

Pleidooi voor kernenergie.

Pleidooi voor kernenergie

Patrick Van Esch

Inhoudsopgave.

Pleidooi voor kernenergie.....	1
Hoofdstuk 1 Inleiding.....	9
1.1 Motivering.....	9
1.2 Oorzaken van de maatschappelijke perceptie van kernenergie.....	12
1.2.a De Groenen, het klimaat en kernenergie.....	12
1.2.b De historisch duistere oorsprong van kernenergie.....	19
1.3 Plan van deze tekst.....	22
Hoofdstuk 2 Kernenergie: basisbegrippen.....	24
2.1 Enkele elementen uit de natuurkunde: atomen, moleculen, nucliden.....	24
2.1.a Atoombouw.....	24
2.1.b Bindingsenergieën en atoom massa's.....	30
2.1.c Radioactiviteit.....	33
2.1.d Nucleaire reacties en hun beschrijving.....	34
2.2 Ioniserende straling in materie: principes.....	41
2.2.a Interactie van gamma straling met materie.....	42
2.2.b Interactie van snelle elektronen met de materie.....	46
2.2.c Interactie van alfadeeltjes met de materie	48
2.2.d Interactie van protonen met materie.....	50
2.2.e Interactie van andere zware geladen deeltjes (nucliden) met materie.....	50
2.2.f Interactie van neutronen met materie.....	50
2.3 Basisprincipes van een kernreactor.....	51
2.3.a Splitsing en de kettingreactie.....	51
2.3.b Moderatoren.....	52
2.3.c Water als moderator en verrijking.....	54
2.3.d Brandstof evolutie in een water reactor.....	55
2.3.e Brandstof cycli en afval – kweekreactoren.....	56
2.3.f Recyclage in water reactoren.....	60
2.4 Soorten kernreactoren.....	60
2.4.a Druk water reactoren.....	61
2.4.b Kokend-water reactoren.....	62
2.4.c Zwaar water reactoren.....	62

2.4.d	Grafiet reactoren met koelwater.....	62
2.4.e	Grafiet-gas reactoren.....	63
2.4.f	Vloeibare metaal reactoren.....	63
2.4.g	Geavanceerde concepten en toekomstvisie.....	64
2.5	Thermische opwekking van elektriciteit.....	66
2.5.a	Enkele basisbegrippen uit de thermodynamica.....	66
2.5.b	Stoom cyclus.....	71
2.5.c	Koeltorens.....	74
Hoofdstuk 3	Stralingsbescherming en veiligheid.....	77
3.1	Inleiding: risico's en gevaren.....	77
3.1.a	Kansen.....	77
3.1.b	Risico's.....	79
3.2	Biologische celschade door ioniserende straling.....	83
3.2.a	Elementaire cel biologie.....	83
3.2.b	Effecten van chemische verandering in cellen.....	86
3.2.c	Stralingsziekte en stochastische effecten.....	87
3.3	Kwantificeren van stralingsdosissen.....	92
3.3.a	Definities van dosimetrische grootheden: algemeenheden.....	92
3.3.b	Externe en interne blootstelling (bestraling versus contaminatie).....	95
3.3.c	Dosimetrische grootheden: vervolg.....	96
3.4	Metten van stralingsdosissen.....	102
3.4.a	Detectie van ioniserende straling: principes.....	102
3.4.b	Meting van specifieke ioniserende stralingen.....	105
3.4.c	Metten van stralingsvelden.....	106
3.4.d	Operationele dosimetrie voor externe bestraling.....	107
3.4.e	Metten van interne contaminatie.....	112
3.5	Wetgeving en organismen.....	115
3.5.a	Internationale organismen.....	115
3.5.b	Principes van de wetgeving i.v.m. stralingsbescherming.....	117
3.5.c	Reglementering in België.....	119
3.5.d	Reglementering in Frankrijk.....	119
3.5.e	Reglementering Nederland.....	120
3.5.f	ALARA – Optimaliseren van de stralingsbescherming.....	120
3.5.g	Ontvangen dosissen in de praktijk.....	124

3.6 Beschermen tegen ioniserende straling.....	125
3.6.a Bescherming tegen externe bestraling.....	126
3.6.b Bescherming tegen contaminatie.....	130
3.7 Ongelukken.....	131
3.7.a Algemeenheden – de INES schaal.....	131
3.7.b Chernobyl (1986).....	135
3.7.c Het Three Miles Island ongeluk (1979).....	142
3.7.d Het Tokai-Mura ongeluk (1999).....	145
3.7.e Het SL-1 ongeluk (1961).....	146
3.7.f Het Windscale ongeluk (1957).....	147
3.7.g Doden en ongelukken bij andere menselijke activiteiten.....	149
3.8 Reactor veiligheid.....	154
3.8.a Bronnen van gevaar.....	154
3.8.b Veiligheidsanalyse.....	156
3.8.c Veiligheidsprincipes.....	158
3.8.d Typische fout-toestanden.....	159
3.8.e Passieve veiligheid.....	160
Hoofdstuk 4 Stralingstransport – neutronica.....	162
4.1 Wat is stralingstransport ?.....	162
4.1.a Motivering.....	162
4.1.b Inleidende concepten: grootheden.....	163
4.1.c Inleidende concepten: natuurwetten.....	169
4.2 Radioactief verval en nucliden productie.....	174
4.2.a Radioactieve vervalketens.....	174
4.2.b Nuclidenproductie in een (gekend) stralingsveld.....	181
4.3 Stralingsvelden.....	195
4.3.a De wet van Boltzmann.....	195
4.3.b Monte Carlo technieken.....	200
4.4 Reactorfysica en neutronentransport.....	206
4.4.a De vier factoren van Fermi en eenvoudige reactor-kinetica.....	206
4.4.b Neutronen diffusie.....	213
4.4.c Vertraging van neutronen.....	219
4.4.d Heterogene reactor structuur.....	228
4.4.e Thermalisatie.....	230

4.4.f De 4 factoren van Fermi, epiloog.....	233
4.4.g Verband tussen neutrontransport en passieve veiligheid.....	235
4.4.h Kernwapens.....	237
Hoofdstuk 5 De druk-water reactor.....	241
5.1 Overzicht.....	241
5.1.a Algemene bouw van een kerncentrale.....	241
5.1.b Overzicht van het functioneren van de centrale.....	243
5.2 Het primaire circuit.....	245
5.2.a Hart van een drukwater reactor.....	245
5.2.b Het reactorvat.....	246
5.2.c De primaire pompen.....	247
5.2.d De stoomgeneratoren.....	247
5.2.e De drukgenerator.....	248
5.2.f Waterbehandeling.....	249
5.2.g Noodsystemen.....	250
5.3 Werkingsmoden van een kerncentrale.....	252
5.3.a Elektriciteitsproductie.....	252
5.3.b Eiland mode.....	255
5.3.c Stop-toestanden.....	256
5.3.d Opstarten van een koude reactor.....	256
Hoofdstuk 6 Nucleaire brandstof en afval.....	258
6.1 Inleiding: brandstof en brandstof cycli.....	258
6.1.a Welke brandstoffen ?.....	258
6.1.b Brandstof “cycli”.....	260
6.1.c Begin en einde van de brandstofcycli.....	261
6.1.d Scheikunde van uranium en actiniden.....	264
6.2 Begin van de cyclus.....	266
6.2.a Mijnbouw en conditionering van uranium.....	266
6.2.b Verrijking van uranium.....	269
6.2.c Brandstof elementen: huidige situatie.....	273
6.3 Huidige brandstofcycli met drukwater reactoren.....	275
6.3.a Gebruik van verse brandstof.....	275
6.3.b Verwerking van een brandstofelement.....	277
6.3.c Het PUREX proces.....	280

6.3.d	Transport van de nucleaire materialen.....	282
6.3.e	Uranium recyclage.....	283
6.3.f	Plutonium recyclage.....	284
6.3.g	Sluiten van de brandstofcyclus.....	286
6.4	Einde van de cyclus: afvalbehandeling.....	287
6.4.a	Soorten nucleair afval.....	287
6.4.b	Het afval van het einde van de cyclus.....	289
6.4.c	Geologische berging.....	296
6.5	Ontwikkelingen en toekomst.....	300
6.5.a	Reactoren met snel spectrum.....	301
6.5.b	Versneller aangedreven systemen (ADS).....	305
6.5.c	Herwerkingsprocessen.....	307
Hoofdstuk 7	Materialen.....	311
7.1	Heel korte inleiding tot de materiaalwetenschappen.....	311
7.1.a	Soorten vaste stoffen: kristallen.....	311
7.1.b	Polykristallijne materialen, kristalfouten.....	312
7.1.c	Mechanische eigenschappen van materialen.....	314
7.1.d	Staalsoorten.....	316
7.2	Stralingsschade in metalen.....	319
7.2.a	Algemeenheden.....	319
7.2.b	Toepassing: levensduur van het drukvat van een drukwater reactor.....	321
7.2.c	Toepassing: zirkonium legeringen.....	324
7.2.d	Toepassing: in-core staalsoorten.....	326
7.3	Brandstof.....	327
7.3.a	Brandstofelementen in drukwater reactoren.....	327
7.3.b	Brandstofelementen in natrium-gekoelde snelle reactoren.....	329
Hoofdstuk 8	Alternatieve energiebronnen.....	331
8.1	Inleiding.....	331
8.1.a	Alternatieven of kernenergie, of alternatieven, waaronder kernenergie ?.....	331
8.1.b	Perspectieven voor de komende decennia in Europa.....	332
8.2	Zonne-energie.....	334
8.2.a	Fotovoltaïsche omzetting.....	335
8.2.b	Thermische zonne-energie.....	337
8.3	Wind energie.....	337

8.4 Bio-brandstoffen.....	340
8.5 CO2 sekwestratie.....	341
8.6 Kernfusie.....	342
8.6.a Wat is kernfusie ?.....	342
8.6.b Onderzoek.....	344
8.6.c Praktisch.....	344
8.7 Besluit.....	344
8.8 Uitdaging!.....	348
Hoofdstuk 9 Argumenten tegen kernenergie.....	349
9.1 Inleiding.....	349
9.2 De 40 redenen tegen nucleaire energie van de Europese Groenen.....	349
9.3 Altijd bijna zware ongelukken zonder gevolgen.....	360
9.3.a Greenpeace's lijst van nucleaire 'ongelukken'.....	360
9.3.b Het “residual risk” rapport.....	362
9.4 Echte argumenten tegen kernenergie.....	365
Hoofdstuk 10 Besluit.....	367
Appendix A: Eenheden.....	369
Het SI systeem van eenheden.....	369
Energie-eenheden.....	371
Microscopische massa eenheden en energie eenheden.....	372
Appendix B: sommen, integralen en al dat.....	373
Sommen.....	373
Integralen.....	374
Dichtheden.....	375
Meerdere dimensies.....	376
Appendix C: SciLab rekenprogramma.....	378
Hoe Scilab bekomen ?.....	378
Wat is Scilab ?.....	378
Monte Carlo programma.....	382
Actiniden activiteit in nucleair afval.....	388
Appendix D: Bibliografie.....	391
Technische en wetenschappelijke werken.....	391
Algemene, polemische en geschiedkundige werken.....	391

Hoofdstuk 1 Inleiding.

1.1 Motivering.

Met deze tekst wil ik een steentje bijdragen in het energie-debat, want ik ben de mening toegedaan dat men in het algemeen een totaal verkeerd beeld heeft van kernenergie. Er wordt over kernenergie zoveel onzin verteld dat ik het de moeite waard vond om *een poging te ondernemen om wetenschappelijk juiste informatie te toetsen aan verschillende totaal foute beweringen* die nochtans gemeengoed zijn geworden.

Toen ik mijn manuscript aan een vriend liet nalezen, was zijn commentaar: “Dat is een dun pleidooi, en een dik leerboek!” Wel ja, ik ben de mening toegedaan dat het beste pleidooi voor kernenergie erin bestaat om gewoon meer kennis erover aan de man te brengen. De argumenten spreken dan als het ware voor zichzelf – dat is mijn overtuiging.

Het is mijn bedoeling om aan te tonen dat kernenergie een volledig aanvaardbare menselijke activiteit is en dat de eventuele problemen ervan objectief gesproken veel kleiner zijn dan wat algemeen gedacht wordt en actief verkondigd wordt door bepaalde ideologische drukkingsgroepen. Enkele van de meest gehoorde kritieken omtrent kernenergie zijn de volgende:

- *Autorijden is gevaarlijk.* We zullen aantonen dat kernenergie duizenden keren minder gevaarlijk is dan autorijden. Om dat te begrijpen, zal het nodig zijn zowel de historische achtergrond (empirische “metingen” van het gevaar) als de risicoanalyses te bestuderen.
- *Steenkoolcentrales bestralen hun omgeving.* De dosis waar het publiek aan blootgesteld is ten gevolge van de kernenergieactiviteiten is veel lager dan de natuurlijke achtergrond. Ze is ook veel lager dan hun blootstelling voor medische diagnose. Minder bekend is dat steenkoolcentrales meer radioactiviteit in het milieu brengen dan kerncentrales! Als steenkoolcentrales dezelfde radiologische normen als kerncentrales zouden moeten respecteren, dan zouden ze gewoon nooit mogen werken! Om dat argument goed te begrijpen, dienen we het een en het ander over stralingsbescherming te leren.
- *Windenergie is milieu-onvriendelijk.* De milieuimpact van kernenergie is per geproduceerde kilowattuur (vervuiling, gebruik van landoppervlak,...) een van de laagste van alle grootschalige technologieën. Dat komt doordat kerncentrales compacte eenheden zijn, en de hoeveelheid benodigde brandstof duizenden keren kleiner is dan in het geval van fossiele centrales. Een heel belangrijk argument is dat kernenergie voor een heel lage CO₂-uitstoot zorgt. Op dat vlak is kernenergie vergelijkbaar met hydro-elektriciteit en doet het iets beter dan windenergie.
- *Kernafval kan goed geborgen worden.* Men denkt soms dat er een “onoplosbaar” probleem is met kernafval. Dat is een aperte misvatting, want er bestaat wel degelijk een heel goed bestudeerde oplossing: diepe geologische berging. Maar om dat goed te begrijpen, dienen we meer te leren over de complete brandstofcyclus en de samenstelling van het afval.
- *We hebben nog voldoende nucleaire brandstof voor een paar duizend jaar.* Het kan waar zijn dat er geen goedkoop vers uranium meer is binnen 60 – 100 jaar. Maar dan houdt men wel geen rekening met het feit dat we slechts ongeveer 1 % van de beschikbare energie hebben gehaald uit het huidige “afgewerkte” uranium. Bovendien weten we heel goed hoe

we de overige 99 % eruit kunnen halen, namelijk met “kweekreactoren”. Met andere woorden, uit het huidige “afval” kan nog ongeveer 100 keer meer energie worden gehaald dan er reeds werd uitgehaald. In wat tot nu toe als “afval” werd verwijderd, zit dus nog voldoende energie voor vele duizenden jaren.

- *Met kernenergie kan België eindelijk kernwapens bouwen om Nederland aan te vallen.* Hoewel dat niet totaal fout is, zit de zaak toch wel wat ingewikkelder in elkaar. Het materiaal dat aanwezig is in de brandstofcyclus van kerncentrales kan niet zomaar gebruikt worden om kernwapens te maken. Het is wel waar dat sommige technologieën die gebruikt worden in de brandstofcyclus kunnen misbruikt worden, en het is ook juist dat bepaalde fasen van de brandstofherwerking materialen bevatten die men als basisstoffen kan gaan gebruiken voor een verdere verwerking tot bom materialen. Maar er zijn directer paden naar bom materiaal en in elk geval vereist de verdere transformatie nog een heel belangrijke infrastructuur. Het is dan ook erg onwaarschijnlijk dat een groep of een natie die kernwapens wil maken, dat zou doen met gestolen nucleair materiaal, hoewel men de mogelijkheid niet kan uitsluiten – het is echter nog nooit gebeurd. Bovendien stelt de vraag zich niet echt voor landen, die ofwel reeds kernwapens bezitten, ofwel nooit de ambitie hebben gehad om zulke wapens te bouwen (België of Nederland bijvoorbeeld).
- *Zonne- en windenergie zijn beter, want die zijn hernieuwbaar.* Hoewel deze energievormen veelbelovend zijn, hebben ze duidelijke beperkingen waardoor het onmogelijk is om ze nu of in de nabije toekomst als hoofdbron voor elektriciteitsproductie te gebruiken. Enerzijds is er de variabiliteit (dag/nacht, zomer/winter, wind/geen wind) die maakt dat er een (fossiele?) noodproductiecapaciteit voorhanden moet zijn die groter is dan het hernieuwbare aanbod. Anderzijds zijn er de enorm grote investeringen in terreinen en installaties. Het belang van deze energieproductiemethodes mag zeker niet genegeerd worden. Maar het zou een strategische fout zijn om ze te gebruiken om kernenergie te vervangen, gezien ze niet dezelfde functionaliteit aan de dag kunnen leggen in de huidige stand van de technologie. Ze vormen wel een aanvaardbaar alternatief voor een fractie van het gebruik van fossiele brandstoffen. Men mag hun bruikbaarheid zeker niet overschatten, want dat houdt het risico in dat men uiteindelijk ertoe overgaat kerncentrales door fossiele centrales te vervangen, met daarnaast een enkele beperkte “alternatieven”, zoals op dit ogenblik in Duitsland gebeurt.

Er zijn nog vele andere gangbare argumenten tegen kernenergie – we zullen vele ervan in dit werk bespreken. Met voldoende kennis ter zake zal men inzien dat de meeste, zonet alle argumenten op foutieve kennis steunen. Dat wil niet zeggen dat er geen geldige argumenten zijn om een andere energiebron boven kernenergie te verkiezen, maar de meeste die ik al gehoord of gelezen heb zijn gewoon fout of een gebaseerd op een scheefgetrokken beeld.

Ik beweer niet dat kernenergie de beste of enige energiekeuze is, maar wel dat het een zinvolle optie is, en op ecologisch vlak zeker veel zinvoller dan het blijven gebruiken van fossiele brandstoffen. Een gedetailleerde analyse van de realistische opties toont trouwens aan dat er op dit ogenblik geen technologieën bestaan die kunnen aantonen van *een betrouwbare hoofdbron* van elektriciteit te leveren met de ecologische en economische voordelen van kernenergie. *Kernenergie a priori (om ideologische redenen) als mogelijke optie verwerpen zal bijgevolg zowel op economisch als ecologisch vlak tot veel hogere kosten leiden.*

Even mezelf voorstellen. Ik ben een wetenschapper (ingenieur en natuurkundige) met jaren ervaring in verschillende domeinen, waaronder de nucleaire sector waarin ikzelf op dit ogenblik actief ben. Voor men mij beschuldigt van partijdigheid, ik werk in Frankrijk, in een internationaal instituut waar men aan materiaalonderzoek doet (dat niets met kernenergie heeft te maken) en waar

men hierbij stralingsdetectoren gebruikt. Mijn instituut gebruikt een kleine kernreactor om die straling op te wekken. Ik ben gespecialiseerd in het ontwerpen van dergelijke stralingsdetectoren en de erbij horende elektronica en sta ook in voor de gegevensverwerking. *Het moge duidelijk zijn dat ik in het geheel niets te maken heb met de industriële sector van de kernenergie. Maar anderzijds ben ik toch voldoende bekend met de materie om de wetenschappelijke en technologische kant relatief goed te kennen.* Ik heb geen financiële of andere banden met de kernenergiesector, maar ik heb uit persoonlijke interesse cursussen gevolgd/bestudeerd over de sector, in het land (Frankrijk) dat op het vlak van kernenergie aan de wereldtop staat. Ik heb absoluut niets te maken met de kernenergie- of andere energiesectoren in België of Nederland. Mijn loon wordt betaald door de Franse, Britse en Duitse belastingbetaler uit wetenschappelijke fondsen voor werk dat niets te maken heeft met kernenergie.

Ik erger mij reeds een tijdje aan de verspreiding van wetenschappelijk verkeerde informatie, maar de concrete aanleiding voor dit schrijven vormden de Belgische verkiezingen van 10 juni 2007. Ik woon reeds jaren niet meer in België, maar werd uitgenodigd mijn stem uit te brengen. Daarom vond ik dat ik mij een beetje diende te interesseren voor het politieke gebeuren van de laatste jaren, maar tot mijn verbijstering stelde ik vast dat België - na Frankrijk het land waar de meeste elektriciteit verhoudingsgewijs met kernenergie wordt geproduceerd - door toedoen van de Groene partij beslist had om uit kernenergie te stappen. Ik heb me voorgenomen om trachten uit te leggen *waarom* kernenergie een heel goede keuze was, en waarom de argumenten die tot die uitstap hebben aangezet grotendeels fout zijn, door mij trachten zo veel mogelijk aan een wetenschappelijk gefundeerde argumentatie te houden, die niettemin begrijpelijk dient te zijn voor de medeburger. De bedoeling is dat de lezer zelf zijn eigen oordeel kan vormen en zelf kan begrijpen wat er precies gaande is – ik denk dat de zaken dan voor zichzelf spreken. Maar natuurlijk vereist dit een zekere wetenschappelijke voorkennis. Ik heb mij daarom ter opgave gesteld een zo precies en gedetailleerd mogelijke uiteenzetting te schrijven over het kernenergie gebeuren, dat niettemin leesbaar moet zijn voor de geïnteresseerde burger.

Ik denk dat met een algemeen humanioraniveau van wetenschappelijke kennis en wat goede wil, het mogelijk moet zijn om deze tekst te lezen en te begrijpen. Dat zou de middenweg moeten zijn om enerzijds toe te laten een argumentatie van enige wetenschappelijke inhoud door te kunnen voeren, en anderzijds de toegankelijkheid voor het publiek niet te sterk te beperken.

Ik heb ook getracht om zo vaak mogelijk referenties te gebruiken die via het internet vrij beschikbaar zijn. Zo verwijs ik vaak naar sites van officiële instanties voor rapporten of experimentele gegevens, die trouwens ook door professionelen in de sector geraadpleegd worden en naar artikelen op de Engels-, Frans- en Nederlandstalige Wikipediastite, die over het algemeen van een goed wetenschappelijk niveau zijn. Ik hoop dat ik daarmee voldoende toegankelijkheid van de bronnen en transparantie in de argumenten bereik. Naar klassieke referenties zoals boeken verwijs ik slechts sporadisch. Aangezien artikelen in de wetenschappelijke literatuur enkel in gespecialiseerde bibliotheken geraadpleegd kunnen worden en vaak ook moeilijker zijn, verwijs ik daar niet naar. Ik heb, wanneer dat niet anders kon, echter soms ook gebruik gemaakt van informatie waarvoor niet dadelijk een publiekelijk toegankelijke bron voorhanden is.

In de tekst komen ook relatief eenvoudige berekeningen en formules voor, die het niveau van een leerling van het laatste jaar van de humaniora niet overstijgen. Sommige delen zijn wat technischer, en op bepaalde ogenblikken geef ik zelfs kleine programmaatjes die met behulp van een vrij beschikbaar wiskundepakket (Scilab) uitgevoerd kunnen worden. Het spreekt vanzelf dat de lezer die niet erg technisch geïnteresseerd is, die items kan overslaan. Ik vond het gewoon interessant om aan te tonen dat men, met relatief eenvoudige middelen – die bovendien vrij beschikbaar zijn -

berekeningen kan maken die interessante aspecten van de kernenergietechnologie kwalitatief en soms zelfs kwantitatief goed beschrijven. Voor hen die er de moed toe hebben, denk ik dat het een heel leerrijke bezigheid kan zijn om “de mouwen op te stropen en de handen vuil te maken”. Heel veel mooie ideeën sneuvelen na berekening op de hoek van een stuk kladpapier. *De argumentatiekracht van een berekening is onovertroffen.*

1.2 Oorzaken van de maatschappelijke perceptie van kernenergie

Maar eerst maken we een kleine maatschappelijk-politieke analyse van de toch wel eigenaardige vaststelling dat een rationeel wetenschappelijke benadering in principe tot een pro kernenergiestellingname leidt, terwijl er een uitgesproken maatschappelijke tendens contra kernenergie bestaat. Hoe kan dat? Hoe is het mogelijk dat die sterke maatschappelijke tendens haaks staat op de wetenschappelijk rationele benadering? Persoonlijk denk ik dat er twee facetten zijn aan deze tweedeling. Eén facet is de Groene ideologie; het andere de duistere origine van kernenergie. In dit deeltje ga ik natuurlijk afwijken van mijn voornemen om “louter technisch en wetenschappelijk” te argumenteren. U bent gewaarschuwd, dit is een opiniestukje van mijn hand.

1.2.a De Groenen, het klimaat en kernenergie

Als een gevolg op de studentenbeweging van '68 is er een Groene beweging ontstaan¹ met een eigen ideologie. De fundamentele vijand van de samenleving is volgens deze visie het zogenaamde aardverkrachtende militair-industriële complex, en het voorbeeld bij uitstek daarvan is de nucleaire sector². Verschillende aspecten van kernenergie waren uiterst bruikbaar als elementen van een samenzweringstheorie: *duistere wetenschappers die in functie van het militair-industriële complex geheime dingen deden die het daglicht niet mochten zien, en propaganda die dat probeerde te verkopen als een weldaad voor de maatschappij*. We zullen zien dat zoiets wel enige grond van waarheid bevatte, vooral in de jaren '50 en '60 en soms ook nog wel later (zelfs tot op heden in sommige landen). Louter absoluut gezien is het ecologisch gesproken natuurlijk beter dat er geen nucleaire activiteiten plaatsvinden dan wel. Nucleaire activiteiten kunnen natuurlijk ecologische (en maatschappelijke) nadelen hebben. Het is hier dat er een fusie is ontstaan tussen “Groen” (in de ruime zin van het woord, van politieke partijen tot milieu-activisten) en “anti-nucleair”. De nucleaire activiteiten waren de schoolvoorbeelden van de waanzinnige mens die leerling tovernaar speelde met krachten die hem te boven gingen, en dat dan nog wel om soms heel twijfelachtige redenen van militair of nationaal prestige, grootschaligheidswaanzin en machtsposities.

Ondertussen is de ecologische beweging veel meer maatschappelijk geïntegreerd geraakt: het gaat hem niet zo vaak meer over zonderlingen met geitenwollen sokken, maar om een (a priori positief) maatschappelijk fenomeen: *de mensen zijn zich in het algemeen bewust geworden dat je niet eender wat met het milieu doet zonder dat zoiets gevolgen heeft, op korte of lange termijn*. Maar bepaalde basisdogma's zijn overeind gebleven. De afkeer van kernenergie is zo sterk geïntegreerd in het weefsel van de Groene bewegingen *dat het ideologisch onmogelijk is om binnen het kader van een Groengekleurde politiek objectief naar de voor- en nadelen van die technologie te kijken*. Kernenergie was een ideologische vijand, en kan niet meer gezien worden als een technologie met

1 http://en.wikipedia.org/wiki/Ecological_movements

2 http://en.wikipedia.org/wiki/Anti-nuclear_movement

voor- en nadelen waarvan men de aanwending in het kader van een bepaalde problematiek kan vergelijken met andere technologieën om naar de beste oplossing te zoeken.

De gebeurtenissen van 1986 waren koren op de molen van veel anti-nucleairen. In een totaal ontwricht communistisch land hadden een paar idioten er niet beter op gevonden dan eens te proberen een gevaarlijke kernreactor over zijn limieten te duwen, en daar waren ze wonderwel in geslaagd:— na één voor één alle koel- en veiligheidssystemen te hebben uitgeschakeld gebeurde wat er moest gebeuren. Het “zie-je-nu-wel-waartoe-die-criminelen-in-staat-zijn” argument was geboren. De belofte dat “het nooit fout zou kunnen gaan” was tegengesproken door de feiten. Dat het in feite om een intrinsiek gevaarlijk reactortype ging dat eigenlijk ontworpen was voor de productie van kernwapens, maar ook elektriciteit produceerde, werd er uiteraard niet bij verteld, en evenmin dat dergelijke reactoren in niets met westerse reactoren kunnen worden vergeleken. De zorgvuldig opgebouwde angst/samenzweringpsychose die al 15 jaar heerste, deed haar werk: de publieke opinie raakte er in één klap van overtuigd dat “kernenergie” vies was, anti-ecologisch, gevaarlijk en enkel diende om een soort obscuur militair-industrieel complex te dienen. Verschillende naties besloten onder druk van de publieke opinie om kernenergie stilaan uit te faseren. Andere, die tot dan toe hadden overwogen om ook op de kernenergietrein te springen, aarzelden.

Maar een ander probleem daagde in diezelfde periode op: zorgvuldige metingen toonden stilaan aan dat het klimaat warmer werd. Hoewel het niet 100% zeker is, is er een aanwijzing van klimaatverandering en zijn er aanwijzingen dat het de menselijke CO₂ productie is die op zijn minst gedeeltelijk verantwoordelijk is voor de opwarming van het klimaat. In de mate dat die hypothesen juist zijn, *moet de mensheid in zijn geheel zijn CO₂ uitstoot met een factor 2 a 4 verminderen tegen het midden van de 21ste eeuw* om tot een gestabiliseerd atmosferisch CO₂ niveau te komen en als dusdanig mogelijk zware problemen binnen 100-200 jaar te vermijden. 10% winnen haalt op zich niets uit, het stelt gewoon het bereikte niveau uit met 5 – 10 jaar. Ofwel is deze hypothese juist, en moeten we alle middelen die we hebben aanwenden om onze CO₂ uitstoot drastisch te verminderen, ofwel is ze fout, in welk geval we ons geen zorgen moeten maken over onze CO₂ uitstoot. Maar in alle geval zijn “kleine verminderingen” zinloos. We dienen echter in het oog te houden wat er precies bedreigd wordt met een mogelijke klimaatsverandering. Het is niet het overleven van het menselijke ras, nog minder het voortbestaan van het leven op aarde dat bedreigd wordt. Het is onze moderne beschaving en onze levensstandaard die bedreigd wordt, en hierbij de levenskwaliteit (en het leven) van miljarden mensen. Het is bijgevolg zinloos om trachten die gevolgen tegen te gaan met middelen die zelf ook onze levensstandaard bedreigen.

In feite is het vraagstuk gecompliceerder dan enkel maar CO₂ productie door verbruik van fossiele brandstoffen: het gaat hem om een hele familie broeikasgassen, zoals methaan, stikstof oxide, en effecten zoals ontbossing en zo. Maar 55% van het vermoedde broeikaseffect komt van CO₂ productie door verbruik van fossiele brandstoffen en is dus de hoofdbijdrage. Het bestrijden van het broeikas effect dient dus in de eerste plaats het verbruik van fossiele brandstoffen en hun bijhorende CO₂ productie aan te pakken.

Kernenergie produceert heel weinig CO₂. De centrales zelf produceren zo goed als geen CO₂, en de hele cyclus (bouw van de centrale, brandstofcyclus...) produceert heden ten dage, per uiteindelijk geleverde hoeveelheid elektriciteit, slechts van de orde van 6-20 g per KWuur elektriciteit³. Zelfs als men heel pessimistische scenarios van mijnbouw en zo gaat beschouwen komt men ten hoogste

³<http://www.computare.org/Support%20documents/Publications/Life%20Cycle.htm> of ook <http://www.uic.com.au/ComparativeCO2.htm>

aan 29 g/KWh. Een steenkoolcentrale produceert ongeveer 1000 g/KWh en de beste gascentrales doen het met 500 g/KWh. *Dat wil zeggen dat heden ten dage, kernenergie het zelfs in de meest pessimistische maar realistische scenario's het 30 keer beter doet dan steenkool wat CO₂ uitstoot betreft.* Maar op middellange termijn gaat het kernenergie gebeuren overschakelen op de gesloten brandstofcyclus met de reactoren van de vierde generatie, en dan valt normaal gezien elke nood aan mijnontginning weg, de voornaamste bron van CO₂ productie in de hele cyclus.

Sommige anti-nucleaire activisten komen voor de dag met irrealistisch hoge getallen. Er zijn zelfs twee Nederlanders die een studie hebben gemaakt in opdracht van anti-nucleaire drukkinggroepen die "aantoon" dat in de "toekomst" kernenergie wel zoveel als een derde van de CO₂ uitstoot van een hedendaagse gascentrale zou kunnen uitstoten (dus rond de 160 g per geleverde KWuur). Hoewel die analyse fout⁴ is, wil dat zeggen dat in de meest irrealistische situaties die de anti-nucleaire lobby kan bedenken, kernenergie nog altijd de CO₂ uitstoot met een factor 6 vermindert ten opzichte van hedendaagse steenkoolcentrales die de meerderheid van de productie vormen. Een factor 6 winst in CO₂ uitstoot is een fantastisch goed resultaat! Zelfs als men de waarheid heel veel geweld aandoet, *moet men toegeven dat kernenergie a priori serieus kan helpen bij het reduceren van de CO₂ uitstoot.*

Hoe efficiënt is kernenergie in werkelijkheid bij de bestrijding van de CO₂ uitstoot? We gaan hier geen heel gedetailleerde analyse maken, maar laten we naar "experimentele" resultaten kijken: de eigenlijke CO₂ uitstoot voor verschillende landen⁵. Er zijn twee intelligente manieren om naar de CO₂ "efficiëntie" van een land te kijken: dat is per inwoner, en dat is per eenheid van bruto nationaal product. Vooral dat laatste is van belang: het geeft aan hoe men erin is geslaagd om *economisch welzijn te combineren met lage CO₂ uitstoot.* Een klein tabelletje voor de energiegebonden uitstoot in 2002:

Land	Totaal (miljoen ton C per jaar) ⁶	ton C per inwoner per jaar	Kg C per dollar BNP (1995 dollar)
USA	1542	5.36	0.168
China	902	0.7	0.168
Japan	329	2.58	0.108

Een interessante compilatie van studies kan gevonden worden op: <http://lightbucket.wordpress.com/2008/02/20/carbon-emissions-from-electricity-generation-the-numbers/> Het is een compilatie van verschillende wetenschappelijke studies, en we vinden grosso-modo: 900 g/KW-uur voor steenkool, 450 g/KW-uur voor gas, 60 g/KW-uur voor zonnepanelen, 15 g/KW-uur voor kernenergie, wind en waterkracht.

⁴ Deze studie is gedetailleerd weerlegd, maar er is een indirect bewijs van dat irrealisme. Een kg uranium (natuurlijk U) kost minder dan \$180,-. Met de huidige technologie halen we uit een kg uranium evenveel energie als uit 10000 kg petroleum. Als 1/6 van die hoeveelheid petroleum zou gebruikt worden om die ene kg te delven (wat overeenkomt met de beweerde 1/6 uitstoot), dan wil dat zeggen dat men 1600 kg petroleum gebruikt om 1kg uranium te produceren. Dat zijn 10 barrils aan \$100,- elk. Onze mijnbouwer geeft dus \$1000,- uit aan petroleum om 1 kg uranium te produceren die hij verkoopt voor \$180,-...

⁵http://fr.wikipedia.org/wiki/Rejets_de_CO2 en <http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/facteur4-comprehension.htm>

⁶ De gegevens hier zijn in ton C. Men vindt soms ook de uitstoot in ton CO₂. Een molecule CO₂ weegt 44 atoom massa eenheden, terwijl de C alleen 12 atoom massa eenheden weegt. Men moet de getallen in de tabel dus met 44/12 = 3.67 vermenigvuldigen om de massa's (ton, kg) in CO₂ terug te vinden.

Duitsland	228	2.77	0.118
UK	144	2.44	0.108
Frankrijk	103	1.68	0.071
Europa (15)	875	2.29	0.100
Wereld	6573	1.06	0.151

Zoals we zien *stoot men in Frankrijk (het enige volledig genucleariseerde land ter wereld) per inwoner 25% minder CO₂ uit dan gemiddeld in Europa, en vooral, stoot men in Frankrijk minder dan half zoveel CO₂ uit per eenheid van economische activiteit dan in de rest van de wereld.*

Met andere woorden, de (droom) doelstellingen die men zich in de rest van Europa en van de wereld stelt qua CO₂ uitstoot (Kyoto: 8% vermindering van de CO₂ uitstoot in 2012), en die men niet gaat halen, zijn reeds allang bereikt en voorbijgestoken in Frankrijk sinds 20 jaar.

Natuurlijk zijn er verschillende factoren die een rol spelen in deze cijfers: bevolkingsdichtheid, klimaat, speciale rijkdommen die maken dat het BNP artificieel hoog of laag is... maar het geeft toch wel een serieuze aanwijzing. Slechts 3 andere “rijke” landen doen het een heel klein beetje beter dan Frankrijk, wat betreft de uitstoot per BNP: IJsland, Zweden en Zwitserland: Zwitserland en Zweden hebben een combinatie van kernenergie en waterkracht centrales die bijna hun volledige elektriciteitsproductie verzorgt. De elektriciteitsproductie is er dus, net zoals in Frankrijk, zo goed als CO₂-vrij. Het is wel zo dat Zweden en Zwitserland een uiterst geschikte geografie hebben om waterkracht ten volle te benutten. IJsland loopt essentieel op geothermische energie, dank zij zijn speciale ligging op de Midden-Atlantische scheidingslijn (het is het enige land in de wereld dat op een oceaanscheidingslijn ligt!).

Is elektriciteit dan zo belangrijk? In de Verenigde Staten (cijfers van 2006⁷) *is van de totale CO₂ uitstoot ten gevolge van gebruik van fossiele brandstoffen, 40% afkomstig van de elektriciteitsproductie, 34% van de transport sector en 26% van ander gebruik zoals huisverwarming.* Wereldwijd zijn deze cijfers minder gemakkelijk vast te stellen, maar de elektriciteitsproductie is in de meeste landen de eerste bron van CO₂ uitstoot en moet ergens⁸ tussen de 30% en de 40% van de productie van CO₂ door fossiele brandstoffen liggen.

In tegenstelling tot wat soms beweerd wordt (we zullen de wetenschappelijke reden van deze misvatting uitleggen: het heeft te maken met het verschil tussen thermisch en elektrisch vermogen), is elektriciteitsproductie de belangrijkste bron van CO₂ emissies, ver boven de emissies van autoverkeer (die slechts een fractie zijn van de totale transportsector).

⁷ Men vindt tonnen informatie op de site van de International Energy Agency: <http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp> voor de wereld, en Energy Information Administration <http://www.eia.doe.gov/> voor de Verenigde Staten.

⁸ Men kan dat als volgt schatten: wereldwijd is de productie van broeikasgassen door elektriciteit en warmte op 25% gesteld, en hiervan komt 68% van de elektriciteit. Elektriciteit is dus oorzaak van 17% van alle broeikasgassen waarvan 55% van fossiele brandstoffen komen. $17\% / 0.55 = 31\%$. Voor deze gegevens, zie <http://cait.wri.org/figures.php?page=ntn/11-1>.

Gezien het gewicht van de elektriciteitsproductie in de CO₂ emissies, en gezien de spectaculaire resultaten op dat vlak voorgelegd sinds vele jaren door Frankrijk (en Zweden en Zwitserland) dank zij zijn kernenergie, resultaten die andere voorstellen zelfs met veel armzwaaien op papier niet kunnen halen (en zeker nooit in de praktijk) *kan men niet ontkennen dat kernenergie een ongelooflijk efficiënt middel is om hoge levensstandaard en beperkte CO₂ emissies met elkaar in overeenstemming te brengen.*

De ecologisch geïnspireerde bewegingen gingen ten strijde tegen de CO₂ uitstoot: we moeten *bezuinigen*. Dat ligt natuurlijk in de lijn van hun ideologie (hun strijd tegen de “consumptiemaatschappij”). Jammer genoeg zijn *grootschalige* “bezuinigingen” niet gemakkelijk te realiseren. Het is natuurlijk wel juist dat een zeker aantal verspillingen kunnen vermeden worden, maar de enige echte vorm van bezuiniging komt van technologische vooruitgang. De meeste andere vormen hebben vaak geen noemenswaardig effect op de werelduitstoot, gewoon⁹ *omdat ze te duur zijn per ton gespaarde CO₂ uitstoot*. Ze geven ons in het beste geval wel een goed geweten, omdat we een inspanning hebben gedaan, maar het is grotendeels symbolisch. Hetgeen we bijgevolg kunnen besluiten is *dat bezuinigingen niet rekbaar zijn*. Zij zullen niet volstaan om snel de CO₂ uitstoot met een factor 2-4 te verminderen. De enige effectieve grootschalige manier om energie te “bezuinigen” is door energie schaars en dus heel duur te maken, wat een zware economische crisis zou veroorzaken waarvan de gevolgen voor onze levensstandaard erger kunnen zijn dan ten gevolge van de mogelijke klimaatsverandering die we willen bestrijden.

Hoewel bezuinigingen altijd een goed idee zijn als ze economisch en technologisch mogelijk zijn, en ze dan ook spontaan zullen plaatsvinden, ligt het volledige antwoord daar niet. Men dient ook alternatieve vormen van energie-opwekking te voorzien die weinig CO₂ uitstoot veroorzaken, en er zijn natuurlijk op het eerste zicht voor de hand liggende “propere” technieken: wind energie, zonne-energie, bio-brandstoffen,... Nadere analyse van deze technieken toont echter vrij snel aan dat, in de huidige stand van de technologie, zij relatief snel begrensd zijn in het mogelijke aanbod. *Men kan geen realistisch plan voorleggen om, zeg maar, 70% van de elektriciteitsproductie van een land binnen de 15 of 20 jaar op die wijze betrouwbaar te voorzien aan een kleine economische en ecologische kost*. Als dusdanig zal in de afzienbare toekomst de realistische elektriciteitsproductie door alternatieven beperkt blijven tot een minderheidsaandeel ; 25% is zelfs heel optimistisch. Wat moeten we daarmee dan doen ? Moeten we dat aanbod gebruiken om (een deel van) de kernenergie productie te vervangen, of moeten we het gebruiken om een deel van het fossiele brandstofgebruik te verminderen ? Waar ligt het echte ecologische probleem ?

Eén feit is onweerlegbaar: welke technieken men ook zal aanwenden (zonne- en windenergie, bezuinigen...) om het CO₂ -probleem aan te pakken, het probleem zal meer teruggedrongen kunnen worden met dan zonder kernenergie. *Daarom is argumenteren tegen kernenergie synoniem met argumenteren voor meer CO₂ -productie en een hoger verbruik van fossiele brandstoffen*. En hier raken we het hart van wat ik de Groene Paradox noem: door zich systematisch te verzetten tegen kernenergie hebben we misschien een grote troef verloren om een mogelijk veel zwaarder ecologisch probleem helpen aan te pakken.

Natuurlijk is het mogelijk (en de anti-nucleaire beweging vertelt dat reeds sinds decennia) dat *alles* beter is dan kernenergie. Kernenergie betekent misschien een nog grotere ramp voor de mensheid dan drie kwart van de wereldbevolking in de armoede dumpen of een klimaatsverandering veroorzaken. *Maar stel nu even dat kernenergie niet zo problematisch is als hier wordt voorgesteld ?* Begaan we dan geen grote stommitieit ? Een nadere analyse die we in dit boek

⁹lees: “Ecologie, la grande arnaque” van Christian Girondeau

uitvoerig zullen doorvoeren, toont aan dat kernenergie helemaal niet zo “duivels” is als wordt beweerd: het is een totaal aanvaardbare technologie, die zo goed als geen negatieve ecologische impact heeft, economisch functioneert en weinig plaats inneemt in vergelijking met andere grootschalige technologieën. Natuurlijk is het in absolute zin altijd beter om “geen kernenergie” te hebben dan “wel kernenergie”, al de rest gelijk. Op de triviale vraag: “wat is beter: kernafval of geen kernafval ?” volgt natuurlijk het even triviale antwoord “geen kernafval”. Maar de vraag is geen keuze van wel of geen kernenergie, de vraag is: wat is beter, kernenergie, of iets anders ?

De vraag stelt zich namelijk niet zozeer: kernenergie of hernieuwbare bronnen ? Maar wel: kernenergie of fossiele brandstoffen ? Het is enkel in het geval men een plan zou kunnen voorleggen waarbij het grootste deel van de energievoorziening door hernieuwbare bronnen kan voorzien worden, dat men kernenergie als concurrent voor hernieuwbare bronnen kan zien. Zolang het grootste deel van de elektriciteit door fossiele brandstoffen wordt opgewekt, zijn zowel hernieuwbare bronnen als kernenergie eerder samen concurrenten voor fossiele brandstoffen. Zij doen elkaar geen concurrentie aan, zij nemen de plaats in van fossiel.

Geen kernenergie is dus meer fossiele brandstoffen gebruiken. Toch in elk geval in de komende decennia.

Juist die opstelling heeft geleid tot de 'Groene paradox': door zich de laatste 40 jaar met alle macht tegen kernenergie te verzetten en door bijgevolg een verhoogde CO₂ -uitstoot en een groter verbruik van fossiele brandstoffen in de hand te hebben gewerkt, dragen ook de Groenen (in de ruime zin van het woord) een zekere verantwoordelijkheid. Ze hebben de bouw van kerncentrales afgeremd en de publieke opinie ervan overtuigd uit kernenergie te stappen, zonder een ecologisch verantwoord alternatief. Hun moet verweten worden dat ze zich geconcentreerd hebben op het bestrijden van hun ideologische vijand en daarbij nagelaten hebben om te kiezen voor het milieu. Ze hebben zich uitgeput in het ontwikkelen van alternatieven voor kernenergie *waaronder* het gebruik van fossiele brandstoffen terwijl ze eigenlijk hadden moeten zoeken naar alternatieven *voor* fossiele brandstoffen! Jammer genoeg zitten vele Groene bewegingen vast in hun ideologische afkeer voor kernenergie en is het voor hen politiek onmogelijk (of toch heel moeilijk) om zonder gezichtsverlies op dat standpunt terug te komen en tot een rationeler en ecologisch realistischer energieplan te komen.

Wat als het uiteindelijk zou blijken dat die klimaatsverandering minder erg is dan sommige scenario's lijken te voorspellen ? Valt het argument voor kernenergie dan grotendeels weg ? In de eerste plaats valt dan elk dringend argument weg om dure en wispelturige alternatieve energiebronnen te ontwikkelen ; we kunnen alle tijd nemen om te zien hoe die uitwerken. De huidige keuze is dan essentieel tussen de enige fossiele brandstof die we nog in enige overvloed hebben in sommige landen¹⁰ – steenkool – en kernenergie. Beide zijn economisch competitief, hoewel de meeste Europese landen niet (meer) over goedkope steenkool beschikken. Aardgas is gekoppeld aan de oliesector via de transportsector, en zal dus even duur en schaars worden. Steenkool vervuult wat meer, en veroorzaakt ook doden door pollutie (het equivalent van enkele Chernobyls per jaar!). Als we daartoe bereid zijn, en we zijn bereid om van buitenlandse steenkool (of nog erger, van een buitenlandse gaskraan) af te hangen – wat ons natuurlijk geopolitiek bindt – dan kunnen we waarschijnlijk nog voort tot het einde van deze eeuw. Maar vroeg of laat raken de fossiele brandstoffen toch wel op. In vergelijking hiermee lijkt kernenergie me dan toch wel een

¹⁰ Men kan met de geschatte wereldreserves aan huidig verbruik nog ongeveer 150 jaar voort. De grootste reserves bevinden zich in de Verenigde Staten (27%), Rusland (17.3%), China (12.6%), India (10.2%), Australië (8.6%), Zuid-Afrika (5.4%), Oekraïne (3.8%), Kazakstan (1.5%). In Europa hebben enkel Polen en Duitsland enige reserves, die samen 2.2% van de wereldreserve bevatten. Zie <http://en.wikipedia.org/wiki/Coal>

veiligere, economisch stabielere, geopolitiek betere en ecologisch meer verantwoorde keuze, maar de keuze om steenkool te gebruiken en geen kernenergie is ook een mogelijkheid.

Kerncentrales kunnen zonder probleem een belangrijk en zelfs het grootste deel van de elektriciteitsproductie overnemen. Frankrijk is daar het bewijs van: in twintig jaar is de elektriciteitsproductie er haast volledig onafhankelijk geworden van fossiele brandstoffen. 76 tot 78% van de elektriciteit wordt er opgewekt door kernenergie en de rest grotendeels door waterkrachtcentrales. Fossiele brandstoffen worden enkel – beperkt – gebruikt om pieken op te vangen. België was een goede tweede met 56% van de elektriciteitsproductie door kernenergie. Met voldoende kerncentrales zouden we trouwens de overvloedige elektrische energie kunnen gebruiken om ook andere problemen aan te pakken. We denken hierbij aan transport: treinverkeer natuurlijk, en hybride- of zelfs volledig elektrische auto's – hoewel we beseffen dat die oplossingen nog niet voor morgen zijn ; maar tenminste kan de elektrische capaciteit al beschikbaar gemaakt worden. Als we moeten bezuinigen op elektriciteit, hebben we de mogelijkheid gewoon niet om auto's elektrisch te laten rijden.

Door de jaren heen evolueerde de kernenergietechnologie continu. Dankzij die verbeteringen kan het brandstofverbruik mogelijk met een factor 50 tot 100 verminderd worden, en de schadelijkheid van het nucleair afval met een bijna even grote factor verbeterd. Deze ideeën zijn zelfs op pre-industriële schaal uitgewerkt en hun uitvoerbaarheid is aangetoond. Voorlopig echter heeft dat economisch weinig zin, want “vers uranium” uit mijnen is louter economisch gezien voorlopig nog goedkoper dan het herwerken van gebruikte brandstof. Niettemin vonden de wetenschappers en ingenieurs die zich met kernenergie bezighielden het zonde om – zelfs al was er op korte termijn voldoende goedkoop uranium op de markt – die verbruikte brandstof niet te recyclen. De nucleaire industrie had dus het concept van afvalrecyclage bedacht voor Janmetdepot zijn huisvuil ging recyclen. Maar ook voor het nucleaire afval dat niet meer verder gerecycled kan worden, zijn er ecologisch verantwoorde oplossingen. We zullen daar uitgebreid op terugkomen. *Het zijn speciaal tegen al die ecologische verbeteringen van het kernenergie proces dat de Groenen het hevigste, en vaak met succes, geprotesteerd hebben.* Dit is enkel te begrijpen als men totaal van kernenergie technologie, in elke vorm, af wil – wat niets anders kan zijn dan een ideologisch geïnspireerd standpunt, waarbij men *ten alle prijze* wil vermijden dat kernenergie enige toekomst zou kunnen hebben.

Voor wie denkt dat ik overdrijf, zie hier een citaat van Amory Lovins, een van de leidende figuren van de anti-nucleaire beweging: *“If you ask me, it'd be a little short of disastrous for us to discover a source of clean, cheap, abundant energy because of what we would do with it. We ought to be looking for energy sources that are adequate for our needs, but that won't give us the excesses of concentrated energy with which we could do mischief to the earth or to each other.”* (bron: *The Mother Earth - Plowboy Interview, Nov/Dec 1977, p. 22*) ; vrij vertaald: *Als U het mij vraagt, zou het voor ons niets minder dan een ramp zijn mochten we een bron van schone, goedkope energie in overvloed ontdekken, want wat zouden we daar mee doen ? We moeten een bron vinden die net goed genoeg is voor onze noden, maar die ons geen overvloed geeft in geconcentreerde vorm, waar we enkel maar slechte dingen mee zouden doen, voor de aarde of voor onszelf.*

We kunnen alleen maar betreuren dat vele ecologische bewegingen om historische redenen vastzitten in een ideologische strijd tegen kernenergie, en in de politieke onmogelijkheid verkeren om de technologie op een rationele wijze in beschouwing te nemen. Hoewel men die initiële afkeer wel ergens kan begrijpen, is de situatie ondertussen veranderd, en is kernenergie geëvolueerd van een verdacht spelletje tussen machtswellustelingen tot een technologie die eventueel kan helpen bij het oplossen van een (deels ecologisch) probleem. Dat leidt hen tot een paradoxale situatie waarbij ecologisch onvriendelijke oplossingen verkozen worden boven een (politiek onmogelijke)

herziening van hun ideologische dogma's. Om die redenen hebben ze ook totaal foutieve informatie aan de burgermaatschappij verkocht. Niettemin slagen sommigen erin om hun standpunt te herzien, zoals Patrick Moore¹¹, de stichter van Greenpeace, die zelf een evolutie heeft ondergaan van fervent anti-nucleair naar vocaal voorstander ervan, of James Lovelock, bedenker van de Gaia-hypothese.

1.2.b De historisch duistere oorsprong van kernenergie.

De oorsprong van de nucleaire technologie ligt in de ontwikkeling van kernwapens en de beschuldigingen in verband met de verwevenheid met het militair-industrieel complex waren niet volledig ongegrond. Maar laten we niet vergeten dat dat op zich geen reden is om die technologie te verwerpen: het internet vindt ook zijn oorsprong in een louter militaire ontwikkeling (ARPANET).

De wetenschappelijke aanwijzing dat er heel veel energie uit atoomkernen gehaald zou kunnen worden, dateert van eind jaren dertig. In Frankrijk was Joliot Curie net achter het idee gekomen van een kettingreactie met de vrijmaking van veel energie. Hij stelde zowel civiele als militaire toepassingen voor. Hij nam een aantal patenten, die hij overigens nooit gebruikte aangezien enkele weken later de Tweede Wereldoorlog uitbrak. Een paar andere geleerden (waaronder de Duitser Otto Hahn en de Hongaarse immigrant Leo Szilard in de Verenigde Staten) hadden onafhankelijk van elkaar een vergelijkbare gedachtegang gevolgd.

De Tweede Wereldoorlog, en de angst dat nazi-Duitsland ook een nucleair wapen kon ontwikkelen, zorgden ervoor dat de geallieerden zich met enorm veel middelen op het ontwerpen van een nucleair wapen wierpen. Dat een kettingreactie in een kernreactor mogelijk was, werd voor het eerst in 1942 door Fermi in Chicago aangetoond met behulp van een grafietmoderator en natuurlijk uranium in CP1 (Chicago Pile 1), een reactor die gebouwd werd van 6 ton uraniummetaal, 37 ton uraniumoxide en 400 ton grafiet. De Amerikanen startten vervolgens het Manhattan project op, het geheime onderzoeksprogramma dat leidde tot de eerste nucleaire wapens. De eerste onderzoeken van het Manhattanproject leidden tot de conclusie dat er twee manieren zijn om een nucleair wapen te bouwen. De eerste is om uit uranium de isotoop U-235 af te zonderen (slechts 0,7 % van het natuurlijk uranium bestaat uit U-235) met een hoge zuiverheid (meer dan 93 %). De andere bestaat erin uranium met neutronen te bestralen, en zo plutonium te maken. Het afzonderen van U-235 heet "verrijken" van uranium, en is een vrij moeilijk technologisch proces. De productie van plutonium is gemakkelijker: het volstaat immers om natuurlijk uranium in een kernreactor te bestralen om plutonium te vormen. Voor dat doel werden er uranium-grafietreactoren naar het model van CP1 gebouwd. Op 16 juli 1945 testten de Amerikanen hun eerste plutoniumbom in de Nevadawoestijn. Op 6 augustus 1945 vernietigde een uraniumbom Hiroshima en op 9 augustus 1945 onderging Nagasaki hetzelfde lot; alleen werd hier een plutoniumbom gebruikt. Achteraf bleek uiteindelijk dat nazi-Duitsland nergens stond met zijn onderzoek naar een kernwapen...

De nucleaire wapenwedloop was begonnen. De Sovjets, die het hele Manhattan project gespioneerd hadden, brachten op basis van deze gestolen kennis hun eerste plutoniumbom op 29 augustus 1949 tot ontploffing. De Britten volgen op 3 oktober 1952, de Fransen in 1960 en de Chinezen in 1964.

Ondertussen ontwikkelden de Amerikanen een nieuw soort nucleair wapen, de zogenaamde thermonucleaire bom of waterstofbom, een uitvinding van Edward Teller en Stan Ulam. Op 1 november 1952 lieten ze de eerste ontploffen boven Eniwetok, een atol in de Stille Oceaan.. De

¹¹http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2006/04/14/AR2006041401209_pf.html

Sovjets volgden op 12 augustus 1953: Andrei Sakharov (de mensenrechtenactivist) stond aan de wieg ervan. Later volgden er nog anderen (de Fransen bijvoorbeeld in 1968).

Vooraf in het begin hebben deze militaire onderzoeksprogramma's een heel duister aspect. De Amerikanen en de Fransen bijvoorbeeld, gaan atmosferische testen van kernwapens doorvoeren in de Stille Oceaan, en hierbij gebeuren op zijn zachtst gezegd weinig correcte dingen voor de lokale bevolkingen: zij ondergaan radioactief neerslag van deze testen, worden hierover niet correct ingelicht,...

Tijdens het Manhattanprogramma kwam ook de basistechnologie voor kernreactoren tot stand, op basis van de berekeningen van Fermi en CP1. Aanvankelijk was het niet de bedoeling om met die reactoren energie te gaan produceren, maar wel van plutonium. Plutonium had immers het voordeel dat het chemisch verschillend was van uranium, en gemakkelijker afgescheiden kon worden dan uranium, waar men moest overgaan tot isotopische scheiding. Bovendien had men voor de eerste reactoren ook geen verrijkt uranium ter beschikking, en kon men bijgevolg enkel grafiet of zwaar water als moderator gebruiken. Omdat zwaar water moeilijk te verkrijgen was, werd vaak gebruikgemaakt van grafiet.

Na de Tweede Wereldoorlog, in de jaren '50, begon men ook te denken aan civiele toepassingen van kernenergie. De bizarste ideeën werden geopperd: kanalen graven met behulp van atoombommen, vliegtuigen met kernreactoren, kernaandrijving voor schepen en duikboten, ... en ook elektriciteitsproductie. Al deze ideeën vonden hun inspiratie in militaire toepassingen. Op 20 december 1951 trad de eerste Amerikaanse reactor voor elektriciteitsproductie, de EBR-1, een snelleneutronenreactor, in werking. Hij kon eerst vier gloeilampen laten branden, en later zelfs een heel gebouw verlichten.... Nadien inspireerden de Amerikanen zich meer op het type reactor dat ze voor hun duikboten ontworpen hadden (de eerste nucleaire duikboot, de Nautilus, deed zijn eerste duik in 1954) en die gewoon water gebruikte als moderator. Nieuwe reactortypes volgden elkaar in snel tempo op: in 1954 de AES-1 Obninsk, de eerste Russische vermogenreactor (van hetzelfde type als de fameuze Chernobyl-reactor), in 1956 gasgekoelde Franse en Britse grafietreactoren, in 1957 de Shippingport (60 MWe), de eerste Amerikaanse vermogenreactor met water onder druk, in 1960 de Dresden Unit One (200 MWe), de eerste kokendwaterreactor met een groot vermogen. Canada en Zweden startten ook een kernenergieprogramma op. In tegenstelling tot de 4 andere waren Canada en Zweden echter helemaal niet geïnteresseerd in militaire toepassingen.

Het dient gezegd dat deze 6 pionierslanden (USA, USSR, Groot-Brittannië, Frankrijk, Canada en Zweden) op wat basiskennis na, hun nucleaire programma's volledig zelf ontwikkelden, vrijwel onafhankelijk van elkaar. De eerste 4 landen gebruiken de reactoren in het begin voor zowel militaire als civiele toepassingen, voor de 2 andere uitsluitend voor civiele doeleinden. In de beginperiode vormden nationaal prestige, militaire toepassingen en kernenergieproductie een nogal dubbelzinnige mix. Er werd ook beduidend minder aandacht besteed aan veiligheid, getuige enkele trieste incidenten waaronder dat van Windscale (zie hoofdstuk 3) is waar een militaire grafiet reactor die diende voor de tritium- en plutonium-productie in brand is gegaan. Windscale is waarschijnlijk het belangrijkste incident in het westen uit die periode. Door alle geheimdoenerij, de banden met kernwapens, en de soms beperkte veiligheid van de installaties sloeg de publieke opinie om, van aanvankelijk enthousiast naar heel wantrouwig, en dat was niet meer dan terecht.

Een illustratie van de tweeslachtigheid in verband met de civiele en militaire toepassingen van kernenergie kan men vinden in Frankrijk. De eerste kernreactor in Frankrijk was de EL-1, Zoë genaamd, een zwaarwaterreactor die op 15 december 1948 in werking trad. Het was een louter experimentele reactor, bedoeld om de technologie onder de knie te krijgen. Frankrijk werd zo goed als volledig buiten het Manhattan-project gehouden. Hoewel het voor de Tweede Wereldoorlog een

voortrekkersrol vervulde (denk aan Joliot Curies patenten), lag alle onderzoek uiteraard plat tijdens de oorlog, terwijl de Amerikanen met het Manhattan-project heel veel vooruitgang boekten. Op de EL-1 volgden vrij snel andere reactoren: EL-2 en EL-3 in Saclay bijvoorbeeld. De Fransen beschikten in die periode niet over uraniumverrijkingstechnieken. Ze zetten een ambitieus programma op om met behulp van grafietreactoren en natuurlijk uranium voldoende plutonium te produceren. Het was de bedoeling om hiermee plutoniumkweekreactoren met snelle neutronen energie te laten produceren, en bovendien vers uranium om te zetten in plutonium. Het idee was briljant, en het is in principe de beste methode om nucleaire brandstof zo optimaal mogelijk te gebruiken. Maar in feite was er van in het begin een geheime tweede bedoeling: de plutoniumproductie kon ook dienen om Frankrijk aan kernwapens te helpen... en enkele jaren later gebeurde dat ook, terwijl het kweekreactorprogramma maar langzaam vooruitging.

De eerste grafietreactoren in Marcoule, G1 (1956), 2 MWe, G2 (1959) en G3 (1960) 38 MWe, produceerden een beetje elektriciteit, maar vooral veel plutonium. De Britten volgden exact hetzelfde schema met de Magnox-reactor, een reactortype dat heel erg leek op de Franse grafietreactoren. Zowel Frankrijk als Groot-Brittannië bouwden later grotere versies van deze grafietreactoren voor elektriciteitsproductie. Tussen 1963 en 1972 bouwde Frankrijk 6 reactoren van het UNGG-type (natuurlijk uranium, grafiet en gaskoeling) voor elektriciteitsproductie.

Ondertussen bouwde Frankrijk samen met België een gewoonwaterreactor. België had met de hulp van de Amerikanen de eerste drukwaterreactor op het Europese continent gebouwd, de BR-3. De eerste Belgische reactor, de BR-1, een kleine experimentele grafiet-natuurlijkuraniumreactor met luchtkoeling, werd gebouwd in 1956. De BR-2 is een watergekoelde experimentele reactor met hoogopgewerkt uranium. Het is een onderzoeksreactor die hoge neutronenfluxdichtheden produceerde voor gebruik in wetenschappelijk onderzoek. De BR-2 trad in werking in 1961.

De BR-3 was een drukwaterreactorprototype naar Amerikaans model (Westinghouse), de eerste reactor van dat type die buiten de Verenigde Staten was gebouwd. Hij trad in werking in 1962. Voor de bouw van zowel de Belgische als Franse moderne centrales werd dankbaar gebruikgemaakt van de principes van de BR-3. De BR-3 werd in 1987 stilgelegd.

De Belgen waren, na de Fransen en de Engelsen, de derden in Europa om een kernreactor te bouwen. Het verschil met die twee landen is dat België nooit militaire nucleaire ambities heeft gehad, en bijgevolg nooit een dubbelzinnige houding heeft aangenomen. De Britse en Franse reactoren tot eind jaren '60 waren geïnspireerd door modellen die een militair doel dienden: de productie van plutonium. Kernenergie was in die landen als het ware een "bijproduct" van de militaire ambitie. Dat gold niet voor België, dat vanaf het prille begin uitsluitend civiele toepassingen beoogde. Op geen enkel ogenblik werd er in het Belgische onderzoeksprogramma van dat principe afgeweken.

In 1967 bouwden Fransen en Belgen met de hulp van de Amerikanen (Westinghouse) een prototype van een kerncentrale dat op hetzelfde principe steunde als de BR-3. De bedoeling was een zo veilig mogelijke vermogenreactor te bouwen voor uitsluitend civiele doeleinden. Het was een cruciaal moment: *het betekende de volledige ontvoogding van de civiele kernenergie, volkomen los van elke militaire inmenging of origine*. Men spreekt ook wel van reactoren van de tweede generatie om onderscheid te maken tussen deze reactoren en de eerdere reactoren die altijd al een half militaire oorsprong of bedoeling hadden (plutoniumproductie). De betrokken centrale werd gebouwd in Chooz, in Frankrijk bij de Belgische grens, en verdeelde zijn elektriciteitsproductie netjes fiftyfifty tussen het Belgische en het Franse elektriciteitsnetwerk. Een anekdote: men hoort soms als argument dat kerncentrales gevaarlijk zijn, de bewering dat de Fransen hun centrales op de grens zetten, zodat de problemen op zijn minst half voor het buurland zijn. Chooz wordt dan geciteerd als

voorbeeld. Zoals we hier zien is de reden anders: Chooz was *een gemeenschappelijk project*, en de elektriciteitsproductie ervan werd door de twee landen gedeeld. Na het succes van dit prototype bouwden de Fransen samen met de Belgen een groter model in Tihange, waar de eerste reactor in 1975 werd opgestart. De nieuwe kerncentrale was erg succesvol en daarom beslisten de Fransen om hun onderzoek op het gebied van grafietreactoren (half-militaire origine) stop te zetten, en zich toe te spitsen op de technologie van de drukwaterreactoren, die ze samen met de Belgen en met de hulp van de Amerikanen hadden ontwikkeld. In 1977 gingen ze van start met een uitgebreid programma voor de bouw van tientallen dergelijke centrales. In 1980 waren er 6 centrales in werking, in 1985 was dat al opgelopen tot 33, in 1990 tot 48, in 1995 tot 54 en in 2000 tot 58. Gedurende die periode werden er heel wat verbeteringen aangebracht, voornamelijk op het vlak van efficiëntie en veiligheid. In 2004 betrok Frankrijk 78% van zijn elektriciteitsproductie uit kernenergie.

Het is waarschijnlijk aan de bevolking ontgaan dat er in 1975 een volledige breuk is gekomen tussen het militair en nationalistisch geïnspireerde gebruik van nucleaire toepassingen, en de civiele toepassing van kernenergie op een rationele wijze, en dat er een generatiewissel heeft plaatsgevonden. Dit heeft een gigantische invloed gehad op de veiligheid, de brandstof efficiëntie en de natuurvriendelijkheid van kernenergie. Kernenergie nadien is een heel andere wereld dan kernenergie ervoor. Maar in de maatschappij associeert men nog veel te vaak militaire toepassingen (en al wat er bij hoort: geheimhouding, vervuilend, veiligheid van secundair belang,...) met de moderne vorm van civiele kernenergie die sinds de jaren '70 het daglicht zag. In zekere mate kan ik wel de afkeer voor kernenergie in het begin van de jaren '70 (en dus met een kijk op wat er in de jaren '50 en '60 is gebeurd) goed begrijpen. Het was inderdaad een ietwat duistere, niet zo heel veilige en zeker geen milieuvriendelijke onderneming. De voornaamste drijfveer was toen inderdaad vaak ingegeven door nationalistische en militaire motieven, waarbij veiligheid en milieuvriendelijkheid niet altijd de nodige aandacht krijgen. Trouwens, dat was niet zo erg aan de orde van de dag voor de meeste activiteiten in die jaren! Maar de tijden zijn veranderd, en kernenergie uit die periode heeft niet veel meer te maken met de huidige kernenergie. Niettemin worden nog steeds de spookbeelden van die periode aangevallen.

1.3 Plan van deze tekst

In hoofdstuk 2 volgt een relatief grondige inleiding tot de natuurkundige basisbegrippen van kernenergie. In dat hoofdstuk wordt uitgelegd wat radioactiviteit is, wat kernreacties zijn en hoe die wetenschappelijk kwantitatief beschreven worden. Ook komen de interacties tussen radioactieve straling en materie aan bod. Verder wordt er ook uiteengezet welke de fundamentele reacties zijn die de energie vrijmaken in een kerncentrale, hoe een kettingreactie in principe tot stand komt, welke de types brandstof zijn die men in een kernreactor kan vinden, en welke de verschillende werkingsprincipes zijn van verschillende soorten reactoren. Ten slotte komt in hoofdstuk 2 ook nog de elementaire thermodynamica van de stoomcyclus ter sprake, die toelaat om van warmte elektriciteit te maken. Met andere woorden, hoofdstuk 2 omvat de elementaire natuurkunde van de kernenergietechnologie. Het is immers onmogelijk om een technisch argument over kernenergie te volgen zonder de basisprincipes ervan te kennen.

Hoofdstuk 3 behandelt stralingsbescherming in al haar aspecten en besteedt de nodige aandacht aan de gevolgen van radioactiviteit en straling voor het menselijke lichaam en de gezondheid. Er wordt een belangrijke plaats ingeruimd voor de meettechnieken voor stralingsdosissen en de reglementaire en sanitaire voorschriften ter zake. Het is namelijk heel belangrijk dat de lezer zich een idee kan vormen van de precieze betekenis van de verschillende gebruikte grootheden. Niemand schreeuwt

moord en brand omdat op een omheining op een publiek toegankelijke plaats een spanning van 20 volt wordt gemeten en men dient evenmin te panikeren als men over een periode van een jaar een dosis van 50 microsievert oploopt. Hoofdstuk 3 behandelt ook alle elementen die te maken hebben met de uiteindelijke veiligheid van kernenergie. Om een en ander te illustreren komen er verschillende historische ongelukken aan bod en worden oorzaken en daadwerkelijke gevolgen toegelicht. En ten slotte worden de objectieve gevaren van kernenergie (kans om om te komen ten gevolge van kernenergie) en die van andere grootschalige menselijke activiteiten met elkaar vergeleken.

Hoofdstuk 4 beschrijft het stralingstransport, en meer bepaald de gedetailleerde fysische principes van reactorontwerp en -controle. Dit is veruit het meest technische hoofdstuk, met gedetailleerde berekeningen. Het hoofdstuk begint relatief bescheiden, met de berekening van radioactief verval en de nuclidenproductie in reactoren. Maar vrij snel snijden we de dynamische aspecten van een kernreactor aan. Als men dit hoofdstuk bestudeerd heeft, dan kan men verschillende subtiele effecten in kernreactoren begrijpen, waaronder het belangrijke begrip “passieve veiligheid”. Dit hoofdstuk zal ook toelaten in detail te begrijpen wat er is misgegaan in Chernobyl, waarom dat ongeluk in de eerste plaats mogelijk was en waarom een gelijkaardig ongeluk fysisch onmogelijk is in een moderne kerncentrale. Ook wordt het fundamentele verschil tussen een kernreactor en een kernwapen bestudeerd.

In het korte hoofdstuk 5 beschrijven we uitvoerig de opbouw van een moderne Westerse kerncentrale: als voorbeeld nemen we de Franse centrales van 1300 MWe. Men leert in dit hoofdstuk twee dingen: ten eerste, dat kerncentrales veel flexibeler elektriciteitsproducenten zijn dan men vaak denkt, en ten tweede, wat het in de praktijk betekent: verdediging in diepte (de vele verschillende veiligheidssystemen).

In hoofdstuk 6 beschrijven we de brandstofcyclus en wordt de nodige aandacht besteed aan de samenstelling van het nucleair afval en de verschillende opwerkingstechnieken. Ook recyclage en de principes van kweekreactoren worden hier aangesneden.

Hoofdstuk 7 handelt over de materiaalwetenschappen in verband met kernenergie: een belangrijk deel van de veiligheid en de functionaliteit van huidige en toekomstige kerncentrales is namelijk verbonden met het gedrag van de materialen (de brandstof, en ook de structurele materialen).

In hoofdstuk 8 hebben we het over “hernieuwbare energieën” en lichten we enkele moeilijkheden toe die aan deze technieken verbonden zijn wanneer ze aangewend worden als hoofdbron voor de elektriciteitsproductie. Het is niet de bedoeling om een aversie tegen windenergie op te wekken, maar wel om te vermijden dat men totaal irrealistische verwachtingen gaat stellen in deze technologieën.

In hoofdstuk 9 houden we een aantal algemeen bekende argumentaties tegen kernenergie (van de hand van ecologische groeperingen of Groene politieke groepen) tegen het licht en tonen we het gebrek aan wetenschappelijke pertinentie van het merendeel van deze argumenten aan.

Hoofdstuk 2 Kernenergie: basisbegrippen.

In dit deel gaan we in op de wetenschappelijke en natuurkundige basisprincipes van het kernenergie gebeuren. De natuurkundige elementen die er aan de grondslag van liggen worden ingeleid op een niveau dat begrijpbaar moet zijn op het niveau algemeen secundair onderwijs in de laatste jaren. Een goed begrip van de basisprincipes (die echt niet moeilijk zijn) is noodzakelijk om de meer maatschappelijk georiënteerde discussies met kennis van zake te kunnen volgen.

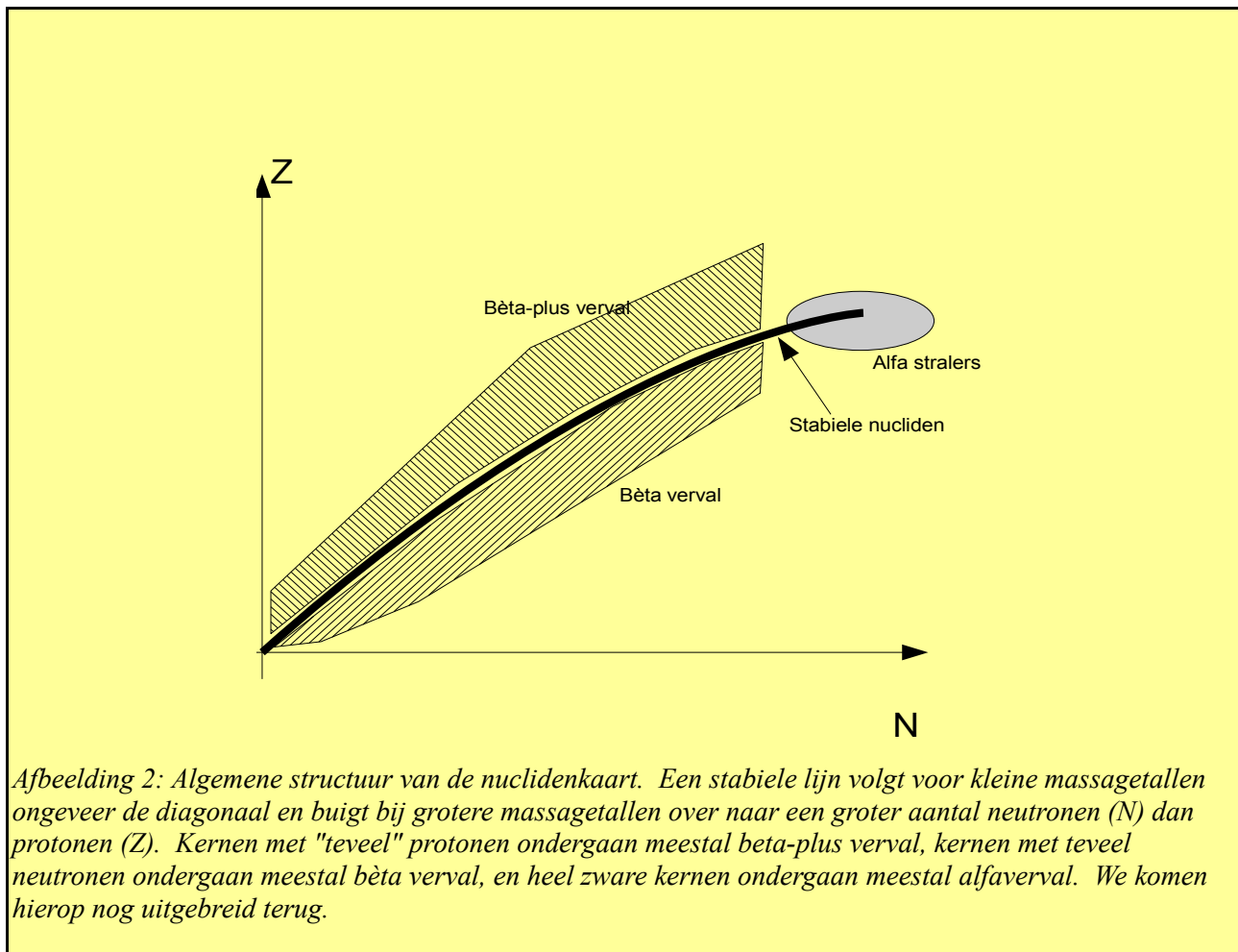
2.1 Enkele elementen uit de natuurkunde: atomen, moleculen, nucliden.

2.1.a Atoombouw.

De conceptuele principes die aan de oorsprong liggen van het nucleaire gebeuren zijn in feite verbazingwekkend eenvoudig. Het heeft de mensheid niettemin eeuwen gekost om die relatief eenvoudige feiten te begrijpen. Materie bestaat uit *atomen* van verschillende aard. Deze atomen zijn opgebouwd uit *een kern* enerzijds, en een “*elektronenwolk*” (een zwerm elektronen) anderzijds. De kern bevat het grootste deel van de massa van een atoom (*elektronen* zijn hele lichte deeltjes), maar is heel klein in vergelijking met de afmetingen van de elektronenwolk die de “afmetingen van het atoom” bepalen. Elektronen zijn elektrisch negatief geladen deeltjes, met een lading -1 in een fundamentele eenheid die gelijk is aan $1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, de SI eenheid voor elektrische lading. Atoomkernen komen voor in positieve ladingen (in die vernoemde fundamentele eenheid) 1, 2, 3 ... 92, 93..., en atomen zijn neutraal. Dat wil zeggen dat een atoomkern met lading, zeg maar, 7, ook 7 elektronen in zijn elektronenwolk zal hebben, zodat de totale lading $(+7) + 7 \cdot (-1) = 0$ is. Meerdere atomen kunnen “samengaan” in grotere conglomeraten, en bij die gelegenheid onderling elektronen uitwisselen. Indien die conglomeraten relatief klein zijn en een precies aantal atomen van verschillende soorten bevat in een goed gedefinieerde configuratie, spreekt men van een *molecule*. Indien die conglomeraten heel groot zijn, spreekt men van *metalen* of van *ionische kristallen*. Er bestaan nog enkele andere soorten materialen, zoals amorfe stoffen. De eigenschappen van atomen om zich op verschillende wijzen te combineren, en die combinaties te veranderen, zijn essentieel bepaald door de elektronenwolken van de atomen, en dus door de lading van de atoomkernen. De studie van die combinaties en de recombinitie van elektronenwolken en van atoomconglomeraten is niets anders dan de *scheikunde*. Scheikunde houdt zich bezig met de studie van de wijze waarop verschillende atomen zich samenstellen in grotere gehelen, door de reorganisatie van hun elektronenwolken. De basisbouwstenen in de scheikunde zijn *de verschillende atoomsoorten*, gerangschikt volgens hun lading. Men noemt deze atoomsoorten de *chemische elementen*, en de elektrische lading van de atoomkern bepaalt het chemische element. Een chemisch element heeft een naam, en, zeer belangrijk, een internationaal erkend symbool (meestal afgeleid van de Latijnse naam). Zo staat lading 1 voor waterstof (symbool: H), lading 2 voor helium (symbool He), lading 3 voor lithium (Li), lading 4 voor beryllium (Be), lading 5 voor boor (B), lading 6 voor koolstof (C), lading 7 voor stikstof (N), lading 8 voor zuurstof (O), lading 9 voor fluor (F), lading 10 voor neon (Ne), ...

is een heel klein beetje zwaarder dan een proton maar het verschil is heel klein. De totale massa van een atoomkern is bijgevolg ongeveer gelijk aan de massa van een proton, maal het totale aantal protonen en neutronen samen... dat is het massagetal.

Een koolstof atoom met massagetal 12 bestaat uit 6 protonen (want de lading is +6), en uit nog eens 6 neutronen om aan 12 te geraken in het totaal. Een koolstof atoom met massagetal 13 heeft ook 6 protonen, maar deze keer 7 neutronen. We kunnen een nieuwe tabel opstellen, met horizontaal het aantal neutronen, en verticaal het aantal protonen. Elk vakje in die tabel komt in principe overeen met een denkbare nuclide. Deze tabel heet: de *nuclidenkaart*¹³. De structuur is aangegeven in figuur 2. Het blijkt dat de meeste vakjes geen vertegenwoordigers in de natuur vinden. De nucliden



die we in de natuur vinden, liggen relatief dicht bij de diagonaal. In bestaande nucliden verschilt het aantal neutronen niet veel van het aantal protonen, hoewel de hele zware atomen een voorkeur hebben voor "wat meer" neutronen dan protonen. Waar komt dat vandaan ?

Laten we even terugkeren naar de scheikunde. De elektronenwolk rond een atoomkern is opgebouwd op een speciale manier, die door een tak van de fysica wordt beschreven, de zogenaamde *kwantum mechanica*. Dat is een relatief ingewikkelde theorie waar we hier niet diep hoeven op in te gaan. Volgens de kwantum mechanica kan de elektronenwolk enkel in bepaalde

¹³Die is bijvoorbeeld zichtbaar op <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>.

configuraties voorkomen, en met die configuraties komen bepaalde energieën overeen. Deze configuraties worden bepaald door de *interactie* tussen de elektronen en de kern via de *elektromagnetische wisselwerking*. De elektromagnetische wisselwerking is niets anders dan het krachtenspel tussen stilstaande of bewegende elektrische ladingen. Het is een heel bekende wisselwerking, die verantwoordelijk is voor onder andere het functioneren van alle elektrische en elektronische apparatuur. Het is de elektrische lading van de kern, en de elektrische lading van de elektronen (tegengesteld en dus aantrekkend) die, in de kwantum mechanica, aanleiding geven tot verschillende mogelijke configuraties met verschillende *bindingsenergieën*. Men noemt “bindingsenergie” de energie die vrijkomt wanneer men de verschillende bouwstenen van een configuratie samenbrengt. Opdat een configuratie zou blijven bestaan, moet haar bindingsenergie positief zijn – dat wil zeggen, de energie van de structuur is kleiner dan de energie van de losse delen. De configuratie met de grootste bindingsenergie is de stabielste, en heet de “grond toestand”. Van een vrij atoom is de elektronenwolk meestal in de grond toestand. Het schoolvoorbeeld is het vrije waterstofatoom. In een elementaire cursus kwantum mechanica leert men hoe men de “grondtoestand” van het waterstofatoom moet uitrekenen, en de bindingsenergie komt dan uit op 13.6 eV^{14} , een waarde die heel goed overeenkomt met de experimentele observatie. Het kost dus 13.6 eV om een waterstof atoom te splitsen in een vrij proton en een vrij elektron (om het atoom te ioniseren). Een elektronvolt (eV) is een eenheid van energie die gelijk is aan de energie die een elektron krijgt wanneer het een potentiaal verschil van 1 Volt doorloopt. Een elektronvolt is gelijk aan $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}^{15}$.

Het blijkt nu dat wanneer verschillende atomen bij elkaar komen, we gemeenschappelijke configuraties van de elektronen kunnen vinden die een lagere energie hebben dan de grondtoestanden van de individuele atomen. Voor twee waterstofatomen, bijvoorbeeld, kan men (benaderd) uitrekenen dat de bindingsenergie ongeveer 2.35 keer de bindingsenergie van 1 enkel waterstof atoom is. Twee waterstofatomen samen hebben dus ongeveer 0.35 keer meer bindingsenergie dan de twee individuele waterstofatomen apart. In zo een geval gaat die gemeenschappelijke configuratie gevormd worden, wat in scheikundige taal een *chemische binding* heet. Dat is de wijze waarop moleculen ontstaan.

Indien twee verschillende moleculen met elkaar botsen, dan kan het zijn dat een herschikking van de atomen en de elektronenwolken aanleiding geeft tot lagere grondtoestanden dan de grondtoestanden ervoor. In dat geval heeft men een mogelijke chemische reactie. Het is nu wel zo dat in de chemie niet altijd de laagste grondtoestand wordt bekomen. Bij een zekere temperatuur hebben de moleculen ook een zekere snelheid en dus ook een kinetische energie wat het mogelijk maakt dat soms “energetisch ongunstige” reacties kunnen plaats vinden als die om een andere reden “gunstig” zijn. De verschillen in bindingsenergieën tijdens de herschikking van de elektronenconfiguraties zijn van de orde van fracties van een elektronvolt tot enkele elektronvolt (eV). Thermische energieën bij kamertemperatuur zijn van de orde van 0.03 eV . Het is bijgevolg mogelijk om in sommige gevallen wat thermische energie te gebruiken om naar structuren met wat kleinere bindingsenergieën te gaan. Dat is bijvoorbeeld wat er gebeurt wanneer ijs smelt.

¹⁴Mijn excuses aan de puristen: ik gebruik de decimale punt, en niet de komma.

¹⁵Een getal, geschreven als $5.3 \cdot 10^{-8}$ wil zeggen: 5.3 maal 0.000 000 01, dus 0.000 000 053. De -8 als exponent van de 10 geeft aan dat we het getal 5.3 acht decimale plaatsen naar « beneden » schuiven. Het getal $1.602 \cdot 10^{-19}$ is dus gelijk aan 0.000 000 000 000 000 160 2. Men noemt deze schrijfwijze de “wetenschappelijke notatie” van getallen, gezien men in de wetenschappen vaak te maken heeft met heel kleine of heel grote grootheden. Het werkt namelijk ook in de omgekeerde richting: $6.23 \cdot 10^{23}$ is gelijk aan 623 000 000 000 000 000 000 000. Dat komt omdat de exponent (hier, 23) nu positief is, en we bijgevolg het getal 6.23 drieëntwintig decimale plaatsen *omhoog* gaan verschuiven.

In vele gevallen gaat men echter reacties bekomen waar bij een herschikking van atomen en dus van elektronenwolken de eindconfiguratie een grotere bindingsenergie heeft dan de beginconfiguratie. In dat geval komt het energieverschil vrij onder vormen van beweging van de moleculen (warmte) en/of van straling. Vaak is dit licht- of warmte straling (infrarode straling).

Bij het gebruiken van fossiele brandstoffen als warmtebron is dat net wat er gebeurt: het herschikken van de atomen en de bijhorende elektronenwolken, zodat de eindstructuren (grotendeels water H_2O en CO_2) een hogere bindingsenergie bezitten dan de initiële producten – zuurstof moleculen O_2 en koolwaterstoffen in het geval van stookolie of aardgas, of grafiet in het geval van steenkool.

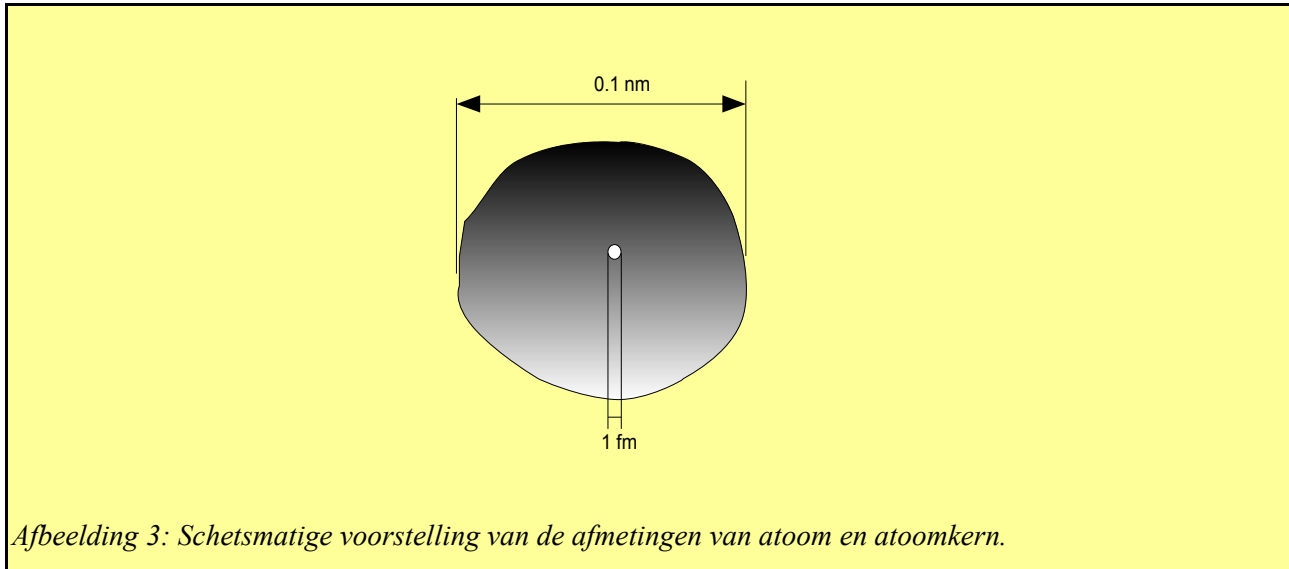
De grondconfiguratie (voor een gegeven molecule, atoom, kristal, kortweg, een gegeven structuur) van de elektronenwolk is niet de enige mogelijke configuratie. Er bestaan ook configuraties met hogere energie (en dus een kleinere bindingsenergie): zulke toestanden noemen we *aangeslagen toestanden*. Indien een structuur zich in een aangeslagen toestand bevindt, dan gaat die meestal vrij snel spontaan over naar de grondtoestand, of een lager gelegen aangeslagen toestand. Het energieverschil wordt meestal uitgestoten als *elektromagnetische straling*, onder de vorm van een *foton*¹⁶. Het kan ook zijn dat een molecuul in een aangeslagen toestand een dissociatie ondergaat: de molecule breekt dan op in twee of meerdere stukken. Omgekeerd kan de impact van een foton van de juiste energie een systeem van de grondtoestand in een aangeslagen toestand brengen – hierbij wordt het foton dan geabsorbeerd.

Scheikunde is een hele ingewikkelde wetenschap, want er bestaat een haast onbegrensde hoeveelheid verschillende structuren: moleculen, kristallen, metalen... met andere woorden *chemische stoffen*, en een nog veel groter aantal chemische reacties tussen al die stoffen, die bovendien sterk van de omgeving afhangen: druk, temperatuur, aanwezigheid van andere stoffen.... De reden hiervoor is dat de energieën die in het spel zijn bij chemische reacties - hoogstens enkele elektronvolt - niet veel groter zijn dan thermische energieën bij gewone omstandigheden bij enkele honderden of duizenden graden. Daarentegen, de theoretische beschrijving van chemische reacties door middel van de kwantum mechanica is vrij accuraat – tenminste voor eenvoudige stoffen, waar de berekeningen niet te ingewikkeld zijn – en er zijn ook heel vele “gedragsregels” gekend - dat zijn alle chemische wetten die men in dikke boeken over chemie kan terugvinden.

Als we terugkeren naar de atoomkern, dan zijn de zaken op het eerste zicht veel eenvoudiger: er bestaan een aantal nucliden, punt. Zij vormen geen “moleculen” of “kristallen” op zich, dat is enkel een spel van de elektronenwolken die er rond zwermen, aangetrokken door de elektrische lading die de atoomkernen bezitten. Als dusdanig is het aantal verschillende structuren (nucliden) beperkt tot een paar honderden, in tegenstelling tot het aantal chemische structuren. Op aarde vindt men bijvoorbeeld ongeveer 270 stabiele nucliden en 70 instabiele nucliden (zie verder: radioactiviteit). Men heeft een paar duizendtal instabiele nucliden artificieel geproduceerd, de meeste met hele korte leeftijden.

¹⁶Een foton is een “fundamentele eenheid van elektromagnetische straling”, en gedraagt zich in vele opzichten als een “lichtkogeltje”. De energie van een foton komt overeen met de golflengte van de elektromagnetische straling in kwestie via de heel bekende relatie van Planck: $E = h c / \lambda$. Hierin is h een natuurkundige constante, de Planck constante, c is de lichtsnelheid en λ is de golflengte. De energie van dat foton is dan exact gelijk aan het verschil van de energieën van de begin- en eindtoestand. Fotonen van enkele elektronvolt zijn zichtbare fotonen: het zijn de bouwstenen van zichtbaar licht – gewoon omdat men via de relatie van Planck uitkomt op de golflengte van zichtbaar licht.

De fysische “afmetingen” van atomen zijn van de orde van 10^{-10} meter of van de orde van een tiendmiljoenste van een millimeter. Dat zijn de afmetingen van de elektronenwolken. Net als bij echte wolken, is het moeilijk om een heel precieze “rand” ervan te definiëren ; die afmetingen moeten dus enkel als orde van grootte beschouwd worden. Men heeft een eenheid van lengte



Afbeelding 3: Schetsmatige voorstelling van de afmetingen van atoom en atoomkern.

gedefinieerd die aangepast is aan atomaire afstanden: de Angstrom (Å). Een angstrom is gelijk aan 10^{-10} meter. Maar een angstrom is eigenlijk een beetje een nutteloze eenheid, gezien een SI-eenheid, de nanometer ($1 \text{ nm} = 10^{-9}$ meter) dicht in de buurt ligt. $1 \text{ nm} = 10 \text{ Å}$.

Op dezelfde manier zijn de fysische afmetingen van atoomkernen ongeveer honderdduizend keer kleiner. Men heeft ook weer een eenheid van lengte gedefinieerd: de Fermi. $1 \text{ Fermi} = 10^{-15}$ meter. Grappig genoeg komt dat exact overeen met een SI-eenheid: de femtometer (fm). Dus $1 \text{ Fermi} = 1 \text{ fm}$ en de afkorting werkt prima!

We hadden gezien dat de structuur van de elektronenconfiguraties bepaald wordt door de elektromagnetische interactie. Men heeft zich lang afgevraagd welke de interactie is die de nucleaire structuur bepaalt, en men is tot het besluit gekomen dat er twee soorten “kernkrachten” zijn, maar die zijn niet van een eenvoudige aard zoals de elektromagnetische interactie. Men heeft eigenlijk nog altijd geen volledig bruikbare formulering van de kernkrachten, hoewel er veel vooruitgang is geboekt in de 70 jaren dat men ze bestudeert. In grote lijnen heeft men ook een kwantum mechanische beschrijving van de atoomkern, maar bij gebrek aan een precies wiskundig model is men voor precieze resultaten op experimentele metingen aangewezen. Niettemin kan men een nuclide beschouwen als een gebonden systeem van protonen en neutronen, met een zekere *bindingenergie*, dat wil zeggen (net zoals bij de elektronenwolken), dat de energietoestand van de nuclide lager ligt dan de energie van de individuele vrije protonen en neutronen. Net zoals bij atomen en moleculen, kunnen nucliden ook in een aangeslagen toestand verkeren: er zijn verschillende configuraties mogelijk van de neutronen en protonen die de nuclide uitmaken. Normaal bevinden ze zich in de grondtoestand, maar soms kunnen ze zich in een aangeslagen toestand bevinden.

Het grote verschil tussen het chemische gebeuren en het nucleaire gebeuren bevindt zich in het volgende: *de bindingsenergieën van nucliden zijn miljoenen keren groter dan de bindingsenergieën van moleculen*. Daar waar de bindingsenergieën van moleculen van de orde van elektronvolts zijn,

zijn de bindingsenergieën van nucliden van de orde van MeV¹⁷. Als dusdanig zijn nucliden, in gewone aardse omstandigheden, totaal ongevoelig voor temperatuur of druk. Ze zijn ook totaal ongevoelig voor de chemische herschikkingen in moleculen. Kunnen nucliden eigenlijk reacties ondergaan? Het is lang een dogma in de scheikunde geweest dat atoomkernen onveranderlijk waren, maar de ontdekking van de radioactiviteit aan het einde van de 19^{de} eeuw, en de ontdekking van de transmutaties in de eerste helft van de 20^{ste} eeuw hebben aan dat dogma een eind gesteld.

2.1.b Bindingsenergieën en atoom massa's.

Er bestaat een verbazingwekkend eenvoudige manier om de bindingsenergie van een atoomkern te berekenen. Deze uiterst eenvoudige techniek is gebaseerd op een conceptueel moeilijk te vatten principe dat door Albert Einstein is ontdekt, namelijk *de relativistische equivalentie van massa en energie*. Die equivalentie is gegeven door de vaak geciteerde, maar veel minder vaak begrepen relatie: $E = m c^2$. Hierin is E (in SI-eenheden, dus in Joule) een energie, m de equivalente massa (in SI eenheden, dus in kilogram) en c de lichtsnelheid (in SI-eenheden, ongeveer 300 000 000 m/s). Einstein's vergelijking zegt dus dat 1 kilogram massa equivalent is met een energie van $9 \cdot 10^{16}$ Joule; dat is een gigantische energie! Het is de thermische energie geleverd gedurende een jaar door een gemiddelde kerncentrale. Let op: Einstein leert ons niet *hoe* we massa in energie omzetten en vice versa, en of dat zelfs mogelijk is. Hij leert ons enkel een formele equivalentie tussen beide concepten, net zoals men de formele equivalentie had ontdekt tussen mechanische arbeid en warmte in de negentiende eeuw (James Joule).

Uit Einstein's overwegingen leert men het volgende: *de massa van een systeem is gelijk aan de massa van zijn constituenten, verminderd met het massa-equivalent van hun bindingsenergie*. Men kan dat ook anders formuleren: *de bindingsenergie van een systeem is gegeven door het energie-equivalent van de massa van de constituenten, verminderd met het energie equivalent van de massa van het geheel*.

Dat principe is universeel en volgt uit Einstein's relativiteitstheorie. Het is even goed geldig voor chemische bindingsenergieën als voor nucleaire bindingsenergieën. Alleen, voor chemische bindingsenergieën is het massa-equivalent van de bindingsenergie zo piepklein in vergelijking met de massa van de constituenten (de atomen), dat deze effecten in de meeste gevallen totaal onmeetbaar zijn, en dat het er dus op lijkt dat de massa van een molecuul exact gelijk is aan de som van de massa's van de atomen waaruit de molecuul bestaat.

Nucleaire bindingsenergieën zijn echter een miljoen keer groter (terwijl de atoom massa's dezelfde zijn), en hier is Einstein's effect heel goed meetbaar: het is zelfs de standaard manier om de bindingsenergieën te bepalen en niet, zoals in de scheikunde, via thermodynamische overwegingen.

De massa van een proton is gelijk aan $1.6726 \cdot 10^{-27}$ kg. Als we Einstein's welbekende formule gebruiken om het energie-equivalent van deze massa te berekenen, namelijk $E = m c^2$, (met c de licht snelheid in vacuüm, gelijk aan 299 792 458 m/s) dan vinden we: $1.50326 \cdot 10^{-10}$ Joule, of 938.27231 MeV. Een proton massa heeft dus een equivalente energie van een beetje minder dan een GeV (giga elektronvolt of een miljard elektronvolt). De nucleaire bindingsenergieën van de orde van een MeV stellen ongeveer een duizendste voor van de massa's van de constituenten. Een massaverschil van een duizendste is goed meetbaar. Chemische bindingsenergieën zijn van de orde

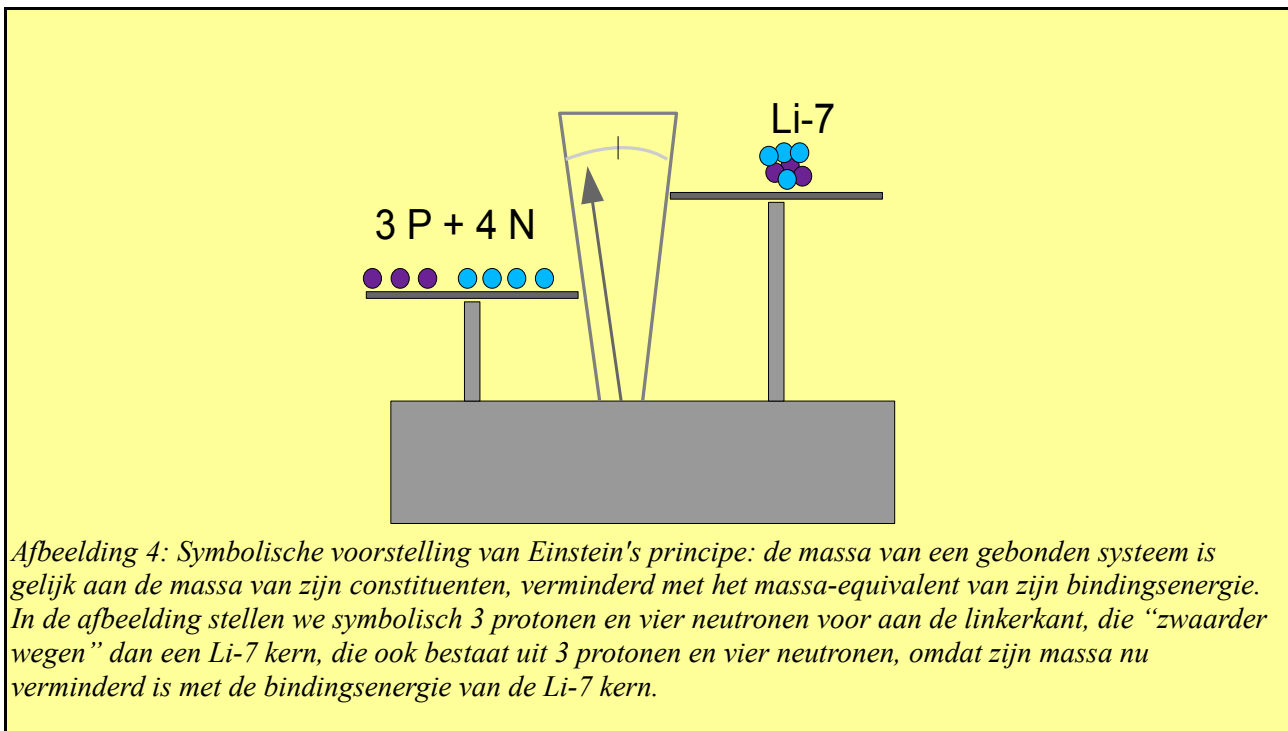
¹⁷ MeV staat voor mega-elektronvolt of miljoen elektron volt – we zullen ook de KeV of kilo-elektronvolt tegenkomen, dat is duizend elektronvolt.

van de eV, wat ongeveer een miljardste voorstelt van een proton massa – meestal kunnen we de massa's van moleculen niet met een precisie van 10 of meer decimale cijfers meten, en kunnen we dat kleine massaverschil te wijten aan chemische bindingsenergie dus niet waarnemen.

De massa van een elektron is gelijk aan $9.109381 \cdot 10^{-31}$ kg, wat een energie equivalent heeft van 0.510998 MeV. Een elektron is ongeveer 2000 keer lichter dan een proton of een neutron. Dit verklaart waarom de atoomkern ongeveer alle massa bevat van het atoom zelf.

Enkele voorbeeldjes¹⁸ zullen het bovenstaande duidelijk maken, maar eerst moeten we de eenheden in orde krijgen. In de appendix vindt men hier een uitgebreider behandeling van. We gebruiken bij conventie de “atoom massa eenheid” die gelijk is aan een twaalfde van de massa van een C-12 atoom, gelijk aan $1.660538782 \cdot 10^{-27}$ kg (wat een energie equivalent heeft van 931.494028 MeV). Een waterstof atoom (een proton en een elektron) heeft een massa, uitgedrukt in atoom massa eenheden, van 1.00782 ; een neutron heeft een massa van 1.008665. Als dusdanig wegen de constituenten van een C-12 atoom: $6 \times 1.00782 + 6 \times 1.008665 = 12.09891$; maar het C-12 atoom weegt maar 12 eenheden (bij definitie!) ; als dusdanig is er een verschil van 0.09891 atoom massa eenheden, wat neerkomt op een energie equivalent van 92.13 MeV. De totale bindingsenergie van een C-12 atoom is dus 92.13 MeV.

Als we naar de nuclidenkaart kijken dan wordt meestal het *massa overschot* aangegeven. Dat



massa-overschot is gegeven door het verschil te maken van de massa van het atoom (met elektronen inbegrepen) in kwestie uitgedrukt in atoom massa eenheden, en het massa getal (een geheel getal). Soms drukt men dat uit in “atoom massa eenheden”, en soms drukt men dat uit in MeV door het energie equivalent te nemen.

¹⁸Men vindt een uitgebreide tabel met de precieze massa's van atomen en hun nucleaire bindingsenergieën op deze plek: <http://www.nndc.bnl.gov/masses/mass.mas03>

We nemen een eenvoudig voorbeeld: een gewoon waterstof atoom. De massa van een waterstof atoom is gelijk aan de massa van een proton plus de massa van een elektron en is gelijk aan 1.00782 atoom massa eenheden ; het massagetal van waterstof is gelijk aan 1 (een geheel getal). Als dusdanig is het massa overschot van een waterstof atoom gelijk aan $1.00782 - 1 = 0.00782$ atoom massa eenheden ; een atoom massa eenheid heeft een energie equivalent van 931.494028 MeV, en bijgevolg is het massa overschot, uitgedrukt in equivalente energie, gelijk aan $0.00782 \times 931.494028 \text{ MeV} = 7.28 \text{ MeV}$. Dat is (op afrondingsfouten na) wat men terugvindt in de nuclidenkaart¹⁹. Maar dat getal heeft geen enkele fysische betekenis! Het is gewoon de afwijking van de massa van een atoom van een geheel veelvoud van een eenheid die we wat arbitrair gekozen hebben, namelijk de atoom massa eenheid! Bij definitie is die afwijking gelijk aan nul voor de C-12 nuclide.

Als men de bindingsenergie van een kern wil kennen, moet men het verschil maken tussen de (equivalente) energieën van de constituenten, en van de uiteindelijke kern. Men kan dat nu even goed doen met de “overschotten” als met de originele massa's of energieën, en dat is waar die massa-overschotten interessant zijn.

Het massa-overschot in energie equivalent van een proton + elektron is gelijk aan 7.2890 MeV, en van een neutron 8.0713 MeV volgens de nuclidenkaart. Als we bijgevolg een atoom beschouwen met N neutronen en Z protonen, dan is de bindingsenergie van dat atoom gegeven door de volgende formule:

$$\text{bindingsenergie} = N \times 8.0713 \text{ MeV} + Z \times 7.2890 \text{ MeV} - (\text{massa overschot van nuclide})$$

Laten we die formule toepassen op C-12 als test:

$$\text{bindingsenergie} = 6 \times 8.0713 \text{ MeV} + 6 \times 7.2890 \text{ MeV} - 0 = 92.16 \text{ MeV} \text{ wat inderdaad correct is.}$$

Ander voorbeeldje: deuterium (H-2) ; volgens de nuclidenkaart is het massaoverschot gelijk aan 13.1357 MeV:

$$\text{bindingsenergie} = 1 \times 8.0713 \text{ MeV} + 1 \times 7.2890 \text{ MeV} - 13.1357 \text{ MeV} = 2.2336 \text{ MeV,}$$

welke inderdaad de bindingsenergie is van een deutron. We zullen verderop zien dat als een traag neutron in de buurt van een proton komt (waterstof), dat er deuterium kan gevormd worden. Het overschot aan energie, namelijk de bindingsenergie van het neutron en het proton in deuterium, komt vrij als gamma straling, die een energie heeft van 2.2336 MeV.

Nog een ander voorbeeld: U-238. Massaoverschot: 47.3089 MeV.

$$\text{Bindingsenergie} = (238-92) \times 8.0713 \text{ MeV} + 92 \times 7.2890 \text{ MeV} - 47.3089 \text{ MeV} = 1801.69 \text{ MeV.}$$

¹⁹ <http://www.nndc.bnl.gov/chart/reCenter.jsp?z=1&n=0>

2.1.c Radioactiviteit.

Niet alle vakjes in de nuclidenkaart zijn gevuld, verre van: enkel een soort diagonale lijn, die lichtjes doorbuigt naar beneden toe, beschrijft de op aarde gevonden nucliden – we hebben deze al schetsmatig getoond in figuur 2. Men heeft ook vastgesteld dat er veel nucliden in die tabel aanwezig zijn die niet stabiel zijn: ze veranderen in andere nucliden als men lang genoeg wacht, en ze zenden deeltjes uit wanneer ze veranderen. Dat fenomeen heet: *radioactiviteit*. Het uitzenden van deeltjes noemt men: straling. Volgens de straling die een instabiele nuclide uitzendt, heeft men de radioactieve fenomenen in verschillende klassen ingedeeld. We bekijken het lijstje van de voornaamste klassen.

Bètaverval is het proces waarbij een nuclide een elektron uitzendt. Men weet nu dat die dan ook een *anti-neutrino* uitzendt, maar dat deeltje is heel moeilijk waarneembaar. Indien zoiets gebeurt, dan verandert een neutron zich in de nuclide in een proton. Als dusdanig “klimt” een nuclide onder bètaverval een vakje omhoog in de tabel van de chemische elementen, terwijl zijn massagetal behouden blijft. Heel vaak is de nieuwe nuclide in een aangeslagen toestand, en valt naar de grondtoestand door het uitzenden van een foton. Gezien de energieën die in het spel zijn (MeV), is dat foton geen zichtbaar foton, maar zogenaamde *gamma straling*.

Anti bètaverval is net het omgekeerde proces. Een nuclide zendt een positron uit (evenals een neutrino); in de kern is een proton nu in een neutron veranderd, en de nuclide daalt een stapje in de ladder van de chemische elementen, terwijl het massagetal behouden blijft. Vaak gaat zo een reactie gepaard met het uitzenden van een gamma foton. Een positron is het anti-deeltje van het elektron: het lijkt op een elektron, maar draagt een positieve elektrische lading (een elektron heeft een negatieve lading), en het kan met een elektron annihileren (de twee deeltjes verdwijnen, en hun energie wordt weggedragen door twee fotonen).

Alfa verval. Een nuclide splitst een He-4 nuclide af; om historische redenen noemt men dat deeltje ook wel een alfa-deeltje. Er zijn nu twee protonen en twee neutronen minder in de kern: het massagetal is met 4 gedaald. Alfa verval kan ook weer gepaard gaan met het uitzenden van een gamma foton.

Neutron emissie. Een nuclide kan een neutron uitzenden. Er is nu een neutron minder in de kern.

Spontane splijting. Zware kernen kunnen spontaan in twee stukken breken, met het vrijgeven van enkele neutronen.

Naast deze processen (bèta verval, anti-bèta verval, alfa verval, neutronenemissie en spontane splijting) zijn er een paar meer zeldzame processen die we hier niet verder bespreken.

We willen erop wijzen dat deze radioactieve processen volledig spontane processen zijn, zonder dat men “iets gedaan heeft” om ze te veroorzaken. *Een instabiele nuclide heeft gewoon een zekere kans per tijdseenheid om een radioactieve desintegratie te ondergaan*. Deze kans blijft constant in de tijd, met andere woorden, een instabiele nuclide “verouderd” niet. Het is duidelijk dat als men deze nucliden aan hun lot overlaat dat deze fenomenen blijven doorgaan., onafhankelijk van de chemische toestand, de druk en de temperatuur die heerst. Sommige nucliden kunnen meerdere verschillende vormen van radioactief verval ondergaan. Ze hebben dan een zekere kans per tijdseenheid om een reactie te ondergaan, en een zekere kans om de ene of de andere reactie te ondergaan. De kans voor een nuclide om een desintegratie te ondergaan, vermenigvuldigd met het aantal nucliden van die soort die aanwezig zijn in een gegeven hoeveelheid materie, geeft ons het (gemiddeld) aantal desintegraties per seconde in die hoeveelheid materie. Men noemt dat *de activiteit* van die hoeveelheid materie, en de eenheid ervan is *de Becquerel* (Bq) die overeenkomt

met 1 desintegratie per seconde. Een oudere eenheid is de Curie (symbool Ci), die gedefinieerd was als de activiteit van 1 gram radium. Die activiteit is gelijk aan 37 miljard Becquerel. Dat wil zeggen dat in 1 gram radium er per seconde, 37 miljard radium atomen zijn die een radioactieve desintegratie ondergaan.

Indien p de kans per tijdseenheid (zeg maar, seconde) is dat een bepaalde nuclide een radioactieve desintegratie ondergaat, dan is $t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{p}$ de *halfwaardetijd*. Indien er N nucliden zijn, is de activiteit $A = p.N$. Na een tijd $t_{1/2}$ is de helft ervan gedesintegreerd, onafhankelijk van hoeveel er nu waren. $\tau = \frac{1}{p} = \frac{t_{1/2}}{\ln(2)}$ is de *tijdconstante* van het radioactieve verval. Indien er op $t=0$, N_0 nucliden aanwezig zijn, dan kan men aantonen dat er na een tijd t , nog $N(t) = N_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)$ nucliden aanwezig zijn. Als we $t = t_{1/2}$ invullen, dan vinden we inderdaad $N(t_{1/2}) = N_0/2$: de helft van de originele nucliden is overgebleven.

Na het verval kan de nieuw gevormde nuclide op zijn beurt ook weer instabiel zijn, en de dochterkern hiervan op zijn beurt ook weer instabiel zijn enzovoort, tot uiteindelijk een stabiele nuclide bereikt wordt. De opeenvolging van onstabiele dochterproducten heet een *verval serie*. Het is wiskundig niet heel moeilijk om het aantal kernen van iedere nuclide in een verval serie als functie van de tijd te berekenen ; we komen hierop in veel meer detail terug in hoofdstuk 4.

Onstabiele nucliden kunnen ook ontstaan door nucleaire reacties. Inderdaad, het beschieten van kernen met andere kernen of met protonen of neutronen kan aanleiding geven tot nieuwe nucliden. De bron van deze bestraling kan de radioactiviteit van een andere nuclide zijn. Bij alfa verval bijvoorbeeld komen snelle He-4 kernen vrij, die met andere nucliden kunnen botsen. De bron kan ook de zon zijn, of andere bronnen van kosmische straling. De bron kan ook een door de mensen gebouwde bron van snelle deeltjes zijn, zoals een deeltjesversneller.

Op aarde kunnen stabiele nucliden in de natuur voorkomen, evenals heel lang levende onstabiele nucliden, en hun dochternucliden die misschien wel sneller vervallen, maar ook voortdurend geproduceerd worden door het verval van de moederkernen. Ook onstabiele nucliden die door kosmische straling geproduceerd worden en hun vervalproducten kunnen op aarde gevonden worden. Maar kortlevende nucliden, die niet zelf een vervalproduct in een verval serie zijn van een langlevende modernuclide of van het resultaat van een nucleaire reactie met kosmische straling, kunnen niet gevonden worden in de natuur. Misschien hebben ze ooit op aarde bestaan, maar ondertussen zijn ze vervallen. Het fenomeen wordt ook gebruikt om bepaalde oude voorwerpen te dateren.

2.1.d Nucleaire reacties en hun beschrijving.

We kunnen, naast radioactieve fenomenen waar een nuclide aan zijn lot wordt overgelaten en die een zekere kans heeft om te vervallen, ook actief een reactie tussen twee nucliden, of tussen een proton of een neutron en een nuclide, trachten te veroorzaken. In tegenstelling echter tot chemische reacties, waar men gewoon de stoffen mengt, en waar de thermische beweging van de moleculen voor hun botsing zorgt, is het meestal nodig om de reagentia in een nucleaire reactie te versnellen en energetisch te laten botsen. De reden hiervoor zit in de positieve elektrische lading die de protonen van een nuclide dragen, en het feit dat kernkrachten maar over een hele korte afstand werkzaam lijken te zijn. Nucliden die op enige afstand van elkaar vertoeven, gaan nooit in (nucleaire) interactie treden, want voor ze kunnen botsen, stoten de gelijknamige ladingen van de twee kernen elkaar af. We moeten dus eerst de zogenaamde *Coulomb barrière* (gewoon een naam voor de elektrostatische afstoting tussen het invallende deeltje en de doekern) overwinnen alvorens twee

nucliden kunnen interageren. Op deze regel is 1 uitzondering: neutronen. Neutronen zijn elektrisch neutraal, en kunnen dus aan heel lage energie met nucliden reageren. Alle andere “nucleaire reagentia” dienen tot vrij hoge energieën versneld te worden alvorens men kan hopen op een nucleaire reactie. Men kan hiertoe bijvoorbeeld deeltjesversnellers gebruiken, maar ook bijvoorbeeld de vervalproducten van radioactief verval, zoals He-4 kernen tijdens alfaverval. Vandaar het grote belang van neutronen in reactoren... en vandaar het feit dat fissie reactoren veel eenvoudiger installaties zijn dan hypothetische kernfusie reactoren. Men kan ook thermische energie gebruiken om nucliden te laten interageren, net zoals in de scheikunde ; alleen moet dan de thermische energie van de orde zijn van nucleaire bindingsenergieën, wat ons tot tientallen of honderden miljoenen graden brengt. Dat is de temperatuur in het centrum van de zon, waar kernreacties inderdaad op die manier gebeuren. Het is ook de temperatuur die men in fusiereactoren dient te bereiken – wat de essentiële moeilijkheid oplevert in deze installaties.

Nucleaire reacties zijn experimenteel bestudeerd in ongeveer alle denkbare kleuren en vormen, en de resultaten hiervan zijn voor een groot deel publiek beschikbaar gesteld. We hebben gezien dat het radioactief verval volgens een bepaalde reactie beschreven wordt door 1 enkele parameter, namelijk de kans per tijdseenheid dat de nuclide volgens die reactie gaat vervallen. Indien een nuclide volgens meer dan een schema kan vervallen, is er een kans per tijdseenheid voor elke van die reacties, en hun som is de kans per tijdseenheid dat de nuclide vervalt, waaruit men de halfwaardetijd kan afleiden. Radioactief verval kan dus vrij eenvoudig beschreven worden, omdat er slechts 1 enkel deeltje aan de reactie deelneemt, namelijk de moedernuclide.

Om van de “tabelparameter” (kans per tijdseenheid p) over te gaan op een macroscopische grootte (activiteit), volstaat het om de kans per tijdseenheid te vermenigvuldigen met het aantal nucliden in de stof onder beschouwing. Omgekeerd beschrijft men soms een hoeveelheid radioactieve stof door de activiteit ervan aan te geven.

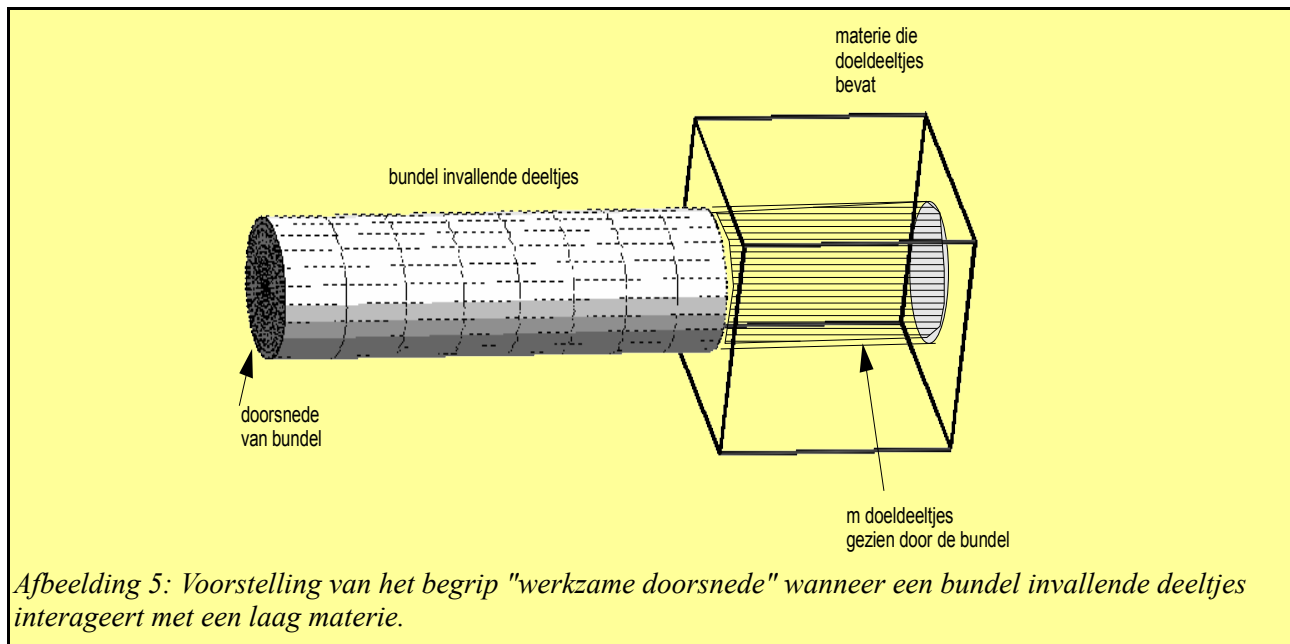
Nucleaire reacties hebben twee deeltjes als begintoestand: de “doelnuclide” en het “invallende deeltje”. Die twee deeltjes kunnen bovendien hard, of minder hard met elkaar botsen. Net zoals in het geval van radioactief verval is er weer een kans dat een reactie zal doorgaan, maar die kans gaat nu afhangen van verschillende dingen. In het geval van reacties noemen we de genormaliseerde kans, de *werkzame doorsnede*. De werkzame doorsnede van een specifieke reactie is gegeven door een grootte (meestal σ - de Griekse sigma - genoteerd) die aangeeft hoeveel reacties van dat type plaatsvinden per tijdseenheid, als we een bundel van invallende deeltjes met een dichtheid van 1 deeltje per tijdseenheid en oppervlakte eenheid (de doorsnede van de bundel) sturen op 1 doeldeeltje in de doorsnede van de bundel. De regel van drie wordt dan toegepast om het aantal reacties per tijdseenheid N te vinden wanneer een bundel van k deeltjes per seconde per oppervlakte-eenheid (de zogenaamde *fluxdichtheid* van de bundel) invalt op een doel met m doeldeeltjes:

$$N = \sigma k m$$

In deze formule is N het aantal reacties per seconde, σ is de “werkzame doorsnede” van de reactie, k is de fluxdichtheid van de bundel: dat is het aantal invallende deeltjes per oppervlakte-eenheid en per tijdseenheid ; m is het totale aantal doeldeeltjes die door de bundel gezien worden.

Uit de bovenstaande formule volgt dat als N gegeven is in de eenheid “(aantal reacties) per seconde”, en k is gegeven in de eenheid “(aantal invallende deeltjes) per vierkante meter per seconde”, terwijl m dimensieloos is (een aantal doeldeeltjes), dat σ de eenheid “vierkante meter” moet hebben. *Werkzame doorsneden hebben dus als eenheid een oppervlakte*. In SI eenheden is de eenheid van oppervlakte natuurlijk de vierkante meter, maar de werkzame doorsneden in kernreacties zijn veel en veel kleiner. Men heeft een specifieke eenheid voor werkzame

doorsneden gedefinieerd: de *barn*. Een barn is 10^{-28} m², de oppervlakte van een vierkantje dat 10^{-14} m op 10^{-14} m meet, ietwat groter dan de doorsnede van een atoomkern. Een barn is gelijk aan honderd vierkante fm (femtometer, of Fermi).



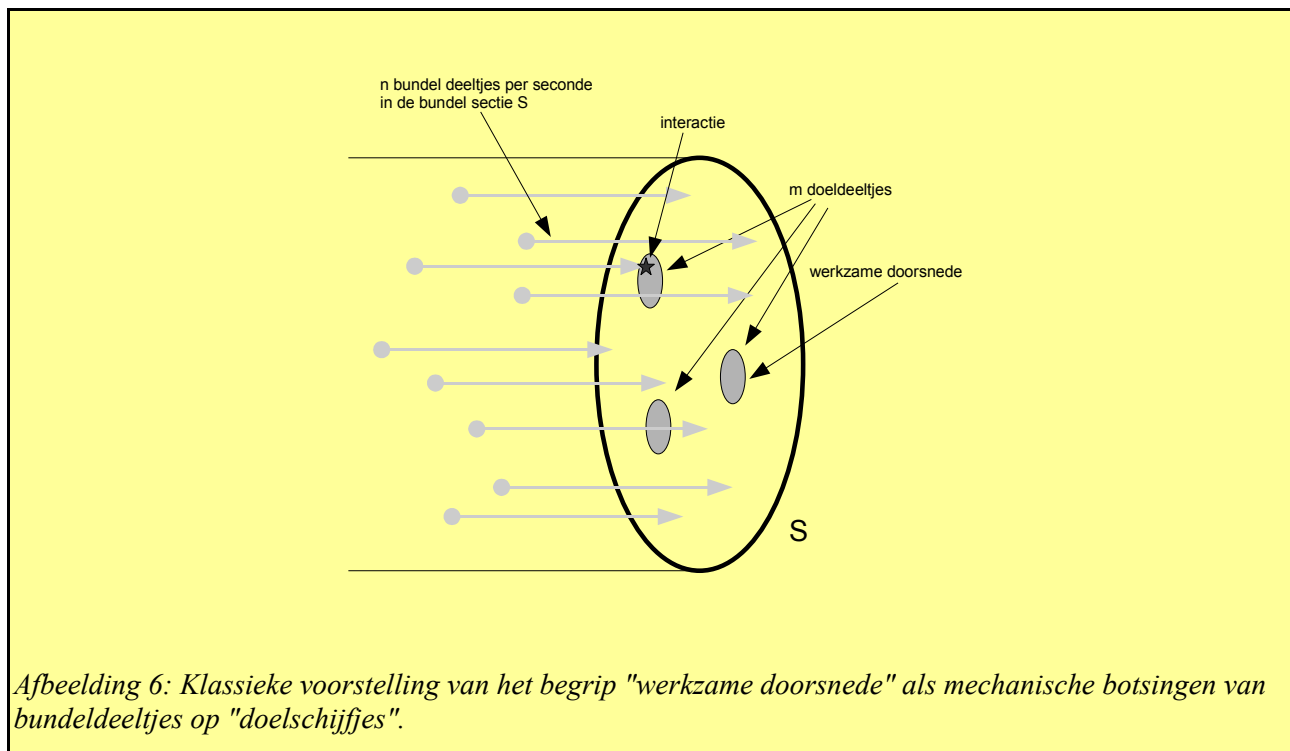
Afbeelding 5: Voorstelling van het begrip "werkzame doorsnede" wanneer een bundel invallende deeltjes interageert met een laag materie.

Indien men gewone mechanica zou gebruiken, en men zou een bundel invallende deeltjes als een bundel biljartballen beschouwen, die invallen op stilstaande voetballen, dan kan men heel gemakkelijk aantonen dat de "werkzame doorsnede" van de interactie "biljart bal botst op voetbal" ongeveer gelijk moet zijn aan de doorsnede van een voetbal. Inderdaad, veronderstel een fluxdichtheid van 1 inkomende biljartbal per vierkante meter per seconde, en veronderstel dat er zich, in die vierkante meter, juist 1 voetbal bevindt. De kans dat de biljartbal de voetbal raakt, is gelijk aan de verhouding van de doorsnede van de voetbal op 1 vierkante meter. Als er drie voetballen in die vierkante meter aanwezig zijn, is de kans om een voetbal te raken drie keer groter, en als er vijf biljartballen per seconde binnenkomen, is de kans per seconde om een voetbal te raken vijf keer groter. Dit klassieke beeld van het begrip "werkzame doorsnede" wordt aanschouwelijk gemaakt in figuur 6. We zien dus dat de werkzame doorsnede gelijk is aan de doorsnede van de voetbal ; in feite iets groter, omdat de biljartbal ook een zekere afmeting heeft, en als het centrum van de biljartbal dus rakelings de voetbal mist, kan er toch nog een botsing zijn. De eerste geleerden die probeerden de werkzame doorsneden van interacties van neutronen op sommige nucliden waar te nemen, verwachtten zich dus aan werkzame doorsneden van de orde van grootte van de kern afmetingen (enkele fm in het kwadraat). Bleek dat sommige reacties een werkzame doorsnede hadden die veel groter was dan de doorsnede van een atoomkern, en een van die geleerden, Oppenheimer, riep in het Engels uit: "it's as big as a barn!" (het is zo groot als een schuur!)²⁰

We hebben gezien dat het aantal kernreacties per seconde afhangt van hun botsingsenergie ; dat is de kinetische energie van de invallende deeltjes. Een nuclide reageert anders wanneer zeg maar een neutron er traag op invalt dan wanneer dat neutron er heel energetisch op inslaat. *Als dusdanig is de*

²⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Barn_%28unit%29

werkzame doorsnede van een gegeven kernreactie meestal gegeven als een functie van de energie van het invallende deeltje²¹.



Afbeelding 6: Klassieke voorstelling van het begrip "werkzame doorsnede" als mechanische botsingen van bundeldeeltjes op "doelschijfjes".

We zullen voornamelijk geïnteresseerd zijn in kernreacties waarbij kleine deeltjes invallen op nucliden. Deze kleine deeltjes zijn voornamelijk neutronen, "alfadeeltjes" (He-4 nucliden) en protonen. Reacties waarbij zwaardere nucliden invallen op andere nucliden worden meestal bestudeerd met deeltjesversnellers, maar dat zijn meestal geen reacties die plaatsvinden in het kernenergie gebeuren maar eerder in het kader van fundamenteel wetenschappelijk onderzoek. Reacties worden meestal als volgt genoteerd:

"doelnuclide" ("invallend deeltje", "uitgaand deeltje") "resterende nuclide".

Het uitgaand deeltje kan ook gewoon een foton zijn. De werkzame doorsnedes voor vele nucleaire reacties zijn te vinden op de website van de National Nuclear Data Center in de Verenigde Staten²². Het volstaat van het doelelement aan te klikken, het juiste massagetal te kiezen, en een tabel mogelijke reacties verschijnt. Men klikt op de gewenste reactie, en de werkzame doorsnede van die reactie wordt getoond. Deze gegevens zijn heel serieus: het is de compilatie van verschillende metingen, op verschillende plaatsen ter wereld, gedurende tientallen jaren, samen met de schatting van hun fout, die uiteindelijk de mensen van het NNDC heeft laten beslissen wat de beste experimentele waarden zijn voor de werkzame doorsnedes.

Een deeltje dat invalt op een nuclide kan soms aanleiding geven tot verschillende mogelijke reacties. Net zoals in het geval van radioactief verval heeft men de keuze tussen het aangeven van een specifieke reactie, of het beschouwen van elke denkbare reactie. Bij elke keuze hoort een

²¹Het feit dat de werkzame doorsnede van interactie afhangt van de energie is een puur kwantum-mechanisch verschijnsel dat niet klassiek kan verklaard worden: inderdaad heeft de snelheid van het inkomende deeltje niets te maken met eventuele klassieke mechanische afmetingen van de doeldeeltjes.

²²<http://www.nndc.bnl.gov/sigma>

werkzame doorsnede, en de werkzame doorsnede die hoort bij “elke denkbare reactie” heet de *totale werkzame doorsnede*. Zij is gelijk aan de som van de werkzame doorsneden van alle deelreacties. Er zijn vele mogelijke reacties denkbaar, maar er zijn een aantal specifieke reacties die zo belangrijk zijn voor de rest van de tekst dat we ze hier expliciet vermelden. Het betreft reacties die met neutronen te maken hebben.

De eenvoudigste (maar heel belangrijke!) reactie tussen een nuclide X en een neutron is de zogenaamde *elastische botsing*. Zij wordt genoteerd:

X (n,n) X

Men kan zich die botsing een beetje indenken als de botsing tussen een tennisbal en een voetbal. Voor lage neutron energieën is het meestal zo dat de werkzame doorsnede onafhankelijk is van de energie, en dat de verstrooiing isotroop is (dat wil zeggen, de richting van het uitgaande neutron na botsing is volledig willekeurig, en onafhankelijk van de richting van het invallende neutron).

X (n,gamma) Y (of Y*)

Neutron absorptie. Een neutron valt in op een kern, en wordt in de kern opgenomen. Er wordt meestal ook een gamma foton uitgezonden. Soms is de resulterende kern nog in een aangeslagen toestand en worden er later nog wat meer gamma fotonen uitgestuurd, soms is de resulterende kern in zijn grond toestand. Y is een isotoop van X, met een massagetal een eenheid groter dan het massagetal van X. Voor lage energieën varieert de werkzame doorsnede meestal als $\frac{1}{\sqrt{E}}$ met de energie E van het invallende neutron. Dat wil zeggen, hoe lager de neutron energie, hoe gemakkelijker het neutron geabsorbeerd wordt: als de energie 4 keer kleiner is, wordt het neutron 2 keer zo gemakkelijk geabsorbeerd.

X (n,splijting)

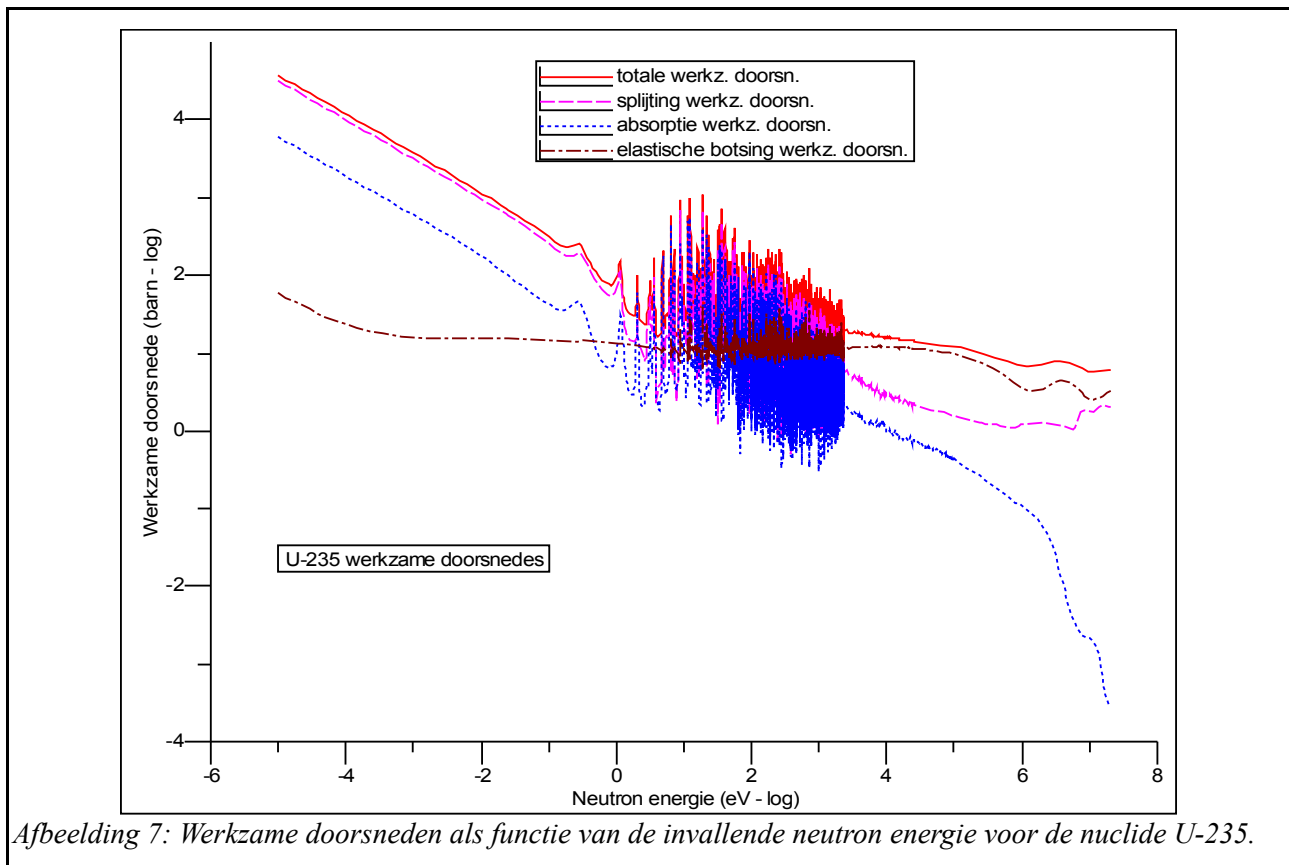
Neutron-geïnduceerde splijting. Een neutron valt in op een kern X, en geeft aanleiding tot een kernsplijting waarbij twee fissieproducten en enkele neutronen vrijkomen. Natuurlijk staat deze reactie generiek voor een hele waaier specifieke reacties met specifieke eindtoestanden die beschreven zijn door de twee welbepaalde splijtingsproducten. Er bestaan twee vormen van deze reactie. Sommige werkzame doorsneden van splijtingsreacties nemen pas een niet-verwaarloosbare waarde aan boven een zekere energie van het invallende neutron (men noemt die energie de *drempel energie* voor de reactie). Maar de meest interessante gevallen zijn de splijtingsreacties die een werkzame doorsnede verschillend van nul hebben bij lage energieën van het invallende neutron. Indien dat trouwens het geval is, dan gaat die werkzame doorsnede meestal ook afhangen van de energie volgens $\frac{1}{\sqrt{E}}$, met andere woorden hoe kleiner de neutron energie, hoe groter de kans op een splijtingsreactie. Nucliden die een geïnduceerde splijtingsreactie met trage neutronen kunnen ondergaan, heten *splijtbare nucliden*.

In afbeelding 7 vinden we een (logaritmische) voorstelling van enkele belangrijke werkzame doorsneden in U-235 als functie van de energie van het invallende neutron. Observeer aan de linkerkant van de grafiek de ongeveer vlakke werkzame doorsnede voor de elastische botsing, terwijl zowel de absorptie als de splijtingswerkzame doorsnede dalen zoals $\frac{1}{\sqrt{E}}$ (in een logaritmische voorstelling is dat een dalende rechte lijn met helling $\frac{1}{2}$). Tussen de 1eV en de 10 000 eV zijn er hele vele pieken op de werkzame doorsneden. Dat is wat men het resonantie gebied noemt.

Men kan een gegeven kernreactie tussen een invallend deeltje van een gegeven energie en een doelkern nauwkeuriger beschrijven een specifieke eindtoestand aan te geven met extra parameters.

Indien er bijvoorbeeld een deeltje vrijkomt in de reactie, is de hoek waaronder dat deeltje wordt uitgezonden, zo een parameter. Men kan nu de werkzame doorsnede aangeven voor het geval die parameter (hier, de hoek van het uitgezonden deeltje) een bepaalde waarde aanneemt. Dat worden *differentiële werkzame doorsneden* genoemd. Het zijn functies die niet enkel afhangen van de energie van het invallende deeltje, maar ook van de extra parameter(s) die we gekozen hebben om de eindtoestand verder te beschrijven.

Wat men dient te onthouden is dat kernreacties door een relatief eenvoudige klasse van gegevens



volledig worden beschreven. In het geval van radioactief verval zijn dit de kans per tijdseenheid om een bepaalde vervalreactie te ondergaan, en in het geval van kernreacties zijn dit de werkzame doorsneden. Deze gegevens zijn experimenteel bepaald en zijn publiek beschikbaar voor een hele grote klasse kernreacties, en onder meer voor zowat alle reacties die ons aanbelangen in het kernenergie gebeuren²³. Gezien kernreacties niet afhangen van druk, temperatuur of omgeving, beschrijven deze gegevens ongeveer alles wat er te beschrijven valt betreffende de natuurkunde van het nucleaire gebeuren. Dit is een heel interessante situatie om een technologie op te baseren: we kennen, op nucleair vlak, alles wat er dient gekend te zijn om het nucleaire aspect van het gebeuren goed te voorspellen. Er zijn geen echte verrassingen, en alles is in principe berekenbaar, uitgaande van de experimentele waarden van de werkzame doorsneden. Dit is totaal verschillend in de scheikunde bijvoorbeeld. In de mate dat men de chemische kinetica kent voor een aantal reacties,

²³Het is wel zo dat voor de kleine actiniden zoals americium en curium, niet alle werkzame doorsneden met grote nauwkeurigheid zijn gemeten. Er zijn wetenschappelijke programma's aan de gang die trachten de nauwkeurigheid van de meetresultaten te verbeteren.

men weet nooit of het toevoegen van een extra stof geen katalytische werking gaat hebben en de hele kinetica veranderen. Maar het feit dat kernen onafhankelijk zijn van hun omgeving, ten eerste omdat ze van elkaar geïsoleerd zijn door middel van de elektronenwolken, en ten tweede omdat de energieën die in het spel zijn zoveel boven elke gewone thermische energie liggen, dat druk en temperatuur geen rol spelen, maakt dat de voorspellingen van kernreacties heel eenvoudig zijn, en dus door een kleine hoeveelheid experimentele gegevens (de werkzame doorsneden) volledig beschreven worden.

We kunnen ons afvragen of er reacties mogelijk zijn zonder externe inbreng van (bewegings-) energie en waarbij energie vrijkomt. Kernreacties moeten het energie behoud respecteren: *de som van de bindingsenergieën van de eindproducten moet groter zijn dan de som van de bindingsenergieën van de initiële producten, verminderd met de eventuele bewegingsenergie van die initiële producten.* Zijn zulke reacties mogelijk met nucliden die we in de natuur vinden? Het antwoord is ja. Omdat in kernreacties de som van protonen en neutronen niet verandert (neutronen kunnen wel in protonen worden omgezet en vice versa via bèta verval), is een goede boekhoudkundige grootheid: *de bindingsenergie gedeeld door het massagetal.* Men kan die grootheid bestuderen voor elke nuclide, en een algemene tendens als functie van het massagetal is dan duidelijk²⁴. Het blijkt dat de grootste bindingsenergie (per proton of neutron) voorkomt in nucliden met een massagetal rond de 50-60. De nuclide met de hoogste bindingsenergie per proton/neutron is Fe-56, gewoon ijzer. Hele lichte kernen, en hele zware kernen, hebben een kleinere bindingsenergie (per proton of neutron). *Indien men dus lichte kernen kan “samensmelten” tot zwaardere (tot aan Fe-56), of zware kernen kan “splijten”, dan verhoogt de bindingsenergie van het geheel, en komt er dus energie vrij.* Maar dat is in theorie: de reactie moet nog echt bestaan ook! Blijkt dat de natuur ons een handje helpt in het geval van de splijting: sommige nucliden (niet veel!) kunnen gemakkelijk tot splijten gebracht worden, door interactie met een traag neutron. Sommige doen het zelfs een beetje spontaan. Het is op die reactie dat het kernenergie gebeuren is gebaseerd.

Laten we even naar de energie balans kijken bij enkele nucleaire reacties. Een typische reactie is de neutron absorptie door de boor-10 nuclide, wat ongeveer 20% uitmaakt van natuurlijk boor (de andere 80% is boor-11: als we een staal natuurlijk boor hebben, is een vijfde van de aanwezige nucliden, boor-10, en vier vijfde, boor-11). B-10 ondergaat de volgende (thermische) neutron vangst reactie:

B-10 (n,alfa) Li-7

De inkomende producten zijn dus een B-10 atoom en een neutron, en de uitgaande producten zijn een He-4 atoom en een Li-7 atoom. De bindingsenergieën van de uitgaande producten verminderd met de bindingsenergieën van de ingaande reagentia geeft ons de energie die vrijkomt in de reactie. Men kan gemakkelijk nagaan dat men even goed de balans kan maken met de massa overschotten (of beter: hun energie equivalent). *Als we de (energie equivalenten van de) massa overschotten van de reagentia verminderen met de (energie equivalenten van de) massa overschotten van de uitgaande producten, dan vinden we de energie die vrijkomt in de reactie.*

Boor-10: massaoverschot is 12.0507 MeV ; neutron: 8.0713 MeV ; He-4: 2.4249 MeV ; Li-7: 14.9081 MeV. De balans geeft ons dus:

$$12.0507 \text{ MeV} + 8.0713 \text{ MeV} - 2.4249 \text{ MeV} - 14.9081 \text{ MeV} = 2.789 \text{ MeV.}$$

²⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Mass_defect

De energie die vrij komt bij deze reactie is 2.789 MeV. Deze energie kan zich manifesteren onder de vorm van *de bewegingsenergie van de uitgaande deeltjes* (de He-4 en de Li-7 kernen) ; er is ook een vorm van deze reactie (in feite de meest voorkomende vorm, in 93% van de gevallen) waar een deel van deze energie gebruikt wordt om *een gamma foton* uit te zenden van 0.48 MeV. Er schiet dan nog $2.789 \text{ MeV} - 0.48 \text{ MeV} = 2.31 \text{ MeV}$ over voor de bewegingsenergie van de uitgaande deeltjes. Boor wordt gebruikt als neutronen absorptie middel, zowel om de reactiviteit van reactoren te regelen als in de stralingsbescherming ; de reactie wordt ook gebruikt in neutronendetectors om de aanwezigheid van thermische neutronen te detecteren.

Het samensmelten van lichte kernen is ook wel mogelijk in principe, maar die reacties zijn veel moeilijker te realiseren. De werkzame doorsneden zijn vrij klein, en enkel maar significant als de invallende energie van de deeltjes vrij groot is. Het is de problematiek van de zogenaamde kernfusie, waar veel onderzoek naar gebeurt, maar nog niet operationeel zal zijn binnen de 50 volgende jaren. Niettemin is het dat soort reactie die de zon laat schijnen! Zonne energie komt voort van de fusie van waterstof, hoewel dat een reactie is die enkel maar plaats vindt in heel extreme omstandigheden. Op aarde is men niet zo ambitieus, en tracht een “gemakkelijker” fusiereactie waar te maken: deuterium/tritium fusie.

2.2 Ioniserende straling in materie: principes.

Chemische veranderingen worden bepaald door de elektronenwolken van de atomen, moleculen en kristallen. Zij worden gedreven door energieveranderingen van de orde van fracties van een elektronvolt tot enkele elektronvolt, en zijn elektromagnetisch van aard: het is de elektromagnetische wisselwerking tussen elektronen onderling en de kernladingen die de energieniveaus bepaalt van de verschillende configuraties. Nucleaire reacties worden gedreven door energieveranderingen van de orde van miljoenen elektronvolt en zij worden door “kernkrachten” bepaald. Hoewel chemische veranderingen geen enkele invloed kunnen uitoefenen op kernreacties, hebben kernreacties natuurlijk wel het potentieel om (heel veel) chemische reacties te beïnvloeden. Maar hiervoor dient er natuurlijk wel een koppeling plaats te vinden tussen een nucleair fenomeen en de chemische structuren zoals moleculen. Er zijn verschillende paden via dewelke het nucleaire gebeuren een invloed kan hebben op het chemische gebeuren.

Het eerste pad is dat van *de chemische transmutatie*. Een lange tijd onmogelijk geacht, is het zo dat zowel radioactief verval als nucleaire reacties nucliden kunnen veranderen in andere nucliden. Indien de eindnuclide een andere lading heeft (een ander aantal protonen bevat) dan de begin nuclide, dan verandert die nuclide van chemisch element. Binnenin een chemische structuur zoals een molecule is het duidelijk dat de verandering van de chemische aard van een atoom een grote invloed gaat hebben op de chemische toestand van die molecule en in de meeste gevallen gaat die molecule dan ook uiteenvallen.

Het tweede pad is het pad van *de elastische nucleaire botsing*. Indien het invallende deeltje een hoge energie heeft, dan kan dat de doelnuclide in de botsing een vrij grote snelheid geven. Indien de doelnuclide deel uitmaakt van een molecule, wil dat meestal zeggen dat de nuclide “uit de molecule weggeslagen” wordt. Er blijft dus een soort geamputeerde molecule over, die natuurlijk chemisch niet meer dezelfde is als toen ze nog de doelnuclide bevatte.

Het derde pad is het meest voor de hand liggende: elektromagnetische *interactie*. Nucliden zijn geladen, en elektronen en positronen (die bijvoorbeeld bij bèta verval respectievelijk anti-bèta verval vrijkomen) zijn ook geladen deeltjes. De bewegingsenergie van die geladen deeltjes is vrij

groot, en bij het voorbijgaan aan of het doorkruisen van een elektronenwolk, gaat er een elektromagnetische interactie plaats vinden die een deel van de bewegingsenergie van het snel bewegende geladen deeltje kan overmaken aan een elektron van de wolk. Deze energie kan voldoende zijn om dat elektron aan de wolk te onttrekken, of om de elektronenwolk in een aangeslagen configuratie te brengen. Als dusdanig is de elektronenwolk nu veranderd, en dat kan aanleiding geven tot een chemisch effect: de molecule valt uiteen, of een chemische reactie met een andere molecule wordt aangegaan.

Gamma fotonen zijn niet elektrisch geladen. Niettemin kunnen ze ook met een elektronenwolk reageren op drie verschillende wijzen. De eerste manier van reageren is het *foto-elektrisch effect*: de elektronenwolk absorbeert het gamma foton, en een elektron van de wolk “krijgt” de energie van het foton (en wordt dus uitgestoten met ongeveer die energie). De tweede manier is *Compton verstrooiing*: het gamma foton wordt geabsorbeerd door een elektron van een elektronenwolk, dat elektron wordt vrijgemaakt, maar in het proces komt ook een ander gamma foton vrij van lagere energie. Tenslotte is de derde manier van interageren: het gamma foton verdwijnt, en een elektron en positron ontstaan “uit het niets” (*paar creatie*).

Gezien de hoge energieën van nucleaire reacties ziet men snel in dat een enkele nucleaire reactie aanleiding kan geven tot vele chemische effecten.

Het zijn de chemische effecten van kernreacties die verantwoordelijk zijn voor de biologische effecten ervan, evenals voor een fenomeen dat “stralingsschade” wordt genoemd – het beschadigen van functionele materialen wanneer ze aan hoge dosissen straling worden onderworpen. Het zijn dezelfde fenomenen die ons ook in staat stellen apparatuur te bouwen die nucleaire straling heel nauwkeurig kan meten.

2.2.a Interactie van gamma straling met materie

Zoals reeds vernoemd, kunnen (gamma) fotonen op verschillende manieren interageren met de materie:

- Via het *foto-elektrisch effect*: de elektronenwolk absorbeert volledig het foton, en de energie van het foton wordt bijgevolg opgenomen in de elektronenwolk ; om die energie terug vrij te maken en de elektronenwolk terug in zijn grondtoestand te plaatsen, wordt meestal een electron uitgezonden dat wegloopt met de energie van het foton, verminderd met de bindingsenergie in de elektronenwolk. Er is dus een drempel energie voor het foto-elektrisch effect: het foton dient minstens de bindingsenergie van een elektron te hebben. Aangezien die energie meestal van de orde van enkele elektronvolts is, is dat niet echt een probleem voor gammafotonen (die energieën van KeV of MeV hebben): voor de gangbare energieën kan men haast zeggen dat het elektron de energie overneemt van het foton.. Na een interactie via het foto-elektrisch effect is er dus een foton verdwenen, en een (snel) elektron vrijgemaakt.
- Het *Compton effect* lijkt op het foto-elektrisch effect, behalve dat het foton slechts een deel van zijn energie afstaat, en dat deel wordt overgedragen aan het elektron. We krijgen dus netto: een energetisch foton wordt omgezet in een minder energetisch foton en een vrijgeslagen elektron. Men noemt het Compton effect soms wel: incoherente verstrooiing.
- *Paar creatie*. Indien het foton een energie heeft boven de 1.022 MeV, dan kan het foton zich in de buurt van een atoom omzetten in een elektron-positron paar. De energie die het foton bezit boven de 1.022 MeV wordt dan als bewegingsenergie gelijk verdeeld over de twee

nieuwe deeltjes. Het positron zal echter niet ver geraken in materie. Het zal heel snel een annihilatie ondergaan met een elektron van de materie, waarbij twee fotonen vrijkomen van 511 KeV. Het netto effect van paar creatie is dus: een foton verdwijnt, twee ioniserende deeltjes ontstaan waarvan een omgezet wordt in twee gammafotonen.

- *Nucleaire interactie*: hoewel vrij zeldzaam, is het mogelijk voor een gamma foton om met een atoomkern te interageren. De meest voor de hand liggende wijze is aanslag van de nuclide: indien het foton net de goede energie heeft om een nuclide van zijn grondtoestand naar een van zijn aangeslagen toestanden te brengen, dan kan het foton geabsorbeerd worden door de kern die zich dan in een aangeslagen toestand bevindt. Die kern kan zijn overvloedige energie dan kwijt op verschillende manieren:
 - Uitzending van een foton
 - Uitzending van een cascade van fotonen
 - Uitzending van een conversie elektron (de aangeslagen kern gaat zijn energie overdragen aan zijn elektronenwolk, en die gaat dan een elektron uitzenden)
 - Uitzending van deeltjes (protonen, neutronen...)

Een historisch voorbeeld was de waarneming in 1934 van de ontbinding van deuterium (H-2) in een proton en een neutron onder bestraling van fotonen met een energie gelijk aan hun bindingsenergie (2.62 MeV)

- *Elastische verstrooiing*: het gaat hem hier om verstrooiing van gamma fotonen, dat wil zeggen, de fotonen veranderen van richting maar niet van energie.

Voor al deze interactiewijzen kan men de werkzame doorsneden bepalen als functie van de energie van het foton, en als functie van de materie waarin deze fotonen zich voortbewegen²⁵. In figuur 8 worden deze resultaten getoond voor lucht ; het is niet de werkzame doorsnede, maar de *massa* attenuatie coëfficiënt²⁶ die getoond wordt. De totale attenuatie coëfficiënt (met en zonder verstrooiing, aangezien verstrooiing niet echt een attenuatie is) wordt getoond, evenals de bijdragen van het foto-elektrisch effect, de Compton verstrooiing en de paar productie die gesplitst wordt in twee bijdragen: paar productie bij de kernen, en paarproductie bij de elektronen.

Voor lood vinden we de attenuatie zoals getoond in afbeelding 9. We merken hier verschillende punten op. Ten eerste kan het bizar lijken dat, qua grootte orde, er niet veel verschil is tussen lucht en lood! Maar dat is omdat de attenuatie gegeven wordt als massa attenuatie coefficient. We dienen dus een laag lood van 1 gram per vierkante centimeter (dat is een laagje van een ongeveer een millimeter) te vergelijken met een laag lucht van 1 gram per vierkante centimeter (dat is ongeveer zeven meter lucht). Het Compton effect is vergelijkbaar voor de twee stoffen, maar voor lood is het foto-elektrisch effect bij lage energieën veel belangrijker. We zien trouwens “zaagtanden” in de foto-elektrische werkzame doorsnede voor lood, wat niet het geval is voor lucht. Die scherpe kanten komen overeen met de bindingsenergieën van sommige elektronen (de elektronen dicht bij de kern, die geen deel nemen in de chemische bindingen) in het lood atoom, en die bindingsenergieën kunnen vrij hoge waarden aannemen. Dat maakt dat lood een fotonenbundel beneden de 100 KeV (dat is 0.1 MeV), tien tot honderd keer sterker dempt dan lucht. Bij 1 MeV

²⁵Men vindt een programma om deze werkzame doorsneden te berekenen op:
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html> .

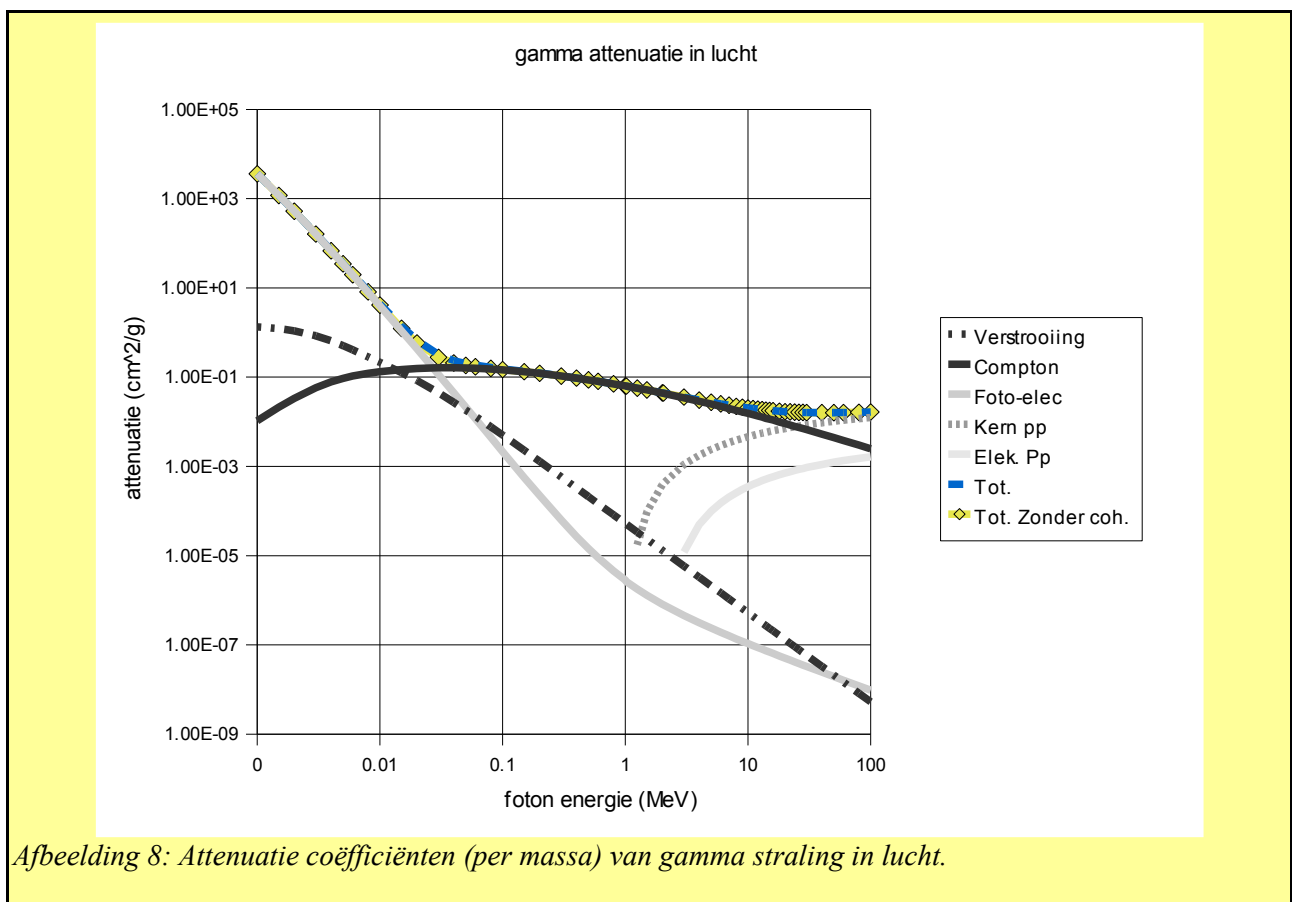
²⁶De massa attenuatie coëfficiënt wordt wat verderop gedefinieerd, en is gelijk aan de werkzame doorsnede, vermenigvuldigd met het aantal nucliden die men vindt in een gram van de betreffende stof.

zijn lucht en lood dan weer ongeveer vergelijkbaar, maar voor hogere energieën gaat lood weer harder absorberen dank zij wat meer paar productie.

Bij lucht is het Compton effect dominant tussen ongeveer 20 KeV en 10 MeV. Aan de lage kant domineert het foto-elektrisch effect, en aan de hoge kant, de paarproductie. Bij lood is het foto-elektrisch effect overheersend tot aan ongeveer 1 MeV en is de paar productie de belangrijkste bijdrage boven 5 MeV. Het Compton effect domineert enkel nog maar tussen deze twee grenzen.

Ten gevolge van een bestraling met fotonen, vinden we in de materie dus:

- bewegende elektronen (en eventueel positronen),
- fotonen van lagere energie,



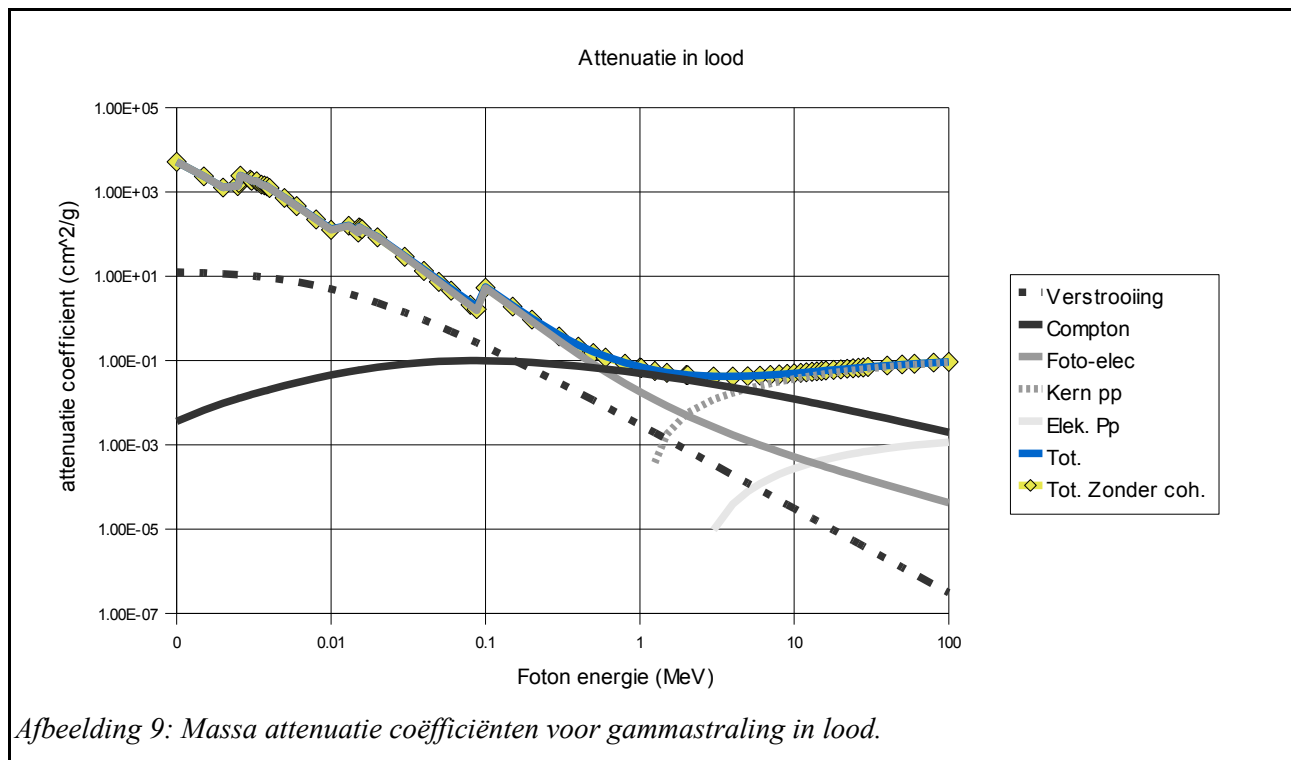
- fotonen van dezelfde energie maar met verschillende richting,
- eventueel andere deeltjes ten gevolge van nucleaire interacties (vrij zeldzaam).

Fotonen die geen interactie ondergaan hebben in de materie, gaan gewoon rechtlijnig door. Indien de totale werkzame doorsnede voor alle mogelijke interacties hierboven beschreven gelijk is aan σ_t , dan kan men een lineaire attenuatie coëfficiënt schrijven: $\mu = n_c \sigma_t$ waar n_c het aantal doeldeeltjes per volume eenheid is en gegeven door $n_c = N_A \frac{\rho}{A}$ waarbij N_A het getal van Avogadro is

($6.02 \cdot 10^{23}$ deeltjes per mol²⁷) en A het massagetal van de nuclide in kwestie (in gram per mol). ρ is de dichtheid van de materie (in gram per cm³, bijvoorbeeld voor water is de dichtheid gelijk aan 1 gram per kubieke centimeter). μ is gegeven in “per centimeter” als men centimeters als lengte eenheid gebruikt.

Van de originele bundel van n_0 invallende fotonen blijven er, na het doorlopen van een laag materie met dikte x (in centimeter), nog $n(x) = n_0 \exp(-\mu x)$ originele fotonen over.

Men kan hieruit berekenen dat de dikte $x_{1/2}$ die nodig is om de hoeveelheid invallende fotonen door 2 te delen, gelijk is aan $x_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu}$. Een aantal typische waarden voor de dikte bij halve absorptie voor fotonen van 1 MeV: lood 8.8 mm, ijzer 1.5 cm, water 9.9 cm, beton 4.6 cm.



Afbeelding 9: Massa attenuatie coëfficiënten voor gammastraling in lood.

De *massa attenuatie coëfficiënt* is gelijk aan de lineaire attenuatie coëfficiënt gedeeld door de dichtheid: $\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{A} \sigma$; het is deze coëfficiënt (voor verschillende werkzame doorsneden) die in de figuur 8 wordt getoond voor lucht en in figuur 9 voor lood.

Men schrijft soms de (totale) lineaire attenuatie coëfficiënt μ als de som van twee termen: de eerste is de *attenuatie coëfficiënt van botsing* (μ_{tr}), en de tweede is de *attenuatie coëfficiënt van diffusie* (μ_s). Men verdeelt de totale attenuatie coëfficiënt proportioneel over die twee, in verhouding tot de gemiddelde energieën van de elektronen en van de fotonen die vrijkomen. Let dus wel op: deze attenuatie coëfficiënten komen niet van werkzame doorsneden van specifieke reacties: ze zijn gewogen volgens de overgedragen energie.

Men dient echter goed op te letten: de attenuatie van de *originele* straling is niet onmiddellijk een mate voor de vermindering van de hoeveelheid ioniserende straling: er is veel “nieuwe” straling

²⁷Een *mol* is de hoeveelheid deeltjes met massagetal A die in A gram van de stof voorkomen. Het is eigenlijk niets anders dan het aantal keren dat de atoom massa eenheid in 1 gram gaat. Zie appendix A.

geproduceerd! Er zijn nu fotonen van lagere energie en snelle elektronen geproduceerd. Als dusdanig dient men de totale balans op te stellen van de straling op een zekere diepte in de materie ; we komen hierop terug bij de discussie van dosimetrische grootheden.

2.2.b Interactie van snelle elektronen met de materie

In tegenstelling tot fotonen, ondergaan elektronen “continu” een energieverlies in materie, die functie is van de materie en van hun energie. De grootheid die ons hier interesseert is het energieverlies dE per afgelegde weg dx :

$$S = \frac{dE}{dx}$$

Men noemt deze grootheid: *het remvermogen* van de materie op het elektron. De eenheid ervan is energie per afstand, bijvoorbeeld MeV/cm. Maar men kan het remvermogen delen door de dichtheid van de materie: S/ρ . We bekommen dan de eenheid: MeV cm² / g. Een remvermogen van 1 MeV cm² / g wil zeggen: als de elektronen door een laag materie zijn gegaan die 1 gram per vierkante cm voorstelt, dan hebben die elektronen 1 MeV verloren. Dat is een eenheid die bijvoorbeeld handig is als men met dunne lagen werkt, waar men weet hoeveel gram van een stof men heeft uitgesmeerd over een zeker oppervlak. Het is ook een grootheid die een belangrijke rol zal spelen in de dosimetrie, omdat enkele stellingen die grootheid gebruiken.

Het continue energieverlies van elektronen in de materie vindt zijn oorzaak in de ionisatie- en excitatie-processen die het elektron veroorzaakt langsheen zijn traject, evenals in de remstraling die de elektronen uitzenden ten gevolge van de interactie met de kernen. Elektronen die in de buurt van een atoomkern komen kunnen inderdaad gammastraling uitzenden. De aangeslagen atomen (ten gevolge van de excitatie processen) kunnen terug naar de grondtoestand keren, enerzijds door het uitzenden van een foton, of anders door het uitzenden van een elektron (zogenaamd Auger elektron).

Men kan S opsplitsen in een deel energieverlies door “botsing” (excitatie, ionisatie), en een complementair deel energieverlies door remstraling, het “radiatieve” deel van het remvermogen.

Hiernaast kunnen snelle elektronen soms kernreacties veroorzaken, maar dat is vrij zeldzaam.

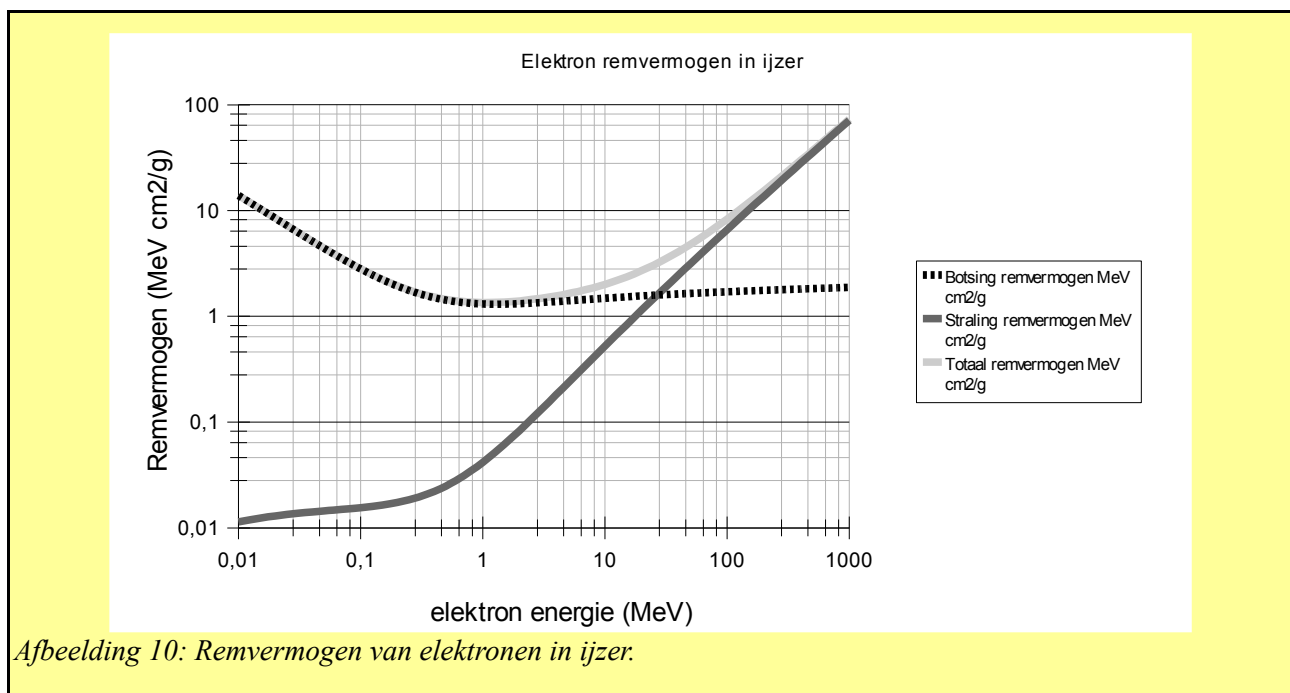
Tenslotte is er nog een andere interactie met de materie: *Cherenkov straling*. Elektronen die sneller bewegen dan de lichtsnelheid in een milieu²⁸ zenden een soort elektromagnetische schokgolf uit, net zoals een supersonisch vliegtuig een sonische schokgolf uitzendt. Dat geeft aanleiding tot zichtbaar licht (meestal blauw licht). Het is deze straling die de “blauwe gloed” van sterk radioactieve bronnen veroorzaakt.

Het gevolg van die “continue” energieoverdracht is dat men vanaf de start energie van een invallend elektron zijn energievermindering als functie van de afgelegde weg kan berekenen. Na een zekere afstand te hebben afgelegd, valt de energie van het elektron als dusdanig terug op nul, en het elektron stopt (en wordt geassimileerd in de materie). Een elektron in materie heeft dus *een eindig traject*. Onafhankelijk van hoeveel elektronen men in de materie schiet, na zekere diepte te hebben doordrongen, komt geen enkel van die elektronen verder. Dat is helemaal anders met gamma

²⁸Opmerking: natuurlijk kunnen elektronen niet sneller bewegen dan de snelheid van het licht in vacuüm, gezien Einstein’s relativiteitstheorie zoiets verbiedt. Maar in materie is de effectieve lichtsnelheid kleiner, en er is niets dat een deeltje verbiedt om sneller te gaan dan die effectieve lichtsnelheid.

fotonen. Bij gamma fotonen heeft men een bundel die in intensiteit vermindert, maar sommige fotonen komen ongehinderd door de materie. Een fotonen bundel wordt dus minder intens, maar de fotonen die overleven hebben nog steeds hun originele energie. In een elektronenbundel verliezen alle elektronen aan energie. Na een zeker parcours te hebben afgelegd, is de bundel niet minder intens geworden, maar zijn er evenveel elektronen en de elektronen zijn minder energetisch. Ze stoppen allemaal ongeveer op de zelfde diepte, omdat ze allemaal tot energie 0 zijn gereduceerd.

We tonen een resultaat in het geval van ijzer²⁹ in figuur 10. Zoals we kunnen vaststellen, is het botsingsremvermogen dominant bij elektron energieën onder de enkele MeV, en wordt het stralingsremvermogen dominant hierboven. Maar zelfs bij relatief lage elektron energieën is er toch nog wat stralingsremvermogen aanwezig, en dus productie van gamma straling.

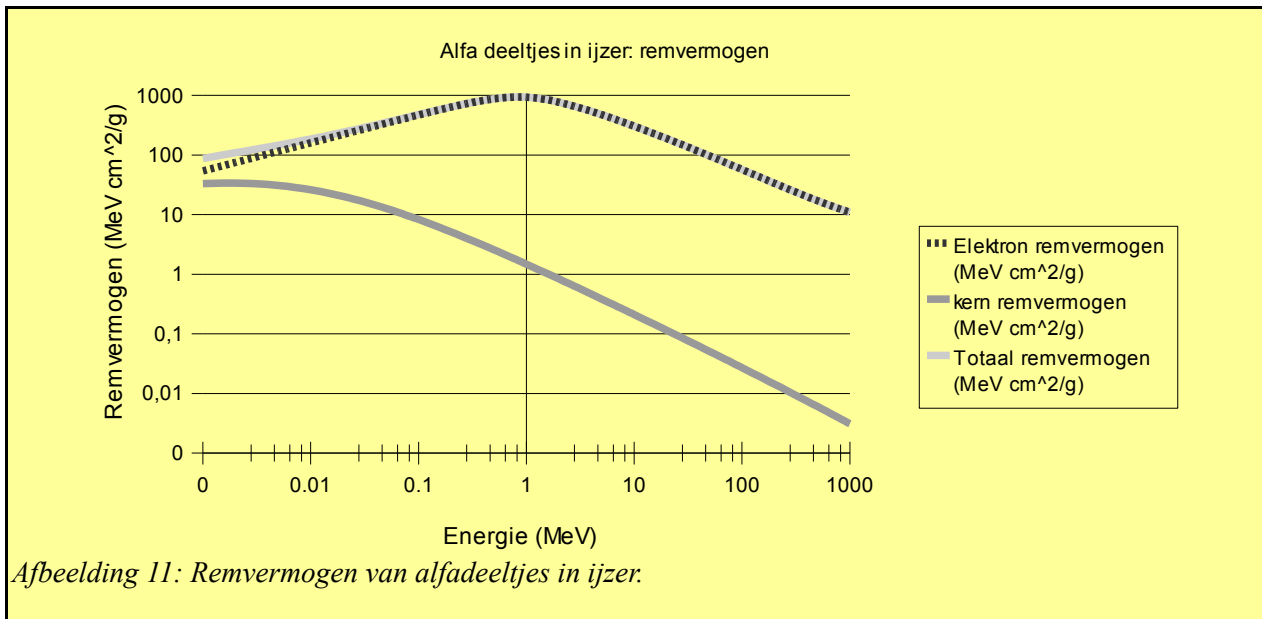


Net zoals fotonen in de materie snelle elektronen produceerde, dient men ook voorzichtig te zijn met de absorptie van elektronen in materie: er komen immers ook fotonen vrij bij het afremmen van elektronen: als dusdanig kan er nog een hoeveelheid ioniserende straling aanwezig zijn nadat de volledige elektronenbundel is tot stilstand gekomen. Dat zulk effect niet verwaarloosbaar is, kan men afleiden uit het volgende feit: een X-stralen apparaat om röntgen foto's te maken is niets anders dan een intense elektronenbundel die inslaat op een zwaar stuk metaal! De elektronenbundel wordt hierbij volledig tot stilstand gebracht, maar het radiatieve deel van het remvermogen is de bron van de X-stralen!

²⁹Men kan grafieken en tabellen voor het remvermogen van elektronen in verschillende stoffen bekomen op de volgende plek <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>.

2.2.c Interactie van alfadeeltjes met de materie

Alfadeeltjes zijn geladen deeltjes, en zijn ook nucliden (het zijn He-4 nucliden). Als dusdanig kunnen ze elektromagnetisch interageren, of ze kunnen een nucleaire interactie aangaan (elastische botsing, of andere). Gezien het echter zware deeltjes zijn, gaan alfadeeltjes geen aanleiding geven tot remstraling, en is hun elektromagnetische interactie beperkt tot het aanslaan en ioniseren van nabije elektronenwolken. Net zoals in het geval van de elektronen, zijn de interacties zo frequent, dat we een energieverlies per lengte-eenheid kunnen definiëren: $S = dE/dx$; die grootte, uitgedrukt in MeV/cm, kan ook weer omgezet worden in MeV cm²/g door S te delen door de

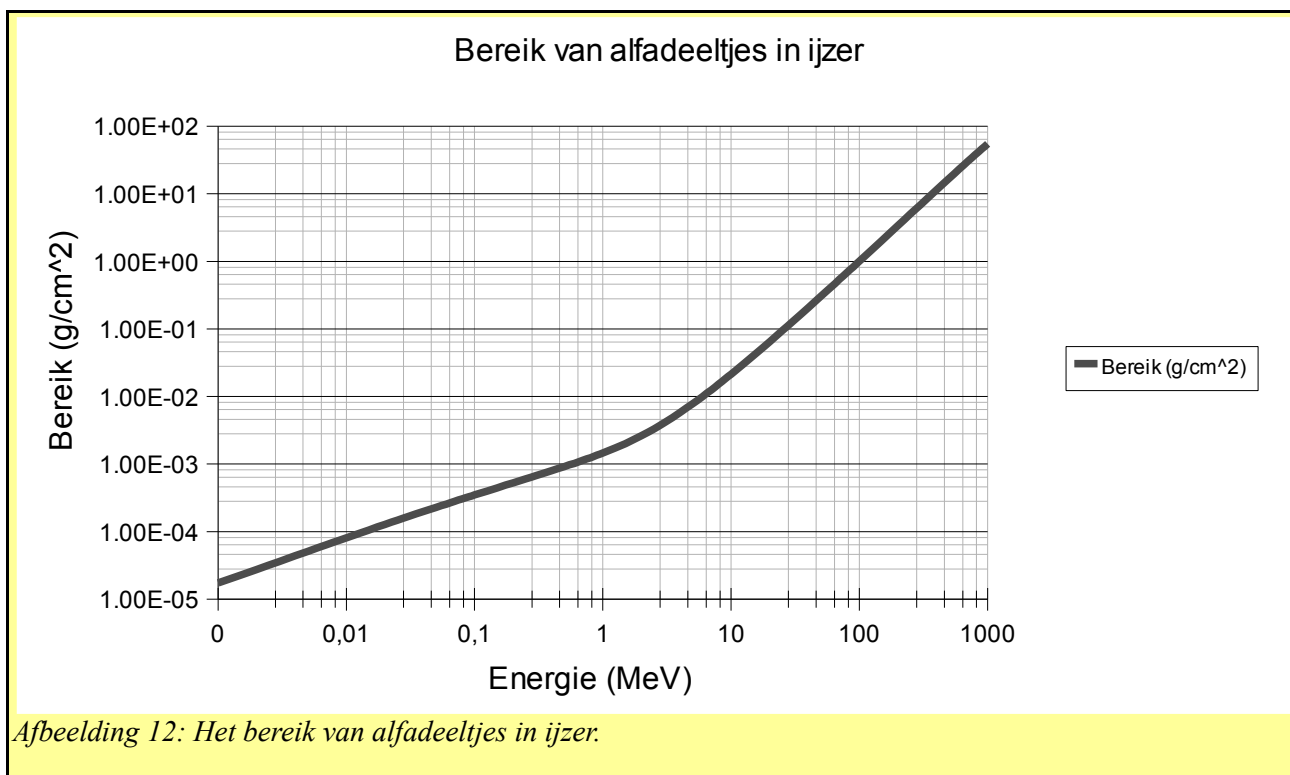


dichtheid van de materie. Net zoals bij elektronen hebben alfadeeltjes een eindig traject in materie, na hetwelk ze geen energie meer over hebben, en tot rust komen. Daarentegen, wanneer alfa deeltjes tot rust komen, worden ze niet echt door de materie geassimileerd zoals elektronen, maar worden ze helium atomen (gas).

Het remvermogen S van alfadeeltjes bestaat uit twee componenten: de elektronische en de nucleaire. Inderdaad kunnen alfadeeltjes ook nucleair interageren (elastische botsing met kernen bijvoorbeeld).

Als we het voorbeeld beschouwen van een alfadeeltje in ijzer³⁰, dan vinden we een remvermogen zoals weergegeven in figuur 11. We stellen vast dat het remvermogen van alfadeeltjes van zeg maar 1 MeV ongeveer duizend keer groter is dan het remvermogen van een elektron van 1 MeV, beide in ijzer. Dit toont aan dat alfadeeltjes heel veel ionisatie veroorzaken.

Alfadeeltjes raken niet ver in materie. Zoals we uit het bereik van alfadeeltjes in ijzer, getoond in figuur 12, kunnen zien, is bij 1 MeV het bereik ongeveer 1 milligram per vierkante centimeter. Een gram per vierkante centimeter komt overeen met een dikte van ongeveer 2 millimeter, dus 1 milligram komt overeen met een dikte van ongeveer twee micrometer. In andere materie is dat wat anders, maar de orde van grootte is correct: zelfs vrij energetische alfadeeltjes worden over enkele micrometers gestopt. Dat is trouwens een onmiddellijk gevolg van hun heel grote remvermogen: ze verspillen al hun energie over heel korte afstand. Alfadeeltjes verdwijnen echter niet: als ze tot stilstand komen, zijn het helium atomen (ze nemen heel snel een paar elektronen van de omliggende materie op). Als dusdanig kan men lokaal een ophoping van helium gas bekomen. Dat speelt een rol in de stralingsschade die alfadeeltjes veroorzaken in materialen. We komen hier nog op terug in hoofdstuk 7.



³⁰Op deze plek: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html> kan men gemakkelijk tabellen genereren en grafieken tonen die het remvermogen van alfadeeltjes als functie van hun energie weergeeft, in de materie naar keuze. Het is ook mogelijk om de reikwijdte van de deeltjes te berekenen en voor te stellen.

2.2.d Interactie van protonen met materie

Protonen gedragen zich volgens dezelfde principes als alfadeeltjes ; ze zijn alleen wat lichter en minder geladen³¹.

2.2.e Interactie van andere zware geladen deeltjes (nucliden) met materie

Het gedrag van alfadeeltjes en protonen is gelijkaardig aan het gedrag van andere snelle nucliden in de materie (zoals bijvoorbeeld fissieproducten). Er bestaat een heel goede simulator die vrij ter beschikking is om de eigenschappen van bewegende nucliden in materie te berekenen: <http://www.srim.org/> het bekende SRIM programma.

2.2.f Interactie van neutronen met materie.

Neutronen kunnen vele dingen doen in de materie. Alleen, het zijn op zich geen geladen deeltjes, en veroorzaken dus enkel ionisatie op indirecte wijze. *De enige interactiewijze die neutronen met materie kan ondergaan, is van nucleaire aard.* Men klasseert de interacties van neutronen in twee categorieën: verstrooiing en absorptie. Het verschil tussen beide is dat bij er zich verstrooiing een neutron in de eindtoestand bevindt, terwijl dat bij absorptie niet het geval is³². Neutronen interageren (zoals fotonen) “puntsgewijs” met materie, en men dient bijgevolg de werkzame doorsneden voor de verschillende mogelijke interacties te beschouwen. Even een lijstje van die interacties:

- *Elastische verstrooiing.* Dit is waarschijnlijk de meest voor de hand liggende interactie. Bij impact op een atoomkern van de materie, kan het neutron voldoende energie overdragen om van die atoomkern een snelbewegend zwaar geladen deeltje te maken (dat voor materiaalschade of ionisatie kan zorgen). Bij de botsing verliest een snel neutron dan evenveel energie als het afstaat aan de doelkern. Hoe lichter de atoomkern waarmee het neutron in botsing treedt, hoe groter de gemiddelde energie overdracht is. Het woord “elastisch” slaat op het feit dat de som van de bewegingsenergie voor en na de interactie behouden is gebleven.
- *Inelastische verstrooiing.* Lijkt op de elastische botsing, maar er is ook overdracht van energie naar de kern zelf, omdat de doelkern in een aangeslagen toestand raakt. De kern kan terug naar zijn grondtoestand door uitzending van een foton of door uitzending van een elektron van zijn elektronenwolk (interne conversie). Als dusdanig is de totale bewegingsenergie na de interactie kleiner dan de totale bewegingsenergie voor de interactie – vandaar de term “inelastisch”.
- *Radiatieve absorptie.* Een vrij veel voorkomende reactie is: de kern neemt het neutron op. De nieuwe kern (een neutron rijker) bevindt zich vaak in een aangeslagen toestand (want de bindingsenergie plus de kinetische energie van het neutron zijn in overschot), wat meestal

³¹Hier <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html> kan men gelijkaardige berekeningen maken, voor protonen.

³²Zelfs dat is niet helemaal waar. Fissie wordt beschouwd als een absorptie en niet als een verstrooiing, maar nochtans bevinden er zich ook enkele neutronen in de eindtoestand. Men kan eventueel opwerpen dat het niet *hetzelfde* neutron als het invallende is, maar dat stelt dan weer andere conceptuele problemen. Het is tenslotte een kwestie van nomenclatuur.

aanleiding geeft tot het uitzenden van een foton (of een elektron, via interne conversie). Vaak is de nieuwe nuclide een radioactieve nuclide. In dat geval spreekt men van *activatie van het materiaal* door neutronenbestraling.

- *Niet-radiatieve absorptie.* Zoals hierboven, maar de nieuwe kern raakt zijn energie kwijt door het uitzenden van een deeltje of verschillende deeltjes. Er kunnen een paar neutronen uitgezonden worden (men kan dan discussiëren of we te maken hebben met inelastische verstrooiing of niet...) of er kan een proton of een alfadeeltje uitgezonden worden. Een extreem geval is natuurlijk: *kernsplijting*. Hierbij komen ook wel wat neutronen vrij, maar kernsplijting is niettemin niet als een diffusie maar als een absorptie fenomeen geklasseerd.

Men kan voor neutronen, net zoals voor fotonen, een attenuatie coëfficiënt uitrekenen gebaseerd op de totale werkzame doorsnede van alle interacties die de neutronen kunnen ondergaan. We krijgen dan ook weer een exponentiële attenuatie van de originele neutron bundel intensiteit: $n(x) = n_0 \exp(-\mu x)$, als functie van de diepte in de materie. Maar ook hier geldt: verschillende andere deeltjes zijn ontstaan, waaronder mogelijk ook neutronen met andere energieën en andere richtingen. Men dient zorgvuldig de volledige “boekhouding” te maken van alle snel bewegende deeltjes die ontstaan ten gevolge van de doorgang van een neutronenbundel: fotonen, neutronen, alfadeeltjes, protonen, nucliden en elektronen.

2.3 Basisprincipes van een kernreactor.

2.3.a Splijting en de kettingreactie.

Natuurlijk uranium is een mineraal waarvan de atoomkernen veel energie bevatten, die kan worden vrijgemaakt door een proces dat *kernsplijting* (of fissie) wordt genoemd. Of beter, natuurlijk uranium bevat (essentieel) twee isotopen, U-235 en U-238, en de splijting is essentieel mogelijk voor U-235 ; U-238 kan het ook een beetje, maar enkel maar met snelle neutronen, en niet vaak. Jammer genoeg bevat natuurlijk uranium slechts 0.7% U-235. Het lijkt er op het eerste zicht op dat de energie, opgeslagen in U-238, niet direct toegankelijk is. Daar kan men een mouw aan passen...

De reactie die in U-235 gebeurt, is de volgende: als een neutron met een U-235 atoom botst, dan kan dat atoom in twee stukken (twee kleinere atomen, de zogenaamde *splijtingsproducten*) “ontploffend”... en een paar (2 of 3) snelle neutronen vrijgeven³³. Dat laatste is heel belangrijk, want we kunnen, als we slim zijn, proberen die vrijgemaakte neutronen te gebruiken om een volgend atoom U-235 te splitsen, enzovoort... In de mate dat zoiets lukt, spreekt men van een “*kettingreactie*” en een conglomeraat van materialen dat een kettingreactie kan ondergaan is een “*kritische structuur*”. Voor een stabiele kernreactie moeten we dus een kritische structuur bekomen, die zo is dat we precies 1 atoom U-235 splitsen met de vrijgemaakte neutronen van elk splitsend U-235 atoom.

De energie die vrijkomt door het ontploffende atoom U-235 wordt grotendeels overgemaakt aan de beweging van de splijtingsproducten, die botsen met andere atomen in de materie van de reactor en zo de gemiddelde bewegingsenergie of warmte van die materie verhogen. Die energie wordt dus omgezet in warmte. De energie die vrijkomt als een U-235 kern splitst is heel groot: ongeveer 200 MeV.

³³http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission

2.3.b Moderatoren

De neutronen die vrijkomen in een splijting van een U-235 atoom, zijn “snelle” neutronen. Ze bezitten een bewegingsenergie van de orde van enkele MeV. Met die neutronen kunnen verschillende dingen gebeuren, en we moeten er voor zorgen dat gemiddeld gezien, exact 1 neutron opnieuw aanleiding geeft tot een nieuwe splijting van een ander U-235 atoom. Het simpelste wat met een neutron kan gebeuren, is dat het aan het uranium ontsnapt aan de grens van de reactor. Maar neutronen kunnen in het uranium ook andere dingen doen dan een U-235 atoom splitsen, en bijgevolg verloren gaan. Zolang ze verstrooiing ondergaan is dat niet erg, ze bestaan nog steeds. Het zijn de absorptie reacties die een eind stellen aan het bestaan van een neutron.

Het probleem stelt zich dat in natuurlijk uranium, het grootste deel U-238 atomen zijn, en dat neutronen ook met U-238 kunnen interageren. Snelle neutronen kunnen soms ook een splijtingsreactie in U-238 doorvoeren, maar meestal worden ze gewoon *geabsorbeerd*. Trage neutronen kunnen enkel maar geabsorbeerd worden in U-238 en nooit een splijting veroorzaken. Snelle neutronen gaan minder gemakkelijk een U-235 atoom splijten dan trage neutronen en worden in verhouding gemakkelijker door U-238 geabsorbeerd, dus met snelle neutronen is er minder kans om een kettingreactie op gang te brengen dan met trage neutronen in uranium.

Hoe groter de reactor is, hoe “gemakkelijker” hij kritisch kan worden, want hoe kleiner de fractie is van de neutronen die ontsnappen. Niettemin is een zuiver blok natuurlijk uranium, van welke afmetingen ook, nooit kritisch, omdat het U-238 teveel snelle neutronen opeet om er nog 1 over te laten voor een splijtingsreactie van U-235, en de kans op een splijtingsreactie met het U-235 te klein is. We kunnen hier gemakkelijk een heel ruwe schatting van geven. Bij 1 MeV (grootte orde van de bewegingsenergie van neutronen als ze vrijgemaakt worden in een splijtingsreactie) is de absorptie werkzame doorsnede in U-235 zowel als in U-238 ongeveer gelijk aan 0.1 barn. De splijting werkzame doorsnede in U-235 is 1 barn. Er is in natuurlijk uranium 0.7% U-235 aanwezig, en als dusdanig gaat de gemiddelde splijting werkzame doorsnede gelijk zijn aan $0.007 \times 1 \text{ barn} = 0.007 \text{ barn}$, terwijl de gemiddelde absorptie werkzame doorsnede gelijk is aan 0.1 barn. Per splijting komen er gemiddeld 2.5 neutronen vrij, maar de kans om geabsorbeerd te worden is $0.1/0.007 = 14.3$ keer groter dan om een nieuwe splijting te veroorzaken. Een splijting zal dus niet steeds aanleiding geven tot een nieuwe splijting, en de kettingreactie “valt stil”.

Dat wil echter niet zeggen dat men met natuurlijk uranium geen kernreactor kan bouwen. Het blijkt namelijk dat als de neutronen traag genoeg zijn de kans om in U-235 een splijting te veroorzaken, vergroot en de kans om door U-238 geabsorbeerd te worden, in verhouding vermindert. Inderdaad, laten we dezelfde ruwe schatting maken, maar bij thermische energie (0.0253 eV). De absorptie werkzame doorsnede in U-238 is nu gelijk aan 2.7 barn en in U-235, gelijk aan 99 barn. De splijtingswerkzame doorsnede in U-235 is gelijk aan 585 barn. Als we nu de gemiddelde werkzame doorsneden uitrekenen, dan vinden we: gemiddelde absorptie = $0.993 \times 2.7 + 0.007 \times 99 = 3.4 \text{ barn}$. Gemiddelde splijting: $0.007 \times 585 = 4.1 \text{ barn}$. Als er per splijting bijgevolg 2.4 neutronen vrijkomen (er komen gemiddeld wat minder neutronen vrij als die van een thermische splijting komen dan van een snelle splijting), die in de verhouding 3.4 : 4.1 geabsorbeerd worden, respectievelijk een splijting veroorzaken, dan kan elke splijting gemakkelijk 1 of meer nieuwe splijtingen veroorzaken en de kettingreactie kan dus doorgaan. *Als we de 2 of 3 snelle neutronen, vrijgemaakt tijdens een splijting van een U-235 atoom, voldoende kunnen vertragen, zonder ze te verliezen, dan kan een structuur met natuurlijk uranium toch kritisch gemaakt worden.* Neutronen kunnen vertraagd worden door ze in contact te brengen met een licht materiaal: de neutronen botsen elastisch met de atomen in het materiaal, en dragen een deel van hun bewegingsenergie over aan het lichte materiaal tijdens de botsing. Hoe lichter de atomen van het materiaal zijn, hoe beter dit werkt. Maar ze

kunnen ook eventueel geabsorbeerd worden door het lichte materiaal, en dan is alle moeite voor niets geweest. Een materiaal dat dient om snelle neutronen te vertragen, heet een *moderator*. De meest voor de hand liggende moderator is water. De *waterstof* in het water is het lichtste element dat bestaat, en dus in principe de meest efficiënte moderator. Jammer genoeg kan waterstof ook neutronen absorberen. Niet veel, maar toch wel een beetje. De reactie is: H-1 (n,gamma) H-2 (ook wel D genoteerd), *deuterium*. Het blijkt dat als men water gebruikt als een moderator in natuurlijk uranium, dat het water net iets te veel neutronen absorbeert om het geheel kritisch te maken. Natuurlijk uranium en water samen kunnen nooit een kettingreactie opleveren, maar het scheelt niet veel.

2 miljard jaren geleden was het gehalte U-235 in natuurlijk uranium groter dan nu (omdat het U-235 sneller verdwijnt dan U-238: de halfwaardetijd van U-235 is kleiner dan die van U-238), en een mengeling van natuurlijk uranium en water kon dan wel een kernreactor vormen ; dat is trouwens ook gebeurd in Oklo in Gabon (Afrika)³⁴.

Andere moderatoren dan gewoon water kunnen eventueel wel goed genoeg de neutronen vertragen zonder ze te absorberen. Twee zulke materialen zijn: zwaar water en grafiet. Zwaar water is water waar de waterstof vervangen is door deuterium (H-2). In natuurlijk water (in de zee en de rivieren) zit een klein beetje zwaar water, dat men er kan uit halen. Met zwaar water of met (heel zuiver) grafiet kan men een kritische structuur (kernreactor) bouwen met natuurlijk uranium. Er bestaat een reactorontwerp van Canadese makelij, de CANDU reactor, die met natuurlijk uranium en zwaar water werkt.

Grafiet werd gebruikt in de eerste reactoren, en de fameuze Chernobyl reactor had grafiet als moderator, evenals de Windscale reactor. Met grafiet dient men op te letten want het kan gaan branden. Dat wil niet zeggen dat men met grafiet geen veilige reactor kan bouwen, maar het vraagstuk is wat ingewikkelder dan in het geval met water.

Inderdaad, we zien dat de moderator, met zijn capaciteit om neutronen te vertragen, een essentieel onderdeel vormt van een kritische structuur met natuurlijk uranium. Zonder moderator werkt de reactor niet. Hierop is een fundamenteel passief veiligheidsprincipe gebaseerd dat werkt in alle water en zwaar water reactoren: als de reactor te heet wordt, gaat het water koken en verdampen, en verdwijnt het dus uit de reactor. Het was de moderator, dus die is er nu niet meer, en de kettingreactie valt stil. Zo een reactor heeft, wat met noemt, een sterke negatieve temperatuurscoëfficiënt³⁵, en het is een van de sleutels tot de bouw van een intrinsiek veilige reactor. Grafiet gaat echter niet koken. Als het warm wordt werkt het wel een beetje minder goed als een moderator (het zogenaamde Doppler effect), maar dat effect wordt soms tegengegaan door een ander effect als men een dom ontwerp heeft gemaakt. Een grafiet-gemodereerde reactor kan heel heet worden als men geen extra mechanisme inbouwt om de reacties te beperken.

Een actief veiligheids- en controle mechanisme is het invoeren van een materiaal dat neutronen sterk absorbeert. Boor, cadmium en gadolinium zijn zulke materialen.

³⁴http://en.wikipedia.org/wiki/Natural_nuclear_fission_reactor

³⁵De negatieve temperatuurscoëfficiënt komt eigenlijk niet van het kokende water ; dat is een ultiem veiligheidsmechanisme. De negatieve temperatuurscoëfficiënt komt reeds tevoorschijn bij “gewone” functionering en heeft te maken met het ontwerp van de reactor. Het betekent dat als de temperatuur stijgt, de reactor aan lager vermogen gaat werken. Het ultieme veiligheidsmechanisme waar we het hier over hebben (het kokende water) heeft een negatieve “void factor” (void is Engels voor “leegte”) en betekent dat bij een vermindering van moderator, de reactie vermindert en zelfs stopt. Zoiets is het geval als de reactor “onder-gemodereerd” is. We komen hierop terug in hoofdstuk 4.

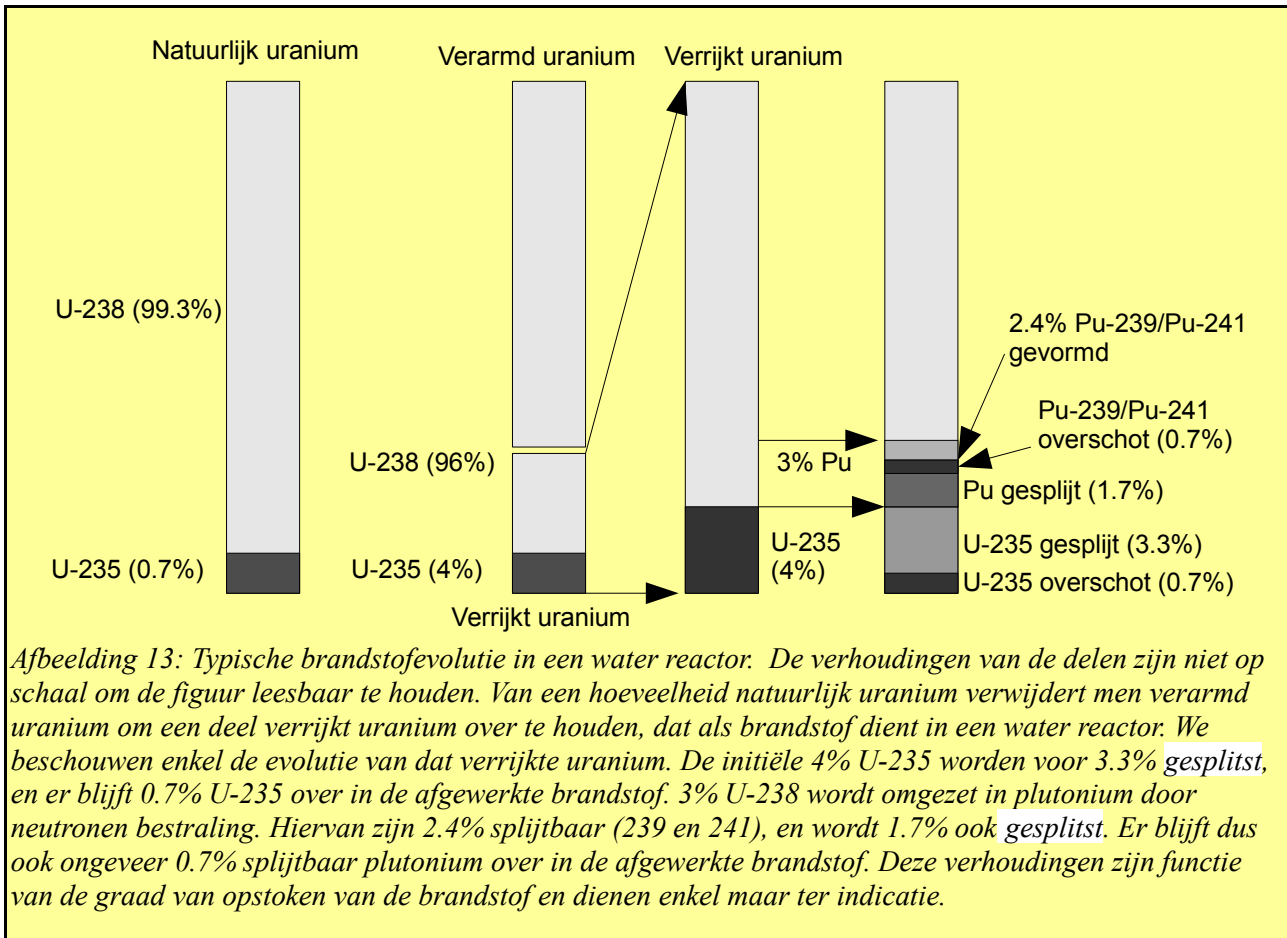
2.3.c Water als moderator en verrijking.

We hebben gezien dat gewoon water niet kan dienen als moderator in een kernreactor met natuurlijk uranium, en dat komt essentieel door het lage gehalte aan U-235. Het is echter mogelijk om een deel van het U-238 uit natuurlijk uranium te verwijderen. Wat overblijft, is een uranium waarin relatief minder U-238, en dus relatief meer U-235 zit: *verrijkt uranium*. Het U-238 dat is weggehaald, vormt *verarmd uranium*.

Met dit verrijkte uranium kan men wel een reactor bouwen met gewoon water als moderator. De meeste hedendaagse westerse reactoren zijn van dit type, en gebruiken verrijkt uranium waarin ongeveer 4% U-235 aanwezig is (in plaats van de natuurlijke 0.7%). In hedendaagse westerse reactoren die met gewoon water werken gebruikt men vaak keramische pastilles van verrijkt uranium oxide. Men gebruikt zelden metallisch uranium, omdat het smeltpunt van uranium metaal veel lager ligt dan het smeltpunt van de oxides. Er zijn nog andere fysische en chemische redenen om *uranium oxide* te gebruiken. Deze pastilles (een paar cm groot) worden in dunne *zirkonium* buizen gestopt. Zirkonium is een heel resistent metaal dat bovendien zo goed als geen neutronen absorbeert. Verschillende van die buizen worden in een assemblage samengebracht samen met een aantal boor-rijke staven, die beletten dat het geheel kritisch wordt. Verschillende van die assemblages worden ondergedompeld in het vat van de reactor, dat met water is gevuld, en het gedeeltelijk wegtrekken van de boor-rijke regelstaven laat het geheel toe om kritisch te worden.

De fissie-reacties die plaatsvinden in de uranium-oxide pastilles maken dat die pastilles warm worden, die warmen de zirkonium buizen op waarin ze zitten en die warmen het water op in het vat van de reactor. Een tweede koelwater circuit koelt dit reactor water af, en het koelwater dat gaat koken gaat dan de turbines aandrijven die generatoren aandrijven die elektriciteit produceren. Het water in het reactorvat zelf gaat niet onmiddellijk koken, omdat men dat water onder een veel hogere druk houdt dan de atmosferische druk. Maar bij oververhitting (of bij een eventuele lek in het drukvat) gaat dat water van het reactor vat natuurlijk wel koken en verdampen, en de reactie stopt dan vanzelf wegens gebrek aan moderator – als de controlekamer of de automatische veiligheidssystemen ondertussen al de regelstaven niet hebben teruggeplaatst. Als extra veiligheidsmiddel voorziet men vaak ook een boor-oplossing die men in het reactorvat kan dumpen: het boor absorbeert heel veel neutronen en de reactor is dan onmiddellijk “dood”.

2.3.d Brandstof evolutie in een water reactor.



Afbeelding 13: Typische brandstofevolutie in een water reactor. De verhoudingen van de delen zijn niet op schaal om de figuur leesbaar te houden. Van een hoeveelheid natuurlijk uranium verwijdert men verarmd uranium om een deel verrijkt uranium over te houden, dat als brandstof dient in een water reactor. We beschouwen enkel de evolutie van dat verrijkte uranium. De initiële 4% U-235 worden voor 3.3% gesplijst, en er blijft 0.7% U-235 over in de afgewerkte brandstof. 3% U-238 wordt omgezet in plutonium door neutronen bestraling. Hiervan zijn 2.4% splijtbaar (239 en 241), en wordt 1.7% ook gesplijst. Er blijft dus ook ongeveer 0.7% splijtbaar plutonium over in de afgewerkte brandstof. Deze verhoudingen zijn functie van de graad van opstoken van de brandstof en dienen enkel maar ter indicatie.

Na een tijd te hebben doorgebracht (enkele jaren) in een kernreactor, is de fractie U-235 in het uranium oxide afgenomen van 4% tot 0.7%, en er zijn 5% fissieproducten gevormd ; dat lijkt op het eerste zicht bizar – we verwachten ons aan 3.3%, nietwaar. Onder de hevige neutronenbestraling zijn er ook andere dingen gebeurd. We hebben gezien dat U-238 neutronen absorbeert. Het is echter zo, dat U-238 dat een neutron absorbeert, zich transformeert in U-239 dat snel (halfwaardetijd 23 minuten) een bèta-verval ondergaat en omgevormd wordt tot Np-239 (neptunium). Np-239 ondergaat een tweede bèta-verval (halfwaardetijd ongeveer twee dagen) en vormt om tot Pu-239 (plutonium). In feite is er een hele familie Pu isotopen die gevormd kunnen worden, want Pu-239 kan op zijn beurt ook weer een neutron absorberen. Maar het interessante is dat Pu-239 en Pu-241 zich ongeveer gedragen zoals U-235: ze zijn gemakkelijk splijtbaar door interactie met trage neutronen. Onder normale omstandigheden wordt er in een drukwater reactor ongeveer 3 % van het U-238 omgezet in Pu, waarvan 2.4 % Pu-239 en Pu-241 zijn, en dus “nieuwe brandstof” vormen waarvan er nog ongeveer 0.7% overblijft op het einde ; er is dus ongeveer 1.7% Pu “verstoekt” - in vergelijking met de 3.3% U-235 die is verstoekt. Een derde van de fissie reacties die in het uranium oxide gebeuren, is met Pu-239 en Pu-241, en twee derde is afkomstig van de originele U-235. Vandaar dat we 5% fissie hebben bekomen (1.7% Pu en 3.3% U-235) in een uranium oxide dat slechts 3.3% U-235 heeft verbruikt, en er nog 0.7% splijtbaar Pu samen met 0.7% splijtbaar U-235 overblijft.

We stellen hier twee dingen vast: ten eerste: onder neutronenbestraling kan U-238 (het aanvankelijk “inerte” uranium) omgevormd worden tot Pu-239 en Pu-241, wat opnieuw nucleaire brandstof oplevert en zelfs gedeeltelijk ter plekke wordt verbruikt. In een gewone water reactor is deze reactie maar marginaal aanwezig. Ten tweede: de definitief onbruikbare elementen in een “afgewerkte” brandstof bestaan uit de 5% fissieproducten, en een aantal “mislukkelingen”: 0.5% U-236, 0.6% Pu isotopen die niet splitsbaar zijn, en 0.1% “kleine” actiniden (Neptunium (Np), Americium (Am) en Curium (Cm)). Deze zijn geproduceerd bij neutronen absorptie zonder splitsing door plutonium of U-235.

Deze elementen vormen het uiteindelijke afval van het kernenergie proces³⁶. Het splijtbare Pu, de rest U-235 en het overgrote deel U-238 zijn in principe recupereerbaar. Het U-238 kan efficiënter in plutonium omgezet worden, maar niet in een gewoon water reactor. Men heeft hiervoor een ander type reactor nodig. Niettemin is het U-238 een potentiële brandstof door zijn potentiële omvorming tot plutonium, en het zou “zonde zijn” het als definitief afval te beschouwen.

2.3.e Brandstof cycli en afval – kweekreactoren.

Men kan de pastilles die uit een lichtwaterreactor komen, als “afval” beschouwen. Het is wat men de *eenmalige cyclus* (een rare benaming, gezien er niets “cyclisch” aan is) noemt, maar zoals uiteengezet hierboven, is dat serieuze verspilling, zowel van uranium als van “afval” ruimte. Niettemin is dat de brandstof politiek die wordt opgedrongen, zoals in Duitsland. Slechts ongeveer 5-6% van deze materie is echt afval, en 94-95% is recupereerbaar in principe. Men beschouwt dan trouwens ook de ongeveer tien keer grotere hoeveelheid verarmd uranium die uit de opwerking is vrijgekomen, ook maar als afval. Al dat materiaal bevat nog “nucleaire energie”.

De afgewerkte brandstof van een drukwater reactor bestaat dus grotendeels uit “inert” uranium (meestal U-238) dat enkel maar het afval volume “vergroot” met een factor van ongeveer 20 en eigenlijk niets doet aan de radiotoxiciteit van het afval. In de eenmalige cyclus bestaat het actieve deel van het afval uit 3 soorten bijdragen:

- het plutonium (12 kilogram per ton verrijkt uranium dat is opgebruikt)
- de kleine actiniden neptunium, americium en curium (1.3 kilogram per ton)
- de fissieproducten (48.7 kilogram per ton).

Deze opsplitsing is belangrijk omdat deze drie categorieën voor 3 verschillende problemen zorgen met het afval. De fissieproducten zijn meestal kort levend en zijn verantwoordelijk voor de hoge activiteit en het thermische vermogen gedurende de eerste (tientallen) jaren. Zij vormen ook de hoofdmoot en het essentiële afval product. De langstlevende fissieproducten hebben een halfwaardetijd van ongeveer 30 jaar³⁷. Dat wil zeggen dat de fissieproducten zelf de specifieke activiteit van natuurlijk uranium bereiken na 300 – 400 jaar. De kleine actiniden zijn maar in relatief kleine hoeveelheden aanwezig, maar het zijn lastige klanten. Het gaat hem om ongeveer 1.3 kilogram per ton afgewerkte verrijkte brandstof waarvan 0.7 kg Np-237, 0.5 kg Am-241 en Am-243 en 0.1 kg Cm-244 en Cm-245. Am-241 heeft een halfwaardetijd van 432 jaar, Am-243 een levensduur van 7370 jaar en Cm-244 een levensduur van 18 jaar. Het plutonium, tenslotte, is niet

³⁶Dat is zelfs niet helemaal waar, want alle actiniden kunnen gesplitst worden met snelle neutronen. Als dusdanig zijn zelfs de “mislukkelingen” potentiële brandstof in een snelle reactor.

³⁷Er zijn een aantal fissieproducten die in heel kleine hoeveelheden geproduceerd worden, en die een veel langere levensduur hebben, maar zij spelen een heel kleine rol in de radiotoxiciteit van het afval.

alleen een potentiële brandstof, het is ook een heel vervelende afvalstof, ten eerste omdat de levensduren lang zijn, en ten tweede omdat ze gedurende hun verval kleine actiniden produceren.

Men kan uitrekenen (we zullen dat trouwens doen!) dat de radio-toxiciteit van deze stoffen terugvalt op die van natuurlijk uranium erts na ongeveer 100 000 jaar. Als men het plutonium verwijdert, dan wordt die periode gereduceerd tot ongeveer 10 000 jaar. Dat is trouwens de huidige stand van zaken: als men, zoals in Frankrijk (en België, waar men dezelfde cyclus volgt) nu het geval is, het plutonium extraheert, dan heeft men uiteindelijk afval dat 10 keer minder lang “gevaarlijk” is dan wanneer men in de “open cyclus” werkt; bovendien heeft men het volume en het gewicht ervan met een factor van ongeveer 20 verminderd (maar niet de activiteit; men heeft gewoon het passieve deel gescheiden van het actieve deel). Als men nu ook nog op een of andere manier van de kleine actiniden kan afmaken, dan kan men die 10 000 jaar reduceren tot de 300 jaar van de fissieproducten.

Een veel ecologischer en economischer aanpak dan de open cyclus is bijgevolg van de afgewerkte brandstof te herwerken, het bruikbare deel te scheiden van het echte afval en te hergebruiken. Bovendien is het mogelijk om een veel groter deel van het U-238 (evenals het minstens 5 keer grotere volume verarmd uranium) om te zetten in splijtbaar plutonium, door speciale “kweekreactoren” te gebruiken met snelle neutronen.

We herinneren ons dat in natuurlijk uranium, de fractie U-235 (namelijk, 0.7%) veel te klein was om een kritische massa te kunnen vormen zonder moderator, gezien het merendeel (U-238) teveel neutronen absorbeerde. Dit was een van de belangrijkste redenen om een moderator te gebruiken in het begin: door de neutronen te vertragen, maakte men de relatieve kans om in U-238 geabsorbeerd te worden, kleiner ten opzichte van de kans om in het U-235 een splijtingsreactie te veroorzaken. Men kon dat bovendien maar met slechts enkele moderatoren, waaronder grafiet en zwaar water. Het was de voornaamste reden om een moderator te gebruiken: men diende de neutronen te vertragen omdat de kansen om een kettingreactie te bekomen in natuurlijk uranium dan groter werden. Gewoon water is niet goed genoeg als moderator, want de fractie neutronen geabsorbeerd door gewone waterstof (H-1) is net iets te groot om er nog genoeg over te laten voor het U-235 in natuurlijk uranium. Niettemin kan men gewoon water gebruiken als moderator, op voorwaarde dat men licht verrijkt uranium gebruikt, waar de fractie U-235 groter is. Het verrijgingsproces is nogal moeizaam, maar mogelijk. Het is nu wel zo dat als we een nog veel hogere verrijgingsgraad gebruiken, dat we helemaal geen moderator meer nodig hebben. Bij een voldoende hoge fractie van U-235 kan een kritische massa gevormd worden zonder moderator. Relatief gezien worden er dan meer neutronen in het U-238 geabsorbeerd, maar de kleinere fractie neutronen die overblijft, gecombineerd met de grotere fractie U-235, kan toch nog de kettingreactie onderhouden. Er is bovendien een subtiel voordeel: als U-235 een splijting ondergaat door reactie met een snel neutron, komen er gemiddeld meer neutronen vrij (naast de splijtingsproducten) dan voor de reactie met een traag neutron. Als dusdanig kan men relatief meer U-238 een neutron laten absorberen in een snelle reactor dan in een reactor met trage neutronen, en toch nog een kritische structuur bekomen. Het is op die manier mogelijk om een heel groot deel van het U-238 om te zetten in splijtbaar Pu-239. Nog beter, het blijkt dat Pu-239 onder splijting met snelle neutronen gemiddeld nog meer neutronen produceert dan U-235 in dezelfde omstandigheden. *Dus kan een snelle reactor op Pu-239 werken, en kan men hem “voeden” met U-238 dat ergens anders vandaan komt.* Het kan getoond worden, dat zo een reactor *meer* U-238 in Pu-239 kan omzetten, dan hij Pu-239 moet verbruiken voor zijn kettingreactie. Vandaar de term “kweekreactor”. *Eens men een “hart” uit Pu-239 heeft dat kritisch kan worden, kan men hem onbeperkt voeden met U-238, en er meer Pu-239 uithalen dan men erin heeft stopt.* Welk U-238? Ongeveer alle U-238: het aanvankelijk verarmde U-238 dat het “afvalproduct” was van de verrijgingsfabrieken, en het U-238 dat kan gerecupereerd worden in de gebruikte brandstof van de drukwater reactoren die actueel in functie zijn, kan omgezet worden in

Pu-239. Dat wil zeggen dat in plaats van uiteindelijk slechts 0.7% van het natuurlijke uranium te gebruiken (namelijk het U-235), we *alle* uranium kunnen gebruiken, door alle beschikbare U-238 (de 99% van natuurlijk uranium) in Pu-239 om te zetten. In de praktijk zijn er steeds wat kleine verliezen die het niet toelaten om echt alle U-238 in splijtbaar Pu-239 om te zetten. Maar al bij al is het in principe mogelijk om uit een gegeven hoeveelheid natuurlijk uranium op die manier 50 tot 100 keer meer (essentieel de verhouding tussen 100% van het uranium, en enkel 0.7% dat we nu gebruiken samen met het beetje Pu productie dat automatisch gebeurt en min de verliezen) energie te halen dan het geval is bij een “eenmalige doorgang”... even nadenken wat dit betekent: we kunnen, door het gebruik van kweekreactoren, uit het “afval” van onze huidige drukwater reactoren nog ongeveer 50 tot 100 keer de energie halen die we er al hebben uitgehaald... Als we dus al 30 jaar die reactoren draaiende hebben, dan volstaat het van het “afval” via kweekreactoren te herwerken, om met die materie dezelfde energie productie voor nog meer dan 1000-3000 jaar aan hetzelfde ritme door te voeren. *Zonder nieuw uranium!* Gewoon door herwerken van het bestaande “afval” dat vol zit met U-238. Als dat geen briljant idee is ! Met het spul dat we nu hebben, kunnen we nog een paar duizend jaar voort... Maar nog beter. We hebben reeds vernoemd dat de langdurige activiteit van het uiteindelijke nucleaire afval veroorzaakt wordt door een heel kleine fractie ervan, de kleine actiniden (americium en curium) eens het plutonium is verwijderd. Men kan hun activiteit verminderen, door ze bloot te stellen aan een snelle neutron flux, want dan kunnen die ook splijting ondergaan. Met andere woorden, een kweekreactor kan ook de activiteit van het uiteindelijke kernafval op lange termijn verminderen, indien dat om een of andere reden wenselijk zou zijn, en die “mislukkelingen” kunnen in een snelle reactor dan zelfs dienen als brandstof.

Is dat enkel een droom, of kan dat ook technisch verwezenlijkt worden? Dit idee was sinds de jaren 1950 de bedoeling van de Fransen (Francis Perrin, de toenmalige baas van de CEA³⁸, was daar de voorvechter van) – alleen was het op een zeker ogenblik niet duidelijk of die plutonium productie bedoeld was voor militaire of civiele doeleinden. De geschiedenis heeft aangetoond dat het in het begin inderdaad voor het Franse militaire programma was. Niettemin, in 1967 bouwden ze een eerste prototype om het principe te bestuderen: de reactor Rapsodie (24MWth) die geen elektriciteit produceerde, maar enkel als studieobject diende. Gesterkt door die wetenschap bouwden ze een grotere vermogensreactor, Phenix (die opstaat uit zijn as!) die van start gaat in 1973 en 250 MWe levert en nog steeds functioneel is. De ervaring met Phenix toont aan dat het principe van de kweekreactor op grote schaal goed kan werken. Een prototype op industriële schaal wordt gebouwd: Superphenix. Hij start op in 1986. Aanvankelijk zijn er nogal wat technische moeilijkheden met het koelsysteem, maar na een tiental jaren draait Superphenix op volle kracht. Maar in 1997 komen de Groenen in de Franse regering, en in het regeerakkoord met Lionel Jospin (de toenmalige socialistische eerste minister) hebben ze bekomen dat Superphenix moet ontmanteld worden. In 1998 wordt Superphenix stopgezet. Maar nog veel erger. Men heeft toen bekomen dat er een gat geboord zou worden in het reactorvat van Superphenix, om ervoor te zorgen dat de beslissing irreversibel zou zijn en hun ideologische overwinning van het ogenblik te behoeden voor een ommekeer in het democratische proces. Een vergelijkbare reactor op het model van Superphenix is in Duitsland gebouwd, in Kalkar. Door de Duitse Groenen is bekomen dat toen de bouw volledig voltooid was die centrale nog voor zijn in werking treden moest ontmanteld worden. Het is nu een pretpark geworden. Verbijstering in de wereld van de kernenergie. *Recyclage van het afval met een factor 50-100, geen nieuwe brandstof meer nodig voor eeuwen, vermindering van de activiteit van het uiteindelijke afval, en het idee wordt tegengegaan door de “Groene” partijen.*

³⁸“Commissariat d’Energie Atomique”, het Franse staatsonderzoekscentrum dat zich aanvankelijk bezighield met alle wetenschappelijke, militaire en industriële aspecten van nucleaire technologie, maar ondertussen een veel ruimere opdracht heeft gekregen: <http://www.cea.fr>

Aanvankelijk hadden de Amerikanen ook een onderzoeksprogramma van dezelfde aard als de Fransen. Zij stonden op een zeker ogenblik zelfs veel verder in de realisatie ervan. De allereerste reactor voor elektriciteitsproductie, de EBR-I, was trouwens een kleine kweekreactor. Maar vanaf de jaren '70 waren ze gekant tegen het herwerken van het "afval" door plutonium recyclage en een kweekprogramma, maar hun motivering was anders. Zij maakten zich vooral zorgen over het feit dat men op die manier grote hoeveelheden plutonium produceert op een gemakkelijke wijze, wat het uiteraard op het eerste gezicht mogelijk maakt om kernwapens te ontwikkelen. Hun idee was dat als zij die technologie niet ontwikkelen, niemand dat zal doen. Dat was de ietwat naïeve houding van president Jimmy Carter, die zelf een militaire nucleaire opleiding had genoten, voor dienst in de Amerikaanse nucleaire duikboten, die in 1977 aan de macht kwam. Hij was voorstander van de "eenmalige cyclus", omdat er op die wijze veel minder technologische kennis in omloop zou gebracht worden die het toelaat om plutonium te produceren, en dat er ook op die manier minder plutonium beschikbaar zou zijn.

Het industrieel herwerken van afgewerkte brandstof is niet alleen mogelijk, het gebeurt reeds op grote schaal in La Hague (F), en in Sellafield (GB). De technologie is ondertussen vrij geperfectioneerd. Als dusdanig is de Carter politiek in het water gevallen: de anderen hebben zich niets aangetrokken van het Amerikaanse voorbeeld.

Wat de kweek-reactor technologie betreft, bestaat de technologie en is de industrialiseerbaarheid ervan aangetoond: Phenix werkt reeds meer dan 30 jaar, en Superphenix heeft enkele jaren goed gefunctioneerd. Ook de Amerikanen hadden enkele kweekreactoren in gebruik voor ze beslist hadden van die politiek stop te zetten. Er zijn wel technologische problemen gerezen, en men dient de passieve veiligheid te verbeteren van deze installaties. Men begint op internationaal vlak te denken aan de "kernreactoren van de vierde generatie" en ze zijn bijna allemaal van het "snelle neutron" type, gebaseerd op het bovenstaande idee. Zij proberen wel de technologische uitdagingen die gezorgd hebben voor de technische problemen bij de lancering van Superphenix, beter op te lossen. Het is immers niet gemakkelijk om een kernreactor te bouwen waarin geen moderatoren voorkomen. Koelwater in het reactorhart kan bijvoorbeeld niet! De Franse serie Rapsodie, Phenix, Superphenix, evenals de Kalkar reactor gebruikten als koelmiddel vloeibaar natrium metaal. Natrium is een moeilijk hanteerbare stof, die een hevige reactie ondergaat met water om natriumhydroxide te vormen, een bijtende stof die nadien de kanalisaties kan verstoppelen. Er zijn serieuze technologische uitdagingen om dat systeem efficiënt, veilig en zonder te veel onderhoud te laten functioneren, maar men is er toch wel in geslaagd om een veilige reactor op dat principe te bouwen. Een spectaculair voorbeeld is gegeven door de experimentele reactor EBR-II in de Verenigde Staten, waar men bij wijze van experiment zo een reactor heeft laten op hol slagen, zonder menselijke tussenkomst en met alle veiligheidssystemen uitgeschakeld. De ontwerpsprincipes waren zo, dat deze reactor zichzelf heeft uitgeschakeld via natuurlijke principes, en dat er geen schade is opgetreden aan de reactor. Men had dat natuurlijk wel heel goed berekend alvorens dat daadwerkelijk uit te voeren. Het argument dat kweekreactoren intrinsiek onveilig zijn – wat men soms hoort – is door dit spectaculaire experiment tegengesproken. Maar men kijkt ondertussen ook naar andere technieken: lood-gekoelde reactoren, gasgekoelde reactoren, en zelfs zout-gekoelde reactoren. Hoewel de industrialiseerbaarheid van deze systemen veel minder is aangetoond dan van de natrium-gekoelde reactor, hebben ze het potentiële voordeel met minder chemisch reactieve stoffen te werken.

2.3.f Recyclage in water reactoren.

Maar goed, het idee van de kweekreactor was (voorlopig?) op het politieke altaar geofferd. Men zit met een aantal water reactoren die in hun afgewerkte brandstof nog een zekere hoeveelheid plutonium bevatten dat voorlopig niet gaat dienen om een snelle reactor te voeden. Plutonium als afval beschouwen is problematisch voor verschillende redenen, waarvan de belangrijkste is dat het voor een relatief lange tijd een hoge activiteit heeft. En bovendien is het zonde: *het is een goede brandstof*. Men kan ze niet onbeperkt opslaan, want het plutonium-241 vervalt met een halfwaardetijd van 15 jaar naar Am-241.

Men heeft onderzoek ondernomen om te zien in welke mate men dat plutonium kan gebruiken in gewone bestaande drukwater reactoren die daar niet voor ontworpen zijn. Pu-239 gedraagt zich in een gewone drukwater reactor ongeveer zoals U-235. Men kan er in principe aan denken om een deel van het verrijkte uranium te vervangen door een mengsel van natuurlijk of verarmd uranium en Pu-239. Natuurlijk gaat men op die manier opnieuw plutonium produceren, maar (in tegenstelling tot in kweekreactoren) is aan het einde van een cyclus netto ongeveer een derde van het plutonium gebruikt. Er is echter een serieus probleem. Bij de plutonium productie in een drukwater reactor door de bestraling van U-238 ontstaat niet alleen Pu-239, maar ook Pu-238, Pu-240, Pu-241 en Pu-242, in ongeveer de volgende verhoudingen: 2% Pu-238, 58% Pu-239, 23% Pu-240, 11% Pu-241 en 6% Pu-242. Pu-241 is ook splijtbaar, dus in totaal is er in de plutonium productie ongeveer 69% splijtbaar plutonium (Pu-239 en Pu-241) geproduceerd, en 31% inert plutonium (Pu-238, Pu-240, Pu-242). Dat inert plutonium heeft bovendien de onhebbelijke eigenschap om gemakkelijk neutronen te absorberen, veel meer dan U-238. Dit stelt potentieel een technisch probleem aan het gebruik van plutonium met de bovenstaande isotopische mengeling in een drukwater reactor: men mag geen te grote variaties in absorptie hebben in de brandstof, want dat veroorzaakt variaties in de vermogensproductie: men zou “hete” en “koele” delen hebben in de reactor. Bovendien mag men ook geen te grote gemiddelde absorptie hebben, want dat stelt een potentieel veiligheidsprobleem, omdat het contrast in absorptie tussen de brandstof en de regeleenheden dan kleiner wordt: de efficiëntie van de regeleenheden wordt dan kleiner. Men heeft uitgerekend dat men in een moderne drukwater reactor slechts maximaal ongeveer de helft van de brandstof met plutonium van de bovenstaande samenstelling kan mengen. In de praktijk beperkt men zich tot een derde om een goede veiligheidsmarge te bekomen.

Het plutonium dat men na een doorgang in een drukwater reactor kan recupereren heeft een nog slechtere isotopische verhouding en is niet meer goed bruikbaar voor een tweede doorgang in een drukwater reactor van huidig ontwerp. Het is op deze eigenschap dat het anti-nucleaire argument “de mythe van de brandstof verwerking” is gefundeerd. Maar het is duidelijk dat we hier aan het “bricoleren” zijn om nog iets proberen te recupereren na het verbod op kweekreactoren. Op zijn minst kunnen we nu, met bestaande drukwater reactoren en met de afscheiding van plutonium, een behoorlijke factor 10 winnen op de levensduur van het afval en 10 a 20 % winnen op de energie extractie van een gegeven hoeveelheid natuurlijk uranium. Dat is niet de factor 50 of 100 die mogelijk is in een kweekreactor: *de recyclage winst in een thermische reactor is marginaal*.

2.4 Soorten kernreactoren

Er bestaan heel veel verschillende denkbare ontwerpen van kernreactoren. Sommige zijn beter dan andere, natuurlijk, en elk ontwerp heeft zijn voordelen, nadelen en historiek. Er zijn twee grote categorieën: “thermische” neutron reactoren, en “snelle” neutron reactoren. In het eerste geval

speelt de moderatie een belangrijke rol, in het tweede geval, veel minder of helemaal niet. In het eerste geval is een aanzienlijk deel van de neutronen van thermische energie, terwijl die fractie heel klein is in een snelle reactor.

Men maakt ook onderscheid tussen de verschillende koelmiddelen. Er is natuurlijk water, dat kan voorkomen in vloeibare vorm (drukwater reactor) of in half vloeibare en half stoom vorm (kokend-water reactoren). Men kan ook zwaar water (deuterium in plaats van waterstof) gebruiken. Men kan gasen gebruiken als koelmiddel: CO₂ of helium. Men kan ook vloeibare metalen (lood of natrium) gebruiken als koelmiddel. Men kan zelfs gesmolten zouten gebruiken als koelmiddel. Men kan al dan niet grafiet gebruiken als moderator. Van de 434 werkende kerncentrales in het jaar 2000 die effectief elektriciteit leverden (we hebben het hier dus niet over experimentele installaties) waren er 252 van het druk water type, 92 van het kokend-water type, 34 van het gas-gekoelde type, 39 waren zwaar-water reactoren, 15 waren grafiet/water reactoren (RBMK – zie Chernobyl...) en 2 waren snelle reactoren met vloeibaar metaal.

In de jaren '50 en '60 heeft men zich uitgeleefd aan het bouwen van prototypes van allerlei aard, en het is gangbaar om te zeggen dat ongeveer elk principieel reactor ontwerp wel een of ander prototype heeft gekend in die jaren. Sommige ontwerpen waren ongelooflijk gevaarlijk ; men heeft soms zelfs vrijwillig een reactor laten op hol slaan en zichzelf vernietigen (Het BORAX experiment bijvoorbeeld³⁹). Dat soort oefeningen is heden ten dage niet meer denkbaar.

We geven hier een korte beschrijving van de werkingsprincipes van enkele belangrijke types van kernreactoren, beseffende dat er nog tientallen andere zijn die op tekentafels hebben gelegen, of zelfs in kleine prototypes zijn gerealiseerd.

2.4.a Druk water reactoren.

Druk water reactoren zijn de huidige “werkpaarden” van de kernenergie sector. Ze werken op licht verrijkt uranium (2 tot 4%). De brandstof bestaat uit UO₂ pastilles die in zirkonium buizen zijn opgesloten. Het zijn buizen van ongeveer 4 meter lang, en ongeveer 1 cm in diameter. Ze worden in een brandstof assemblage eenheid geplaatst, die een vierkant van 17 x 17 zulke buizen samenhoudt. Hiertussen worden controlestaven geplaatst. Een 200-tal zulke assemblages vormen het hart van de reactor, dat ongeveer 100 ton uranium bevat. Het geheel is dus een groot stel “buizen” en controlestaven, opgehangen in een kader, dat een min of meer cilindrisch volume inneemt van ongeveer 4 meter hoog en 3.5 meter in diameter. Dat wordt opgesloten in een eerste reactor vat, en dat gaat in een groot reactor druk vat, dat gevuld is met water, het primaire water. Dat water staat onder hoge druk (155 bar of zo) en komt binnen aan ongeveer 290 graden, en gaat buiten aan 320 graden. Door de hoge druk blijft het de hele tijd vloeibaar. Het primaire, hete water gaat in een warmtewisselaar, de zogenaamde stoomgenerator, waar het een tweede watercircuit, het secundaire water, verhit. Dat secundaire water staat onder lagere druk, en wordt door de temperatuur van het primaire water aan het koken gebracht (vandaar de naam “stoomgenerator”). De gevormde stoom drijft de turbines aan die de generatoren doen draaien, waardoor elektriciteit opgewekt wordt.

³⁹http://en.wikipedia.org/wiki/BORAX_experiments

2.4.b Kokend-water reactoren.

Zij lijken een beetje op drukwater reactoren, maar het verschil is gewoon dat aan lagere druk wordt gewerkt, zodat het primaire water gaat koken. Men kan die primaire stoom direct gebruiken om de turbines aan te drijven. Dat heeft het kostenvoordeel van geen stoomgeneratoren te vereisen, maar het is wel minder veilig omdat men geen scheiding van een primair en secundair circuit heeft. De druk in het reactor vat is meestal van de orde van 70 bar, wat met een kokend-water temperatuur van 290 graden overeenkomt. Het voordeel van een kokend-water reactor is dat die zichzelf grotendeels regelt: hij levert het vermogen dat gevraagd wordt door de turbines. Als men meer water in de reactor pompt, gaat hij harder werken, en als er minder water in gepompt wordt, gaat er verhoudingsgewijs meer stoom ontstaan, en vermindert het vermogen van de reactor, zonder dat men iets moet doen. Het nadeel op het eerste gezicht is een ongelijk verbruik van de brandstof: de brandstof beneden in de reactor ondergaat meer fissie dan die boven (die geregeld in de stoom zit). Daar kan een oplossing aan gebracht worden en in de praktijk stelt dat trouwens geen echt probleem. Qua opbouw lijkt een kokend-water reactor sterk op een drukwater reactor met vergelijkbare brandstofelementen en totale hoeveelheden splijtstof.

2.4.c Zwaar water reactoren.

Het voordeel van zwaar water is dat men natuurlijk uranium kan gebruiken, wat het voordeel oplevert dat men geen uranium verrijking dient toe te passen. Een CANDU reactor (het meest gebruikte model gebaseerd op zwaar water) bestaat uit een groot vat met zwaar water, waardoor horizontaal drukbuizen lopen. In die drukbuizen zitten cilindervormige assemblages van zirkonium buizen, die UO_2 pastilles bevatten, net zoals bij drukwater reactoren. Alleen, het gaat hem hier nu over natuurlijk uranium en niet over verrijkt uranium. De assemblages zijn kleiner: het zijn tronken van 10 cm diameter en 50 cm lang. Er gaan er zo 12 achter elkaar in de 7 meter lange drukbuizen. 380 zulke drukbuizen worden doorheen het vat geplaatst in een horizontale cilindervormige configuratie, die dus 7 meter lang is, en ongeveer 4 meter in diameter is. De drukpijpen worden gevuld met zwaar water onder een druk van 100 bar, en komt binnen aan 265 graden en gaat buiten aan 310 graden. De drukbuizen hebben onafhankelijke circuits, wat wil zeggen dat men continu buizen uit dienst kan nemen en de brandstof vervangen, tijdens de werking van de reactor.

2.4.d Grafiet reactoren met koelwater

Deze reactoren van Russische makelij (de RBMK reactoren, bedacht in 1954) zijn intrinsiek gevaarlijke structuren. Het is zulke reactor die voor het Chernobyl ongeluk heeft gezorgd. De basis structuur bestaat uit 1600 balkvormige blokken grafiet, 25 cm zijde, en 7 meter hoog, waarin gaten zitten, de kanalen. In die kanalen zitten brandstofelementen, die in een drukbuis zitten waardoor water kan stromen ter afkoeling. Sommige grafietblokken bevatten geen brandstofelementen, maar controlestaven. Deze structuur is geplaagd door allerlei instabiliteiten, de ergste zijnde een sterk positieve temperatuurscoefficient bij hoge temperatuur. De essentiële instabiliteit komt van het feit dat gewoon water een slechtere moderator is dan grafiet en dat het ontwerp een domme schaalvergroting is van een militaire reactor, zonder verdere studie.

2.4.e Grafiet-gas reactoren

De eerste reactoren waren van dit type: Fermi's CP1 was een “luchtgekoelde” grafietreactor. De reden is dat grafiet toelaat om met natuurlijk uranium te werken (zwaar water ook, maar grafiet is gemakkelijker te verkrijgen). In het begin waren reactoren bedoeld om plutonium te produceren en de warmte was maar een vervelend bijproduct. Kernenergie centrales gebaseerd op grafiet reactoren zijn evoluties van die eerste reactoren. De Fransen en de Engelsen bouwden CO₂ gekoelde grafietreactoren. Er zijn twee intrinsieke veiligheidsproblemen met grafiet. Het eerste probleem is dat het kan gaan branden, en het tweede probleem is dat het een vaste stof is die niet gemakkelijk kan verwijderd worden. Als dusdanig kan grafiet ongewenst als moderator blijven werken wanneer men liever zou hebben dat de reactie zou stoppen. Men dient met deze problematiek rekening te houden bij een grafiet reactor. Kooldioxide is natuurlijk beter dan lucht als koelmiddel in grafiet reactoren om brand te vermijden, maar bij heel hoge temperaturen kan grafiet toch gaan branden in CO₂. De Engelse Magnox reactoren bestonden uit natuurlijk uranium metaal in een magnesium buis (magnox), geplaatst in grafietblokken waardoor kooldioxide gas stroomde onder een druk van ongeveer 25 bar aan ongeveer 400 graden. Een typische Magnox reactor is 14 meter in diameter en 8 meter hoog.

Nadien is men overgestapt op een “geavanceerde gasgekoelde reactor”, waar het kooldioxide gas aan 50 bar stroomt en de temperatuur 650 graden is. Jammer genoeg kon men geen magnesium buizen meer gebruiken bij die temperatuur, en men is overgestapt op staal. De verhoogde neutronenabsorptie maakte dat men verrijkt uranium nodig had in deze reactoren. Men heeft snel ondervonden dat CO₂ geen geschikt koelmiddel is bij die hogere temperaturen en men is overgestapt op helium als koelmiddel.

2.4.f Vloeibare metaal reactoren

Om een snel neutronenspectrum te bekomen, mag men niet te veel moderator-achtig materiaal gebruiken. Koelwater is dus zo goed als uitgesloten. Een snel spectrum heeft het voordeel dat men een kweekreactor op basis van de U-Pu transmutatie kan bouwen, wat niet mogelijk is in een thermisch spectrum. Een kweekreactor produceert meer splijtbaar materiaal dan hij verbruikt, en de brandstof evolutie is dus omgekeerd: de potentiële reactiviteit stijgt naarmate hij langer werkt. Men heeft installaties gebouwd met vloeibaar natrium als koelmiddel. Een kweekreactor is meestal veel kleiner dan een gewone reactor. Een typische reactor bevat slechts 32 ton uranium en plutonium, en het hart is slechts 1 meter op 2 meter. Natrium is een metaal dat een vaste stof is bij kamertemperatuur, maar een laag smeltpunt heeft (98 graden). Als dusdanig is het te beschouwen als een vloeistof bij de temperaturen die ons hier aanbelangen. Natuurlijk is het een technologische uitdaging om pompen, kleppen, buizen en warmtewisselaars voor vloeibaar natrium te bouwen, maar men is daar mits enige moeite wel in geslaagd. Er is echter een ander potentieel probleem met vloeibare metaal reactoren: er kan een positieve void coëfficiënt optreden. Bij stijgende temperatuur, of bij een of andere lek, dus bij het afnemen aan hoeveelheid koelmiddel (natrium), schuift het energie spectrum van de neutronen naar hogere energieën. Hierdoor vermindert de werkzame doorsnede voor absorptie (bijvoorbeeld, in een resonantie in natrium) en vermindert de “cyclus tijd” van de neutronen omdat ze sneller bewegen. Dit beïnvloedt de reactiviteit meestal positief. Men dient dus andere mechanismen in te bouwen die dat effect voldoende kunnen compenseren. Men is er in geslaagd om een volledig passief veilige vloeibaar metaal reactor te bouwen ; hiervan hebben de Amerikanen een spectaculaire demonstratie gegeven met de EBR-II reactor die ze op hol hebben laten slaan en die zichzelf zonder enige tussenkomst, passief heeft

gecontroleerd en hierbij geen enkele schade heeft opgelopen. Er zijn in het verleden 18 werkende vloeibare natrium reactoren gebouwd ; op dit ogenblik zijn er nog maar 3 in werking, waarvan 1 in Europa: Phenix.

2.4.g Geavanceerde concepten en toekomstvisie.

De ervaring met bestaande reactoren leidt, zoals in elke ingenieursdiscipline, tot nieuwe ontwerpen die trachten de goede punten van vroegere ontwerpen te verbeteren, en de nadelen weg te werken. De lijnen langs dewelke men nieuwe ontwerpen opstelt worden ingegeven door volgende verlangens:

- verhoging van de veiligheid door verder doordrijven van passieve veiligheidsprincipes⁴⁰.
- Modulariteit, kleinere reactor modules die kunnen samengebracht worden tot grotere eenheden of niet (vooral de Amerikanen werken hierop)
- Brandstof efficiëntie, en brandstofrecyclage, kweekreactoren, plutonium gebruik en vermindering van de nociviteit van het afval (vooral de Europeanen werken hierop).
- Economische haalbaarheid.

Het huidige park van kerncentrales is gedomineerd door water reactoren (grotendeels drukwater reactoren), de zogenaamde reactoren van de tweede generatie. De reactoren van de eerste generatie waren de experimentele installaties van de jaren '50 en '60 die meestal een half-militair verleden of doelstelling hadden ; vaak waren het de natuurlijk uranium en grafiet reactoren. De veiligheid heeft een grote sprong voorwaarts gemaakt bij de generatiewissel, maar men heeft in de meer dan dertig jaar werken met deze installaties ook wel heel wat bijgeleerd. Er is ondertussen in de meeste westerse landen ook een pauze gekomen in de bouw van nieuwe reactoren. Tenzij men kernenergie wenst uit te faseren, zullen de bestaande installaties stilaan aan het einde van hun leeftijd komen en moet men aan hun vervanging denken. Men kan die leeftijd eventueel nog wat verlengen door na te gaan in hoeverre de essentiële componenten nog stralingsbestendig zijn (voornamelijk het reactor drukvat) en in hoeverre componenten kunnen vervangen worden, maar in de komende decennia zal het huidige park toch wel aan zijn einde komen en het is waarschijnlijk te ambitieus om te hopen dat we dat park direct door geavanceerde concepten zoals kweekreactoren kunnen vervangen op grote schaal. Dat had mogelijk geweest als onderzoeksprogramma's zoals Superphenix hadden kunnen doorgaan, maar we betalen nu de prijs voor die stop, want het zal tijd kosten om de draad weer op te nemen.

Als dusdanig is er het voorstel van *de reactoren van de derde generatie*. Eigenlijk zijn dat drukwater reactoren, maar waar twee essentiële lessen uit het verleden uit zijn getrokken. Ten eerste wordt *de veiligheid nog drastisch verbeterd*: inderdaad wordt een core meltdown nu beschouwd als een “routine ongeluk dat moet kunnen worden opgevangen zonder te veel problemen” zodat men een opvanginstallatie met nodige koeling voorziet voor een gesmolten reactor hart. Er worden nog andere ontwikkelingen op het vlak van de veiligheid, die over de jaren bedacht zijn op drukwater reactoren, toegepast. Ten tweede wordt van in het begin *de mogelijkheid beschouwd om volledig met plutonium dat uit de brandstofherwerking wordt gewonnen te werken*. Dat was namelijk niet voorzien in de huidige generatie drukwater reactoren, en hoewel men dus een zekere hoeveelheid plutonium kan gebruiken als brandstof, is de hoeveelheid hiervan beperkt. De EPR, de “European Pressurized Reactor” is een model is van een reactor van de derde generatie.

⁴⁰http://en.wikipedia.org/wiki/Passive_nuclear_safety

Op dit ogenblik wordt er een in Finland en een in Flamanville (F) gebouwd. Maar het is misschien een fout om dit een reactor van de derde generatie te noemen, gezien het gewoon een verregaande evolutie is van de reactoren van de tweede generatie, zonder “breuk” zoals dat het geval was tussen de eerste en de tweede generatie ; het komt enkel omdat deze reactoren er komen na een relatief lange rustpauze en omdat ze voornamelijk de reactoren van tweede generatie zullen vervangen dat men die zo heeft genoemd.

Een echte breuk zal er komen met *reactoren van de vierde generatie*⁴¹. Deze zullen hoofdzakelijk kweekreactoren zijn en reactoren met specifieke toepassingen zoals waterstofgeneratie: de zogenaamde hoge-temperatuur reactoren. In tegenstelling tot de derde generatie zijn die op radicale wijzigingen in ontwerp gebaseerd. Men voorziet in het algemeen dat deze reactoren op grote schaal dienen te worden ontplooid tegen 2040. Als dusdanig dient de derde generatie enkel maar om ons tot aan de vierde generatie kunnen te brengen.

Frankrijk heeft al reeds heel lang de “vierde generatie” in het hoofd, en de reeks natrium-gekoelde kweekreactoren (Rhapsodie, phenix en superphenix) waren hier reeds de onderzoeksfase naar. Ondanks de “terugslag” door de stop van superphenix, willen zij de draad terug opnemen, maar ze willen gebruik maken van de hernieuwde lancering om volgende extra ontwikkelingen door te voeren die destijds een lagere prioriteit genoten:

- verbeteren van de *economische competitiviteit*. Als de technologie van de vierde generatie op grote schaal dient te worden toegepast, dient zij economisch verantwoord te zijn (superphenix was nogal duur).
- Verbeteren van de *veiligheid*. Gezien de drukwater reactoren van generatie 3 ondertussen nog veel veiliger zijn geworden, dient men diezelfde standaarden ook aan te wenden in de vierde generatie om geen “achteruitgang” in de veiligheid te bewerkstelligen.
- *Verbranden van de langlevende “kleine actiniden”*. Dit was een consideratie die vroeger geen rol speelde, en nu gezien wordt als een interessante eigenschap.
- *Proliferatie-bestendig zijn*: er mogen geen nucleaire materialen van wapen kwaliteit aanwezig zijn.

Gezien hun lange ervaring met natrium-gekoelde kweek reactoren, wensen de Fransen in de eerste plaats hun reactor van generatie 4 op deze technologie te baseren en ze wensen tegen 2020 een prototype kunnen neer te zetten (eigenlijk een verbeterde superphenix!). Zij doen dat samen met Japan, de USA, Korea en Euratom.

Niettemin liggen er enkele andere technologieën op de tekentafel, die evenwel minder kunnen profiteren van ervaring uit het verleden. Zij trachten de technologische (en vooral politieke) uitdagingen van het vloeibare natrium uit de weg te gaan. Dat zijn:

- de gasgekoelde kweekreactor. Het koelmiddel bestaat nu uit gas, helium lijkt het meeste aangewezen.
- De kweekreactor met vloeibaar lood. Deze lijkt in de eerste plaats op de natrium gekoelde reactor, maar met vloeibaar lood in plaats van natrium.

Trachten te beginnen met omschakelen van generatie 3 naar generatie 4 tegen 2030-2040 lijkt op dit ogenblik economisch opportuun. Waarschijnlijk zullen de fossiele brandstoffen duurder worden, en waarschijnlijk zal ook de uranium prijs sterk stijgen tegen die tijd. Dat maakt het economisch

41 Zie <http://www.gen-4.org/>

interessant om met kweekreactoren van start te gaan. Natuurlijk dient men tegen die tijd ook de brandstofcyclus volledig rond te hebben.

De bedoeling is om binnen enkele decennia kernenergie volledig in te schrijven in het kader van *een duurzame technologie*. Een duurzame technologie is gedefinieerd door de Verenigde Naties als “een technologie die de huidige noden oplost, zonder de mogelijkheden van de toekomstige generaties om hun problemen op te lossen in het gedrang te brengen”. Als dusdanig dient kernenergie de huidige problemen op te lossen: elektriciteit te leveren zoals we die nu nodig hebben zonder de toekomstige generaties met een klimaatsverandering op te zadelen en zonder een andere overdreven belasting voor de toekomstige generaties op te leggen. Dat gebeurt door zuinig om te springen met de nucleaire brandstof, in veilige centrales, en met een visie op de afvalbehandeling die geen overdreven last oplevert voor de toekomstige generaties. Reactoren van generatie 4 lossen dat probleem op, door enerzijds het huidige “afval” als brandstof te gebruiken, de langlevende radionucliden te verstoken en door een veilig ontwerp voor te leggen. Let wel dat een duurzame technologie niet noodzakelijk een technologie moet zijn die “eeuwig” gebruikt wordt. Zij dient enkel onze *huidige* problemen op te lossen, zonder overdreven last te veroorzaken voor de toekomst. Dat is iets dat niet kan gezegd worden van fossiel brandstof verbruik bijvoorbeeld (zij zorgen voor problemen in de toekomst), maar ook niet van “alternatieven” (zij lossen onze huidige problemen niet op).

2.5 Thermische opwekking van elektriciteit.

2.5.a Enkele basisbegrippen uit de thermodynamica.

Het kan eigenaardig lijken, maar conceptueel is de studie van de relatie tussen warmte en andere energievormen eigenlijk moeilijker dan de basisideeën uit de kernfysica die we eerder hebben aangehaald. Niettemin is de (klassieke) thermodynamica een wetenschap die zich essentieel in de 19^{de} eeuw heeft ontwikkeld en tegen het begin van de twintigste eeuw waren de basisbegrippen ervan duidelijk begrepen. Thermodynamica is een heel andere soort fysische theorie dan de meeste andere takken van de moderne natuurkunde. Daar waar de meeste takken van de natuurkunde trachten een microscopische beschrijving te geven van wat er nu precies gebeurt, geeft de (klassieke) thermodynamica een veel abstracter beeld van bepaalde processen. Zij zoekt niet naar een microscopische beschrijving, maar beschrijft relaties tussen enkele macroscopische grootheden, zoals warmte, temperatuur, arbeid, druk en zo verder.

In de 20^{ste} eeuw heeft men natuurlijk wel gezocht naar een microscopische uitleg voor de wetten van de thermodynamica, en men heeft die uitleg ook gevonden. Dit is de tak van de moderne, of *statistische thermodynamica*. Maar we zullen die hier niet nodig hebben. De *klassieke* theorie volstaat ruimschoots.

De klassieke thermodynamica associeert twee grootheden aan elk “systeem”: een ervan is conceptueel gemakkelijk te begrijpen, de andere veel moeilijker. Men dient zich zijn hoofd niet te breken over wat die grootheden (vooral de tweede) nu fysisch willen zeggen. Men dient gewoon te aanvaarden dat er twee grootheden zijn. De eerste grootheid heet de *interne energie* en wordt meestal door de letter U voorgesteld. De tweede grootheid heet de *entropie* en wordt meestal door de letter S voorgesteld.

De *eerste hoofdwet van de thermodynamica* luidt: de interne energie van een systeem verandert volgens de warmte die men eraan toevoegt en de arbeid die men erop uitoefent. Men noemt die wet

soms ook: de wet van behoud van energie. In de mechanica is er ook een wet van behoud van energie, en in feite is het zelfs zo dat de eerste hoofdwet van de thermodynamica een gevolg is van die mechanische wet van behoud van energie op microscopisch vlak. Dat is iets dat in de moderne statistische thermodynamica kan worden aangetoond. Maar in de klassieke thermodynamica moet men de dingen nu eenmaal aanvaarden als wet. Men schrijft die eerste hoofdwet vaak als:

$$dU = dQ + dW$$

Dat staat voor: de toename in interne energie U (namelijk dU) is gelijk aan de toegevoegde warmte dQ plus de arbeid dW die is uitgeoefend op het systeem door de buitenwereld. Dat kan mechanische of elektrische arbeid zijn. De eerste hoofdwet is eigenlijk de formulering van de ontdekking uit de 19de eeuw door James Prescott Joule⁴² dat warmte en mechanische energie omzetbaar zijn in elkaar maar dat de totale balans behouden blijft.

Men kan *de thermodynamische temperatuur* definiëren op een strikte wijze, maar aangezien het hier de bedoeling niet is om een volledige cursus thermodynamica uit te schrijven, gaan we ervan uit dat het begrip “temperatuur” intuïtief begrepen is. We hebben het hier wel over de thermodynamische temperatuur. Dat is de temperatuur die in *Kelvin* is uitgedrukt. Een Kelvin is hetzelfde als een graad Celsius, alleen ligt het nulpunt ergens anders. 0 graden Celsius komt overeen met 273.16 Kelvin en 100 graden Celsius komt overeen met 373.16 Kelvin. Thermodynamische temperatuur is steeds een positief getal in de klassieke thermodynamica. Het kan niet kouder worden dan -273.16 graden Celsius ofte 0 Kelvin.

Twee systemen zijn *in thermisch evenwicht* als ze dezelfde temperatuur hebben.

Entropie is een veel moeilijker vatbare grootte, maar men moet gewoon stellen dat er een grootte S bestaat, die samen met U de toestand van een systeem beschrijft. Indien men een systeem heeft waarop geen arbeid wordt uitgeoefend, en waar men *op omkeerbare wijze* een hoeveelheid warmte dQ kan aan toevoegen, dan geldt:

$$dS = dQ / T$$

Indien men een systeem heeft waar geen warmte mee uitgewisseld wordt (een thermisch geïsoleerd systeem), en men oefent er arbeid op uit *op omkeerbare wijze*, dan geldt:

$$dS = 0$$

Op die manier is S vastgelegd voor een systeem op een constante na: men kan immers elke toestand van een systeem bereiken door er oftewel warmte aan toe te voegen of te onttrekken, oftewel arbeid op uit te oefenen (bijvoorbeeld de druk te verhogen) of te laten uitoefenen, op omkeerbare wijze.

Arbeid uitwisselen op omkeerbare wijze kan men meestal doen door het proces traag te laten verlopen. Men kan bijvoorbeeld *langzaam* de druk verhogen van een gas: de arbeid die men uitoefent is dan gelijk aan de kracht maal de verplaatsing, wat neerkomt op de druk maal de volumeverandering. Dat is omkeerbaar als men bij de drukverlaging hetzelfde verloop van kracht als functie van verplaatsing heeft. Als men dat langzaam genoeg doet dan is dat meestal omkeerbaar.

Als men verschillende systemen heeft, die met elkaar mechanisch, elektrisch en/of thermisch in contact zijn, dan kan men aan elke van die deelsystemen a een interne energie U_a en een entropie S_a toekennen. De totale interne energie van het geheel is dan gewoon de som van de U_a , en de totale entropie van het geheel is dan de som van de S_a . Het geheel gedraagt zich alsof het een enkel systeem is, met interne energie U en entropie S .

⁴²http://en.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joule

De *tweede hoofdwet van de thermodynamica* (die vaak verkeerd begrepen wordt!) luidt: een systeem dat geïsoleerd is (zowel thermisch als mechanisch als elektrisch) van de omgeving, kan enkel interne processen ondergaan zodat

$$dS \geq 0$$

De twee hoofdwetten van de thermodynamica zijn zo goed als in marmer gegraveerd. Van alle wetenschappelijke theorieën zijn zij waarschijnlijk de meest onschendbare. Geregeld komt er wel een gekke uitvinder met een uitvinding voor de dag waarvan hij/zij beweert dat ze de eerste of de tweede hoofdwet schenden, maar dat is altijd een verkeerde bewering geweest. Men heeft de (enkel op papier bestaande) uitvindingen die zoiets tot stand brengen geklasseerd in twee groepen:

Perpetuum mobile van de eerste soort zijn dingen die de eerste hoofdwet schenden.

Perpetuum mobile van de tweede soort respecteren de eerste hoofdwet maar schenden de tweede.

Het grappige is dat deze concepten serieus gebruikt worden in de thermodynamica: als men een bepaalde thermodynamische wet wil afleiden, dan gaat men er soms van uit dat de wet geschonden wordt, en door redeneren komt men dan tot de conclusie dat men op die wijze een perpetuum mobile (van de eerste of de tweede soort) heeft bedacht. Aangezien dat niet kan, wil dat zeggen dat de wetmatigheid in kwestie dus niet geschonden kan worden, en bijgevolg heeft men haar geldigheid aangetoond. Zulke redeneringswijze wordt genoemd: *reductio ad absurdum*, of herleiding tot het absurde. Het is een heel krachtige redeneringstechniek.

Een eerste toepassing vinden we onmiddellijk. Uit de twee hoofdwetten van de thermodynamica kan men volgende eigenschap afleiden:

Twee systemen die met elkaar in thermisch contact zijn, en dus warmte, maar geen arbeid (mechanisch of elektrisch) kunnen uitwisselen, en die voor de rest van de omgeving geïsoleerd zijn, kunnen enkel warmte uitwisselen in de richting van het systeem met de hoogste temperatuur naar het systeem met de laagste temperatuur.

Dat lijkt natuurlijk evident, en is het misschien ook, maar we gaan toch de moeite nemen om het te bewijzen, uitgaande van de twee hoofdwetten van de thermodynamica.

Noem systeem 1, een systeem met interne energie U_1 en entropie S_1 . Het heeft temperatuur T_1 . Op gelijke wijze hebben we U_2 , S_2 en T_2 voor systeem 2.

Veronderstel nu dat systeem 1 een hoeveelheid warmte Q_1 afstaat, en dat systeem 2 een hoeveelheid warmte Q_2 absorbeert. Uit de eerste hoofdwet volgt (gezien het totale systeem geïsoleerd is), dat $Q_1 = Q_2$. Inderdaad, $U = U_1 + U_2$, de interne energie van het totale systeem. Aangezien het totale systeem geïsoleerd is, hebben we dat $dU = 0$, en dus dat $dU_1 + dU_2 = 0$. Maar $dU_1 = -Q_1$ (warmte is afgestaan, eerste hoofdwet) en $dU_2 = Q_2$ (warmte is opgenomen, eerste hoofdwet). Vandaar dat $-Q_1 + Q_2 = 0$, ofte $Q_1 = Q_2$. We hebben hier dus de quasi triviale eigenschap aangetoond dat warmte niet kan verdwijnen tussen twee systemen (als er geen arbeid wordt uitgewisseld).

De entropieverandering van het eerste systeem is $dS_1 = -Q_1/T_1$. De entropieverandering van het tweede systeem is $dS_2 = +Q_1/T_2$. De totale entropieverandering van het totale systeem is gelijk aan: $dS = dS_1 + dS_2 = Q_1/T_2 - Q_1/T_1 = Q_1 (T_1/(T_1T_2) - T_2/(T_1T_2)) = (T_1 - T_2)Q_1/(T_1T_2)$. Uit de tweede hoofdwet volgt nu dat $dS > 0$ (het geheel is een geïsoleerd systeem). We nemen aan dat Q_1 een positieve grootte is (systeem 1 staat warmte af). T_1 en T_2 zelf zijn ook positieve grootheden (thermodynamische temperaturen). Bijgevolg moet $T_1 - T_2$ een positieve grootte zijn, wil $dS > 0$. Met andere woorden, T_1 is groter dan T_2 , wat we moesten bewijzen.

Bovenstaande was gemakkelijk, en wat pedant. *Natuurlijk* gaat warmte van het lichaam met hoge temperatuur naar het lichaam met lage temperatuur. Niemand haalt het in zijn hoofd om te denken dat als we warme koffie in contact brengen met koud water, dat de koffie heter gaat worden, en het koude water gaat bevriezen. Dat moet niet met wiskunde aangetoond worden, zou men denken. Maar het bovenstaande was een opwarmertje voor een fundamentele stelling, de stelling van Sadi Carnot:

Als we twee lichamen ter onzer beschikking hebben, een op temperatuur T_1 (warm), en een ander op temperatuur T_2 (koud), en we hebben een machine tussen de twee die enkel arbeid met de buitenwereld kan uitwisselen, maar geen warmte, en we onttrekken een hoeveelheid warmte Q_1 aan het eerste lichaam, dan kan de machine op stationaire wijze ten hoogste een arbeid aan de buitenwereld leveren gelijk aan $Q_1 (1 - T_2/T_1)$, en is het noodzakelijk om minstens warmte $Q_2 = T_2/T_1 Q_1$ aan het tweede lichaam te leveren.

Bedenk even de kracht van bovenstaande bewering. We kunnen trachten een machine uit te vinden op gelijk welke manier, stoommachine, elektrisch proces, ingewikkelde gasmachine, je kan het zo gek niet bedenken, nooit kan ze *meer* warmte in energie omzetten dan $Q_1 (1 - T_2/T_1)$. Een denkbeeldige machine die dat doet, heet *een Carnot machine*. Echte machines zijn dus minder goed dan Carnot machines.

We gaan dat nu bewijzen, door gebruik te maken van de eerste en de tweede hoofdwet.

We gaan ervan uit dat de machine een hoeveelheid warmte Q_1 aan het eerste lichaam onttrekt, een hoeveelheid arbeid W aan de buitenwereld levert, en een hoeveelheid warmte Q_2 aan het tweede lichaam levert. Gezien de machine in dezelfde toestand moet blijven voor en na de operatie (stationaire operatie), moet zijn interne energie dezelfde blijven. We hebben: $dU = Q_1 - Q_2 - W = 0$.

We vinden dus: $Q_2 = Q_1 - W$. Dat is begrijpelijk: de warmte onttrokken aan lichaam 1 wordt gedeeltelijk in arbeid omgezet, en de rest is warmte die naar lichaam 2 gaat. Niks wordt opgeslagen in de machine (die moet stationair werken).

De totale entropieverandering van het systeem is gelijk aan $dS = dS_1 + dS_2$ (de machine is stationair en verandert dus ook zijn entropie niet).

$dS_1 = -Q_1/T_1$, $dS_2 = Q_2/T_2$. De tweede hoofdwet geeft ons: $dS > 0$ en dus: $Q_2/T_2 - Q_1/T_1 > 0$

Of:

$$Q_1/T_2 - W/T_2 - Q_1/T_1 > 0$$

Of:

$$Q_1(1/T_2 - 1/T_1) > W/T_2$$

Of:

$$Q_1(1 - T_2/T_1) > W$$

Wat we moesten bewijzen voor W . Uit $W = Q_1 - Q_2$ volgt dan: $Q_1(1 - T_2/T_1) > Q_1 - Q_2$ of

$$-Q_1 T_2 / T_1 > -Q_2 \text{ of}$$

$$Q_2 > Q_1 T_2 / T_1$$

Wat we moesten bewijzen voor Q_2 . De stelling is dus aangetoond.

Deze stelling is heel belangrijk voor elke conversie van warmte in elektriciteit, of dat nu met gas, olie, steenkool, kernreactoren of thermische zonne-energie is. De “lage” temperatuur is natuurlijk de omgeving, bijvoorbeeld de lucht, maar meestal water (rivierwater of zeewater). De hoge temperatuur wordt bepaald door het proces onder beschouwing en enkele ingenieurseisen (materialen moeten bestand zijn tegen de temperatuur). Welke techniek gebruikt wordt heeft, zoals eerder gezegd, geen enkel belang. De omgevingstemperatuur is ongeveer 300 K (zeg maar 27 graden Celsius, maar het komt er niet op 5 of 10 graden aan). Als we water gewoon laten koken aan atmosferische druk, dus bij 100 graden Celsius (met gelijk welke techniek), dan is de “hoge” temperatuur 373 K, en de lage, 300 K, zodat de maximale conversie van warmte in arbeid geven wordt door $1 - 300/373 = 0.196$ of 19.6%. Dit is dus de maximale warmte conversie efficiëntie die de thermodynamica toelaat bij kokend water onder atmosferische druk. Men moet nog een systeem bedenken dat zoiets benadert in de praktijk, maar het is natuurkundig niet mogelijk om beter te doen. Als we daarentegen heel hete stoom onder druk aan, zeg maar, 327 graden Celsius (600 K) gaan gebruiken, dan wordt de potentiële warmte conversie efficiëntie gelijk aan $1 - 300/600 = 50\%$. We hebben er dus belang bij om een zo hoog mogelijke temperatuur te gebruiken, maar moeten daarbij wel rekening houden met de eisen die de gebruikte materialen stellen. In de praktijk draait de efficiëntie eerder rond de 30-40%, behalve voor gascentrales, omdat men de gasvlam direct kan gebruiken als warmtebron zonder via een ander fluïdum om te gaan. De temperatuur van de gasvlam is vrij hoog, en dus kan men hogere warmte conversie efficiëntie bereiken, van de orde van 50-55% in de praktijk, als de uitlaat van de gasturbine aan een stoomcyclus gekoppeld wordt. Een alleenstaande gasturbine heeft een efficiëntie van 35-40%.

Thermische elektriciteitsopwekking betekent dus twee verschillende vermogens: *de thermische productie van warmte, en de elektrische energie productie. Vaak is er een factor van ongeveer 3 tussen de twee.* Als we spreken van een centrale van 1 GW, dan dienen we te specificeren wat we bedoelen: 1GW elektriciteit of 1GW thermische productie van warmte? We noteren dit door voor het eerste, 1 GWe te schrijven, en voor het tweede 1GWth te schrijven.

Het is ook te wijten aan die verwarring tussen thermische en elektrische vermogens dat er een (foutief) argument is gebouwd tegen kernenergie. Ik neem het voorbeeld van Frankrijk omdat ik daar de cijfers beter ken. In Frankrijk wordt ongeveer 76-78% van de elektriciteit geproduceerd door kerncentrales. Als dusdanig lijkt dat het argument van de anti-nucleaire beweging, dat kernenergie toch maar een druppel op de hete plaat is of kan zijn, van de kaart te vegen. Maar ze hebben een tegen-argument gevonden: *elektriciteit is slechts een heel kleine fractie van de maatschappelijke energie behoeften.* Inderdaad, als we naar de officiële statistieken kijken in 2004, dan zien we dat het totale energieverbruik in Frankrijk 160 miljoen tep (“ton equivalent petroleum”, een conventionele eenheid die ongeveer overeenkomt met de verbrandingsenergie van een ton petroleum, en is gelijk aan 41.868 GJ⁴³) is, terwijl 36.2 miljoen tep elektriciteit is verbruikt. Het elektriciteitsverbruik stelt dus 22.6% van het totale energieverbruik voor, en 76% van die 22.6% is 17.2%. Voila. In het “supernucleaire land Frankrijk” komt slechts 17.2% van de verbruikte energie uiteindelijk van kernenergie. Druppel op de hete plaat... Het is trouwens anekdotisch dat tijdens de presidentsverkiezingen in Frankrijk in 2007 (tussen Ségolène Royal en Nicolas Sarkozy) gejongleerd werd met deze cijfers, en dat men die fameuze 17.2% ook op de website van “sortir du nucléaire” vindt. Wat gaat hier mis in die vergelijking? *Wat er fout gaat is dat men enerzijds het verbruik van energetische (fossiele) brandstoffen gaat vergelijken met de netto productie van elektrische energie anderzijds.* We zijn hier appels met citroenen aan het vergelijken: verbruik van brandstoffen versus productie van nuttige energie. De bedoeling van benzine in uw auto is niet om

⁴³http://en.wikipedia.org/wiki/Ton_of_oil_equivalent

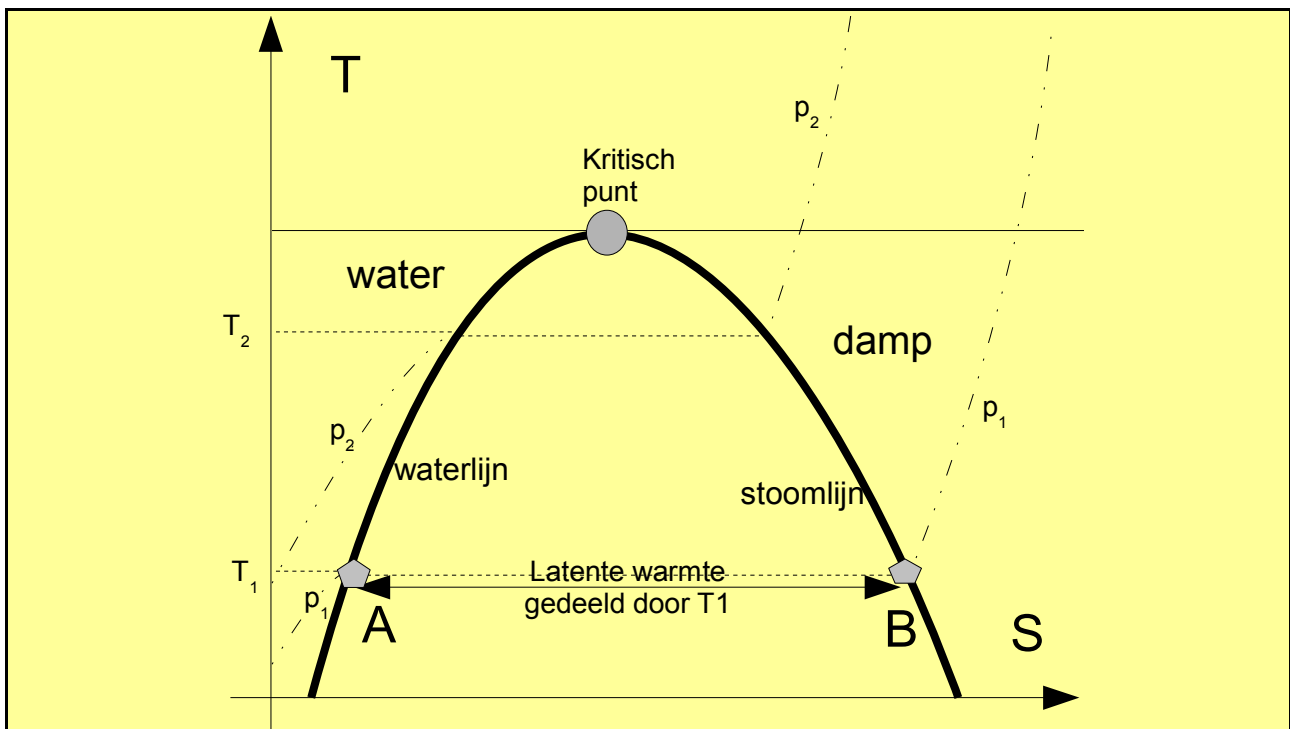
benzine te verbranden, de bedoeling is van de auto doen te rijden, en hiervoor wordt *een thermische omzetting van warmte in bewegingsenergie gevraagd*. Het is trouwens ook zo dat de CO₂ uitstoot evenredig is met het thermische vermogen – met de hoeveelheid verbruikte fossiele brandstof ; het elektrische vermogen heeft hier niets mee te maken. Met andere woorden, de niet-elektrische energie is uitgedrukt in thermisch vermogen, terwijl de elektrische energie is uitgedrukt in, uiteraard, elektrisch vermogen. Zowel in auto's als in warmtepompen als ergens anders is het rendement van thermisch naar elektrisch/mechanisch vermogen meestal ongeveer een factor drie. Elektrische motoren zijn ongeveer 97% efficiënt, terwijl thermische motoren ongeveer 20-37% efficiënt zijn⁴⁴. *Als dusdanig moet men, om een eerlijke vergelijking door te voeren, het niet-elektrische deel van het energie verbruik door 3 delen om dat op hetzelfde “nuttigheidsniveau” te plaatsen als elektriciteit: $(160 - 36.2)/3 = 41.3$ miljoen tep.* We hebben dus een elektrisch energieverbruik van 36.2 tep, en een elektrisch/mechanisch equivalent energieverbruik van niet-elektrische vorm van 41.3 miljoen tep. Geen 22.3%, maar 46.7% ! Merk ook op dat dit in overeenstemming is met de 40% van het aandeel CO₂ uitstoot van elektrische oorsprong (steenkoolcentrales) in de Verenigde Staten. De nucleaire bijdrage is dan 35.5% en geen 17.2%. Geen “druppel op de hete plaat”! De kleine helft van de toegepaste energie is elektrisch. En een groot derde van het *nuttige* energieverbruik is van nucleaire oorsprong.

2.5.b Stoom cyclus.

In het voorgaande hebben we aangetoond dat als men een warmtebron aan temperatuur T_1 en een koelmiddel aan temperatuur T_2 wil gebruiken om mechanische of elektrische energie op te wekken, men door de thermodynamica begrensd is wat de energie conversie efficiëntie betreft tot ten hoogste $(1-T_2/T_1)$. Maar men moet nog een apparaat bouwen dat daadwerkelijk zoiets in werking stelt. In de praktijk hebben bestaande installaties altijd een kleinere energie conversie efficiëntie, maar sommige systemen komen vrij dicht bij de theoretische limiet. Dat is trouwens de voornaamste boodschap van de stelling van Carnot: als de stelling van Carnot zegt dat de maximale conversie-efficiëntie bijvoorbeeld 38% is, en we hebben een toestel dat 35% efficiënt is, dan is het misschien de moeite niet meer om nog veel verbeteringen trachten aan te brengen: we kunnen ten hoogste nog maar 3% winnen.

Bij de productie van mechanische energie uit warmte op grote schaal gebruikt men vaak apparaten die op de water-stoom cyclus gebaseerd zijn ; het zijn in feite de verre nakomers van de goede oude stoommachine. Het principe van een stoommachine is als volgt: de bedoeling is om water te laten koken en in stoom om te zetten. Het volume van de stoom is veel groter dan het volume van dezelfde hoeveelheid water bij dezelfde druk. Een hoeveelheid water toevoegen aan die druk vraagt ons een arbeid $P dV_{water}$ (geleverd door de pomp die het water in de ketel pompt), en het ontspannen van stoom kan ons a priori een arbeid van de orde van $P dV_{stoom}$ opleveren. Gezien dV_{stoom} veel groter is dan dV_{water} , is er hier dus een grote winst in mechanische energie te verwachten, van de orde van $P (dV_{stoom} - dV_{water})$.

⁴⁴http://en.wikipedia.org/wiki/Internal_combustion_engine



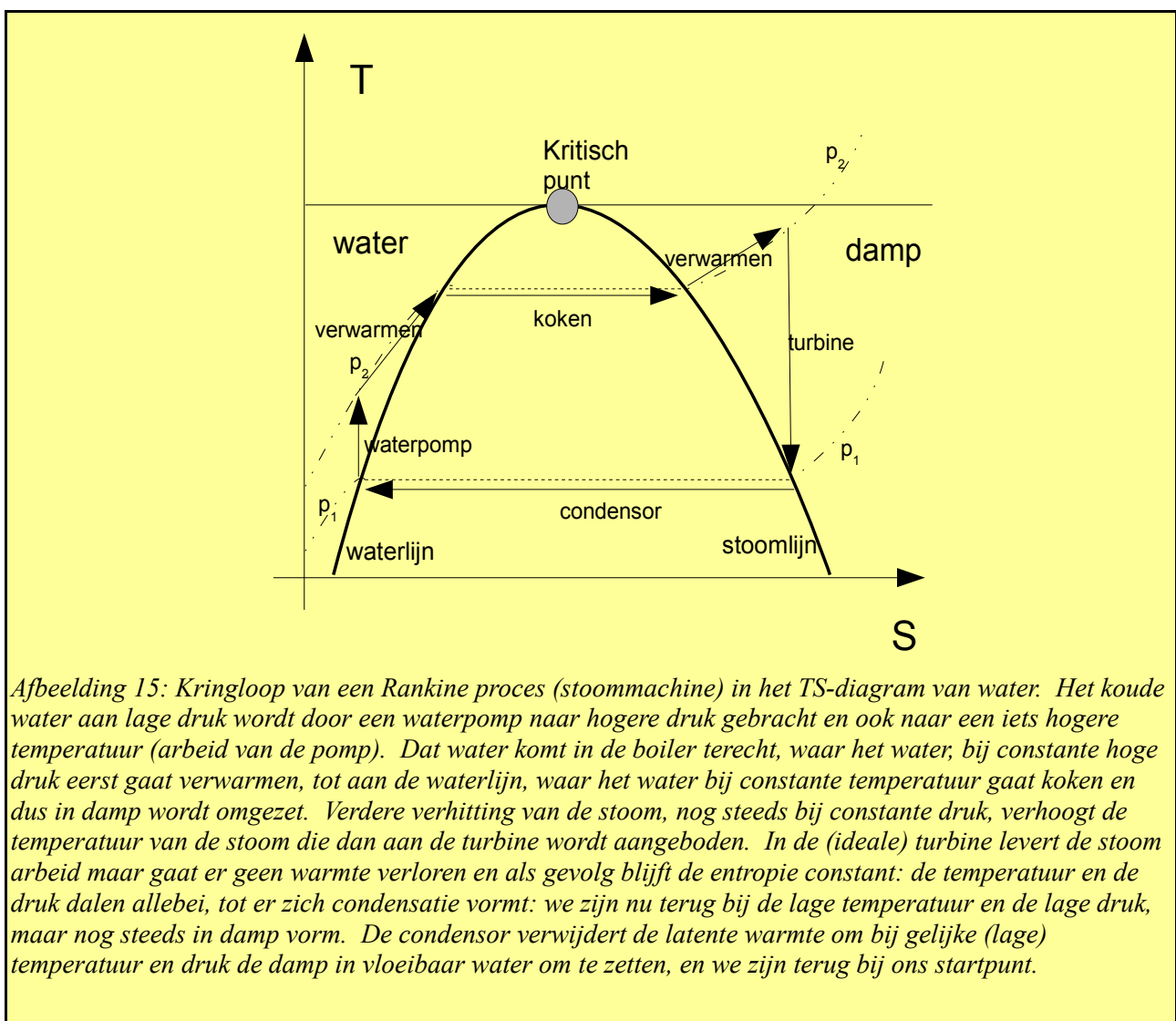
Afbeelding 14: *TS*-diagram voor een stof zoals water. Links van de waterlijn bevinden zich de verschillende mogelijke toestanden van vloeibaar water. Bij een gegeven temperatuur (horizontale lijn) komen er verschillende mogelijke entropieën voor die met verschillende drukken overeenkomen. Rechts van de stoomlijn vindt men de verschillende mogelijke toestanden van dampvormig water (stoom). De zone tussen de waterlijn en de stoomlijn komt niet overeen met enige homogene toestand van water, maar wel met een evenwicht tussen water en stoom (de waterfase bevindt zich op de waterlijn en de dampfase bevindt zich op de stoomlijn).

Om dat preciezer te begrijpen, dient men te beseffen wat een stoom-water diagram is, bijvoorbeeld in de vorm van een temperatuur/entropie diagram (*TS* – diagram)⁴⁵. Horizontaal zet men de entropie uit van een hoeveelheid water (zeg maar, een kilogram), en verticaal zet men de temperatuur uit. Elk punt van het *TS*-diagram komt dus overeen met een denkbare toestand van een hoeveelheid water. Het is echter zo dat er een 'gat' zit in het *TS*-diagram: sommige punten komen niet overeen met een homogene hoeveelheid water of stoom. In een *TS*-diagram kan men trachten de lijnen te tekenen die overeen komen met een gegeven druk. Bij een gegeven druk en temperatuur heeft men meestal ofwel water, ofwel stoom, en hiermee komt een zekere waarde van de entropie *S* overeen. Maar bij sommige waarden van druk en temperatuur kunnen we zowel water als stoom bekomen, en het water heeft een andere entropie dan de stoom. We kunnen echter niet “tussenin” water en stoom zitten qua entropie: we zullen dan gewoon twee fasen hebben, een met water, en de entropie van water, en een andere met stoom, met de entropie van stoom. Elke horizontale lijn (dus een gegeven temperatuur) bevat twee speciale punten die trouwens overeenkomen met een zelfde druk: namelijk die druk waar zowel waterdamp als vloeibaar water samen in evenwicht zijn: de water fase heeft een zekere entropie, en de damp fase heeft een (hogere) entropie. Bij 100 graden Celsius is de druk de normale atmosferische druk. Bij een hogere temperatuur zal dat een hogere druk zijn. Het verschil tussen de twee entropie waarden is gegeven door *de latente verdampingswarmte* van water in die omstandigheden. Latente verdampingswarmte is de warmte die men aan vloeibaar water

⁴⁵http://en.wikipedia.org/wiki/Image:TS-Wasserdampf_engl.png

dient toe te voegen om het om te zetten in stoom bij gelijk blijvende temperatuur en druk. Het is ook de warmte die men recupereert wanneer stoom terug condenseert in vloeibaar water. Als Q_l de latente verdampingswarmte is van water bij een gegeven temperatuur T , dan is Q_l/T het bijhorende verschil tussen de entropie van de stoom en de entropie van het vloeibare water.

De evenwichtsdruk tussen water en stoom stijgt relatief snel bij toenemende temperatuur: bij 100 graden Celsius hebben we 1.013 bar (atmosferische druk), bij 150 graden hebben we 4.76 bar, bij 200 graden hebben we 15.5 bar, bij 250 graden is dat 39.7 bar, bij 300 graden zijn we aan 85.8 bar, bij 350 graden is dat 165 bar, en bij 372 graden zijn we aan 215 bar. Hoger kunnen we niet gaan, want bij hogere temperaturen is er geen verschil meer tussen water en stoom: de dichtheid van stoom aan 372 graden en 215 bar is 425 kg/m^3 wat gelijk is aan de dichtheid van water aan die temperatuur en druk; herinnert U zich dat bij kamertemperatuur de dichtheid van water gelijk is aan $1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$ maar bij 372 graden is het water lichter omdat het uitzet onder verwarming.



Dat punt wordt *het kritisch punt* genoemd. Deze concepten worden geïllustreerd in afbeelding 14.

De basis stoom-water cyclus om warmte in mechanische energie om te zetten wordt *de Rankine cyclus* genoemd. Men pompt water onder een hoge druk (P_h , zeg maar 70 bar) in de boiler, waar het

water gaat koken aan de temperatuur die overeenkomt met die druk (ongeveer 280 graden Celsius). De stoom die onder druk P_h vrijkomt, wordt dan in een turbine geleid, waar aan de andere kant een druk P_b heerst (meestal lager dan de atmosferische druk). De ontspanning van de druk in de turbine levert de mechanische arbeid. Hierbij daalt de temperatuur van de stoom, ideaal gezien tot de temperatuur waarbij evenwicht gevonden wordt met de lage druk (zeg maar, 50 graden Celsius en 100 millibar of zo). Indien de turbine goed ontworpen is, is dat expansieproces bijna reversibel, en dus bij constante entropie (verticale lijn in het TS diagram, zie figuur 15). In de praktijk treden een aantal verliezen op en stijgt de entropie wat. De afgewerkte stoom aan de uitgang van de turbine bevat reeds wat water. De stoom gaat in een condensor waar de latente verdampingswarmte aan de stoom wordt onttrokken wordt met behulp van koelwater. De stoom condenseert volledig in water onder lage druk (P_b), en wordt weggepompt door een vacuümwaterpomp, die de hoge-druk pomp voedt. De cyclus kan herbeginnen. De efficiëntie van de Rankine cyclus wordt gegeven door de verhouding van de mechanische energie die door de turbine wordt gerecupereerd min de mechanische energie nodig om de pompen laten te werken enerzijds (dat is de netto mechanische arbeid die we uit het proces bekomen) en de warmte die in de boiler aan het water onder druk wordt afgestaan anderzijds (dat is de warmte die we aan het proces moeten leveren).

Men heeft systemen bedacht om de cyclus ietwat te verbeteren zowel op technisch vlak als op thermodynamisch vlak, maar het zou ons te ver leiden om hierop dieper in te gaan.

2.5.c Koeltorens

Zoals we gezien hebben, is het bij de conversie van warmte in elektriciteit onvermijdelijk dat warmte bij lage temperatuur aan de omgeving wordt vrijgemaakt. We hebben twee mogelijkheden om die warmte af te geven: aan water of aan de lucht.

We willen weten hoeveel warmte we aan een bepaald materiaal kunnen geven, en hoeveel de temperatuur hierbij stijgt. De grootte die ons interesseert is de *warmtecapaciteit* van het materiaal. De warmtecapaciteit C_v van een materiaal is gelijk aan de toename van de interne energie U als we de temperatuur van het materiaal met 1 graad laten toenemen, en als er geen mechanische arbeid op het materiaal wordt uitgeoefend tijdens de opwarming. Het probleem is dat als we bijvoorbeeld een gas bij constante druk beschouwen, dat bij het opwarmen dat gas uitzet. Als dusdanig gaat dat gas een zekere arbeid op zijn omgeving uitoefenen. Het zal dus in het algemeen meer warmte vragen om een gas *onder constante druk* 1 graad warmer te maken (want we moeten de interne energie verhogen, maar ook arbeid op de omgeving uitoefenen), dan om een gas *bij constant volume* 1 graad warmer te maken (waarbij alle warmte dient om de interne energie te verhogen). Er bestaat een trucje om dat probleem op te lossen: de warmte capaciteit C_p van een materiaal is gelijk aan de toename van de grootte $H = U + p V$ (*enthalpie* genaamd: de enthalpie is bij definitie de interne energie plus p maal V) bij constante druk, als we de temperatuur ervan met een graad laten stijgen. Zoals we zien, komt bij constante druk, dH overeen met $dU + p dV$. Maar $p dV$ is net de arbeid die een systeem op de omgeving uitoefent als het een expansie van volume dV onder druk p ondergaat. Als dusdanig is dH gelijk aan de totale energie (onder de vorm van warmte in ons geval) die nodig is om de interne energie met dU te laten stijgen en bovendien de nodige arbeid op de omgeving uit te oefenen om de druk constant te houden. We vinden dus dat $C_p = C_v + p dV/dT$.

Het is enkel voor gassen dat er een significant verschil bestaat tussen C_p en C_v , omdat gassen (onder constante druk) nogal veel uitzetten als de temperatuur stijgt (dV/dT is vrij groot). Voor vloeistoffen en vaste stoffen is de expansie als functie van de temperatuur vrij klein, en bijgevolg is $C_p \sim C_v$.

Men spreekt dan ook gewoon van de warmtecapaciteit van een vloeistof, zonder te specificeren of het bij constant volume of bij constante druk gebeurt.

Lucht heeft een warmte capaciteit $C_p = 1000 \text{ J / (kg K)}$. Het kost 1 KJ om 1 kg lucht 1 graad warmer te maken. Water heeft een warmte capaciteit gelijk aan 4180 J / (kg K) . Het kost 4.18 KJ om 1 kg water 1 graad warmer te maken. Dat is 1 liter water. Per eenheid van volume is water dus veel veel interessanter dan lucht. Stel dat we 1 GW warmte moeten afvoeren, en stel dat we de lucht 30 graden, en het water, 3 graden mogen opwarmen. We moeten dan ofwel 27 700 kubieke meter lucht per seconde erdoor blazen, ofwel 79.4 kubieke meter water per seconde gebruiken. Het eerste is gewoon ondenkbaar. Als we een wind blazen van 100 km/u (stormkracht!) dan moeten we een pijp met diameter 35 meter gebruiken. Het tweede is ook wel problematisch. Bijvoorbeeld, het debiet van de Schelde is $104 \text{ m}^3/\text{s}$. De Rijn heeft een debiet van $2200 \text{ m}^3/\text{s}$. De Maas: $230 \text{ m}^3/\text{s}$. We hebben dus een flink deel van een grote rivier nodig om die warmte te dumpen. Niettemin is het wel mogelijk: we kunnen een kleinere hoeveelheid water een hogere opwarming geven (bijvoorbeeld, 7.9 kubieke meter per seconde 30 graden opwarmen), en bij menging met de rest van de rivier zal de netto opwarming in verhouding kleiner zijn. Niettemin is *de thermische pollutie* vrij belangrijk als we zoiets doen op een relatief kleine rivier zoals de Schelde. Om de thermische pollutie te verminderen, kan beter een andere techniek aangewend worden.

De *latente verdampingswarmte* van water bedraagt 2258 KJ/kg – dat hangt wel een beetje af van de temperatuur, maar niet heel veel. Als we dat vergelijken met de warmtecapaciteit van vloeibaar water, namelijk 4.18 KJ/kg , dan zien we dat de verdamping van water ongeveer 500 keer meer warmte vraagt dan om dezelfde hoeveelheid water 1 graad op te warmen. De bedoeling van een koeltoren is om water te verdampen als ‘lage-temperatuur’ warmte dump. Een eenvoudige berekening toont dat om onze 1 GW via verdamping te dumpen, het volstaat om 443 liter water te verdampen per seconde (vergelijk dit met de nodige 79.4 kubieke meter koelwater!). De natuur was daar al achter gekomen: zweet !

Het enige probleem is: hoe een systeem te bouwen dat veel water bij lage temperatuur (zeg maar, 50 graden) kan verdampen ? Het antwoord is: een koeltoren. Een koeltoren is eigenlijk een grote schoorsteen, open van onder en van boven. Men pompt warm water naar boven, en sprenkelt het in de toren, zodat het naar beneden valt. Hierbij verdampt water een beetje, en veroorzaakt een heel sterke convectiestroom : de warmere, vochtige lucht stijgt op in de toren, en verse koude lucht wordt onderaan aangezogen – het kan gek lijken, maar vochtige lucht is lichter dan droge lucht bij gelijke temperatuur en druk. Voor de wijsneuzen, dat komt omdat het moleculair gewicht (massagetal) van water 18 is, terwijl dat van stikstofgas 28 is en dat van zuurstofgas 32. Waterdamp is dus een lichter gas dan lucht. Eens het proces op gang is, hebben we een situatie waar warm water naar beneden druppelt in een gigantische opgaande wind. Dit veroorzaakt een snelle verdamping van een deel van het water en een groot deel komt beneden toe, helemaal afgekoeld door de verdamping ; net zoals boven een warme soep blazen een deel laat verdampen en de soep afkoelt. Men laat het koelwater (dat men uit een rivier betreft, bijvoorbeeld) een aantal keren circuleren in de koeltoren, en dumpt het dan terug in de rivier. Normaal gezien geeft dit geen aanleiding tot een noemenswaardige temperatuursverhoging van de rivier: het gaat hem hier over een relatief klein debiet en dat water is normaal niet veel warmer dan het rivierwater. Men is genoodzaakt om het koelwater na enkele cycli terug te dumpen, want anders zou men teveel ketelsteen (kalk en zoutneerslag) in de installatie bekommen.

Op zich ziet die oplossing er heel natuurvriendelijk uit. Dat is het ook, in vergelijking met de thermische pollutie die anders veroorzaakt zou worden. Er is echter een min-punt: het is nodig om een zekere hoeveelheid bacterie-dodende stoffen toe te voegen (zoals chloor), om legionella te

vermijden want we hebben hier grote hoeveelheden lauwwarm water in contact met lucht, de typische gevaarlijke situatie voor legionella. Men bouwt nu echter systemen die het toegevoegde chloor grotendeels terug extraheren alvorens het water terug te dumpen (Siemens commercialiseert zo een systeem bijvoorbeeld). Niettemin is er een deel van het chloor dat in de natuur terecht komt. Als dusdanig zijn koeltorens in het algemeen imposante systemen, maar met een hele kleine impact op de ecologie: ze verbruiken weinig water, ze dumpen niet veel warmte in het water, en ze vervuilen relatief weinig. Indien men een grote hoeveelheid warmte moet kwijtraken bij lage temperatuur, zoals steeds het geval is voor een conversie van warmte in elektrische energie, dan zijn koeltorens de beste oplossing, tenzij men toegang heeft tot heel grote hoeveelheden water (zoals zeewater), zodat de thermische pollutie verwaarloosbaar is.

Hoofdstuk 3 Stralingsbescherming en veiligheid.

3.1 Inleiding: risico's en gevaren

Nucleaire reacties en radioactieve verschijnselen geven aanleiding tot ioniserende straling. Niet alleen deze processen doen dat, trouwens. Versnelde deeltjes doen dat ook: vroegere kathodestraalbuizen (oude televisies en computerschermen), X-stralen apparatuur om röntgen foto's te maken... Ioniserende straling kan biologische schade veroorzaken, omdat ze een invloed uitoefent op de chemische structuur van de stoffen in een biologisch systeem, zoals het menselijke lichaam. In dit deel gaan we de processen die voor die schade verantwoordelijk zijn wat meer bestuderen, en gaan we een aantal grootheden definiëren die trachten die schade te kwantificeren. Maar eerst gaan we een delicaat punt aansnijden: het concept van aanvaardbaar risico. Vertrekkende van dat concept, bespreken we dan de reglementaire begrenzingsen die internationaal afgesproken zijn en die normen opleggen voor de bestraling van mensen. Indien men zich aan die regels houdt dan zullen we aantonen dat nucleaire activiteiten aanvaardbare menselijke activiteiten worden in alle denkbare betekenissen van het woord.

Mensen zijn hun hele leven blootgesteld aan zekere risico's. Een risico bestaat essentieel uit twee gegevens: ten eerste, *het potentieel negatieve gevolg* dat banaal of dodelijk kan zijn, en ten tweede uit *een objectieve kans* dat het fenomeen in kwestie zich voordoet. Voor sommige risico's heeft men de keuze, voor anderen, niet.

3.1.a Kansen

Hoewel er heel wat filosofie rond de betekenis van kansen bestaat, volstaat voor ons wat men noemt de "frequentie interpretatie" die de enige praktische vorm van kansrekening voorstelt. De uitspraak "een bepaalde situatie S heeft een kans p om aanleiding te geven tot een gebeurtenis X " betekent: wanneer men de situatie S heel vaak herhaalt, zeg maar, N keer, dat de gebeurtenis X zich dan ongeveer pN keer voordoet. Schoolvoorbeeld: situatie S : het gooien van een dobbelsteen, gebeurtenis X : het gooien van een 3. De kans om een 3 te gooien met een dobbelsteen is $1/6$, wil zeggen: als men, zeg maar, twaalf miljoen keer de dobbelsteen gooit, dan zal men $1/6$ maal 12 000 000 ofte ongeveer twee miljoen keer een 3 gegooit hebben.

Soms zijn er theoretische redenen die de kans a priori bepalen. Bij de dobbelsteen komt de kans $1/6$ van het feit dat er 6 mogelijke resultaten zijn, en dat, door symmetrie van de situatie, er geen reden is dat er vaker een 5 dan een 3 wordt gegooit. Alle 6 zijden van de dobbelsteen hebben dus een gelijke kans (en is dus gelijk aan $1/6$). Maar in vele realistische situaties is het onmogelijk om een kans te berekenen, en in dat geval gaat men die gewoon meten. Als de situatie zich vaak genoeg voordoet, telt men gewoon het aantal keren dat de gebeurtenis waarvan men de kans in die situatie wil bepalen, zich heeft voor gedaan, deelt dat door het aantal keer dat de situatie zich voorgedaan heeft, en die verhouding is dan een goede schatting van de kans in kwestie. Hoe groter het aantal waargenomen gebeurtenissen, hoe beter de schatting: de statistische fout op de schatting is evenredig met $1/\sqrt{pN}$. Typisch voorbeeld: sterven in een auto-ongeluk. Het is totaal onmogelijk om, op basis van een technische beschrijving van auto, weg, persoon ... te gaan berekenen wat de kans is om te sterven aan een auto ongeluk. Daarentegen, per jaar weten we ongeveer hoeveel

mensen omgekomen zijn in een auto ongeluk, en het blijkt dat dat cijfer niet heel veel verandert van jaar tot jaar. Er is wel een langzame tendens zichtbaar, in de vorm van een lichte verbetering⁴⁶. We zien hier bijvoorbeeld dat de kans, per jaar, om te sterven aan een verkeersongeluk als Nederlander in 2006 gelijk is aan 0.005% terwijl die kans voor een Belg gelijk is aan meer dan 0.01%.

Soms praat men subjectief over kansen. Men kan stellen dat iets “een grote kans heeft” om te gebeuren, maar *dat is enkel maar een uitdrukking van een opinie of een gevoelswaarde*, en men dient dat niet te verwarren met de objectieve kans die hierboven is gedefinieerd, namelijk de fractie van een groot aantal gelijkaardige situaties waarin de gebeurtenis in kwestie zich heeft voorgedaan. Vaak praat men subjectief over kansen wanneer we de mogelijkheid nog niet gehad hebben (of nooit zullen hebben) om voldoende keren het fenomeen in kwestie te kunnen beschouwen. De kans dat Mia met mij zal willen trouwen is heel moeilijk in te schatten, want er zijn geen honderden Mia's die aan dezelfde situatie voldoen. We praten louter gevoelsmatig over zulk soort “kansen”. Wat echter wetenschappelijk fout is, is stellen dat een situatie die zich herhaaldelijk voordoet, een grote kans heeft om gebeurtenis X te veroorzaken, terwijl dat in de praktijk niet gebeurt. Niettemin zijn er beweringen (en “rapporten”) van de anti-nucleaire beweging waarin geargumenteed wordt *dat er zich al honderden incidenten hebben voorgedaan in kerncentrales die met grote kans aanleiding zouden geven tot een grote catastrofe* en dat door een “toevallige samenloop van omstandigheden” *iedere keer* de ramp is vermeden. Dat is een contradictie: indien de kans op een ramp groot is, en het aantal keren dat de situatie zich voorgedaan heeft, groot is, dan moeten er zich relatief veel rampen hebben voorgedaan. Als dat niet het geval is, dan is de bewering gewoon fout. Men kan niet duizend keer een dobbelsteen gooien, en beweren dat men iedere keer door een “toevallige samenloop van omstandigheden” geen 3 heeft gegooid, maar dat de kans om een 3 te gooien, wel degelijk gelijk is aan 1/6. Als men duizend keer een dobbelsteen gooit, en nooit (of slechts een paar keer) een 3 bekommt, dan is de kans om een 3 te gooien veel kleiner dan 1/6 – en dus is de dobbelsteen vervalst.

Niettemin kan men wel kleine kansen berekenen voor gebeurtenissen in situaties die zich (nog) niet voldoende hebben voorgedaan, als deze gebeurtenissen de combinatie zijn van beter bestudeerde deelgebeurtenissen. Zoiets heet kansrekening en is een wiskundige theorie. Indien de deelgebeurtenissen, wat men noemt, *statistisch onafhankelijk zijn* (dat wil zeggen dat ze geen gemeenschappelijke oorzaken hebben en elkaar niet beïnvloeden), dan is de kans op de totale gebeurtenis gelijk aan het product van de kansen van de deelgebeurtenissen. Als men bijvoorbeeld twintig dobbelstenen heeft, dan is de kans om ze allemaal een 3 te laten gooien, gelijk aan $1/6^{20} = 1/(3.6 \cdot 10^{15})$. We nemen immers aan dat de uitkomst van dobbelsteen 5 niks te maken heeft met de uitkomst van dobbelsteen 17. De kans die we aldus berekenen is belachelijk klein. Niemand heeft ooit vaak genoeg een stel van 20 dobbelstenen gegooid om die kans daadwerkelijk te kunnen vaststellen door te tellen hoeveel keren we allemaal 3 hebben gegooid. Niettemin bestaat er weinig twijfel over de correctheid van die kans, in de volgende zin: als we op een of andere wijze voldoende keren die twintig dobbelstenen zouden kunnen gooien, dan zijn we er vrij zeker van dat het de bovenstaande kans is die uit de bus zou komen. De techniek werkt immers voor meer realistische situaties die verifieerbaar zijn, enerzijds, als we bijvoorbeeld drie dobbelstenen beschouwen (de kans is dan 1/216, wat, met enige moeite, verifieerbaar is), en anderzijds voor kleine kansen wanneer we “heel veel pogingen” ondernemen. Dat is typisch wat er gebeurt in vele atomaire en nucleaire processen: per atoom zijn de kansen soms piepklein, maar er zijn heel veel atomen in een stukje materie, en we kunnen als dusdanig de toepasbaarheid van de kanswetten verifiëren in het domein van de hele kleine individuele kansen en het groot aantal pogingen.

⁴⁶<http://nl.wikipedia.org/wiki/Verkeersveiligheid>

3.1.b Risico's

Terug naar onze risico's. Een risico bestaat uit een potentieel negatieve gebeurtenis, en een objectieve kans dat die gebeurtenis zich voordoet. Men kiest er soms bewust voor een risico te nemen, omdat het ons een voordeel oplevert. Voor sommige risico's kan men op de potentiële gevolgen, of op de kans dat het zich voordoet, wat inspelen. Voor andere risico's bestaat er geen mogelijkheid om ze te ontlopen.

Enkele voorbeelden.

- *Met een auto rijden.* Er is een risico dat men hierbij gewond raakt, het leven verliest, of een ongeluk veroorzaakt en bijvoorbeeld in de gevangenis terecht komt. Dat risico is niet verwaarloosbaar. Laten we Frankrijk beschouwen. 60 miljoen inwoners, ongeveer 6000 verkeersdoden per jaar. Dat wil zeggen dat de kans per jaar, om te sterven in een verkeersongeluk, ongeveer 1/10 000 is. In andere landen zijn die cijfers vergelijkbaar. Prent U zich dat goed in: als U deelneemt aan het verkeer heeft U een kans van 0.01% (een op tienduizend) om er in het komende jaar aan te sterven! Over een gans leven (zeg maar, 70 jaar oud) wordt dat 0.7%! U heeft bijna 1 kans op honderd om tijdens uw leven om te komen in een verkeersongeluk. Die kans is natuurlijk wel een beetje moduleerbaar: men kan steeds goed op alle verkeersregels letten, zijn veiligheidsgordel omdoen, een veilige auto kopen, goed op zijn kinderen letten als ze oversteken... Misschien kan U dan uw eigen kans op dodelijk ongeluk wel door 10 delen, en misschien kan U de gevolgen van een ongeluk wat indijken (gewond eerder dan dood). Roekeloze chauffeurs vermenigvuldigen hun kans misschien wel met 10. Maar vaak is een van de twee partijen in een ongeluk een onschuldige verkeersdeelnemer zoals U of ik. Het is dus helemaal niet duidelijk in welke mate U die kans wel kan beïnvloeden. Waarom nemen we zulke risico's? Waarom nemen we deel aan het verkeer? Gewoon omdat het ons zoveel dingen bijbrengt die ons leven meer de moeite maken, dat we dat voordeel zonder probleem belangrijker achten dan dat risico. Ik heb wel al politici en activisten horen pleiten voor meer verkeersveiligheid, maar ik heb nog geen enkele serieuze politieke of maatschappelijke beweging gehoord die "uitstappen uit het autoverkeer tegen 2020" wil voorstellen.
- *Een lijnvlucht nemen.* Objectief gezien is reizen met een lijnvlucht veiliger dan reizen met een auto. Dat wil zeggen: per afgelegde kilometer is de kans om te sterven in een vliegtuigongeluk stukken kleiner dan de kans om te sterven aan een verkeersongeluk. Het grappige is dat veel meer mensen bang zijn om het vliegtuig te nemen dan om met de auto ergens heen te gaan of de straat over te steken. Het effect dat hier aan de gang is, is waarschijnlijk hetzelfde als het emotionele effect met straling en kernenergie. Men heeft de indruk dat men "zijn lot niet in eigen handen heeft", en bovendien komen de slachtoffers van vliegtuigongelukken in grotere groepen dan de slachtoffers van verkeersongelukken. Bij verkeersongelukken is dat 1, 2, of 4 of 5 doden per keer, met een vliegtuig zijn dat 100, 200 of 300 slachtoffers met een keer. *Het komt in het nieuws.* De meeste verkeersongelukken komen niet in het nieuws. Vliegen is zes keer⁴⁷ veiliger per afgelegde kilometer dan autorijden. Met de trein reizen is twee keer zo gevaarlijk als met het vliegtuig reizen (per kilometer), maar dat blijft nog drie keer veiliger dan met de auto.
- *Een gezondheidsprobleem hebben.* Hoewel we een deel van dat risico zelf in handen hebben (eet-, drink-, rook- en leefgewoonten, sport...) is een deel een ons opgedrongen risico

⁴⁷<http://nl.wikipedia.org/wiki/Luchtvaart#Veiligheid>

waarbij we geen keuze hebben. Een anekdote: toen ik student was, had ik een medestudent die rookte als een Turk. Hij kwam niet naar de lessen die twee uur duurden als hij wist dat de professor in kwestie geen pauze gaf, omdat hij het geen twee uur zonder zware, zelfgerolde sigaret kon volhouden. Zelfs na 1 uur les liep hij snel naar buiten, en stak soms zelfs twee sigaretten tegelijk in zijn mond. Deze jongen nam dus een hele zware hypotheek op zijn gezondheid. Maar bij een practicum, waar we een heel klein radioactief bronnetje moesten gebruiken gedurende een half uur, durfde hij niet van achter het lood muurtje vandaan komen, uit schrik voor de straling. Zoals we verder zullen zien (en zoals hij ook wist, gezien we er een cursus over gevolgd hadden) is het potentiële gevolg van zo een bronnetje voor de gezondheid waarschijnlijk een miljoen maal kleiner dan de gevolgen van zijn roken.

- *Extreme sport activiteiten.* Beoefenaars van verschillende extreme sport activiteiten hebben een niet-verwaarloosbaar risico om te komen (diepzeeduiken, bergbeklimmen, deltavliegen, of nog veel gekker dingen). Dat risico hebben we natuurlijk zelf in handen, in de eerste plaats door deel te nemen of niet, en in de tweede plaats door “voorzichtig” te zijn of niet tijdens de uitoefening van de activiteit. Maar niettemin is er toch wel een redelijk groot risico voor de “voorzichtige deelnemer”. Dat risico wordt echter gemakkelijk aanvaard omdat de persoon in kwestie zijn eigen potentieel tot de modulatie van het risico overschat en door het gevoel van “zijn lot in eigen handen te hebben” wat natuurlijk niet het geval is: ongelukken gebeuren ook met de “voorzichtige deelnemers” en die hadden ook “hun lot in eigen handen”. Men is bereid om die risico’s te aanvaarden, enerzijds omdat men ze onderschat, en anderzijds omdat men een groot plezier beleeft aan de uitoefening van die activiteiten.
- *Een natuurramp.* Enige modulatie is wel mogelijk door de keuze (in de mate dat men die keuze heeft) van zijn leefomgeving (een “gevaarlijke” streek of een kalm gebied...), maar tussen overstroming, bosbrand, meteorinslag, bliksem, aardbeving, vulkaanuitbarsting... is er altijd wel iets wat kan gebeuren en waar we geen vat op hebben.
- *Slachtoffer van een misdaad.* Of het nu een roofmoord is bij U thuis, of een gewapende bankoverval net als U in de bank bent, of een terroristische aanslag, U loopt een kleine kans om daar het slachtoffer van te zijn. Natuurlijk is enige modulatie mogelijk: U kan in een bunker wonen, lijfwachten betalen, niet naar “gevaarlijke plekken” gaan...
- *Een gerechtelijke vergissing.* Het is heel goed mogelijk dat U op een dag op het slechte ogenblik op de slechte plaats bent, en dat U beschuldigd wordt van een abominabele misdaad, en veroordeeld wordt. Die kans is vrij klein, maar daar kan men haast niets tegen doen. Er bestaat een kleine kans dat U onschuldig toch tot 20 jaar dwangarbeid wordt veroordeeld. Dat risico wordt aanvaard, omdat we maatschappelijk denken dat een gerechtelijk systeem nodig is om de leefregels van onze maatschappij op te dringen. Zo een systeem kan fouten maken, maar we nemen dat risico omdat we het voordeel over een gerecht te beschikken belangrijker achten.

Al dat om te besluiten dat we tijdens ons leven verschillende risico’s lopen. Sommige risico’s kunnen we niet ontlopen (en brengen ons meestal ook niets op). Andere risico’s lopen we vrijwillig, omdat daar individueel of maatschappelijk voordeel uit gehaald wordt. Sommige van die risico’s zijn vrij groot, voor een objectief klein voordeel (roken bijvoorbeeld), andere risico’s zijn vrij groot, voor een vrij groot voordeel (autoverkeer). Men staat soms voor de keuze of men een bepaald risico wil lopen of niet om daar een bepaald voordeel uit te halen. *Indien men voor de keuze staat om iets te ondernemen, en indien men voor een gelijk of veel kleiner voordeel, bereid is een veel*

groter risico te lopen, dan is het irrationeel de onderneming omwille van het gestelde risico te weigeren. Het typische voorbeeld is: weigeren om een vliegtuig te nemen, en hetzelfde traject per auto maken voor de enige reden dat men het risico dat het vliegtuig kan neerstorten, onaanvaardbaar acht. Er kunnen andere redenen zijn: prijs van het ticket, het vervelende van naar de luchthaven te moeten en zo voort, natuurlijk – we plaatsen ons hier in het geval dat al de rest gelijk is, en dat men enkel die beslissing neemt op basis van het “risico dat het vliegtuig neerstort”. De autoreis is objectief gezien zes keer gevaarlijker dan de vliegtuigreis. Als individu is men natuurlijk vrij om domme beslissingen voor zichzelf te nemen⁴⁸. Maar als een maatschappij een keuze dient te maken, moet dat wel op een rationeler basis gebeuren.

Wat is *het objectieve risico* voor de mensen van een industriële activiteit? *Het is de kans per jaar dat een willekeurig individu vroegtijdig overlijdt ten gevolge van die activiteit.* Inderdaad geeft dit getal, over lange tijden en grote bevolkingen, het verwachte aantal overlijdens:

$$n = m \times p \times T$$

waarin n het aantal overlijdens, wereldwijd, over de periode T is, m de totale bevolking, en T de beschouwde periode in jaren. Het is de prijs, in mensenlevens, die de activiteit ons zal kosten. Voor autorijden is $p = 0,0001$. Het *potentiële gevaar* geeft ons eerder aan of de n doden bekomen worden in een klein aantal spectaculaire catastrofes, of eerder in een groot aantal banale ongelukken.

Kernreactoren zijn potentieel relatief gevaarlijke installaties. Dat wil zeggen dat ze het *potentieel* hebben om in een ongeluk veel schade aan te richten en een zeker aantal slachtoffers te maken. Het is meestal van deze potentialiteit dat mensen een intuïtieve afkeer hebben, omdat ze enkel het potentieel zien om schade te veroorzaken en niet goed weten wat er gedaan is om te zorgen dat dat potentieel geen realiteit wordt. Geconfronteerd met de beperkte wetenschap dat er een potentieel gevaar is, en zonder veel meer gedetailleerde kennis ter zake, slaat meestal een irrationele angst toe. Men stelt bij vele menselijke activiteiten vast dat hoe beter men weet waarover het gaat hoe minder men slachtoffer is van irrationele angst. Bij andere activiteiten stelt men het omgekeerde gedrag vast: hoe meer men erover weet, hoe meer men beseft dat wat initieel als ongevaarlijk was beschouwd, in feite een heel gevaarlijke bezigheid is.

Een van de bedoelingen van dit werk is om wat meer kennis ter zake op een toegankelijk niveau ter beschikking te stellen, zodat men zijn kennisniveau kan optrekken en bijgevolg de kans verkleint om een slachtoffer te zijn van irrationele angst. Het is mij trouwens niet duidelijk in welke mate anti-nucleaire activisten zelf slachtoffer zijn van irrationele angst, of in welke mate ze misbruik maken van irrationele angsten bij het publiek om hun agenda door te drukken. *Kennis vervangt irrationele angst voor het onbekende door rationele angst voor een gekend risico.* Als U in een autobus zit waarvan de remmen stuk gegaan zijn op een steile helling in de Alpen, dan weet U relatief goed wat er gaande is, en heeft U geen cursus auto mechanica of rijlessen nodig om te beseffen dat de situatie een groot risico inhoudt. Bijkomende kennis zal uw (rationele) angst niet laten afnemen. Als U weet dat een autobus slecht werkende remmen heeft, dan zal uw rationele angst een goede raadgever zijn als die U de beslissing laat nemen om niet in die bus plaats te nemen. U vindt immers dat de prijs die U moet betalen (namelijk het missen van de bus, en bijgevolg het feit dat U te voet moet gaan, of een taxi betalen, of...) door niet in de bus plaats te nemen, niet opweegt tegen het (grote) risico dat U loopt om in een ongeluk met die bus om te komen of zwaargewond te raken. *U heeft, met andere woorden, een rationele beslissing genomen:*

⁴⁸ Men vindt een schat aan informatie over de psychologische aspecten van risicoperceptie op de site van Peter Sandman: <http://www.psandman.com/index.htm>

U heeft het verwachte voordeel van een handeling vergeleken met het risico dat U daardoor loopt, en een keuze gemaakt. Maar laten we even enkele tienduizenden jaren terugkeren. De mens van toen (niet heel verschillend van de mens van nu, trouwens) had de keuze om in zijn grot te blijven, bessen in het bos gaan te verzamelen, of op jacht te gaan. De eerste optie was op het eerste gezicht de veiligste. In het bos gaan bessen zoeken was gevaarlijker: men kon op een roofdier vallen, of een giftige bes plukken, of uitglijden en een been breken... Maar nog veel gevaarlijker was op jacht gaan. Men liep dezelfde gevaren als bij het plukken van bessen, maar bovendien liep men het gevaar dat een gewond dier kon aanvallen, of dat de pijl van een medejager U ging doorboren of... Niettemin maakte de mens vaak de laatste keuze, wetende dat hij een groter risico liep, maar ook dat hij een groter voordeel haalde uit de jacht. Jagen leverde vlees op, proteïnen die de mens sterker maakte, een betere gezondheid leverde,... Het was de juiste keuze: het risico dat gelopen werd bij het jagen, werd ruimschoots gecompenseerd door de voordelen die dat opleverde, op zulke wijze dat, alles bij elkaar, een groep mensen een beter en langer leven kende als ze gingen jagen, dan als ze in hun grot bleven zitten. *Deze keer ging de rationele beslissing in de zin van het "risicovolle" gedrag, omdat dat op termijn voor de kleinste kost zorgde.* De irrationeel bange oermens die niet ging jagen omdat hij bang was van het potentiële gevaar die de jacht praktijk met zich meebracht, stierf aan honger in zijn grot en nam de foute beslissing. We leren hier dus twee dingen. Enerzijds, wat telt is het (objectieve) risico, en niet het potentiële gevaar van een handeling; anderzijds, in de mate dat rationele angst een goede, rationele beslissing laat nemen – het afwegen van een risico met een verwacht voordeel – is irrationele angst een slechte raadgever.

Maar we kunnen nog iets anders doen. Het kan zijn dat we verlekkerd zijn op het voordeel van een bepaalde handeling, maar dat we het risico wat te hoog vinden. We kunnen dan gewoon de beslissing nemen om de handeling dan maar niet uit te voeren, zoals in het geval van de bus. Maar we kunnen ook nagaan wat er allemaal kan misgaan, en *trachten de kans te verminderen dat het misgaat enerzijds, of trachten de gevolgen van wanneer het misgaat te verminderen, anderzijds.* In beide gevallen verkleinen we het objectieve risico, en kunnen we het aanvaardbaar maken.

Wat is het verwachte voordeel van kernenergie? Het is de goedkope en massieve elektriciteitsproductie uit een compacte installatie met een grote brandstofautonomie, op een manier die heel weinig vervuiling veroorzaakt en die serieus kan helpen bij het verminderen van de CO₂ uitstoot en bijgevolg kan helpen een dramatische klimaatsverandering binnen 100-200 jaar tegen te gaan. *Geen enkele andere vorm van elektriciteitsopwekking kan op dit ogenblik dat lijstje van voordelen voorleggen.* Dit is het proteïne-rijk vlees meegebracht door onze voorhistorische jager.

Maar, zoals gezegd, een kerncentrale houdt een potentieel gevaar in. Wat moeten we in zo een geval doen? Ons laten leiden door onze irrationele angst, die enkel het potentiële gevaar ziet, en "veilig" in onze grot blijven zitten, of "roekeloos" onze boog en pijl nemen, en op jacht gaan? *We kunnen de juiste beslissing niet nemen als we het echte risico niet kennen.* We zouden verkeerdelijk kunnen beslissen om in onze grot blijven te zitten, terwijl dat op lange termijn gevaarlijker is dan op jacht te gaan, maar we zouden ook met een paar stenen kunnen trachten op tijgerjacht te gaan. Een verkeerde beslissing is duur, in de twee richtingen.

Alvorens iets zinnigs te kunnen zeggen over de aanvaardbaarheid van de risico's van kernenergie, dienen we eerst te bestuderen wat die risico's nu eigenlijk zijn.

3.2 Biologische celschade door ioniserende straling.

3.2.a Elementaire cel biologie.

De levende wezens op aarde bestaan uit cellen. Sommige levende wezens bestaan uit een enkele cel. Bacteriën zijn zo een levensvorm. Maar de hogere levensvormen bestaan uit lichamen die opgebouwd zijn uit vele cellen. Deze cellen kunnen verschillend zijn, naar gelang het deel van het lichaam waar ze zich bevinden. Gelijkaardige cellen vormen zogenaamde weefsels, en met weefsels zijn organen opgebouwd. De cellen verschillen van elkaar door hun functionaliteit. Cellen zijn essentieel “waterzakjes”, waar een kleine hoeveelheid water is opgesloten in een zogenaamd celmembraan. Binnenin dat waterzakje zitten verschillende heel ingewikkelde moleculen, en op het celmembraan zitten ook heel ingewikkelde moleculen. Deze moleculen kunnen moleculen buiten de cel naar binnen pompen, of vice versa. Binnenin een cel gebeuren vele heel gesofisticeerde chemische reacties tussen de moleculen die erin zitten onderling, en de moleculen die naar binnen gebracht worden. Een levende cel heeft normaal gezien steeds een influx van moleculen, een uitflux van andere moleculen, en een verloop van chemische reacties. Men noemt dit geheel: het *metabolisme* van een cel. De ingewikkelde moleculen die voor de al even ingewikkelde chemische reacties zorgen, zijn meestal *proteïnen*⁴⁹. Proteïnen zijn een speciale klasse van moleculen, opgebouwd uit lange kettingen van 20 verschillende mogelijke aminozuren. Het is de specifieke volgorde van de aminozuren die de functie bepaalt van een proteïne. Proteïnen worden binnen de cel gefabriceerd door een speciale structuur, het zogenaamde *ribosoom*. Het ribosoom⁵⁰ is een proteïne/RNA mengeling die essentieel een mRNA molecule “leest” en volgens de “instructies van het mRNA molecule” de verschillende *aminozuren* die het vindt in de oplossing van de cel aan elkaar rijgt om zo een nieuwe proteïne te maken. In realiteit is het proces iets ingewikkelder, maar dit is het netto resultaat. Voor elke benodigde proteïne in een cel zijn er dus een aantal “patronen” (mRNA moleculen) die in de cel rond drijven, en die geregeld door een ribosoom “gelezen” worden, om iedere keer een exemplaar van het benodigde proteïne te bouwen. Wat zijn die mRNA moleculen? Het zijn ook aaneenschakelingen van elementaire moleculen, maar deze keer zijn de bouwblokken niet de aminozuren (zoals het geval is voor de proteïnen), maar wel opgebouwd is door vier verschillende *nucleotiden*: adenine (A), guanine (G), cytosine (C) en uracil (U), en een fosfaat structuur die het geheel bij elkaar houdt. mRNA moleculen worden best gezien als een soort “telegram” bandje waarop “geschreven staat”: AGCUUGACCUGCA....

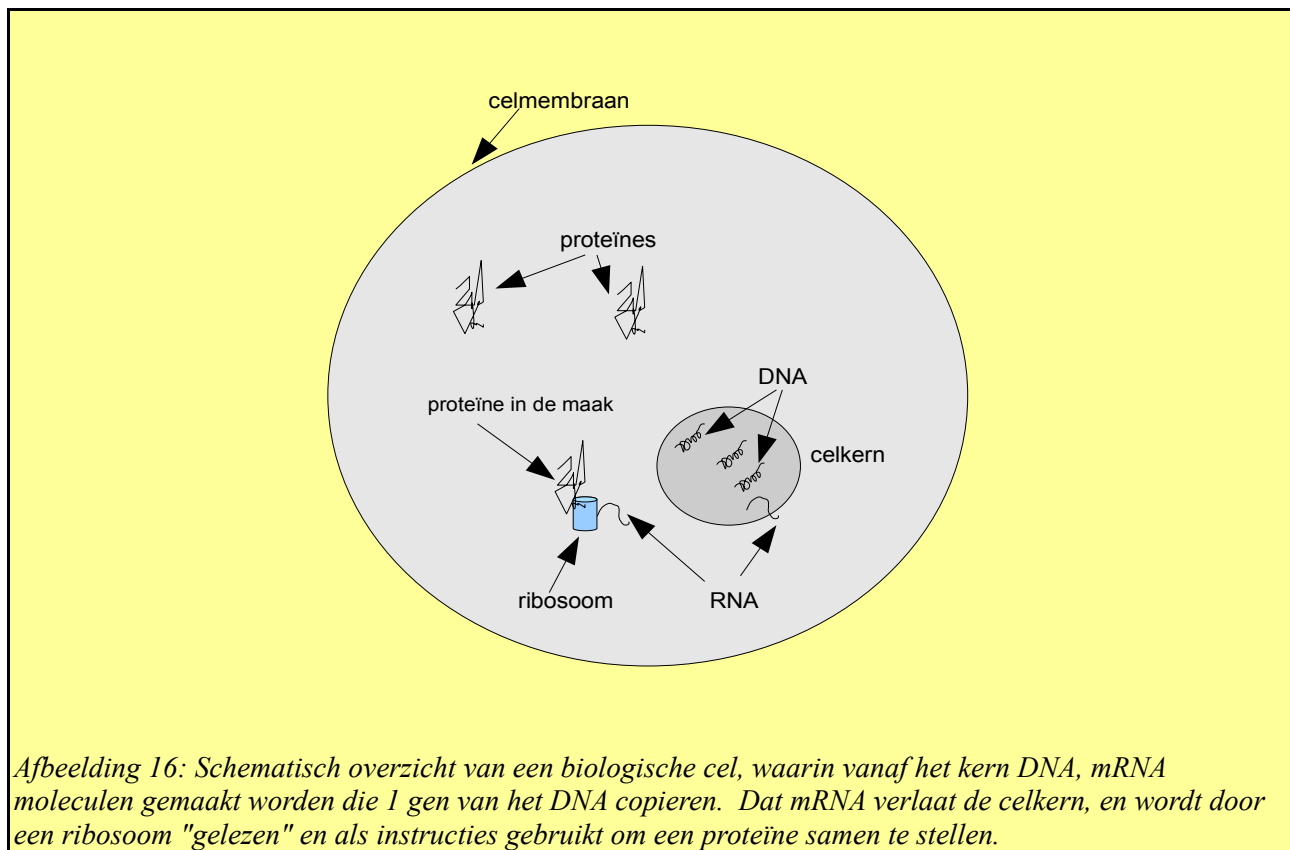
Men heeft ontdekt dat met 3 verschillende “letters” van het mRNA molecule, 1 specifiek aminozuur (van de 20) overeen komt. Het is op die manier dat het ribosoom dus weet, aan de hand van een mRNA molecule, hoe het een bepaald proteïne moet maken. De overeenkomst tussen blokjes van 3 nucleotiden op een mRNA molecule, en het overeenkomstige aminozuur dat in het proteïne moet ingebouwd worden, heet *de genetische code*⁵¹. Er zijn 64 mogelijke combinaties van 3 nucleotiden (4 x 4 x 4), en met elke combinatie komt een specifiek aminozuur overeen (of een stop of start instructie). Er is bijgevolg wat redundantie in de code: verschillende combinaties willen hetzelfde zeggen. Het is interessant op te merken dat alle levende wezens op aarde, of het nu bacteriën zijn die op de bodem van de oceaan leven, of olifanten in de Afrikaanse savanne, exact dezelfde genetische code gebruiken.

⁴⁹<http://en.wikipedia.org/wiki/Protein>

⁵⁰<http://en.wikipedia.org/wiki/Ribosome>

⁵¹http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic_code

Binnen een cel worden de meeste chemische interacties uitgevoerd met behulp van proteïnen. Ribosomen bouwen die proteïnen, door de instructies van mRNA moleculen af te lezen. Waar komt dat mRNA vandaan? Binnen in een cel bevindt er zich een celkern (tenminste, voor eukaryoten). Dat is een nog kleiner waterzakje met membraan, binnenin de cel. Binnenin die celkern zitten een aantal moleculen zogenaamd DNA. Bij de mens zijn het er 46. De rudimentaire opbouw van een



biologische cel, en het pad van DNA, via mRNA en ribosomen, naar de productie van proteïnen, wordt symbolisch geïllustreerd in figuur 16.

DNA lijkt heel erg op mRNA: het is ook een opeenvolging van nucleotiden, maar er zijn enkele verschillen. Ten eerste is er een klein verschil in de structuur van de samenhang van de nucleotiden. Ten tweede zijn de 4 nucleotiden niet dezelfde: adenine (A), guanine (G), cytosine (C) en thymine (T). Uracil (U) is dus vervangen door thymine. Maar het belangrijkste verschil is dat DNA in een *dubbele* helix voorkomt, met twee strengen van nucleotiden in plaats van een enkele zoals het geval is voor mRNA. De twee strengen zijn complementair: waar in een string guanine voorkomt, komt in de andere cytosine voor en vice versa, en waar in een string adenine voorkomt, komt in de andere thymine voor en vice versa. Deze DNA structuur loste het "geheim" op van de genetische erfelijkheid. Inderdaad, cellen "planten zich voort" door zich in twee te splitsen, en de twee kleinere helften te laten bijgroeien. Men heeft zich lang afgevraagd hoe de informatie voor de cel opbouw "verdeeld" werd. De chemische opbouw van het DNA geeft het antwoord: bij het splitsen van de cel (en dus ook de cel kern) komen de twee strengen van het DNA molecule los van elkaar. Vervolgens wordt elke "halve" DNA molecule "vervolledigd" door de complementaire nucleotide toe te voegen en de strengen opnieuw te vervolledigen. Als resultaat hebben we nu twee identieke kopieën van het originele DNA molecule. Een van de kopieën gaat in de ene celkern, en de andere kopie gaat in de andere celkern.

Een mRNA molecule codeert voor een enkel proteïne, maar is slechts de kopie van een klein stukje van een DNA molecule. De “stop” en “start” codes op het DNA molecule duiden aan waar een “muziekstukje” begint, en waar het eindigt. Zo een stukje DNA molecuul, dat voor een enkel mRNA molecuul codeert, en bijgevolg voor een proteïne codeert, heet een *gen*. Op een enkel DNA molecule kunnen honderden duizenden genen zitten. Van zo een gen worden mRNA moleculen gemaakt in de kern. Dat wordt een gewone 1-1 kopie voor adenine, guanine en cytosine, terwijl thymine (DNA) vervangen wordt door uracil (U) (mRNA). Het gefabriceerde mRNA wordt dan uit de cel kern naar buiten gestuurd, waar ze de ribosomen de bijhorende proteïne laten bouwen.

In een mensencel zitten er 46 DNA moleculen in de kern, die 2 aan 2 ongeveer bijeen horen (niet te verwarren met de twee strengen in een enkele molecule DNA). 1 molecule komt van de vader, en 1 molecule komt van de moeder. Zij hebben dezelfde functie ; het is een soort “reserve mechanisme”: als 1 van de twee niet goed werkt, kan de andere toch nog de functie overnemen. Er zijn dus 23 paren “gelijkaardige” DNA moleculen in een mensencel: de 23 *chromosomenparen*. Voor andere soorten levende wezens is het aantal chromosomen anders. Gezien de twee DNA moleculen in een chromosomenpaar dezelfde genen bevatten (behalve dat een versie dus van de vader, en de andere van de moeder afkomstig is, en er dus kleine verschillen kunnen bestaan), associeert men dikwijls de genen aan de chromosomen. Men kan een chromosomenpaar als een soort dubbele catalogus beschouwen waarin heel veel proteïnen beschreven staan, met gedetailleerde instructies hoe die proteïnen te bouwen. Elke “paragraaf” die zo een proteïne volledig beschrijft, is een gen van dat chromosomenpaar, en gezien we een dubbele catalogus hebben, hebben we als dusdanig twee lichtjes verschillende beschrijvingen (een van de vader en een van de moeder). Hier is een uitzondering op: het X-chromosoom, dat bij een meisje inderdaad in twee copieën voorkomt, maar bij een jongen slechts 1 X-chromosoom heeft (van zijn moeder), en een “mislukking”: het Y-chromosoom (van zijn vader). Het Y-chromosoom is louter mannelijk.

Cellen kunnen een geprogrammeerde zelfmoord plegen: de zogenaamde apoptose. Een reeks chemische reacties treedt op in de cel om “zichzelf netjes op te ruimen”. Dat mechanisme kan in gang gesteld worden in twee gevallen. Ten eerste kan het nodig zijn, tijdens de evolutie van een organisme, dat bepaalde weefsels verdwijnen of veranderen, of dat bepaalde weefsels dood moeten gaan, denk maar aan de metamorfose van poppen in vlinders. Maar ten tweede, het kan ook zijn dat een cel ontdekt dat zij niet goed meer functioneert. In dat geval kan het gevaarlijk zijn voor het organisme dat die cel blijft functioneren en bijvoorbeeld, verkeerde hormonen fabriceert of dergelijke. In dat geval “blaast de cel zichzelf op”. Cellen die te erg beschadigd zijn om zich netjes op te ruimen, gaan ook dood (necrosis), maar dat is veel minder goed: verschillende actieve moleculen komen dan vrij, moleculen die hun plaats niet hebben buiten de cel en die verkeerde chemische reacties kunnen opwekken. In werkelijkheid is celdood een veel complexer fenomeen dan hier gewoon wat naïef is aangehaald, maar de essentie voor wat we in ons betoog nodig hebben is hierbij gezegd.

Wat kan er mis gaan in een cel ? De chemische reacties die zich in een cel afspelen, zijn hele complexe en delicate processen, en op verschillende plekken kunnen dingen “fout” gaan. Reacties in de cel kunnen misgaan. Dat kan op het niveau van een specifieke reactie zijn, of het kan zijn dat een proteïne verkeerd gevormd is, of dat een mRNA molecule verkeerd in elkaar zit of... Het is duidelijk dat de ergste fouten die fouten zijn die in het genetisch materiaal (het DNA) gebeuren, want die fouten worden doorgegeven aan alle dochtercellen na celdeling. Alle andere fouten blijven beperkt tot die ene cel die waarschijnlijk vroeg of laat doodgaat. Een verandering van het genetische

materiaal heet een *mutatie*⁵². In het geval van een mutatie wordt die verandering blijvend doorgegeven aan alle cellen die van de veranderde cel afstammen. Er zijn mechanismen in de celkern aan het werk, die mutaties repareren⁵³.

In een cel gebeuren er, onder gewone omstandigheden duizenden beschadigingen aan het DNA per dag. Het zijn niet allemaal mutaties. Het kunnen ook gewone beschadigingen in de “ruggengraat” van het DNA molecule zijn. In de mate van het mogelijke worden die gerepareerd, en in het geval dat de reparatie niet lukt, probeert de cel zich in senescence te zetten (kan nog functioneren, maar niet meer delen), of vernietigt zichzelf (apoptosis). In het geval dat een mutatie gebeurt die niet gerepareerd wordt kan het zijn dat de cel toch nog gaat delen. Zo een mutatie kan een dodelijk of slecht gevolg hebben voor de nakomelingen van de cel: het kan zijn dat een vitaal proteïne niet goed meer gebouwd wordt. In dat geval zal de cel geen leefbare nakomelingen nalaten, of nakomelingen die niet goed functioneren. In verschillende gevallen heeft de mutatie geen effect. Er zijn vele delen van het DNA die niet voor een proteïne coderen in de gegeven cel. Ook voor gegeven proteïnen hebben niet alle aminozuren hetzelfde belang. Voor niet-gevoelige zones is het niet veel van belang dat het aminozuur in kwestie veranderd is. De mutatie kan ook “onzichtbaar” zijn: er is redundantie in de genetische code, en sommige veranderingen van de genetische volgorde in het DNA coderen voor hetzelfde aminozuur.

Maar in enkele gevallen kan het zijn dat de mutatie zorgt voor een fout in het celdelingmechanisme. Indien er zich genoeg fouten ophopen in dat celdelingsmechanisme, dan kan het “op hol slaan”, en gaat de cel zich ongecontroleerd delen: we hebben een kankercel. Als dusdanig zijn alle mechanismen die mutaties veroorzaken, potentieel kankerverwekkend.

In uitzonderlijke gevallen kan een mutatie aanleiding geven tot een *verbetering* van de werking van de cel. Het is op basis van die positieve mutaties dat de biologische evolutie theorie is gebouwd: natuurlijke selectie gaat verbeterde organismen een grotere kans op overleven toekennen, zodat de zeldzame verbeteringen “bijgehouden” worden over de generaties heen.

3.2.b Effecten van chemische verandering in cellen.

Ioniserende straling geeft aanleiding tot chemische veranderingen. Die veranderingen doen zich voor onder de vorm van elektronische aanslag of ionisatie (vandaar de naam!) waarvan het voornaamste chemische gevolg is: het breken of vormen van chemische bindingen. In biologische cellen (eukaryotische cellen) met een celkern, zoals die voorkomen in alle hogere levensvormen, stelt het probleem zich natuurlijk als deze chemische veranderingen zich voordoen in de celkern omdat er zich dan mutaties kunnen voordoen, of beter gezegd, meer mutaties kunnen voordoen dan reeds normaal het geval is.

De ioniserende straling kan schade veroorzaken aan een bepaald molecuul (zeg maar, een DNA molecuul) op twee mogelijke wijzen. De directe wijze is die waarbij een chemische binding van de molecule door toedoen van de ioniserende straling gebroken wordt. Bij de indirecte wijze verandert de ioniserende straling chemisch een nabijge molecule, en daarbij komt een agressieve molecule vrij die op chemische wijze onze DNA molecule gaat aanvallen en beschadigen. Een typisch geval: de ioniserende straling breekt een chemische binding in een water molecule op zo een wijze dat er een hydroxyl-radicaal (H-O.) en een waterstofatoom (H., ook een radicaal) vrijkomt. Die radicalen

⁵²<http://en.wikipedia.org/wiki/Mutation>

⁵³http://en.wikipedia.org/wiki/DNA_Repair

zijn hele reactieve moleculen en gaan heel gemakkelijk reacties aan met andere moleculen. Als dat andere molecuul een DNA molecule is, dan gaat die chemische reactie natuurlijk het DNA molecule beschadigen.

Nu is het zo dat er andere (chemische) oorzaken zijn van het ontstaan van radicalen, en van het aanvallen van DNA moleculen. *In feite zijn er in gewone omstandigheden veel meer agressies van niet-ioniserende oorsprong dan van ioniserende straling.*

Er zijn *twee vormen van effecten van ioniserende straling op cellen, naargelang er heel veel ioniserende straling aanwezig is, of slechts relatief weinig.* Indien er heel veel ioniserende straling is, dan worden er zoveel chemische beschadigingen aan cellen aangebracht, dat die niet meer goed functioneren in hun geheel. Bij heel hoge dosissen worden de cellen onmiddellijk in grote aantallen vernietigd: men heeft diepe brandwonden. Maar bij hoge dosissen die niet zo hoog zijn dat men ogenblikkelijk verbrand wordt, kan ook heel veel schade berokkend worden. In het bijzonder kan het mechanisme dat voor celdeling zorgt, geblokkeerd worden. Indien een groot deel van de cellen in de weefsels van vitale organen irreversibel beschadigd zijn, dan kunnen die organen niet goed meer functioneren. Indien een groot deel van de cellen in een weefsel van vitale organen niet meer goed kunnen delen, dan zullen die weefsels over een relatief korte tijd afsterven, omdat hun cellen niet meer vernieuwd worden. Het (zwaar) bestraalde individu loopt dus een grote kans om vrij snel te sterven.

Cellen hebben wel reparatie mechanismen, en het is empirisch vastgesteld, dat hoe meer cellen gespecialiseerd zijn, en hoe minder vaak ze delen, hoe efficiënter ze zichzelf kunnen repareren. Omgekeerd, cellen die “vrij algemeen zijn” en die snel delen, hebben meestal minder efficiënte reparatie mechanismen, en zijn dus gevoeliger voor stralingsbeschadiging.

Dat fenomeen wordt in de geneeskunde gebruikt in de zogenaamde radiotherapie. Kanker cellen die vaker delen dan gewone cellen, zijn ook gevoeliger aan stralings schade. Als dusdanig kan men een stralingsdosis geven aan een weefsel dat kankercellen bevat, zodanig dat kankercellen daar veel meer onder lijden dan gewone cellen. Om dat te bekomen, moet de dosis natuurlijk heel goed gekozen worden.

Indien relatief weinig ioniserende straling aanwezig is, dan veroorzaakt die straling mogelijk mutaties (naast andere mechanismen die dat reeds deden). In de mate dat de kans op mutaties vergroot wordt in vergelijking met de mutaties die reeds in elk geval voorkomen, is ioniserende straling potentieel kankerverwekkend.

3.2.c Stralingsziekte en stochastische effecten.

Gezien de twee verschillende soorten effecten verschillende ziekteverschijnselen veroorzaken, zijn er ook twee vormen van “stralingsziekten”. Bij hoge dosissen spreekt men van deterministische effecten met drempel. Men spreekt ook wel van stralingsziekte. Bij lage dosissen spreekt men van stochastische effecten – de kans op kanker. De twee verschijnselen zijn totaal verschillend.

In het eerste geval, de deterministische effecten, is de totale dosis straling die men op korte tijd heeft gekregen van belang. Indien die dosis groot genoeg is om het reparatiemechanisme van vele cellen te overstelpen, en als dusdanig de celfunctie in de war te brengen, dan treden vrij snel ziekteverschijnselen op. *De ziekteverschijnselen zijn dan meestal functie van de dosis die men ontvangen heeft, en de specifieke organen die bestraald zijn.* Indien de dosis niet groot genoeg is om de reparatiemechanismen van de cellen te overstelpen, dan treden die ziekteverschijnselen helemaal niet op. Vandaar dat er een drempeldosis is voor deze verschijnselen. De

stralingsbescherming tegen dit soort verschijnselen bestaat er dan gewoon in, met een zekere veiligheidsmarge, beneden deze drempel te blijven. Zoals we echter zullen zien, zijn er goede redenen om veel lagere dosissen op te leggen, en als dusdanig hebben de (relatief hoge) drempeldosissen voor stralingsziekte geen praktische gevolgen gezien men altijd veel lagere maximum dosissen gaat eisen. Stralingsziekte is bijgevolg een relatief zeldzaam fenomeen dat enkel optreedt in zware accidentele situaties.

Voor stralingsziekte effecten gebruikt men meestal de geabsorbeerde dosis tijdens de (sterke maar kortdurende) blootstelling, uitgedrukt in Gray (Gy). Bovendien hangt het ziekteverschijnsel af van het gegeven of er een globale lichamelijke bestraling is geweest, of enkel een partiële. In het geval van de globale dosis, gaan we na wat de typische ziekteverschijnselen zijn:

- vanaf 0.2 a 0.3 Gy stelt men een tijdelijke terugval van witte bloedcellen vast. Dat komt omdat het beendermerg tijdelijk beschadigd werd. Tot ongeveer 1 Gy is dit verschijnsel omkeerbaar. Men dient enkel gedurende een tijd een opvolging van het hematologische beeld door te voeren.
- Tussen 1 en 2 Gy is er een tijdelijke functionele terugval van het immuunsysteem. Het is nodig de patiënt op te nemen in een ziekenhuis en onder antibiotica te plaatsen gedurende een tijd. Een bloedtransfusie kan ook aangewezen zijn.
- Boven de 2 Gy begint het serieus fout te gaan. Een opname in een gespecialiseerd instituut is nodig en de terugval in bloedcellen is heel ernstig, meestal drie a vier weken na de bestraling. Dit is trouwens heel misleidend: in het begin vertoont de patiënt nagenoeg geen symptomen, en alles lijkt goed te gaan. Niettemin is er een toenemende kans op overlijden binnen de 60 dagen met de ontvangen dosis.
- 3.5 a 4 Gy: 50% kans om binnen de 60 dagen te overlijden. Het is slechts na vele maanden dat men kan aannemen dat men het ongeluk “overleeft” heeft.
- 8 a 12 Gy: zware stoornissen in de spijsvertering treden op na 6 a 8 dagen. Weinig kans om te overleven.
- 10 Gy: serieuze storingen in het functioneren van de longen
- 15 a 20 Gy: een dodelijk neurologisch syndroom treedt haast onvermijdelijk op.

De bovenstaande tabel geeft enkel maar wat richtwaarden aan, natuurlijk. De verdeling van de dosis en de gezondheidstoestand van de patiënt op het ogenblik van bestraling speelt ook een heel grote rol. Het is interessant op te merken dat de meeste ongelukken (Chernobyl terzijde) waarbij een zware bestraling met deterministische effecten optreedt, in de volgende categorieën vallen:

- Verloren industriële of therapeutische gamma bron (Co-60, Ir-192,...) wordt gevonden door niets-vermoedend personen
- Verkeerde regeling van de apparatuur voor radio-therapie die de patiënten een veel te hoge dosis toedient
- Het botweg overtreden van de meest elementaire veiligheidsvoorschriften bij deeltjesversnellers en bij bestralingsapparatuur (binnendringen van de bestraalde ruimte terwijl de bestraling aan de gang is)

In het bovenstaande hadden we het voornamelijk over deterministische effecten na een globale lichaamsbestraling. Er kunnen ook soms zware partiële bestralingen optreden. De huid vertoont brandwonden, necrose en sclerose vanaf 10 Gy. Testikels vertonen een vermindering van

spermatozoïden vanaf 0.5 Gy, en een reversibele tijdelijke steriliteit van 2 tot 6 Gy. De eierstokken zijn minder gevoelig: een dosis van 12 tot 15 Gy is nodig om een kunstmatige menopauze te verwekken bij jonge vrouwen. Als de longen bestraald worden met een dosis van 25 Gy is men dodelijk getroffen, evenals bij dosissen van 50 tot 70 Gy voor het hart. Een dosis van 10 Gy aan de ooglen kan cataract veroorzaken. Lokale bestralingen zijn meestal beter te behandelen dan volledige lichaamsbestraling.

De bovenstaande beschouwingen hebben te maken met de deterministische effecten die optreden bij hoge stralingsdosissen. De ernst van de aandoening is direct functie van de ontvangen dosis, en beneden een zekere drempel treedt het fenomeen gewoon niet op.

Het andere sanitaire aspect van ioniserende straling is het stochastische effect. In dat geval treden er niet onmiddellijk ziekteverschijnselen op. Men heeft gewoon de kans vergroot om een kanker te bekomen, jaren later, ten gevolge van de extra mutaties die erdoor veroorzaakt zijn. Er is a priori geen relatie tussen de specifieke kanker en de gevolgen ervan enerzijds, en de stralingsdosis anderzijds. Het enige wat verandert is de kans om zo een kanker te bekomen. Bovendien komt die kanker meestal pas 10 tot 30 jaar na de bestraling tot ontwikkeling.

Uit relatief sterke bestralingen van personen uit het verleden (maar die beneden de drempel liggen van de stralingsziekte) heeft men epidemiologische studies kunnen verrichten. De voornaamste stalen komen van de ontploffing van de kernwapens op Hiroshima en Nagasaki. Er zijn ook andere reeksen bestraalde personen, maar het zijn kleinere stalen, bijvoorbeeld van de vrouwen die in het begin van de eeuw radium-verf gebruikten om fosforescerende uurwerken te fabriceren. Ook dierenproeven hebben bruikbare gegevens opgeleverd.

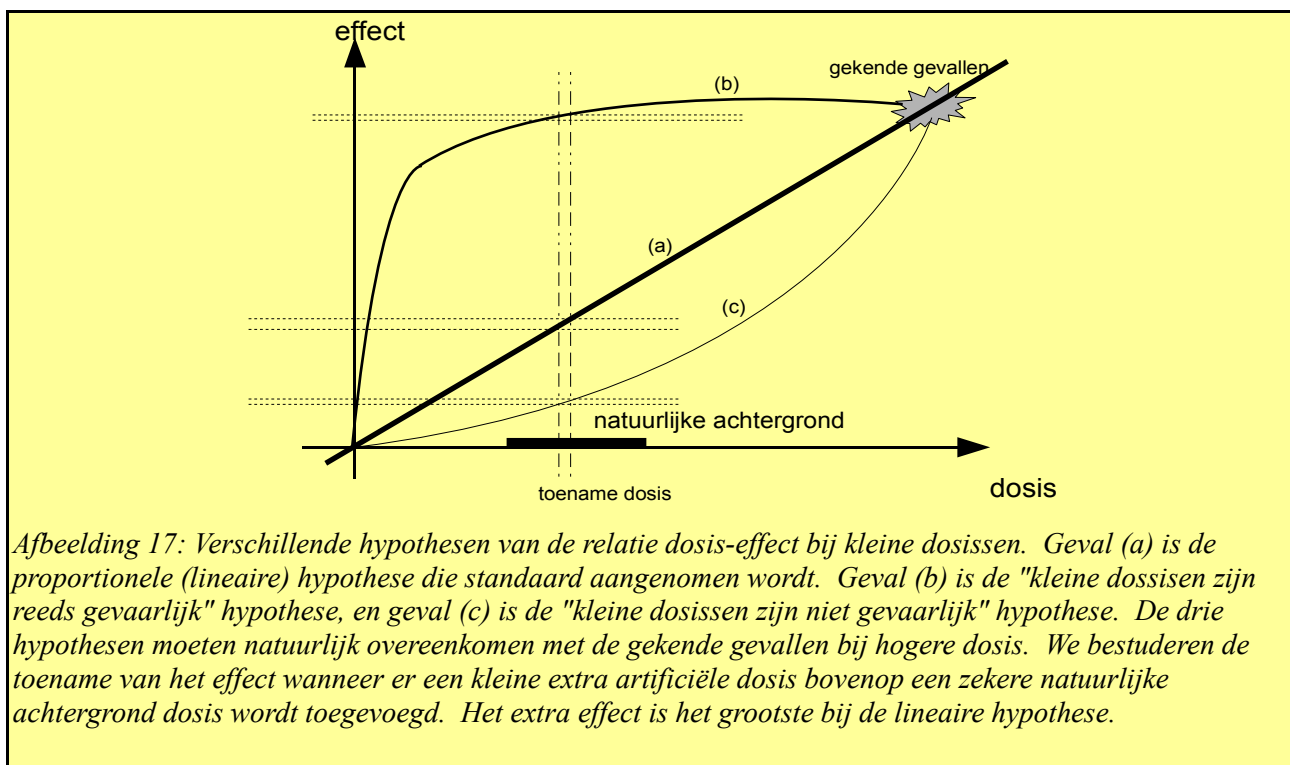
Het probleem is dat enkel epidemiologische effecten duidelijk zijn aangetoond bij dosissen die veel hoger zijn dan men in normale omstandigheden ontvangt. De strenge normen die heden ten dage zijn vastgelegd qua wettelijk toegelaten dosis voor het publiek en voor werknemers in de nucleaire sector laten enkel dosissen toe waarvan men epidemiologisch het effect heel moeilijk kan meten. Dat is trouwens logisch! Indien men de effecten gemakkelijk zou kunnen meten, dan zou het redelijk zijn om de normen strenger te maken tot de effecten onmeetbaar worden! Maar dat wil in de praktijk zeggen dat men niet goed weet wat de effecten zijn van de toegelaten dosis. Men weet enkel dat ze heel klein zijn ten opzichte van andere effecten ; men heeft geen verschil gezien zonder en met extra dosis. Vier hypothesen zijn in principe mogelijk:

- er bestaat een relatief belangrijk effect dat intreedt vanaf de kleinste *kunstmatige* extra stralingsdosis, en dat zit net onder de meetbare effecten. Dit is een wetenschappelijk moeilijk verdedigbaar standpunt, maar het wordt soms aangenomen door anti-nucleaire activisten, die een reglementering willen die extra dosis strikt nul wil zien (wat natuurlijk een reden zou zijn om elke vorm van artificiële radioactiviteit en dus kernenergie te bannen). Het onwetenschappelijke is inderdaad dat het heel gek zou zijn dat de natuurlijke dosis die we ontvangen “net geen kwaad kan”, maar dat een ietsepietsie meer ons plotseling gaat opzadelen met gevolgen, maar die net klein genoeg zijn om niet meetbaar te zijn. Dat stelt vooral een probleem omdat de variaties in natuurlijke dosis veel groter zijn dan de dosissen van kunstmatige oorsprong waarvan de bijdrage door kernenergie, zoals we zullen zien, een heel heel kleine fractie is.
- Beneden een bepaalde dosis is er geen effect van de straling. Er zijn een aantal theoretische argumenten die dit suggereren (reparatie mechanismen van cellen), maar het kan niet epidemiologisch aangetoond worden. Er zou ergens een “drempel” van stralingsdosis zijn die geen kwaad kan, en boven die drempel begint men de kans op een kanker te verhogen.

Dit lijkt op de vergiftigingsverschijnselen van sommige chemische producten: onder een bepaalde dosis lijken ze helemaal geen effect te hebben.

- Voor kleine dosissen is het effect (= de kans op een kanker) proportioneel met de dosis. Men kan dat ook niet aantonen, maar het lijkt een redelijke aanname, die bovendien strenger is dan de voorgaande suggestie. Men extrapoleert, vanaf de epidemiologisch waarneembare effecten, lineair naar dosis nul. *Dit is de hypothese die aangenomen wordt door de internationale commissies die de normen voor stralingsbescherming vastleggen.*
- Kleine dosissen zijn goed voor de gezondheid: beter een kleine dosis dan geen dosis (hormesis). Net zoals het eerste standpunt wordt dit in het algemeen niet aanvaard, hoewel er wel enkele experimentele aanwijzingen met dierproeven zijn die in die richting gaan. Het idee is dat een kleine stralingsdosis de DNA reparatie mechanismen "activeert", net zoals een vaccin het natuurlijk afweringsmechanisme tegen infecties activeert.

Er zijn wel recente studies die een klein epidemiologisch effect hebben gesuggereerd door de statistische verwerking van alle gegevens van alle werknemers van de nucleaire sector⁵⁴. Hierin zijn



aanwijzingen dat er inderdaad kleine negatieve effecten zijn bij kleine dosissen, zoals aangenomen bij de proportionele hypothese, hoewel de statistische onzekerheden op die resultaten zo groot zijn dat ze nog steeds compatibel zijn met alle bovenstaande hypothesen.

De (conventionele) aanname, bij gebrek aan duidelijke wetenschappelijke gegevens die iets anders aanduiden, is dat het risico op een kanker ten gevolge van een kleine en in de tijd gespreide dosis proportioneel is met de effectieve dosis (zie verder) die men ontvangen heeft. De proportionaliteitscoëfficiënt wordt afgeleid, zoals reeds vernoemd, uit epidemiologische studies van mensen die zwaarder bestraald werden, uit dierproeven en uit biologische proeven die schade aan

⁵⁴<http://www.bmj.com/cgi/content/full/331/7508/77>

cellen tracht te bepalen. Aannemende dat er een lineair verband bestaat tussen stralingsdosis en stochastische effecten (kanker), stelt men *dat de extra kans om een dodelijke kanker te ontwikkelen, geïnduceerd door ioniserende straling die in de tijd is gespreid, 5.6% per Sievert is*. Let wel, hoewel de lineariteitshypothese niet wetenschappelijk is aangetoond met enige zekerheid, is de waarde zelf (5.6%) niet arbitrair: die volgt uit de aanname van een lineair verband tussen oorzaak (dosis) en effect (dodelijke kanker), samen met de vereiste om compatibel te zijn met de epidemiologisch waargenomen effecten bij hogere dosissen.

De proportionele hypothese is de strengste hypothese die wetenschappelijk zinvol is. Een “snelle stijging” net boven het gebied van de natuurlijke achtergrond straling heeft wetenschappelijk gezien geen zin, gezien de grote spreiding die er wereldwijd bestaat in die achtergrondstraling zonder dat men daar duidelijke epidemiologische effecten van heeft waargenomen. Als dusdanig heeft een niet-proportioneel verband tussen dosis en kans op kanker ofwel een snelle stijging bij dosissen die veel lager zijn, of veel hoger zijn dan de achtergrondstraling die in verschillende delen van de wereld wordt waargenomen. In het geval de drempel hoger ligt, zou het zinloos zijn om de artificiële dosis zo laag mogelijk te houden: het zou gewoon volstaan om beneden de drempel te blijven. Kleine extra dosissen beneden die drempel zouden dan geen of weinig effect hebben, in tegenstelling tot wat de proportionele hypothese zegt. In het geval van een drempel beneden de achtergrond dosis (een hypothese die soms door de anti-nucleaire lobby wordt gepromoot: de kleinste hoeveelheid straling is sterk schadelijk) heeft men ook een *kleiner* effect van de *toename* van de dosis boven de natuurlijke achtergrond dosis, als men compatibel wil blijven met de gemeten epidemiologische effecten bij hogere dosis. Inderdaad, een aanvankelijke snellere stijging moet dan gecompenseerd worden met een afvlakken van de curve bij wat hogere dosissen. Als dusdanig is de lineaire hypothese veruit de strengste, en is het de enige hypothese die het zinvol maakt om naar zo klein mogelijke extra dosissen te streven. Dit wordt geïllustreerd in figuur 17.

Om een idee van de grootte orde te hebben, het natuurlijke gemiddelde effectieve dosisdebiet dat we ontvangen heeft een wereldgemiddelde van 2.4 mSv/jaar, maar hangt af van de hoogte, de geologische structuur van de ondergrond enzovoort. Dat wil dus zeggen dat we, over 50 jaar genomen, 120mSv opdoen aan natuurlijke dosis, wat zou moeten leiden tot 0.6% kans dat we een kanker opdoen ten gevolge van die (natuurlijke) straling. Jammer genoeg is de kans om aan een kanker te sterven van de orde van 13% (wereldwijd gemiddelde van doodsoorzaken) en sterk afhankelijk van verschillende factoren (leefgewoonten, genetisch materiaal...), zodat een eventuele 0.6% moeilijk vast te stellen is ten opzichte van de fluctuaties in de lokale kans om aan kanker te sterven ten gevolge van andere oorzaken. We weten dus niet of dat effect werkelijk bestaat, maar nemen het uit voorzichtigheidsoverwegingen aan.

We zullen zien dat de wettelijke maximum dosis voor het publiek ten gevolge van een nucleaire activiteit is vastgelegd op 1 mSv/jaar – dat is een absoluut maximum, niet de “gangbare” grootte die in de praktijk veel kleiner is. Als dusdanig betekent dat een maximum dosis van 50 mSv over 50 jaar of dus een maximale toename met 0.25% van het dodelijke kanker risico. Aangezien de reglementering ook voorschrijft om zo klein mogelijke dosissen als mogelijk is te veroorzaken (het ALARA principe – zie verder) is de effectieve dosis die het publiek ontvangt ten gevolge van kernenergie activiteiten, nog enkele orden van grootte kleiner. We begrijpen nu beter de bewering dat de sanitaire effecten van kernenergie, zelfs onder de strenge hypothese van lineair verband tussen dosis en effect, totaal verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de natuurlijke kans om een dodelijke kanker te krijgen en er zo goed als geen hoop bestaat om die ooit, voor zoverre ze bestaan, statistisch kunnen vast te stellen.

3.3 Kwantificeren van stralingsdosissen

3.3.a Definities van dosimetrische grootheden: algemeenheden

Om wetenschappelijk te kunnen praten over de effecten van stralingsdosis, moeten we die op een of andere wijze kunnen kwantificeren. Dat wil zeggen dat meetbare grootheden moeten gedefinieerd worden, evenals grootheden die gebaseerd zijn op meetbare grootheden (ook al zijn die zelf misschien niet direct meetbaar), die zo goed mogelijk moeten overeenkomen met wat we fysisch bedoelen met “stralingsdosis”, en die zo goed mogelijk de schade aan biologische weefsels kwantificeren.

Men zou aan verschillende types van grootheden kunnen denken: de soort straling (neutronen, fotonen, elektronen, alfa deeltjes), hun energiespectrum en zo voort. Dat zou voor een heel ingewikkelde boekhouding zorgen. Eigenlijk is het niet de precieze soort straling die een rol speelt: wat een rol speelt is *hoeveel ionisatie is veroorzaakt* en ook, *hoe die ionisatie ruimtelijk is verdeeld*. Neutrino's bijvoorbeeld, interageren zo goed als niet met de materie. Het heeft dus totaal geen belang hoeveel neutrino's we door ons lichaam krijgen: ze doen niets in ons lichaam. Neutrino's kunnen ongestoord doorheen de hele aarde vliegen. Dat komt omdat neutrino's (zo goed als) geen interacties met normale materie ondergaan, en bijgevolg ook geen energie afstaan aan die materie.

De fysische basisgrootheid waarop we de effecten van de chemische veranderingen van ioniserende straling kunnen baseren (wat tenslotte is wat we willen meten), is: *hoeveel energie is door de straling gedeponeed in de materie* wetende dat het die energie is die voor ionisatie of excitatie zorgt, de twee effecten van ioniserende straling op materie. Hierop is een belangrijke fysische grootheid in de stralingsbescherming gebaseerd: *de gray*. *Een gray (symbool: Gy) is die dosis straling die in de materie in kwestie een joule heeft achtergelaten per kilogram van de betreffende materie*. Duidelijk is die grootheid onafhankelijk van de tijd waarover die energie is gedeponeed: het is dus een dosis die geïntegreerd is over de tijd. Ook is duidelijk dat de dosis in principe afhankelijk is zowel van de invallende soort straling, als van de materie in dewelke de dosis wordt gegeven. Daarentegen, de dosis is gegeven per eenheid materie (een kilogram). Als we dus twee keer zoveel materie in dezelfde straling plaatsen, dan blijft de dosis dezelfde. Er is een oudere eenheid, de rad, die 100 keer kleiner is: $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.

Energetisch gezien is de gray een heel kleine eenheid: bijvoorbeeld, 1 Gy gedeponeed in water laat de temperatuur van dat water met ongeveer 0.000 25 graden stijgen. Niettemin is een Gy een hoge stralingsdosis, die relatief gevaarlijk is, vooral als ze op korte tijd wordt ontvangen, zoals we gezien hebben.

De gray (Gy) is de eenheid van fysisch geabsorbeerde dosis.

We hebben gezien dat een zekere dosis straling veel gevaarlijker is als ze in een keer wordt toegediend dan wanneer ze gespreid over de tijd wordt toegediend. De reden hiervoor is dat in het eerste geval, de reparatiemechanismen van de cellen overwelmd kunnen worden zodat er zware acute ziekteverschijnselen optreden (stralingsziekte), terwijl in het tweede geval er enkel een verhoogde kans is om op termijn een kanker te ontwikkelen (stochastisch effect). De tijdschaal die hier een rol speelt, is de tijdschaal van de zelfreparatie van de cellen. Op dezelfde wijze als de concentratie van straling in de tijd gevaarlijker is dan gespreid over de tijd, is concentratie van straling in de ruimte (in een paar cellen) gevaarlijker dan meer gespreid over de ruimte (vele cellen). De lengteschaal die hierbij een rol speelt, is de afmeting van de cel (en van de cel kern). Inderdaad, een ioniserende straling die veel ionisatie veroorzaakt over een korte afstand (in 1 cel, zeg maar)

gaat die cel veel schade berokkenen, die ze waarschijnlijk niet meer kan repareren. Ioniserende straling waarvan de ionisatie gespreid is over grotere afstanden (vele cellen) gaat een beetje schade veroorzaken in vele cellen, en waarschijnlijk gaan al die cellen hun schade kunnen repareren.

We hebben hogerop gezien dat de er verschillende mechanismen van ioniserende straling zijn, maar de belangrijkste zijn de interactie met fotonen (die dus 1 ionisatie veroorzaken, plus een snel elektron, ofwel een snel elektron en een snel positron) en de beweging van geladen deeltjes: enerzijds de lichte deeltjes zoals elektronen, en anderzijds de zware deeltjes, namelijk nucliden, zoals alfa-deeltjes. We hadden gezien dat zware, geladen deeltjes hun energie op een veel korter traject verliezen dan lichte geladen deeltjes of fotonen. Vandaar dat zware geladen deeltjes, voor dezelfde energie depositie, meer biologische schade kunnen veroorzaken dan lichte deeltjes of fotonen. Neutronen veroorzaken op zich geen ionisatie. Hun interactie in de biologische materie geeft echter aanleiding tot elastische botsingen die nucliden in beweging zetten (dat zijn zware geladen deeltjes), en ook tot nucleaire interacties die zware deeltjes kunnen uitzenden, of die gamma straling kunnen vrijgeven. Als dusdanig hebben neutronen een indirect, maar belangrijk ioniserend effect, afhankelijk van de nucleaire interacties die ze kunnen ondergaan in biologische materie.

Om rekening te houden met de verschillende hoeveelheden biologische schade die verschillende soorten straling, bij gelijke geabsorbeerde dosis, aanbrengen, vermenigvuldigt men de geabsorbeerde dosis met een “schadefactor” voor de betreffende straling. Bij definitie stelt men de schadefactor van gamma-fotonen met een energie van 250 KeV gelijk aan 1. Het blijkt dat de schadefactor zo goed als onafhankelijk is van de energie van de fotonen.

Men heeft getracht om experimenteel de schadefactor vast te stellen voor andere stralingen (neutronen, elektronen, alfa deeltjes...) door epidemiologische studies en dierenproeven.

Men is tot het volgende besluit gekomen. Er zijn twee manieren om de biologische schade te berekenen startende van de geabsorbeerde dosis. Een eerste manier is te kijken naar hoeveel ionisatie de straling veroorzaakt per lengte eenheid. We hebben gezien dat dit de fysische oorzaak is van de verhoogde schade aan cellen: veel ionisatie op een korte afstand.

Indien de straling per deeltje minder dan 10 KeV per micrometer energiedepositie veroorzaakt, dan is de schadefactor Q gelijk aan 1. Indien de straling per deeltje tussen 10 en 100 KeV per micrometer energiedepositie veroorzaakt, dan is de schadefactor gegeven door de formule $Q = 0.32 L - 2.2$, waarbij L de depositie is in KeV per micrometer. Indien er meer dan 100 KeV per micrometer energie wordt gedeponeerd, dan is de schadefactor gegeven door de formule

$$Q = \frac{300}{\sqrt{L}}$$

De geabsorbeerde dosis, vermenigvuldigd met de bovenstaande schadefactor, heet *het dosis equivalent*. Voor een gegeven straling is het dosis equivalent H gelijk aan de schadefactor Q vermenigvuldigd met de geabsorbeerde dosis D :

$$H = D Q$$

Als de geabsorbeerde dosis uitgedrukt wordt in Gray (Gy), dan wordt het dosis equivalent H uitgedrukt in een nieuwe eenheid, de *Sievert (symbol Sv)*. Een oudere eenheid is de rem: 1 Sv = 100 rem (of 1 rem = 10 mSv).

Een andere aanpak, die vrij equivalent is, bestaat erin een wegingsfactor te geven aan de verschillende componenten van de straling volgens hun natuur. Die wegingsfactor (de biologische schadefactor) is gegeven in een tabel. Voor gamma straling en elektronen is die gelijk aan 1, voor

alfa deeltjes en fissie producten is die gelijk aan 20, en voor neutronen hangt die af van de energie van de neutronen, en gaat van 5 tot 20. Indien men blootgesteld is aan een gemengd stralingsveld, dan dient men de geabsorbeerde dosis D op te splitsen in de deel dosissen veroorzaakt door de verschillende soorten straling, en deze te vermenigvuldigen met de betreffende schade factor alvorens de som te maken. Bijvoorbeeld, indien een zekere geabsorbeerde dosis $D = 0.3 D + 0.7 D$ waar de eerste term, zeg maar, gamma straling en de tweede term, alfa straling voorstelt, dan dient men $0.3 \times 1 \times D + 0.7 \times 20 \times D = 14.3 D$ uit te rekenen om *de equivalente dosis* te bekomen. Noteer het kleine verschil in benaming: equivalente dosis versus dosis equivalent.

Een tweede element waar men rekening mee wil houden bij het biologische effect van straling is de verdeling van de straling over het lichaam. Sommige organen lijden meer schade dan andere, en naargelang de dosis geconcentreerd is op die organen of niet, is de algemene biologische schade anders. Men heeft een tabel opgesteld met een wegingsfactor per orgaan. Men dient de equivalente dosis, of het dosis equivalent, te wegen met deze factoren. De som van al die wegingsfactoren is gelijk aan 1. Indien die wegingsfactor gewoon gelijk zou zijn aan de verhouding van de massa van het orgaan op de massa van het lichaam, dan zou zo een wegingsfactor geen effect hebben.

De wegingsfactoren zijn:

- Geslachtsorganen 0.2 (duidelijk maken de geslachtsorganen niet 1/5 uit van de massa van het totale lichaam: men kent dus een hogere gevoeligheidsfactor toe aan deze organen)
- beenmerg: 0.12
- Ingewanden, maag, longen: elk 0.12
- Urineblaas: 0.05
- Borsten (x2): 0.05
- Schildklier: 0.05
- Slokdarm: 0.05
- Huid: 0.01
- Beenderen: 0.01
- Rest: 0.05

De dosis, dusdanig herwogen volgens de organen, heet: *de effectieve dosis*. Indien het lichaam in zijn geheel is blootgesteld aan een uniforme straling van een of ander type, dan is de effectieve dosis gelijk aan de equivalente dosis (of het dosis equivalent, naargelang). Het is slechts indien de bestraling niet uniform verdeeld is over het lichaam, dat deze coëfficiënten een belang hebben. De eenheid van effectieve dosis is ook de Sievert.

Bijvoorbeeld, indien de longen blootgesteld zijn aan een dosis alfastraling van 100mGy (mGy = milligray = 0.001 gray), en de rest van het lichaam niet is blootgesteld, dan is de equivalente dosis gelijk aan 2 Sv (want de schadefactor van alfastraling is gelijk aan 20). De wegingsfactor van de longen is 0.12, de effectieve dosis is gelijk aan 0.24 Sv. De beschreven bestraling wordt verondersteld hetzelfde risico-effect te hebben als een blootstelling van het gehele lichaam aan een dosis van 0.24 Sv (bijvoorbeeld, door een uniforme gammastraling van 0.24 Gy).

3.3.b Externe en interne blootstelling (bestraling versus contaminatie)

Er zijn twee manieren om een lichaam bloot te stellen aan ioniserende straling. Gezien straling zich door de ruimte voortplant, kan een externe bron van straling een lichaam bestralen. Dat is wat men meestal verstaat onder “bestraling”. Maar het kan ook zijn dat het lichaam de stralingsbronnen intern heeft opgenomen, via ademhaling, inslikken, penetratie door de huid, of via een wonde. Die bronnen blijven dan hun straling afleveren aan het lichaam, tot ze door dat lichaam geëlimineerd worden.

In het geval van externe bestraling is de dosis berekenbaar door de totale hoeveelheid ioniserende straling die het lichaam heeft ondergaan uit te rekenen. De meeste externe bronnen geven een min of meer constante bestraling in de tijd. We kunnen dan, per tijdseenheid uitrekenen hoeveel dosis wordt opgenomen. De dosis per tijdseenheid ten gevolge van een externe bron wordt *het dosis debiet* genoemd. De tijd die men verblijft in een zone waar een zeker dosis debiet aanwezig is, bepaalt dan de totale ontvangen dosis.

De eenheid van dosisdebiet is gray per tijdseenheid (bijvoorbeeld, gray per uur, of gray per jaar of...) indien het om geabsorbeerde dosis gaat, of Sievert per tijdseenheid (Sv/hr, Sv/jaar...) als het om biologische equivalente dosissen gaat.

Men kan een constant stralingsveld beschrijven door zijn dosisdebiet. De opgelopen dosis is dan gelijk aan het dosis debiet vermenigvuldigd met de tijd die men in dat stralingsveld heeft doorgebracht. Er bestaat meetapparatuur die het dosisdebiet kan meten (dosimeters). Als dusdanig is het relatief gemakkelijk om de dosis opgelopen door een externe bestraling te kwantificeren: het volstaat om zich met zijn dosimeter te verplaatsen.

Interne bestraling is wat ingewikkelder. Men heeft de bron opgenomen in zijn lichaam. Uiteraard zijn de meest voor de hand liggende interne bronnen de radioactieve stoffen (dat wil zeggen: stoffen die radioactieve nucliden bevatten) – men slikt maar heel zelden deeltjesversnellers in. Afhankelijk van de chemische natuur van die radioactieve stoffen, worden deze in bepaalde organen opgehoopt of niet, en worden ze gemakkelijk uitgescheiden of niet. Bij de inname van een zekere hoeveelheid van een radioactieve stof kan men in principe uitrekenen wat de dosis zal zijn die de aanwezigheid van die stof in het lichaam gaat veroorzaken: enerzijds is er het radioactieve verval van de stof (ze vermindert dus vanzelf) en anderzijds is er de biologische uitscheiding. Vanaf het ogenblik van inname vermindert dus de aanwezigheid van die stof, en ondertussen bestraalt ze een of meerdere organen met een a priori gekend dosisdebiet. Over de jaren accumuleert men op die wijze dus een zekere dosis ten gevolge van de inname van een radioactieve stof. In sommige gevallen valt het dosisdebiet terug op ongeveer 0 na een zekere tijd – de stof is helemaal radioactief vervallen, of is helemaal uitgescheiden. Of men nu over langere tijden rekent of niet, de totale dosis zal niet veranderen. Daarentegen, sommige stoffen vervallen maar traag en worden niet veel uitgescheiden. Men heeft dan gedurende de rest van zijn leven een dosisdebiet ten gevolge van die stoffen. In de praktijk doet men de berekening over 50 jaar ; tenzij voor kinderen, waar men rekent tot aan de leeftijd van 70 jaar. Indien men een contaminatie met radioactieve stoffen heeft opgelopen, dan spreekt men van *de geëngageerde dosis* over de vernoemde periode: men heeft die dosis nog niet ontvangen, maar ze is niet meer vermijdbaar in de toekomst.

De natuur van de straling die een rol speelt is ook helemaal anders bij externe bestraling en interne bestraling of contaminatie. Bij een externe bestraling is het nodig dat de straling van de externe bron tot in de levende weefsels van het lichaam raakt, om schade door ionisatie kunnen te veroorzaken. Als dusdanig spelen zware geladen deeltjes eigenlijk geen rol. Alfadeeltjes of fissieproducten raken slechts enkele micrometer ver in vaste materie (enkele millimeters tot

centimeters in lucht). Als dusdanig raken ze niet door de oppervlakte van de menselijke huid. *Zolang de bron extern blijft, is een bron van alfastraling of van fissieproducten eigenlijk relatief ongevaarlijk.* Daarentegen kunnen gamma fotonen of neutronen ettelijke meters afleggen doorheen lucht, en centimeters of meer in materie. Als dusdanig zijn zij de meest zorgwekkende externe bronnen van straling. Elektronen bevinden zich een beetje tussen deze gedragingen. Snelle elektronen raken niet ver in lucht, en raken ten hoogste enkele mm doorheen vaste stoffen of vloeistoffen. Als dusdanig is een lichte bescherming (kledij) vaak voldoende om zich te beschermen tegen een externe bèta straler.

Het is helemaal omgekeerd met interne bestraling. De bron is nu aanwezig in het lichaam, en de afstand die moet overbrugd worden is nul. De gevaarlijkste bronnen zijn nu alfa stralers, of spijtingsproducten, gezien hun hoge schade coëfficiënt. Gammastralers zijn de minst gevaarlijke: er is vrij veel kans dat de gammastraling het lichaam verlaat.

3.3.c Dosimetrische grootheden: vervolg

Dosimetrie is een specifieke toepassing van de detectie van ioniserende straling, die tracht een zo juist mogelijke inschatting te geven van de dosimetrische grootheden, dat wil zeggen, van de grootheden die eerder gedefinieerd werden, zoals geabsorbeerde dosis en grootheden die toelaten om de effectieve dosis of de equivalente dosis te bepalen. Zoals we gezien hebben, is het begrip “geabsorbeerde dosis” *niet alleen afhankelijk van de natuur en flux van de straling, maar ook van de materie waarop ze invalt.* In ons geval interesseren we ons voornamelijk aan biologische materie. Maar nog lastiger: de straling die invalt wordt gemodificeerd door de materie, en bijgevolg ontvangen dieper liggende weefsels een heel ander stralingsveld dan weefsels aan het oppervlak van het lichaam. In sommige gevallen wordt hierdoor de dosis sterk verminderd (denk maar aan alfa straling), maar in sommige gevallen verhoogt de dosis ontvangen door de dieperliggende weefsels ten gevolge van de aanwezigheid van de weefsels aan het oppervlak. Een typisch voorbeeld is gamma bestraling. De gamma straling zelf wordt voor een deel geabsorbeerd door de (biologische) materie. Maar bij dat gebeuren worden elektronen vrijgemaakt (bijvoorbeeld, door foto-elektrisch effect). De dichtheid van elektronen stijgt naarmate men dieper in de materie doordringt om een maximum te bereiken, en dan terug te vallen. Bijgevolg is de voornaamste dosis niet bereikt aan het oppervlak, maar op een zekere diepte in de weefsels.

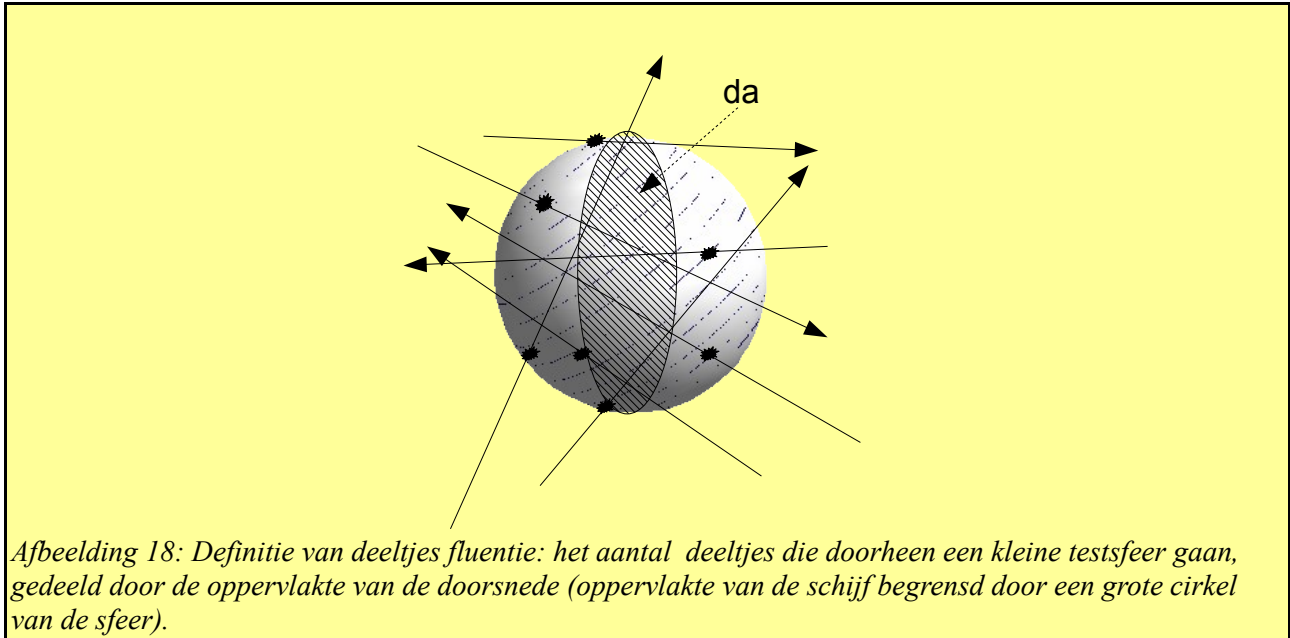
De problematiek van de dosimetrie is natuurlijk dat we een meting willen bekomen die ons de dosimetrische grootheden geeft zonder dat we een gedetailleerde analyse van de verschillende componenten van een stralingsveld willen doorvoeren. Dat zou een te complexe meting vereisen, die wel in principe uitvoerbaar is, maar niet praktisch is om “in het veld” gebruikt te worden. We zullen zien dat er technieken bestaan die ons toelaten om met relatief eenvoudige middelen een vrij accurate schatting te maken van de dosimetrische grootheden.

We waarschuwen de lezer: het wordt ietwat technischer. Niettemin denken we dat een betere kennis van wat nu precies dosimetrisch gedefinieerd is een goede zaak is voor zij die een gevoel willen ontwikkelen voor de objectieve risico's van ioniserende straling en bij extrapolatie, de vermeende en werkelijke risico's van het kernenergie gebeuren.

Eerst definiëren we enkele grootheden die ons zullen helpen bij het begrijpen wat er nu gemeten wordt ; nadien zullen we uitvoerbare standaard meetprocedures bespreken die, uitgaande van meetbare grootheden, schattingen opleveren van de dosimetrische grootheden (equivalente dosissen in delen van het menselijk lichaam en dergelijke). Vervolgens bespreken we praktische meetapparatuur die geijkt wordt tegen deze standaard meetprocedures. Bij deze opbouw gaan we

uit van eerder natuurkundig geïnspireerde en wat abstracte grootheden, om tot praktische meetgrootheden te komen in een later stadium.

We beginnen met het invoeren van grootheden die de beweging van de stralingsdeeltjes beschrijven.



Afbeelding 18: Definitie van deeltjes fluentie: het aantal deeltjes die doorheen een kleine testsfeer gaan, gedeeld door de oppervlakte van de doorsnede (oppervlakte van de schijf begrensd door een grote cirkel van de sfeer).

Een eerste naïeve manier zou er natuurlijk in bestaan van gewoon een lijst te geven van alle posities van alle individuele deeltjes en hun bewegingsrichting en snelheid, maar men ziet snel in dat dat een veel te gedetailleerde manier van doen is. We willen een grootheid die ons aangeeft hoeveel deeltjes zich bewegen in een zeker stukje van de ruimte. Beschouw een (kleine) sfeer die een doorsnede heeft met oppervlak da ; da is niet het oppervlak van de sfeer zelf, maar van de doorsnede: als de sfeer een straal R heeft, dan is da gelijk aan πR^2 , terwijl het sferoppervlak zelf $4\pi R^2$ is. Die kleine sfeer heeft als centrum een punt P in de ruimte. Het aantal deeltjestrjecten (van een bepaalde soort...) die de sfeer binnendringen noemen we dN . De *deeltjes fluentie* in het punt P is bij definitie gelijk aan $F = dN/da$. Men gebruikt ook wel de letter ϕ . Afbeelding 18 tracht het idee te illustreren. De SI eenheid van deeltjesfluentie is: per m^2 . De reden voor deze definitie is dat de grootheid “deeltjes fluentie” op die manier niet afhangt van de precieze grootte van de sfeer die we gekozen hebben, op voorwaarde dat de sfeer klein genoeg is. Met andere woorden, de deeltjes fluentie beschrijft hoeveel deeltjes zich in de buurt van punt P bewegen op een wijze die onafhankelijk is van de precieze manier waarop we de “buurt van P ” vastleggen.

De deeltjes fluentie *per tijdseenheid* noemt men het deeltjes *fluentie debiet*, \dot{F} . De SI eenheid is: per vierkante meter en per seconde.

Zoals gezegd, kan men praten over deeltjes van een bepaalde soort. Men kan bijvoorbeeld praten over het fluentie debiet van alfadeeltjes ter hoogte van de punt van uw neus, of in een punt van uw longen.

Het is belangrijk te beseffen dat bij de bepaling van de fluentie, de richting van de deeltjes geen belang heeft: het is gewoon een mate voor hoeveel deeltjes per oppervlakte eenheid langs komen, onafhankelijk van hun richting. Een fluentie is dus steeds een positief getal.

Men kan anderzijds ook spreken van *de energie fluentie* ψ van geladen deeltjes of van neutrale deeltjes. In dit geval gaat het niet om het aantal deeltjes, maar om de totale energie van de deeltjes

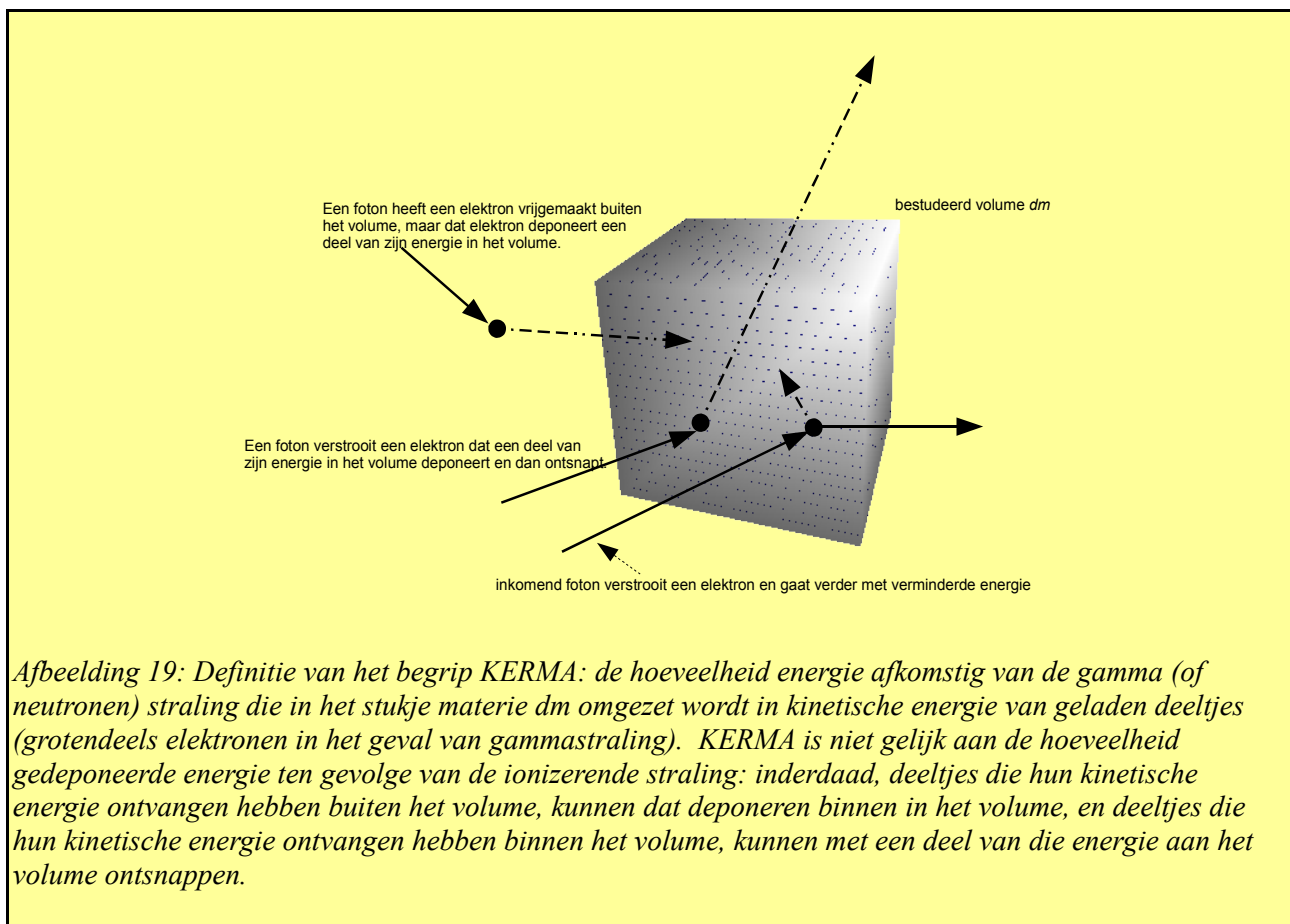
die de kleine sfeer hebben gepenetreerd, gedeeld door het oppervlak van de doorsnede van de sfeer. De eenheid is: Joule per m^2 .

Net zoals met het deeltjes fluentie debiet, kan men ook *het energie fluentie debiet* definiëren: het is de energie fluentie per tijdseenheid. De SI eenheid is: Watt per m^2 .

Tenslotte kan men ook *een spectrale deeltjes fluentie* definiëren: het is de deeltjes fluentie van de deeltjes die een energie hebben tussen E en $E + dE$: $\phi_E = \frac{d\phi}{dE}$. De eenheid is: per m^2 per Joule.

Stralingsenergie R van een aantal deeltjes is gelijk aan de som van de energieën van de deeltjes in kwestie.

We komen nu tot onze eerste dosimetrise relatie: Beschouw een stukje materie van massa dm . De energie afgestaan aan dat stukje materie dm rond punt P is gelijk aan: $d\epsilon = R_i - R_u + Q$ Waarbij R_i de stralingsenergie is van de deeltjes die het stukje materie binnendringen, R_u de stralingsenergie is van de deeltjes die het stukje materie verlaten, en Q de som is van de verminderingen van bindingsenergie in het stukje materie (dus de energie die is vrijgekomen). Het is gewoon de boekhouding van de energie die binnenkomt, de energie die buitengaat, en de energie die



vrijgemaakt is door de kernen in het stukje. Deze energie, gedeeld door de hoeveelheid massa is:

de *geabsorbeerde dosis* $D = \frac{d\epsilon}{dm}$

De eenheid is de gray.

Men definieert ook *de KERMA* (kinetic energy released in matter) voor ongeladen deeltjes (gamma fotonen en neutronen): het is de kinetische energie dE_t die in een stukje materie van massa dm is afgestaan aan geladen deeltjes door de invallende straling:

$$K = \frac{dE_t}{dm}$$

Dit is niet noodzakelijk gelijk aan de geabsorbeerde dosis: inderdaad, enerzijds kan de invallende straling kinetische energie verloren hebben in ons stukje materie aan een elektron, maar dat elektron zelf ontsnapt aan ons stukje materie. Als dusdanig is niet de volledige energie van dat elektron gedeponerd als ioniserend effect in ons stukje materie. Anderzijds kunnen geladen deeltjes die in gang gezet waren door onze invallende straling in een ander stukje materie, een deel van hun energie verliezen in ons stukje materie. Die bijdrage maakt deel uit van de geabsorbeerde dosis, maar niet van de KERMA. De KERMA bepaalt eerder de conversie van ongeladen straling in geladen deeltjes. Het concept wordt geïllustreerd in afbeelding 19.

Als we de geabsorbeerde dosis of de KERMA gaan beschouwen per tijdseenheid, dan bekomen we het *geabsorbeerde dosis debiet* en het *KERMA debiet*. De eenheid is in beide gevallen: gray per seconde.

Laten we een radioactieve puntbron beschouwen in de lege ruimte, met een activiteit A . I is het gemiddelde aantal deeltjes van de soort die we willen beschouwen per verval-gebeurtenis⁵⁵. Op een afstand s van de bron is het deeltjes fluentie debiet gelijk aan:

$$\dot{\phi} = \frac{AI}{4\pi s^2}$$

We kunnen een bron als een puntbron beschouwen, als haar afmetingen klein zijn ten opzichte van s . Als we ons tweemaal zover van een punt bron bevinden, dan is het dosisdebiet vier keer kleiner.

We hebben reeds aangehaald dat bij het invallen van een ioniserende straling op materie, het niet volstaat om te kijken wat er met die invallende straling gebeurt, maar dat er ook secundaire ioniserende stralingen ontstaan als het resultaat van de interactie van het originele stralingsveld op de materie. Die secundaire straling geeft ook aanleiding tot ionisatie, volgens haar eigen karakteristieken. Als er een bundel gammastralen invalt op de materie ontstaan er ook snelle elektronen. Deze snelle elektronen dienen als een tweede, secundaire ioniserende stralingsbron beschouwd te worden. Indien de reikwijdte van de elektronen echter relatief klein is in vergelijking met de diepte in de materie waar de gammastraling significant wordt verminderd, dan bekomt men al vrij snel, na een diepte van de orde van een reikwijdte van de elektronen, wat men noemt: *het elektronisch evenwicht*. Dat wordt symbolisch geïllustreerd in figuur 20. Met een zekere gamma-fluentie gaat dan een zekere elektronen-fluentie gepaard. Eens dit regime bereikt is, kan men stellen dat de hoeveelheid energie afgestaan door de gammastraling aan de materie ook gelijk is aan de hoeveelheid ionisatie die veroorzaakt wordt. Het zijn, lokaal gezien, echter niet de elektronen die door de gammastraling in beweging zijn gezet die al hun energie lokaal verliezen, maar wel gedeeltelijk deze elektronen, en gedeeltelijk de eerder in gang gezette elektronen die voorheen door de gammastraling in beweging werden gezet. Bij elektronisch evenwicht is dat deel exact gelijk aan

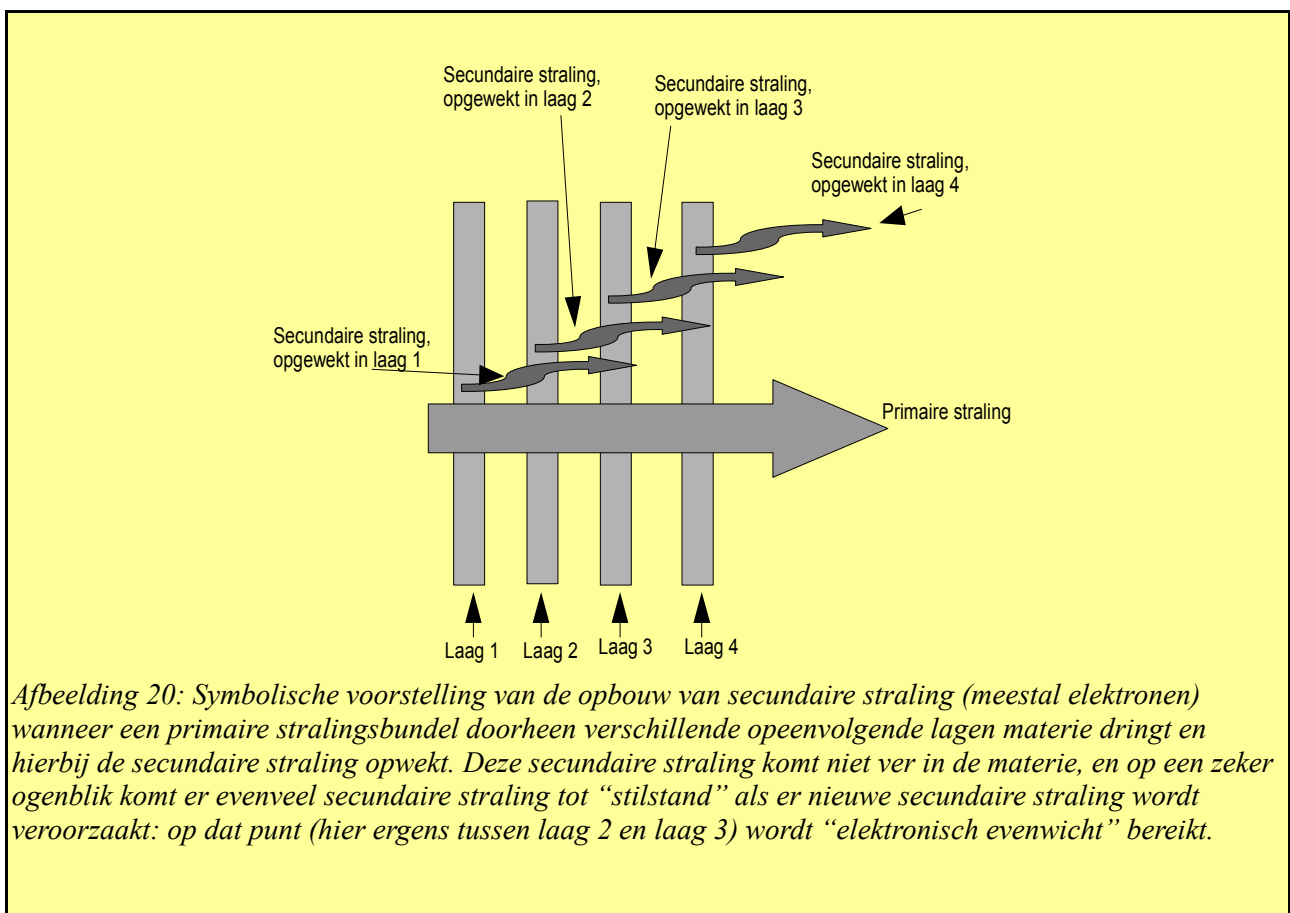
⁵⁵Er kunnen immers per gebeurtenis ofwel meerdere deeltjes vrijkomen (bij een radioactieve desintegratie kunnen soms verschillende gammafotonen vrijkomen), ofwel zijn er verschillende mogelijke vervalgebeurtenissen, waarbij soms wel, en soms geen deeltjes van de gewenste soort vrijkomen. I zal hier het gemiddelde aantal deeltjes zijn over al deze mogelijkheden. In het eenvoudige geval waarbij er steeds hetzelfde soort verval gebeurt, en waarbij er bij dat verval steeds een deeltje van de gewenste soort vrijkomt, is $I=1$.

de hoeveelheid energie die de huidige elektronen niet lokaal hebben gedeponereerd. Men zou daarom geneigd zijn te stellen dat de geabsorbeerde dosis gelijk is aan de KERMA. Dit is bijna juist. Het enige wat fout gaat is dat de secundaire elektronen ook een deel van hun energie kunnen verliezen door fotonen uit te zenden (remstraling). Die energie wordt niet lokaal gedeponereerd. Als we de fractie van het energieverlies van een secundair elektron door remstraling, g noemen, dan kunnen we, bij elektronisch evenwicht, schrijven:

$$D = K(1-g)$$

Bij lichte materialen is $g \sim 0$.

Voor voldoende dikke materialen is er dus wel een gelijkheid tussen de KERMA en de geabsorbeerde dosis. Dit is belangrijk, want voor gamma fotonen is de KERMA gemakkelijk uit te rekenen: Als ϕ de deeltjes fluentie is van de gammafotonen met een energie E_γ in een punt P , en μ_{tr} is de attenuatie coëfficiënt van botsing, dan is de KERMA gelijk aan: $K = \phi E_\gamma \mu_{tr} / \rho$ waarbij ρ de dichtheid van het materiaal is.



Afbeelding 20: Symbolische voorstelling van de opbouw van secundaire straling (meestal elektronen) wanneer een primaire stralingsbundel doorheen verschillende opeenvolgende lagen materie dringt en hierbij de secundaire straling opwekt. Deze secundaire straling komt niet ver in de materie, en op een zeker ogenblik komt er evenveel secundaire straling tot "stilstand" als er nieuwe secundaire straling wordt veroorzaakt: op dat punt (hier ergens tussen laag 2 en laag 3) wordt "elektronisch evenwicht" bereikt.

Naast elektronen hebben de primaire gamma fotonen ook aanleiding gegeven tot de productie van andere gamma fotonen. We hebben die lokaal niet meegerekend omdat die normaal gezien de kleine hoeveelheid massa verlaten en relatief ver kunnen doordringen. Maar voor een volledige berekening dient men ook de boekhouding van deze secundaire gamma fotonen in rekening te brengen. De enige manier van doen is via een vrij ingewikkelde berekening die de precieze geometrie van, zeg maar, het lokaal waar we ons bevinden in rekening brengt. Dit geeft aanleiding tot een mogelijke verhoging van de dosis. Men noemt dit effect de "opbouw factor".

Voor neutronen is de zaak veel ingewikkelder, behalve in een geval: indien men de dosis in een primair neutronen straalveld wenst uit te rekenen, en de kans op een interactie met een neutron is vrij klein en enkel absorberend, dan kan men dezelfde aanpak als met fotonen gebruiken. Maar in het geval van herhaalde interacties in de materie (verstrooiing) zoals meestal het geval is, wordt de zaak veel te ingewikkeld om met enkele eenvoudige schattingen de dosis te berekenen, en moet men overgaan op een volledige berekening van het stralingstransport probleem.

We hebben hogerop gezien dat de biologische schade niet alleen afhankelijk is van de hoeveelheid ionisatie die in een stukje materie is veroorzaakt (de geabsorbeerde dosis), maar ook van de ruimtelijke concentratie van die ionisatie: komt het in kleine, intense spoortjes, of is de ionisatie meer uniform verspreid? De biologische reden hiervoor was dat veel schade aan een enkele cel, die cel onherroepelijk beschadigt, terwijl een beetje schade aan vele cellen, waarschijnlijk al die cellen toelaat om zichzelf te repareren.

Als we naar een klein stukje materie kijken, waar we de ioniserende deeltjes een voor een kunnen zien langskomen, en dat kleiner is dan de gemiddelde lengte van een ioniserend spoor, dan kunnen we wel een idee krijgen van die ruimtelijke concentratie. Inderdaad, als we een klein volume beschouwen, dan kunnen we nog altijd de gemiddelde hoeveelheid ionisatie (dus de geabsorbeerde dosis) bepalen. We berekenen hoeveel ionisatie zich in het geheel heeft voorgedaan in dat kleine volume en delen dat door de massa van het kleine volume in kwestie. Maar we krijgen ook een idee van de lokale ionisatie dichtheid: is die totale hoeveelheid ionisatie er gekomen in hele vele kleine beetjes, of in een veel kleiner aantal grote dosissen?

Laten we een sfeertje beschouwen met diameter d , waarbij d van de orde is van een micrometer (grootte orde van een biologische cell!). Het sfeertje stelt een hoeveelheid massa m voor. Als een ioniserend deeltje langskomt, wordt er een hoeveelheid ionisatie veroorzaakt in dat sfeertje. Al die ionisatie wordt gedeponereerd in een fractie van een nano-seconde. Heel wat later gaat er misschien een tweede deeltje langskomen, en opnieuw gaat alle ionisatie door dat deeltje veroorzaakt, in een fractie van een nano-seconde worden gedeponereerd. We kunnen de statistische verdeling maken van al die individuele deposities (een histogram). We kunnen, per depositie, twee grootheden uitrekenen, uitgaande van de hoeveelheid ionisatie energie die is gedeponereerd in het sfeertje voor die depositie, ϵ : enerzijds is er de specifieke energie, $z = \epsilon/m$, uitgedrukt in Gray. De som van de waarden van z geeft ons natuurlijk de totale geabsorbeerde dosis in Gray. Maar we kunnen anderzijds ook de lineaire energie definiëren: $y = \epsilon/l$ waarbij l de gemiddelde koorde is van een rechte doorheen de sfeer. Men kan aantonen dat $l = 2/3 d$ als we alle denkbare rechten beschouwen die doorheen het sfeertje gaan. De grootheid y is, per depositie, een schatting voor de lineaire ionisatiedichtheid zolang het spoortje in kwestie langer is dan de diameter van het sfeertje. Dat is interessant om het biologische dosis equivalent uit te rekenen: voor elke gebeurtenis kennen we nu zowel de bijhorende dosis z , als een schatting voor de lineaire ionisatiedichtheid y . Bij een lineaire ionisatiedichtheid y hoort een schadefactor die we reeds zijn tegengekomen: $Q(L)$. Als L kleiner is dan 10 KeV/micrometer, dan stellen we $Q(L) = 1$; als L tussen 10 en 100 KeV / micrometer is, dan stellen we $Q(L) = 0.32 L - 2.2$; voor L groter dan 100 KeV / micrometer schrijven we $Q(L) = 300/\sqrt{L}$. Een schatting van het dosisequivalent is nu gemakkelijk gevonden: we maken de som over alle evenementen van de waarde $z Q(y)$. Als we dat delen door de tijd die het geduurd heeft om al die gebeurtenissen waar te nemen, dan hebben we onmiddellijk het debiet van dosis equivalent.

Het voordeel van de bovenstaande techniek is dat ze onafhankelijk is van de natuur van de invallende deeltjes en dus korter bij het eigenlijke fenomeen van biologische schade door ioniserende straling staat. We zullen zien dat er een experimentele techniek bestaat om een louter

experimentele meting door te voeren van het dosis equivalent, gebaseerd op bovenstaande redenering. *We zijn er dus op die manier in geslaagd om van een dosimetrische grootte een in principe experimenteel meetbare schatting in te voeren.*

3.4 Meten van stralingsdosissen

3.4.a Detectie van ioniserende straling: principes.

Ioniserende straling kan gemakkelijk met instrumenten waargenomen worden. Er bestaan verschillende categorieën van instrumenten die individuele ioniserende deeltjes kunnen waarnemen. Het meest gekende instrument is waarschijnlijk de fotografische plaat. De fotografische plaat is in feite niet gevoelig aan ionisatie, maar aan elektronische excitatie. Licht fotonen (lichtdeeltjes) hebben in het algemeen niet genoeg energie om materie te ioniseren (er zijn een paar uitzonderingen, zie verder), maar kunnen wel sommige elektronen aanslaan. Het is op dat proces dat de fotografische plaat is gebaseerd. Zilverbromide kristalletjes⁵⁶ zijn op dat vlak opmerkelijk: de elektronen ervan kunnen niet alleen aangeslagen worden, maar de aangeslagen toestand blijft bovendien lang bestaan (in de vorm van enkele interstitiele zilveratomen). Zo een aangeslagen toestand die kan blijven bestaan heet een *metastabiele toestand*. Het blijkt nu dat de metastabiele toestand van zilverbromide chemisch anders reageert dan de normale (grondtoestand). Een chemische reactie kan bijvoorbeeld aanleiding geven tot reductie van de zilver ionen in metallisch zilver met metastabiele zilverbromide kristallen, maar niet met gewoon zilverbromide. Die chemische stof heet de “ontwikkelaar”. Nadien wordt met een fixeermiddel de overblijvende (gewone) zilverbromide weggewassen: wat overblijft is metallisch zilver daar waar licht fotonen op de fotoplaat invielen. Met andere woorden: hoe meer licht er was, hoe zwarter de foto: we hebben een negatief.

Een fotografische plaat is gevoelig voor elektronische aanslag. Ioniserende straling doet dat ook, naast materie ioniseren. Ioniserende straling maakt dus ook fotografische platen zwart. Toen Henri Becquerel in 1896 bij toeval het verschijnsel van natuurlijke radioactiviteit ontdekte was dat met een fotografische plaat. In feite probeerde Becquerel het fenomeen van fosforescentie te bestuderen: materialen blootgesteld aan zonlicht die nadien in het donker nog licht uitstralen zoals op uw nachtwekker van de oude stempel. Hij bestudeerde verschillende fosforescerende kristallen, waaronder zekere uraniumzouten. Na enkele experimenten had hij zijn reserve fotografische platen samen met die kristallen in een lade van zijn bureau opgeslagen. Nadien stelde Becquerel vast dat de platen zwart geworden waren. Na enkele verificaties bleek het de straling te zijn voortkomende van het radioactief verval van uranium die de platen had zwartgemaakt: het fenomeen van de natuurlijke radioactiviteit was experimenteel vastgesteld!

Individuele ioniserende deeltjes met voldoende energie kunnen zelfs een spoor nalaten in een fotografische plaat: op verschillende plekken langs hun traject in de plaat hebben ze immers wat zilver bromide kristalletjes aangeslagen: er treedt een zwarting op langs hun traject. Fotografische platen worden nog steeds gebruikt in de hoge-energie fysica. Ze hebben een heel belangrijk voordeel: ze hebben een heel goede ruimtelijke resolutie. Daarentegen hebben ze een nadeel: ze zijn gevoelig gedurende de hele tijd van het experiment, en nadien moet de emulsie ontwikkeld worden. We hebben dus geen tijdsinformatie.

⁵⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Silver_bromide

Er zijn andere technieken gebruikt in de hoge-energie fysica om deeltjestrajecten waar te nemen: we denken hierbij aan nevelvaten en bellenvaten. Aangezien deze technieken niets te maken hebben met wat in de nucleaire sector gebruikt wordt, gaan we er verder niet op in ; ze hebben trouwens enkel een historisch belang.

Daarentegen, twee principes die wel vaak gebruikt worden, zijn: gasdetectoren en scintillatie detectoren. Ioniserende straling ioniseert ook gassen. In tegenstelling tot in de meeste vaste stoffen of vloeistoffen, is het mogelijk om de geïoniseerde gasmoleculen (ionen) enerzijds, en de vrijgemaakte elektronen anderzijds, in een gas te laten bewegen onder de invloed van een elektrisch veld, zonder dat de lading hierbij “verloren” gaat. Het is dus mogelijk om een (heel klein beetje) lading te recupereren, die het gevolg is van de ionisaties veroorzaakt door een ioniserend deeltje in een gasvolume. Als die lading op een geleider komt die in het gas geplaatst is, dan geeft dat een heel klein elektrisch signaaltje. Het is voor de elektronicus een uitdaging om dat hele kleine signaaltje waar te nemen. Maar er bestaat een tweede fenomeen in een gas: als het elektrisch veld sterk genoeg is, kan een elektron hard genoeg versneld worden om op zichzelf ook weer een ioniserend deeltje te worden (dat dus ook weer een elektron gaat vrijmaken) enzovoort. We krijgen een soort kettingreactie of lawine van ioniserende deeltjes in het gas, startende met een enkel elektron. We krijgen, wat genoemd wordt, *gasversterking* door het lawine effect. Voor de ionen lukt dat niet: die zijn te traag om voldoende versneld te worden in een gas onder elektrische velden die geen vonken veroorzaken in dat gas.

Men kan het bovenstaande fenomeen op twee manieren toepassen. Men kan ten eerste het elektrisch veld zo sterk maken, dat de kettingreactie zichzelf “uitsmoort”: indien zoveel ioniserende interacties zijn gebeurd dat er veel geladen deeltjes in het gas aanwezig zijn, dan gaan die het elektrische veld dat voor de kettingreactie verantwoordelijk was, afschermen, en dus de reactie vanzelf stopzetten. Het voordeel van deze aanpak is dat we “het onderste uit de kan halen” qua gasversterking, en dus een heel sterk elektrisch signaal kan geven ; zo sterk, dat men de geleider in het gas direct op een luidsprekertje kan aansluiten, en men “klik” hoort. De eerste gasdetectoren waren van dat type: de welgekende *Geiger-Mueller teller*. Het voordeel van zo een detector is dat men heel weinig (of geen) elektronica nodig heeft. Uit het aantal “klik” per tijdseenheid heeft men dan een idee van hoeveel ioniserende straling aanwezig is.

Maar men kan het elektrisch veld ook beperken, en de kettingreactie slechts over een heel klein stukje ruimte van de gasdetector laten plaatsvinden. Typisch doet men dat door een hele fijne metaaldraad in het gasvolume te spannen, en daar een goed gekozen elektrische potentiaal (van de orde van 1000-2000V) aan te leggen. We krijgen nu een bepaald aantal elektronen voor een enkel begin elektron. Met andere woorden: de lading die na deze gasversterking gerecupereerd wordt, is evenredig met de lading die door ionisatie in het gas is veroorzaakt. Men noemt zo een detector een *proportionele gasdetector*. Het is heel interessant om een signaal te bekomen dat proportioneel is met de hoeveelheid ionisatie die is opgetreden. Het signaal is wel veel groter dan het signaal dat we enkel zouden bekomen hadden we gewoon de initiële lading gemeten ; het is dus elektronisch gemakkelijker om dat signaal waar te nemen. Indien we er kunnen voor zorgen, dat een ioniserend deeltje volledig tot stilstand komt binnenin de gasdetector, dan is de totale ionisatie die dat deeltje veroorzaakt, evenredig met zijn bewegingsenergie. Als dusdanig laat een proportionele gasdetector toe om deeltjesenergie te meten. Opdat we met een gasdetector de deeltjes energie zouden kunnen meten, moet de ioniserende straling helemaal tot stilstand gebracht worden in het gas. Voor zware deeltjes, die niet diep in de materie kunnen doordringen (zoals alfa deeltjes), is dat geen probleem. Maar voor gamma stralen bijvoorbeeld is dat niet zo evident. Men zou oftewel een groot gasvolume moeten gebruiken, ofwel moet men een ander, dichter medium dan een gas aanwenden.

Men kan een fenomeen gebruiken dat in dicht materiaal ook goed werkt: scintillatie. Er bestaan materialen (vaste stoffen en ook vloeistoffen, naast gassen) die, wanneer ze elektronische aanslag ondergaan, licht uitzenden. Zulke materialen heten: *scintillatoren*. Zoals we eerder gezien hebben, gaat met ioniserende straling ook steeds elektronische aanslag gepaard. Men heeft hier bijgevolg een andere manier om een signaal, proportioneel met de invallende energie van het ioniserende deeltje, te meten: men dient gewoon de hoeveelheid licht die uit een scintillator komt te meten. Er zijn wel twee problemen: ten eerste is het vaak zo dat een scintillator ondoorschijnend is voor zijn eigen scintillatie licht. Ten tweede zijn de hoeveelheden licht (het aantal licht fotonen) meestal heel klein. Het eerste probleem kan aangepakt worden door zogenaamde “golflengte verschuivers” aan te wenden: dat zijn fluorescerende stoffen die bij bestraling met licht van een bepaalde golflengte, licht van een andere (langere) golflengte uitzenden. Als we een scintillator mengen met zo een fluorescerende stof, dan wordt het scintillatie licht (voor een deel) omgezet in het fluorescentie licht van de golflengte verschuiver. Als we die goed kiezen, kan de scintillator wel doorzichtig zijn voor dat licht, en dus ongehinderd naar buiten treden.

Om goed gebruik te maken van de kleine hoeveelheid licht die per gebeurtenis wordt geproduceerd moeten we licht-detectors gebruiken die heel gevoelig zijn. De typische licht detector in dat geval is een fotomultiplicatorbuis. We hebben eerder gezien dat licht niet beschouwd wordt als ioniserende straling, omdat het in de meeste materialen geen ionisatie veroorzaakt, maar ten hoogste elektronische aanslag. Dat komt door de lage energie van de licht fotonen, die individueel niet genoeg energie bezitten om een elektron helemaal vrij te maken (dus te ioniseren). Maar er bestaan een aantal metalen (cesium, bijvoorbeeld) waarop licht dat wel kan, omdat de elektronen slechts heel zwakjes gebonden zijn (hun bindingsenergie is heel klein, en kleiner dan de energie van licht fotonen). In deze metalen ageert licht dus als een ioniserende straling! Men heeft toestellen gebouwd – fotomultiplicatoren – die bestaan uit een glazen buis waar aan de binnenkant wat van zo een metaal is opgedampt. Dat metaal laagje aan de binnenkant van de glazen buis heet dan de “foto-kathode”. De buis zelf is luchtledig gepompt, en verschillende metalen plaatjes worden tegenover die foto-kathode geplaatst, en onder een relatief hoge elektrische spanning geplaatst. De (enkele) elektronen, door het licht vrijgemaakt van de foto-kathode, versnellen dan naar het eerste plaatje, waar ze hard inslaan (die elektronen zijn zelf ioniserende straling geworden), en vele elektronen vrijmaken. Die elektronen versnellen dan samen naar het tweede plaatje enzovoort. Na een aantal plaatjes zijn er zoveel elektronen vrijgemaakt dat men die allemaal in een laatste plaatje kan opvangen, een plaatje dat men de “anode” noemt (de tussenliggende plaatjes heten “dynoden”). Aan die anode wordt dan een geleider verbonden, die buiten de buis komt. Hierop wordt door al die elektronen een goed waarneembaar elektrisch signaal veroorzaakt. In principe kan een enkel licht foton een elektrisch signaal veroorzaken ; alleen is de kans niet 100% dat zo een licht foton een elektron gaat vrijmaken en dat bovendien nog de goede richting uitgaat om het hele proces hierboven beschreven in gang te zetten. Voor gangbare fotomultiplicatoren ligt die *kwantumefficiëntie* eerder rond de 20%. Wat van belang is, is dat het elektrische signaal dat door de anode geregistreerd wordt, evenredig zal zijn met het aantal initiële elektronen die door de foto-kathode werden uitgezonden en bijgevolg, rekening houdende met de kwantumefficiëntie, proportioneel is met het aantal licht fotonen dat door de fotomultiplicator buis is gezien. De combinatie van een scintillator (eventueel gemengd met een golflengte verschuiver) en een fotomultiplicator geeft ons dus ook een proportionele detector die de energie van ioniserende deeltjes kan meten.

Binnenin halfgeleiders kan ioniserende straling ook aanleiding geven tot het “ioniseren” van elektronen. In feite gaat het hier niet om echte ionisatie, maar eerder om excitatie, waarbij een elektron dat zich in de valentieband bevindt (en als dusdanig “gebonden” is), aangeslagen kan

worden naar de conductieband ; het elektron is nog steeds gebonden aan de halfgeleider, en is dus niet echt geïoniseerd, maar een elektron in de conductieband van een halfgeleider kan vrij bewegen binnen in de halfgeleider. Ioniserende straling brengt dus elektronen van de valentieband in de conductieband in halfgeleiders, en met de gepaste elektronische koppeling kan men de lading die naar de conductieband is gebracht, meten. Aangezien dat het hier niet om echte ionisatie gaat, maar om excitatie, is de energie, nodig om zoiets te doen, veel kleiner dan de echte bindingsenergie van de elektronen. Een ionisatie paar (elektron en ion) in gas kost ongeveer 30eV (hangt af van het gas natuurlijk) aan energie van het ioniserende deeltje ; een excitatie van valentieband in conductie band in een halfgeleider kost 2-3 eV, tien keer minder. Als dusdanig heeft men 10 keer meer lading ter beschikking in een halfgeleider dan in een gas ; bovendien is een halfgeleider een vaste stof, die zelfs gamma fotonen op een korte afstand kan stoppen. Men kan met germanium halfgeleiders hele precieze instrumenten bouwen die de energie van gamma fotonen heel nauwkeurig kunnen meten. Dat is heel belangrijk, want de precieze energie van gamma straling uit radioactief verval geeft ons een heel goede aanduiding over welke nuclide die gammastraling uitzendt: elke radioactieve nuclide die gammastraling uitzendt doet dat met verschillende energieën en de precieze waarde is dus een soort handtekening van een bepaalde nuclide. Men noemt de meettechniek die erin bestaat (mengsels van) radioactieve nucliden te identificeren met behulp van gammastraling, *gamma spectroscopie*. Het is een heel gevoelige en precieze techniek die heel wat toepassingen kent.

3.4.b Meting van specifieke ioniserende stralingen.

De bovenstaande principes, gebaseerd op:

- de fotografische plaat
- de gasdetector
- scintillatie
- halfgeleiders

laten toe om individuele ioniserende deeltjes waar te nemen en in vele gevallen, hun energie te meten. Door variaties op de bouw, vorm, en elektronische uitlezing van deze detectoren kan men ook in vele gevallen informatie winnen over de positie en het tijdstip van hun doorgang. In een gasdetector kan men bijvoorbeeld vele draden spannen, en naargelang de signalen die men op de verschillende draden waarneemt, kan men de positie van impact bepalen. De signalen duren enkele tientallen tot honderden nanoseconden, en met die precisie kan dus ook bepaald worden op welk tijdstip het gegeven deeltje de detector raakte. Men kan vele kleine scintillatie kristalletjes, elk met hun fotomultiplicator, naast elkaar plaatsen. Op die manier kan men dan weten welk kristalletje geraakt werd. Er zijn tientallen verschillende technieken bedacht om een positie-gevoelige ioniserende-deeltjes detector te bouwen.

Men heeft ook variaties op deze thema's bedacht om deeltjes van verschillende soorten beter te detecteren. Alfa-deeltjes moeten in dicht contact gebracht worden met het actieve deel van de detector vanwege hun heel klein penetratievermogen. Een alfa bron die zich buiten een detector bevindt, kan meestal geen deeltjes doorheen de wand van de detector krijgen. Vandaar dat men de bron **in** de detector dient te plaatsen. In een gasdetector dient het staal dat geanalyseerd dient te worden, in het gasvolume geplaatst te worden. Hetzelfde geldt voor fissieproducten.

Gamma detectoren daarentegen, zijn gemakkelijk te maken. Gezien het doordringende vermogen van gammastraling, is er geen enkel probleem om een (eventueel dunne) wand te hebben tussen de

bron en het gevoelige volume van de detector. Voor elektronen geldt, in mindere mate, hetzelfde, alleen moet de wand hier wel heel dun zijn.

Een efficiënte gamma detector dient wel een voldoende kans op interactie met een gammafoton te bezitten. Hoe dichter de elektronenwolk van de moleculen in de detector is, hoe gemakkelijker een foto-elektrisch effect optreedt. Men gebruikt dus bij voorkeur zware elementen (voor gassen is xenon een favoriet bijvoorbeeld, en voor scintillatoren gebruikt men graag lood) in het gevoelige deel van de detector.

Neutronen zijn speciale dingen. Enerzijds penetreren neutronen zonder moeite diep in de materie, het probleem stelt zich dus niet om een wand te hebben tussen de bron en de detector. Maar neutronen zijn op zich niet ioniserend. Zij dienen een nucleaire interactie te ondergaan om een ioniserend effect te hebben. Voor snelle neutronen is de elastische botsing (als nucleaire interactie) vaak aangewezen. Men heeft echter het probleem dat de werkzame doorsneden hiervoor relatief klein zijn zodat de efficiëntie voor detectie soms vrij klein kan zijn. Voor thermische neutronen (die zo goed als geen kinetische energie bezitten) is die techniek niet bruikbaar, en moet men een nucleaire interactie beschouwen die geladen deeltjes vrijmaakt. Er zijn niet veel nucliden die zoiets doen. De voornaamste zijn: een zeldzame isotoop van helium: He-3 (gebruikt in gasdetectoren), boor-10, lithium-6, U-235, Gd-157.

Men kan deze nucliden inbouwen in bestaande detectorconcepten. Voor de gasdetector is er geen probleem: men voegt genoeg He-3 aan het detectiegas toe. In scintillatoren kan men boor of lithium toevoegen zonder probleem. Men kan ook dunne laagjes U-235 gebruiken, en proberen de fissieproducten in, bijvoorbeeld, een gasdetector waar te nemen. Daarentegen is het vrij moeilijk (er gebeurt onderzoek naar) om halfgeleider detectoren te maken die gevoelig zijn voor thermische neutronen.

3.4.c Meten van stralingsvelden

De vernoemde detectietechnieken werden in de eerste plaats bedacht om individuele deeltjes waar te nemen, meestal met het oog op wetenschappelijk onderzoek. Zij kunnen zonder probleem ook aangewend worden om relatief zwakke stralingsvelden te karakteriseren. Inderdaad, als de detectoren snel genoeg individuele deeltjes kunnen identificeren en hun energie meten, dan kan men uit de statistiek opgebouwd per tijdseenheid snel een dosis debiet berekenen. Voor intensere stralingsvelden kunnen die technieken ook wel gebruikt worden, maar op een andere wijze: men wenst geen individuele deeltjes meer waar te nemen, maar een signaal, proportioneel met het fluentie debiet van deeltjes (of met de energie fluentie). Een uitlezing die enkel probeert een gemiddeld fluentie debiet van deeltjes waar te nemen, heet een *integrerende uitlezing* in tegenstelling tot de tellende uitlezingen of *pulsmatige* uitlezingen die we hierboven hebben beschouwd en die individuele deeltjes waarneemt.

Dezelfde fysische detectiemechanismen kunnen gebruikt worden, het gaat hier enkel om een andere manier om naar het resultaat te kijken. Fotografische platen kunnen het idee illustreren: in plaats van naar individuele sporen van deeltjes te kijken (bijvoorbeeld door de ontwikkelde emulsie onder een microscoop te bekijken), kan men ook gewoon naar de algemene zwarting van de plaat kijken, die een mate is van hoeveel ioniserende straling is gezien door de plaat. Gewone fotografie doet dit ook: een foto, als prentje, is niets anders dan een integrerende meting van de lichtintensiteit (de flux van fotonen op een bepaalde plek van de foto). Men gaat bij gewone fotografie niet proberen individueel de verschillende foton impacten waar te nemen. De eerste meting van ioniserende straling (meneer Becquerel) heeft een integrerende meting van ioniserende straling door middel van

fotografische platen gerealiseerd. De fotografische plaat is nog steeds een heel veel gebruikt hulpmiddel bij het bepalen van dosissen ioniserende straling.

Gasdetectoren zijn ook bruikbaar als integrerende detectoren. In plaats van naar individuele pulsen te kijken, kan men gewoon naar de (continue) elektrische stroom kijken die uit zo een detector komt. De gemiddelde elektrische stroom is dan proportioneel met de hoeveelheid ionisatie die per tijdseenheid plaatsvindt in het gasvolume. In het geval we geen gasversterking gebruiken, is die stroom zelfs absoluut gelijk aan de hoeveelheid ionisatie die zich in het gevoelige gasvolume van de detector voordoet per tijdseenheid. Een gasdetector zonder gasversterking heet *een ionisatiekamer* en men begrijpt, gezien het voorgaande, het belang van zo een ionisatiekamer voor het vaststellen van absolute niveaus van ioniserende straling.

Scintillatoren en halfgeleiders kunnen tenslotte ook gebruikt worden. Daar waar fotomultiplicatoren nodig zijn als men individuele scintillaties wil waarnemen, volstaan vaak eenvoudiger licht detectie middelen (CCD camera, of gewoon fotodioden) om een integrerende scintillatie detector te bouwen.

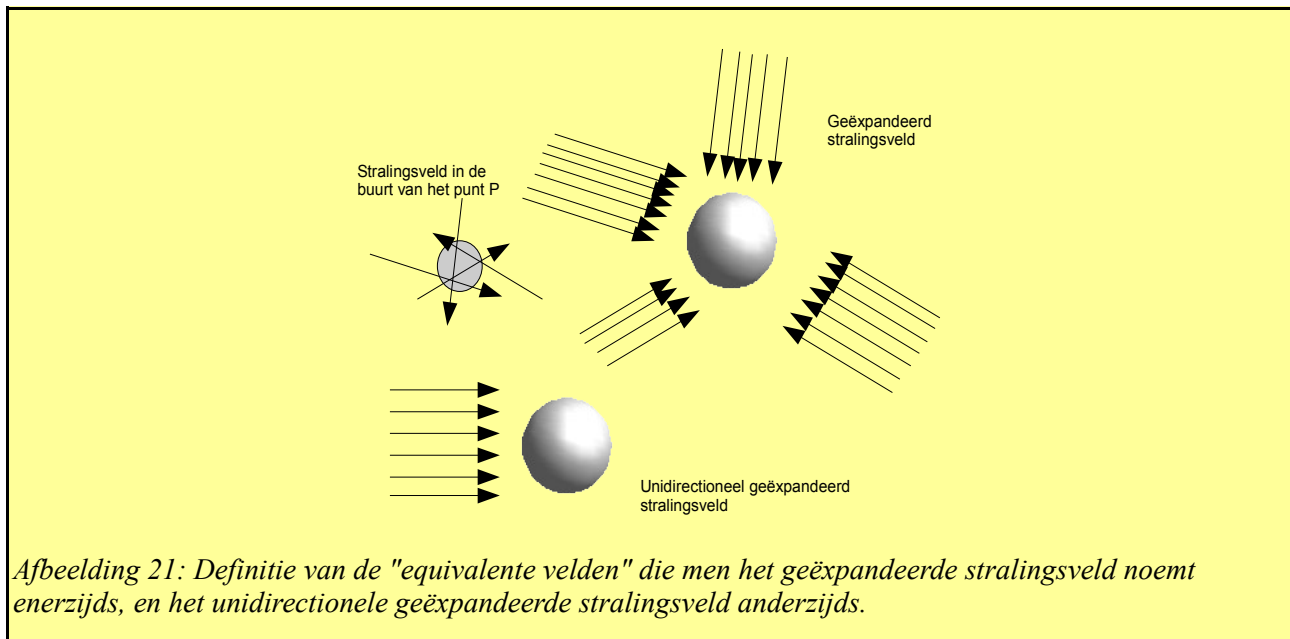
Bovenstaande technieken zijn afgeleid van individuele deeltjes detectoren, maar met een integrerende uitlezing. Er bestaan ook technieken die specifiek “integrerend” zijn: thermoluminescente en fotoluminescente detectoren. Bepaalde materialen hebben een elektronische structuur die zo is, dat aangeslagen toestanden ervan heel lang metastabiel kunnen blijven bestaan. Ioniserende straling kan dan zorgen voor een accumulatie van zulke aangeslagen toestanden over een relatief lange tijd. Men kan, via een externe factor, er voor zorgen dat deze metastabiele aangeslagen toestanden terug naar de grondtoestand vallen, en op dat ogenblik zendt elke desexcitatie een lichtfoton van een welbepaalde energie (kleur) uit. Het volstaat om de totale hoeveelheid licht die zo uitgezonden wordt, te meten, om te weten hoeveel ioniserende straling dat materiaal heeft gezien. De uitlezing zorgt daarbij ook voor het “uitwissen” van de detector, die dan kan hergebruikt worden. Bij thermoluminescente detectoren is de externe factor, de temperatuur. De desexcitatie gebeurt bij een relatief hoge temperatuur voor twee gangbare materialen: lithium fluoride (200 graden Celsius), calcium fluoride (275 graden Celsius). Men tracht materialen te gebruiken die, qua samenstelling, zo dicht mogelijk staan bij menselijk weefsel wat betreft hun interactie met ioniserende straling, omdat de stralingsdosissen dan vergelijkbaar gaan zijn – stralingsdosissen hangen immers niet alleen af van de invallende deeltjes, maar ook van het materiaal waarop ze invallen.

Fotoluminescente materialen werken volgens hetzelfde principe, alleen is de externe factor nu een bestraling met licht van een zekere kleur. Fotoluminescente detectoren zijn over het algemeen minder geschikt voor dosimetrie, gezien hun samenstelling steeds zware elementen vereist (niet equivalent aan menselijk weefsel, en bijgevolg over-gevoelig voor laag-energetische gammastraling). Bovendien hebben ze vaak een grotere pre-dosis (dat is de “dosis” die uitgelezen wordt, ook al is de dosimeter aan geen enkele ioniserende straling blootgesteld).

3.4.d Operationele dosimetrie voor externe bestraling

In de praktijk dient men over handige systemen te beschikken die metingen kunnen uitvoeren die ons toelaten om de stralingsdosis te schatten, of daar tenminste een bovengrens voor te schatten. Dat is wettelijk vereist. Er zijn internationale richtlijnen opgesteld die door de meeste landen in wetteksten zijn gegoten, en die het elke organisatie die met ioniserende straling werkt verplicht om de dosissen ontvangen door werknemers en door het grote publiek te meten, of tenminste metingen door te voeren die toelaten te garanderen dat de werkelijk ontvangen dosis kleiner is dan de

gemeten dosis, dit om aan te tonen dat aan de wettelijke begrenzings en principes voldaan is. Men kan er hierbij niet a priori van uitgaan dat men weet aan welk soort stralingsveld (gamma fotonen, neutronen, alfadeeltjes...) de persoon en bijgevolg het meetapparaat is blootgesteld, en men dient dus een meetsysteem te bedenken dat zo onafhankelijk mogelijk werkt van een hypothese van het betreffende stralingsveld. Ook kan men niet daadwerkelijk binnen in het lichaam van de persoon de echte dosis gaan meten. Maar men moet toch over aanvaardbare schattingen van die direct onmeetbare grootheden (bijvoorbeeld: de dosis ontvangen door de slokdarm van een persoon) beschikken om aan de wettelijke vereisten kunnen te voldoen.

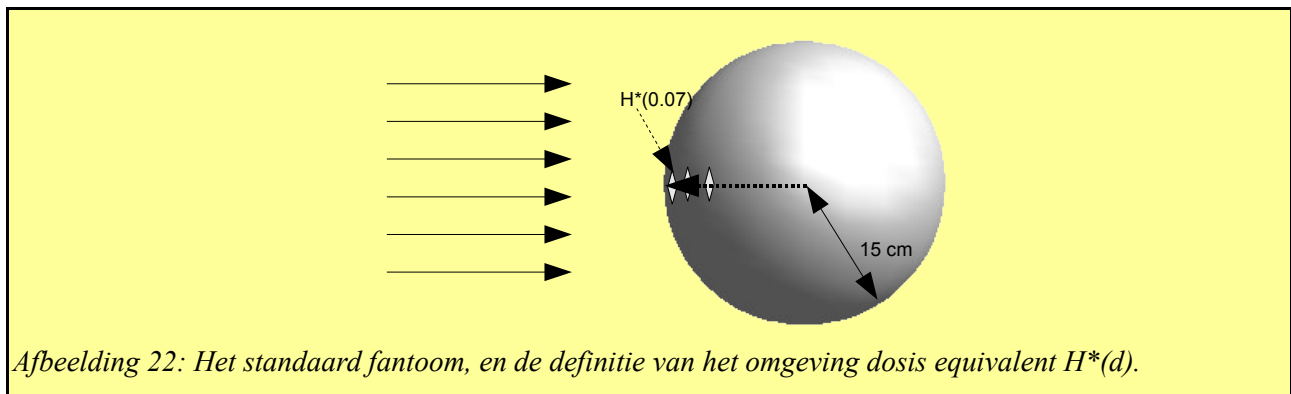


Men heeft daarom enkele grootheden ingevoerd die meetbaar zijn in een laboratorium, en waartegen men een dosimeter kan ijken. Zo heeft men een "standaard fantoom" ingevoerd: een (plastic) bal met diameter 30 cm, die bestaat uit 76.2% zuurstof, 11.1% koolstof, 10.1% waterstof en 2.6% stikstof (massapercent), met een dichtheid van 1g/cm^3 . Dit is een fantoom dat enerzijds geometrisch eenvoudig is, en anderzijds het biologisch materiaal en de typische afmetingen van delen van het menselijk lichaam heeft. Ook al is dat natuurlijk een benadering, dat fantoom stelt, op dosimetrisch vlak, redelijk goed het menselijke weefsel en zijn dikte voor.

Voor een gegeven stralingsveld voert men twee "equivalente" theoretische stralingsvelden in: *het geëxpandeerde stralingsveld*, en *het unidirectionele geëxpandeerde stralingsveld*. Het geëxpandeerde stralingsveld is een denkbeeldig stralingsveld met dezelfde fluentie en directiviteit als het originele stralingsveld in een punt, maar "opgeblazen" tot de schaal van het standaard fantoom. Het unidirectionele geëxpandeerde stralingsveld is een denkbeeldig stralingsveld met zelfde fluentie, maar waar alle deeltjes in dezelfde richting bewegen over de gehele breedte van het standaard fantoom.

Men definieert: $H^*(d)$ *het omgeving dosis equivalent van een stralingsveld in een punt* als het dosis equivalent dat men bekomt in het standaard fantoom als men het unidirectionele geëxpandeerde stralingsveld neemt van het stralingsveld in dat punt, en dat op het standaard fantoom laat invallen, en gaat meten op een diepte d (in mm) op de straal die wijst in de richting van waar de straling invalt. Standaard gebruikt men $H^*(0.07)$, $H^*(3)$ en $H^*(10)$. Als men deze schatters heeft, kan men, gebruik makende van de coëfficiënten toegekend aan de verschillende organen, een vrij goede

schatting maken van de effectieve dosis. Men heeft 3 maten: $H^*(0.07)$ geeft de blootstelling van de huid weer, $H^*(3)$ geeft de blootstelling van de ooglenzen weer, en alle andere organen worden geassimileerd aan $H^*(10)$. Inderdaad is voor verschillende stralingsvormen het elektronisch equivalent reeds bereikt na een diepte van 10 mm. Als dusdanig zal de dosis enkel maar afnemen bij grotere diepte, en hebben we dus in $H^*(10)$ een bovengrens van de echte dosis die op grotere diepte wordt ondergaan. De definitie van de operationele grootheid “omgeving dosis equivalent” gebruik makende van het fantoom, wordt visueel voorgesteld in figuur 22.



Men definieert op die wijze nog andere operationele grootheden, bijvoorbeeld om de richtingsafhankelijkheid in rekening te brengen. We gaan niet in op al die technische details. Het punt is dat men enerzijds een heel precieze grootheid heeft ingevoerd die in een laboratorium kan gemeten worden, of via computer berekeningen goed bepaald kan worden voor een gegeven stralingsveld, en anderzijds een vrij redelijke benadering is van wat biologisch verwacht kan worden. Men heeft, met andere woorden, een ijkprocedure beschreven, waartegen praktische dosimeters vergeleken kunnen worden, en die ons toelaten een redelijke schatting van de effectieve dosis te geven. Bovendien is de grootheid conceptueel eenvoudig genoeg om via computer simulaties berekend te worden zodat men in gegeven situaties voorspellingen kan maken van verwachte uitlezingen van dosimeters.

Nu men operationele grootheden heeft gedefinieerd die niet afhankelijk zijn van een menselijk lichaam, maar van een goed gedefinieerd fantoom, moet men die ook daadwerkelijk gaan meten. Voor gamma en bèta straling is de zaak vrij eenvoudig: aangezien hun schadefactor gelijk gesteld is aan 1, volstaat het van de geabsorbeerde dosis in het betreffende fantoom te meten. We steunen hierbij op de stelling van Bragg-Gray: het gaat hem om het toelaten van een kleine caviteit bestaande uit materie M' binnen in een milieu M , en er wordt aangetoond dat er een eenvoudige relatie bestaat tussen de dosis geabsorbeerd door M' , en de dosis die in die caviteit zou geabsorbeerd zijn mocht de caviteit gevuld zijn met milieu M . Indien:

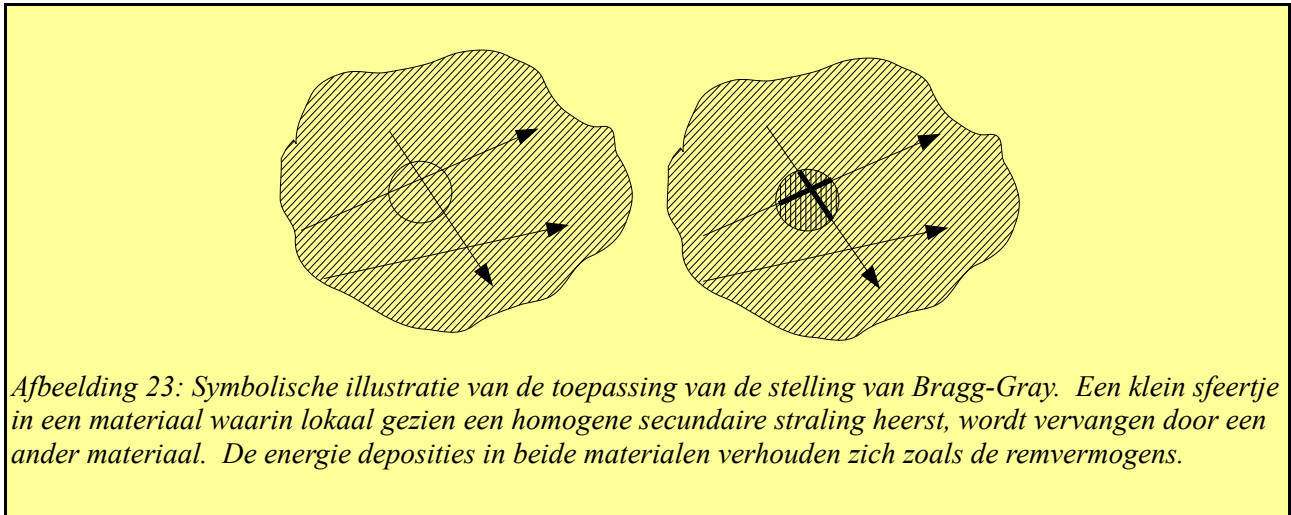
- de afmetingen van de caviteit klein is in vergelijking met het parcours van de elektronen in M' volgens het spectrum van energieën gegenereerd in M ,
- de hoeveelheid elektronen die in de caviteit gegenereerd worden klein zijn in vergelijking met de hoeveelheid elektronen die in de caviteit terecht komt van buiten uit,
- het energiespectrum van de elektronen uniform is doorheen de caviteit,
- de fluentie van primaire deeltjes uniform is in de buurt van de caviteit,

dan kan men stellen dat de geabsorbeerde dosis in milieu M' zich verhoudt tot de geabsorbeerde dosis die zich zou voorgedaan hebben in milieu M , als de verhouding van het (massa

genormaliseerd) rem vermogen in M' tot het (massa genormaliseerd) rem vermogen in M .

$$D_M = \frac{(S/\rho)_M}{(S/\rho)_{M'}} D_{M'}$$

Dit is de stelling van Bragg-Gray, zoals die is geïllustreerd in afbeelding 23. Men kan dus een



kleine detector plaatsen binnen in een milieu, en hoewel die detector uit een ander materiaal (M') bestaat dan het milieu M , kan men toch vrij eenvoudig de geabsorbeerde dosis gezien door de detector omzetten in de geabsorbeerde dosis van het milieu. Let wel, in de conversie factor komen de verhoudingen van het remvermogen *per massa* voor, en niet het ruimtelijke remvermogen. *Als dusdanig speelt de absolute dichtheid van de materie geen rol, maar enkel zijn samenstelling.* Als

we bijvoorbeeld lucht vergelijken met menselijk weefsel, dan vinden we dat: $\frac{(S/\rho)_{\text{weefsel}}}{(S/\rho)_{\text{lucht}}} = 1.14$

voor elektronen. Niettemin heeft menselijk weefsel een ongeveer 1000 keer grotere dichtheid dan lucht.

Dit laat ons toe om bijvoorbeeld een kleine gasdetector in een hoeveelheid “weefsel-equivalent” materiaal te plaatsen, en de totale ionisatie in die gasdetector te meten. Alles hangt af van de eigenschappen van het gas, dat bijvoorbeeld lucht kan zijn in het geval van een ionisatiekamer.

Men kan voor een ionisatiekamer in lucht, uitrekenen dat de geabsorbeerde dosis per uur (dosis debiet) gelijk is aan $\dot{D} = 1.0710^{11} \frac{I}{V}$ waar I de stroom is (in Ampère) die gemeten wordt in het ionisatiekamer, en V het volume is van het kamertje in cm^3 . Het dosisdebiet is gegeven in Gray per uur. Indien het kamertje 1cm^3 groot is, en we een stroompje meten van 1 pA (een pico-Ampere, een heel klein stroompje, maar goed meetbaar met een gevoelige stroommeter), dan komt dat overeen met 100mGy per uur (beter niet te lang in de buurt blijven daar!).

Dosimeters gebaseerd op andere principes (thermoluminescentie bijvoorbeeld) kunnen ook gebruikt worden om de geabsorbeerde dosis in een klein volume, dat geplaatst is binnen een materiaal dat qua samenstelling lijkt op menselijk weefsel, te bepalen. Zij kunnen geijkt worden door ze te vergelijken met de performantie van het fantoom in hetzelfde stralingsveld. Zolang we met gamma en bèta straling te maken hebben, is de equivalente dosis gelijk aan de geabsorbeerde dosis.

Het wordt moeilijker wanneer we met neutronen of alfa straling (of andere zware deeltjes zoals protonen, splijtingsproducten...) te maken hebben, omdat we dan een schade factor moeten

invoren die functie is, oftewel van de soort straling en spectrum (voor de equivalente dosis) ofwel functie is van de lineale ionisatie dichtheid L (voor het dosis equivalent). Deze twee (gelijkaardige) grootheden kunnen door elkaar gebruikt worden. Als dusdanig heeft men oftewel een ruwe analyse nodig van de samenstelling van het stralingsveld, ofwel moet men een empirische meting van de lineale ionisatiedichtheid doorvoeren.

Dat laatste kan, zoals we gezien hebben, bekomen worden door de grootheden z en y te gaan meten in een heel kleine caviteit (orde micrometer). Nu is er een stelling, *de stelling van Fano*, die het volgende zegt: *voor een milieu van gegeven samenstelling is de fluentie van secundaire deeltjes en hun energiespectrum onafhankelijk van de dichtheid van het materiaal of van de variaties in dichtheid*. Dat laat ons toe een microscopische caviteit van de orde van 1 micrometer in “menselijk weefsel” te vervangen door een kleine caviteit van de orde van enkele millimeter, gevuld met een gas onder lage druk met een samenstelling vergelijkbaar met menselijk weefsel. We zullen de spoortjes langer maken in dat gas, en bijgevolg een goede meting van y doorvoeren met een detector van uitvoerbare afmeting (orde cm).

Als dusdanig kunnen we, met zo een “microdosimeter”, de meting uitvoeren waarvan eerder sprake, en bijgevolg de dosis per gebeurtenis z , evenals de lineale ionisatiedensiteit y bepalen (en dus de schade coëfficiënt). Deze techniek wordt gebruikt om absolute metingen van dosis equivalent door te voeren, en als dusdanig een ijkprocedure te bekomen voor andere dosimeters.

De standaard (en vaak wettelijk verplichte) veld dosimeter is nog steeds de fotografische emulsie. Deze dosimeter vertoont twee problematische eigenschappen: gezien zijn samenstelling met zware elementen is hij niet echt “menselijk weefsel equivalent” enerzijds, wat maakt dat hij overgevoelig is voor laag-energetische gammastraling (bij 50 KeV is hij 50 keer meer gevoelig dan bij 1 MeV). Anderzijds geeft hij een te zwakke respons voor neutronen. Men pakt dat probleem aan door de fotografische emulsie achter verschillende schermen te plaatsen, gaande van plastic en aluminium tot lood en cadmium. Als dusdanig bekomt men een ruwe informatie over de samenstelling van het stralingsveld (neutronen inbegrepen), van waaruit men dan een equivalente dosis kan berekenen. Men doet dat op volgende wijze: men laat een computer alle mogelijke stralingsvelden (mengsels van gammastraling van verschillende energieën, neutronen van verschillende energieën...) uitproberen, en zien of zo een stralingsveld in overeenstemming is met de verschillende zwartingen van de emulsie onder de verschillende filters. Voor elk stralingsveld in overeenstemming met de zwartingen berekent men de equivalente dosis, en men kiest die samenstelling die aanleiding geeft tot de hoogste dosis. Als dusdanig heeft men zeker een overschatting van de werkelijk ontvangen dosis.

In de mate dat de fotografische emulsie relatief goede performanties heeft voor gammastraling, is zijn performantie voor zware deeltjes relatief zwak (en gaat men dus systematisch veel te hoge dosissen berekenen). Een complementaire techniek bestaat erin een stukje organische materie (bijvoorbeeld cellulose nitraat) achter een laagje U-235 te plaatsen. Bij impact van neutronen geeft het U-235 splijtingproducten vrij, die micromechanische schade aan het materiaal toebrengen. Na etsen van het materiaal met een bijtende stof (bijvoorbeeld NaOH), maakt die bijtende stof bij voorkeur “gaatjes” in het materiaal daar waar het materiaal reeds beschadigd was. Onder een microscoop volstaat het dan die gaatjes te tellen, om een idee te hebben van het aantal neutronen. Deze dosimeter is bovendien totaal ongevoelig voor een andere soort straling, en kan dus complementair aan de fotografische film werken. Zonder “neutronenconverter” kan zulk een dosimeter ook werken als “alfa deeltjes” dosimeter: de alfadeeltjes veroorzaken ook micromechanische schade, die op dezelfde manier gekwantificeerd kan worden.

Naast deze “passieve” dosimeters, die een relatief nauwkeurig beeld trachten te geven van de geïntegreerde dosis, gebruikt men ook elektronische actieve dosimeters, meestal gebaseerd op een halfgeleider. Deze dosimeters hebben een veel slechtere performantie voor het nauwkeurig inschatten van het dosis equivalent, maar hebben een groot voordeel: ze meten ogenblikkelijk het dosis debiet. Als dusdanig kunnen ze geprogrammeerd worden om een alarm weer te geven van zodra een bepaalde grens van dosis debiet wordt overschreden (ook al is die meting niet erg nauwkeurig). Een werknemer die zo een dosimeter draagt, kan zich dan snel verwijderen uit de zone waar het desbetreffende stralingsveld (dat dus te intens is) heerst, en bijgevolg zijn opgelopen dosis beperken.

Er bestaan nog verschillende andere dosimetrische technieken voor specifieke toepassingen. We gaan die hier allemaal niet opnoemen. De bedoeling van deze uiteenzetting was de lezer een idee te geven van de wijze waarop men tracht een praktische operationele dosimetrie in verband te brengen met grootheden die ons in fine interesseren: de hoeveelheid biologische schade die aangebracht is door ioniserende straling. We hebben van een “princiële grootheid” (effectieve dosis), via meetbare fysische grootheden (geabsorbeerde dosis in verschillende omstandigheden, schatting van de lineale ionisatiedichtheid) en redelijke standaarden (het fantoom, $H^*(d), \dots$), vrij goede schatters bekomen, gebaseerd op realistisch uitvoerbare metingen met verschillende realiseerbare instrumentatie technologieën.

We wensen er hier de nadruk op te leggen dat men in dat opzicht bij nucleaire activiteiten een veel duidelijker en precies beeld heeft van het risico waaraan mensen nu blootgesteld zijn, dan bij vele andere menselijke activiteiten die een potentieel risico met zich meebrengen. Vele chemische pollutanten (of ze nu van industriële oorsprong zijn, of van natuurlijke, of recreatieve) hebben een minstens zo nefaste biologische invloed als ioniserende straling ; alleen, men beschikt niet over zo een precies en door de wet vastgelegd systeem om de individuele blootstelling en hun bijhorend risico te kwantificeren. Veel ander “risicovolle” bezigheden (zoals autorijden) hebben helemaal geen objectieve kwantificerende en operationele grootheden (behalve de heel grove “aantal doden op de weg per jaar”). Dit is ironisch genoeg waarschijnlijk een slechte zaak voor het nucleaire gebeuren: “wat niet weet, niet deert”, en in het nucleaire gebeuren weten we vrij precies wat deert, ook al deert het meestal niet veel.

3.4.e Meten van interne contaminatie

Interne contaminatie geeft aanleiding tot een ietwat verschillende problematiek. Enerzijds is het stralingsveld gekend als we de contaminant kennen, en als we weten hoe die in het lichaam verdeeld is. Het volstaat om een berekening te maken van de ontvangen dosissen van elk orgaan, want we kennen perfect de straling die veroorzaakt wordt door een radioactieve stof. We zijn dus enerzijds verlost van het probleem van het stralingsveld met ongekende samenstelling, zoals het geval was bij externe blootstelling. Maar anderzijds moeten we kunnen vaststellen welke, en hoeveel contaminatie er is (geweest), en waar die contaminanten zich bevinden in het lichaam. Het tweede aspect is aangepakt door een groot aantal experimenten op dieren en mensen: men heeft vrij gedetailleerde modellen opgesteld van de biologische migratie en de uitscheiding van chemische stoffen (bijvoorbeeld, uranium, jood, ...). Men heeft twee soorten modellen: *contaminatie modellen* (hoe raakt de stof in ons lichaam?), en *interne migratiemodellen* (eens de stof in ons lichaam is, hoe migreert ze tussen de verschillende organen, bloed, uitscheidingen...). De migratiemodellen zijn louter een aspect van menselijke biologie, daarentegen, de contaminatie modellen hangen af van hoe de contaminant zich extern voordoet: kleine stofdeeltjes, welke afmetingen hebben de

stofdeeltjes (bepaalt in welk deel van de luchtwegen ze zich vastzetten), gaat het om een vloeistof, gas, welke chemische toestand.... Het is belangrijk deze eigenschappen te kennen op het ogenblik van de besmetting.

Eens de besmetting in het lichaam is “geïntegreerd”, volstaat het om de totale hoeveelheid ervan te kennen, om samen met een biologisch migratie model, de geëngageerde dosis te berekenen. We kennen de straling perfect. Het volstaat om te weten welke de hoeveelheid contaminant is die de persoon heeft opgenomen in zijn lichaam. Die hoeveelheid wordt meestal niet uitgedrukt in gram, maar in Becquerel, wetende dat er een precieze verhouding bestaat tussen een bepaalde hoeveelheid radioactieve stof en zijn activiteit.

Uit de contaminatiemodellen en interne migratiemodellen kan men bijgevolg afleiden welke de geëngageerde dosis is als men een zekere activiteit heeft opgenomen. Men noemt de geëngageerde dosis per eenheid van opgenomen activiteit, ook wel *de radiotoxiciteit* van de nuclide in kwestie. Zij wordt uitgedrukt in Sievert per Becquerel (of microsievert of millisievert per Bequerel). Gezien het contaminatiemodel gebruikt wordt, hangt de radiotoxiciteit ook gedeeltelijk af van de vorm van opname (inademing, inslikken...) en ook een beetje van de specifieke chemische en fysische vorm van de contaminant. Voor enkele typische radionucliden geven we de gemiddelde radiotoxiciteit (uit een ICPR rapport van 1972):

Nuclide	Inslikken (Sv/Bq)	Inademen (Sv/Bq)
C-14	$5.8 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Tc-99	$6.4 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-9}$
I-129	$1.1 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$
Cs-137	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$4.1 \cdot 10^{-11}$
U-235	$4.7 \cdot 10^{-8}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$
Pu-239	$2.5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Am-241	$2 \cdot 10^{-7}$	$4.2 \cdot 10^{-5}$

Het bovenstaande wil bijvoorbeeld zeggen dat als we 1 000 000 Bq aan U-235 hebben ingeslikt, dat we dan een geëngageerde dosis hebben opgelopen van 47 mSv, wat een relatief klein risico inhoudt. Als we diezelfde hoeveelheid echter hebben ingeademd, dan hebben we een geëngageerde dosis opgelopen van 3.1 Sv, wat veel erger is, en maakt dat we ongeveer dezelfde kans op longkanker hebben opgelopen als een kettingroker. De halfwaarde tijd van U-235 is 704 miljoen jaar. Als dusdanig komt 1 000 000 Bq overeen met $3.2 \cdot 10^{22}$ atomen U-235 of 12.6 gram. We zien hier dus dat het inslikken van 12 gram U-235 slechts een klein risico voorstelt, maar dat het opsnuiven van 12 gram U-235 een redelijk belangrijk risico voorstelt, vergelijkbaar met kettingroken. Dat laat ons trouwens toe om sommige alarmerende nieuwsberichten te relativeren. Laten we bijvoorbeeld de

alarmerende berichten⁵⁷ bekijken betreffende de Japanse kerncentrale van Kashiwazaki⁵⁸ die een zware aardbeving heeft ondergaan en waarbij licht gecontamineerd water in de zee is gevloeid. Het blijkt dan dat die ongehoord gevaarlijke lek van “radioactief water” aanvankelijk op 60 000 Bq en uiteindelijk op 90 000 Bq geschat werd. Het nieuws ging de wereld rond dat de lek “50% erger was dan aanvankelijk gedacht”. Maar 90 000 Bq van ongeveer gelijk welke radioactieve stof kan zonder probleem helemaal ingeslikt worden door een enkele persoon en voor een heel kleine geëngageerde dosis zorgen. Alleen ging het om vele kubieke meters water, en is er dus weinig kans dat het zal ingeslikt worden door een enkel persoon. De natuurlijke activiteit van 1 kubieke meter zeewater is reeds 16 000 Bq (16 Bq per liter voor zeewater). Het is een piepkleine hoeveelheid radioactiviteit, die qua nociviteit veel kleiner is dan een whiskey glas benzine. Dus herejzus, na een aardbeving is er uit een raffinaderij een glas benzine in de natuur gevloeid⁵⁹ !

Om de interne contaminatie te meten bestaan er twee technieken, naargelang de contaminant. Indien de radioactieve stof in kwestie gamma straling uitzendt, dan kunnen we hopen om de dosis te bepalen door, extern aan het lichaam, die gammastraling te meten (meting “in vivo”). Bovendien geeft de precieze energie van de gammastraling ook aan over welke nuclide het gaat (gamma spectroscopie). Men heet deze techniek “antroporadiometrie”. Naargelang de gammastraling hoog-energetisch is (>200KeV) of niet, dient men twee verschillende meettechnieken te gebruiken. Voor de hoog-energetische gammastraling (die relatief ongehinderd het lichaam kan verlaten), volstaat het de persoon in een geïsoleerde doos in een bepaalde positie te plaatsen (een ligzetel of een bed), en ergens in de buurt een (of verschillende) gamma spectrometer(s) op te stellen. Het spectrogram dat als dusdanig bekomen wordt, geeft aan hoeveel en welke nucliden zich in de buurt bevinden. Men kan via berekeningen, of via een fantoom dat de vorm van het menselijk lichaam aanneemt en waarin men een gekende hoeveelheid radioactieve stof heeft geplaatst (liefst verdeeld over de fantoom organen in de verhoudingen zoals het contaminatiemodel het aangeeft), de meetinstallatie ijken.

Voor de laag-energetische fotonen dient men een lokale meting uit te voeren, met een detector zo dicht mogelijk bij de organen in kwestie (bijvoorbeeld, de longen, of een blessure, of de adamsappel). Deze techniek is echter veel minder gevoelig en precies, en wordt niet routine-matig gebruikt, maar enkel in het geval van vermoeden van accidentele contaminatie.

De andere techniek is de analyse, in vitro, van excrementen en urine. Op die manier is het mogelijk om niet alleen een precieze gamma spectroscopie door te voeren, maar ook een bèta straling en alfa

⁵⁷We wensen hier wat dieper in te gaan op de retorische argumenten in het Greenpeace artikel. Er worden hierin vele onnauwkeurigheden vernoemd die insinueren dat we (weeral) heel veel geluk hebben gehad. Wat de transformator brand betreft, dat had in gelijk welke elektrische installatie kunnen gebeuren, en in tegenstelling tot wat geïnsinueerd wordt, was deze transformator geen essentieel voedingselement voor de koelpompen ; er zijn trouwens, zoals we zullen zien in hoofdstuk 5, meerdere problemen nodig alvorens de standaard situatie van “loss of heat sink” een probleem wordt dat aanleiding geeft tot een core meltdown, en een core meltdown wil nog steeds niet zeggen dat er grote hoeveelheden radioactief materiaal vrijkomen. Met andere woorden, we waren nog heel ver van een zware accidentele situatie, en het Greenpeace artikel suggereert dat “het bijna zo laat was” met een gewone transformator brand. Enkele andere incidenten die in het lijstje voorkomen zijn van dezelfde aard. Zo heeft het augustus 2004 ongeluk, waar 5 mensen omkomen in het explosief vrijkomen van stoom uit een stoomturbine, niets met een kernreactor te maken. Het is een ongeluk met een stoomturbine, zoals dat ook in een steenkoolcentrale had kunnen voorkomen, en heeft op geen enkel ogenblik iets te maken met nucleaire veiligheid. Dat is niet meer een nucleair incident dan iemand die van de trap valt in een kerncentrale.

⁵⁸<http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/6903146.stm>

<http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/6902142.stm>

<http://www.greenpeace.org/international/news/earthquake-fire-and-nuclear-1>

⁵⁹http://www.world-nuclear-news.org/regulationSafety/Kashiwazaki_Kariwa_nuclear_units_shutdown_on_earthquake_160707.shtml

straling analyse. De gammaspectroscopie gebeurt op de normale wijze, maar is deze keer veel gevoeliger en preciezer voor laag-energetische gamma straling, gezien er geen menselijk weefsel meer dient te worden doorgaan alvorens bij de detector te komen. Voor bèta stralers gebruikt men vaak volgende techniek: men lost het staal op in een vloeistof die een scintillator bevat. Op die wijze is er een intiem contact tussen de scintillator en het actieve materiaal en meet men de volledige geabsorbeerde dosis (en dus uitgezonden energie fluentie) door het actieve materiaal. Een typische toepassing is het bepalen van een tritium contaminatie in de urine. Het is ook mogelijk om, via speciale preparatie (hele dunne plakjes), stalen te maken van de excrementen die in een alfa-deeltjes detector (een gas detector bijvoorbeeld) geplaatst kunnen worden. Op die wijze kan men een eventuele contaminatie door alfa-stralers (meestal de actiniden) bepalen. Men kan ook niet-radiologische technieken gebruiken: chemische analyse of massa-spectrometrie om de chemische samenstelling van het staal te bepalen, bijvoorbeeld, het gehalte uranium. Hoewel deze technieken wel vrij precies zijn (men kent vrij goed het gehalte aan contaminant in de excrementen), dient men nu wel uit deze waarden een geëngageerde dosis te berekenen voor de persoon. Hiervoor dient men beroep te doen op het fysiologisch model, eerder besproken, voor de contaminant in kwestie, dat normaal gezien een verband geeft tussen de hoeveelheid contaminant aanwezig in het lichaam, en de hoeveelheid die uitgescheiden wordt. Men is bovendien met een ander probleem geconfronteerd: de uitscheiding zal natuurlijk functie zijn van de tijd tussen het ogenblik van contaminatie en van analyse. Als er een grote onzekerheid heerst over het ogenblik van contaminatie, dan resulteert dat in een grote onzekerheid in de berekening van de geëngageerde dosis. Men dient de cadans van reguliere onderzoeken zo te kiezen dat in het meest ongunstige geval (contaminatie net na een vorig onderzoek) men nog met enige precisie een redelijke maximum dosis kan berekenen.

Naast routine individueel onderzoek van werknemers en personen die eventueel een risico van besmetting oplopen, is er een tweede strategie: de geregelde analyse van de omgeving (meestal: de lucht), bijvoorbeeld door filters te plaatsen die geregeld het stof in de lucht opvangen, gevolgd door een analyse van die filters, om te zien of zij enige contaminanten bevatten.

3.5 Wetgeving en organismen

3.5.a Internationale organismen.

De natuurlijke radioactiviteit werd in 1896 ontdekt (Becquerel). Na enkele gekke jaren begon men in te zien dat ioniserende straling gevaarlijk kon zijn. In 1925 te Londen en in 1928 te Stockholm werden twee internationale organismen opgericht: enerzijds de ICRP⁶⁰ (International Commission for Radiological Protection) en anderzijds de ICRU⁶¹ (International Commission for radiation units and their measurement).

De ICRP is een niet-gouvernementele internationale wetenschappelijke organisatie die bestaat uit experts in verschillende domeinen, en die zich toelegt op het wetenschappelijke vraagstuk van de stralingsbescherming. De ICRP bestaat uit 5 subcommissies: commissie 1 bestudeert het effect van ioniserende straling op de mens, commissie 2 houdt zich bezig met de berekening van dosissen, commissie 3 houdt zich bezig met medische toepassingen van ioniserende straling (radiografie en

⁶⁰<http://www.icrp.org/>

⁶¹<http://www.icru.org/>

radio-therapie), commissie 4 houdt zich bezig met het opstellen van aanbevelingen en commissie 5 kijkt naar de ecologische impact van ioniserende straling. De ICRP is als het ware de « internationale expert » in stralingsbescherming. Zij publiceert haar vindingen geregeld in dikke rapporten, en sommige van die rapporten zijn heel gedetailleerde aanbevelingen voor reglementering. Aangezien de ICRP een wetenschappelijke niet-gouvernementele organisatie is, hebben deze aanbevelingen het statuut van wetenschappelijke publicatie, en meer niet. Het rapport ter zake dat aan de grondslag ligt van de huidige reglementering is rapport 60, gepubliceerd in 1991. Jammer genoeg wordt het gecommmercialiseerd als een boekvorm en is enkel een samenvatting vrij toegankelijk⁶².

De ICRU is een internationale commissie die eenheden en meet- en ijkprocedures publiceert betreffende stralingsgrootheden.

De Verenigde Naties heeft twee agentschappen die zich bezig houden met ioniserende straling. Enerzijds is er UNSCEAR⁶³ (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), een wetenschappelijk agentschap dat de blootstelling van de wereldbevolking aan natuurlijke en artificiële ioniserende straling bestudeert en zijn bevindingen publiek beschikbaar stelt (bijvoorbeeld, over het Chernobyl ongeluk).

Het andere agentschap van de Verenigde Naties is de « International Atomic Energy Agency »⁶⁴ dat zich bezighoudt met alle wetgevende en politiek-militaire aspecten van het nucleaire gebeuren zoals bijvoorbeeld de controle op naleving van internationale akkoorden betreffende kernwapens. Een deel van zijn taken is het publiceren van normen voor stralingsbescherming, die de deelstaten verondersteld zijn in wetteksten over te nemen. Bij dat werk steunt de IAEA zich sterk op de publicaties van de ICRP. Het is hier dat de ICRP rapporten « meer wettelijk gewicht » krijgen, op hetzelfde niveau als andere aanbevelingen van de Verenigde Naties.

Tenslotte is er Euratom, het onderdeel van de Europese Unie dat zich bezighoudt met het nucleaire gebeuren in Europa. Euratom werkt zijn eigen normen uit, ook gebaseerd op de ICRP aanbevelingen, en rekening houdend met de voorgestelde normen van de IAEA. In tegenstelling tot de IAEA normen, die enkel aanbevelend zijn, zijn de Euratom normen bindend voor de lidstaten, zoals elke richtlijn van de Europese Unie.

De lidstaten (Europese en andere) worden verondersteld een eigen wetsysteem uit te werken dat nauw de aanbevelingen (in de Europese gemeenschap: de richtlijnen van Euratom) opvolgt ; dat gebeurt meestal ook (met enkele jaren vertraging). Elk land is verondersteld een nationaal controle organisme te bezitten dat toeziet op de naleving van de wetgeving ter zake. Sommige landen gaan verder in hun wetgeving dan de aanbevelingen – dat wil zeggen dat ze zelf strengere normen opstellen. Maar over het algemeen zijn de wetgevingen in de verschillende landen heel erg gelijkaardig omdat ze tenslotte allemaal door dezelfde teksten zijn geïnspireerd, en aan de basis daarvan liggen de aanbevelingen van de ICRP.

⁶²http://www.icrp.org/downloadDoc.asp?document=docs/Summary_B-scan_ICRP_60_Ann_ICRP_1990_Recs.pdf

⁶³<http://www.unscear.org/unscear/index.html>

⁶⁴<http://www.iaea.org/>

3.5.b Principes van de wetgeving i.v.m. stralingsbescherming

Men onderscheidt twee verschillende vormen van handelen: er zijn « praktijken » en er zijn « interventies ». Praktijken zijn geplande menselijke ondernemingen met ioniserende straling. Zij zijn aan strenge regels onderworpen. Interventies daarentegen zijn tussenkomsten die trachten de schade te beperken in een bepaalde (nood) situatie. Zij zijn enkel aan een aantal principes van gezond verstand onderworpen.

De drie grote principes waaraan praktijken moeten voldoen, zijn:

1. Motivering van de praktijk. Een praktijk die een radiologisch risico met zich meebrengt (of het nu effectief, of potentieel is), moet voldoende reden hebben, dat wil zeggen, moet voldoende voordelen met zich meebrengen voor het individu of voor de maatschappij. Met andere woorden, er moet een soort economische (in de brede zin van het woord) verschoning voor het risico bestaan. Voorbeeld: in het begin van de twintigste eeuw hadden sommige schoenenwinkels een radiografie apparaat, om na te gaan of de schoen goed paste. In het algemeen vindt men nu het voordeel om iets sneller te zien of een schoen goed past, een onvoldoende motivering om de praktijk van een radiografie te verschonen (tenzij misschien voor Assepoester...). Als men deze richtlijn veralgemeent naar andere risico's, dan zou sigaretten roken verboden moeten zijn.
2. Het optimiseren van de stralingsbescherming. Men dient de voorzienbare dosis voor werknemers en voor het publiek zo klein mogelijk te maken als redelijk uitvoerbaar is. Met andere woorden (en in tegenstelling tot vele andere reglementeringen), het volstaat niet van « de normen te halen ». Als het mogelijk is om de dosis te verminderen met een investering die de originele motivering van de praktijk niet economisch in gevaar brengt, dan dient men dat te doen. Natuurlijk (en daar staat het woord « redelijk » voor) heeft men het probleem van de verminderde opbrengst: de eerste maatregelen zijn steeds economisch gezien de efficiëntste. Voor kleinere en kleinere verbeteringen dient men grotere en grotere investeringen te maken, en op een zeker ogenblik heeft dat geen zin meer. Bijvoorbeeld: als een kerncentrale de dosis voor het omwonende publiek al 1000 keer kleiner heeft gemaakt dan de natuurlijke dosis die dat publiek toch ontvangt, dan heeft het niet veel zin om de kerncentrale twee keer zo duur te maken, om die dosis tot 3000 keer kleiner te maken. Men bouwt dan beter met dat geld een tweede centrale, daar heeft de collectiviteit meer aan. Men noemt dit principe soms bij de naam ALARA (As Low As Reasonably Achievable).
3. Wettelijke maximum dosissen voor publiek en voor werknemers. Een praktijk mag nog zo een grote voordelen voor de maatschappij hebben (eerste principe), als het technisch of economisch niet mogelijk is (tweede principe) om de verwachte dosis voor de mensen beneden een bepaald niveau te krijgen, dan is die praktijk niet toegestaan.

De drie principes zijn een formulering van twee aspecten. Enerzijds neemt men aan dat elke dosis ioniserende straling, hoe klein ook, schadelijk is (hoe weinig ook). We wijzen erop dat dit wetenschappelijk niet met enige zekerheid is aangetoond, maar het wordt uit voorzichtigheid verondersteld. Als dusdanig wil men de schade zo klein mogelijk houden. Anderzijds stelt men vast dat bepaalde activiteiten met ioniserende straling economische en sociale voordelen opleveren, en dat het niet doorvoeren van die activiteiten dus ook economisch en sociaal schadelijk is. Men stelt dat mensen sociaal kunnen aanvaarden dat zekere activiteiten ook zekere risico's meebrengen (autorijden, een vliegtuig nemen) omdat daar voordelen aan verbonden zijn. Maar sommige risico's zijn onaanvaardbaar geacht, onafhankelijk van het voordeel dat ze opbrengen. In het geval we binnen de aanvaardbare risico's blijven, is de praktijk (die voordelen oplevert) toegestaan, op

voorwaarde dat we alles redelijkerwijze in het werk stellen om die risico's zo laag mogelijk te houden.

De wetgeving slaat op twee soorten praktijken: de praktijken die een artificiële bron van straling betreffen, en ook de praktijken die enkel met natuurlijke bronnen te maken hebben, maar waar mensen (werknemers en publiek) eventueel aan een verhoogde dosis van natuurlijke straling kunnen blootgesteld zijn zoals mijnbouw activiteiten, maar ook: bezoek van grotten, of werk in zones waar de natuurlijke bestraling relatief belangrijk is, zoals bijvoorbeeld in vliegtuigen. Daarentegen, de wetgeving slaat niet op de natuurlijke blootstelling buiten het kader van een professionele activiteit (zoals radon in woningen).

De wet is niet van toepassing in twee gevallen. Enerzijds is er *de vrijstelling van aangifte*, wanneer de hoeveelheden radioactieve stoffen waarmee gewerkt wordt en hun concentratie kleiner zijn dan specifiek aangegeven limieten. Indien men in dat geval is (en men dient zich daar zelf van te overtuigen, op straffe van overtreding van de wet), dan worden de bijhorende handelingen niet als « praktijken » beschouwd. Anderzijds is er de *vrijgave*: de hoeveelheden en concentraties radioactieve stoffen die men in de omgeving mag dumpen zonder verder gevolg. Men kan immers niet vermijden dat kleine hoeveelheden radioactieve (en andere) stoffen in het milieu terecht komen, en de vrijgave specificeert de normen die men hiervoor dient te vrijwaren. De vrijgave gebeurt in het kader van de aangifte van een praktijk.

De richtlijnen van Euratom voorzien verder dat de lidstaten een meetsysteem van ioniserende straling over hun territorium moeten bezitten (water, lucht, grond), en dat het functioneren van dat systeem moet onderworpen zijn aan een goedkeuring van Euratom. De resultaten moeten ook ter beschikking gesteld worden van Euratom. Elke aanvraag van een praktijk op nationaal vlak moet ook aan Euratom gecommuniceerd worden. Als dusdanig heeft Euratom op elk ogenblik een volledig beeld van de nucleaire praktijken in gans Europa, evenals een beeld van het patroon van (meestal natuurlijke) ioniserende straling over het gehele grondgebied van de Europese Unie.

De nationale wetgevingen die volgens de Euratom richtlijnen zijn opgesteld, kunnen wat verschillen van land tot land in de details, maar zijn allemaal relatief gelijklopend. Aan een praktijk wordt een verantwoordelijke geassocieerd (meestal de directeur van de instelling of het bedrijf), die moet nagaan en kunnen bewijzen dat de wetgeving is gerespecteerd (dosimetrie, medisch opvolgen van werknemers...), dat de nodige aanvragen voor toelating van de activiteit zijn gedaan en dat toelating is bekomen. Hij is ook verantwoordelijk voor het informeren van de werknemers en het melden van elk incident. Hij blijft « eigenaar » van elke vorm van radioactief afval. Hij moet noodplannen uitwerken, en een inventaris bijhouden van alle radioactieve stoffen. Het nationaal controle organisme organiseert ook geregelde controles en inspecties van alle aangegeven praktijken.

Het maximum dosis debiet voor het publiek is als volgt vastgelegd: effectief dosis debiet (over heel het lichaam dus) 1mSv/jaar, evenals enkele lokale begrenzingen: niet meer dan een equivalent dosis debiet (lokaal) van 15mSv/jaar voor de ooglenzen, en niet meer dan 50mSv/jaar voor elke vierkante centimeter van de huid. Er zijn een aantal uitzonderingen op deze regel, bijvoorbeeld voor patiënten. Merk op dat het natuurlijke stralingsniveau in de meeste landen tussen 2 mSv/jaar en 6 mSv/jaar ligt, met enkele uitschieters in sommige plaatsen.

Werknemers in de nucleaire sector die medisch en dosimetrisch gevolgd worden, mogen hogere dosisdebieten ontvangen. Werknemers van categorie B mogen jaarlijks tot 6 mSv/jaar ontvangen, werknemers van categorie A mogen 20 mSv/jaar opdoen. Elke zone van de werkruimte waar het dosisdebiet potentieel groter is dan 1mSv/jaar noemt men een « bewaakte zone » en de werkgever is gedwongen om een meetsysteem te bezitten dat de dosisdebieten daar opvolgt. Een « gecontroleerde zone » is een zone waar het dosis debiet mogelijk groter is dan 6mSv/jaar.

Naargelang de potentiële dosis debieten groter zijn, worden hierbinnen zones afgebakend met een strengere en strengere reglementering. De fysische toegang tot de zones, de personen die er binnen mogen komen en de speciale toelatingen die ze hiervoor nodig hebben, worden bepaald per zone niveau.

3.5.c Reglementering in België

In België is het nationaal instituut dat toeziet op het respect voor de wetgevingen in zake stralingsbescherming, het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC⁶⁵). Men kan de volledige wetteksten (die, zoals men kan vaststellen, heel dicht bij de internationale richtlijnen aanleunen) daar⁶⁶ vinden.

De technische specificaties (die na onze uiteenzetting leesbaar zouden moeten zijn) wat betreft:

- Vrijstelling(bijlage IA)
- Vrijlating (bijlage IB)
- Equivalente dosis externe bestraling (bijlage II)
- Equivalente dosis interne besmetting en limiet op losingen (bijlage III)
- Transport van radioactieve stoffen (bijlage IV)
- Noodplannen (bijlage V)
- Activiteitslimieten voor hoog-radioactief afval (bijlage VI)
- Opvolging van hoog-radioactief afval (bijlage VII)

vindt men daar⁶⁷ ook.

Zij zijn een transcriptie van de ICRP aanbevelingen.

3.5.d Reglementering in Frankrijk

Frankrijk is een referentie inzake kernenergie en het nucleaire gebeuren. Er zijn in Frankrijk twee officiële organismen die zich bezighouden met de stralingsbescherming: enerzijds is er de autoriteit, de ASN⁶⁸ (Autorité de sûreté nucléaire) die zich bezighoudt met inspecties, het al dan niet toekennen van toelatingen tot nucleaire praktijken, transportvergunningen aflevert enzovoort. Anderzijds is er de IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire⁶⁹), een expert orgaan dat in opdracht van de ASN (of andere Franse of buitenlandse organisaties) expertises en studies verricht.

Een Franse specificiteit is de indeling in verschillende niveaus van gecontroleerde zone. Voor de Fransen is een bewaakte zone (zone surveillée) een zone waar het dosisdebiet door externe

⁶⁵<http://www.fanc.fgov.be/default.htm>

⁶⁶http://www.fanc.fgov.be/nl/reglementation_20_07_2001.htm

⁶⁷http://www.fanc.fgov.be/download/reglementation_20_07_2001_annexes_nl.pdf

⁶⁸ <http://www.asn.fr/>

⁶⁹ <http://www.irsn.fr/>

blootstelling niet groter is dan 0.0075 mSv/uur, maar potentieel groter dan 0.0005 mSv/uur. Dat komt overeen, als we 8 uren per dag, en 200 dagen per jaar rekenen, met een totale dosis van minder dan 12 mSv per jaar, maar potentieel meer dan 0.8 mSv per jaar. Die zone is dus (met een veiligheidsmarge) niet geschikt voor permanente toegang van niet-stralingswerkers (jaarlijkse limiet 1 mSv), maar stelt geen probleem voor stralingswerkers van klasse A (jaarlijkse limiet 20 mSv).

Boven dit niveau bevinden we ons in een gecontroleerde zone. Als het dosisdebiet tussen de 0.0075mSv/uur en de 0.025 mSv/uur ligt, dan is dat een « Groene » zone, als het dosisdebiet tussen 0.025 mSv/uur en 2 mSv/uur valt, hebben we te maken met een « gele » zone. Is het dosisdebiet gelegen tussen 2 mSv/uur en 100 mSv/uur, dan is de zone « oranje », en boven de 100 mSv/uur is de zone « rood ». De toegang tot oranje en rode zones is onderworpen aan een specifieke en individuele toelating, voor de oranje zone, door de lokale stralingsbeschermingsdienst, en voor de rode zone, door de verantwoordelijke van de nucleaire praktijk, en moet een uitzonderlijk en gemotiveerd karakter hebben.

3.5.e Reglementering Nederland

Men kan informatie betreffende de wetgevingen omtrent stralingsbescherming in Nederland vinden bij SenterNovem⁷⁰.

Een overzicht van de Kernenergiewet, het wettelijke kader dat in Nederland de nucleaire praktijken beheert, kan men daar⁷¹ ook vinden.

Men stelt al snel vast dat deze wet als twee druppels water lijkt op de Belgische wetgeving ter zake en ongeveer dezelfde terminologie gebruikt. Dit is inderdaad vrij algemeen: aangezien de verschillende lidstaten dezelfde Euratom richtlijnen in hun wetgeving vertalen (die zelf op een rapport van de ICRP is gebaseerd), vindt men vrij gelijklopende wetgevingen in verschillende landen.

3.5.f ALARA – Optimaliseren van de stralingsbescherming

Zoals door de wetgevingen is voorgeschreven, dient men niet gewoon maar de maximum dosissen te respecteren, men dient de dosissen zo klein mogelijk te houden. De hele strategie om de dosissen zo klein mogelijk te houden, heet “het optimaliseren van de stralingsbescherming”, ook wel ALARA. Het is in de nucleaire sector wat “integrale kwaliteitszorg” in de industrie is, met dat verschil dat het hier om een wettelijke verplichting gaat.

Eerst en vooral gaat het om een “bedrijfscultuur” of een “mentaliteit”. Men dient, bij het ontwerp van een installatie, of bij het plannen van praktijken, steeds het ALARA idee indachtig te zijn. Men kan immers niet optimaliseren zonder te plannen. Vervolgens dient men een dosimetrische opvolging in te voeren, om na te gaan of de opgelopen dosissen in overeenstemming zijn met de voorziene waarden. Tenslotte dient men een analyse van het gebeuren te maken, om daar eventueel een ervaring voor een latere praktijk uit af te leiden. Het ALARA principe vereist dat alle acteurs op de hoogte zijn van de principes en doelstellingen. De autoriteiten dienen actief toe te zien dat de ALARA richtlijnen gevolgd worden. De hiërarchie dient zich te engageren in een ALARA aanpak

⁷⁰<http://www.senternovem.nl/Stralingsbescherming/index.asp>

⁷¹http://www.senternovem.nl/Stralingsbescherming/wet_en_regelgeving/index.asp

(toekennen van verantwoordelijkheden, ter beschikking stellen van middelen, het erkennen van goed werk ter zake), het personeel moet geïnformeerd en gemotiveerd worden, en de ALARA principes dienen ook deel uit te maken van de contractuele relaties met externe personen of bedrijven.

Men voert soms het concept van *collectieve dosis* in. De eenheid ervan wordt vaak *de man-Sievert* genoemd, en het is de som van de dosissen opgelopen door alle betrokken personen in een groep. Als we een lineair verband tussen dosis en risico bij conventie aannemen, dan heeft de collectieve dosis een fysische betekenis: het is evenredig met het collectieve risico. Het verwachte aantal dodelijke kankergevallen is gelijk aan de collectieve dosis vermenigvuldigd met de kans op dodelijke kanker per eenheid van dosis. Indien dat getal veel kleiner is dan 1, dan is dat de kans op een verwacht kankergeval.

Een ALARA aanpak wil de totale impact van de ioniserende straling verminderen ; het is bijgevolg noodzakelijk om de collectieve dosis te optimaliseren, gezien (onder de hypothese van lineariteit) bij de laagste collectieve dosis, ook de laagste totale sanitaire impact zal horen.

Laten we ons in een specifiek geval plaatsen. Voor een gegeven taak in een zone waar een zeker dosis debiet aanwezig is, lopen werknemers (of mensen van het publiek) een zekere dosis op. De taak kan zijn: de jaarlijkse revisie van een pomp in een gecontroleerde zone. Maar we hoeven niet steeds aan de kernenergie sector te denken: een patiënt die met radio-isotopen is behandeld, bestraalt de verplegers een beetje, bijvoorbeeld, maar ook de mensen in de autobus als hij naar huis gaat. Of een wetenschapper die een staal ter analyse in een of andere stralingsbundel wil plaatsen. Het ALARA principe vereist dan dat we tenminste gaan nadenken of er manieren zijn om de ontvangen dosis te verminderen. Er zijn soms verbazingwekkend eenvoudige ideeën die de dosis kunnen verminderen. Laten we terugkeren naar onze pomp. Het is mogelijk dat een deel van de taak de aanwezigheid van verschillende personen vraagt. Het idee is dan gewoon om het werk zo te organiseren dat de collectieve dosis (dat wil zeggen: de som van de dosissen van alle personen) geoptimaliseerd wordt. Als het bijvoorbeeld niet nodig is dat alle personen voor de interventie de hele tijd in de gecontroleerde zone aanwezig zijn (of als het mogelijk is de taak zo te herorganiseren dat dit het geval is), dan is het beter dat die personen de zone een deel van de tijd verlaten. Indien er geactiveerde materialen zijn, dan kan het nuttig zijn om bijvoorbeeld een “afkoeltijd” te voorzien waardoor de activiteit van het materiaal afneemt (we kunnen bijvoorbeeld de interventie plannen aan het einde van een stop periode en niet aan het begin). Het ALARA concept indachtig, dient men steeds bij gelijkblijvende kost, het werk op die manier te organiseren dat de collectieve dosis minimaal is.

Maar natuurlijk zijn de meeste interventies die de dosis kunnen verminderen ook verbonden aan een kostprijs. De vraag die zich dan stelt, is: wanneer is het de moeite waard om die investering door te voeren, en wanneer zijn dit hoge kosten voor weinig baat ? Intuïtief voelt men wel aan dat er ergens een grens is die het “redelijke” overschrijdt. Als een hulpmiddel bij de beslissingsname heeft men het concept van *prijs van een man-Sievert* ingevoerd. Dit kan een op het eerste zicht “onethische” grootheid zijn, want het lijkt erop dat we de waarde van een mensenleven in geld uitdrukken. Niettemin is het een hulpmiddel dat in de wereld van de verzekering bijvoorbeeld gehanteerd wordt. Het is niets anders dan de formalisering van een intuïtief concept: wanneer vinden we het nog de moeite waard om geld uit te geven voor een dosis vermindering ? De prijs van de man-Sievert is de hoeveelheid geld die we bereid zijn uit te geven om de collectieve dosis met 1 man-Sievert te laten afnemen.

Economisten en verzekeringsmakelaars gaan als volgt te werk. Als, door het collectief lopen van een zeker risico, een aantal levensjaren verloren gaan (statistisch gesproken, over een bevolking, en

vergeleken met de normale levensverwachting) dan kan men daar een geldswaarde tegenover plaatsen op de volgende wijze. Men kijkt naar de totale rijkdom van die bevolking (het Bruto Nationaal Product BNP), en men deelt dat door het aantal leden in de bevolking. Dat is de “maximale economische inspanning” die die bevolking aan elk lid ervan kan toestaan per jaar bij maximale solidariteit, in de veronderstelling (wat natuurlijk niet waar is) dat de gehele rijkdom van een maatschappij erop gericht is om “zo lang mogelijk te leven”. We kunnen dus economisch gezien stellen dat een mens-levensjaar egalitair (en dus statistisch) gezien, dat bedrag waard is. In Europa draait dat bedrag rond de 20 000 Euro. Het oplopen van een dodelijke kanker door straling (rekening houdende met de typische latentie, die tussen de 10 en de 40 jaar bedraagt) geeft aanleiding tot een vermindering van de levensverwachting van ongeveer 16 jaar. Dat wil dus zeggen dat de maatschappij 320 000 Euro kan uitgeven om een kanker geval te vermijden. Gezien de kans op zo een kanker geval 5.6% is per man-Sievert, wil dat zeggen dat de maatschappij 18 000 Euro kan spenderen om een man-Sievert te vermijden, als alles strikt egalitair verdeeld wordt. Deze “redenering op de hoek van een enveloppe” is natuurlijk bij de haren getrokken, maar het geeft een idee van de grootte-orde die redelijk is, puur objectief en economisch-collectief gezien, om middelen aan te wenden om een risico te verminderen. In de praktijk legt men de lat hoger, en is men, in de nucleaire sector, meestal bereid om hogere bedragen uit te geven om de dosis te verminderen. De nationale organismen die zich bezighouden met de stralingsbescherming geven soms richtwaarden (die niet bindend zijn) voor de prijs van een man-Sievert. Zij schommelen in vele landen rond de 100 000 a 200 000 Euro per man-Sievert. Sommige landen gaan veel verder: in Nederland wordt een bedrag van 450 000 Euro per man-Sievert aangenomen, in Zwitserland 1 800 000 Euro.

Onder de hypothese van een lineaire afhankelijkheid van het risico als functie van de dosis, is het optimaliseren van de collectieve stralingsdosis statistisch gezien, de beste. Maar er is een sociaal fenomeen dat meespeelt. Beschouw dat er, binnen een groep personen, 990 personen zijn in deelgroep A, en 10 personen in deelgroep B. Veronderstel dat voor een gegeven kost, het mogelijk is de dosis van elk van de personen in groep A met 0.2 mSv te laten dalen, maar dat daarbij de dosis van elk van de 10 personen van groep B met 15mSv stijgt. We kunnen bijvoorbeeld denken aan een interventie, door die 10 personen, in vele gecontroleerde zones, zodat het algemene dosis debiet wat afneemt. Wat de collectieve dosis betreft, maken we vooruitgang: in groep B is de collectieve dosis met 198 man-mSv gedaald, in groep A is die met 150 man-mSv gestegen, en in de totale groep is de collectieve dosis dus met 48 man-mSv gedaald. Statistisch gezien draagt de groep dus nu een kleiner risico. Maar er is iets dat sociaal niet door de beugel kan. De 10 personen van groep B zijn kort bij de wettelijke limiet voor jaarlijkse blootstelling gekomen (20 mSv/jaar voor personeel van categorie A). Zij nemen dus “alle risico op zich” en “offeren zich op” voor het welzijn van groep B. Hoewel individueel altruïstisch gedrag wel mogelijk is, kan dat onmogelijk deel uitmaken van een planning.

Men heeft daarom voorgesteld om de prijs van de man-Sievert te laten afhangen van de individuele dosis. We berekenen dus niet meer de collectieve dosis, maar de collectieve prijs van een dosis, die gewogen wordt met een prijs van de Sievert per individu. Bijvoorbeeld, in Frankrijk stelt men de volgende prijs voor:

- 0 – 10 mSv: 650 000 Euro per Sievert
- 10 – 16 mSv: 1 300 000 Euro per Sievert
- 16 – 20 mSv: 1 800 000 Euro per Sievert.

Als we terug naar ons voorbeeld kijken, dan zien we dat de “winst” van de bovenstaande interventie gelijk is aan $990 \times 0.2 \text{ mSv} \times 650 \text{ Euro/mSv} - 10 \times 15 \text{ mSv} \times 1300 \text{ Euro/mSv} = -66\,300 \text{ Euro}$, een

negatieve winst, met andere woorden, we verliezen. Zeker geen goed idee om deze actie door te voeren volgens deze schaal.

Indien men zo een gewogen schaal invoert, die rekening houdt met de sociale “aversie voor risico” dan gaat men niet voor het kleinste risico voor de hele groep, maar men vermijdt dat sommigen veel grotere risico’s lopen dan anderen.

We wensen er nog eens op te wijzen, dat bovenstaande redenering enkel maar een formeel hulpmiddel is bij het nemen van beslissingen betreffende het optimaliseren van de stralingsbescherming. *Het is als het ware een formaliseren van wat we intuïtief zouden beslissen zonder te weten waarom.*

Indien de bovenstaande aanpak heel formeel en misschien zelfs wat cynisch lijkt, is het niettemin een volledig verantwoorde aanpak van het concept van “risico”. Het is omdat we betreffende ioniserende straling zo een goed beeld hebben van wat het risico inhoudt, en dat we het goed kunnen berekenen en meten, dat de optimalisering ervan denkbaar is. Bovenstaande formalisering is denkbaar in elk geval waarin we op enige betrouwbare wijze een objectief risico kunnen inschatten. Men dient hierbij in het oog te houden dat het niet doorvoeren van een activiteit ook een risico inhoudt. Een vermindering van economische welvaart en de afwezigheid van een zeker comfort houdt ook objectieve risico’s in, in de volgende zin: het geeft aanleiding tot een vermindering in levensverwachting. Een voorbeeld: tijdens de hittegolf in de zomer van 2003 zijn er in Frankrijk naar schatting 15 000 overlijdens geweest, meestal bij bejaarde personen, ten gevolge van het afwezig zijn van een airco in hun rusthuis of woonplaats. Als dusdanig kan men ook niet te veel middelen investeren in het verminderen van een bepaald risico, want die verloren middelen voor andere welvaart dragen hun eigen risico met zich mee. Vandaar dat het helemaal niet cynisch is om een prijs te stellen op het verminderen van een (reeds klein) risico. Maar voor de meeste andere menselijke activiteiten kunnen we zoiets niet doen omdat we geen goed beeld hebben van het risico.

Bij de meeste andere risico’s die we lopen, die vaak veel hoger zijn, kunnen we heel moeilijk kwantificeren hoe groot dat risico nu werkelijk is, of het nu gaat om ongevallen, sanitaire problemen door blootstelling aan polluenten, ... We hebben op zijn best wat “epidemiologie”, ofte statistieken, zoals de kans op auto ongeval per leeftijdscategorie. Maar we kunnen niet precies becijferen hoeveel we ons risico verminderen (of verhogen) door een of andere investering te doen, of door een of andere actie te ondernemen. In vele gevallen zijn we totaal ignorant betreffende de risico’s die we werkelijk lopen, en we zouden veel moeite hebben om ze te voorspellen of te meten. Als dusdanig zou het moeilijk, zo niet onmogelijk zijn om aan enige optimalisering te doen en slaan we er maar naar hoeveel en op welke manier we wensen of kunnen investeren in een vermindering van het risico. Als we een miljard Euro willen investeren in het verminderen van het risico voor de bevolking, moeten we dat besteden aan verkeersveiligheid (en hoe ?) of aan een of andere vorm van pollutie bestrijding, of dienen we het eerder in een sociaal programma te investeren dat het “sociale” risico voor de minst-begunstigden verkleint ? Gezien men helemaal niet kan becijferen wat nu de winst, zeg maar, in levensverwachting gaat zijn voor deze drie strategieën, gaat men maar voort op zijn intuïtie, vandaar de levendige politieke en sociaal-economische debatten over deze kwesties. In de stralingsbescherming is het veel gemakkelijker om een relatief precies beeld te bekomen van welke investering, waar, welk risico vermindert. Paradoxaal genoeg leidt deze hele precieze kennis tot een argument *tegen* nucleaire activiteiten. Bijvoorbeeld, in het reeds eerder geciteerde medische rapport komt men tot het “alarmerende” besluit dat er, zij het wel geen statistisch significant bewijs, maar toch wel een lichte aanduiding bestaat dat de maximum dosissen toegelaten door de wet niet volledig *zonder* risico zijn. Ten eerste gaat de stralingsbescherming

reeds van die hypothese uit (risico evenredig met dosis), maar ten tweede zijn er niet veel menselijke activiteiten waar het risico helemaal nul is. Het is alsof men tot de ontdekking is gekomen dat het belangrijkste menselijke transportsysteem (namelijk, de auto) niet helemaal risico vrij is, zelfs al rijdt men aan de wettelijk toegelaten snelheid. Het feit dat men een gemakkelijk meetbare en berekenbare grootte heeft die het kleine maar niet nul zijnde risico aangeeft, terwijl men daar bij andere (veel meer risicovolle) activiteiten veel moeilijker een schatting kan van geven in precieze omstandigheden, speelt tegen de nucleaire activiteit. Men verkiest een groot maar onmeetbaar risico boven een klein en exact kwantificeerbaar risico, onder het motto “wat niet weet, niet deert”.

3.5.g Ontvangen dosissen in de praktijk.

Veruit het belangrijkste dosis debiet van ioniserende straling die het publiek ontvangt, is van natuurlijke oorsprong. In een gedetailleerd rapport⁷² hierover kan men vinden:

- Kosmische straling: 0.39 mSv/jaar (varieert tussen 0.3mSv/jaar en 1.0mSv/jaar)
- Bestraling door de aarde: 0.48 mSv/jaar (tussen 0.3mSv/jaar en 0.6mSv/jaar)
- Inademing (radon): 1.26mSv/jaar (tussen 0.2 mSv/jaar en 10mSv/jaar)
- Inwendig: Kalium-40 en uranium: 0.29mSv/jaar (tussen 0.2 mSv/jaar en 0.8 mSv/jaar)

Als dusdanig is *het wereldgemiddelde van de natuurlijk ontvangen dosis 2.4 mSv/jaar* maar varieert tussen 1mSv/jaar en 10mSv/jaar⁷³ en meer.

De natuurlijke belasting is sterk veranderlijk. In het (dichtbevolkte) kustgebied van Kerala (India) bijvoorbeeld, zijn er plaatsen waar de natuurlijke dosis tot 70 mSv / jaar bedraagt⁷⁴. In Ramsar, een streek in Iran, vindt men in sommige woningen een dosis tot 132 mSv/jaar. In Guarapari⁷⁵ in Brazilië vindt men piek dosissen van 175 mSv / jaar. Het is dus onmogelijk om in die streken een nucleaire praktijk uit te oefenen, want men zou reeds de wetgeving op alle vlakken overtreden alvorens de installatie zelfs maar zou gebruikt worden.

De stralingsdosis die men ontvangt ten gevolge van medische onderzoeken is, grappig genoeg, evenredig met het « medisch comfort » van het land in kwestie : in Westerse landen met hoog medisch comfort (een dokter per minder dan duizend inwoners), is die dosis 1.2 mSv per jaar, terwijl het wereldgemiddelde rond 0.4 mSv/jaar ligt. Let wel, in deze dosis zijn stralingstherapieën niet inbegrepen: het gaat enkel maar om dosissen ontvangen voor diagnose. In de mate dat men de lineaire dosis-gevolg relatie kan toepassen op deze kleine dosissen, wil dat zeggen dat diagnose gebruik van ioniserende straling 120 000 slachtoffers per jaar veroorzaakt.

De voornaamste bron van kunstmatige dosisbelasting naast de medische belasting, zijn de atmosferische testen van kernwapens in de jaren 1945-1963. In 1963 (op zijn maximum), was de wereldwijde bijdrage tot de ontvangen jaarlijkse dosis 0.15 mSv, dat is ondertussen teruggevallen tot 0.005 mSv per jaar, wat dus wil zeggen: 1 500 doden per jaar voor een wereldbevolking van 6

⁷²<http://www.unscear.org/docs/reports/annexb.pdf>

⁷³ http://en.wikipedia.org/wiki/Natural_radioactivity

⁷⁴http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?cmd=Retrieve&db=PubMed&list_uids=10564957&dopt=Abstract

⁷⁵<http://en.wikipedia.org/wiki/Guarapari>

miljard mensen (het jaar 2000). Chernobyl staat voor ongeveer 0.002 mSv per jaar, maar de bijdrage hiervan is niet gelijkmatig verdeeld over de wereldbevolking.

Na medische belasting en atmosferische nucleaire wapen testen en Chernobyl, is de belangrijkste bron van kunstmatige stralingsbelasting... elektriciteitsproductie door steenkool. Bij het verbranden van steenkool komen een aantal radioisotopen vrij, waaronder ook radioactieve gassen. Een 1 GW-e steenkool centrale brengt per jaar tussen de 4 en de 20 ton uranium en radium in de omgeving. Men heeft uitgerekend dat dit ongeveer wereldwijd voor 0.001 mSv zorgt wat neerkomt op ongeveer 320 doden per jaar (schatting door UNSCEAR). Men dient hieraan toe te voegen: het verbranden van steenkool in de staalindustrie. Er is een geval bekend in Groot-Brittannië waar een staalfabriek lokaal zorgde voor een extra dosis van 0.25 mSv/jaar voor de omwonenden.

Kernenergie draagt 0.0002 mSv/jaar bij en dit betreft alle sectoren van het kernenergie gebeuren buiten Chernobyl, inbegrepen de uranium mijnen en het afval. Als dusdanig is de bijdrage tot de stralingsbelasting van de wereldbevolking door kernenergie ongeveer 10 000 keer kleiner dan wat die bevolking qua stralingsdosis reeds natuurlijk ontvangt. Maar zelfs de ramp van Chernobyl draagt 200 keer minder bij tot de bestraling van de wereldbevolking dan het gemiddelde van de medische onderzoeken, die, laten we niet vergeten, grotendeels door Westerse bevolkingen wordt gedragen. M.a.w. als we de logica extreem doortrekken, dan mogen er 200 Chernobyl rampen gebeuren alvorens de objectieve gevolgen ervan voor de wereldbevolking overeenkomen met het risico dat we oplopen ten gevolge van medische onderzoeken, en er mogen 600 Chernobyl rampen gebeuren alvorens de gevolgen ervan overeenkomen met het risico dat we in het Westen aanvaarden voor medische onderzoeken. Natuurlijk is dit wat karikaturaal, maar onder de hypothese van proportionaliteit van dosis en effect *worden er dus 200 keer meer kankers per jaar veroorzaakt wereldwijd door de medische onderzoeken dan ten gevolge van het Chernobyl ongeluk*. Als we Chernobyl uitsluiten, dan worden er 2000 keer meer kankers veroorzaakt door medisch onderzoek dan door de hele kernenergie activiteit. Dit plaatst het concept “risico” ten gevolge van nucleaire activiteiten in een meer nuchter daglicht. We zijn lichtjaren ver van de doemscenarios waarbij een ongeluk in een kerncentrale de hele wereld in gevaar brengt...

3.6 Beschermen tegen ioniserende straling

Zoals gezien is ioniserende straling schadelijk voor biologische cellen, en bijgevolg voor mensen en andere levende wezens. We gaan uit van de werkhypothese dat zelfs kleine dosissen een (klein beetje) schadelijk zijn. Het is bijgevolg nodig om de blootstelling van mensen aan ioniserende straling zo veel mogelijk te vermijden. Zoals gezien, zijn er strenge wettelijke normen opgesteld die dienen nageleefd te worden door gebruikers van processen die met ioniserende straling te maken hebben. De hele dosimetrie is deels opgezet in functie van het nagaan of de wettelijke bepalingen ter zake zijn nageleefd. Om nucleaire installaties aan de wetgevingen ter zake te laten voldoen, is het nodig om bij het ontwerp van een nucleaire installatie rekening te houden met de stralingsbescherming.

Om de externe blootstelling van mensen te verminderen, kan men op drie aspecten werken:

- De tijd van blootstelling zo kort mogelijk houden
- De afstand tussen personen en bronnen zo groot mogelijk maken
- Materiële schermen plaatsen die de intensiteit en/of de nociviteit van de ioniserende straling verminderen

Het interessante aan de wetgeving betreffende blootstelling aan ioniserende straling is dat men niet gewoon « de wettelijke norm » dient te halen en daarmee basta. Men moet het ALARA principe toepassen, dus de laagste dosis toelaten die redelijkerwijs mogelijk is.

Om de interne besmetting van mensen te verminderen, dient men te vermijden dat mensen in fysiek contact komen (lucht, vloeistoffen, stofdeeltjes, gassen...) met de radioactieve stoffen in kwestie, en vermijden dat die stoffen in een “opneembare vorm” voorkomen. Men pakt dat probleem aan met verschillende (complementaire) technieken, naargelang de aard van de bron. Niettemin bestaat de aanpak altijd uit drie luiken:

- preventie (werken op de bron, op de barrières, op de persoon)
- toezicht (nagaan dat er geen contaminatie is)
- veiligheidsmaatregelen in geval van vaststelling van contaminatie

3.6.a Bescherming tegen externe bestraling

In de eerste plaats hangt de vorm van de bescherming af van de bron. Het spreekt vanzelf dat niet dezelfde maatregelen getroffen worden als de bron een kernreactor is of als we te maken hebben met een klein laboratorium bronnetje.

Men dient, om een goede bescherming kunnen uit te werken, te weten wat de straling (in het meest ongunstige geval) van de bron inhoudt. Dit kan, naargelang de bron, een eenvoudig, of een ingewikkeld probleem zijn. Laten we twee voorbeelden beschouwen: een kernreactor, en afgewerkte brandstof. Het functioneren van de kernreactor bepaalt welke straling aan zijn rand vrijkomt. Dat bestaat essentieel uit een intens neutronen spectrum, en een even intense gamma straling. Buiten de reactor hal dient men aan verwaarloosbare stralingsniveaus te komen (ALARA). Men dient dus alle mogelijke stralingsvelden te beschouwen die de reactor in alle denkbare toestanden kan produceren, en een bescherming ontwerpen om tot een verwaarloosbaar stralingsniveau te komen aan de buitenkant. Een afgewerkte brandstof is een heel complex geheel van radioactieve stoffen. Naarmate het radioactieve verval verloopt, verandert de samenstelling, en dus het stralingsveld dat uitgezonden wordt.

Men dient ook rekening te houden met de eventuele transformaties die de materialen ondergaan bij een intense bestraling, in het bijzonder de activatie. M.a.w. de bescherming (of tenminste een deel ervan) wordt zelf een bron van straling. Bovendien kan een intense bestraling zorgen voor een opwarming van het materiaal (door nucleaire reacties, of door directe energie depositie). De nodige koeling dient dus eventueel voorzien te worden.

Als dusdanig stelt het ontwerp van een stralingsbescherming vrij gelijkaardige problemen als het ontwerp van een reactor: men dient het stralingstransport probleem op te lossen in gegeven materialen, rekening houdende met de nucleaire en andere reacties die zich daarbij voordoen. Het gewenste effect is verschillend (kettingreactie versus stralingsbescherming), maar de categorie van fysisch/ingenieurs probleem is in feite hetzelfde. We komen nog op enkele principes van die berekeningen terug in het kader van het reactor ontwerp in hoofdstuk 4. Hier gaan we ervan uit dat er technieken bestaan die toelaten het transport van straling doorheen materiële barrières te berekenen, met alle grootheden die daarbij horen zoals eventuele opwarming van de materie, schade en modificatie van de materie. Wat bij de stralingsbescherming vooral van belang is, is het uiteindelijke stralingsveld en de eventuele activatie.

Natuurlijk zijn er rond een belangrijke bron, zoals een kernreactor, reeds “van nature” beschermingen aanwezig: de constructie materialen. Hun voornaamste bedoeling is niet om voor de stralingsbescherming te zorgen, maar wel om de installatie de structurele integriteit te geven die nodig is. Deze materialen zijn niet noodzakelijk optimaal voor de stralingsbescherming, maar men dient wel rekening te houden met sommige aspecten om het stralingsbeschermingsprobleem nietodeloos ingewikkeld te maken.

Zoals reeds eerder vernoemd, zijn bèta, en vooral alfa straling geen serieus probleem voor externe blootstelling, gezien ze heel snel gestopt worden in zowat elke materie. De stralingscomponenten die, qua stralingsbescherming, aandacht vragen zijn de gamma straling en de neutronen. Een bescherming die op voldoende wijze gamma straling en neutronen tegenhoudt, zal vanzelf ook alfa en bèta straling tegenhouden.

Om gammastraling tegen te houden, gebruikt men best relatief zware materialen. Hoewel het stralingstransport probleem vrij ingewikkeld is, en, zoals eerder uiteengezet, het verminderen van de originele gamma straling niet wil zeggen dat de dosis evenredig verminderd is (door de aanwezigheid van secundaire deeltjes, voornamelijk gamma en bèta straling), hebben we toch een ruw idee van de nodige dikte door de grootte $x_{1/10}$ te beschouwen, de dikte die nodig is om de intensiteit van een gamma bundel van een zekere energie tot een tiende van zijn intensiteit te herleiden: $x_{1/10} = \frac{\ln(10)}{\mu}$.

De materialen die vaak gebruikt worden als gamma-scherm zijn de volgende (tussen haakjes geven we hun $x_{1/10}$ waarde voor gamma fotonen van 6 MeV):

- Ijzer, staal... (9.6 cm – 9.8 cm)
- lood (4.6 cm)
- uranium (2.6 cm)
- wolfram (2.9 cm)
- beton, gewoon of met toevoeging van magnetiet (36 cm, 25 cm)
- loodglas (15 cm)
- water (83 cm)

Voor lucht is die waarde ongeveer een kilometer.

Als we de bovenstaande waarden gebruiken (die, we herhalen, enkel een vuistregel zijn ; een gedetailleerde berekening van het stralingstransport probleem is noodzakelijk), dan kunnen we bijvoorbeeld stellen dat een muur van 20 cm dikke loodblokken (dus ongeveer vier keer een $x_{1/10}$ dikte) de gamma intensiteit met een factor van wat meer dan 10 000 vermindert.

Neutronen (vooral snelle neutronen) zijn lastiger klanten. De beste manier om van neutronen af te geraken is door ze te absorberen via een kernreactie. Inderdaad, als we ze enkel maar vertragen, dan blijven ze als thermische neutronen bestaan, dingen die ook schadelijk zijn. De werkzame doorsnede voor absorptie is echter omgekeerd evenredig met de snelheid. We dienen snelle neutronen eerst te vertragen, alvorens ze te absorberen. Bovendien zal de absorptie vaak aanleiding geven tot het uitzenden van gammastraling. We moeten dus achtereenvolgend drie dingen doen: snelle neutronen vertragen, trage neutronen absorberen en tenslotte de gammastraling die daarbij vrijkomt kwijtraken.

Om snelle neutronen te vertragen kunnen we op twee mechanismen rekenen. Eerst is er natuurlijk de elastische botsing, waarbij een deel van de energie van het neutron overgedragen wordt aan de

kern. Deze overdracht is des te efficiënter naarmate de kern in kwestie licht is (denk aan moderatoren). Voor heel snelle neutronen kan men ook zwaardere kernen gebruiken, als er een behoorlijke werkzame doorsnede voor inelastische botsing of interactie is, maar niettemin moet men op een of ander ogenblik toch wel lichte materialen als vertragingsmiddel gebruiken. Als absorptiemiddel kan men waterstof gebruiken, hoewel de neutron absorptie werkzame doorsnede vrij klein is. Beter is een materiaal met hoge werkzame doorsnede te gebruiken, zoals boor, gadolynium of lithium⁷⁶. Vaak mengt men een waterstofhoudend materiaal met een absorbeermiddel, zoals boor.

Een probleem dat zich stelt is dat neutronen (snelle of thermische) vaak nucleaire interacties aangaan met kernen, en *dat hierbij radioactieve kernen ontstaan*. Zoiets wordt *activering* van het materiaal genoemd. Men dient op te letten: het kunnen soms de kleine verontreinigingen in materialen zijn die zich het meeste activeren. Men dient bijgevolg zorgvuldig de keuze te maken tussen de verschillende beschikbare materialen.

In elk geval veroorzaken de reacties van de neutronen in de materialen (evenals de geactiveerde onderdelen ervan), een zekere gammastraling. En jammer genoeg zijn de lichte materialen die we gebruiken om de neutronen te vertragen en soms ook te absorberen, heel slechte beschermingen tegen gammastraling. We dienen dus een combinatie te bedenken van materialen die neutronen afremmen en/of absorberen, en materialen die de gammastraling verminderen. Men gebruikt soms gelaagde structuren, waarbij zware en lichte materialen afwisselen. Een gedetailleerde berekening geeft aan welke de gunstigste verhoudingen en diktes zijn.

Vaak voorkomende materialen gebruikt als stralings scherm, zijn de volgende:

- Water. Water is een relatief slecht scherm tegen energetische gammastraling, maar men kan met hele dikke lagen werken (piscines). Water bevat veel waterstof, en met een dikke laag vertraagt men niet alleen de neutronen, men absorbeert ze ook. Er treedt een belangrijke activering op door de reactie $O-16(n,p)N-16$ bij hoge energie neutronen. N-16 is een hoog-actieve bèta-straler met een halfwaarde tijd van 7 seconden. Als dusdanig vervalt deze activiteit heel snel. Men dient wel rekening te houden met onzuiverheden die in het water kunnen opgelost zijn en die wel langdurige activering kunnen meebrengen. Er is echter een potentieel gevaar met water: radiolyse. Onder invloed van intense straling kan water gaan splitsen in waterstof en zuurstof. Als de waterstof zich kan ophopen, dan kan er een ontploffing optreden.
- Ijzer. Ijzer is, naast een goed constructie materiaal, ook een vrij goed stralings scherm. Het is redelijk efficiënt om gammastraling tegen te houden, en bovendien geen slecht neutron scherm (er zijn inelastische reacties bij hoge energie, en een zekere absorptie van thermische neutronen). Men dient echter op te letten. In de totale werkzame doorsnede voor neutronen op ijzer, is er een "gat". Bij ongeveer 23 KeV is de kans voor een neutron om te interageren met ijzer heel klein. Dat wil zeggen dat ijzer zo goed als transparant is voor die neutronen. Erger, snelle neutronen kunnen in ijzer vertraagd worden tot 23 KeV, en dan ontsnappen.

⁷⁶ Maar er is een grap met natuurlijk lithium! Li-6 ondergaat de absorptie $Li-6(n,\alpha)H-3$ met heel hoge werkzame doorsnede bij thermische neutronen. Maar er is ook een reactie $Li-7(\alpha,n)B-10$, waarbij snelle neutronen vrijkomen, en natuurlijk lithium bevat de twee isotopen, met 7.6% Li-6 en 92.4% Li-7. Dat maakt dat de alfa die uitgezonden wordt door de reactie van een thermisch neutron met een Li-6 kern, veel kans heeft om een Li-7 kern tegen te komen, en daarmee te reageren. Hierbij wordt een snel neutron gecreëerd. Als dusdanig is natuurlijk lithium een convertor van thermische neutronen in snelle neutronen! Als men lithium als absorbeermiddel voor thermische neutronen wil gebruiken, dient men bijgevolg isotopisch zuiver Li-6 te gebruiken, en geen natuurlijk lithium.

Een ander probleem met ijzer is dat het meestal gebruikt wordt in de vorm van staal, waarin andere elementen voorkomen. Alles bij elkaar activeert staal vrij behoorlijk.

- Lood. Lood is een heel goed gamma-scherm, maar een heel slecht neutronenscherm. Het enige wat lood doet met snelle neutronen is ze wat verstrooien, en vooral harde gammastraling uitzenden, en zelfs meer neutronen produceren via (n,2n) reacties.
- Beton. Men kan aan gewoon beton zware materialen toevoegen, om het beter geschikt te maken als gammascherm, of waterstofhoudende stoffen en/of boor, om het neutronen te laten absorberen. Beton is een vrij goed universeel scherm (vooral als men elementen toevoegt). Men dient echter relatief grote diktes te gebruiken.
- (Verarmd) uranium. Heel goed gamma-scherm, maar gevaarlijk materiaal in metaalvorm (kan branden), is een alfa-straler,... Vooral niet blootstellen aan neutronen! Het wordt soms gebruikt om gamma-bronnen af te schermen.
- Polyethyleen. Meestal vinden we niet vaak organische materialen in de stralingsbescherming, omdat organische stoffen vaak slecht aan ioniserende straling weerstaan. Niettemin wordt polyethyleen vaak, gezien zijn hoge waterstof inhoud, als bescherming tegen neutronen gebruikt. Het is vooral een handige stof om spleten en zo op te vullen. Men kan aan polyethyleen ook stoffen (zoals boor of lood) toevoegen om het een beter scherm te maken. In het algemeen activeert polyethyleen heel weinig (als het zuiver is).
- Lucht. Ongewenst, maar aanwezig. Lucht zorgt voor twee problemen: ten eerste verstrooit het straling, wat een vervelende eigenschap is (laat straling toe om “bochten” te maken). En ten tweede wordt het (licht) geactiveerd: Ar-41 en C-14 worden gevormd.

De moeilijkste problemen zijn die waar er een gemengde bron is van neutronen (snelle of thermische) en gammastraling. In het algemeen ontwerpt men eerst een scherm voor de belangrijkste component, en gaat dan na in hoeverre dat scherm ook voor de zwakkere component werkt. Maar het is ook zo dat harde gammastraling de neiging heeft om de lichte materialen die neutronen moeten vertragen (water, polyethyleen...) te beschadigen. Het kan dus nodig zijn om eerst de gammastraling voldoende te verminderen alvorens aan het neutronenscherm te denken. Bovendien is het gunstig om een gammascherm dicht bij de bron te plaatsen: het bestaat meestal uit de zwaarste elementen, en als men dat scherm het dichtste bij de bron plaatst, dan gaat men een kleinere hoeveelheid zwaar materiaal gebruiken, terwijl de neutronenschermen die verder weg staan, meestal lichter zijn, wat het geheel dus minder zwaar maakt. Aan de andere kant gaat een intense neutronen fluentie zware materialen zoals gamma schermen nogal sterk activeren. Vandaar dat de oplossing afhangt van probleem tot probleem. Men kan ook met gelaagde structuren werken, met afwisselend lichte en zware materialen.

Hoe bedenkt men een bescherming? Men maakt snel enkele eenvoudige berekeningen die meestal snel zullen aangeven welke oplossingen de het meest beloftevol zijn. Men houdt een klein aantal beloftevolle ideeën over, om veel gedetailleerder berekeningen te maken, waarin volledig stralingstransport en activeren van de materialen in rekening gebracht worden. Men dient voor belangrijke projecten de berekeningen ook te *valideren*, dat wil zeggen, de berekeningen vergelijken met “standaard” situaties die dicht bij de voorgestelde (deel-) oplossing liggen en die experimenteel zijn waargenomen.

3.6.b Bescherming tegen contaminatie

Afhankelijk van de radioactieve stoffen en hun vorm neemt deze bescherming verschillende vormen aan, maar bestaat meestal uit materiële barrières en dynamische barrières. Met dat laatste verstaan we luchtstromen die het beletten dat de radioactieve stoffen in een bepaalde, ongewenste richting gaan. Bovendien werkt men met een opeenvolging van barrières, zodat het falen van een ervan kan opgevangen worden door een andere.

Voor ingekapselde bronnen is de eerste barrière natuurlijk de inkapseling, bijvoorbeeld, een verglazing, die de stof zo goed als onopneembaar maakt door het menselijke lichaam. Zulke bronnen vertonen geen groot risico voor contaminatie, tenzij ze aan extreme fysische condities (grote hitte, ...) worden blootgesteld.

Delicater is het wanneer men wil werken met “open bronnen”, zoals poeders, vloeistoffen... die radioactieve stoffen bevatten. In dat geval dient men te werken met een opeenvolging van statische (materiële) afschermingen en dynamische systemen.

De materiële afschermingen vormen opeenvolgende afgesloten zones (die niet steeds strikt hermetisch zijn afgesloten), en men veroorzaakt een luchtdruk verschil waarbij men van lage druk bij de bron, naar steeds hogere drukken gaat in de verschillende zones om tot aan de atmosferische druk te komen in de “onbewaakte zone”. Als dusdanig wordt er een lucht flux onderhouden (tenzij de afscherming strikt lucht-dicht is) die naar de bron toegaat. Elke vorm van contaminatie die door een lek zou kunnen plaatsvinden, wordt dan tegengegaan door een luchtstroom in de omgekeerde richting. De afgezogen lucht wordt door een opeenvolging van filters gevoerd, die op continue wijze, of geregeld, geanalyseerd worden op besmetting, wat dan aangeeft dat er een probleem is opgetreden. De drukverschillen zijn niet groot: ten hoogste enkele millibar. Dat volstaat ruimschoots om een luchtstroom in de goede richting te krijgen. Met zo een systeem beheerst men normaal gezien alle vrijgemaakte radioactieve stoffen: ze komen op de filters terecht, en nergens anders. Een ander voordeel is dat men op die wijze ook het ophopen van gassen tegengaat (bijvoorbeeld waterstof die kan vrijkomen) die eventueel een veiligheidsprobleem kunnen vormen (explosie).

Bij een noodzakelijke interventie in een zone waar een contaminatie gevaar bestaat kan men hetzelfde systeem toepassen voor de persoon: een hermetisch pak wordt aangedaan, en het pak wordt vanbinnen onder een lichte overdruk gezet. Als dusdanig heeft een kleine lek in het pak geen contaminatie voor gevolg.

Men dient ook een systeem te gebruiken dat continu de kwaliteit van de lucht nagaat in de lokalen waar er personeel aanwezig is en in de omgeving van het gebouw waar de werkzaamheden plaats vinden. Men gebruikt hiervoor apparatuur die wat lucht aanzuigt en een stofdeeltjes analyse doorvoert. We gaan hier niet in op de details, maar deze techniek is niet zo eenvoudig als het lijkt. De moeilijkheid schuilt er in dat de afmeting van de stofdeeltjes (de granularometrie) bepaalt in welke mate die stofdeeltjes gemakkelijk worden opgezogen. Het staat dat dus in zo een apparaat binnenkomt, is niet altijd representatief voor het staal stofdeeltjes dat in de lucht aanwezig is. De granularometrie is heel belangrijk, want de afmetingen van de (radioactieve) stofdeeltjes bepalen in hoge mate of ze opgenomen worden door inademing en waar ze terechtkomen (worden ze terug uitgeademd, komen ze in de longen terecht...). Een ander probleem is dat een contaminatie ruimtelijk heel heterogeen kan zijn. Het kan zijn dat er ter hoogte van het apparaat slechts een heel kleine contaminatie is, terwijl twee meter verder, waar een persoon aanwezig is, de contaminatie veel hoger is. Als dusdanig vereist een zinvolle bewaking een doorgedreven studie.

De beschermingstechnieken tegen contaminatie door radioactieve stoffen zijn heel gelijklopend aan de technieken die gebruikt worden in laboratoria waar men met gevaarlijke biologische materialen (virussen, bacteriën) werkt. Radioactieve stoffen beheren is iets gemakkelijker dan virussen beheren, omdat ze gemakkelijk gedetecteerd worden met stralingsdetectoren terwijl het moeilijker is om onmiddellijk de aanwezigheid van virussen vast te stellen, en omdat zij zich kunnen voortplanten.

3.7 Ongelukken

3.7.a Algemeenheden – de INES schaal.

Een van de delicaatste punten bij het kernenergie gebeuren, zoals ervaren door de bevolking, en zoals sterk aangevallen door de anti-nucleaire activisten, is de veiligheid van die activiteit in accidentele situaties en dus niet in normale omstandigheden. In tegenstelling tot wat men soms denkt, kan een kernreactor nooit ontploffen zoals een nucleair wapen, zelfs al zou men dat willen bekomen. Het nucleaire materiaal dat aanwezig is, is immers verre van zuiver genoeg om een nucleaire explosie kunnen te leveren. *Het ergste wat potentieel kan gebeuren is dat de splijtstoffen en splijttingsproducten van de reactor in grote hoeveelheden in de omgeving terecht komen.* Dat is wat in Chernobyl is gebeurd, en is a priori het aller-ergste ongeluk dat denkbaar is met een kernreactor. Men noemt dit “het maximale ongeluk”. Hierbij hangt het er ook van af over welk gebied ze verspreid worden en in het Chernobyl geval was dat een uitzonderlijk groot gebied.

Om dat risico tegen te gaan, worden Westerse kernreactoren *in een hermetisch gesloten betonnen bunker gebouwd*, die normaal zo berekend is dat hij alle hitte- en druk-solicitaties die denkbaar zijn met wat fysisch aanwezig is in de reactor kan weerstaan. Vele Westerse kernreactoren hebben nu zelfs een dubbele bunker ; dat wil zeggen dat rond de eerste bunker nog een tweede wordt gebouwd. Had de Chernobyl reactor in zo een bunker gestaan, dan was er waarschijnlijk niet veel gebeurd aan de buitenkant, maar hij stond jammer genoeg in een gewone fabriekshal die zelfs ramen had.

Een tweede belangrijk aspect van de ultieme veiligheid van een kernreactor is wat men *de passieve veiligheid* noemt: wat er ook gebeurt, en welke domme commando's men ook geeft in de controlekamer, er moeten passieve mechanismen bestaan die de reactor stoppen als het behoorlijk fout gaat, voor er een ergere ramp ontstaat. Inderdaad, een reactor die niet meer gekoeld wordt, en energie blijft produceren, zal natuurlijk door niets kunnen worden tegengehouden. *Er moet dus een passief mechanisme bestaan (want elk actief mechanisme kan falen) dat automatisch, door een of ander natuurlijk verschijnsel, het ding stopt.* Een drukwater reactor heeft zo een ultiem mechanisme: als het water verdwijnt (omdat het verdampt is), is de moderator weg, en valt de kettingreactie stil. De grafietreactor van het Chernobyl type had zo een mechanisme dus niet...en is blijven werken... wel, vroeg of laat zou het grafiet natuurlijk gaan opbranden en ook de reactie stop zetten, maar dan is de ramp allang gebeurd natuurlijk. Er waren fantasieën die destijds verteld werden: het “China syndrome⁷⁷”, waarbij een op hol geslagen hart van een kernreactor zichzelf (vanuit de USA) een weg smelt doorheen de aarde en in China terecht komt. Een ontwerp met passieve veiligheid wil zeggen dat het onmogelijk is dat de kernreactie nog verder doorgaat, ten laatste als het hart begint te smelten. Ironie: net als de film “The China Syndrome” in 1979 in de bioscopen getoond wordt, gebeurt er het zwaarste ongeluk dat zich ooit heeft voorgedaan in een

⁷⁷http://en.wikipedia.org/wiki/China_syndrome

Westerse centrale: het Three Miles Island ongeluk, waarbij het hart van een reactor gedeeltelijk gaat smelten. Maar de ultieme veiligheidsmechanismen werken: de reactor (was reeds ge-)stopt, en de bunker laat de splijtstoffen niet vrijkomen. Er is, behalve wat licht-radioactieve stoom, niet veel vrijgekomen, en niemand heeft een dosis ontvangen boven de wettelijke opgelegde normen.

Eens het ultieme gevaar van een kernreactor, namelijk het vrijkomen in de omgeving van grote hoeveelheden splijtingsproducten die in het hart aanwezig zijn, is geweerd, wat kan er dan nog mis gaan ? Er kunnen dingen intern misgaan enerzijds, en er kunnen beperkte hoeveelheden radioactieve stoffen vrijkomen anderzijds.

Intern zijn de twee ergste dingen die kunnen gebeuren:

- het smelten van het reactor hart
- het zwaar bestralen van enkele werknemers

Extern is het ergste wat er kan gebeuren het vrijlaten van het grootste deel van het primaire koelwater dat een heel klein deel van de splijtstof en vooral van de splijtingsproducten kan bevatten als ondertussen het reactorhart is stukgegaan en dat met het water in contact is gekomen. Er kunnen ook radioactieve stoffen vrijkomen die opgeslagen zijn in de kerncentrale. Maar we hebben het hier over hoeveelheden die duizenden tot miljoenen keren kleiner zijn dan in het geval van het maximale ongeluk en die qua impact vergelijkbaar zijn met relatief kleinschalige lozingen van pollutanten zoals dat meer gebeurt in andere industriële activiteiten. Dit zijn ongelukken op een veel kleinere schaal dan het Chernobyl type ongeluk, die ten hoogste een heel beperkt aantal slachtoffers en een min of meer ernstige lokale pollutie kunnen veroorzaken, naast het volledig stukmaken van de installatie. Dit is het soort potentiële ongelukken dat vele industriële activiteiten met zich meebrengen – trouwens, vele industriële activiteiten brengen veel hogere risico's met zich mee.

We hebben reeds gezien dat de reglementering in de nucleaire industrie veel strenger is dan voor andere menselijke activiteiten. Ook wat betreft ongelukken is er een veel strikter behandeling. Er bestaat een meldingsplicht van elke zaak die misgaat in een nucleaire praktijk aan het nationaal organisme dat op de nucleaire activiteiten toeziet, en dat zelf gebonden is om die incidenten door te geven aan het IAEA, de nucleaire waakhond van de Verenigde Naties. Jammer genoeg speelt die meldingsplicht vaak tegen de kernenergie sector, want anti-nucleaire activisten noemen maar al te graag de lijsten van gemelde incidenten als indicatie dat het voortdurend fout gaat in de kernenergie, en dat er al hele vele keren bijna een ongeluk van grote schaal is gebeurd, implicerende dat we al vele keren een ongeluk dat grote kans heeft om te gebeuren, net zijn ontlopen (dat is de redenering van een herhaald aantal keren iets met grote kans om te gebeuren, dat niet gebeurt...).

Kerncentrales zijn complexe installaties en alle complexe installaties bevatten fouten. Er zijn fouten bij ontwerp, fouten bij realisatie, en onverwachte problemen die kunnen optreden na een zekere tijd. Ook de mensen die de kerncentrale besturen en onderhouden maken fouten. Dat is nu eenmaal eigen aan elke menselijke activiteit. Men kan niet alles voorzien, en men kan ook domme fouten maken. De aanpak is echter om trachten de ontwerpen zo te maken, dat de gevolgen van de fouten die op verschillende niveaus gemaakt zijn of worden, een zo klein mogelijke impact hebben. De bedoeling van het melden van de kleinste incidenten is dat men een overzicht begint te krijgen over waar en hoe fouten gemaakt zijn, en hoe men daaruit kan leren voor de volgende keer. *Als dusdanig is het melden van de kleinste gebeurtenissen belangrijk, omdat het een onderdeel vormt van de veiligheidscultuur in de kernenergie.* Zulk een “kwaliteitszorg van de veiligheid” bestaat in slechts weinig menselijke activiteitsgebieden, en het is wat pervers dat de anti-nucleaire activisten net dat systeem misbruiken om trachten aan te tonen dat het “voortdurend bijna zwaar misgaat”. Dat begon een probleem te worden, want het verbeteren van de veiligheid door het melden van

kleine incidenten werd tegengegaan door de vrees van weer (zinloos) water op de molen te scheppen van de anti-nucleaire lobby. In de meeste industriële sectoren weet men immers niet wanneer er kleine dingen fout gaan.

In 1989 heeft de IAEA een schaal voor de ernst van een gebeurtenis in een nucleaire installatie voorgesteld, de zogenaamde INES schaal. De bedoeling van deze schaal is een soort van “objectieve ernst van de gebeurtenis” weer te geven, een soort “schaal van Richter” voor wanneer het misgaat in de kernenergie sector. De kernenergie sector lijdt immers onder het feit dat relatief kleine gebeurtenissen vaak in de pers voorgesteld worden als zware incidenten (“Radioactiviteit is ontsnapt uit kerncentrale X”). Dat heeft een negatieve invloed voor twee redenen: enerzijds aarzelt de verantwoordelijke van de kerncentrale soms om kleine incidenten publiek bekend te maken uit angst voor de over-reactie van het publiek, anderzijds heeft het publiek vaak geen enkel idee wat een bepaald incident echt inhoudt. Dit werkt wederzijds wantrouwen in de hand en is nergens goed voor. *Het idee van de INES schaal is essentieel om een meer objectieve communicatie over incidenten in de nucleaire praktijken toe te laten.* Dat is trouwens ook de reden waarom de INES schaal van de anti-nucleaire activisten veel kritiek krijgt: zij kunnen nu niet meer spelen op de “angst voor het onbekende” en argumenteren dat er voortdurend erge dingen gebeuren met kerncentrales. De INES (“International Nuclear Event Scale”) schaal⁷⁸ beschrijft “gebeurtenissen” in een nucleaire praktijk in 8 verschillende niveaus, die geklasseerd zijn in 3 soorten gebeurtenissen: afwijkingen (niveau 0), incidenten (niveaus 1, 2 en 3) en ongelukken (niveaus 4, 5, 6 en 7). De anti-nucleaire activisten stellen dat de INES schaal zich beperkt tot wat er werkelijk is gebeurd, en niet tot wat er allemaal eventueel nog had kunnen fout gaan, gegeven wat er gebeurd is. Maar dat is net de kwaliteit van deze schaal: objectieve informatie, geen speculatie (die natuurlijk afhangt van wat je wil speculeren!).

De INES schaal *is gebaseerd op wat er werkelijk is misgegaan*, niet op wat de eventuele betekenis is van wat er gebeurd is qua veiligheidsperceptie en die uiteraard een totaal subjectieve appreciatie is. In feite is de INES schaal, *drie schalen door elkaar*, die elk een bepaald aspect van een gebeurtenis nagaan:

- de impact buiten de centrale
- de impact binnen de centrale
- de veiligheidsmarge die nog overblijft voor men aan niveau 4 zit (ongeluk).

Een gebeurtenis “scoort” op elk van de drie aspecten (impact buiten, impact binnen, en de overblijvende veiligheidsmarge) en de hoogste score van de drie bepaalt de uiteindelijke score van de gebeurtenis.

0. Niveau 0: *afwijking*. Elke “routinematige” afwijking die volledig binnen het normale operationele kader blijft. Voorbeelden zijn: het vaststellen van een niet werkend onderdeel tijdens een inspectie die daarvoor bedoeld is, valse alarmen van een veiligheidssysteem, kleine contaminaties in gecontroleerde zones die de gestelde grenzen niet overschrijden.
1. Niveau 1: *anomalie*. Elke uitwijking buiten de gestelde grenzen van voorgeschreven functioneren of procedures, maar zonder dat de veiligheidsmarge in gedrang komt. We hebben het over het overtreden van procedures, een zondiging tegen de “veiligheidscultuur” of het inadequaat van een voorgeschreven procedure... kleine problemen met pijpwerk. Geen impact binnen of buiten de centrale.

⁷⁸http://en.wikipedia.org/wiki/International_Nuclear_Event_Scale

2. Niveau 2: *incident*: Impact binnen de centrale: een werknemer overschrijdt de wettelijk bepaalde maximum jaardosis, een significante en onverwachte hoeveelheid radioactiviteit is aanwezig waar ze niet verwacht is en die een specifieke actie vereist. Veiligheidsmarge: de veiligheidsmarge is verkleind, maar nog niet tot nul herleid ; dat wil zeggen dat een extra veiligheidsprobleem nog kan opgevangen worden. Ook: een gebeurtenis van niveau 1, samen met een significante inbreuk op de veiligheidscultuur. Geen impact buiten de centrale.
3. Niveau 3: *ernstig incident*: Impact buiten de centrale: beperkt tot enkele tienden van een milliSievert voor de “kritische groep” - dus nog beneden de wettelijke grens voor dosis aan het publiek, met een veiligheidsmarge. Impact binnen de centrale: zware bestraling van een werknemer die tot stralingsziekte kan leiden ; het intern vrijkomen van een grote hoeveelheid radioactiviteit (10^{15} Bq) die echter nog binnen een secundaire begrenzing valt, zodat ze kan opgeborgen worden. Veiligheidsmarge is volledig opgebruikt: een individueel extra probleem kan voor een ongeluk van niveau 4 of meer zorgen.
4. Niveau 4: *ongeluk zonder significante externe gevolgen*: Impact buiten de centrale: beperkt tot enkele millisievert voor de “kritische groep” - dus lichtjes over de wettelijke grens voor dosis aan het publiek, en van de orde van de natuurlijke stralingsdosis. Impact binnen de centrale: significante schade (bijvoorbeeld gedeeltelijk smelten van de kern) ; dodelijke bestraling van een werknemer.
5. Niveau 5: *ongeluk met extern risico*: Impact buiten de centrale: vrijlating van een significante hoeveelheid radioactiviteit (10^{15} Bq) die het noodzakelijk maakt van het gedeeltelijk uitvoeren van een voorzien noodplan. Impact binnen de centrale: installatie heel zwaar beschadigd (groot deel van het hart beschadigd/gesmolten, groot deel beschadigd door ontploffing, heel grote interne contaminatie van de centrale).
6. Niveau 6: *zwaar ongeluk*: Impact buiten de centrale: vrijmaken tot 10^{16} Bq, de noodzaak om volledig de voorziene noodplannen uit te voeren.
7. Niveau 7: *maximaal ongeluk*: groot deel van de radioactiviteit van de reactor is vrijgegeven, lange-termijn effecten en gezondheidseffecten onvermijdbaar.

Er is slechts 1 niveau 7 ongeluk gebeurd en dat is natuurlijk Chernobyl. Er is ook slechts 1 niveau 6 ongeluk gekend, dat is in een Russische militaire installatie in 1957, het Mayak ongeluk⁷⁹.

Er zijn twee niveau-5 ongelukken bekend, het Windscale ongeluk (militaire reactor brand in 1957) en het Three Miles Island ongeluk (enkel door zijn intern effect: zware beschadiging van de reactor).⁸⁰

Statistieken van de Fransen tussen 1986 en 2006: 10 000 gerapporteerde gebeurtenissen in twintig jaar tijd, waarvan de meesten niveau 0. 1615 waren INES niveau 1, 59 waren INES niveau 2, en 1 gebeurtenis was INES niveau 3. We bespreken in het vervolg enkele van de belangrijkste ongelukken.

⁷⁹http://en.wikipedia.org/wiki/Mayak#Serious_accident_in_1957

⁸⁰Een redelijk volledige lijst met nucleaire incidenten van enig belang in de kernenergie sector kan men hier vinden: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_civilian_nuclear_accidents

3.7.b Chernobyl (1986)

De “referentie” inzake maximaal ongeluk is ons op een dienbordje aangeboden op 26 april 1986 door een totaal ontwricht communistisch land in zijn laatste stuiptrekkingen. Er is een groot contrast tussen wat gangbaar was betreffende de nucleaire activiteiten in de ex-Sovjet Unie en in het Westen (zoals trouwens voor vele andere activiteiten). Voorheen gingen de wildste speculaties de ronde over wat nu het ergst denkbare ongeluk met een kerncentrale kon zijn. Chernobyl⁸¹ is de experimentele verificatie van de verschillende speculaties. Het resultaat zal tegenvallen: de wereld is niet vergaan zoals in sommige doemscenario's, maar 't was toch niet schoon om zien.

De Chernobyl reactoren (er zijn er vier, het is nummer vier die voor de problemen heeft gezorgd) zijn van het RBMK⁸² type, dat is een Russische uitvinding uit de jaren '50.

De RBMK reactor is een gemengde “grafiet-water” reactor. Dat wil zeggen, het is een grafiet structuur die als “hoofdmoderator” dient, waarin staven met licht verrijkte uranium oxide pastilles zitten. Door de structuur lopen drukbuizen waarin water onder druk zit. Het water onder druk wordt *aan de kook gebracht* door de hitte van de reactor, en kan als dusdanig via een stoomcyclus elektriciteit produceren. Het is een modificatie van een militaire grafiet reactor om plutonium te produceren, waaraan men waterbuizen heeft toegevoegd om ook kokend water te maken, en dus elektriciteit te produceren.

Maar de aandachtige lezer zal zich misschien een vraag stellen, die ook de essentie van het probleem was: waarom gebruikt men *verrijkt* uranium in een grafietreactor die normaal gezien met gewoon uranium kan werken ? Antwoord: het water. We hebben gezien dat een *heel zuivere* grafietmoderator voldoende de neutronen kan vertragen zonder ze te absorberen om een structuur met natuurlijk uranium kritisch te maken. Fermi's CP1 was zo een reactor. Maar dat is “kantje boordje”. De minste extra absorptie (door bijvoorbeeld onzuiverheden in het grafiet) en de kriticitet is weg. We weten ook dat gewoon water een slechtere moderator is dan grafiet, want met gewoon water kan geen natuurlijk-uranium reactor gebouwd worden. Het is het water in de drukbuizen die relatief meer neutronen absorbeert dan het grafiet die maakt dat de “gemiddelde” moderator in een RBMK reactor minder goed is dan grafiet op zich.

En nu moet een belletje gaan rinkelen: de RBMK reactor gaat dus *meer* gaan reageren als er *minder* water aanwezig is. Als de temperatuur stijgt, gaat er meer water koken, en dus minder in de reactor aanwezig zijn, en bijgevolg gaat de reactor nog meer reageren en nog warmer worden. Dat is wat men noemt: *een reactor met een positieve temperatuurscoëfficiënt*. Het is “*passieve onveiligheid*”. Het hele ontwerp van de RBMK reactor is een gevaarlijk ontwerp, omdat de reactor, in tegenstelling tot wat de doelstelling is in een ontwerp dat passief veilig is, net harder gaat reageren als het fout gaat.

Vergelijk dit met een water reactor, waar de moderator (enkel maar) water is. Als het water gaat koken en verdwijnt, dan is de moderator weg, en de reactor stopt dan vanzelf (is niet meer kritisch).

Niet alleen in ongelukssituaties was zo een positieve temperatuurscoëfficiënt gevaarlijk, hij was het zelfs in gewone omstandigheden. Inderdaad, een RBMK reactor heeft steeds vloeibaar water onder druk nodig zolang de brandstof aanwezig is in de reactor, en die druk komt van de waterpompen in het koelcircuit. *Als dusdanig wisten de ontwerpers dat het een onveilige situatie was als de*

⁸¹http://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl_disaster

http://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl_disaster_effects

⁸²<http://en.wikipedia.org/wiki/RBMK>

waterpompen plots niet meer zouden werken. Het ironische is dat het deze wetenschap van de ontwerpers is die de aanleiding is geweest voor het ongeluk.

Tweede punt: de RBMK reactor is een “half-open structuur”, en *zit niet in een hermetisch gesloten drukvat, en zit ook niet in een (stoom)ontploffing-bestendige bunker.* Het grafiet zit wel in een hermetisch gesloten metalen omhulling in een inert gas, maar die dient enkel om het hete grafiet (normaal ongeveer 700 graden) *van de lucht te scheiden omdat het anders vuur zou vatten door de hoge temperatuur.* Die metalen omhulling is echter geen drukvat en is niet bestand tegen een significante drukverhoging. Het is bij wijze van spreken gewoon een blikken doos.

Onder de reactor zit een betonnen plaat, errond zijn betonnen muren en zand geplaatst, en bovenop ligt een betonnen deksel. Dat is de stralingsbescherming, maar *heeft geen mechanische integriteit.*

Bovenop de reactor stond een grote kraan, die het moest toelaten om tijdens het functioneren, geregeld brandstofstaven te vervangen. Dit diende hoofdzakelijk om *geregeld U-238 staven te bestralen voor militaire plutonium productie.* Deze kraan, en de drukpijpen met water, waren vastgehangen aan de betonnen plaat die bovenop de reactor lag.

De regelstaven, die boorcarbide bevatten dat neutronen sterk absorbeert, waren enkel menselijk bediend en hadden *een punt uit grafiet.* Bovendien konden ze maar *heel traag bewegen* (het duurde twintig seconden om ze van helemaal uit, naar helemaal in te brengen). *Er was dus geen actief automatisch veiligheidssysteem dat de reactor stopt als sommige parameters te ver uit de schaal gaan.* De punt uit grafiet was ook een element dat heeft bijgedragen tot het ongeluk. We zullen zien dat de operatoren de staven veel te ver hadden uitgetrokken op een zeker ogenblik. De grafietpunt zat dus niet in de reactor. Toen men de reactor wilde stoppen, heeft men de staven in de reactor willen laten brengen. Maar dat ging traag, en het eerste wat er gebeurde was dat de grafieten punten (en niet de neutronen-absorberende boorstaven) de reactor ingingen, wat de moderator nog wat verbeterde en dus de reactiviteit gedurende enkele seconden verhoogde.

Een verder probleem was dat de baas van de Chernobyl reactor geen nucleair ingenieur was, maar een thermodynamisch ingenieur die goed steenkoolcentrales kende en dat de ploeg die de reactor bestuurde, enkel ervaring had met een steenkoolcentrale. Er was dus een serieus gebrek aan kennis over het functioneren van een kernreactor in de ploeg en het management.

De laatste ingrediënt van onze explosieve cocktail is een fenomeen dat in alle reactoren optreedt, *de zogenaamde xenon-vergiftiging.* Tijdens het werken van een reactor gebeuren er fissiereacties en ontstaan er fissieproducten. Een van die fissieproducten is jodium-135, een radioactief product dat vervalt naar Xe-135 met een halfwaardetijd van 6 en een half uur (via bèta verval). Nu is Xe-135 een ongelooflijk efficiënte neutron absorbeerder, wat wil zeggen dat hij de kettingreactie serieus tegengaat. Tijdens die absorptie $Xe-135(n,\gamma)Xe-136$ wordt het Xe-135 ook veranderd in Xe-136. Als dusdanig is er enerzijds Xe-135 productie door I-135 verval (zelf een splijtproduct en geproduceerd in verhouding met het reactor vermogen), anderzijds is er Xe-135 verbruik door de neutronenflux van de reactor. Als de reactor aan constant regime werkt, is er na enige tijd evenveel productie van Xe-135 als er opgebruikt wordt, en is het niveau van Xe-135 stabiel (en evenredig met het vermogen). Als men het vermogen van een reactor wil laten stijgen, dan gebeurt het volgende. De neutronenflux neemt toe, en gaat meer Xe-135 verbruiken. Er wordt voorlopig niet veel meer Xe-135 geproduceerd, want het Xe-135 wordt essentieel geproduceerd *door het verval van het I-135 van enkele uren geleden* dat aan een lagere concentratie zat (wegens lager vermogen). Met andere woorden, als het vermogen van de reactor toeneemt, wordt er meer Xe-135 verbruikt dan er geproduceerd wordt, en bijgevolg neemt de concentratie aan Xe-135 eerst af. Er worden hierdoor minder neutronen geabsorbeerd, en dus gaat de reactor nog harder zijn vermogen laten toenemen. Omgekeerd, als men een reactor laat verminderen in vermogen, dan gaat men minder

Xe-135 opgebruiken terwijl er nog altijd evenveel geproduceerd wordt (verval van enkele uren geleden). Het niveau aan Xe-135 gaat stijgen, en de reactor gaat nog harder willen verminderen in vermogen. Als dusdanig zorgt Xe-135 voor een (relatief kleine) instabiliteit over de tijdschaal van enkele uren als men snel het vermogen verandert. Een probleem stelt zich wanneer men van langdurig vol vermogen snel naar heel laag vermogen gaat. Op dat ogenblik is er zo goed als geen Xe-135 verbruik meer, maar nog steeds een hoge productie, en de aanwezigheid van Xe-135 stijgt dramatisch tijdens de uren die volgen. De reactor wordt dan meestal onstabiel (naar beneden toe) en valt stil. Het is meestal zo dat een reactor die een tijd aan volle vermogen heeft gedraaid, en snel stilgezet wordt voor meer dan een uur, gedurende een dag of zo niet meer kan her-opstarten omdat er teveel Xe-135 aanwezig is, die teveel neutronen absorberen. Men spreekt van een “dode tijd door Xe-135 vergiftiging” van de reactor. Dit op het eerste gezicht technische detail, samen met een ongelooflijke roekeloosheid van de reactor bestuurders zal een cruciaal element zijn in de aanzet tot het ongeluk.

Nu we alle ingrediënten hebben: een gevaarlijke reactor, geen beschermende bunker, incompetente stuurder en de afwezigheid van elke vorm van actief veiligheidssysteem, komen we met de kers op de taart: *ze gaan een experimentje doen.*

Zoals reeds eerder vermeld, heeft de RBMK reactor, als een van zijn vele onveilige eigenschappen, de eigenschap dat hij absoluut steeds water onder druk moet krijgen van de (elektrische) waterpompen in het koelcircuit. Dat stelt een probleem als er een elektriciteitspanne is. Normaal gezien stopt men dan de reactor, maar de pompen moeten blijven werken. Om dat te bewerkstelligen, zijn er twee dieselgeneratoren aanwezig op de site, maar die hebben 40 seconden nodig om op te starten. Als men op het ogenblik van de panne, de reactor stil legt en de diesels start, dan heeft men het probleem dat de pompen gedurende 40 seconden zonder stroom zitten, wat bij een RBMK reactor gevaarlijk is. Het idee was van de turbine-generator van de reactor (die tot aan de stop van de reactor aan het draaien is aan verminderd vermogen) laten “door te bollen” en met de elektriciteit die die generator bij het doorbollen nog levert, proberen de pompen nog 40 seconden te laten werken. Men had dat al geprobeerd op een andere RBMK reactor, en dat was toen niet goed gelukt (!) . Een verandering aan het ontwerp van de turbine-generator zou de zaak moeten verbeterd hebben, en men wilde het nog eens proberen. Denk U de “bricolage” in...

Normaal gezien moest reactor vier op 25 april 1986 stilgelegd worden voor een onderhoudsbeurt en men wilde van dat stilleggen gebruik maken om de test door te voeren. Voor “veiligheidsredenen” wilde men die test bij lager vermogen doen ; het idee zijnde dat als je gaat klooiën met een aspect van de veiligheid van de reactor (ze gingen met de pompen spelen!), je dat beter bij laag vermogen doet. Dat op zich toont aan dat zij die het experiment planden niet veel wisten van de werkingsprincipes van een kerncentrale, want laag vermogen wil niet noodzakelijk zeggen, beter controleerbaar.

Maar goed. Tijdens de dag van 25 april verminderde men het vermogen van de reactor, om aan het experiment te beginnen. Maar een onverwachte oproep vanuit Kiev droeg de centrale op van meer elektriciteit te produceren, om een onverwacht stilgevallen regionale centrale te compenseren. De verantwoordelijke van de centrale besliste dan van de test te laten uitvoeren door de nachtploeg. Rond 11 uur 's avonds liet Kiev weten dat ze de reactor konden stoppen als ze dat wilden. De nachtploeg verminderde vrij brusk het vermogen van de reactor, en de Xe-135 vergiftiging zette in: in plaats van nog 1 GWth te leveren (i.p.v. de 3.2 GWth van vol vermogen) om de test kunnen te doen, viel de reactor terug op 30 MW. De nachtploeg had schrik dat hij helemaal ging stilvallen. Ze trokken de regelstaven uit tot wat maximaal toegelaten was, en omdat de reactor nog steeds niet “van de grond” kwam, hebben ze een aantal veiligheidssystemen uitgeschakeld die het verboden om

de regelstaven verder uit te trekken. De staven werden dus verder uit de reactor getrokken dan normaal mogelijk is. Het vermogen steeg tot een magere 200 MWth. De test was voorzien aan 1GWth, maar goed, men ging hem dan maar doen met het vermogen dat beschikbaar was. Maar de reactor was op dit ogenblik al in een gevaarlijk onstabiele toestand, met de staven zo ver eruit. De enige reden waarom hij niet op hol sloeg, was dat er nog teveel Xe-135 vergiftiging aanwezig was, maar die begon stilaan te verminderen. Het verbinden van de turbine-generator aan twee extra pompen maakte aanvankelijk dat er meer water onder druk in de reactor gepompt werd en dat het waterniveau boven het toegelaten niveau ging. Dat extra water absorbeerde nog meer neutronen, en het vermogen ging achteruit, zodat de operatoren beslisten om een aantal hand-bestuurde staven helemaal uit de reactor te trekken. Een alarmsysteem dat aangaf dat er teveel water in de reactor was ging af. Normaal gezien diende bij dat alarm de reactor gestopt te worden door de staven terug in de reactor te brengen, maar dat gebeurde niet automatisch, het was aan de operatoren om dat commando te geven. Het alarm werd door de ploeg bestuurders genegeerd. Het kwam bij de ploeg niet op dat ze de reactor, door het uittrekken van al die staven, in een potentieel heel gevaarlijke toestand hadden gebracht: de regelstaven waren vervangen door Xe-135 en water. Men had de veer heel hard opgespannen zonder zich daar bewust van te zijn. Door het ontbreken van enige vorm van passieve veiligheid was het potentieel piekvermogen van de reactor nu zo goed als onbegrensd.

Men begon de test in de vroege morgen om 1 uur, 23 minuten en 4 seconden: men sneed de stoom naar de turbine-generator (die de pompen nu aandreef) af. Dat maakte enerzijds dat men het water van de reactor minder koelde, en anderzijds dat de pompen minder en minder hard werkten. De reactor begon dus warmer te worden, water harder te koken, en door de positieve temperatuurscoëfficiënt van de RBMK reactor, begon het vermogen flink toe te nemen. De Xe-135 vergiftiging werd hierdoor sneller verbruikt, en alle staven waren uit de reactor getrokken. Ongeveer 40 seconden later (einde van de test), wilde men alle staven terug in de reactor stoppen – het is niet duidelijk of dat gewoon de 'routine' stop was, of de nachtploeg zich begon bewust te worden dat er iets mis ging. Maar die staven gaan er traag in, en het eerste deel van de staven is eigenlijk een stukje moderator (grafiet). Het was de “druppel die de emmer deed overlopen”: de reactor werkte op laag vermogen, maar met een gigantische positieve temperatuurscoëfficiënt en een toenemende reactiviteit, die het vermogen heel snel heel hard liet toenemen en de temperatuur heel snel liet stijgen. De toenemende hitte beschadigde de geleiding van de regelstaven, die geblokkeerd raakten.

7 seconden later was de reactor tot een vermogen gekomen van 30 GWth, 10 keer meer dan zijn normaal maximum vermogen. Men heeft geschat dat er nadien pieken zijn opgetreden tot enkele honderden keren het maximale vermogen. De temperatuur steeg daardoor heel snel, en de druk van de stoom in de drukpijpen ook. De pijpen die daar niet op voorzien waren, braken stuk, de stoom onder druk kwam explosief vrij en het betonnen deksel van de reactor waaraan alle instrumentatie en controlestaven waren bevestigd werd in de lucht geblazen (evenals het dak van het gebouw). Het is trouwens ook mogelijk dat het water, onder invloed van de hoge stralingspuls, waterstof had vrijgemaakt, dat is niet heel duidelijk. Die eerste ontploffing⁸³ had twee gevolgen: zuurstof kon nu aan het hele hete grafiet, dat onmiddellijk vuur vatte, en het betonnen deksel viel scheef terug neer

⁸³Het is interessant op te merken dat deze explosie hoewel lokaal natuurlijk spectaculair, een vrij zwakke explosie was die niets te maken heeft met de explosie van een nucleair wapen. Natuurlijk is het in zekere zin wel een “kernexplosie” in de zin dat de warmte voor de explosie door kernreacties is geleverd, maar het is via stoomdruk dat de ontploffing zich heeft voorgedaan: men had hetzelfde effect bekomen had men met een steenkoolvuur de stoom opgewarmd. Er zijn ten hoogste temperaturen van een paar duizend graden bereikt, en helemaal niet de miljoenen graden die typisch zijn voor een nucleair wapen. De zwakte van de ontploffing is aangetoond door het feit dat een deel van het reactor gebouw zelfs nog intact was. Een kernreactor kan nooit een explosie ondergaan zoals een nucleair wapen, want de materialen en configuraties die hiervoor nodig zijn, zijn gewoon niet voor handen.

op de reactor zodat die zwaar beschadigd werd. Bovendien stopte de stukke reactor zijn activiteit niet, gezien er geen passief veiligheidsmechanisme was. Men zat dus met een grote hoop verbrijzeld heet grafiet (~steenkool) dat aan het branden was, en dat vol verrijkte splijtstof zat, in een verhouding die maakte dat het geheel kritisch bleef en enorm veel hitte bleef produceren midden in de brand. Een enorme hete rookwolk vol splijtstof, roet en fissieproducten steeg op uit het stukke gebouw, hoog de atmosfeer in. Het omhooggevlogen en teruggevallen betonnen deksel had natuurlijk alle instrumentatie van de reactor volledig vernietigd, en er waren natuurlijk geen controlestaven of zelfs maar instrumenten die nog functioneerden.

De operatoren hadden niet onmiddellijk door dat er iets heel ergs gebeurd was, of dat de reactor beschadigd was, ondanks het feit dat de stukken brandend grafiet hen bijna om de oren vlogen. Ze probeerden water in de reactor te pompen. De controleploeg had geen dosimeters die het stralingsdosis debiet in het reactorgebouw kon meten: de enige dosimeters die ze hadden, gaven aan dat het stralingsniveau hoger lag dan 0.001 Rontgen/seconde (de Rontgen is een oude dosimetrische eenheid, die ongeveer overeenkomt met 10mGy). 3 uur later hadden ze de beschikking over een andere dosimeter, die aangaf dat het dosis debiet rond de 20 000 Rontgen per uur was (200 Gy/uur !!), en de ploeg besloot dat die dosimeter stuk was. Ondertussen hadden ze de brandweer opgebeld, die probeerde de brand te blussen, alsof het een banaal vuur was.

Het is pas de *volgende* nacht, de nacht van 26 op 27 april, dat een onderzoekscommissie moest toegeven dat de reactor stuk was, dat er veel radioactieve stoffen aan het vrijkomen waren (reeds gedurende 24 uur!) en dat het noodzakelijk was om de nabije stad te evacueren. Dat werd uiteindelijk gedaan op 27 april om 14 uur (anderhalve dag later!). In diezelfde periode hebben helicopters ook veel zand en vooral boor op de reactor gegooid, om de nucleaire reactie te stoppen (!!).

In de maanden en jaren die volgden, hebben de Sovjet autoriteiten verschillende honderd-duizenden arbeiders (mijnwerkers en zo) laten overkomen naar Chernobyl om de boel wat op te ruimen, en vooral, om een soort “sarcofaag” te bouwen rond de smeulende reactor. Men noemt ze “liquidatoren”. Ze hebben in gevaarlijke omstandigheden, zonder adequate bescherming, gewerkt.

Volgens rapporten van de IAEA (de “nucleaire politiemann” van de UNO) en de Wereld gezondheidsorganisatie zullen er naar schatting 9000 mensen hun leven verliezen als een gevolg van het ongeluk. Een 60-tal mensen is gestorven aan directe stralingsziekte binnen de dagen, weken en maanden die op het ongeluk gevolgd zijn: alle leden van de nachtploeg, de brandweerman die de brand hebben willen blussen, de helieterpiloten die het zand en boor hebben gedumpt... Dit kunnen er meer zijn, maar door de geheimhouding van de tijd, en de druk van de Sovjet autoriteiten om het ongeluk te minimaliseren zullen we dat nooit weten. Het zijn de mensen die zich, bewust of onbewust, aan hele hoge stralingsdosisen hebben blootgesteld in de onmiddellijke omgeving van de nog werkende reactor tijdens de eerste werkzaamheden. In totaal hebben een klein 300-tal mensen stralingsziekte opgelopen. De IAEA schat dat, onder de hypothese van het lineaire model, ongeveer 4000 mensen op de 600 000 liquidatoren en omwonenden zullen omkomen ten gevolge van de opgelopen dosissen door stochastische effecten op lange termijn ; dat komt grotendeels door de veel te late evacuering van de omgevende woongebieden. Dit getal is gebaseerd op metingen en schattingen van de interne contaminatie, die voor de omwonenden binnen de 30 km rond de centrale ging van 700 mSv tot 5 mSv, afhankelijk van hoelang ze bleven, waar ze waren, en of het kinderen waren of volwassenen (verschillend biologisch model). Men schat dat van het legertje liquidatoren, een 200 000 relatief zwaar blootgesteld zijn met een gemiddelde dosis van 165 mSv, ontvangen aan interne contaminatie. Schattingen van de interne contaminatie (soms door metingen, meestal door een schatting van de blootstelling uitgaande van de bodemcontaminatie die achteraf is gemeten)

samen met de risicofactor van 5.6% kans om een dodelijke kanker te ontwikkelen gedurende zijn leven per ontvangen Sievert, leveren het geciteerde getal op van 4000 dodelijke kankers in de onmiddellijk getroffen gebieden (de omwonenden, en de liquidatoren), door hen die dus relatief hoge dosissen hebben ontvangen. Als men gaat kijken op grotere schaal, naar de gebieden verder afgelegen die een deel van de uitval op hun grondgebied hebben gekregen, schat men dat dit in totaal aanleiding heeft gegeven tot een kleine verhoging van de natuurlijke dosis, en gebruik makende van de hypothese van lineair verband tussen dosis en effect, schat men dat dit voor ongeveer 5000 extra dodelijke kankers over de jaren zal zorgen in het hele gebied dat door de wolk is bereikt, wat het totale aantal doden, over het grote gebied van de wolk, gedurende de 50 jaar die komen of zo, op 9000 brengt.

Het is natuurlijk zo dat van de 4000 geschatte overlijdens van de “direct blootgestelden” (de omwonenden, en de liquidatoren), de relatief hoge dosissen die ontvangen zijn grotendeels de schuld zijn van Sovjet beslissingen om de mensen pas 36 uur na het ongeluk te evacueren, en om onbeschermde werkers naar het slagveld te sturen, maar een mensenleven was niet veel waard in de voormalige Sovjet unie. We zijn lichtjaren ver van de ALARA aanpak!

Natuurlijk zijn deze schattingen ruw omdat men niet steeds over precieze gegevens beschikte (echte metingen van interne contaminatie in plaats van schattingen) en omdat men niet kan voortgaan op verschillende gegevens van de voormalige Sovjet Unie omdat die vaak fout zijn, gezien die het ongeluk wilden minimaliseren. Niettemin is deze schatting het beste cijfer dat men, steunende op al wat men weet over stralingsbescherming, naar voren kan schuiven. Het is gesteund op de lineariteitshypothese voor kleine dosissen, en de interne contaminatie modellen die men heeft uitgewerkt, samen met schattingen van de blootstelling en soms ook metingen.

En natuurlijk vallen deze cijfers dik tegen voor anti-nucleaire activisten die liever hadden gezien dat miljoenen mensen straaldood zouden gevallen zijn, in overeenstemming met de doemscenario's die ze over kernenergie ongelukken hadden verdedigd. Ze hebben het dan ook niet nagelaten om deze cijfers van de IAEA en de WHO van de verenigde naties in twijfel te trekken, omdat die deel zouden uitmaken van de nucleaire lobby. De Duitse Groenen hebben een rapport besteld door twee geneesheren, het TORCH rapport, Greenpeace heeft zijn eigen rapport uitgebracht, en een vereniging van geneesheren tegen kernoorlog heeft ook een rapport uitgebracht. In deze rapporten wordt van enkele honderdduizenden slachtoffers gesproken, gebaseerd op “epidemiologische studies”, die jammer genoeg geen vergelijkingspunten hadden. Verschillende ziekten die normaal niets te maken hebben met blootstelling aan lage dosissen (zoals hart- en vaat ziekten, stoornissen in de spijsvertering en zo) werden aangegeven als gevolg van het ongeluk. Om tot aan die cijfers te komen moet men dus alle wetenschappelijke kennis die men opgedaan heeft over de effecten van ioniserende straling aan de kant zetten.

Er is natuurlijk ook een ander gevolg van Chernobyl, in sommige opzichten veel erger dan de kleine 10 000 vermoedelijke slachtoffers, en dat is de besmette gebieden. Rond de reactor is er een 30 kilometer zone (ongeveer 3 000 vierkante kilometer) “verboden zone” waar normaal gezien geen mensen toegelaten zijn, tenzij wetenschappelijk personeel en werknemers van de kerncentrale (die nog steeds werkt!! Er staan nog 3 andere intacte reactoren...), en wat vroegere inwoners die beslist hebben om hun leven toch maar verder te zetten in dit besmette gebied – ondanks dat dat officieel verboden is heeft men die kluzenaars toch maar toegelaten. Het is een de-facto natuurgebied geworden door afwezigheid van menselijke activiteiten. Er zijn trouwens vogelsoorten, plantensoorten en andere diersoorten teruggekomen die uit de streek verdwenen waren en de biodiversiteit is sterk toegenomen: bevers, wolven, arenden zijn terug aanwezig in de streek. Men dient te beseffen dat hoewel de besmetting onaanvaardbaar geacht is voor permanent menselijk

verblijf, dit geen probleem stelt voor de natuur. Recente rapporten⁸⁴ tonen trouwens aan dat het hier om een heel “gezond” natuurgebied gaat. Het heeft niet veel belang, in een ecosysteem, of het risico op kanker in een vogel met een paar procenten is toegenomen.

Maar de besmetting stopt niet aan de grenzen van de verboden zone. Hoewel in de eerste ogenblikken na het ongeluk, de grootste factor van besmetting door het splijtingsproduct I-131 was, heeft dat een halfwaardetijd van 8 dagen, en is nu dus verdwenen. De probleemkinderen zijn nu Sr-90 en Cs-137, de lang levende splijtingsproducten met een halfwaardetijd van 30 jaar: ongeveer 28 000 vierkante kilometer (ongeveer België) is besmet met een bodem contaminatie van meer dan 185 kBq/m²; 830 000 mensen leefden in dit gebied. Ongeveer 10 500 km² hiervan (een derde) heeft meer dan 555 kBq/m² en 250 000 mensen leefden in dit gebied. Cesium is niet mobiel in de grond (het bindt aan klei), maar wordt wel opgenomen door planten en paddestoelen. Als dusdanig is de cesium contaminatie gebonden aan het grondgebied. Dat heeft een voordeel en een nadeel. Het voordeel is dat grondwater niet besmet zal raken, maar het nadeel is dat de contaminatie niet zal verdund worden: men moet dus wachten tot het radioactief verval: een factor 10 in honderd jaar, wat dus wil zeggen dat men daar voor 200 jaar (7 halfwaardetijden, of dus een vermindering door radioactief verval van 100 van de besmetting) “zoet” is. Daarentegen, waterlopen (er vloeit een belangrijke rivier net naast de reactor) hebben slechts heel weinig besmetting opgelopen, zoals metingen hebben vastgesteld.

Een verwant probleem is de reactor zelf. Die zit nu opgeborgen in een slecht-gebouwde betonnen doos met gaten erin, de sarcofaag, die heel snel is gebouwd om de ergste gevolgen in te dijken. Maar het is duidelijk dat er nog een grote hoeveelheid hoog-radioactief materiaal in zit, en een ineensstorten van het ding zou een tweede “mini-Chernobyl” kunnen veroorzaken. Erger, men heeft vastgesteld dat er in 1990 opnieuw splijtingsreacties opstartten (de afwezigheid van passieve veiligheid in een grafiet reactor) en heeft dus snel veel boor in de sarcofaag gedumpt. Men zal daar vroeg of laat een meer definitieve oplossing voor moeten vinden, in het beste geval het weghalen van het hoogradioactieve spul (bijvoorbeeld met robotica), om het op te bergen als hoog-radioactief afval.

Wat heeft men uit Chernobyl geleerd? Eigenaardig genoeg, niet veel. Qua reactor ontwerp en reactor veiligheid heeft men niks geleerd, want men wist dat de RBMK reactor een intrinsiek gevaarlijke reactor was. Niet door subtiele detailfouten, maar door elementaire en grove fouten: positieve temperatuurscoëfficiënt en afwezigheid van een passief veiligheidsmechanisme. *Men wist dat dit ongeluk kon gebeuren en er waren geen voorzieningen om daar iets aan te doen.* Zelfs de ontwerpers wisten het, maar in de voormalige Sovjet Unie had men daar niks om te malen. Qua veiligheidssystemen heeft men ook niks geleerd, gezien er geen echte veiligheidssystemen waren. Qua containment ook niet, gezien er geen was. Qua personeelsopleiding ook niet: de nachtploeg was duidelijk incompetent en roekeloos.

Qua procedures en noodplannen heeft men ook niks geleerd: er waren geen noodplannen. Het enige wat men misschien geleerd heeft is dat men geen onbeschermd brandweelrui een reactor moet laten blussen en dat men geen legertje onbeschermd mensen de boel moet laten opruimen. Ook dat men geen 36 uur moet staan staren naar een radioactieve roetwolk, alvorens te beslissen van de omwonenden te evacueren. Dat zou 4000 mensenlevens gespaard hebben. Maar goed, dat zou niemand in de gedachten gekomen zijn in het Westen.

84 <http://jan.ucc.nau.edu/~dmo2/Chesser%20Baker%2006%20Chernobyl.pdf>

Qua onderzoek naar stralingseffecten (zoals bijvoorbeeld de Hiroshima bom) zal men waarschijnlijk ook niet veel leren. Dat is heel jammer, maar dat komt voornamelijk omdat er in de voormalige Sovjet unie geen goede opvolging is geweest van de besmette personen (zoals bijvoorbeeld het nauwkeurig meten van de opgelopen contaminatie). Behalve voor de “onmiddellijke slachtoffers” (en in tegenstelling tot de alarmerende rapporten van anti-nucleaire activisten) zullen er waarschijnlijk niet veel epidemiologische betrouwbare gegevens zijn die statistisch significante effecten hebben, op een na: thyroïde kanker bij hoog-besmette kinderen, en misschien leukemie na 20 of 30 jaar.

Het enige wat men echt uit Chernobyl leert, is dat er drie facetten aan zijn:

- qua ramp (slachtoffers) is het in de “middelmoet” van andere grote rampen die de mensheid geregeld tegenkomt: dat is “het goede nieuws”: het maximale nucleaire ongeluk is niet van een andere grootte orde dan andere rampen die soms gebeuren, in tegenstelling tot sommige doemdag scenario's die hierover verteld worden.
- Qua besmet gebied is er een vrij groot gebied dat voor een paar honderd jaar zal moeten uitgeroepen worden tot natuurgebied. Dat is het “slechte” nieuws: een relatief belangrijke regionale economische impact.
- De oorzaken van het ongeluk zijn te vinden in de totale afwezigheid van de minste vorm van veiligheidscultuur.

Het interessante aan het Chernobyl ongeluk is dat we een concreet voorbeeld hebben van het “maximale ongeluk”, waar alles misgaat, in zijn ergste vorm. Als dusdanig dient het als bovengrens voor de meest pessimistische voorspellingen, en zijn we niet meer aangewezen op fantasieën en doem scenario's.

3.7.c Het Three Miles Island ongeluk⁸⁵ (1979)

Een druk-water reactor bestaat uit het reactor drukvat, waarin de eigenlijke reactor zit, en die vol water (primaire water) onder druk zit. Dat reactor drukvat is verbonden aan de zogenaamde “drukgenerator” erboven, die een reserve primaire water onder druk bevat en die de druk bepaalt in het reactor drukvat door een water/stoom mengsel aan een zekere temperatuur te houden. Men kan een veel uitgebreider beschrijving van een drukwater reactor vinden in hoofdstuk 5. Die drukgenerator is via pompen en kleppen verbonden aan een reservoir dat primaire water onder gewone druk bevat: de uitwisseling met dit vat zal de hoeveelheid water in het primaire circuit bepalen. Het primaire water wordt in een kringloop onder druk van het reactor druk vat in de zogenaamde stoomgenerator gepompt en terug. De stoomgenerator is de warmtewisselaar met het secundaire circuit, waar stoom gevormd wordt in een tweede kringloop, die de turbines laat werken om elektriciteit te produceren en die door de koeltorens gekoeld wordt door een derde circuit, het koelwater circuit.

Op 28 maart 1979, om 4 uur in de morgen, hebben de waterpompen in de secundaire waterkringloop (dat is de kringloop die vloeit tussen de stoomgeneratoren in de reactor, en de turbines buiten de reactor) van reactor nummer 2 een storing gekend die ervoor zorgden dat de stoomgeneratoren geen koelwater meer kregen (eerste storing). Men heeft nooit met precisie kunnen vaststellen wat daar de precieze oorzaak van was, hoewel er een aantal hypothesen zijn

⁸⁵http://en.wikipedia.org/wiki/Three_Mile_Island_accident

(zoals een lek in een pneumatisch controlesysteem). Een automatisch veiligheidssysteem heeft op dat ogenblik de reactor stilgelegd, en de turbines uitgeschakeld. Maar zelfs een uitgeschakelde reactor produceert gedurende nog een tijdje extra warmte (door het radioactieve verval van de splijtingsproducten). De temperatuur en dus ook de druk in het primaire circuit ging dus stijgen. De drukgenerator probeerde dat te compenseren door meer water op te nemen, en het waterniveau steeg dus in de drukgenerator. Om dat tegen te gaan, gaf de hoofdoperator de instructie om een klep te openen om wat "water af te laten", dat wil zeggen, het verwijderden water vanuit de stoomgenerator, in het reservoir dat daar normaal voor voorzien is. Normaal gezien moest die klep vanzelf terug sluiten, maar er was geen instrumentaanwijzing die dat aangaf, en in werkelijkheid bleef de klep open (tweede storing), terwijl de ploeg in de controlekamer aannam dat die gesloten was. Door die open klep ontsnapte langzaam maar zeker een grote hoeveelheid primair koelwater vanuit de drukgenerator terug in het reservoir.

De reactor had een noodkoelsysteem, met een tweede onafhankelijk secundair koelingscircuit. De operatoren startten dat systeem op. Jammer genoeg was dat circuit 42 uur tevoren getest, en de testprocedure voorzag dat de afsluitkleppen van dat circuit getest werden. Na de test heeft de persoon die de test heeft uitgevoerd, vergeten om die kleppen weer open te zetten (derde probleem). Het kostte de reactor operatoren 8 minuten om dat te beseffen, en ze hebben dan die kleppen zelf maar open gezet. Tot hier niks ergs, maar de paniek en verwarring in de ploeg begon te stijgen. Ondertussen was het primaire circuit, waar de druk serieus was gedaald door de open klep, aan het koken geraakt, en stoombellen vormden. Door het openen van het secundaire nood koelingscircuit was de koeling van het primaire koelwater in gang gezet, maar door de vorming van stoombellen in het primaire circuit (door de te lage druk) koelde dat water minder goed af dan normaal het geval moest zijn. Die stoombellen drukten ook meer water van de reactor in de drukgenerator (een beetje zoals water omhoog gedrukt wordt in een koffiezetapparaat). De operatoren, die geen idee hadden van de open klep en van het echte waterniveau in de reactor (dat aan het dalen was), dachten dat er op een of andere wijze teveel water in de reactor was toen ze naar het niveau in de drukgenerator keken.

De verlaagde druk in het reactorvat had een automatisch noodbijvulstelsel opgestart dat boor-rijk water in het reactorvat pompte. Maar de operatoren die verkeerdelijk dachten (door het hoge water niveau in de drukgenerator) dat er teveel water in de reactor was, stopten dit systeem.

Door het voortdurend lozen van het primair koelwater in het reservoir, liep dat reservoir uiteindelijk over, rond 4 uur en 11 minuten. Het overlopende water liep in de opvangbak beneden in het reactor gebouw, en dat gaf een alarm aan. De langzaam stijgende temperatuur en druk in het reactor gebouw en het overloop alarm hadden de bestuurders moeten laten beseffen dat het water uit het reactorvat aan het lopen was, maar dat werd niet beseft, omdat men zich concentreerde op de hoge waterstand in de drukgenerator. Ook de meting van temperatuur en druk van het primaire water had de operatoren moeten laten beseffen dat het primaire water aan het koken was, maar dat hadden ze niet door.

De verlaagde druk, en het verminderde koelwater zorgden voor een onvoldoende koeling van de gestopte reactor, waarvan de temperatuur langzaam toenam. Na ongeveer 80 minuten ging de primaire koelwaterpomp cavitatie vormen (dat wil zeggen, dat in de pomp stoom gevormd werd). De vibraties die waargenomen werden, lieten de operatoren beslissen om deze pompen dan maar uit te schakelen, uit angst dat dit een lek kon veroorzaken (niet beseffende dat ze er al een veel grotere hadden veroorzaakt).

Het waterniveau daalde zo erg, dat het bovenste deel van de reactor zonder koelwater zat. De zirkonium buizen die de splijtingsbrandstof bevatten, werden zo heet, dat ze lekken gingen

vertonen, en wat radioactief materiaal kwam zo terecht in het primaire water (waarvan het niveau aan het dalen was). Ondertussen was men begonnen met het water, dat beneden in het reactor gebouw aan het verzamelen was, naar buiten te pompen.

Om 6 uur 's morgens was er een ploegwissel. De nieuwe ploeg beseftte vrij snel dat koelwater door de eerste klep aan het ontsnappen was, en sloot de reserve klep. Ondertussen was er heel veel primair water ontsnapt uit het primaire circuit en in het reactor gebouw, en was er een contaminatie opgetreden van dat koelwater. Het weggepompte koelwater gaf uiteindelijk een stralingsalarm af en om 7 uur 's morgens werd alarm geblazen. Rond de middag begon men de reactor terug met nieuw water te vullen, en rond 8 uur 's avonds kon men de primaire pompen terug in werking stellen. De temperatuur van de reactor begon te dalen, maar ondertussen was de bovenste helft van het hart (de buizen en de brandstof) gesmolten. Bij het terug vullen met water zijn er enkele waterstof explosies geweest, maar die hebben weinig gevolgen gehad. Tijdens de week die volgde heeft men gewoon beslist om de gassen die vrijgekomen waren in de atmosfeer te lozen. Daar is discussie over geweest. Als dusdanig zijn ongeveer $480 \cdot 10^{15}$ Becquerel radioactieve edelgassen vrijgekomen – wat gelukkig heel weinig impact heeft op de gezondheid. Er is ook veel licht-radioactieve stoom vrijgelaten. Er is consensus dat de opgelopen dosis door de omwonenden tussen 0 en 1 extra kanker geval zullen leiden over de 50 volgende jaren.

Laten we dit ongeluk trachten te begrijpen. Men is er niet in geslaagd (of beter, dat men alle stomiteiten gedaan heeft om te vermijden!) een *gestopte* reactor van zijn residuele warmte te ontdoen, waardoor de temperatuur langzaam is gaan stijgen, en waardoor uiteindelijk een deel van het reactor hart is gaan smelten. *Het reactor vat zelf is nooit stuk gegaan, en het reactor gebouw (de bunker) is ook nooit in enige vorm van gevaar gebracht. De enige vrijlating van radioactieve stoffen is vrijwillig gebeurd.* Daarentegen, de ploeg in de controlekamer heeft zware fouten gemaakt, mede door het afwezig zijn van voldoende en juiste instrumentele informatie. Om een of andere wijze dachten ze dat er teveel water in de reactor was, terwijl er te weinig water, en een te lage druk was. Ze hebben dat afgeleid van een enkel instrument: het waterniveau in het drukvat. De indicaties die nadien volgden, duiden aan dat die hypothese fout was, maar de operatoren waren psychologisch geblokkeerd en hielden vast aan hun eerste werkhypothese. De opbouw van het incident heeft vele uren geduurd, en men had op elk ogenblik het probleem kunnen vermijden, maar men heeft systematisch de verkeerde beslissingen genomen.

Het Three Miles Island ongeluk heeft ervoor gezorgd dat *men de hele instrumentatie, en de voorgeschreven procedures is gaan herzien in drukwater reactoren.* Men heeft nu veel meer, en redundante instrumentatie, en men heeft procedures uitgewerkt voor elk denkbaar incident: de operatoren moeten niet meer trachten een strategie te bedenken als het fout gaat, maar hebben voor elk denkbaar incident, voorgeschreven procedures. Als dusdanig heeft het Three Miles Island ongeluk ervoor gezorgd dat vele andere centrales meer beveiligd zijn tegen “verkeerde initiatieven”.

Het beschadigde reactor hart is na een afkoelperiode verwijderd in 1990. Er is geen hoogradioactief materiaal meer aanwezig in het gebouw, maar het gebouw zelf binnenin en de overblijvende installaties zijn licht gecontamineerd. Er is geen dringende reden om dat verder af te bouwen, gezien dat voor geen potentiële problemen zorgt.

Men neemt in het algemeen aan dat het bovenstaande ongeluk veruit het ergste ongeluk is dat in het westen is gebeurd met een kerncentrale: een zogenaamde “core meltdown” of het smelten van het reactor hart. Sommige anti-nucleaire activisten stellen soms een “core-meltdown” gelijk met Chernobyl, maar zoals men ziet is er geen vergelijking. Chernobyl was een op hol geslagen reactor, geen “core meltdown”. Het hart van de reactor van Chernobyl is niet gesmolten, maar de lucht ingevlogen.

3.7.d Het Tokai-Mura ongeluk (1999)

Het volgende ongeluk is geen “kernenergie” ongeluk per se, maar een ongeluk in een experimentele installatie die ook met nucleaire brandstoffen werkte. Men kan over het ongeluk meer lezen in het officiële IAEA rapport terzake⁸⁶.

Als men verrijkt uranium in waterige oplossing gebruikt, bestaat er a priori de mogelijkheid om accidenteel een kritische massa te vormen en dus ongewild een reactor te maken, gezien we een mengsel hebben van splijtstof en moderator. Om zulke ongelukken tegen te gaan, gebruikt men normaal vaten waarvan de geometrie zo is, dat er nooit een kritische massa kan gevormd worden. Typisch betekent dit dat er buisvormige vaten gebruikt worden waarvan het oppervlak groot genoeg is in verhouding tot hun volume, zodat er voldoende neutronen verloren gaan en er geen criticiteit kan bekomen worden. Elke operatie met verrijkt uranium (of plutonium) is normaal onderworpen aan een goedkeuring door het nationale controle-organisme voor nucleaire praktijken, dat nagaat of de onmogelijkheid van criticiteit is gerespecteerd. Dat was ook het geval in de Tokai-Mura opwerkingsfabriek van nucleaire brandstof, in een installatie waar er een chemische behandeling plaatsvond van een oplossing van verrijkt uranium, tot in 1996. In dat jaar heeft men lokaal beslist, zonder de competente autoriteiten hiervan op de hoogte te stellen en de toelating te vragen, om het uranium oxide op te lossen in een groot stalen vat, in plaats van in de cilindervormige installatie die hiervoor voorzien was, omdat dat sneller ging. Dat is verschillende keren goed gegaan, omdat men toen oplette om geen te grote hoeveelheden tegelijk op te lossen. Op 30 september 1999 is het echter mis gegaan, omdat men toen een veel te grote hoeveelheid (16 kilogram uranium, verrijkt aan 18.8%, opgelost in 40 liter salpeterzuur) verrijkt uranium in een daartoe niet voorzien vat had opgelost: men had zonder het te willen een kleine kernreactor gebouwd! Zoiets heet een *criticiteitsongeluk*. De opgestarte kettingreactie gaf een hele sterke neutronen en gamma flux af, en de drie operatoren die de oplossing aan het maken waren, zijn zo goed als ogenblikkelijk heel zwaar bestraald. Vergeet niet dat we hier dus een “mini kernreactor in een stalen vat” hebben, zonder de minste vorm van stralingsbescherming! De sterke straling liet alle dosimeters in de installatie alarm slaan, en de drie operatoren hebben het gebouw verlaten, evenals alle personeel van de installatie. Rond 11 uur 40 heeft men een gamma dosis debiet van 0.8 mSv/uur gemeten aan de buitenkant van het gebouw en rond 17 uur mat men 4 mSv/uur buiten het gebouw, wat aangaf dat de “reactor” nog steeds werkte. Om 15 uur werden een honderdtal omwonenden in een straal van 350 meter rond het gebouw geëvacueerd.

Een comité experts dat ter plaatse gekomen was heeft rond 11 uur 's avonds beslist om de koelwater mantel rond het chemische reactievat leeg te halen. Dat water zorgde immers voor extra moderatie en voor gedeeltelijke neutronenreflectie, en de hoop was dat het weghalen van dat water de kettingreactie kon stoppen. Een gedeelte van het pijpwerk van die koelwater mantel was toegankelijk van buiten het gebouw, wat het gemakkelijker maakte om zonder te grote blootstelling de voorgestelde operatie uit te voeren. Dat lukte eerst niet goed, maar rond 6 uur de volgende morgen (we zijn nu 1 oktober 1999) lukte men erin om het koelwater te verwijderen, en de gemeten neutronenflux viel terug tot een natuurlijke achtergrond, wat wilde zeggen dat de kettingreactie gestopt was. Daarentegen, de gamma dosis bleef nog relatief hoog, van de orde van enkele millisievert per uur aan de grens van het gebouw. Het verval van de fissieproducten was hiervoor verantwoordelijk. Men kon nu enkele werkers naar binnen sturen om een hoeveelheid boorzuur in het vat te gieten, om er zeker van te zijn dat de reactie niet meer zou hervatten.

⁸⁶<http://f40.iaea.org/worldatom/Documents/Tokaimura/iaea-toac.pdf>

Men besliste om zandzakken op te hopen rond het gebouw om de gamma dosis er rond te verkleinen. Het gebouw zelf was hermetisch gesloten en beschikte over een lucht filter systeem dat tegenging dat eventuele fissieproducten geloosd werden, behalve de gasvormige fissieproducten waaronder wat I-131.

Analyse achteraf heeft aangetoond dat er ongeveer 10^{18} splijtingen hebben plaatsgevonden. De gewaarschuwde autoriteiten hebben enkele uren na het begin van het ongeluk detectoren in 16 verschillende richtingen aan de grens van de site geplaatst, en stalen genomen van grond, water en lucht op verschillende plaatsen in een straal van 10 kilometer rond de site om een zo nauwkeurig mogelijke kartografie op te stellen van de stralingsbelasting van de omgeving.

De drie operatoren zijn zwaar bestraald: ze hebben dosissen geabsorbeerd van 18 Gy, 10 Gy en 2.5 Gy respectievelijk. De eerste twee patiënten zijn ondertussen overleden aan stralingsziekte (respectievelijk na 3 maanden en na 7 maanden). De andere werkers op de site hebben volgens hun dosimeters, en volgens dosimetrisch en medisch onderzoek, dosissen ontvangen van 0.1 mSv tot 23 mSv voor enkele gevallen. De personen die, in tien ploegen van 2 personen, getracht hebben om het koelwater weg te halen, hebben relatief hoge dosissen opgelopen: van 1 mSv tot 112 mSv voor de hardst bestraalde persoon. De personen die de booroplossing hebben toegediend hebben slechts 0.6 mSv opgelopen, omdat het een hele snelle interventie bedroeg en de criticiteit toen reeds verdwenen was.

Men schat dat leden van het lokale publiek minder dan 21 mSv (geschatte bovengrens) hebben opgelopen (de dichtstbijzijnde omwonenden, tussen het ogenblik van het ongeluk en de evacuatie).

Tokai-Mura is een experimentele installatie op kleine schaal. Normale brandstofherwerking gebeurt in vol-automatische systemen, en niet op artisanale wijze zoals hier het geval was. De exploitatie licentie voor nucleaire praktijken van Tokai-Mura is tijdelijk ingetrokken in 2000 en de verantwoordelijken worden gerechtelijk vervolgd, gezien er zware inbreuken op de veiligheid, reglementering en vergunningen zijn opgetreden. Het is een ongeluk op de INES schaal van niveau 4 (dodelijke bestraling van een werknemer).

3.7.e Het SL-1 ongeluk (1961)

Het SL-1 ongeluk⁸⁷ is een ongeluk in een kleine militaire reactor, maar het heeft enige historische betekenis omdat het belangrijke aspecten heeft aangetoond over de passieve veiligheid van reactoren.

De SL-1 reactor was een testinstallatie voor een militair project voor de bouw van hele kleine en mobiele reactoren die elektriciteit aan afgelegen militaire installaties konden leveren (zoals radarstations in Alaska). Het was wel degelijk een kleine kernenergie centrale, met de bedoeling om elektriciteit te genereren, maar ongeveer 300 keer kleiner dan een “gewone” kerncentrale. Het kleine reactor hart had 1 dikke controlestaaf, die het vermogen van de reactor regelde. Tijdens een onderhoudsbeurt op 3 januari 1961 waren drie werknemers aanwezig in het reactor gebouw. Rond 9 uur 's avonds heeft een van de werknemers de fatale fout gemaakt (die gemakkelijk te maken was!): tijdens het onderhoud was de centrale controlestaaf losgemaakt van het automatische mechanisme dat die staaf beweegt, en zij diende terug mechanisch aan dat mechanisme gekoppeld te worden. De reactor begon normaal te werken als die staaf 4 inches (ongeveer 10 cm) uitgetrokken werd, en men heeft geschat dat de werknemer die staaf ongeveer 50 cm heeft

⁸⁷<http://en.wikipedia.org/wiki/SL-1>

uitgetrokken om gemakkelijk aan het mechanisme te koppelen. De reactor is prompt kritisch gegaan. Het was een water reactor, met een aantal passieve veiligheidselementen: stoomvorming moet normaal gezien het moderatie proces afremmen en de reactie stoppen. Maar alvorens dat proces intreedt heeft men ongeveer 7 milliseconden nodig, terwijl bij het prompt kritisch gaan, een enorm vermogen ontwikkelde in ongeveer 3 milliseconden, dus net wat te snel. De enorme hoeveelheid energie heeft uiteindelijk de brandstofelementen laten verdampen en natuurlijk het water laten koken, maar dat kwam te laat om de reactie te stoppen voor er schade was. De vrijgemaakte hitte puls heeft voor een stoomexplosie gezorgd die het deksel van de reactor, waarop de man stond, in de lucht heeft gegooid, en de arme man is tegen het plafond van het gebouw geplakt, zoals een vlieg die je met een krant platmept. De reactie is natuurlijk gestopt door de stoomvorming, maar ondertussen was de reactor dus stuk. Twee andere mensen die in het reactor gebouw waren, zijn ook gedood in de stoomexplosie. Er was dus niemand meer aanwezig in het reactor gebouw, en gelukkig maar dat de reactie vanzelf stopte door de stoomvorming.

Een alarmsignaal dat de toegenomen warmte in het reactorgebouw vaststelde, liet de brandweer komen. De brandweertjes stelden vast dat hun dosimeters op maximum schaal gingen als ze kort bij het gebouw in kwestie kwamen, en trokken terug. Wat later kwamen mensen van de stralingsbescherming ter plaatse, met speciale pakken. Ze stelden vast dat de dosis binnen het gebouw van de orde van 1 Sv/uur was. In shifts van een paar minuten per ploeg werd het gebouw verkend, en twee slachtoffers werden gevonden. Een was duidelijk dood, een andere bewoog nog een beetje, maar is wat later aan zijn wonden gestorven en hij zou in elk geval aan stralingsziekte zijn gestorven: aan zijn huidoppervlak mat men nog 5 Sv/uur als dosis! De man die aan het plafond was gespijkerd is pas veel later gevonden. Hoewel het gebouw van de reactor geen bunker was, is het grootste deel van de radioactieve contaminatie in het gebouw gebleven.

Men heeft uit dit ongeluk verschillende aspecten van het concept van passieve veiligheid bijgeleerd. Een van de problemen was bijvoorbeeld de te grote thermische weerstand tussen de splijtstof en het water, die maakte dat het 7 milliseconden duurde alvorens er stoombellen gingen vormen. Had die stoom zich in minder dan 3 milliseconden gevormd door betere warmtegeleiding van de brandstof naar het water, dan was het ongeluk waarschijnlijk vermeden. Een ander punt was het feit van 1 controlestaaf te hebben, die door mechanische beweging toeliet van de reactor prompt kritisch te laten worden.

3.7.f Het Windscale ongeluk (1957)

Een ongeluk in een militaire reactor in het Verenigd Koninkrijk heeft destijds nogal wat radioactief materiaal in de omgeving vrijgelaten. Hoewel Groot-Brittannië tijdens de tweede wereldoorlog had deelgenomen aan het Manhattan project om nucleaire wapens te ontwikkelen, hadden de Amerikanen in 1946 beslist om hen geen toegang meer te geven tot de Amerikaanse militaire nucleaire technologie. De Engelsen hebben dan beslist om hun eigen kernwapen programma op te starten, met wat ze in het Manhattan project geleerd hadden. Ze beslisten om twee reactoren te bouwen die plutonium gingen produceren, nabij het dorpje Seascale: Windscale Pile 1 en Windscale Pile 2. De structuur van deze reactoren was heel simpel: het waren grafiet reactoren werkende op natuurlijk uranium, die in een betonnen hal geplaatst waren, met aan de ene kant een grote ventilator die lucht door kanalen in de reactor blies, en aan de andere kant een schoorsteen die die koel-lucht in de atmosfeer vrij liet. Laat in het ontwerp, op aandringen van de wetenschapper (en Nobelprijns winnaar) Sir John Cockroft, had men toch maar beslist om wat stof-filters in die schoorsteen te stoppen, – hoewel de ingenieurs dat maar een lastig en dom idee vonden. De reactor

was zo gebouwd, dat men tijdens het functioneren uranium staven kon wisselen, kwestie van een continue plutonium productie (die het doel was van de reactor) toe te laten. Men stopte een staaf met uranium (of een ander materiaal) in een gat in de reactor, en als die voldoende bestraald was, dan duwde men die (hoog-actieve) staaf doorheen de reactor, waar die aan de andere kant in een waterbak viel.

Men had na de bouw van de reactoren het fenomeen van Wigner energie vastgesteld: het feit dat grafiet heel wat atomaire vervormingsenergie kan opslaan wanneer het door neutronen bestraald wordt. Deze energie kan dan in een keer vrijkomen, wat een grote hitte kan opleveren en het grafiet heel heet maken. Windscale Pile 2 had zo een effect ondergaan: een plotselinge stijging van temperatuur van het grafiet. Men vond als oplossing, dat het een goed idee was om geregeld het grafiet warm te laten worden (250 graden Celsius), zodat de energie vanzelf vrijkwam en “de veer ontspannen werd”. Jammer genoeg waren de reactoren of hun instrumentatie er niet op voorzien om aan zulke temperaturen te werken.

Het ontwerp van de reactor was heel gevaarlijk, om verschillende redenen. Ten eerste was grafiet een brandbare stof, en men blies er voortdurend lucht in, wat een eventuele brand zou aanwakkeren. Ten tweede waren de hitte cycli veel te warm voor de instrumentatie die was gebouwd: men had een heel slecht zicht op de echte temperatuur van de reactor. Ten derde ging de koel-lucht direct (via wat filters) de natuur in. Ten vierde gebruikte men metallisch uranium, dat gemakkelijk vuur vat, en natuurlijk zat het geheel niet in een bunker.

Op 7 oktober 1957 paste men een warmtecyclus toe op Windscale Pile 1: na de reactor een tijd op laag vermogen te hebben gehouden, stopte men de luchtkoeling, en verhoogde men langzaam het nucleaire vermogen (zodat de reactor warm werd). Van zodra men een extra verhitting waarnam, ging men ervan uit dat het Wigner “ontspanningsproces” bezig was, en stopte men de reactor. Jammer genoeg viel de temperatuur, zoals gemeten door enkele instrumenten, terug, wat wilde zeggen dat het ontspanningsproces niet volledig was. Men besliste dus om terug het nucleaire vermogen te laten toenemen, in een tweede verhittingspoging, waarna het nucleaire vermogen opnieuw gestopt werd. Op de instrumenten zag men een zachte toename in temperatuur, wat verwacht was. Drie dagen later, op 10 oktober, was de temperatuur echter nog steeds lichtjes aan het stijgen, terwijl men een daling verwachtte omdat alle Wigner energie ondertussen wel zou vrijgekomen zijn. Toen Tom Hughes, de vice-directeur van het centrum, in beschermend pak een kijkje ging nemen aan de voorkant van de reactor, stelde hij tot zijn verschrikking vast dat sommige brandstofstaven roodgloeiend waren! De directeur van het centrum, Tom Tuohy, is toen in volledig beschermend pak met ademhalingsapparatuur, gaan kijken naar de achterkant van de reactor, waar hij vaststelde dat er een rode gloed zichtbaar was die de betonnen muur van het gebouw aan het verhitten was. Die muur was gemaakt uit een betonsoort die geen warmte kon verdragen (!).

De reactor stond duidelijk in brand. Vermoedelijk is de Wigner energie ongelijkmatig vrijgekomen, en zijn sommige delen van de reactor veel heter geworden dan andere delen. Dat heeft waarschijnlijk het uranium metaal vuur laten vatten, en het grafiet aan het smeulen gebracht.

Men wist niet goed wat te doen. Eerst heeft men domweg getracht met de ventilator het vuur uit te blazen, door de luchttoevoer op te drijven, maar men ziet al snel in dat dat een dom idee was dat het vuur enkel maar liet oplaaien. Nadien heeft men zoveel mogelijk uranium staven door de reactor geduwd, in de waterbak achterin, maar de staven die in brand waren, zaten muurvast. Een poging om met een lange stok op die staven te duwen, heeft ertoe geleid dat er vloeibaar (!) uranium aan de voorkant van de reactor ontsnapte...

Men heeft getracht te blussen met vloeibaar kooldioxide. Het probleem is echter dat kooldioxide plus koolstof (grafiet) kan verbranden tot koolmonoxide en men wakkerde weer het vuur enkel maar aan.

11 oktober: de reactor was aan 1300 graden, en weldra zou het gebouw instorten. Men besliste om dan maar met water te blussen. Dat was heel gevaarlijk: een stoom ontploffing, of erger, een waterstof ontploffing zou waarschijnlijk het hele boeltje (a la Chernobyl) de lucht injagen. Maar er ging in elk geval een ramp gebeuren als men niets deed. Twaalf darmen werden verbonden met de voorkant van de reactor, en men pompte water erin, eerst langzaam en nadien onder hogere en hogere druk. Dat heeft uiteindelijk gewerkt. Men vermoedt dat er ongeveer 700 Tbq is vrijgekomen, voornamelijk onder de vorm van I-131, met een halfwaardetijd van 8 dagen, maar gevaarlijk voor de schildklier. Het andere probleem was Cs-137, maar ook Polonium-210 dat in sommige staven zat om bestraald te worden. Men heeft wel de melkproductie in een straal van 12 kilometer gedurende een maand vernietigd, uit angst voor een ophoping van radioactief jodium. Het is dank zij de filters in de schoorsteen dat er niet veel meer radioactieve stoffen zijn vrijgekomen.

Men heeft getracht om de radiologische effecten te schatten⁸⁸ en men vermoedt dat er een collectieve dosis is opgelopen van 2 000 man Sv, wat dus neerkomt op een honderdtal extra dodelijke kankergevallen over 50 jaar (aan 5% per Sv).

Het reactor gebouw is verzegeld en men heeft beslist dat de constructie van de andere reactor veel te gevaarlijk was ; Windscale Pile 2 is korte tijd daarna ook gestopt met werken.

Dit is geklasseerd als een INES-5 ongeluk.

3.7.g Doden en ongelukken bij andere menselijke activiteiten

Zoals we gezien hebben, heeft de nucleaire sector (waarvan de kernenergie sector een deel is) een aantal ongelukken gekend, en deze ongelukken worden vaak aangehaald als bewijs dat het een veel te gevaarlijke activiteit is, waar onmiddellijk moet mee gestopt worden. Natuurlijk is elk ongeluk waarbij slachtoffers vallen te betreuen: de fietser die omver gereden wordt op de hoek van de straat is ook een betreuenswaardig ongeluk. Maar om een activiteit als “veel te gevaarlijk” te klasseren net omwille van die ongelukken, dient men ze te vergelijken met andere, aanvaarde, activiteiten. Als we dat doen, dan zien we dat er vele menselijke activiteiten zijn die veel meer slachtoffers eisen dan “het gemiddelde nucleaire ongeluk” dat er meestal uit bestaat om een beetje radioactiviteit te laten ontsnappen, en dat het maximale nucleaire ongeluk (Chernobyl) niet in een totaal andere categorie speelt dan sommige rampen die gebeurd zijn in andere activiteitstakken. Er is echter een ander verschil: *menselijke rampen waarbij heel wat pollutanten vrijkomen laten meestal niet toe een schatting te maken van de lange-termijn effecten* – het aantal verwachte extra kankergevallen in de 50 volgende jaren door, zeg maar, een blootstelling aan bepaalde organische verbindingen – terwijl die schattingen steeds gegeven worden in het geval van een nucleair incident, *gewoon omdat er meestal zo goed als geen directe slachtoffers te betreuen zijn.*

Laten we eerst eens kijken naar de “standaard” manier om elektriciteit te produceren: steenkoolcentrales. In de USA schat men dat de luchtvervuiling ten gevolge van zulke centrales verantwoordelijk is voor ongeveer 30 000 doden per jaar⁸⁹. Dat is dus, voor de USA alleen, drie Chernobyls per jaar!

⁸⁸Int J Radiat Biol Relat Stud Phys Chem Med. 1984 Nov;46(5):479-506.

Een gevaarlijke menselijke activiteit is *mechanisch transport*, waarvan de hoofdmoot ingenomen wordt door autoverkeer. Men heeft zelfs een relatief goede empirische wet, *de wet van Smeed*⁹⁰, die het aantal doden per jaar geeft als functie van de fractie van de bevolking die een auto bezit. Op een kleine factor (kleiner dan 3) na is die wet geldig in alle landen, en over bijna honderd jaar! De wet wordt geïnterpreteerd als aangevende wat mensen aanvaardbaar vinden als doodstol. Elke verbetering van de veiligheid van voertuigen wordt gebruikt om meer en/of roekelozter te rijden.

Een rapport van de Wereld Gezondheids organisatie⁹¹ stelt dat er *wereldwijd, jaarlijks ongeveer 1.2 miljoen mensen sterven in auto ongelukken*. Dat is per jaar een stad als Brussel die van de kaart wordt geveegd. Bovendien is er een veel groter aantal dat gewond en gehandicapt geraakt per jaar. Dat cijfer geeft enkel de *directe* slachtoffers van verkeersongelukken weer, en niet van de pollutie die het verkeer veroorzaakt, een cijfer dat heel moeilijk te schatten is, maar dat qua principe overeen komt met alle geschatte extra dodelijke kankergevallen in het geval van kleine dosissen in de nucleaire activiteiten. Als dusdanig is het totale aantal doden per jaar ten gevolge van de menselijke activiteit van autorijden nog veel groter.

De kans per jaar om aan een auto-ongeluk te sterven, varieert niet veel in de wereld: wereldwijd is dat 0.01% gemiddeld, in Afrika is het gevaar het grootste met 0.017%, en in West-Europa is het gevaar het kleinste met een risico van 0.005%. Wereldwijd is autoverkeer verantwoordelijk voor 2.1 % van de doodsoorzaken ; in Europa is het de kleinste bijdrage met 1.7% en in het oosten van het Middellandse-Zee gebied is het het belangrijkste met 3.6% (en in de rijkere delen van de bevolking daar zelfs 5.6%).

Het roken van sigaretten verhoogt aanzienlijk de kans op overlijden ten gevolge van deze activiteit, door verschillende effecten. De voornaamste doodsoorzaak direct ten gevolge van roken is een hartinfarct. Men schat dat dit effect alleen al zorgt voor 440 000 doden per jaar in de Verenigde Staten⁹².

Roken veroorzaakt ook kanker, door twee effecten: chemisch en radiologisch. Er zijn veel kanker-veroorzakende chemicaliën in sigarettenrook, de twee belangrijkste zijn benzopyrenes en nitrosamines. Een belangrijke oorzaak van kanker door roken komt echter ook door de radiologische belasting die het veroorzaakt. Er zijn wetenschappelijke studies⁹³ geweest (dit was het stokpaardje van Dr. Ed Martell⁹⁴) die aantonen dat iemand die sigarettenrook inneemt (zelfs nog meer wanneer het “passief roken” betreft), hij radioactieve componenten (voornamelijk Po-210, maar ook aanverwante nucliden) vastzet in teer in de longstructuur. Een roker die twee pakjes per dag rookt gedurende 25 jaar, neemt op die manier een geëngageerde dosis van 1.6 tot 10 Sv op ; dit dient men te vergelijken met de blootgestelde dosis aan natuurlijke achtergrond straling (wereldgemiddelde 2.4 mSv per jaar, dus 60 mSv over 25 jaar). Sommige onderzoekers denken zelfs dat die stralingsbelasting grotendeels verantwoordelijk is voor de kankerverwekkende eigenschappen van sigarettenrook. Een reden hiervoor zien zij in het feit dat rokers ook een grotere kans op blaaskanker hebben, terwijl er geen chemische kankerverwekkende stoffen in de urine worden gevonden, maar wel 6 keer meer Po-210 dan normaal in de urine van rokers.

⁸⁹<http://www.sierraclub.org/cleanair/factsheets/power.asp>

⁹⁰http://en.wikipedia.org/wiki/Smeed%27s_law

⁹¹http://www.who.int/topics/injuries_traffic/en

⁹²http://en.wikipedia.org/wiki/Health_effects_of_tobacco_smoking

⁹³ <http://www.pnas.org/cgi/content/abstract/80/5/1285>

⁹⁴http://en.wikipedia.org/wiki/Ed_Martell

De chemische nijverheid brengt ook heel wat pollutanten in kleine dosissen in de omgeving. Jammer genoeg heeft men niet het duidelijke beeld zoals in het geval van straling die een statistische relatie aangeeft tussen de vrijgelaten stoffen en het aantal extra doden door kanker die hierdoor worden veroorzaakt. Er bestaat niet echt zoiets als dosimetrie die de blootstelling of de geëngageerde dosis nu eens gaat aangeven voor alle kankerverwekkende chemicaliën in kleine dosissen. Als dusdanig beperkt men zich in de chemische nijverheid tot de enkele spectaculaire “maximale” ongelukken die de wereld rondgaan als nieuws. Men hoort nooit dat er een heel klein beetje dit of zulk product is vrijgekomen door een vastgestelde lek, maar dat die lozing nog steeds binnen de normen valt. Er zijn geen lijsten van vaststellingen dat die of zulke pomp niet werkte. Met andere woorden, alvorens er zelfs maar iets bekend wordt over een probleem in de chemische nijverheid moet men aan het equivalent zitten van een INES-5 ongeluk.

De enkele relatief spectaculaire ongelukken in deze sector zijn:

- het Bhopal ongeluk
- de AZF fabriek
- de brand in Bale
- het Seveso ongeluk
- de cyanuur vergiftiging van de Tizsa
- de Phillips petroleum fabriek te Houston

Het Bhopal ongeluk⁹⁵:

Op 3 december 1984 is er in de fabriek van Union Carbide nabij de stad Bhopal in India, die pesticiden produceerde, een zwaar ongeluk gebeurd met een tank die methyl isocyanaat bevatte. Door het insijpelen van water is een chemische reactie opgetreden die de temperatuur en de druk in de opslagtank heeft laten toenemen, en een noodklep is opengegaan, die 40 ton methyl iso cyanaat gas heeft vrijgelaten. Dat is een uiterst giftig en kankerverwekkend gas, dat bovendien zwaarder is dan lucht (het stijgt dus niet op in de atmosfeer). Er zijn waarschijnlijk ook andere chemicaliën vrijgekomen, maar hierover is nooit informatie vrijgegeven. Er is een sterk vermoeden dat ook waterstof cyanide is vrijgekomen gezien de bloedanalyses van sommige slachtoffers. Het gas is de straten van de stad binnengedrongen, en heeft op het moment zelf 3000 mensen gedood, en het is algemeen aangenomen dat er 15 000 latere dodelijke slachtoffers geweest zijn, terwijl meer dan 500 000 gehandicapten erkend zijn door het Indiaanse hooggerechtshof. Na de ramp is de gecontamineerde site verlaten, en zijn er nog vele andere chemicaliën vrijgekomen in de natuur. Trichlorobenzeen, lood, kwik, en andere kankerverwekkende stoffen zijn in hoge hoeveelheden gevonden in nabije waterputten. Deze stoffen zullen waarschijnlijk een verhoogde kans op kanker en andere ziekten veroorzaken.

Men ziet hier onmiddellijk het verschil tussen de beschrijving van een nucleair en een chemisch ongeluk. Hoewel er onzekerheden zijn, kan men in het geval van een nucleair ongeluk relatief nauwkeurig de ontvangen dosissen bepalen door de blootgestelde mensen, en hieruit een ruwe schatting maken van het aantal verwachte slachtoffers over de komende tientallen jaren volgens de hypothese van lineair verband tussen dosis en effect. Men zal dat nooit direct waarnemen, gezien het epidemiologisch zo goed als onwaarneembaar is: de toename in kankers is heel klein in vergelijking met de totale hoeveelheid “natuurlijke” kankers, en kan statistisch bijna niet

⁹⁵http://en.wikipedia.org/wiki/Bhopal_Disaster

aangetoond worden. Zulke informatie is niet beschikbaar in het geval van een chemisch ongeluk, zowel betreffende de dosissen van chemicaliën aan dewelke men is blootgesteld, als de lange-termijn effecten. Maakt men bijvoorbeeld ook een lineariteitshypothese bij kleine dosissen? Men dient de 15 000 slachtoffers van Bhopal dus niet te vergelijken met het totale aantal geschatte extra doden door Chernobyl, maar met de “onmiddellijke” en aanwijsbare slachtoffers in de periode die volgde: dat was een 60-tal. Men heeft geen cijfer voor de lange-termijn effecten (kleine verhoging van kanker kans en zo) van Bhopal, dat men kan vergelijken met de 10 000 geschatte doden van Chernobyl. Indien de 500 000 erkende gehandicapten een indicatie zijn, heeft men een idee van de schaal van de ramp, vergeleken met Chernobyl. Maar er bestaat geen enkele wetenschappelijke techniek om dat te schatten in het geval van chemische blootstelling. We zijn weer in de “wat niet weet, niet deert” geestestoestand.

De AZF-fabriek in Toulouse⁹⁶.

Op 21 september 2001 is in de chemische fabriek AZF ongeveer 400 ton ammonium nitraat ontploft. 30 mensen zijn onmiddellijk omgekomen, 22 werknemers en 8 leden van het publiek, samen met meer dan 2000 zwaargewonden. Dit ongeluk heeft vooral voor enorm veel materiële schade gezorgd. De hele fabriek is van de kaart geveegd, en er is voor ongeveer 2 miljard Euro directe schade aan de omgeving aangebracht (bijvoorbeeld, 150 stadsbussen zijn vernietigd in de ontploffing). De hele site moet gereinigd worden van chemische polluenten.

De brand in Bale⁹⁷.

Op 1 november 1986 woedt er een hevige brand in de fabriek Sandoz nabij het Zwitserse Bale. Om de brand te blussen gebruikt de brandweer meer dan 15 000 kubieke meter water, die in de Rijn vloeit, en die een hele hoop chemische polluenten van de brandende fabriek meevoert: een mengsel van pesticiden, kwikverbindingen, fosfor esters ... heeft de Rijn heel zwaar vervuild en de visvangst onmogelijk gemaakt gedurende 6 maanden. Er zijn geen directe slachtoffers gemeld, maar, in tegenstelling tot radioactieve lozingen die meetbaar zijn, heeft men geen enkel idee van hoeveel kankers die lozing heeft veroorzaakt.

Het Seveso ongeluk⁹⁸.

Op 10 juli 1976 ontsnapt er uit de fabriek Icmesa, in het Italiaanse Lombardije, een grote hoeveelheid trichlorofenol en nog andere chemicaliën. Men heeft eerst niet door dat deze een chemische reactie kunnen ondergaan om dioxines te vormen, hoogst kankerverwekkende chemicaliën. Als de bomen beginnen te vergelen in de omgeving, begint men zich vragen te stellen. Men stelt dat het gemiddelde aantal kankers niet significant maar wel waarneembaar⁹⁹ is toegenomen maar dat is epidemiologisch ook niet het geval bij nucleaire ongelukken ; met andere woorden, wat niet weet, niet deert.

De cyanuur vergiftiging van de Tisza.

Op 30 januari 2000 breekt een dijk van een waterpond van de goud-verwerkende fabriek Aurul in het Romeense Baia Mare, en 100 000 kubieke meter water met een hoge concentratie aan cyanuur vloeien de rivier Somes in, die uitmondt in de rivier Tisza die zelf uitgeeft op de Donau. Alle leven in de rivier wordt gedood, en zelfs tot in de Zwarte Zee is de vervuiling vastgesteld.

⁹⁶http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_l%27usine_AZF_de_Toulouse

⁹⁷http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Schweizerhalle

⁹⁸http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Seveso

⁹⁹<http://www.who.int/ipcs/publications/en/exe-sum-final.pdf>

De Philips Petroleum fabriek te Houston¹⁰⁰ ontploft voor de derde keer.

Op 21 maart 2000 ontploft de fabriek voor de derde keer, en veroorzaakt een dode en 71 zwaargewonden. In de drie ontploffingen gedurende 11 jaar zijn 26 mensen in totaal omgekomen. De fabriek produceert voornamelijk styrene-butadiene copolymeren, een soort doorschijnende verpakking gebruikt in vele sectoren. De brand die erop volgt jaagt een gigantische zwarte rookpluim vol giftige dampen de lucht in. De omwonenden worden verzocht binnen te blijven, de 31 scholen in de buurt plaatsen de kinderen in veiligheid.

De fossiele-brandstof sector heeft ook zijn aandeel ongelukken. We noemen er enkele van de meest spectaculaire op:

- de gas explosie van Ghislenghien
- de brand van Buncefield
- Het boorplatform Ixtoc I
- Het Piper-Alfa ongeluk
- Lijst van gezonken tankers.

De ontploffing van Ghislenghien¹⁰¹.

In het Belgische stadje is er op 30 juli 2004 een lek in de gas-pijplijn die gas vervoert van Noorwegen naar Frankrijk en naar Spanje toe. Tijdens een inspectie van de brandweer ontploft het boeltje: 24 doden en 132 zwaar verbranden.

De brand van Buncefield¹⁰²

Om 6 uur 's morgens, op 11 december 2005, ontploft een grote brandstof opslagplaats in Engeland. Gedurende 3 dagen heeft een heel hevige brand gewoed, die een dikke zwarte rookwolk heeft veroorzaakt die tot in Spanje merkbaar was. 43 personen zijn gewond geraakt, maar er zijn geen directe doden gevallen. Er is een sterke piek-pollutie vastgesteld, die na de brand snel is teruggevallen. Welke zijn daarvan de lange-termijn effecten ?

Het boorplatform Ixtoc I¹⁰³

Op 3 juni 1979 heeft het experimentele booreiland Ixtoc I een hoge-druk olieveld aangeboord, en de olie is onder zo een hevige druk omhoog gekomen, dat het boorplatform werd vernietigd. De olie heeft vuur gevat, en de grootste olievervuiling in de geschiedenis was daar het gevolg van. Gedurende 9 maanden is er ongeveer 1 miljoen ton ruwe olie in de Golf van Mexico gevloeid.

Het Piper-Alfa ongeluk¹⁰⁴

Op 6 juli 1988 is het grote booreiland voor de kust van Schotland, Piper Alpha, helemaal ontploft, 167 doden bij de personeelsleden.

Gezonken tankers en andere olie verliezen.

100<http://www.wsws.org/articles/2000/mar2000/expl-m30.shtml>

101http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Ghislenghien

102http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Buncefield

103<http://en.wikipedia.org/wiki/Ixtoc>

104http://en.wikipedia.org/wiki/Piper_Alpha

Er bestaat een lijst¹⁰⁵ van gezonken olietankers die voor heel wat pollutie hebben gezorgd, waaronder ook een blootstelling aan kankerverwekkende stoffen.

Er gebeuren soms ook ongelukken met stuwmeren en stuwdammen¹⁰⁶, hoewel dat vrij zeldzaam is. We illustreren met een paar spectaculaire voorbeelden: de dam van Malpasset¹⁰⁷ die in 1959 brak, en die meer dan 400 doden heeft veroorzaakt in het zuiden van Frankrijk en de dam van Vajont¹⁰⁸ die in 1963 bijna 2000 doden heeft veroorzaakt in Italië. In dat laatste geval is het geen dambreuk geweest die aan de oorsprong lag, maar wel een aardverschuiving, die een enorme hoeveelheid modder in het stuwmeer heeft laten schuiven, met als gevolg dat het meer is overgelopen, over de stuwdam heen.

Andere voorbeelden: de Teton¹⁰⁹ dam (USA) en de val di stava dam¹¹⁰ 1985, 268 doden.

3.8 Reactor veiligheid

3.8.a Bronnen van gevaar

Wat is het potentiële gevaar van een kerncentrale? In tegenstelling tot wat soms wordt gedacht, is het gevaar totaal niet van explosieve aard. Een kerncentrale kan niet zwaar ontploffen, zoals bijvoorbeeld een raffinaderij dat kan. De ergste vorm van explosie is een explosief vrijlaten van hete stoom die een vrij lokale impact heeft. *Het potentiële gevaar van een kerncentrale bestaat uit de relatief grote hoeveelheden hoog-radioactief materiaal die aanwezig zijn in de reactor.* Als dat materiaal in grote hoeveelheden in de natuur vrijkomt, dan kan dat aanleiding geven tot twee problemen. Enerzijds kan de inname (door inademen, drinken, eten...) van dat materiaal aanleiding geven tot een verhoogde geëngageerde dosis bij de blootgestelde personen (leden van het publiek), wat dus aanleiding kan geven tot een verhoogde kans op kankers. Anderzijds is het mogelijk dat het vrijgekomen materiaal een deel van de omgeving gaat vervuilen (contamineren), zodat een deel land voor lange tijd ofwel onbewoonbaar wordt ofwel heel duur is om opgekuist te worden; zo duur, dat het goedkoper is om dat land gewoon maar gedurende een lange tijd niet te gebruiken. Het Chernobyl ongeluk is de absolute bovengrens aan wat er kan gebeuren.

Een ongeluk met een kerncentrale is geen “alles-of-niets” ongeluk, en niet elk ongeluk is noodzakelijker wijze van het Chernobyl type (gelukkig maar!). Men kan verschillende types ongelukken hebben, en aan elk soort ongeluk is een zekere “kostprijs” verbonden, die er meestal op neerkomt na te gaan wat de hoeveelheid radioactieve stoffen is die in de omgeving zal vrijkomen, op welke wijze ze vrijkomen en wat daar de sanitaire kostprijs van is, die uiteindelijk gegeven is door het geschat aantal slachtoffers op lange termijn en de kostprijs van het tijdelijk besmette land.

In het Westen (gezien Chernobyl, denk ik niet dat zoiets gebeurde in de voormalige Sovjet Unie!) maken de instanties die zich bezighouden met nucleaire veiligheid, voortdurend *een risico-analyse*

105http://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_principales_mar%C3%A9es_noires

106http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_dam_failures

107http://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_Malpasset

108http://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_Vajont

109http://en.wikipedia.org/wiki/Teton_Dam

110http://en.wikipedia.org/wiki/Val_di_Stava_Dam_Collapse

van de bestaande of geplande installaties. Dat wil zeggen dat ze voortdurend trachten na te gaan wat er allemaal kan fout gaan, welke daartoe de geschatte kans is, en wat de impact hiervan gaat zijn. Relatief weinig menselijke activiteiten zijn aan zo een rigoureuze risico-analyse onderworpen, maar nucleaire activiteiten zijn dat wel. Deze risico analyse leidt tot strategieën om het risico zo klein mogelijk te houden. De twee basis strategieën die aangewend worden om de risico's te verkleinen, zijn: *verdediging in diepte* en *passieve veiligheid*. De bedoeling is om het risico te verkleinen, wat wil zeggen: *hoe erger de gevolgen van een bepaald type ongeluk, hoe onwaarschijnlijker het moet zijn dat zo een ongeluk ook daadwerkelijk gebeurt*. Men doet dit door enerzijds trachten de gevolgen te beperken, ervan uitgaande dat het ongeluk kan gebeuren, en anderzijds ervoor te zorgen dat er vele onwaarschijnlijke dingen tegelijk moeten gebeuren alvorens het ongeluk zich voordoet. Het hele gebeuren, van risico-analyse tot risico-vermindering maakt deel uit van een veiligheidscultuur. Om trachten deze analyse en strategie te verbeteren is het voortdurend nodig om “gegevens van het terrein” op te doen, en de meldingsplicht van de kleinste incidenten maakt daar deel van uit. Het helpt om een beter beeld te krijgen van wat er typisch allemaal kan misgaan, en welke daartoe de kansen zijn, evenals het waakzaam houden van alle personeelsleden (uitvoerend personeel zowel als hiërarchie) betreffende de veiligheidsproblematiek.

De uiteindelijke bron van gevaar bestaat uit de radionucliden die aanwezig zijn in een reactor, en de “nijdigste” zijn de fissieproducten. De actiniden (uranium, plutonium, americium...) zijn ook wel vervelend, maar stellen niet het grootste potentiële gezondheidsprobleem. Er zijn twee categorieën van splijtingsproducten als functie van hun halfwaardetijd. Vele van die radionucliden hebben een halfwaardetijd van minuten en uren, tot enkele dagen. Deze zijn dus heel actief, maar verdwijnen ook snel. Het typische voorbeeld is jodium. I-131, I-132, I-133, I-134 en I-135 zijn gevaarlijke stoffen gedurende de eerste dagen en weken. Nadien zijn ze verdwenen. Jodium wordt opgenomen door de schildklier. Hoewel de vervaltijd kort is, is kan de opgelopen dosis belangrijk zijn tijdens die korte tijd. Een snelle evacuatie is dus gewenst indien die stoffen vrijkomen in grote hoeveelheden. Een paar splijtingsproducten (voornamelijk Cs-137 en Sr-90) hebben jammer genoeg halfwaardetijden van een dertigtal jaar. Zij spelen een vervelende rol in de contaminatie van gebouwen en terreinen, omdat het honderd – tweehonderd jaar duurt alvorens ze verdwenen zijn. Strontium lijkt chemisch op calcium, en wordt in het lichaam opgenomen in de beenderen, waar de straling het beendermerg gaat beschadigen. Cesium wordt opgenomen in de spieren.

De “drijvende kracht” achter het vrijgeven van deze stoffen is *druk en warmte*. Inderdaad, een ijskoud “bloot” reactorhart stelt een relatief klein probleem: het volstaat als het ware om hem in te pakken in, zeg maar, aluminiumpapier of keukenfolie om te beletten dat de stoffen vrijkomen! Er is natuurlijk lokaal een groot stralingsdosisdebiet, maar dat is beperkt tot enkele honderden meters in de omgeving. Het probleem is de warmte die geproduceerd wordt. De voornaamste bron van warmte is natuurlijk de nucleaire kettingreactie ; de hele bedoeling van een kernreactor is warmte te produceren. Wanneer die reactie aanwezig is, is het veruit de belangrijkste vorm van warmteproductie, maar van zodra de kritische conditie is verbroken, stopt de kettingreactie in een fractie van een seconde, en is de voornaamste bron van warmte nu het radioactieve verval van de fissieproducten. Er is ook potentiële energie opgeslagen in het warme water van een reactor, en er kunnen chemische reacties optreden bij hoge temperatuur, zoals de oxidatie van metalen in de aanwezigheid van zuurstof of water. In het laatste geval kan er ook waterstof vrijkomen. Druk kan veroorzaakt worden door heet water (stoom onder druk), of door een waterstof explosie. Het gevaar bestaat er dus in dat de warmte de temperatuur zodanig laat stijgen dat barrières hiertegen niet bestand zijn en/of dat de druk (langzaam of explosief) laat stijgen zodat de barrières doorbroken worden en de fissieproducten “efficiënt” verspreid worden in de omgeving. Een laatste drijvende kracht is convectie door een grote brand, die de fissieproducten hoog in de atmosfeer kan voeren in

een kolom hete brandlucht. Het is dat laatste wat gezorgd heeft voor de verspreiding van de stoffen over een heel groot gebied bij het Chernobyl ongeluk.

De hele bedoeling van een veiligheidsanalyse en strategie zal erin bestaan op het “pad naar vrijheid” van de fissieproducten vele obstakels te plaatsen en na te gaan hoe (on) waarschijnlijk het is dat al die obstakels geheel of gedeeltelijk falen ; en in welke mate er dan verwachte fissieproducten vrijkomen, en hoe ze verspreid worden.

3.8.b Veiligheidsanalyse

De veiligheidsanalyse¹¹¹ van een activiteit (in ons geval een kerncentrale) bestaat erin, alle denkbare paden te beschouwen die leiden van normale toestand tot “uiteindelijke ongelukstoestand”. In ons geval bestaan de ongelukstoestanden uit de verschillende wijzen waarop radioactieve stoffen vrijkomen in de omgeving. We hebben het hier niet alleen over het “ultieme ongeluk” maar over elke noemenswaardige vorm van ongeluk (zeg maar, elk niveau van de INES schaal).

Elk ongeluk heeft een “initiële aanleiding”, een eerste ding dat mis gaat. Dat kan een belangrijke oorzaak zijn, of een klein detail (lampje stuk in een controlepaneel, die de operator een verkeerde beslissing laat nemen, bijvoorbeeld). Men stelt voor elke beschouwbare initiële aanleiding een boomdiagram op, waar op elk vertakkingspunt twee of meerdere verdere mogelijkheden worden beschouwd in het vervolg van het verhaal. Bijvoorbeeld: de initiële oorzaak “lampje stuk” kan leiden tot twee vertakkingen: “operator heeft door dat het lampje stuk is, en vervangt het lampje” of “operator neemt verkeerde beslissing en opent klep 17”. Voor elke tak tracht men de kans te schatten. Soms kent men deze kansen, soms moet men ze schatten (of raden). Het is voor de bepaling van deze kanswaarden dat de melding van elk incident belangrijk is, evenals voor aanduidingen dat men soms takken vergeten heeft in de analyse. Men dient ook op te letten voor correlaties tussen verschillende fouten die maken dat als 1 ding misgaat, verschillende (verwante) dingen mis gaan. Wat men dus aannam als zijnde verschillende obstakels op een pad, is dan in feite een enkel obstakel: als het wegvalt, vallen alle “deelobstakels” meteen ook weg. Dat is een rationalisatie van de wet van Murphy.

Elk knooppunt en elke vertakking brengt ons van de initiële oorzaak wat dichterbij de “ontknoping”. Sommige takken leiden ons “weg” van de accidentele situatie, anderen leiden ons er naartoe. Wat telt zijn de takken die uiteindelijk terecht komen bij de accidentele situatie. De analyse van eerdere ongelukken of “vermeden ongelukken” geeft aan dat er meestal een lange weg is van initiële aanleiding tot accidentele situatie. Men leert hieruit welke de cruciale punten zijn waar het ongeluk al dan niet vermeden kon worden. Bijvoorbeeld, het Three Miles Island ongeluk heeft een element toegevoegd aan de veiligheidsanalyse dat men eerder zwaar onderschat had: de verschillende opeenvolgende “verkeerde beslissingen” genomen door de operatoren, gebaseerd op gebrekkige informatie, stress en een aantal psychologische elementen, zoals het vasthouden aan een hypothese (namelijk, dat er teveel water in de reactor aanwezig zou zijn) terwijl er duidelijke aanwijzingen zijn dat dit niet het geval is. Men was er eerder (verkeerdelijk) van uitgegaan dat de operatoren “rationele” beslissingen zouden nemen als functie van de gegevens waarover ze beschikten, en dat die beslissingen elke keer opnieuw “geëvalueerd” zouden worden. Met andere woorden, hoewel het initieel te begrijpen is dat de operator dacht dat er teveel water was, was die beslissing achteraf niet meer in overeenstemming met de objectieve gegevens waarover de operator later beschikte, maar hij hield vast aan zijn eerste hypothese (dat was dus een onverwachte

111 Zie bijvoorbeeld <http://www.hse.gov.uk/nuclear/tolerability.pdf> of <http://www.physics.isu.edu/radinf/np-risk.htm>

correlatie tussen de verschillende vertakkingen). Het is enkel bij de ploegwissel in de morgen dat die vicieuze cirkel is doorbroken.

Het is de bedoeling van een veiligheidsanalyse om “in simulatie” (of in “war games” als men wil) vele hypothetische wegen naar de accidentele situatie te analyseren, alsof ze een echte situatie betreffen. Zo moet men niet wachten op een echt ongeluk om er de lessen uit te trekken. Niettemin corrigeren de voortdurende meldingen van (kleine en minder kleine) incidenten deze analyses. Vroeger gebeurden deze analyses met de hand (men bedacht zelf allerlei “scenario's”), maar tegenwoordig wordt dit computergesteund gedaan. Dat heeft het voordeel dat men veel meer “paden” kan analyseren, en dus minder gemakkelijk een mogelijk pad overslaat. Bij deze analyses dient men natuurlijk zo nauwkeurig mogelijk het effect van een bepaalde gebeurtenis op de reactor te voorspellen (neutronenflux, warmteproductie, druk,...). Het is bijgevolg belangrijk voor de veiligheid dat men het gedrag van een reactor goed kan berekenen en voorspellen, omdat het deel uitmaakt van de analyse van alles wat fout (en niet fout) kan gaan.

Als men betrouwbare kansen voor elke vertakking kan invullen, en men heeft de belangrijkste takken naar een accidentele situatie allemaal “beet”, dan kan men een schatting bekomen van de kans dat de genoemde accidentele situatie zich zal voordoen. Het is op die manier dat men aan soms belachelijk kleine kansen komt. Natuurlijk is die voorspelling maar zo goed als de gegevens die men erin stopt, en zoals gezegd, kent men vaak de kansen op bepaalde fenomenen (wat is de kans dat een pomp faalt ?) niet heel goed, vooral als ze zeldzaam zijn, en kent men niet altijd de correlatie tussen die kansen (wat is de kans dat een tweede pomp, van dezelfde fabrikant, gaat falen als de eerste pomp reeds gefaald heeft ?...). Met andere woorden, men kan fouten maken in de veiligheidsanalyse, en de uiteindelijke kansen op een ongeluk verkeerd inschatten, als men de tussenliggende kansen niet goed kent. Dat is een kritiek die men vaak uit op dit soort analyse, maar men mist dan het hele punt in een veiligheidsanalyse. De bedoeling is niet om een “uiteindelijke kans op ongeluk” te berekenen, maar eerder *om alle wegen naar een accidentele situatie te analyseren*. Men dient natuurlijk wel een ruw idee van de kansen te hebben, om zich kunnen te concentreren op de zwakste schakels. Dat is namelijk de hoofdbedoeling van een veiligheidsanalyse: het vastleggen van de meest waarschijnlijke paden naar een ongelukssituatie. Dat zijn de gegevens die ons toelaten om remedies te bedenken voor deze paden door trachten de kansen bij de knooppunten te verminderen, of door trachten extra knooppunten (obstakels) in deze paden in te schakelen. Niettemin geeft deze analyse, ook al kan men de precieze numerieke waarden in twijfel trekken, een idee van het objectieve risico: de kans per jaar dat het gebeurt en van de kostprijs van het gebeuren in mensenlevens, besmet terrein, enz.... Men kan gelijkaardige analyses doorvoeren voor andere menselijke activiteiten of natuurrampen. Hieruit volgt wat we reeds eerder ruw geschat hebben¹¹²: het objectieve risico van kernenergie in het Westen is duizenden malen kleiner dan van andere risico's, tenminste zolang men zich houdt aan de veiligheidscultuur die ingesteld is. Als men de hele veiligheidscultuur echter aan de kant zet (of zelfs nooit beschouwd heeft), dan kan kernenergie een bijna even riskante bezigheid worden als andere menselijke industriële activiteiten, zoals de chemische nijverheid of dammen bouwen. Het blijft echter zelfs in de meest roekeloze situaties nog steeds veiliger dan autorijden. Chernobyl heeft dat aangetoond.

Het is niet omdat een technologie “veel veiliger” is dan andere activiteiten, dat men op zijn lauweren dient te rusten. Men vindt middelen om de “gevaarlijkste paden” veiliger te maken, door het verminderen van de kansen, of door het plaatsen van extra obstakels. Als dusdanig is er een

112 Voor een ietwat ludieke maar serieuze lijst: <http://www.psandman.com/articles/cma-appb.htm#B-5>

voortdurende verbetering van de veiligheid in nieuwe ontwerpen, of in verbeteringen van bestaande centrales. Maar hier is iets ironisch: men valt soms de nucleaire sector aan omdat er “nieuwe veiligheidsmaatregelen nodig zijn” in een centrale, wat laat doorschemeren dat het voordien dus, in tegenstelling tot wat men beweert, “niet veilig” zou zijn. Elke actie die kernenergie (in het Westen) zo veilig maakt, namelijk een veiligheidscultuur, risico analyses, het melden van incidenten, het voortdurend verbeteren van de veiligheid gebaseerd op gesimuleerde of waargenomen incidenten, ... wordt gezien als een “bewijs” dat het een intrinsiek onveilige activiteit zou zijn. Ironisch genoeg zou de kernenergie sector een veel beter “veiligheidsimago” bekomen mocht het enkel maar zware ongelukken melden die een grote impact hebben, geen analyses van de “paden naar ongeluk” doorvoeren en geen nieuwe veiligheidsprocedures doorvoeren. Objectief gezien zou de veiligheid dan zwaar achteruit gaan, maar het veiligheidsimago zou beter worden (wat niet weet, niet deert...).

Tenslotte een heel fundamentele opmerking: een veiligheidsanalyse gaat er niet van uit dat alles “perfect moet werken”, maar is eerder gebaseerd op de onvermijdbare realiteit dat er voortdurend dingen mis gaan. *Het gaat hem niet om het vermijden van alle fouten, maar eerder om het vermijden, of het verminderen van de kans, van die fout-sequenties die aanleiding geven tot een ongeluk.* Het is niet omdat er een pomp is in panne gevallen, of een operator een verkeerde beslissing heeft genomen, dat kernenergie onveilig is. De veiligheid schuilt niet in het vermijden dat een pomp in panne valt (dat kan men niet!), of dat een mens een fout maakt. *De veiligheid schuilt hem in de opeenvolging van obstakels in het pad van initiële fout naar ongeluk met zware gevolgen.* Anti-nucleaire activisten vallen de sector soms aan met beweringen dat er ontwerpfouten zijn, of dat er iets is stukgegaan, enzovoort. Bij autoriteiten, bijvoorbeeld, zijn de paden van fout naar ongeluk vrij klein. Als de initiële fout is: de chauffeur is in 't slaap gevallen, dan zijn er niet veel obstakels meer tot aan een ongeluk! Als de initiële fout is: “de remmen gaan stuk”, dan gaat het ook heel snel heel fout. Vandaar dat men soms denkt dat “een fout” gelijkgesteld is met “bijna zo goed als zeker een ongeluk”. En vandaar dat de paniek om het hart slaat als men hoort dat in “kerncentrale X men ontdekt heeft dat pomp Y niet werkte”.

Met andere woorden, met een voldoende veiligheidscultuur is kernenergie een activiteit met een relatief hoog potentieel gevaar (maar niet veel erger dan sommige andere industriële activiteiten), en met heel klein risico (veel kleiner dan de meeste andere industriële activiteiten). Autoriteiten is een activiteit met een relatief klein potentieel gevaar (een “individueel maximaal ongeluk” veroorzaakt ten hoogste enkele doden) en met vrij groot risico (er vallen vele doden per jaar). Men dient goed het onderscheid tussen beide te maken en te beseffen dat het concept dat telt, niet het potentiële gevaar is, maar wel het risico.

3.8.c Veiligheidsprincipes

De twee grote veiligheidsprincipes zijn: “verdediging in diepte” en “passieve veiligheid”.

Verdediging in diepte wil gewoon zeggen *dat men elk mogelijk pad van fout naar ongeluk zo lang mogelijk maakt*, met verschillende obstakels langsheen het pad, liefst van verschillende aard om mogelijke onverwachte correlaties tegen te gaan. Men bewerkstelligt dat op 3 vlakken:

- vermijden dat de normale gang van zaken verstoord wordt: bijvoorbeeld, vermijden dat de splijtstoffen oververhitten, of dat er een onverwachte vermogenspieken optreden ; redundantie van instrumentatie.

- Beschermen in het geval fouten optreden: noodsystemen (nood koelpompen, nood generatoren...), automatische systemen die de reactor stoppen bij detectie van een abnormale toestand, overdruk beschermingen.
- Verminderen van de consequenties van een ongeluk: decontaminatie systemen, bunkers...

Als men de twee “referentie ongelukken”, namelijk Three Miles Island enerzijds, en Chernobyl anderzijds, vergelijkt, dan kan men duidelijk het effect waarnemen van de “verdediging in diepte”. Niettegenstaande dat in beide gevallen een groot deel van het ongeluk te wijten was aan opeenvolgende verkeerde operator handelingen (in het ene geval, door een verkeerd begrijpen van de instrument lezingen, in het andere door botte incompetentie en roekeloosheid), ziet men dat in het TMI ongeluk, de verdediging in diepte goed werkte, terwijl in Chernobyl, waar nergens sprake was van zulk een idee, alle factoren meewerkten om het ongeluk zo zwaar mogelijk te maken: het ontwerp was helemaal niet gebaseerd om te vermijden dat de normale gang van zaken verstoord werd (positieve temperatuurscoëfficiënt, slecht ontworpen controlestaven die veel te traag werkten, brandbaar grafiet), de noodsystemen waren afwezig of gemakkelijk uitschakelbaar, en er was niks voorzien om de gevolgen van een ongeluk in te dijken (geen bunker, geen drukvat, geen beveiliging of blusmiddel tegen het brandende grafiet...).

Passieve veiligheid bestaat erin dat enkele essentiële condities om een zwaar ongeluk kunnen te vermijden, niet (alleen) door systemen bewerkstelligd worden, maar *deel uitmaken van de natuurkunde van het ontwerp*. Een essentieel punt is dat als het serieus fout gaat, op zijn minst de kettingreactie moet kunnen stoppen. Bij Chernobyl is die reactie nog meer dan een dag doorgegaan. Een ander punt is dat het niet mogelijk mag zijn (wat er ook gebeurt en wat de operator ook doet) om een hele hoge vermogenspiek te bekomen. Ook al mogen er natuurlijk (actieve) systemen bestaan die dat bewerkstelligen, het ontwerp moet zo gemaakt zijn dat een hoge vermogenspiek fysisch gewoon onmogelijk moet zijn. De vermogenspiek kan men vermijden door een (snel genoeg werkende, SL-1 indachtig) negatieve globale temperatuurscoëfficiënt te bekomen in alle denkbare situaties ; een gelijkaardig effect moet bestaan om passief de criticiteit tegen te gaan in extreme situaties. We herinneren eraan dat in Chernobyl geen enkel zulk principe aanwezig was. Passieve veiligheid voert geen extra obstakels in op het pad naar het ongeluk of verandert de kans niet van sommige vertakkingen, *passieve veiligheid elimineert gewoon zekere paden die fysisch onmogelijk geworden zijn*.

3.8.d Typische fout-toestanden

Elk pad naar ongeluk is natuurlijk specifiek, maar men kan ze toch wel in een aantal categorieën indelen. Ze hebben meestal een Engelstalige benaming:

- “Loss of flow” (LOFA) en “Loss of coolant” (LOCA) ongelukken. De reactor (actief of uitgeschakeld) verliest zijn primair koelmedium (het primaire water in een druk water reactor) of dat koelmiddel vloeit niet meer. Het effect is in elk geval een sterke stijging van de temperatuur. Men rekent hier in de eerste plaats op een passief veiligheidsmechanisme om de reactie stop te zetten. Dat lost het probleem niet helemaal op, maar het ergste zal vermeden worden door de voornaamste bron van warmte, namelijk de kettingreactie, stop te zetten. Als een LOCA te lang duurt, dan kan men een smelten van het reactorhart bekomen. Maar zelfs dan is er nog niets aan de hand aan de buitenkant. Een gesmolten reactorhart heeft natuurlijk wel de installatie binnenin zwaar beschadigd, maar het zit nog in het stalen drukvat en binnen in de bunker. Men zal wel vroeg of laat voor koeling moeten zorgen, om

de warmte van het radioactieve verval weg te halen, eventueel met extern koelwater om de integriteit van die begrenzingen intact te houden.

- “Loss of heat sink” (LOHA) ongeluk. Het primaire circuit staat zijn warmte af aan een secundair circuit dat de warmte op een of andere manier naar buiten brengt. Een probleem met dit systeem zal ervoor zorgen dat het primaire systeem zijn warmte niet meer kwijt kan. Opnieuw is de negatieve temperatuurscoëfficiënt hier belangrijk, om een te grote warmteontwikkeling in het primaire circuit snel tegen te gaan. Een LOHA kan een voorloper zijn van een LOCA.
- “Reactivity insertion” (RIA) ongeluk. Op een of andere wijze verhoogt men ongewenst de reactiviteit. Dat kan gebeuren door een ongewenst uitstoten van de controlestaven, maar, afhankelijk van het reactor type, ook op andere wijzen. Bijvoorbeeld, in een kokend-water reactor kan een te grote koeling leiden tot een RIA situatie. Als men niet oplet kan men een vermogenspiek bekomen. Opnieuw rekent men op een passief mechanisme om een belangrijke vermogenspiek onmogelijk te maken, met andere woorden, het ontwerp moet zo bedacht zijn dat een RIA niet tot een catastrofe leidt.
- “Anticipated Transient Without Scram” (ATWSA). Er zijn automatische controlesystemen die ervoor zorgen dat wanneer een of andere parameter niet correct is, de reactor automatisch een “noodstop” ondergaat (snel inschuiven van de controlestaven). Een ATWSA situatie is de mogelijkheid dat die systemen falen en dat de reactor dus niet gestopt wordt.

Zoals gezegd is iedere “pre-accidentele” situatie specifiek, maar bovenstaande lijst geeft de grote categorieën aan waarin de meeste ernstige situaties kunnen geklasseerd worden. Men dient dan noodsystemen en procedures specifiek op die toestanden te bedenken. Bijvoorbeeld, in een ontwerp van een drukwater reactor, zijn er vaten met water met een boorzout in opgelost, die boven het reactorvat zitten. Bij een LOCA situatie gaan de kleppen van die vaten door de drukvermindering vanzelf open (passief) en vloeit extra koelwater van die vaten in het reactorvat. De booroplossing helpt ook de kettingreactie te stoppen (tweede passief veiligheidssysteem), mocht die nog niet helemaal zijn stilgevallen op het ogenblik van het begin van het LOCA.

3.8.e Passieve veiligheid

Passieve veiligheid is via de natuurkundige principes van de constructie, en niet door een actief systeem, trachten volgende eigenschappen te bekomen:

- stoppen van de nucleaire reactie in abnormale situatie
- begrenzen van het maximale nucleaire vermogen
- trachten een evenwicht te bekomen tussen geproduceerde warmte en afgevoerde warmte

Hoewel de eerste twee doelstellingen, namelijk het stoppen van de reactie in het geval van een abnormale toestand en het begrenzen van het maximale vermogen, reeds lang is geïntegreerd in Westerse reactoren, tracht men nu ook de noodkoeling via volledig passieve mechanismen laten te functioneren, wat er normaal toe zou moeten leiden dat het smelten van het hart fysisch onmogelijk wordt. Met andere woorden, de vooruitgang op het vlak van passieve veiligheid zit hem in het derde punt, dat nog niet overal helemaal is geïntegreerd.

In een recent ontwerp van een drukwater reactor, de AP-600, plaatst men hele grote tanks water boven het reactor vat. Bij een LOCA vloeit dat water dan natuurlijk in de reactor, en door natuurlijke convectorie in de grote watertank wordt dan voldoende koeling voorzien om de resterende radioactieve vervalhitte te evacueren. Een ander ontwerp van een druk water reactor, de PIUS reactor, houdt het drukvat van de reactor ondergedompeld in een grote piscine van boor-rijk water. Een lek leidt dan onmiddellijk tot het stoppen van de reactie, en de thermische capaciteit van de piscine is groot genoeg om de vervalwarmte op te vangen zonder problemen.

Als argument tegen kweekreactoren hoort men soms dat dat veel gevaarlijker reactoren zijn dan standaard drukwater reactoren. Hoewel de ontwerpen ingewikkelder zijn, zijn de principes van passieve veiligheid niettemin volledig gerespecteerd. Men heeft dat experimenteel vastgesteld tijdens een aantal tests op de EBR-II reactor (experimental breeder reactor II). Men heeft gewoon de koeling uitgeschakeld, zonder de controlestaven terug te plaatsen, en men heeft alle actieve veiligheidssystemen ook uitgeschakeld. De negatieve temperatuurscoefficient heeft de reactie gestopt, en de temperatuur is gestegen van de normale 500 graden tot ongeveer 750 graden, om nadien terug te vallen. Natuurlijk had men deze test eerst gesimuleerd op allerlei wijzen, maar de daadwerkelijke uitvoering toont aan dat een snelle kweekreactor ook volledig passief veilig kan gemaakt worden.

Hoofdstuk 4 Stralingstransport – neutronica

4.1 Wat is stralingstransport ?

4.1.a Motivering

Dit is een wat technischer hoofdstuk ; er komen wat meer formules in voor, die men kan overslaan als men daar niet zo van houdt. In dit hoofdstuk tracht ik van de principes uiteen te zetten waarop de berekeningen van stralingstransport problemen zijn gebaseerd. Deze komen in de kernenergie voornamelijk op twee plaatsen kijken: enerzijds in de kernreactor zelf: het fenomeen van de kettingreactie, waarbij neutronen die vrijkomen door fissie van splijtbare kernen, andere kernen al dan niet gaan splijten, enz... De hele boekhouding van zowel de neutronen, als van de (getransmuteerde) kernen is niets anders dan een (vrij ingewikkeld) stralingstransport probleem. Men noemt dit deel van het stralingstransport soms wel “neutronica”. De meeste veiligheidsaspecten van een kernreactor worden bepaald door het stralingstransport probleem, omdat het ontwikkeld nucleair vermogen daardoor bepaald wordt. Anderzijds speelt stralingstransport een belangrijke rol in de stralingsbescherming. Zoals we gezien hebben, is een van de belangrijkste manieren om aan stralingsbescherming te doen, het plaatsen van materiële schermen tussen de bron en de mensen en het milieu dat tegen ioniserende straling dient te worden beschermd. Uiteraard is de bedoeling van dat materiële scherm dat het interageert met de straling. Als dusdanig wordt de straling veranderd ; sommige straling verandert (energie, richting), sommige straling verdwijnt (absorptie), sommige nieuwe straling ontstaat ook ; ook wordt (aan een veel langzamer tempo) de materie veranderd (transmutatie). Ook de evolutie van de afgewerkte brandstoffen in de tijd door radioactief verval, en het bijhorende aspect van de afvalberging valt onder dit luik. De precieze berekening van deze fenomenen, die ons bijvoorbeeld toelaat om dosimetrische grootheden uit te rekenen, is ook een stralingstransport probleem. We kennen alle individuele processen die verantwoordelijk zijn voor deze veranderingen, zowel van de straling als van de materie – op zijn minst op een statistische wijze: we kennen de kansen dat een of ander proces gaat gebeuren op microscopisch vlak. We hebben te maken met voldoende grote aantallen micro-gebeurtenissen om in vele gevallen gemiddelde waarden gelijk te stellen aan macroscopische grootheden.

De totale (macroscopische) boekhouding van hoe de straling verandert van plek tot plek en doorheen de tijd evenals hoe (op een langzamer tijdschaal) de materie hierdoor (of spontaan) verandert is het onderwerp van het stralingstransport. Het is “gewoon” het toepassen van de boekhouding van al die gekende microscopische fenomenen.

Het probleem dat zich stelt is essentieel een wiskundig probleem. Voor de lezer die enige allergie heeft ontwikkeld aan zulke dingen: U kan zonder problemen de meer technische delen overslaan. We wensen hier enkel enkele principes van de berekeningen van stralingstransport aan te halen voor twee redenen. Enerzijds geeft het een “gevoel” voor wat er in zo een berekening gedaan wordt (ook al gaat men die zelf niet doorvoeren) en als dusdanig een minder grote onwetendheid over wat er gaande is. Als dusdanig kan men met wat meer kennis ter zake een debat volgen of voeren over het onderwerp, en zich zelf vergewissen van de redelijkheid of de onwaarschijnlijkheid van sommige beweringen. Maar anderzijds is het ook zo dat zelfs met gewoon wat kwalitatieve kennis, men

intuïtief verschillende effecten die volgen uit gedetailleerde berekeningen, kan begrijpen. Sommige van deze effecten zijn heel belangrijk betreffende de veiligheid van kernenergie, en aangezien op dat vlak vaak totaal onjuiste dingen worden verteld door anti-nucleaire activisten (bewust, of omdat ze het zelf niet begrijpen), lijkt het mij interessant, voor de lezer die bereid is mij hierbij te volgen, om een idee te geven van hoe die effecten tot stand komen. Het voorbeeld dat natuurlijk voor ogen komt is de “negatieve temperatuurscoëfficiënt” van een kernreactor. Het lijkt een techniciteit, maar het is een van de belangrijkste veiligheidsaspecten van een moderne reactor: een reactor met negatieve temperatuurscoëfficiënt is zo ontworpen, dat wanneer hij (te) warm wordt, de kettingreactie vanzelf vermindert of zelfs stopt. Het is de ultieme “ingebouwde noodrem” die de reactor zal stoppen als al de rest faalt. Bij de Chernobyl reactor was dit mechanisme niet aanwezig, wat de reactor heeft toegelaten tot meer dan 30 keer zijn maximum vermogen te laten leveren (en dus te ontploffen). Als men dat zo hoort, dan lijkt dat een “magische bewering die we dan maar zullen geloven zeker”. Als men kwalitatief (zelfs zonder zelf al het cijferwerk door te voeren) begrijpt hoe het tot stand komt, dan kan men een grotere geloofwaardigheid hechten aan het concept. We beginnen met het definiëren van de relevante grootheden in het stralingstransport.

4.1.b Inleidende concepten: grootheden.

Vele fysische grootheden hangen af van de plaats en van de tijd. Het archetype voorbeeld is temperatuur. De temperatuur in de kelder is niet dezelfde als die in de badkamer of nog als de temperatuur in de oven. Bovendien is de temperatuur ‘s morgens niet dezelfde als de temperatuur ‘s middags. In de natuurkunde zegt men dat zo een grootheid afhangt van ruimte en van tijd. Men heeft de neiging om grootheden die afhangen van ruimte en van tijd een “veld” te noemen - vandaar dat we spreken over een “stralingsveld” of een “magnetisch veld” - het is wat minder gangbaar, maar men kan dus ook spreken over het “temperatuursveld”. We kunnen elke plek in de ruimte aangeven door drie getallen, de drie coördinaten van die plek (in een zeker referentiekader). Technische tekenaars weten dat heel goed, maar vaak (als ze van de oude stempel zijn) werken ze slechts met twee coördinaten: we werken in “het vlak van het tekenpapier”. We nemen als referentie bijvoorbeeld de linker onder hoek van het blad, en meten de horizontale coördinaat x (zeg maar, in centimeter) en de verticale coördinaat y (ook in centimeter bijvoorbeeld), en met die twee getallen (x,y) duiden we gelijk welk punt aan op het blad. Op dezelfde manier kunnen we dat doen in de ruimte, maar we hebben daar, zoals gezegd, nog een derde getal voor nodig, de hoogte, z . Het is standaard praktijk om de 3 coördinaten in de ruimte, x,y en z te noemen.

De tijd kan voorgesteld worden door een enkel getal, meestal t genoteerd. Men noemt t soms ook de “tijdscoördinaat”. Die t wordt bepaald vanaf een referentie ogenblik.

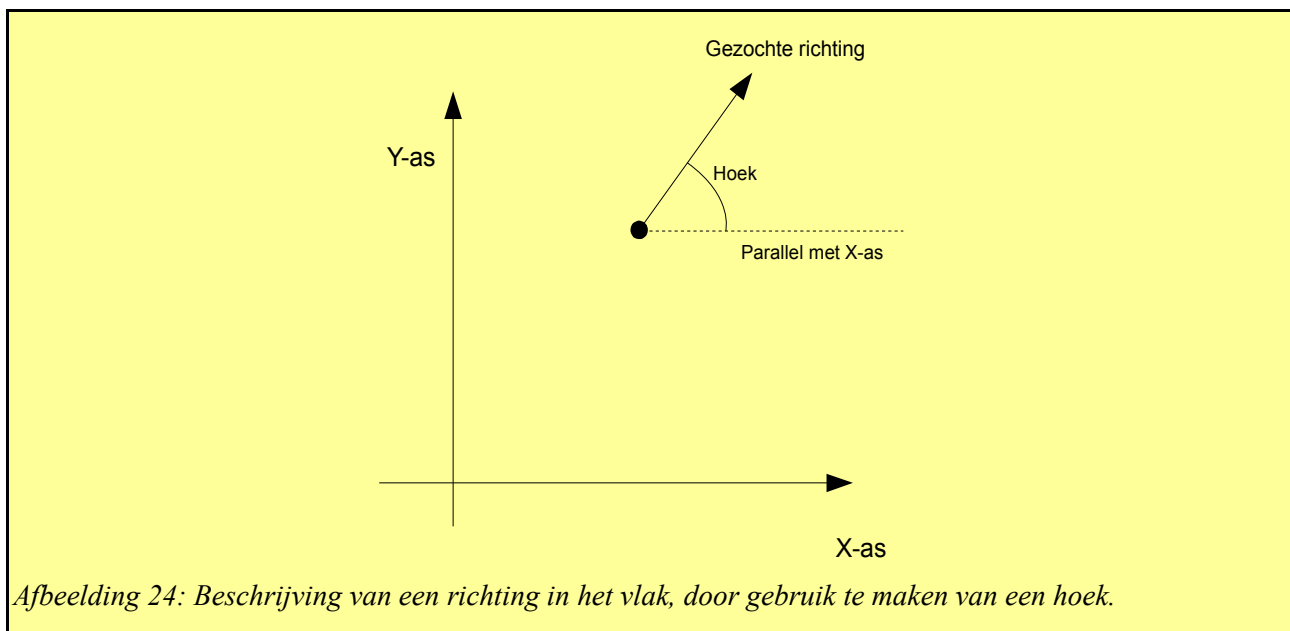
We zien dus dat een beschrijvende fysische grootheid (bijvoorbeeld onze temperatuur) zal afhangen van de plaats (x,y,z) en van de tijd t . In de wiskunde noteert men “dingen die afhangen van”, functies. Een beschrijvende fysische grootheid (een “veld”) is dus niets anders dan een grootheid die functie is van x, y, z en t . Als we onze temperatuur door het symbool T voorstellen, dan hebben we $T(x,y,z,t)$. Met zulk veld beschrijven we de temperatuur, overal en altijd. Het volstaat om voor (x,y,z) de coördinaten van de keukenoven te nemen, en voor t , het ogenblik waarop die oven opgewarmd is, en $T(x,y,z,t)$ staat dan voor de temperatuur in de oven, op dat ogenblik. Natuurlijk, het is niet omdat we nu een mooi naampje bedacht hebben voor die temperatuur, dat we ook de numerieke waarde kennen. De hele kunst zal erin bestaan om numerieke waarden voor velden uit te rekenen of te meten.

Als x, y, z en t reële getallen zijn, dan kunnen we ons denkbeeldig voorstellen dat er aan “elk denkbaar geometrisch punt in de ruimte en voor elk ogenblik” een waarde wordt toegekend. Dat kan een schokkende ervaring zijn, zich een getal inbeelden in “elk denkbaar geometrisch punt in de ruimte”. We zouden de filosofische toer kunnen opgaan, maar in de praktijk ligt men daar niet wakker van. Men gaat ervan uit dat de velden die ons interesseren, over kleine afstanden en tijdsveranderingen ook maar weinig veranderen. Als we de temperatuur in onze oven kennen op een bepaalde plek en op een bepaald ogenblik, dan gaan we ervan uit dat een millimeter verder, een halve seconde later, die temperatuur wel ongeveer dezelfde is. We gaan er meestal zelfs van uit (hoewel dat niet meer helemaal juist is), dat we slechts een getal nodig hebben om de temperatuur in de ganse oven weer te geven (meestal aangegeven op een paneeltje aan de voorkant van de oven). Dat is natuurlijk fout: als we een diepvries pizza in een oven stoppen die aan 210 graden is opgewarmd, dan zal de temperatuur aan het oppervlak van de (nog bevroren) pizza in het begin wel niet 210 graden zijn. Men zou een berekening kunnen maken om te weten hoe de temperatuur gaat verlopen binnenin de oven, maar om pizza te bakken moeten we dat allemaal niet weten: een enkele temperatuur in de oven is “goed genoeg”. Een gelijkaardige redenering zal ook gehouden worden in vele praktische fysische vraagstukken zoals een stralingstransport probleem: we kunnen de ruimte opdelen in blokjes waarbinnen we veronderstellen dat een enkele temperatuur kennen, goed genoeg is. Als dusdanig hebben we het conceptueel probleem van “een waarde in elk geometrisch punt in de ruimte” omgezet in een praktisch probleem van “een enkele waarde in elk blokje dat ons klein genoeg lijkt”.

Welke zijn de “velden” die ons interesseren? Temperatuur natuurlijk wel, maar in de eerste plaats interesseren we ons aan *de ruimtelijke dichtheid van elke nuclidenssoort* die in het vraagstuk een rol speelt. Dat wil zeggen, het aantal, zeg maar, U-235 nucliden per kubieke centimeter. In een homogeen materiaal is die dichtheid natuurlijk een enkel getal (we kunnen dus de geometrische vorm van het voorwerp gemaakt uit dat materiaal beschouwen als een van die “blokjes” waarbinnen we maar een waarde wensen te weten), maar we moeten opletten: het is niet omdat we met een homogeen stuk materiaal beginnen, dat het materiaal homogeen blijft. Laten we bij wijze van voorbeeld een bol van natuurlijk uranium beschouwen. De (aanvankelijke) dichtheid van U-235 nucliden is dan gelijk aan 0.7% van de nuclidendichtheid in uranium, wat gelijk is aan N_A nucliden per 238 gram of $4.2 N_A$ nucliden per kilogram in totaal en bijgevolg $0.029 N_A$ nucliden U-235 per kilogram; gezien de dichtheid van 19.2 g/cm^3 betekent dit (0.029×0.0192) dat er $0,00056 N_A$ nucliden per kubieke centimeter aanwezig zijn. Maar stel nu dat die bol in een bad van thermische neutronen geplaatst wordt. Intuïtief kan men inzien dat er veel meer U-235 nucliden aan de buitenkant van de bol splijting gaan ondergaan (door nucleaire interactie met de neutronen) dan in het midden van de bol. Als dusdanig gaat de verdeling van de U-235 nucliden na die bestraling nog in de buurt zijn van $0.00056 N_A$ nucliden U-235 per kubieke centimeter in het midden van de bol, maar een kleinere waarde aan de rand, en een gelijkmatig afnemend verloop als we van het centrum naar de rand van de bol gaan. Als we dit op een of andere manier numeriek willen uitwerken, zal het nodig zijn om onze bol op te delen in kleinere volumes (bijvoorbeeld: schillen) waarin we weer kunnen veronderstellen dat een enkele waarde van de dichtheid “goed genoeg” is. De dichtheid van nucliden zal dus veranderen onder invloed van stralingsvelden. Omgekeerd zal de dichtheid van nucliden ook een invloed uitoefenen op de stralingsvelden zelf, als die straling met die nucliden interageert. De dichtheid van nucliden zal ook spontaan veranderen in de tijd als er radioactieve processen optreden. Het is nu wel zo dat als we veronderstellen dat de materie onbeweeglijk is (we beschouwen geen mechanische of hydrodynamische toestanden), dat de radioactieve evolutie van de dichtheid van nucliden meestal strikt lokaal is. We bedoelen hiermee

dat het radioactieve verval in een punt onafhankelijk is van het verval ergens anders¹¹³. Dat heeft voor gevolg dat een homogeen stuk materie dat radioactieve stoffen bevat, ook homogeen zal blijven, en dus met een enkele waarde beschreven kan worden, in plaats van met een veld. Dat is wat er meestal impliciet gedaan wordt als we over radioactiviteit spreken: we beschouwen “het totale aantal kernen” zonder rekening te houden met hun eventuele ruimtelijke verdeling. Radioactief verval is, qua berekening, het eenvoudigste geval van “stralingstransport” hoewel er strikt genomen niet veel getransporteerd wordt.

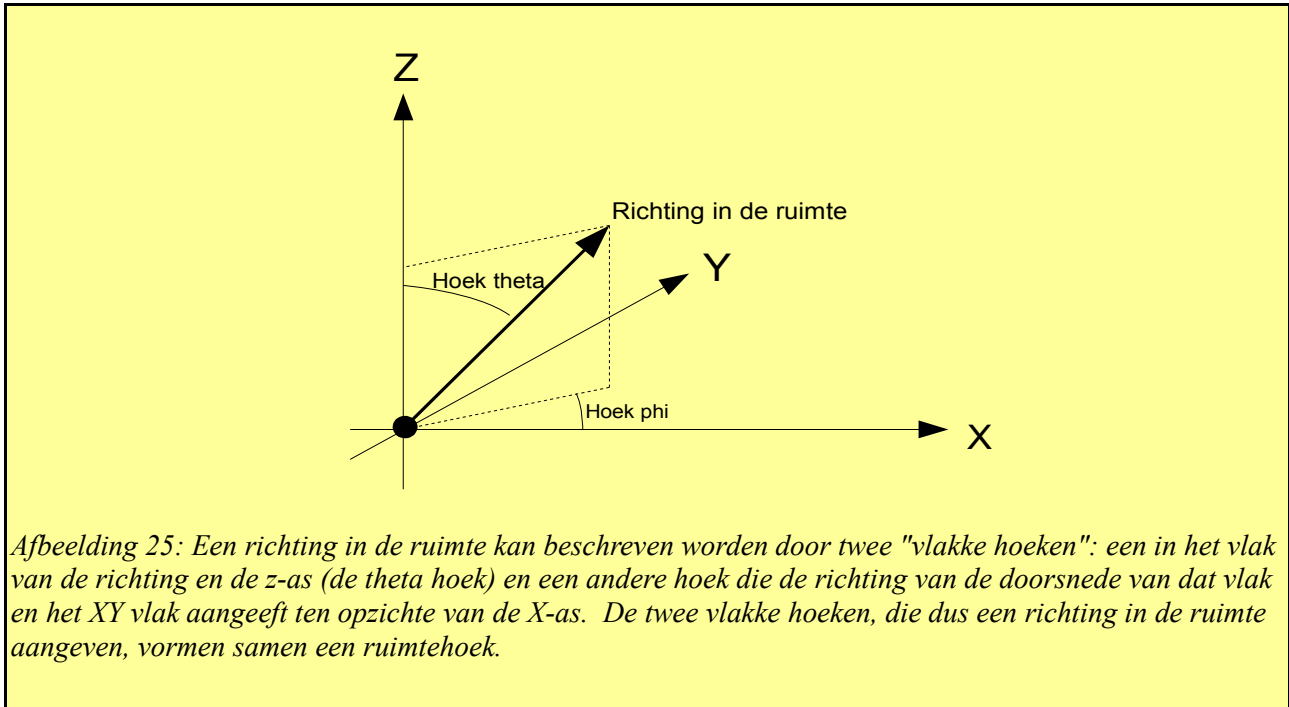
Wat ons natuurlijk meer interesseert is de beschrijving van stralingsvelden, die niets anders zijn dan de beweging van kleine deeltjes. Beschouwen we het geval van neutronen. Hoe kunnen we de bewegende neutronen beschrijven? Neutronen kunnen in verschillende richtingen bewegen, en met verschillende snelheden. Op een bepaald punt P in de ruimte (opnieuw, we beschouwen eigenlijk een klein blokje) kunnen er vele neutronen bewegen, in verschillende richtingen tegelijk, en met verschillende energieën. Aangezien we ons niet interesseren aan individuele neutronen, maar aan gemiddelden van grote hoeveelheden neutronen, moeten we dus op het punt P, *voor elke richting en voor elke energie*, aangeven hoeveel neutronen er gemiddeld in die richting bewegen met de



gegeven energie. Hoe definieert men een “richting”? Op een blad papier is een richting gemakkelijk gedefinieerd: men neemt *de hoek* tussen een referentierichting (bijvoorbeeld, de onderkant van het blad, naar rechts), en de richting die men wil bepalen. Een enkel getal (de hoek) geeft dus een richting aan op een blad papier, zoals geïllustreerd in figuur 24. In de ruimte heeft men twee hoeken nodig. Men neemt eerst het denkbeeldig verticaal vlak dat de richting bevat (elke rechte lijn in de ruimte ligt in een verticaal vlak), en men beschouwt de hoek die dat verticaal vlak vormt met een horizontale referentielijn (meestal de x-as). Die hoek noemt men traditioneel ϕ . Vervolgens kijkt men in dat verticale vlak (we bevinden ons nu in hetzelfde geval als met een blad papier), en daar vormt onze gewenste richting ook een hoek met een referentie lijn (meestal de verticale lijn of z-as). Die tweede hoek wordt traditioneel θ genoemd. Dit wordt geïllustreerd in

¹¹³We moeten opletten: de straling die vrijkomt bij een radioactief verval kan indirect wel de nuclidendichtheid ergens anders beïnvloeden via nucleaire reacties. Indien dat effect optreedt, dan zal een aanvankelijk homogeen stuk materie niet noodzakelijk homogeen blijven.

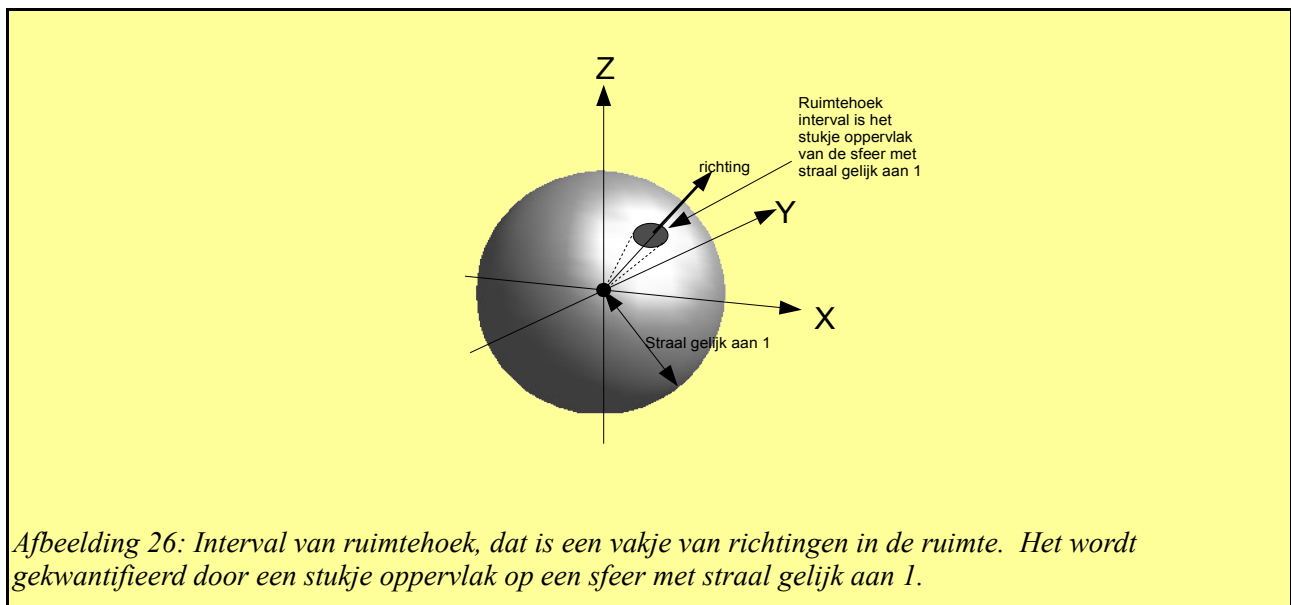
afbeelding 25. Als dusdanig geven de twee hoeken samen een enkele richting in de ruimte. Men noemt daarom zo een koppel hoeken: een *ruimtehoek* en men noteert die soms Ω maar men moet niet vergeten dat dat symbool dus voor twee (gewone) hoeken staat.



In de praktijk gaan we natuurlijk werken met een zeker aantal richting "vakjes" (en niet "alle richtingen") en een zeker aantal energie "vakjes" (en niet "alle energieën"). Men definieert een aantal energie-intervallen en gaat na hoeveel neutronen zich, nabij het punt P, in elk interval bevinden. Op dezelfde wijze gaat men een zeker aantal richtingen definiëren door een aantal intervallen voor de hoeken θ en ϕ te bepalen (men spreekt losjes van "intervallen van Ω "). Hier komt een techniciteit bij kijken: de "grootte" van een ruimtehoek interval is niet, zoals men zou kunnen denken, $d\theta d\phi$ maar is gegeven door het stukje oppervlak van een sfeertje met straal gelijk aan 1, dat, gezien vanuit het middelpunt van dat sfeertje, binnen in het ruimtehoek interval ligt. Als we dus een interval hebben voor de gewone hoeken $(\theta, \theta + d\theta)$ en $(\phi, \phi + d\phi)$ dan kan men tonen dat de grootte van dat oppervlakje gelijk is aan: $d\Omega = \cos\theta d\theta d\phi$ voor kleine intervallen. De som van alle mogelijke ruimtehoek-intervallen is dan gelijk aan de totale oppervlakte van de sfeer met straal 1, en dat is dan gelijk aan 4π . In de formule is cos de cosinus functie, welbekend uit de driehoeksmmeetkunde. We illustreren dit in figuur 26.

We hebben nu (bijna) alle elementen ingevoerd die ons toelaten om een neutronen stralingsveld volledig te beschrijven: het volstaat om voor elk punt P met coördinaten (x,y,z) (in de praktijk een blokje!), voor elk ogenblik t (in de praktijk een tijdsinterval), voor elke energie E (in de praktijk een energie interval) en voor elke richting Ω het gemiddeld aantal neutronen te kennen die met energie E in de richting Ω bewegen op het tijdstip t "door het punt P".

Het kleine detail dat ons ontbreekt is de volgende beschouwing: stel, dat voor een gegeven stel $\{x=2\text{cm}, y=4\text{cm}, z=1\text{cm}, t=6\text{s}, E=20\text{eV}, \Omega=(30^\circ, 10^\circ)\}$ met bijhorende intervallen met afmetingen $\{dx, dy, dz, dt, dE, d\Omega\}$, we vinden dat er gemiddeld 1000 neutronen zijn. We noteren dat getal: $n(x, y, z, t, E, \Omega)$. We schrijven dat zo, omdat afhankelijk van elke waarde van x, y, \dots we een ander getal zullen vinden. Dat wil zeggen dat er in het tijdsinterval van t tot $t+dt$, duizend neutronen zijn die door het blokje dat opgespannen is tussen x en $x+dx$, y en $y+dy$, en z en $z+dz$ zijn gegaan die een energie hadden tussen E en $E+dE$ en die bewogen in de richting gegeven door Ω in het interval $d\Omega$. Prima. Maar hadden we nu bijvoorbeeld een kleiner tijdsinterval gekozen, $dt' = dt/4$, dan waren er in dat vier keer kleinere tijdsinterval natuurlijk vier keer minder neutronen doorgedaan, ofte 250. Voor de “afmetingen van het blokje” is de zaak iets subtieler. We kijken eigenlijk niet



naar de neutronen die “in het blokje” bewegen (er zijn er die erbinnen komen, er zijn er die erin blijven, er zijn er die erbuiten gaan), maar we kijken eerder naar het aantal deeltjes die doorheen een klein oppervlakje dat binnen het blokje past, en loodrecht op de richting staat van Ω . We noteren dat oppervlakje dS . Als we ons blokje nu groter maken, zodat de oppervlakte van dS drie keer groter wordt, dan zullen we natuurlijk drie keer meer neutronen tellen die doorheen dat vlakje gaan. Had ons energie interval vijf maal groter geweest $dE' = 5dE$, dan hadden we 5000 neutronen gevonden. Vandaar dat de interessante grootheid niet het aantal neutronen is die in al die intervallen ligt, maar het aantal neutronen in al die intervallen, gedeeld door alle interval groottes. Die grootheid noemen we: de neutron *fase flux* en beschrijft volledig het stralingsveld van de neutronen:

$$\phi(x, y, z, t, E, \Omega) = \frac{n(x, y, z, t, E, \Omega)}{dS dt dE d\Omega}$$

Deze grootheid hangt niet meer af van de grootte van de gekozen blokjes, de ruimtehoek intervallen, de tijds- en energie-intervallen zolang we kunnen veronderstellen dat de blokjes en de intervallen klein genoeg zijn. De bovenstaande grootheid zal het “werkpaard” vormen van alle stralingstransport berekeningen, want zij het geeft precies aan hoeveel deeltjes met welke energie waarheen gaan. Van deze grootheid kunnen we eenvoudiger grootheden afleiden die ons meer zullen interesseren bij bepaalde toepassingen.

In vele gevallen interesseert het ons niet in welke richting de deeltjes gaan. Bijvoorbeeld, om het aantal nucleaire interacties uit te rekenen heeft het geen belang vanuit welke richting het invallende

neutron komt: wat van belang is, is te weten hoeveel neutronen invallen, met welke energie. Ook qua stralingsdosis zijn we meestal niet geïnteresseerd in de richting van de ioniserende deeltjes: de schade die ze aanrichten is enkel afhankelijk van hun energie.

We maken daarom de som over alle ruimtehoek intervallen, en definiëren *de scalaire flux*:

$$\varphi(x, y, z, t, E) = \int \phi d\Omega$$

waarbij het symbool \int (het zogenaamde *integraal teken*) een gesofistikeerde manier is om te zeggen dat we de som maken over alle ruimtehoek intervallen (zie appendix). De scalaire flux wordt uitgedrukt in deeltjes per vierkante centimeter, per MeV en per seconde.

Als we gewoon deeltjes willen tellen, en geen rekening houden met hun energie, dan kunnen we nog een eenvoudiger grootheid bekomen door de som te maken over alle energie intervallen: we hebben dan *de totale flux* of het *deeltjes fluentie debiet*:

$$\varphi_T(x, y, z, t) = \int \varphi dE$$

waarbij opnieuw het integraalteken staat voor “som over alle energie intervallen”. De totale flux wordt uitgedrukt in deeltjes per vierkante centimeter en per seconde. Het is het aantal deeltjes dat per tijdseenheid doorheen een klein sfeertje gaat, gedeeld door de oppervlakte van de sectie van dat sfeertje. Dit is de grootheid die we ook tegengekomen waren in de definities van dosimetrische grootheden.

Als we uiteindelijk de som maken over alle tijdsintervallen, dan bekomen we *de deeltjes fluentie*, ook bekend uit de dosimetrie:

$$F_T(x, y, z) = \int \varphi_T dt$$

Voor fotonen, elektronen en alfadeeltjes kan men ook zulke grootheden invoeren. In een drukwater reactor is de totale neutronenflux in het hart van de reactor van de orde van $3 \cdot 10^{14}$ neutronen per seconde en per vierkante centimeter. De totale gammaflux is van een vergelijkbare grootte.

Naast de beschrijving van een stralingsveld door de faseflux en afgeleide grootheden zijn er nog andere grootheden die ons interesseren. Waarschijnlijk een van de belangrijkste is: de reactiesnelheid van bepaalde kernreacties. We drukken, voor een specifieke reactie, de *reactiesnelheid* uit als het aantal kernen die zulke reactie ondergaan in een blokje rond het punt P met afmetingen dx , dy en dz in een gegeven tijdsinterval dt . Laten we dat aantal kernen dat zulke reactie ondergaat, $n(x, y, z, t)$ noemen. Voor dezelfde reden als hierboven het geval was met de definitie van de fase flux, gaan we het aantal kernen dat de reactie ondergaat, delen door de relevante afmetingen van de intervallen van onze blokjes. De reactiesnelheid is dan gegeven door:

$$\tau(x, y, z, t) = \frac{n(x, y, z, t)}{dx dy dz dt}$$

en wordt uitgedrukt in aantal reacties per kubieke centimeter en per seconde.

Grootte orde: in een drukwater reactor is de reactiesnelheid van fissie van de orde van $9 \cdot 10^{12}$ splijtingen per kubieke centimeter en per seconde binnenin een stukje brandstof.

4.1.c Inleidende concepten: natuurwetten.

In het voorgaande hebben we de grootheden ingevoerd (meestal “velden” die functie zijn van ruimte en tijd, en soms nog van andere grootheden zoals energie, hoek...) die in principe alles wat we op het vlak van het nucleaire gebeuren willen weten, beschrijven. Het zijn echter niets anders dan symbolen die voor een grootheid staan: het is niet omdat we een keurige definitie hebben bedacht, en een mooi symbool hebben neergeschreven, dat we ook de numerieke waarde kennen van die grootheid, wat uiteindelijk is wat ons interesseert. Wat ons zal toelaten om daadwerkelijke berekeningen te maken, en numerieke waarden aan de bovenstaande grootheden toe te kennen, is het feit dat al die grootheden van elkaar en van zichzelf afhankelijk zijn, en die afhankelijkheden zijn natuurkundige wetmatigheden. Sommige zijn eerder van “boekhoudkundige” aard, andere zijn van ingewikkelder natuur, maar ze komen allemaal neer op het volgende: *we kunnen wiskundige relaties schrijven tussen alle bovenstaande grootheden*. Sommige van die wiskundige relaties zijn slechts benaderend juist, en sommige van die wiskundige relaties steunen op experimenteel waargenomen grootheden (zoals, bijvoorbeeld, werkzame doorsneden). Andere relaties zijn heel strikt waar. *Het “oplossen” van een stralingstransport probleem bestaat er dan in om, gebruik makende van bepaalde gegevens van het probleem (gekende bron, gekende toestand op een zeker ogenblik, gekende geometrie van de opstelling...), en gebruik makende van de wiskundige relaties die natuurkundige wetmatigheden voorstellen, trachten numerieke waarden toe te kennen aan de bovenstaande grootheden*. Jammer genoeg gaat dat niet altijd van een leien dakje.

Verschillende wiskundige relaties komen voort uit “natuurkunde wetten” die een zeker boekhoudkundig aspect hebben. Hiermee bedoelen we het volgende: als er in een bepaald blokje van de ruimte N_1 deeltjes zijn, en op een of andere manier verdwijnen er N_2 deeltjes (omdat ze het blokje verlaten, of omdat ze reageren en in de reactie verdwijnen), dan blijven er... $N_1 - N_2$ deeltjes over. Dat lijkt zo vreselijk eenvoudig en naïef, maar het is voor verschillende wiskundige relaties in stralingstransport het basisprincipe waarop ze gebaseerd zijn.

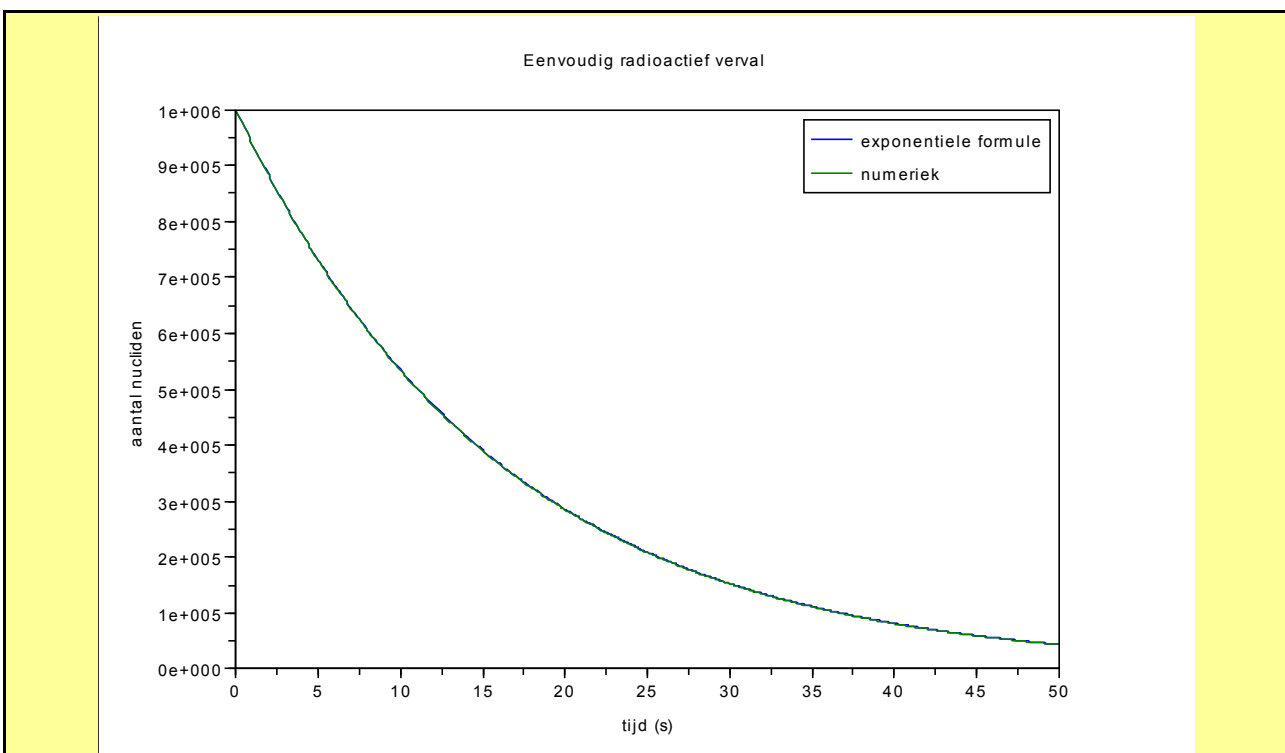
We illustreren dat met een eenvoudig voorbeeld: het eenvoudige radioactieve verval. Laten we, ik zeg maar wat, de nuclide fluor-20 (F-20) beschouwen. Als we naar de nuclidenkaart kijken, dan zien we dat F-20 een radioactieve nuclide is met een halfwaarde tijd van 11.07 seconden, en het verval is bèta verval. F-20 wordt dus de stabiele nuclide Ne-20 (neon gas). Een halfwaarde tijd van 11.07 seconden wil zeggen: een kans om te vervallen per tijdseenheid van $p = \frac{\ln(2)}{11.07s} = 0.0626 \frac{1}{s}$. Beschouw nu dat we in een blokje van de ruimte aanvankelijk N fluor-20 nucliden hebben, en dat die nucliden niet bewegen zodat ze uit het blokje niet ontsnappen. Laten we een klein tijdsinterval beschouwen (veel kleiner dan de 11 seconden), zeg maar, $dt = 0.1$ seconde. We kunnen stellen dat de bijhorende toename van het aantal kernen F-20 in dat tijdsinterval dt gelijk zal zijn aan $dN = -N p dt$. Het is namelijk de kans per tijdseenheid voor een kern om te vervallen maal het tijdsinterval dat we beschouwen (dat is de kans dat een kern, tijdens dat tijdsinterval, vervalt) vermenigvuldigd met het aantal kernen, die ons het gemiddeld aantal kernen aangeeft dat zal vervallen. De kans om te vervallen per kern, maal het aantal kernen, geeft ons het verwachte aantal kernen op de N die zullen vervallen. We schrijven een minteken, want de “toename” is natuurlijk een afname. Nu is dN niets anders dan $N(t+dt) - N(t)$, het verschil tussen het aantal kernen op tijdstip $t+dt$ en het aantal kernen op tijdstip t . Dat is immers wat men “de toename” noemt. We kunnen dus de vergelijking schrijven:

$$\frac{dN}{dt} = -N p$$

We kunnen een klein computer programmaatje schrijven dat, gebruik makende van deze

vergelijking, een numerieke waarde geeft voor het aantal kernen op tijdstip t . We nemen aan dat er aanvankelijk, zeg maar, een miljoen F-20 kernen aanwezig zijn. De volgende code is geschreven in een taal die begrepen kan worden door het vrije rekenprogramma *scilab*¹¹⁴ dat ook redelijk compatibel is met het commerciële pakket MATLAB:

```
clear // met een schone lei beginnen.
dt = 0.1 // het kleine tijdsinterval, in seconden.
p = 0.0626 // de kans per tijdseenheid voor een kern om te vervallen
t = 0:dt:50; // alle tijdsintervallen, van 0 tot 50 seconden.
lti = size(t);
steps = lti(2) - 1; // aantal stappen (een minder dan het aantal intervallen)
n(1) = 1000000; // de begin hoeveelheid: een miljoen kernen in het eerste interval
for i = 1:steps // we gaan over het aantal stappen lopen
n(i+1) = n(i) - dt * p * n(i); // onze fameuze natuurwet - boekhoudkunde.
end //for
```



Afbeelding 27: Vergelijking numerieke berekening en wiskundige formule voor het radioactieve verval van F-20 kernen.

Maar de vergelijking $\frac{dN}{dt} = -N p$ staat in de wiskunde bekend als een *differentiaalvergelijking* waarvan we een oplossing in formule vorm kunnen vinden. Dat is uitzonderlijk ; de meeste differentiaalvergelijkingen kunnen we niet met een formule oplossen, maar enkele belangrijke gevallen zoals deze dus wel. De oplossing is gegeven door: $N(t) = N_0 e^{-pt}$ waarbij N_0 het aantal kernen is op ogenblik $t = 0$. Dat was het eerdere exponentiële verval van radioactieve kernen, en we zien hier dat die exponentiële wet gewoon een gevolg is van een “boekhoudkundige redenering” nadat we hebben vastgesteld dat, voor radioactieve kernen, er een vaste kans per tijdseenheid bestaat dat ze vervallen. De “echte” natuurwet zit in dat laatste: het feit dat radioactieve kernen een

¹¹⁴<http://www.scilab.org/> Zie ook appendix C.

vaste kans per tijdseenheid hebben om te vervallen. Deze wet is niet vanzelfsprekend: voor mensen is het bijvoorbeeld niet waar (jonge mensen hebben een kleinere kans om te sterven dan oude mensen). Al de rest is “boekhoudkundig” en daar volgt, zoals we hierboven hebben aangetoond, automatisch die exponentiële wet uit.

We kunnen aan onze code het volgende toevoegen:

```
nexp = n(1)*exp(-p*t); // de voorspelling van het aantal kernen met de formule
```

en we kunnen de twee resultaten vergelijken met het volgende commando:

```
plot(t,nexp,t,n)
legend("exponentiele formule","numeriek")
xlabel("Eenvoudig radioactief verval","tijd (s)","aantal nucliden")
```

Het resultaat kan men bewonderen in figuur 27. We zien dat de wiskundige formule - het welbekende exponentiële verval van radioactieve kernen - een resultaat geeft dat ook numeriek goed bekomen wordt door de vergelijking “in kleine blokjes” op te lossen.

We hebben ons eerste “stralingstransport” probleem opgelost! Het lijkt natuurlijk een beetje simpel en dat is het ook, maar niettemin hebben we de essentiële stappen aangeraakt die in elk stralingstransport probleem naar voor komen: het kiezen van de relevante grootheden (hier de nucliden dichtheid $N(t)$), het opzoeken van de relevante natuurkundige eigenschap (hier de vaste kans voor een nuclide om te vervallen, p), het uitschrijven van de “boekhoudkunde” die daarmee gepaard gaat (hier, de vergelijking $\frac{dN}{dt} = -N p$), en tenslotte het oplossen van die vergelijking door de blokjes en intervallen klein genoeg te kiezen en de wetmatigheid toe te passen op elk blokje (hier zijn dat enkel tijdsintervalletjes van 0.1 seconde). Het is in dit geval ook zo dat er een wiskundige oplossing in de vorm van een formule bestaat wat ons toelaat om de twee te vergelijken, maar in het algemeen, voor wat ingewikkelder problemen, bestaat zo een formule-oplossing meestal niet.

Als tweede illustratie van de mengeling “natuurwet/boekhoudkunde” die ons de nodige vergelijkingen oplevert, beschouwen we: uitgaande van een stralingsveld (zeg maar, neutronen), en een nuclide dichtheid bepalen we een reactiesnelheid. Laten we concreet het volgende kiezen: de splijting van U-235 kernen onder invloed van neutronen. De natuurkunde zit in de werkzame doorsnede voor onze reactie van een neutron op onze nucliden in kwestie: de werkzame doorsnede is getoond in afbeelding 7 (de splijting werkzame doorsnede van U-235 als functie van de energie van het invallende neutron). In een punt P (een blokje) vallen er $n(x, y, z, t, E, \Omega) = \phi(x, y, z, t, E, \Omega) dS dt dE d\Omega$ neutronen in langs richting Ω doorheen een vlakje met doorsnede dS en met een energie in het interval dE tijdens het tijdsinterval dt . Als we ons voorlopig beperken tot deze categorie van neutronen (in energie en in hoek), die we als een “bundel” kunnen beschouwen met een doorsnede dS , en we kijken naar het aantal doelnucliden in het volume-element, dat gelijk is aan $N(x, y, z, t) dx dy dz$ dan geeft de definitie van de werkzame doorsnede ons het aantal reacties dat door deze neutronenbundel veroorzaakt wordt:

$$m(E, \Omega) = \sigma(E) \frac{n(x, y, z, t, E, \Omega)}{dS} N(x, y, z, t) dx dy dz$$

waaruit volgt:

$$m(E, \Omega) = \sigma(E) \phi(x, y, z, t, E, \Omega) dt dE d\Omega N(x, y, z, t) dx dy dz$$

Eerst en vooral kunnen we de som maken over alle ruimtehoeken. We definiëren dus:

$$m(E) = \int m(E, \Omega) = \sigma(E) \phi(x, y, z, t, E) dt dE N(x, y, z, t) dx dy dz$$

waar we handig gebruikt gemaakt hebben van de som over de ruimtehoeken om de scalaire flux in te voeren. Vervolgens

gaan we ook de som maken over de energieën, maar hier kunnen we niet overschakelen op de totale flux, want de werkzame doorsnede is wel afhankelijk van de energie. We moeten dus schrijven:

$$m = \int m(E) = N(x, y, z, t) dx dy dz dt \int \sigma(E) \varphi(x, y, z, t, E) dE$$

m is het aantal reacties die in het blokje hebben plaatsgevonden in een tijdsinterval dt maar we zijn natuurlijk geïnteresseerd in de reactiesnelheid, die gelijk is aan $\tau(x, y, z, t) = \frac{m}{dx dy dz dt}$. Als dusdanig blijft er over:

$$\tau(x, y, z, t) = N(x, y, z, t) \int \sigma(E) \varphi(x, y, z, t, E) dE$$

Deze belangrijke formule geeft ons aan hoe we, uitgaande van de scalaire flux van een stralingsveld (hier dus neutronen), en een werkzame doorsnede voor de gezochte interactie, samen met de nuclidedichtheid van de doelnuclide, de reactiesnelheid kunnen berekenen. Het integraalteken wil zeggen dat we per energie interval het product moeten maken van de scalaire flux bij die energie met de werkzame doorsnede bij die energie, dat vermenigvuldigen met de grootte van het energie interval dat we aan het beschouwen zijn, en dan de som moeten maken van dat resultaat over alle energie intervallen.

Eens we de reactiesnelheid kennen, kunnen we die gebruiken om verdere “boekhouding” te doen. Bijvoorbeeld, de reactiesnelheid geeft aan hoe snel onze doelnucliden verdwijnen (net zoals in het geval van het radioactieve verval). We kunnen dus schrijven:

$$dN(x, y, z, t) = -\tau(x, y, z, t) dt;$$

de afname van het aantal doelnucliden gedurende het tijdsinterval dt is gelijk aan de reactiesnelheid vermenigvuldigd met de duur van het tijdsinterval. Het kan zijn dat deze vergelijking niet nodig is, indien de verandering over de beschouwde tijden belachelijk klein is in vergelijking met de hoeveelheid nucliden die initieel aanwezig is. Het kan ook zijn dat de reactie in kwestie aanleiding geeft tot het ontstaan van nieuwe nucliden. Als we de ruimtelijke dichtheid van die nieuwe nucliden M noteren, dan kunnen we schrijven:

$$dM(x, y, z, t) = +\tau(x, y, z, t) dt$$

De boekhoudkunde voor stralingsvelden is wat ingewikkelder. Dat komt essentieel omdat de deeltjes die een stralingsveld uitmaken in beweging zijn. Als dusdanig veranderen ze voortdurend van “blokje”: ze verdwijnen uit het blokje waar ze aanvankelijk waren, en ze komen binnen in een blokje ergens in de buurt. Om te weten welk blokje dat is, moeten we de snelheid en ook de richting kennen waarin de deeltjes bewegen (vandaar dat we meestal de fase flux nodig hebben).

De “natuurkunde” die een stralingsveld beheert is gegeven door:

- de rechtlijnige en uniforme beweging van deeltjes die “puntsgewijs” interageren (neutronen en gamma fotonen) tussen interacties, of het continue afremmen (en eventueel zijdelingse beweging) van geladen deeltjes zoals elektronen of alfa-deeltjes.
- De reacties (die zelf gegeven werden door de werkzame doorsneden). In sommige gevallen moeten we zelfs rekening houden met de invallende richting van het deeltje (voor de reactiesnelheden zelf was dat niet nodig) als de richting van de uitgaande deeltjes afhankelijk is van de richting van de invallende deeltjes (wat bij hoge energieën soms het geval kan zijn). De reactiesnelheden zijn zowel bron van nieuwe straling als oorzaak van het verdwijnen van straling. We kunnen bij reactiesnelheden ook het spontane radioactieve verval rekenen (de reactiesnelheid is dan de activiteit per volume eenheid). Reacties kunnen vier dingen doen:
 - Stralingsdeeltjes “vernietigen” (absorptie)

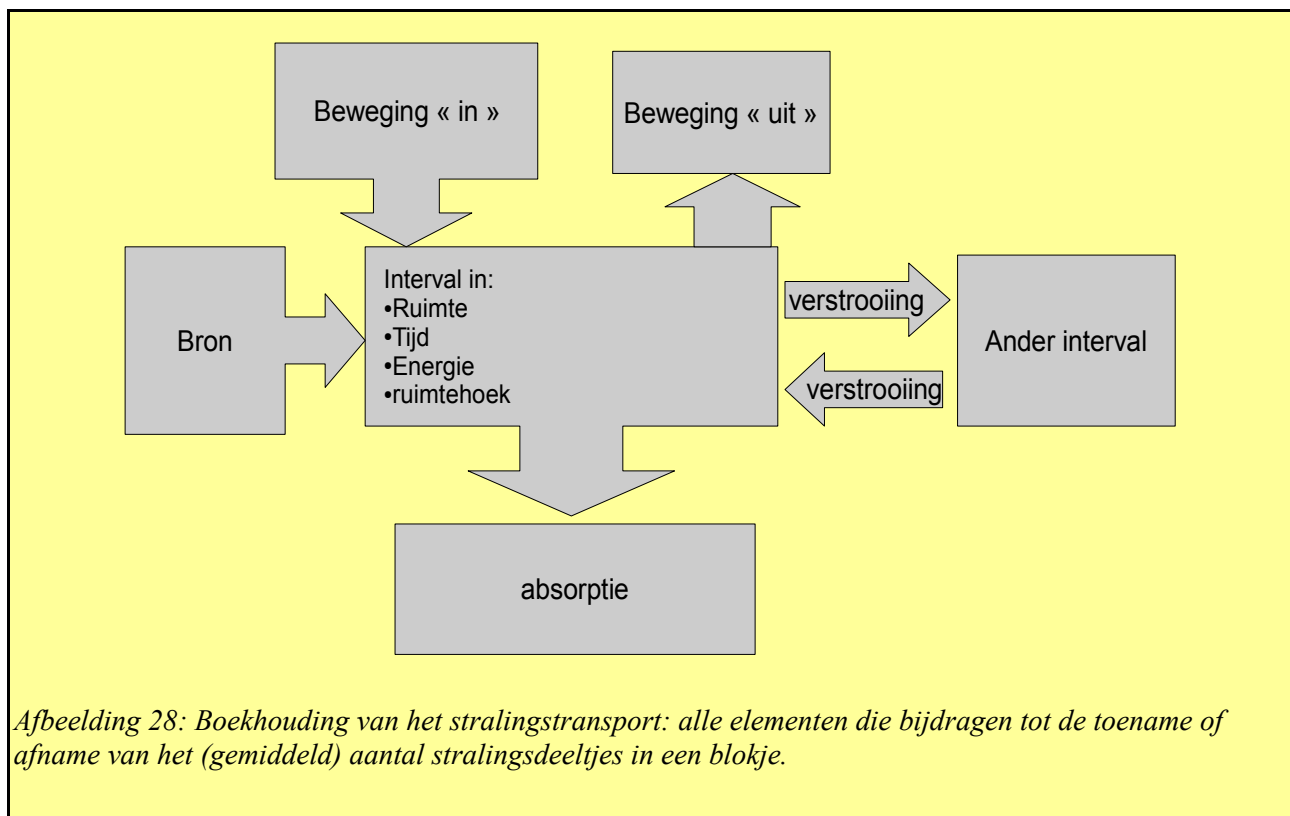
- Stralingsdeeltjes “creëren” (bron van straling)
- Stralingsdeeltjes van richting en (eventueel) van energie veranderen (verstrooiing)
- Nuclidendichtheden veranderen (op veel tragere tijdschaal).

Eens deze natuurkundige elementen beschouwd, volstaat het om de totale boekhouding op te stellen voor een gegeven blokje in de ruimte, een tijdsinterval, een energie interval en een ruimtehoek interval (Zie figuur 28):

(toename in de tijd) = (inkomst min uitgang door verplaatsing)

- (absorptie)
- (totale verstrooiing van “eigen” deeltjes)
- + (verstrooiing van andere hoeken en energieën naar “onze” hoek en energie)
- + (bron).

Het volstaat om als functie van de relevante velden (fase flux van de stralingsvelden, nuclidendichtheden...) en de relevante reacties (met gekende werkzame doorsneden) elke term in bovenstaande vergelijking uit te schrijven om de algemene transportvergelijking te bekomen, die geldig is voor elk blokje en interval. We kunnen nadien dan trachten om numerieke oplossingen te bekomen van deze vergelijkingen. In de meeste gevallen kan men de vergelijkingen niet oplossen met een formule.



In sommige gevallen kunnen we de vergelijking eenvoudiger maken als sommige processen of effecten niet aanwezig zijn of verwaarloosbaar kunnen geacht worden.

We begrijpen nu beter wat er bedoeld wordt wanneer we zeggen dat we een transportprobleem “berekenen”. We gebruiken enerzijds gekende gegevens van het probleem (de aanvankelijke geometrische dispositie van de materialen met gekende samenstelling, die ons de ruimtelijke

nuclidendichtheden geeft bijvoorbeeld) en anderzijds natuurwetten (radioactieve vervalkansen, werkzame doorsneden van interacties) gecombineerd in “boekhoudkundige” uitdrukkingen die de relaties weergeven tussen de relevante grootheden (faseflux van stralingsvelden, nuclidendichtheden, reactiesnelheden...) in verschillende “blokjes”. *Die relaties laten ons dan in principe toe om de numerieke waarden van de grootheden in kwestie te berekenen startende van de gegevens van het probleem.* In enkele hele eenvoudige gevallen kunnen we zelfs een wiskundige formule vinden die de oplossing voorstelt. In meer realistische situaties kunnen we op zijn best hopen om met een computer de numerieke waarden stap voor stap, en blokje voor blokje, uit te rekenen. In vele situaties is zelfs dat te gecompliceerd gewoon omdat de berekeningen te lang zijn, en er veel te veel numerieke waarden zouden moeten worden uitgerekend. In dat geval gaan we vereenvoudigingen doorvoeren waarvan we moeten nagaan of ze geen te grote fouten invoeren in de resultaten.

4.2 Radioactief verval en nucliden productie

4.2.a Radioactieve vervalketens

We beginnen met het probleem van de radioactieve vervalketens, omdat het een vrij eenvoudig probleem is, dat niettemin enkele interessante eigenschappen vertoont. De problematiek is eenvoudiger dan de berekening van een echt stralingsveld, omdat de grootheden die we willen berekenen deeltjes beschrijven die niet bewegen. Als dusdanig is de boekhouding volledig “puntsgewijs”. Wat er in dit blokje hier gebeurt heeft geen invloed op wat er in dat blokje ginder gebeurt: de ruimtelijke blokjes leven elk hun eigen, onafhankelijk leven. Dat maakt de boekhouding heel wat gemakkelijker, vandaar dat het een goed type vraagstuk is om mee te beginnen. Maar bovendien is het ook een belangrijk concept bij het praktische kernenergie gebeuren. Radioactieve vervalketens komen tevoorschijn, zowel bij het beschouwen van de brandstoffen, als in de kernreactor (bijvoorbeeld: juist nadat de reactor is stilgelegd), als bij het beschouwen van afgewerkte brandstoffen en uiteindelijk het radioactieve afval.

Het wiskundige probleem van de radioactieve vervalketens is trouwens een van de weinige problemen waar men er meestal wel in lukt om de oplossing onder “formule vorm” te vinden (denk aan de exponentiële curve die we eerder zijn tegengekomen) ; alleen vallen die wiskundige technieken buiten het kader van de tekst als ik mij wil beperken tot humaniora niveau, maar dat is niet erg: numerieke berekeningen geven ook prima resultaten en zijn, qua principe, eenvoudiger te begrijpen.

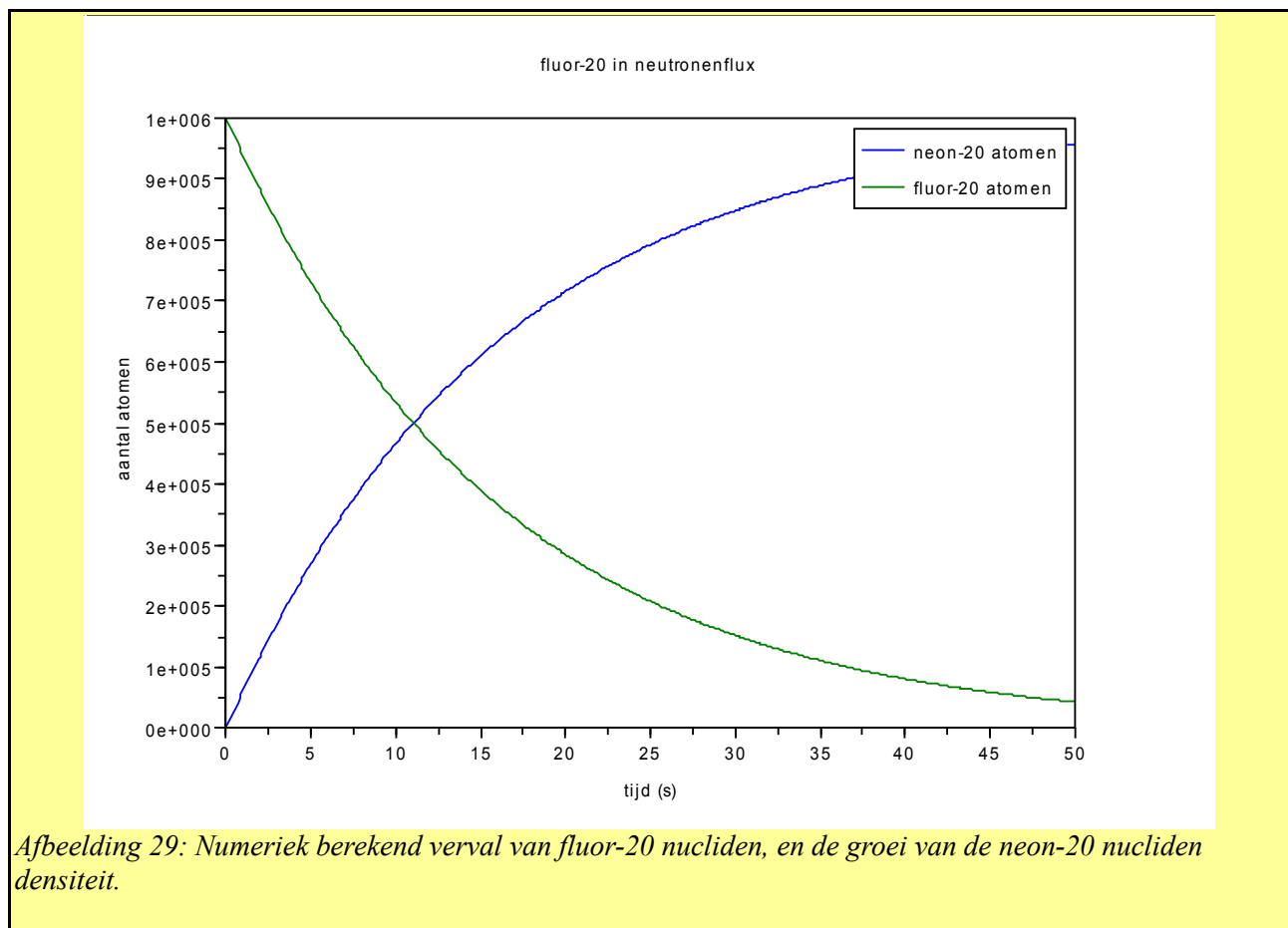
Maar wat is een radioactieve vervalketen ? We hebben eerder het eenvoudige radioactieve verval gezien: een radioactieve nuclide vervalt in een stabiele nuclide. We keren terug naar ons fluor-20 voorbeeld. We hadden gezien dat de vergelijking voor de fluor-20 nucliden (de nucliden die vervallen) van de volgende vorm was: $\frac{dN}{dt} = -N p$ waarbij het rechterlid het aantal vervalreacties per volume eenheid weergeeft, en het minteken erop duidt dat de fluor-20 nucliden verdwijnen bij deze reactie. Maar we zouden ook de boekhouding kunnen opvolgen van de neon-20 kernen, het vervalproduct van deze reactie. Laten we de nuclidendichtheid van de neon-20 kernen met M noteren. We kunnen een gelijkaardige redenering doorvoeren als die die ons tot de vergelijking hierboven heeft gebracht ; alleen zullen we nu een plusteken moeten gebruiken, want bij elke reactie komt er een neon-20 nuclide bij $\frac{dM}{dt} = +N p$. Merk het plusteken op, maar merk ook op dat het nog steeds N is die in het rechterlid voorkomt (en niet M). Dat komt omdat het rechterlid de activiteit per volume eenheid voorstelt, en die is nu eenmaal gegeven door de fluor-20 nucliden en

niet door de neon-20 nucliden (de reacties komen van de fluor-20 nucliden, die de radioactieve nucliden zijn).

We kunnen ons eerder Scilab programmaatje aanpassen:

```
clear // met een schone lei beginnen.
dt = 0.1 // het kleine tijdsinterval, in seconden.
p = 0.0626 // de kans per tijdseenheid voor een kern om te vervallen
t = 0:dt:50; // alle tijdsintervallen, van 0 tot 50 seconden.
lتي = size(t);
steps = lتي(2) - 1; // aantal stappen (een minder dan het aantal intervallen)
n(1) = 1000000; // de begin hoeveelheid: een miljoen kernen in het eerste interval
m(1) = 0;
for i = 1:steps // we gaan over het aantal stappen lopen
    n(i+1) = n(i) - dt * p * n(i); // onze fameuze natuurwet - boekhoudkunde.
    m(i+1) = m(i) + dt * p * n(i); // idem, maar voor de neon atomen
end //for
plot(t,m,t,n)
legend("neon-20 atomen","fluor-20 atomen")
xtitle("fluor-20 in neutronenflux","tijd (s)","aantal atomen")
```

en het resultaat wordt getoond in figuur 29.



Afbeelding 29: Numeriek berekend verval van fluor-20 nucliden, en de groei van de neon-20 nucliden dichtheid.

We zien, zoals we wel konden verwachten, dat de neon-20 kernen dichtheid complementair groeit terwijl de fluor-20 dichtheid afneemt ; de som van beiden is steeds gelijk aan een miljoen kernen. Inderdaad, een originele fluor-20 kern is ofwel nog niet vervallen ofwel is hij al vervallen en hij zal dus ofwel zijn bijdrage tot de fluor-20 dichtheid, ofwel tot de neon-20 dichtheid leveren.

Ten gevolge van radioactief verval, kunnen nieuwe kernen ontstaan en dus kan hun bijhorende dichtheid veranderen. Gezien in ons voorbeeld, deze nieuwe kern, neon-20, een stabiele kern is, zal deze gewoon toenemen in dichtheid.

Maar het is ook mogelijk dat de kern die het verval product is van een radioactieve kern, op zich ook weer radioactief is, en dat zijn dochterkernen op hun beurt eventueel ook weer radioactief zijn. Zo een opeenvolging van radioactieve kernen heet een radioactieve vervalreeks.

Een heel bekende reeks is de U-238 reeks, zo genoemd omdat ze met U-238 begint:

- U-238 ondergaat alfa verval in Th-234 (4.47 miljard jaar),
- Th-234 ondergaat bèta verval in Pa-234 (24.1 dagen),
- Pa-234 ondergaat bèta verval in U-234 (6.7 uur),
- U-234 ondergaat alfa verval in Th-230 (246 duizend jaar),
- Th-230 ondergaat alfa verval in Ra-226 (75 duizend jaar),
- Ra-226 ondergaat alfa verval in Rn-222 (1600 jaar),
- Rn-222 ondergaat alfa verval in Po-218 (3.8 dagen),
- Po-218 ondergaat alfa verval in Pb-214 (3.1 minuten),
- Pb-214 ondergaat bèta verval in Bi-214 (26.8 minuten),
- Bi-214 ondergaat bèta verval in Po-214 (19.9 minuten),
- Po-214 ondergaat alfa verval in Pb-210 (164 microseconden),
- Pb-210 ondergaat bèta verval in Bi-210 (22 jaar),
- Bi-210 ondergaat bèta verval in Po-210 (5 dagen),
- Po-210 ondergaat alfa verval in Pb-206 (138 dagen),
- Pb-206 is een stabiele nuclide.

Men kan dat “avontuur” volgen op de nuclidenkaart¹¹⁵ die we reeds eerder hebben aangehaald: op die kaart is alfa verval twee stapjes naar links beneden, en bèta verval een stapje naar links boven. We zullen de nucliden dichtheden noteren: $N(\text{Pb-206})$ of $N(\text{Bi-204})$ of ... als zijnde het aantal Pb-206 respectievelijk Bi-204 nucliden per kubieke centimeter. Laten we de kans per tijdseenheid van radioactief verval van Pb-214 noteren: $p(\text{Pb-214})$. $p(\text{Pb-214})$ is gelijk aan $\ln(2)/(26.8 \text{ minuten}) = 0.000431$ per seconde.

We kunnen stellen dat de toename van het aantal nucliden Po-214 in een gegeven (klein) tijdsinterval dt gelijk is aan het aantal nieuwe Po-214 nucliden die tijdens dat tijdsinterval gevormd worden (door verval van Bi-214) verminderd met het aantal Po-214 nucliden die tijdens dat tijdsinterval verdwijnen (door verval van Po-214 zelf):

$$dN(\text{Po-214}) = p(\text{Bi-214})N(\text{Bi-214})dt - p(\text{Po-214})N(\text{Po-214})dt$$

We kunnen zo een vergelijking uitschrijven voor elke nuclide, behalve de eerste (U-238) die enkel maar een verval ondergaat en geen bron heeft en de laatste (Pb-206) die stabiel is en dus geen verval ondergaat maar wel een bron heeft. Als dusdanig kunnen we in principe ook weer een numerieke berekening doorvoeren zoals voorheen. Maar we zullen een praktisch probleem hebben: Po-214

¹¹⁵<http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>

heeft een halfwaarde tijd van 164 microseconden. Onze tijdsintervallen moeten zo gekozen worden, dat we kunnen veronderstellen dat de grootheden (hier, de nuclidendichtheden) niet veel veranderen in het interval. De tijdsintervallen moeten dus veel kleiner zijn dan 164 microseconden, zeg maar, 10 microseconden of zo. Aan de andere kant hebben we nucliden met halfwaardetijden van duizenden jaren. Als we dat willen uitrekenen op die manier, dan gaat ons computertje heel lang moeten rekenen: duizenden jaren in stapjes van 10 microseconden, dat zijn heel veel stapjes!

In het geval van radioactief verval hebben we reeds aangehaald dat er wiskundige technieken bestaan om de oplossing onder formule vorm te vinden, dus is er in de praktijk voor dit soort problemen geen moeilijkheid; alleen illustreert dit een probleem dat wel voorkomt in andere stralingstransport problemen waar geen oplossing in formulevorm gekend is. Het is goed mogelijk dat we de vergelijkingen kunnen uitschrijven (zoals hier het geval is), en in principe een voorschrift hebben hoe we de numerieke waarden van onze grootheden moeten berekenen, maar dat dit te veel computer werk vergt om praktisch op te lossen. We moeten dan nadenken en trachten met minder rekenwerk een aanvaardbare oplossing te bekomen. Soms maken we hierbij (doelbewust) kleine fouten: zoiets noemen we dan een *benadering*.

In de bovenstaande vervalserie van U-238 kunnen we, door een redenering, een (heel goede) benadering doorvoeren. Laten we veronderstellen dat ons stuk uranium “reeds lange tijd” aan het vervallen is, sinds het een zuiver blok was. Aangezien U-238 veel trager vervalft dan al de dochterproducten kunnen we ervan uitgaan dat de nuclidendichtheid van U-238 constant is. Zijn activiteit is dan ook constant en gelijk aan $p(U-238) N(U-238)$. De dochterkernen worden gevormd en vervallen, en na een tijd die langer is dan de langste vervaltijd van de dochterkernen (hier dus Ra-226 met 1600 jaar) zullen er van de eerst gevormde (of aanvankelijk aanwezige) kernen geen meer overblijven. Het aantal kernen van elke dochternuclide (behalve de laatste) zal constant blijven: er worden er evenveel gevormd als er verloren gaan. Dat wil zeggen dat in dit geval, de activiteit van elke dochternuclide gelijk is aan de activiteit van de moedernuclide U-238. Nu de activiteit van de dochterkern ook constant is, gedraagt die zich op zijn beurt zoals een “langlevende” moederkern enzovoort...

We hebben wat men noemt *een stationaire toestand*:

$$A_0 = p(U-238) N(U-238) = p(Th-234) N(Th-234) = p(Pa-234) N(Pa-234) = \dots$$

Als we de nuclidendichtheid van, zeg maar, Bi-214 willen kennen, dan is die gegeven door:

$$N(Bi-214) = \frac{A_0}{p(Bi-214)} = N(U-238) \frac{p(U-238)}{p(Bi-214)}$$

In zulke stationaire toestand zien we dat hoe sneller een nuclide vervalft, hoe kleiner haar nuclidendensiteit is. De totale activiteit is natuurlijk de som van de activiteiten van alle radioactieve nucliden die aanwezig zijn. Aangezien elke nuclide op zich dezelfde activiteit heeft, en aangezien er 14 opeenvolgende nucliden zijn die vervallen in de U-238 vervalreeks, is de totale activiteit gelijk aan 14 maal de activiteit van U-238: $A = 14 A_0$.

In 1 kg U-238 zijn er $1000 N_A / 238 = 2.6 \cdot 10^{24}$ U-238 nucliden aanwezig, en de kans per seconde om te vervallen $p(U-238) = 4.9 \cdot 10^{-18}$ per seconde, wat ons een activiteit oplevert van: 12 miljoen Becquerel: 12 miljoen U-238 kernen vervallen per seconde in een kilogram U-238. Dat is dus onze A_0 voor een kilogram U-238. De totale activiteit is 14 keer groter, dus 179 miljoen Bq per kilogram uranium.

In een kilogram U-238 zal de hoeveelheid Bi-214 nucliden (stationaire toestand) bijvoorbeeld gelijk zijn aan: $N(Bi-214) = \frac{1.28 \cdot 10^7}{0.000431} = 2.9 \cdot 10^{10}$ kernen. De aandachtige lezer zal misschien opgemerkt

hebben dat we een kleine onnauwkeurigheid hebben gemaakt. We hebben hier gewerkt met een kilogram U-238, terwijl N aanvankelijk de nuclidendichtheid (per kubieke centimeter, zeg maar) voorstelde. We zijn impliciet overgestapt van een dichtheid per volume op een dichtheid in massa en de verhouding tussen de twee is de dichtheid van uranium (19 g per kubieke centimeter, dat is 19 keer denser dan water!). De echte volume-densiteiten worden bekomen door bovenstaande massa densiteiten te vermenigvuldigen met 0.019 (dat is de massa van 1 kubieke centimeter uranium, uitgedrukt in kilogram).

We kunnen het bovenstaande veralgemenen: *als een moedernuclide radioactief vervalft in een radioactieve dochternuclide, en die dochternuclide heeft een veel kleinere halfwaardetijd dan de moedernuclide, dan kan men stellen dat de activiteit van de dochternuclide gelijk is aan de activiteit van de moedernuclide, na enkele halfwaardetijden van de dochternuclide.* Het is de benadering van de stationariteit.

Het bovenstaande verklaart ook hoe het komt dat sommige radioactieve nucliden met relatief korte halfwaardetijden op geologische schaal toch nog voorkomen op aarde. Men zou zich immers de vraag kunnen stellen hoe het komt dat deze nucliden, als ze aanwezig waren op het ogenblik van de vorming van de aarde, nog niet helemaal vervallen zijn. Vaak¹¹⁶ is de reden dat ze voorkomen in een radioactieve verval keten van een langlevende nuclide. Als dusdanig is hun aanwezigheid te danken aan de voortdurende productie van nieuwe nucliden door verval. Het standaard voorbeeld is de aanwezigheid van radium. Radium (natuurlijk radium bestaat voor 100% uit Ra-226 met een verval tijd van 1600 jaar, wat heel kort is op geologische tijdschalen) is aanwezig in de natuur omdat het voorkomt in de bovenstaande verval keten van U-238.

In het bovenstaande hebben we verschillende aspecten aangeraakt. Eerst en vooral hebben we het concept van radioactieve verval keten ingevoerd. Vervolgens hebben we gezien hoe we een stel vergelijkingen kunnen opstellen, uitgaande van de “boekhouding” van elke relevante grootte (hier, de nuclidendensiteiten). We hebben dan gezien dat het niet praktisch doenbaar is om die numerieke waarden te berekenen (er zijn er veel te veel). We zijn dan overgestapt op een benadering die fysisch gemotiveerd was: de beschouwing dat er evenveel nucliden gevormd worden als er vervallen. Dat leidde dan tot een veel eenvoudiger oplossing van het probleem, waarbij we nu zelfs verbazingwekkend gemakkelijk de oplossing van het probleem vinden (de numerieke waarden van de nuclidendichtheden). We hebben zelfs een algemene gedragsregel ontdekt op die manier.

Bovenstaande manier van doen is heel courant in de aanpak van stralingstransportproblemen.

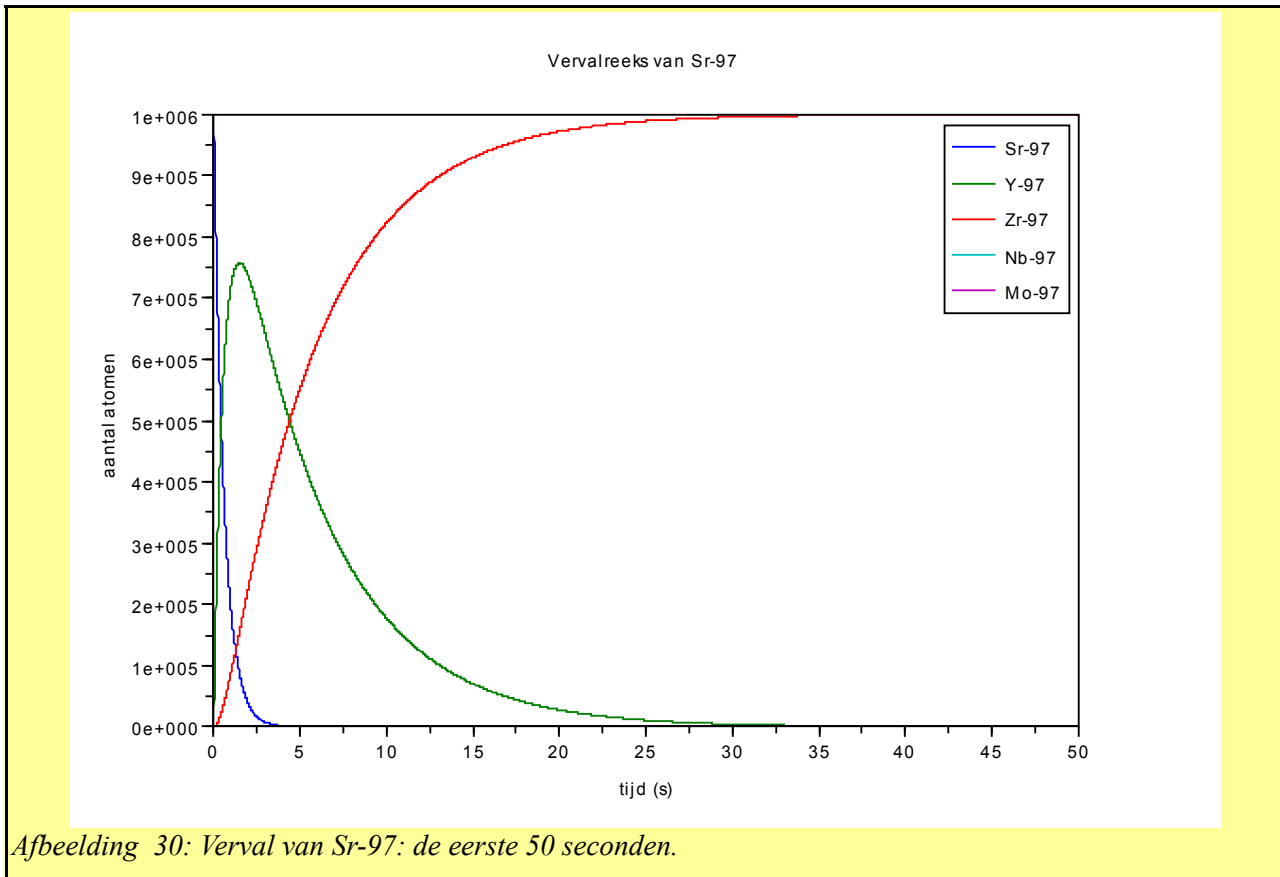
Laten we een andere, kortere vervalreeks beschouwen: Sr-97, een typisch splijtingsproduct. Zoals we van de nuclidenkaart kunnen aflezen, hebben we opeenvolgend bèta verval:

- Sr-97 vervalft in Y-97 (429 milliseconden, $p = 1.6157$ per seconde)
- Y-97 vervalft in Zr-97 (3.75 seconden, $p = 0.18484$ per seconde)
- Zr-97 vervalft in Nb-97 (16.7 uur, $p = 1.1529e-05$ per seconde)
- Nb-97 vervalft in Mo-97 (72.1 minuten, $p = 0.00016$ per seconde)
- Mo-97 is stabiel

Hier is er niet echt een heel veel grotere periode dan de andere en de eerste nuclide. Niettemin is de tijdschaal relatief uitgebreid: de eerste nuclide (Sr-97) heeft een halfwaardetijd van 0.43 seconden,

¹¹⁶De andere reden, die we verderop zullen bespreken, is een continue productie van de nuclide, of van een (eventueel kortlevende) moedernuclide door een nucleaire reactie zoals de bestraling van de atmosfeer door kosmische straling.

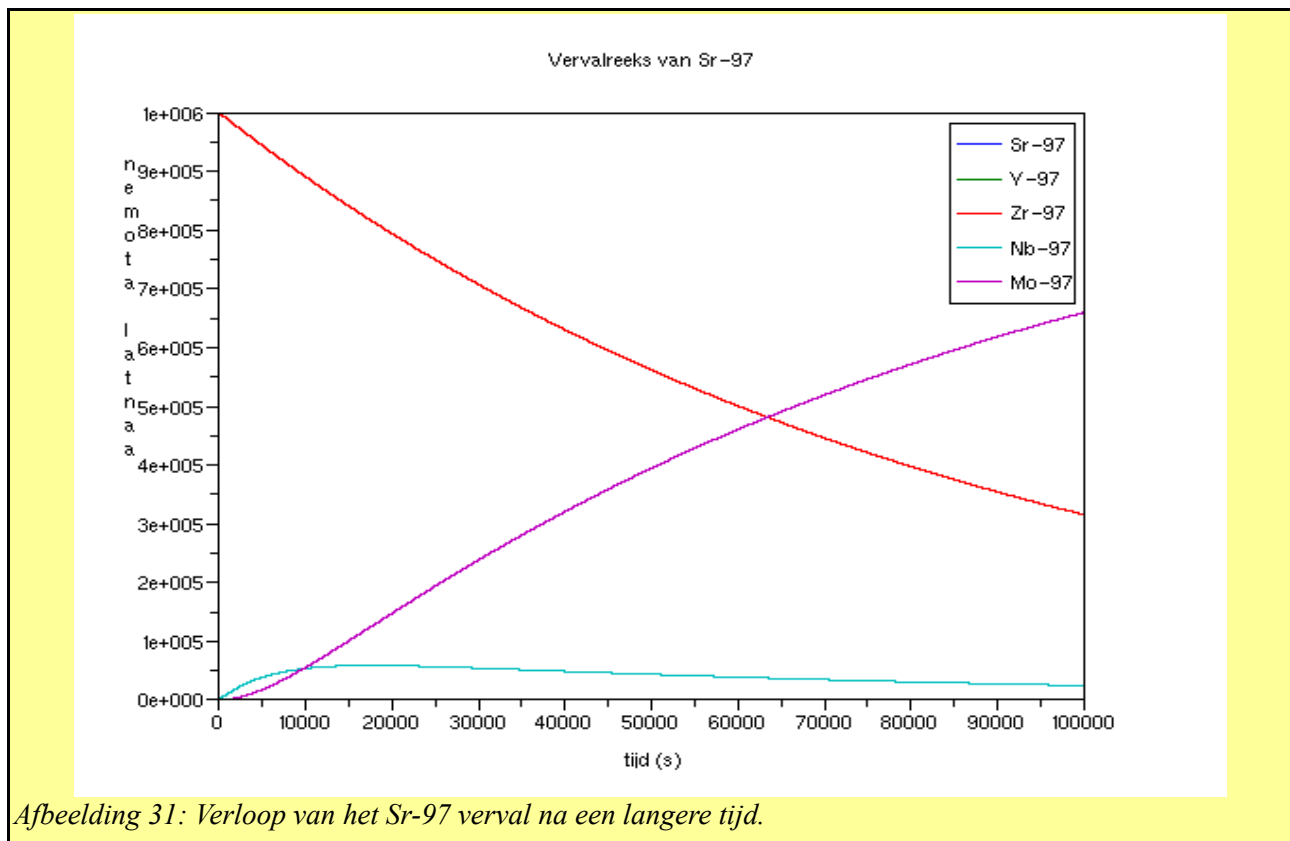
terwijl de langste halfwaardetijd in het probleem 16.7 uur is (Zr-97). Het is dus toch wel een relatief lange berekening, en we kunnen ze versnellen door eerst een korte periode te beschouwen met kleine tijdstap, gevolgd door een langere periode met grotere tijdstap. Inderdaad, in het begin gaan Sr-97 en Y-97 snel vervallen naar Zr-97. Na enkele tientallen seconden zal alle Sr-97 omgezet zijn in Zr-97, en een veel trager verval gaat nu een rol spelen.



Afbeelding 30: Verval van Sr-97: de eerste 50 seconden.

De code voor het eerste stukje ziet er als volgt uit:

```
clear
p1 = log(2)/(0.429); // Sr-97
p2 = log(2)/3.75; // Y-97
p3 = log(2)/(16.7 * 3600); // Zr-97
p4 = log(2)/(72.1 * 60); // Nb-97
tend = 50;
dt = 0.01;
t=0:dt:tend;
lti = size(t);
lt = lti(2);
u0 = zeros(lt,1);
u1 = zeros(lt,1);
u2 = zeros(lt,1);
u3 = zeros(lt,1);
u4 = zeros(lt,1);
u0(1) = 1000000;
j = 0;
```



Afbeelding 31: Verloop van het Sr-97 verval na een langere tijd.

```

for tt = t
  if (tt == tend)
    tt
  else
    j = j+1;
    u0(j+1) = u0(j) - p1*u0(j)*dt;
    u1(j+1) = u1(j) + p1*u0(j)*dt - p2*u1(j)*dt;
    u2(j+1) = u2(j) + p2*u1(j)*dt - p3*u2(j)*dt;
    u3(j+1) = u3(j) + p3*u2(j)*dt - p4*u3(j)*dt;
    u4(j+1) = u4(j) + p4*u3(j)*dt;
  end //if
end //for
plot(t,u0,t,u1,t,u2,t,u3,t,u4)
legend("Sr-97","Y-97","Zr-97","Nb-97","Mo-97")
xtitle("Vervalreeks van Sr-97","tijd (s)", "aantal atomen")

```

We nodigen de geïnteresseerde lezer uit om het bovenstaande programmaatje te analyseren. Het berekent de curves getoond in afbeelding 30. We hebben als begin gegevens ingevoerd dat we een miljoen Sr-97 nucliden hadden. In deze berekening hebben we tijdstappen van 10 milliseconden genomen, wat kleine stapjes zijn in vergelijking met de kortste vervalperiode. Om het tweede deel over een langere periode uit te rekenen nemen we grotere stapjes (1 seconde) en nemen als begin gegevens, de toestand op het einde van de 50 seconden van onze eerste berekening (namelijk: er zijn nu een miljoen Zr-97 nucliden) en rekenen over een vrij lang interval. Het resultaat ziet men in afbeelding 31.

We stellen in afbeelding 30 het volgende vast: de moedernuclide Sr-97 verdwijnt vrij snel (dat hadden we verwacht) omdat ze een kleine halfwaardetijd heeft. De eerste dochternuclide (Y-97) bouwt eerst vrij snel op, maar gaat dan door een maximum (rond ongeveer twee seconden) om dan ook weer relatief snel te vervallen. De tweede dochternuclide (Zr-97) bouwt op om uiteindelijk

(bijna) het gehele aantal nucliden (een miljoen) voor zich te nemen, alsof Zr-97 stabiel was. Dat komt omdat de halfwaardetijd van Zr-97 zo veel langer is dan die van Sr-97 of Y-97. Na 50 seconden is het dus alsof alle nucliden Zr-97 nucliden zijn. We nemen dat trouwens als “gegeven” voor onze tweede berekening.

De tweede berekening toont ons dat het Zr-97 tenslotte toch vervalft. Hierbij wordt een relatief kleine hoeveelheid Nb-97 gevormd die een maximum bereikt na ongeveer 18 000 seconden (of vijf uur). Na een kleine aarzeling (de tijd om de Nb-97 populatie op te bouwen) neemt het (echt stabiele) Mo-97 tenslotte alle vervallen nucliden voor zijn rekening en groeit dus naarmate het Zr-97 vervalft.

Dit tweede voorbeeld van een radioactieve vervalketen (deze keer een artificiële) moet de lezer die de moed heeft gehad om de technische details te volgen (of wie weet, zelf op zijn computer uit te proberen!) het nodige inzicht hebben gegeven over hoe men te werk kan gaan om zulke ketens te berekenen. Maar belangrijker: de lezer moet nu wel begrepen hebben dat radioactief verval een volledig gekend en berekenbaar verschijnsel is: men kan precies voorspellen wat de samenstelling zal zijn van een aanvankelijke hoeveelheid radioactief materiaal na een zekere tijd (bijvoorbeeld: Sr-97 na 8 uur).

4.2.b Nuclidenproductie in een (gekend) stralingsveld

Het volgende probleem dat we aanpakken is dat van de nuclidenproductie (en vernietiging) in een gegeven stralingsveld. Dat wil zeggen: op een of andere wijze kennen we het stralingsveld op een bepaalde plek, we kennen de (initiële) materiële samenstelling en we gaan na hoe dat stralingsveld de materiële samenstelling beïnvloedt. Natuurlijk zullen de kernreacties die plaatsvinden ook het stralingsveld beïnvloeden, maar we veronderstellen dat dit reeds is in rekening is gebracht. In de praktijk heeft dat ook wel enige zin: bij de berekening van een stralingsveld kan men er gemakkelijk van uitgaan dat de materiële samenstelling constant is: de materiële samenstelling verandert immers veel langzamer dan de tijd die nodig is om het stralingsveld te laten ontstaan. Dat stralingsveld kan men dan gebruiken om de materiële evolutie onder invloed van straling te berekenen.

We beginnen met een eenvoudig voorbeeld: de bestraling van aluminium (natuurlijk aluminium bestaat voor 100% uit Al-27) door thermische neutronen. Stel dat natuurlijk aluminium is blootgesteld aan een fluentie debiet van 10^{11} neutronen per seconde en per vierkante centimeter en dat dat allemaal thermische neutronen zijn (met een energie van 0.0253 eV). We gaan de kernreacties na die met aluminium kunnen plaatsvinden¹¹⁷. Men kan alle reacties bestuderen tussen neutronen en Al-27, en het blijkt dat thermische neutronen slechts op twee manieren met Al-27 kunnen interageren:

- Elastische botsing, werkzame doorsnede bij 0.0253 eV gelijk aan 1.452 barn
- Absorptie, Al-27 (n,gamma) Al-28, met werkzame doorsnede bij 0.0253 eV gelijk aan 0.23377 barn. Ter informatie, de gammastraling die hierbij vrijkomt¹¹⁸ heeft twee sterke lijnen: een gamma van 30.64 KeV en een gamma van 7.7 MeV.

¹¹⁷<http://www.nndc.bnl.gov/sigma/index.jsp>

¹¹⁸<http://www.nndc.bnl.gov/capgam/indexbyn.html>

De totale werkzame doorsnede bij 0.0253 eV is gegeven als 1.686 barn, wat wel degelijk de som is van de twee reacties (elastische botsing en absorptie), wat bewijst dat we geen reactie vergeten hebben.

De volume dichtheid van Al-27 atomen in massief aluminium¹¹⁹ is 2.7 gram per kubieke centimeter. Er zijn in massief aluminium $N_A/27 * 2.7 = 6.02 \cdot 10^{22}$ atomen aluminium in een kubieke centimeter. Bijgevolg is de reactiesnelheid voor absorptie gelijk aan $6.02 \cdot 10^{22}$ atomen per kubieke centimeter vermenigvuldigd met 0.234 barn of $0.234 \cdot 10^{-24}$ vierkante centimeter vermenigvuldigd met het fluentie debiet van 10^{11} neutronen per vierkante centimeter per seconde. Dat levert ons 1.45 miljard reacties per kubieke centimeter en per seconde. Elke reactie levert een Al-28 nuclide op (een neutron toegevoegd aan Al-27). Maar Al-28 is een radioactieve nuclide die bèta verval ondergaat met een halfwaardetijd van 2.24 minuten (een kans om te vervallen gelijk aan 0.0051573 per seconde). Dat bèta verval levert stabiel Si-28 op. Als dusdanig hebben we de volgend situatie:

- Al-28 nucliden worden geproduceerd aan een tempo van 1.45 miljard nucliden per seconde
- Al-28 nucliden vervallen met een kans van 0.0051573 per seconde naar Si-28.

Hetvolgende programmaatje implementeert deze berekening:

```
clear
p = 0.0051573;
a = 1450800000;
dt = 1;
tfinal = 1000;
t = 0:dt:tfinal;
lti = size(t);
lt = lti(2);
u0 = zeros(1,lt); // Al-28
u1 = zeros(1,lt); // Si-28
j = 0;
for tt = t
    if tt == tfinal
        tt
    else
        j = j + 1;
        u0(j+1) = u0(j) + dt * a - u0(j) * p * dt;
        u1(j+1) = u1(j) + u0(j) * p * dt;
    end //if
end //for

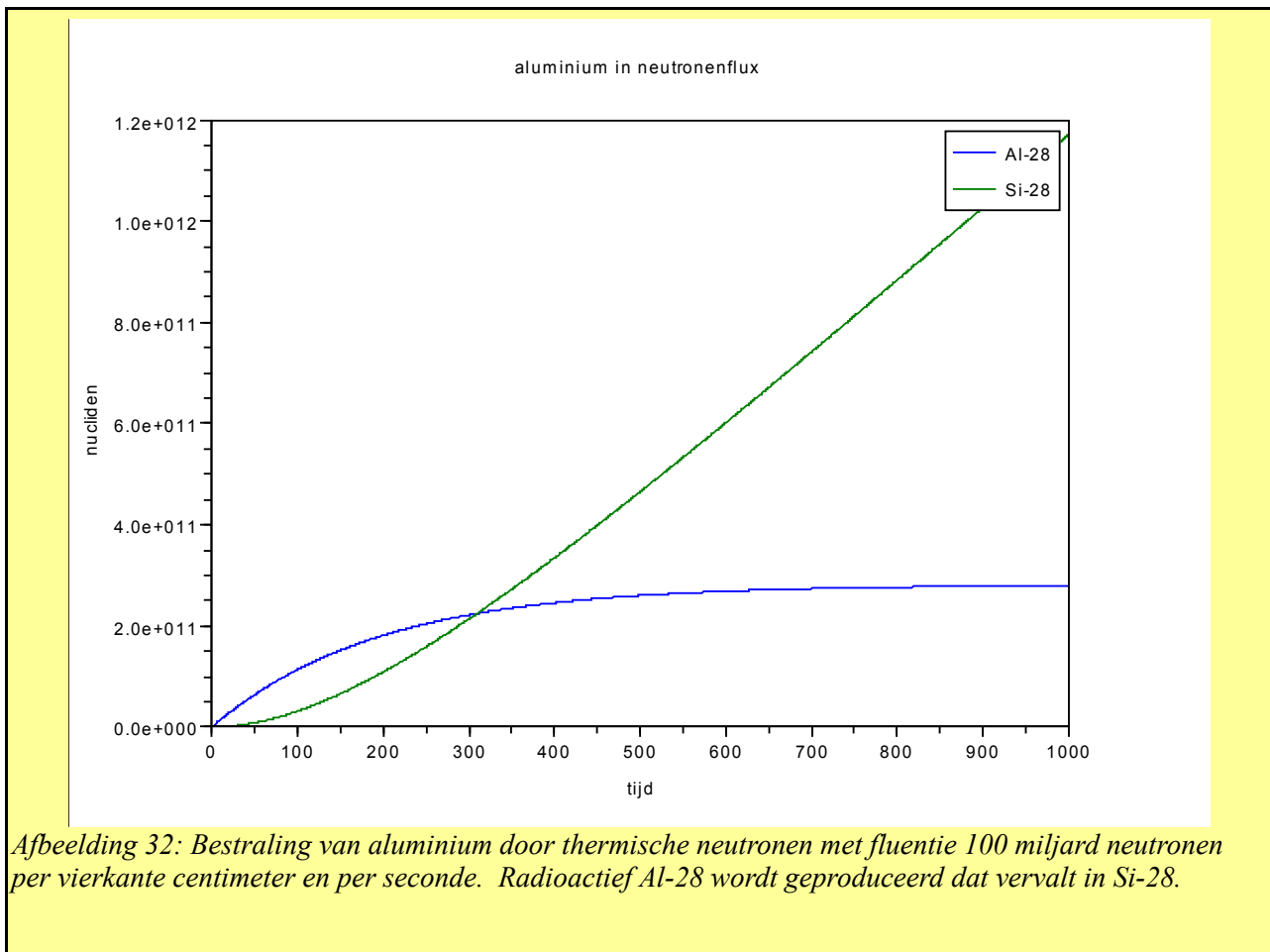
// genereren van de afbeelding
plot(t,u0,t,u1)
legend('Al-28','Si-28')
xtitle('aluminium in neutronenflux','tijd','nucliden')
```

Het resultaat van deze berekening wordt in afbeelding 32 getoond. We stellen hier twee dingen vast: ten eerste stijgt de nuclidendichtheid van Al-28 tot aan een zeker niveau en stabiliseert zich daar. Dat niveau kan gemakkelijk aangetoond worden zo te zijn dat de activiteit van Al-28 precies gelijk is aan de reactiesnelheid waarmee het geproduceerd wordt (waarom?). Ten tweede, na een kleine transitieperiode stijgt de dichtheid van de uiteindelijke stabiele nuclide Si-28 lineair met de tijd. De transitie periode is enkele malen de halfwaardetijd van Al-28. De productiesnelheid per tijdseenheid (na die transitieperiode) is gelijk aan de reactiesnelheid van de neutronen op het originele Al-27 (en ook dus gelijk aan de activiteit van Al-28). Na vijf jaar bestraling bekomen we een totaal aantal Si-28 nucliden per kubieke centimeter gelijk aan $2.2876 \cdot 10^{17}$. Dat is ongeveer een

¹¹⁹<http://www.webelements.com/>

honderdduizendste van de originele Al-27 dichtheid. Dus een atoom op honderdduizend is in Si-28 veranderd. Dat heeft een serieuze invloed op de mechanische eigenschappen van aluminium.

We zien ook dat aluminium dat bestraald wordt door thermische neutronen relatief sterk geactiveerd wordt. Direct na bestraling (die enige tijd heeft geduurd – langer dan een paar keer de halfwaardetijd van Al-28) is de activiteit per kubieke centimeter gelijk aan 0.005 keer de neutronenfluentie van thermische neutronen. Die activiteit sterft echter af met een halfwaardetijd van enkele minuten: het is de populatie van Al-28 kernen die afneemt. Na een tiental minuten is de activiteit van het aluminium met een factor van ongeveer duizend afgenomen.



Afbeelding 32: Bestraling van aluminium door thermische neutronen met fluentie 100 miljard neutronen per vierkante centimeter en per seconde. Radioactief Al-28 wordt geproduceerd dat vervalt in Si-28.

Men ziet ook in dat een stof waarvan de activatie gebeurt naar nucliden met een korte halfwaardetijd, een constante activiteit heeft als de bestraling langer is dan enkele malen de halfwaardetijd. Als men die stof nu langer bestraalt of niet, de activiteit blijft dezelfde en is gelijk aan het fluentie debiet vermenigvuldigd met het aantal doelnucliden per kubieke centimeter en vermenigvuldigd met de werkzame doorsnede.

In een stof waarvan de activatie gebeurt naar nucliden met een lange halfwaardetijd (veel langer dan de tijd van bestraling), stijgt de activiteit lineair met de ontvangen fluentie, wat, bij constant fluentie debiet, overeenkomt met een lineaire stijging met de bestralingstijd.

Een stof waarin er een conversie gebeurt naar een stabiele nuclide gedraagt zich op dezelfde wijze: de dichtheid van de geproduceerde nuclide is uiteindelijk evenredig met de ontvangen fluentie en is

gegeven door de fluentie vermenigvuldigd met het aantal doelnucliden per kubieke centimeter en vermenigvuldigd met de werkzame doorsnede.

Als het stralingsveld gekend is, en de werkzame doorsneden zijn gekend, dan is het perfect mogelijk te voorspellen welke nucliden gevormd gaan worden, wanneer, en hoe veel, en daaruit af te leiden welke de activiteit is van het materiaal in kwestie.

We beschouwen nu een ingewikkelder geval dat echter heel interessant is voor het kernenergie gebeuren: de transmutatie van uranium in plutonium onder neutronenbestraling. Dit is enerzijds een reactie die ongevraagd gebeurt in een drukwater reactor, maar anderzijds ook de basis van de transmutatie van U-238 (niet direct splijtbaar) in splijtbaar en niet splijtbaar plutonium in een kweekreactor. We beginnen met een vereenvoudigde aanpak. We gaan er ten eerste van uit dat het neutronen stralingsveld bestaat uit enkel en alleen maar thermische neutronen. In een drukwater reactor is dat een grove benadering, want er komen ook snelle neutronen voor (onmiddellijk na splijting) van enkele MeV, en alle tussenliggende energieën komen voor. Maar in ons vereenvoudigd voorbeeld nemen we aan dat de neutronen bestraling louter thermisch is aan 0.0253 eV. De essentiële reacties, waarbij we de werkzame doorsneden geven voor een neutron energie van 0.0253 eV, zijn de volgende¹²⁰:

- U-238 ondergaat een neutron absorptie (n,gamma), werkzame doorsnede 2.69 barn. Het resultaat is de productie van U-239.
- U-239 ondergaat bèta verval met een halfwaardetijd van 23 minuten in Np-239, en Np-239 ondergaat op zijn beurt bèta verval met een halfwaardetijd van 2.4 dagen in Pu-239.
- Pu-239 ondergaat, onder neutronenbestraling, splijting (751 barn) of neutron absorptie (272 barn). In dat laatste geval wordt Pu-240 geproduceerd.
- Pu-240 ondergaat een beetje splijting (0.06 barn) of – vooral – neutron absorptie (288 barn). In dat laatste geval wordt Pu-241 geproduceerd.
- Pu-241 ondergaat splijting (1013 barn) of neutron absorptie (363 barn). We produceren hierbij Pu-242. Pu-241 ondergaat ook een bèta verval naar Am-241 met een halfwaardetijd van 14.35 jaar, wat vrij vervelend is als men plutonium lang bijhoudt.
- Pu-242 ondergaat zo goed als geen splijting (0.001 barn) en wat neutronenabsorptie (19 barn). Productie van Pu-243.
- Pu-243 kan splijting ondergaan (182 barn) of neutronenabsorptie (88 barn). We vormen Pu-244. In feite ondergaat Pu-243 eerder bèta verval (halfwaardetijd 4.9 uur). Er wordt dus zo goed als geen Pu-244 geproduceerd, want het Pu-243 zal vervallen in Am-243 voor het veel kans heeft om een neutron te absorberen.
- Pu-244 kan neutronen absorberen (1.8 barn).

We nemen als voorbeeld een bestraling in een fluentie van $3 \cdot 10^{13}$ neutronen per centimeter en per seconde en we laten het volgende programma (in Scilab) erop los:

```
clear
sigmau238c = 2.69447422 * 1e-24; // U-238 absorptie
sigmapu239c = 271.802563 * 1e-24; // Pu-239 absorptie
sigmapu239fission = 751.321808 * 1e-24; // Pu-239 splijting
sigmapu240c = 288.500017 * 1e-24; // Pu-240 absorptie
sigmapu240fission = 0.064259524 * 1e-24; // Pu-240 splijting
```

120 <http://www.nndc.bnl.gov/sigma/index.jsp>


```

sigmapu241c = 363.413717 * 1e-24; // Pu-241 absorptie
sigmapu241fission = 1013.10783 * 1e-24; // Pu-241 splijting
sigmapu242c = 19.2476845 * 1e-24; // Pu-242 absorptie
sigmapu242fission = 0.00104722 * 1e-24; // Pu-242 splijting
sigmapu243c = 88.3988641 * 1e-24; // Pu-243 absorptie
sigmapu243fission = 181.996419 * 1e-24; // Pu-243 splijting
sigmapu244c = 1.83614856 * 1e-24; // Pu-244 absorptie

punp = log(2)/(23.45 * 60); // beta verval U-239
pnppu = log(2) / (2.356 * 3600 * 24) ; // beta verval Np-239
ppuam = log(2)/(4.956 * 3600) ; // beta verval Pu-243
nu = 19.0 * 6.2e23 / 238; // densiteit van U-238 atomen per cm3.
dt = 250; // tijdstapje (in seconden)
tfinal = 3e6; // eindtijd (in seconden)
t = 0:dt:tfinal;
lti = size(t);
lt = lti(2) // aantal stappen
u239 = zeros(1,lt);
np239 = zeros(1,lt);
pu239 = zeros(1,lt);
pu240 = zeros(1,lt);
pu241 = zeros(1,lt);
pu242 = zeros(1,lt);
pu243 = zeros(1,lt);
pu244 = zeros(1,lt);
puover = zeros(1,lt);
am243 = zeros(1,lt);
pfiss = zeros(1,lt);
fldeb = 1e14;
a238 = nu * fldeb * sigmapu238c;
j = 0;
for tt = t
    if tt == tfinal
        tt
    else
        j = j + 1;
        u239(j+1) = u239(j) + a238 * dt - punp * u239(j) * dt;
        np239(j+1) = np239(j) + punp*u239(j) * dt - pnppu * np239(j) * dt;
        pu239(j+1) = pu239(j) + pnppu * np239(j) * dt - ...
            pu239(j) *(sigmapu239c + sigmapu239fission) * fldeb * dt;
        pu240(j+1) = pu240(j) + sigmapu239c * pu239(j) * fldeb * dt - ...
            pu240(j) *(sigmapu240c + sigmapu240fission) * fldeb * dt;
        pu241(j+1) = pu241(j) + sigmapu240c * pu240(j) * fldeb * dt - ...
            pu241(j) *(sigmapu241c + sigmapu241fission) * fldeb * dt;
        pu242(j+1) = pu242(j) + sigmapu241c * pu241(j) * fldeb * dt - ...
            pu242(j) *(sigmapu242c + sigmapu242fission) * fldeb * dt;
        pu243(j+1) = pu243(j) + sigmapu242c * pu242(j) * fldeb * dt - ...
            pu243(j) *(sigmapu243c + sigmapu243fission) * fldeb * dt - ...
            pu243(j) * ppuam * dt;
        pu244(j+1) = pu244(j) + sigmapu243c * pu243(j) * fldeb * dt - ...
            pu244(j) *sigmapu244c * fldeb * dt;
        am243(j+1) = am243(j) + pu243(j) * ppuam * dt;
        puover(j+1) = puover(j) + pu244(j) *sigmapu244c * fldeb * dt;

        pfiss(j+1) = pfiss(j) + pu239(j) * sigmapu239fission * fldeb * dt ...
            + pu240(j) * sigmapu240fission * fldeb * dt ...
            + pu241(j) * sigmapu241fission * fldeb * dt ...
            + pu242(j) * sigmapu242fission * fldeb * dt ...
            + pu243(j) * sigmapu243fission * fldeb * dt ;
    end //if
end //for
// teveel punten voor een grafische voorstelling, we nemen een punt op honderd.
tb = t(1:100:lt);
u239b = u239(1:100:lt);
np239b = np239(1:100:lt);

```

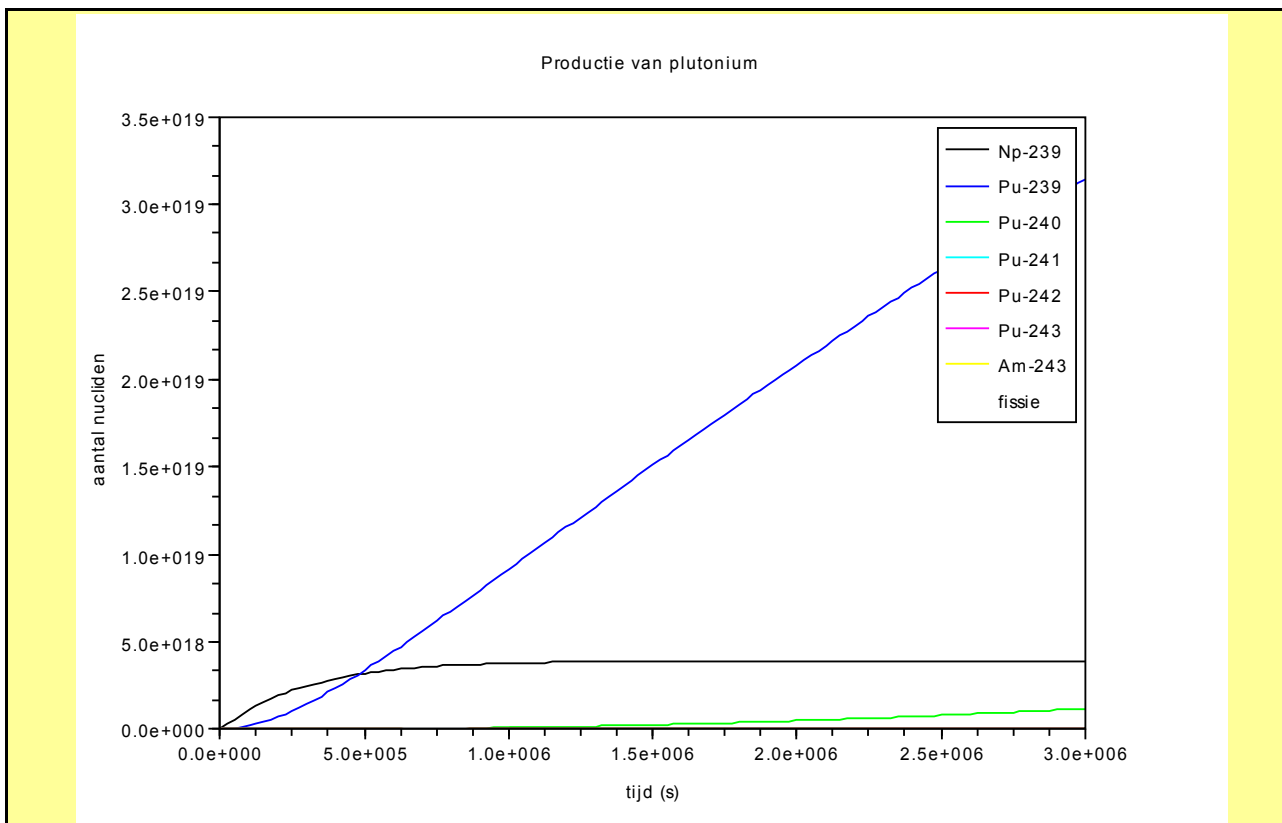
```

pu239b = pu239(1:100:1t);
pu240b = pu240(1:100:1t);
pu241b = pu241(1:100:1t);
pu242b = pu242(1:100:1t);
pu243b = pu243(1:100:1t);
pu244b = pu244(1:100:1t);
am243b = am243(1:100:1t);
pfissb = pfiss(1:100:1t);

plot2d([tb;tb;tb;tb;tb;tb;tb;tb]',
[ np239b;pu239b;pu240b;pu241b;pu242b;pu243b;am243b;pfissb]')

legend("Np-239", "Pu-239", "Pu-240", "Pu-241", "Pu-242", "Pu-243", "Am-243", "fissie");
xtitle('Productie van plutonium', 'tijd (s)', 'aantal nucliden')

```



Afbeelding 33: Nucliden densiteiten bij de bestraling door een fluentie debiet van $3 \cdot 10^{13}$ thermische neutronen per seconde en per vierkante centimeter van zuiver U-238.

Als we naar het resultaat kijken over 3 miljoen seconden, dan vinden we in afbeelding 33 de evolutie van de nuclidensiteiten. 3 miljoen seconden is 34 dagen, terwijl de thermische neutronen fluentie representatief is voor wat er in een drukwater reactor in de kern aanwezig is. De U-238 densiteit is $4.94 \cdot 10^{22}$ nucliden per kubieke centimeter en na ongeveer een maand is er 0.02% Pu-239 gevormd, maar het is wel isotopisch vrij zuiver Pu-239. We zien ook dat na ongeveer een week, de densiteit van Np-239 constant is.

Als we over langere tijden willen werken, dan kunnen we de U-239 naar Np-239 naar Pu-239 als ogenblikkelijk beschouwen. Dat laat ons toe om de tijdstappen groter te kiezen. We doen dat in het volgende programma:

```
clear
```

```

sigmau238c = 2.69447422 * 1e-24; // U-238 absorptie
sigmapu239c = 271.802563 * 1e-24; // Pu-239 absorptie
sigmapu239fission = 751.321808 * 1e-24; // Pu-239 splijting
sigmapu240c = 288.500017 * 1e-24; // Pu-240 absorptie
sigmapu240fission = 0.064259524 * 1e-24; // Pu-240 splijting
sigmapu241c = 363.413717 * 1e-24; // Pu-241 absorptie
sigmapu241fission = 1013.10783 * 1e-24; // Pu-241 splijting
sigmapu242c = 19.2476845 * 1e-24; // Pu-242 absorptie
sigmapu242fission = 0.00104722 * 1e-24; // Pu-242 splijting
sigmapu243c = 88.3988641 * 1e-24; // Pu-243 absorptie
sigmapu243fission = 181.996419 * 1e-24; // Pu-243 splijting
sigmapu244c = 1.83614856 * 1e-24; // Pu-244 absorptie

// punp = log(2)/(23.45 * 60); // beta verval U-239
// pnppu = log(2) / (2.356 * 3600 * 24) ; // beta verval Np-239
ppuam = log(2)/(4.956 * 3600) ; // beta verval Pu-243
nu = 19.0 * 6.2e23 / 238; // densiteit van U-238 atomen per cm3.
dt = 2e3; // tijdstapje (in seconden)
tfinal = 1e8; // eindtijd (in seconden)
t = 0:dt:tfinal;
lti = size(t);
lt = lti(2) // aantal stappen
// u239 = zeros(1,lt);
// np239 = zeros(1,lt);
pu239 = zeros(1,lt);
pu240 = zeros(1,lt);
pu241 = zeros(1,lt);
pu242 = zeros(1,lt);
pu243 = zeros(1,lt);
pu244 = zeros(1,lt);
puover = zeros(1,lt);
am243 = zeros(1,lt);
pfiss = zeros(1,lt);
fldeb = 3e13;
a238 = nu * fldeb * sigmau238c;
j = 0;
for tt = t
    if tt == tfinal
        tt
    else
        j = j + 1;

        pu239(j+1) = pu239(j) + a238 * dt - ...
            pu239(j) *(sigmapu239c + sigmapu239fission) * fldeb * dt;
        pu240(j+1) = pu240(j) + sigmapu239c * pu239(j) * fldeb * dt - ...
            pu240(j) *(sigmapu240c + sigmapu240fission) * fldeb * dt;
        pu241(j+1) = pu241(j) + sigmapu240c * pu240(j) * fldeb * dt - ...
            pu241(j) *(sigmapu241c + sigmapu241fission) * fldeb * dt;
        pu242(j+1) = pu242(j) + sigmapu241c * pu241(j) * fldeb * dt - ...
            pu242(j) *(sigmapu242c + sigmapu242fission) * fldeb * dt;
        pu243(j+1) = pu243(j) + sigmapu242c * pu242(j) * fldeb * dt - ...
            pu243(j) *(sigmapu243c + sigmapu243fission) * fldeb * dt - ...
            pu243(j) * ppuam * dt;
        pu244(j+1) = pu244(j) + sigmapu243c * pu243(j) * fldeb * dt - ...
            pu244(j) *sigmapu244c * fldeb * dt;
        am243(j+1) = am243(j) + pu243(j) * ppuam * dt;
        puover(j+1) = puover(j) + pu244(j) *sigmapu244c * fldeb * dt;

        pfiss(j+1) = pfiss(j) + pu239(j) * sigmapu239fission * fldeb * dt ...
            + pu240(j) * sigmapu240fission * fldeb * dt ...
            + pu241(j) * sigmapu241fission * fldeb * dt ...
            + pu242(j) * sigmapu242fission * fldeb * dt ...
            + pu243(j) * sigmapu243fission * fldeb * dt ;
    end //if

```

```

end //for

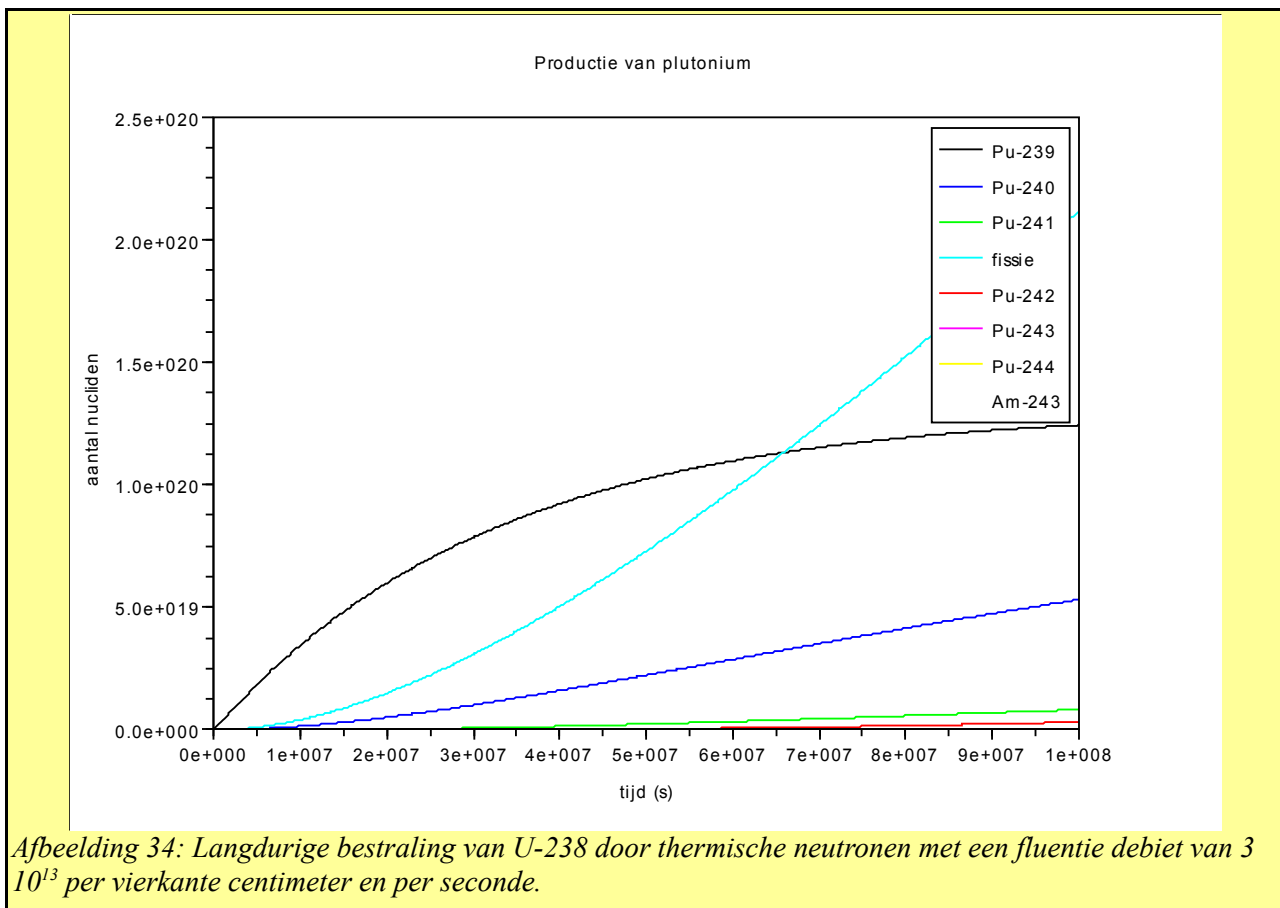
// teveel punten voor een grafische voorstelling, we nemen een punt op k.
tidx = 1:100:lt;
tb = t(tidx);

pu239b = pu239(tidx);
pu240b = pu240(tidx);
pu241b = pu241(tidx);
pu242b = pu242(tidx);
pu243b = pu243(tidx);
pu244b = pu244(tidx);
am243b = am243(tidx);
pfissb = pfiss(tidx);

plot2d([tb;tb;tb;tb;tb;tb;tb;tb;tb]',
[pu239b;pu240b;pu241b;pfissb;pu242b;pu243b;pu244b;...
 am243b]')

legend("Pu-239", "Pu-240", "Pu-241", "fissie", "Pu-242", "Pu-243", "Pu-244", "Am-243");
xtitle('Productie van plutonium', 'tijd (s)', 'aantal nucliden')

```



Afbeelding 34: Langdurige bestraling van U-238 door thermische neutronen met een fluentie debiet van $3 \cdot 10^{13}$ per vierkante centimeter en per seconde.

We nodigen de geïnteresseerde lezer uit om het verschil te zoeken met het vorige programma. Het resultaat (over honderd miljoen seconden of ongeveer drie jaar, de tijd die een brandstofelement normaal in de reactor vertoeft) wordt getoond in afbeelding 34. We stellen vast dat de Pu-239 dichtheid vastloopt rond de $1.24 \cdot 10^{20}$ nucliden per kubieke centimeter of 0.25% van de U-238 dichtheid. We stellen vast dat Pu-240 een dichtheid heeft van $5.3 \cdot 10^{19}$ nucliden per kubieke centimeter (0.1%); Pu-241 heeft een dichtheid van $8.2 \cdot 10^{18}$ per kubieke centimeter en Pu-242 een

dichtheid van $3.1 \cdot 10^{18}$ per kubieke centimeter terwijl er $2.1 \cdot 10^{20}$ (0.4%) fissies hebben plaatsgevonden in een kubieke centimeter. De relatieve isotopische samenstelling van het plutonium is dus volgens deze berekening: 66% Pu-239, 28% Pu-240, 4% Pu-241 en 2% Pu-242. Als men veel langer bestraalt, dan blijft de Pu-239 dichtheid ongeveer constant, en stijgen de andere plutonium isotopen, evenals het aantal fissies.

De bovenstaande waarden zijn niet echt de correcte waarden die men vindt voor de plutonium productie in een echte drukwater reactor: men vindt eerder 0.6% Pu-239 en de isotopenverhouding (239/240/241/242) is 58% - 23% - 11% - 6%. Hadden we een fluentie debiet van $6 \cdot 10^{13}$ neutronen per seconde en per vierkante centimeter genomen (twee keer zoveel), dan waren we uitgekomen op de volgende waarden (de geïnteresseerde lezer kan dat proberen door zelf het programma op zijn computer te draaien): 1.1% splijting in het plutonium en nog 0.5% plutonium in de eindtoestand. 0.26% Pu-239 op het einde, en de isotopische samenstelling van het plutonium is: 50% Pu-239, 36% Pu-240, 7% Pu-241 en 7% Pu-242. Hoewel we de goede orde van grootte te pakken hebben, zijn er toch nog verschillen met de echte waarden, en vooral een factor twee ten opzichte van de echte plutonium productie in brandstof.

Men dient zich niet te verbazen dat de resultaten in een echte drukwater reactor wat verschillen met onze berekening. De berekening die we gemaakt hebben was met een zuiver thermisch spectrum van neutronen, terwijl er zich in een drukwater reactor een deel snelle neutronen bevinden in het spectrum die gemakkelijk resonantie absorptie ondergaan en hierbij extra Pu-239 produceren – we zullen nog op de berekening van zo een spectrum terugkomen. Als we een heel spectrum aan neutron energieën hebben, dan wordt de berekening op het eerste zicht veel ingewikkelder. We zouden op het eerste gezicht vakjes moeten opstellen voor elke neutronenenergie. Men kan dat probleem echter eenvoudiger maken, door te beseffen dat de totale reactiesnelheid de som is van de reactiesnelheden per energievakje:

$$\tau_i = \int \sigma(E) \phi(E) N dE = N \int \sigma(E) \phi(E) dE = N \bar{\sigma} \phi_i$$

Hierin stelt N de nuclidendensiteit voor van de doelnuclide, sigma de werkzame doorsnede voor de gegeven reactie als functie van de neutronenenergie en phi de scalaire flux (ook functie van de energie). Als we de gemiddelde sigma uitrekenen, gemiddeld over de scalaire flux, dan volstaat het om die gemiddelde sigma te gebruiken, samen met het fluentie debiet, alsof dat de werkzame doorsnede was bij een bepaalde energie en dat fluentie debiet een fluentie debiet was van neutronen enkel bij die energie. Met andere woorden, we kunnen het bovenstaande programma opnieuw gebruiken, maar in plaats van de werkzame doorsneden bij thermische energie in te voeren, dienen we de gemiddelde werkzame doorsneden gemiddeld over het echte neutronenspectrum aanwezig in de reactor te gebruiken. Er is echter een kleine extra moeilijkheid: als de samenstelling van de brandstof evolueert (door, bijvoorbeeld, productie van plutonium nucliden en zo), zal dat ook een verandering invoeren van het neutronenspectrum. Als dusdanig moet men eigenlijk per tijdstap opnieuw het neutronenspectrum bepalen om nieuwe gemiddelde werkzame doorsneden uit te rekenen. Alles hangt af van de precisie waarmee men de uiteindelijke resultaten wil kennen.

Als we als neutronenspectrum, het fissiespectrum van de vrijkomende neutronen bij een fissiereactie nemen, zonder moderator-vertraging van de neutronen, dan kunnen we de gemiddelde werkzame doorsneden voor zulk een spectrum in principe berekenen met de formule:

$$\bar{\sigma} = \frac{\int \sigma(E) \phi(E) dE}{\int \phi(E) dE}$$

We geven hier de waarden die men als dusdanig berekend heeft:

- U-238 absorptie: 0.07 barn
- Pu-239 absorptie: 0.05 barn
- Pu-239 splijting: 1.8 barn
- Pu-240 absorptie: 0.09 barn
- Pu-240 splijting: 1.4 barn
- Pu-241 absorptie: 0.12 barn
- Pu-241 splijting: 1.6 barn
- Pu-242 absorptie: 0.09 barn
- Pu-242 splijting: 1.1 barn

We merken hier verschillende punten op. Ten eerste *zijn de werkzame doorsneden voor een fissiespectrum veel kleiner dan voor een thermisch spectrum*. Ten tweede is *de verhouding van splijting over absorptie in plutonium veel groter dan voor een thermisch spectrum* (ongeveer 10 keer meer). Bovendien zijn de werkzame doorsneden *voor zowel absorptie als splijting vergelijkbaar voor de verschillende plutonium isotopen*. Dat zal als belangrijk gevolg hebben dat er slechts heel weinig Pu-240 en hoger geproduceerd zal worden in vergelijking met de Pu-239 die geproduceerd wordt, met andere woorden, de isotopische kwaliteit van het geproduceerde plutonium is van hoge kwaliteit, zelfs onder intense bestraling.

In snelle reactoren is het neutronenspectrum ongeveer gelijk aan het fissiespectrum. Het neutronen fluëntiedebiet is er ook meestal veel hoger: van de orde van 10^{15} neutronen per seconde en per vierkante centimeter, al ware het gewoon maar omdat de snelheid van de neutronen veel hoger is.

Het volgende programmaatje (dat heel sterk lijkt op het voorgaande, alleen hebben we de waarden van de werkzame doorsneden aangepast en Pu-244 weggehaald wegens gebrek aan gegevens) maakt de berekening met bovenstaande getallen:

```
clear
sigmau238c = 0.07 * 1e-24; // U-238 absorptie
sigmapu239c = 0.05 * 1e-24; // Pu-239 absorptie
sigmapu239fission = 1.8 * 1e-24; // Pu-239 splijting
sigmapu240c = 0.09 * 1e-24; // Pu-240 absorptie
sigmapu240fission = 1.4 * 1e-24; // Pu-240 splijting
sigmapu241c = 0.12 * 1e-24; // Pu-241 absorptie
sigmapu241fission = 1.6 * 1e-24; // Pu-241 splijting
sigmapu242c = 0.09 * 1e-24; // Pu-242 absorptie
sigmapu242fission = 1.1 * 1e-24; // Pu-242 splijting

ppuam = log(2)/(4.956 * 3600) ; // beta verval Pu-243
nu = 19.0 * 6.2e23 / 238; // densiteit van U-238 atomen per cm3.
dt = 2e3; // tijdstapje (in seconden)
tfinal = 1e8; // eindtijd (in seconden)
t = 0:dt:tfinal;
lti = size(t);
lt = lti(2) // aantal stappen
pu239 = zeros(1,lt);
pu240 = zeros(1,lt);
pu241 = zeros(1,lt);
pu242 = zeros(1,lt);
pu243 = zeros(1,lt);
am243 = zeros(1,lt);
pfiss = zeros(1,lt);
fldeb = 2e15;
a238 = nu * fldeb * sigmau238c;
```

```

j = 0;
for tt = t
    if tt == tfinal
        tt
    else
        j = j + 1;

        pu239(j+1) = pu239(j) + a238 * dt - ...
            pu239(j) * (sigmapu239c + sigmapu239fission) * fldeb * dt;
        pu240(j+1) = pu240(j) + sigmapu239c * pu239(j) * fldeb * dt - ...
            pu240(j) * (sigmapu240c + sigmapu240fission) * fldeb * dt;
        pu241(j+1) = pu241(j) + sigmapu240c * pu240(j) * fldeb * dt - ...
            pu241(j) * (sigmapu241c + sigmapu241fission) * fldeb * dt;
        pu242(j+1) = pu242(j) + sigmapu241c * pu241(j) * fldeb * dt - ...
            pu242(j) * (sigmapu242c + sigmapu242fission) * fldeb * dt;
        pu243(j+1) = pu243(j) + sigmapu242c * pu242(j) * fldeb * dt - ...
            pu243(j) * ppuam * dt;
        am243(j+1) = am243(j) + pu243(j) * ppuam * dt;

        pfiss(j+1) = pfiss(j) + pu239(j) * sigmapu239fission * fldeb * dt ...
            + pu240(j) * sigmapu240fission * fldeb * dt ...
            + pu241(j) * sigmapu241fission * fldeb * dt ...
            + pu242(j) * sigmapu242fission * fldeb * dt;

    end //if
end //for

// teveel punten voor een grafische voorstelling, we nemen een punt op k.
tidx = 1:100:lt;
tb = t(tidx);
pu239b = pu239(tidx);
pu240b = pu240(tidx);
pu241b = pu241(tidx);
pu242b = pu242(tidx);
pu243b = pu243(tidx);
am243b = am243(tidx);
pfissb = pfiss(tidx);

plot2d([tb;tb;tb;tb;tb;tb;tb]', [pu239b;pu240b;pu241b;pu242b;pu243b;am243b;pfissb]')

legend("Pu-239", "Pu-240", "Pu-241", "Pu-242", "Pu-243", "Am-243", "fissie");
xlabel('Productie van plutonium', 'tijd (s)', 'aantal nucliden')

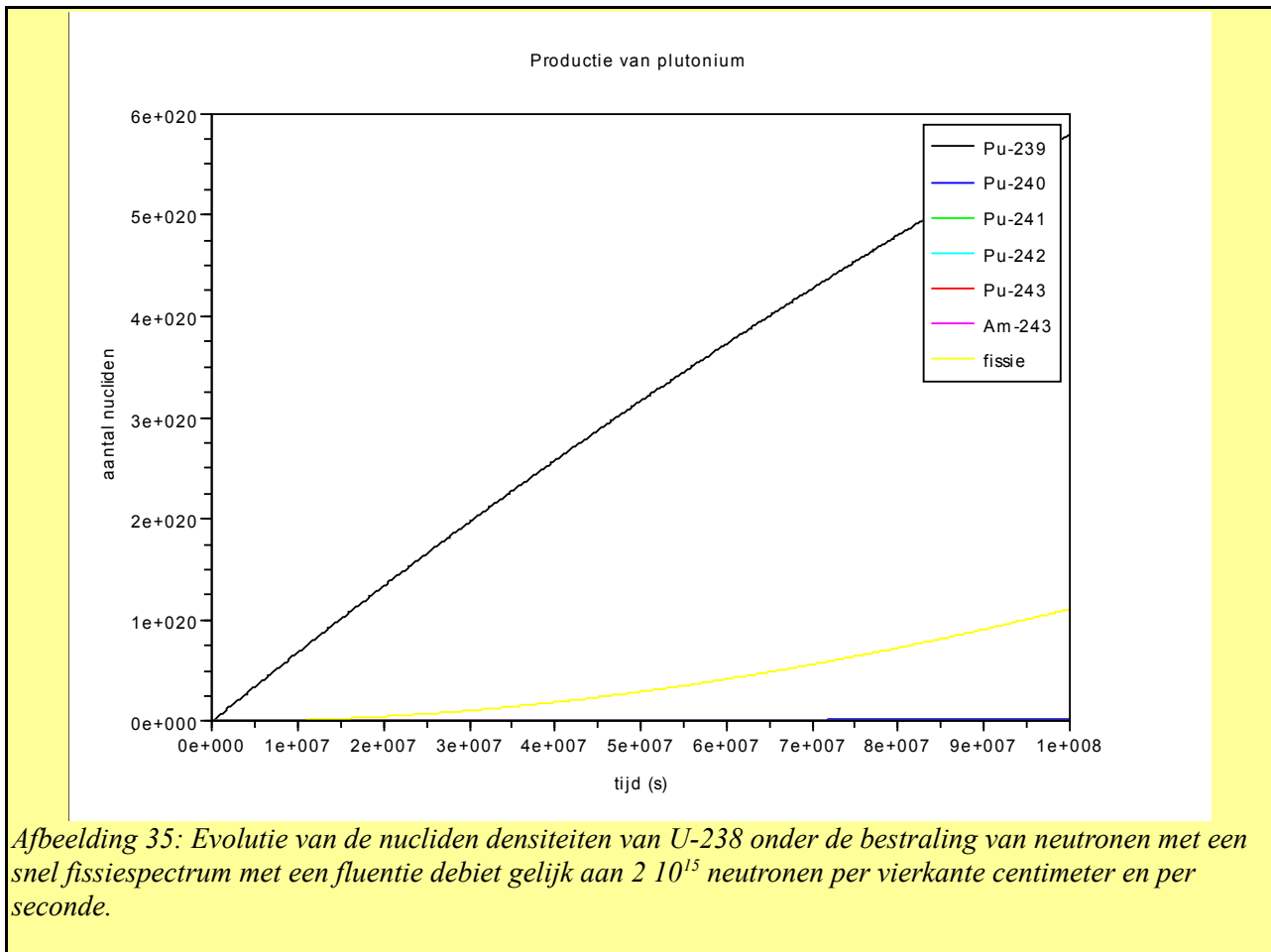
```

Het resultaat is zichtbaar in de afbeelding 35. Men stelt een zuivere groei van Pu-239 vast, evenals wat fissie, en zo goed als geen Pu-240 of hoger. Aan het einde van de bestraling vinden we $5.8 \cdot 10^{20}$ Pu-239 nucliden per kubieke centimeter, wat neerkomt op 1.2% van de nucliden. Pu-240 staat in voor 0.006% van de nucliden. *We hebben dus een heel zuivere Pu-239 productie.* Dat is enerzijds heel goed als brandstofkwaliteit, anderzijds stelt dat eventueel een probleem (afhankelijk waar de reactor zich bevindt) voor proliferatie: dit plutonium is van militaire kwaliteit en wordt in grote dichtheid geproduceerd. Ongeveer 0.2% van de nucliden heeft een fissie ondergaan. De hoeveelheid Am-243 die geproduceerd wordt is belachelijk klein (ongeveer 0.000 000 000 7 %).

Als we 5 keer langer bestralen (of vijf keer intensere fluentie debieten aanwenden), dan begint de Pu-239 productie te verzadigen, en vinden we (na 500 miljoen seconden of ongeveer 16 jaar) 3.2% Pu-239, 0.06% Pu-240, 3.7% fissie en 0.000 001 % Am-243. Dat is fantastisch! *We hebben nu een vrij hoge graad van plutonium productie bereikt, en zelfs ongeveer evenveel plutonium "opgestookt", en de isotopische samenstelling is nog steeds van heel goede kwaliteit.* Dit is het voordeel van een reactor met snel spectrum: de omzetting van U-238 in Pu-239 kan gebeuren bij hoge productiegraad en met goede kwaliteit - in tegenstelling tot een drukwater reactor met thermisch spectrum. We wijzen er weer op dat de berekeningen die we hier maken uiterst

eenvoudig zijn, en geen rekening hebben gehouden met heel wat verschijnselen. Niettemin is de essentie van het resultaat juist, ook al zou men een ingewikkelder berekening dienen te maken als men ook numeriek juiste waarden met grote precisie wenst te bekomen.

In feite zijn we een reactie vergeten in bovenstaande schema: gezien we nu hogere neutronenenergieën hebben, zijn er ook reacties mogelijk (de lezer kan dat verifiëren door naar de



Afbeelding 35: Evolutie van de nucliden densiteiten van U-238 onder de bestraling van neutronen met een snel fission spectrum met een fluentie debiet gelijk aan $2 \cdot 10^{15}$ neutronen per vierkante centimeter en per seconde.

desbetreffende werkzame doorsneden te kijken) waarbij een neutron geabsorbeerd wordt, en twee neutronen worden uitgezonden (inelastische botsing), zodat het netto effect is dat onder neutronenbestraling, een nuclide een neutron verliest. Bijvoorbeeld, de reactie Pu-239 (n,2n) Pu-238 heeft een werkzame doorsnede van 0.004 barn. Men kan zonder veel moeite deze termen bijvoegen in de boekhouding in het bovenstaande programma. Als men naar het numerieke resultaat kijkt, verandert dat echter nauwelijks iets.

Een laatste voorbeeld: de Xenon “vergiftiging” in een reactor, dat een rol heeft gespeeld in het Chernobyl ongeluk, en dat een belangrijk aspect betekent in de dynamica van elke thermische reactor.

Een splijting van U-235 geeft in 6.1% van de gevallen aanleiding tot de productie van Te-135 (tellurium), wat binnen de minuut verval naar I-135. Dat I-135 ondergaat met een halfwaardetijd van 6.7 uur een bèta verval naar Xe-135, dat zelf met een halfwaardetijd van 9.2 uur een bèta verval ondergaat. Een splijting van U-235 geeft ook in 0.2% van de gevallen direct aanleiding tot de productie van een Xe-135 nuclide (direct fissionproduct). Xe-135 heeft een ongelooflijk hoge

werkzame doorsnede voor radiatieve neutronvangst: $2.6 \cdot 10^6$ barn bij thermische energie. We gaan na hoe de Xe-135 dichtheid evolueert als men de neutronenflux in een kernreactor verandert, wat in de praktijk neerkomt op wat er gebeurt als men het vermogen van de reactor plots vermindert of verhoogt.

Laten we uitgaan van een thermisch fluentie debiet van de orde van 10^{14} neutronen per vierkante centimeter en per seconde in een reactor. Bij een isotopenconcentratie van 3% U-235 in uranium oxide (UO_2 met een dichtheid van 11 g/cm^3) hebben we een U-235 nuclidendichtheid van $1.0 \cdot 10^{21}$ U-235 nucliden per kubieke centimeter.

Hetvolgende programma maakt de berekening:

```
clear // met een schone lei beginnen.
dt = 360; // het kleine tijdsinterval, in seconden
piodium = 1/(6.7 * 3600) // de kans per tijdseenheid voor een kern om te vervallen
// I-135/Xe-135
pxenon = 1/(9.2 * 3600) // de kans per tijdseenheid vooe een Xe-135 om te vervallen
n235 = 0.04 * 11/(238+2*16)*6.2e23;
sigmafission=316 * 1e-24; // werkzame doorsnede fissie U-235;
sigma=0.06*n235*sigmafission; // macroscopische werkzame doorsnede voor I-135
// productie
sigma2=0.002*n235*sigmafission; // macroscopische werkzame doorsnede directe Xe-135
// productie
sigmaxe = 2.6e-18 // microscopische werkzame doorsnede voor Xe-135 neutron vangst
t = 0:dt:500*3600; // alle tijdsintervallen, van 0 tot 500 uren.
lti = size(t);
steps = lti(2) - 1; // aantal stappen (een minder dan het aantal intervallen)
nflux(1:1000) = 0.9e14; // de neutronenflux
nflux(1001:3000) = 1e13;
nflux(3001:3500)=2.1e14;
nflux(3501:3700)=1e13;
nflux(3701:5001)=0.9e14;
iodium(1:steps+1)=0;
xenon(1:steps+1)=0;

for i = 1:steps // we gaan over het aantal stappen lopen
iodium(i+1) = iodium(i) - dt * piodium * iodium(i)+dt*sigma*nflux(i); //i-135
// productie
xenon(i+1) = xenon(i) + dt * piodium * iodium(i)-dt*sigmaxe*xenon(i)*nflux(i)+...
dt*sigma2*nflux(i) - dt * pxenon*xenon(i); // idem, maar voor de xenon
// atomen
end //for
tt = t/3600; // tijd in uren
plot(tt,nflux*500,tt,iodium,tt,xenon)

legend("flux (x 500)","I-135 atomen","Xe-135 atomen")
xlabel("verloop van Xe-135 dichtheid","tijd (uren)","aantal atomen")
```

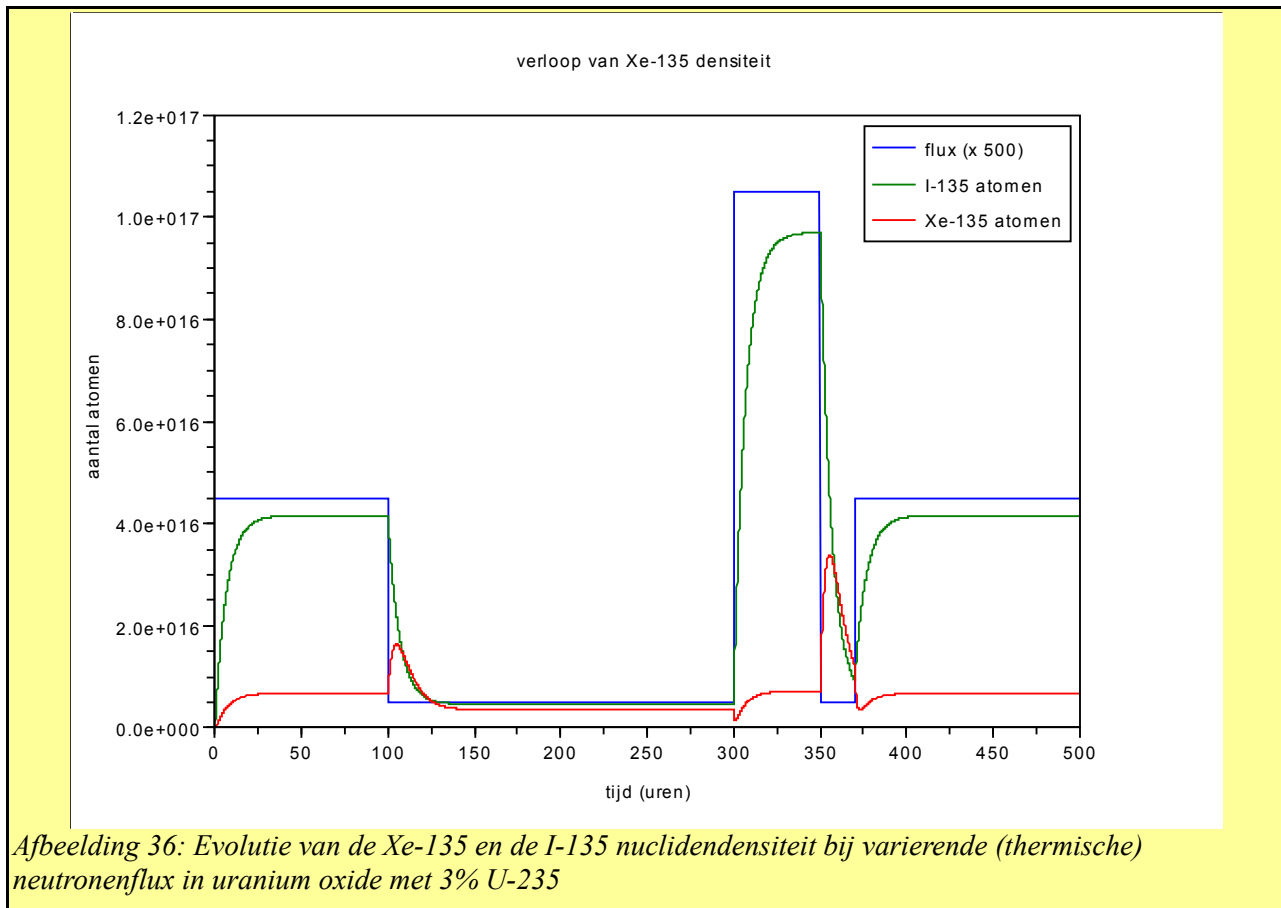
In het bovenstaande programma hebben we eerst een fluentie debiet van $9 \cdot 10^{13}$ (neutronen per vierkante centimeter en per seconde) gedurende 100 uur, vervolgens een deling van het vermogen door 9 gedurende 200 uur, vervolgens een bruuske stijging van het vermogen met een factor 21 gedurende 50 uur, een even bruuske daling gedurende 20 uur, om tenslotte tot het initiële vermogen te komen van $9 \cdot 10^{13}$ voor de laatste 130 uur.

Het resultaat is getoond in afbeelding 36. Het neutronen fluentie debiet dat we opleggen is (vijfhonderd keer groter dan werkelijk, om zichtbaar te maken op de grafiek) getoond, en de evoluerende nuclidendensiteiten van Xe-135 en I-135 zijn getoond, als functie van de tijd.

Men stelt onmiddellijk de moeilijkheid vast: Hoewel initieel de dichtheid van de nucliden naar een evenwicht streeft bij een zeker vermogen, bekomen we, bij een bruuske daling van het vermogen

een heel hoge Xe-135 piek, die nadien afsterft naar de nieuwe, lagere, evenwichtswaarde. Door het grote neutronen-absorberende vermogen van Xe-135 wil dat dus zeggen dat gedurende een zekere tijd, de absorptie van neutronen in de reactor veel hoger is dan normaal, en hij dus “moeilijker” tot een kritische conditie kan komen.

Het gevaar bestaat er dan in dat men op een of andere wijze toch het vermogen bruusk laat stijgen.



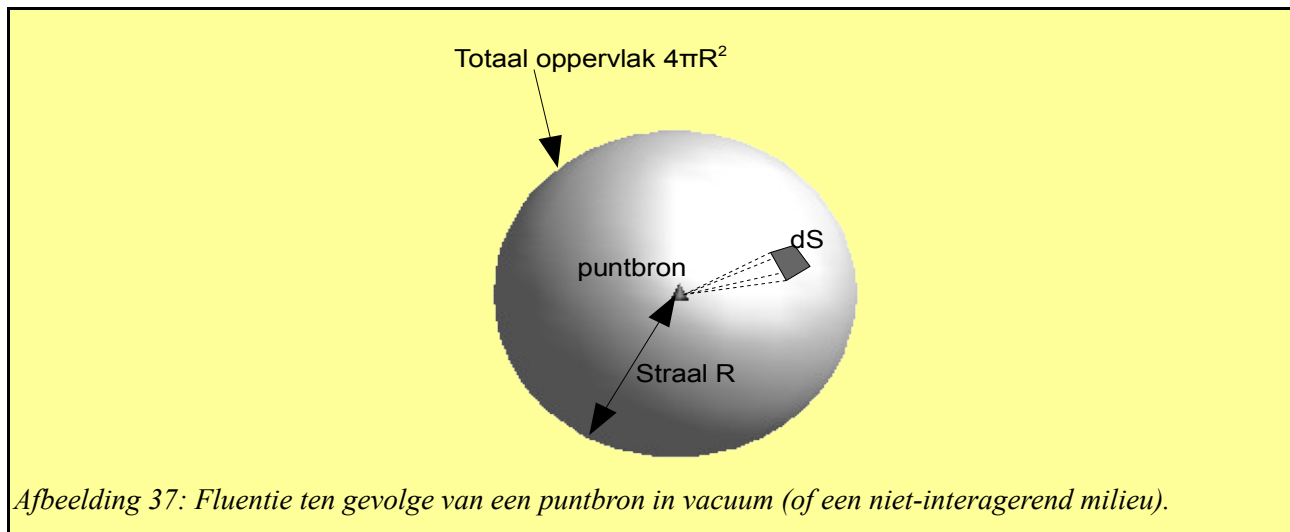
Afbeelding 36: Evolutie van de Xe-135 en de I-135 nuclidendensiteit bij variërende (thermische) neutronenflux in uranium oxide met 3% U-235

Dat is wat verder geïllustreerd in de afbeelding: we gaan rond de 300 uur terug naar hoog vermogen, gaan bij 350 uur terug naar laag vermogen (we bekommen dus opnieuw een Xe-135 piek), en in de piek gaan we op 370 uur terug bruusk naar een hoger vermogen. We zien dat het Xe-135 gehalte (dat dus de reactor sterk afremde), brutaal ineens stort. Het is alsof de rem plots breekt! Als er geen mechanisme bestaat dat op dat ogenblik het wegvallen van de Xe-135 absorptie kan vervangen, kunnen we een heel sterke vermogenstoename krijgen. Dat is wat er gebeurd is in Chernobyl, waar zo geen mechanismen aanwezig waren.

4.3 Stralingsvelden

4.3.a De wet van Boltzmann

Zoals eerder gesteld kunnen we het daadwerkelijke stralingstransport maar summier aansnijden als we niet te ver buiten het kader van deze tekst willen gaan, maar we trachten toch enkele elementen in te voeren die de lezer een idee geven van wat er gebeurt. Wat we hier vertellen over neutronen



Afbeelding 37: Fluentie ten gevolge van een puntbron in vacuum (of een niet-interagerend milieu).

gaat in de meeste gevallen ook op voor gamma straling. Het kan zijn dat het volgende stukje werkelijk een beetje te technisch wordt voor sommige lezers. Die lezers kunnen trachten diagonaal een vaag idee te krijgen wat er gebeurt, en verder kunnen ze dit stuk dan maar overslaan.

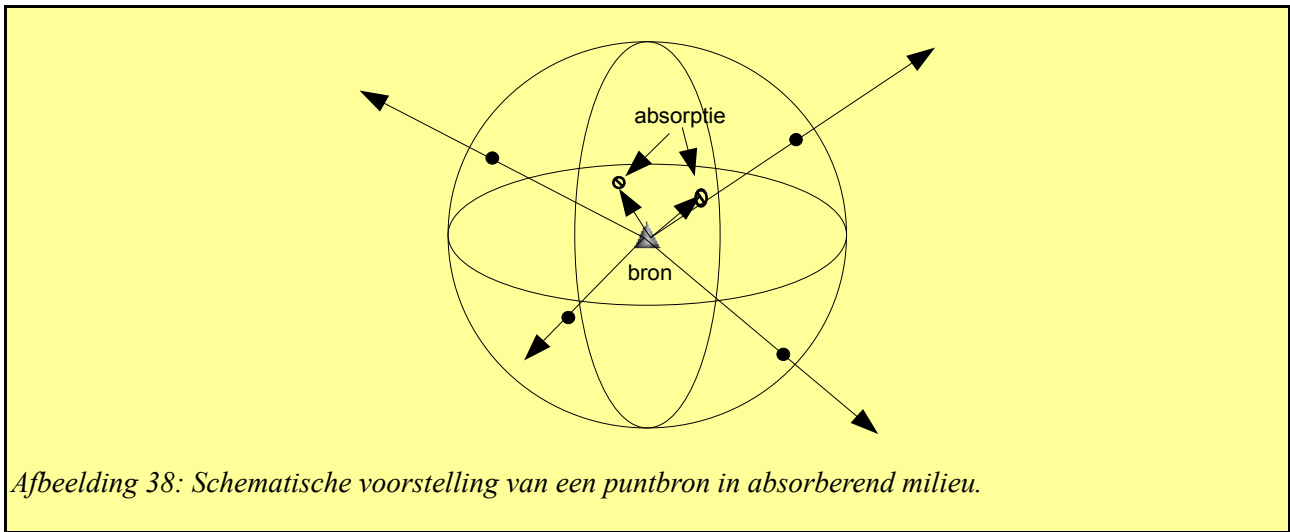
We beginnen met een heel eenvoudig geval: een kleine neutronenbron in de lege ruimte, die $S(E)dE$ neutronen per seconde uitzendt in alle mogelijke richtingen in het energie interval E tot $E+dE$. We hebben dit geval reeds behandeld, en we illustreren de situatie in figuur 37. Op een afstand R van de bron vinden we een scalaire flux gelijk aan:

$$\varphi(E) = \frac{S(E)}{4\pi R^2}$$

Dat komt gewoon omdat alle neutronen uitgezonden door de bron, ook door een sferoppervlak met straal R gaan. Gezien alle richtingen gelijk verdeeld zijn, is het aantal neutronen per oppervlakte eenheid en per seconde dan gewoon gelijk aan de hoeveelheid neutronen die de bron uitzendt, gedeeld door het totale oppervlak van de sfeer. Als we aan beide kanten door dE delen, vinden we bovenstaande formule.

Iets moeilijker nu. Beschouw nog steeds onze puntbron, maar nu bevinden we ons in een uniform en homogeen materiaal dat neutronen absorbeert. We illustreren het in figuur 38. Als de nuclidendichtheid van de absorberende stof gelijk is aan N en de (microscopische) werkzame doorsnede van absorptie gelijk is aan sigma, dan kan men de zogenaamde *macroscopische werkzame doorsnede* invoeren: $\Sigma(E) = N\sigma(E)$. De kans dat een neutron, dat van de bron S rechtlijnig naar ons “punt van waarneming” op straal R gaat, alle absorptie heeft overleefd, is gelijk aan $\exp(-\Sigma(E)R)$. Als dusdanig is de scalaire flux op afstand R nu gelijk aan:

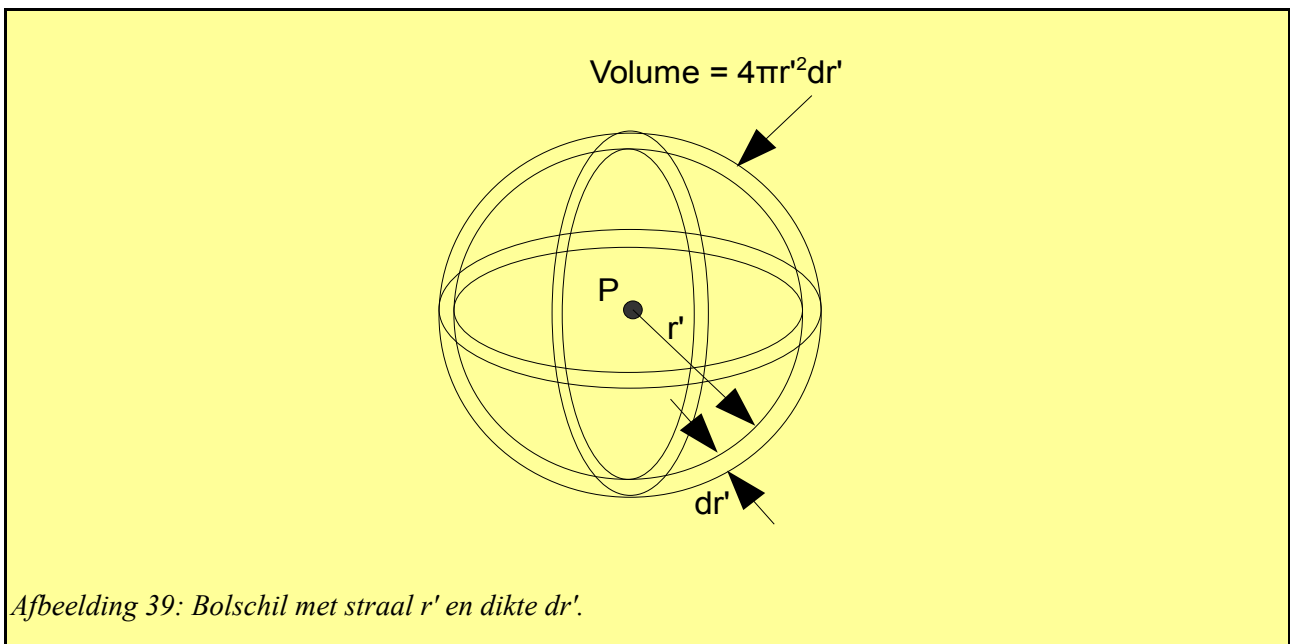
$$\varphi(E) = \frac{S(E) \exp(-\Sigma(E)R)}{4\pi R^2}$$



Afbeelding 38: Schematische voorstelling van een puntbron in absorberend milieu.

Nog een stukje moeilijker. Veronderstel nu dat er niet 1, maar verschillende bronnen zijn, verdeeld in de ruimte. We noteren de bronnen nu als $S(E, x', y', z')$: de hoeveelheid neutronen die wordt uitgezonden door het blokje in de ruimte met zijden dx' , dy' en dz' , per tijdseenheid per eenheid van energie interval. De scalaire flux in een punt P is nu gewoon *de som van de bijdragen van elke bron afzonderlijk*. Inderdaad, de neutronen die van bron 1 komen hebben niets te maken met de neutronen die van bron 2 komen, en als er 25 neutronen van bron 1 in P toekomen en 18 van bron 2, dan komen er in het totaal 43 neutronen toe in het punt P. We schrijven dit als volgt onder formulevorm, waar we dus de som maken over alle blokjes die bronnen bevatten:

$$\varphi(E, x, y, z) = \int \frac{S(E, x', y', z') \exp(-\Sigma(E)R)}{4\pi R^2} dx' dy' dz'$$



Afbeelding 39: Bolschil met straal r' en dikte dr' .

Let wel op: R is de afstand tussen het punt P met coördinaten (x,y,z) en de bron in het punt met coördinaten (x',y',z') , dus R hangt af van x', y' en z' ook al schrijven we dat niet om de notatie niet te overladen.

Toepassing: veronderstel dat we een oneindig groot stuk materie hebben waarin homogeen een bron aanwezig is uniform verdeeld in de ruimte, en die ook homogeen absorbeert. Voor alle gemak nemen we het punt P in de oorsprong (dus $x=y=z=0$). Bovenstaande vergelijking wordt dan:

$$\varphi(E, x=0, y=0, z=0) = S(E) \int \frac{\exp(-\Sigma(E)R)}{4\pi R^2} dx' dy' dz'$$

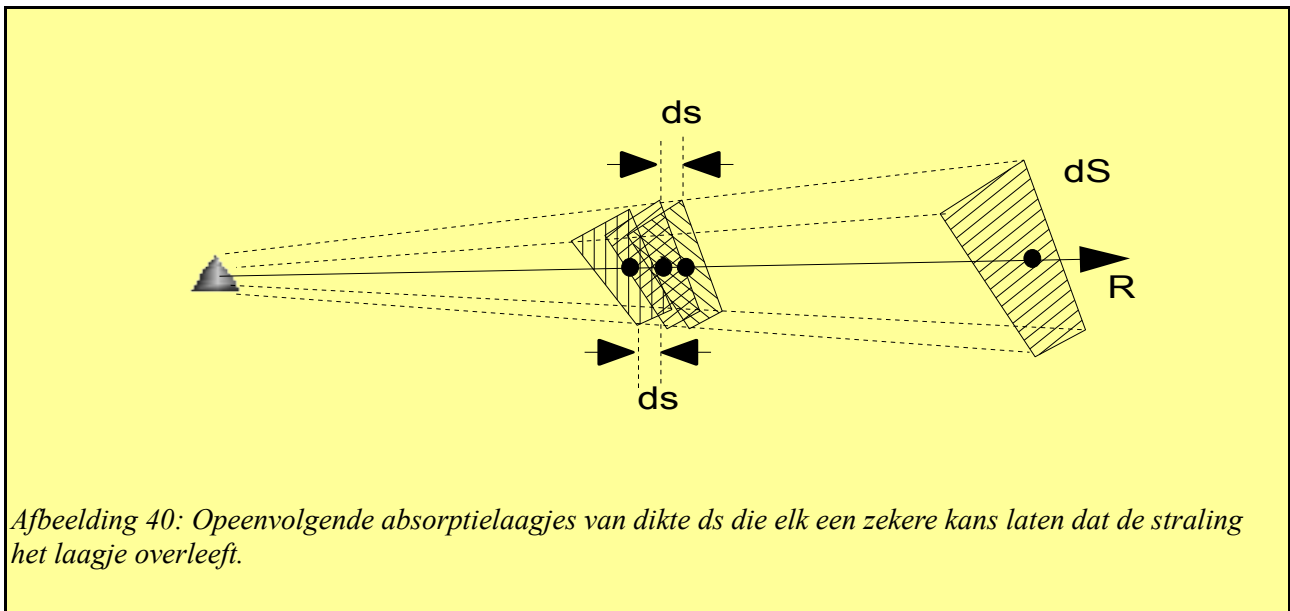
In plaats van de som te maken over balkjes (dx', dy', dz') kan men ook de som maken over sferische schillen tussen r' en $r'+dr'$. Het volume van zo een schil (zie figuur 39) is gelijk aan $4\pi r'^2 dr'$ (als dr' veel kleiner is dan r') dat dus het volume van het balkje $dx' dy' dz'$ vervangt. We moeten dan enkel maar de som maken over alle r' intervallen:

$$\varphi(E, x=0, y=0, z=0) = S(E) \int \frac{\exp(-\Sigma(E)R)}{4\pi R^2} 4\pi r'^2 dr'$$

Bovendien is R nu gemakkelijk geschreven als functie van r' : $R = r'!$ Inderdaad, de punten van de schil tussen r' en $r' + dr'$ liggen allemaal op afstand $R = r'$ van het punt P (dat we in de oorsprong hebben gelegd), als we de kleine dr' kunnen verwaarlozen.

Er blijft dus over: $\varphi(E, x=0, y=0, z=0) = S(E) \int \exp(-\Sigma(E)r') dr'$

Men kan weer een computer programma schrijven om de som te maken aan de rechterkant, maar de wiskunde komt ons ter hulp: de som over alle r' intervalletjes van 0 tot oneindig (eigenlijk: de integraal) is gemakkelijk uitgerekend als volgt: $\int \exp(-\Sigma(E)r') dr' = \frac{1}{\Sigma(E)}$. Het is een van die gevallen waar we een formule kunnen neerschrijven voor zo een som.



Bijgevolg is onze scalaire flux in punt P gelijk aan: $\varphi(E) = \frac{S(E)}{\Sigma(E)}$. Het is de scalaire flux in elk punt van onze materie, gezien de keuze van de oorsprong arbitrair is.

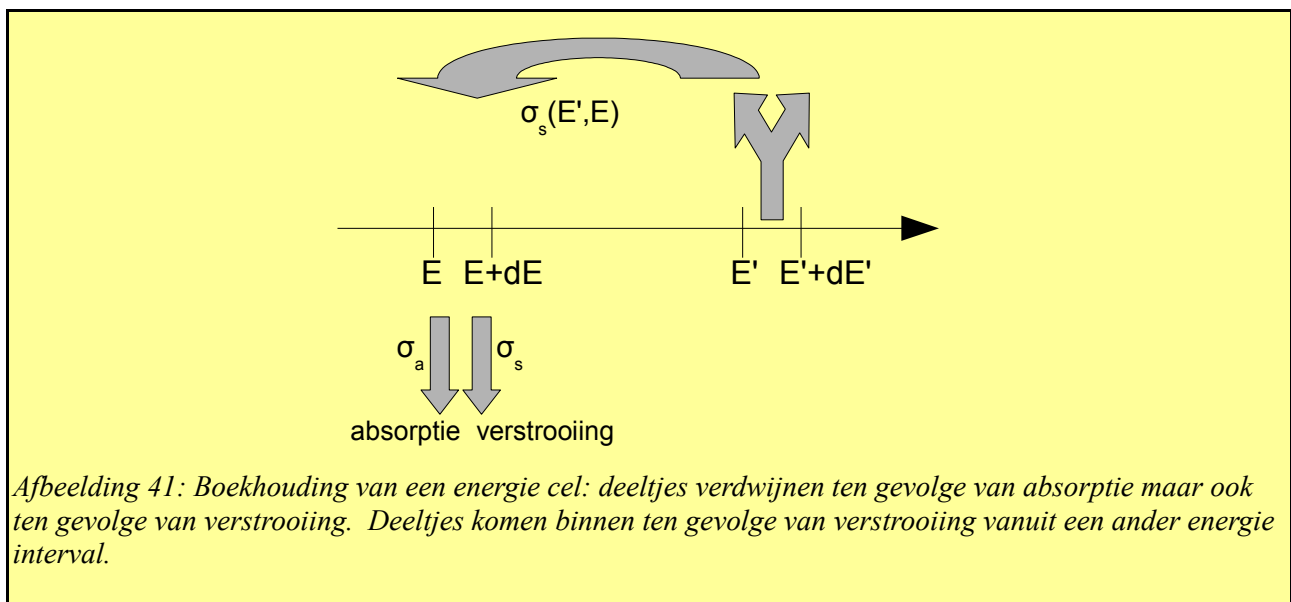
We hebben ons eerste echte stralingsveld uitgerekend! Natuurlijk hebben we heel wat condities moeten invoeren: zuivere absorptie, homogeen medium, homogene bron... Niettemin is bovenstaand resultaat heel belangrijk. Inderdaad, we hebben niet echt een “oneindig” stuk materie nodig. Door de exponentiële factor is de bijdrage van een bron die op enkele keren de afstand $\frac{1}{\Sigma(E)}$ ligt, te verwaarlozen. Als dusdanig is het bovenstaande probleem ook geldig in een homogeen stuk materie dat enkele malen groter is dan die afstand.

Nog moeilijker nu. Laten we veronderstellen dat het milieu absorberend is, maar niet meer homogeen. We dienen nu dat parcours van de bron tot aan het waarnemingspunt, met lengte R , in kleine stapjes op te delen, en de “overlevingskans” voor elk stapje te beschouwen. Veronderstel dat we een “meter” afrollen vanaf de bron van het neutron, en we meten de afstand s die het neutron al heeft afgelegd. De grootte s gaat lopen van 0 aan de bron, tot R wanneer het neutron (eventueel) is aangekomen in het waarnemingspunt P . Voor elk stukje ds heeft het neutron een kans om te overleven, gelijk aan $\exp(-\Sigma(E, s) ds)$. De totale kans om te overleven, is gelijk aan de kans om het eerste stukje te overleven, vermenigvuldigd met de kans om het tweede stukje te overleven, vermenigvuldigd met de kans om het derde stukje te overleven... zoals getoond in figuur 40. We vermenigvuldigen de kansen hier, omdat het overleven van elk stapje statistisch onafhankelijk is van het overleven van een ander stapje. We hebben dus dat de kans om het hele interval van 0 tot R te overleven, gelijk is aan:

$$\exp(-\Sigma(E, 0) ds) \exp(-\Sigma(E, ds) ds) \exp(-\Sigma(E, 2 ds) ds) \dots \exp(-\Sigma(E, R) ds)$$

We herinneren ons nu aan een elementaire eigenschap van de exponentiële functie: $\exp(a) \exp(b) = \exp(a+b)$. Als dusdanig wordt de kans om het hele interval van 0 tot R te overleven, gegeven door:

$\exp(-\int \Sigma(E, s) ds)$ waarbij s loopt over alle intervalletjes van 0 tot R . Dat is de formule die de eerdere $\exp(-\Sigma(E)R)$ zal vervangen. We hebben nu, in onze uitdrukking:



$$\varphi(E, x, y, z) = \int \frac{S(E, x', y', z') \exp(-\int_R \Sigma(E, s) ds)}{4\pi R^2} dx' dy' dz'$$

En opnieuw een extra moeilijkheid: we voeren (isotrope) verstrooiing in. In het voorgaande was de enige mogelijke interactie van de neutronen met de materie: absorptie. De exponentiële functie

stond in voor het verdwijnen van de neutronen langsheen de rechte waarlangs ze van de bron tot het waarnemingspunt gingen. De verdwenen neutronen waren geabsorbeerd, en men hoorde er (wat het neutronenstralingsveld betreft) verder niet meer over praten. In de eerste plaats doet verstrooiing hetzelfde. Het neutron dat in een rechte lijn van de bron naar het waarnemingspunt P gaat, wordt van zijn baan geslagen, en zal dus niet in P toekomen. Prima, maar het is niet verloren. *Het verstrooiingspunt is een nieuwe "bron" geworden.* Wat ons interesseert is de nieuwe "bron" die zich toevoegt aan de bron $S(E,x',y',z')$. Het zal de bijdrage zijn van de verstrooide scalaire flux in het punt (x',y',z') van een energie-interval van E' tot $E' + dE'$, die door diffusie een neutron in dat punt in het energie-interval van E tot $E+dE$ heeft gebracht. We hebben hier de werkzame doorsnede nodig die aangeeft wat de kans is om een neutron van energie E' te verstrooien, en het in het interval E tot $E+dE$ te brengen, zoals getoond in afbeelding 41. Dat is een *differentiële werkzame doorsnede*: $\sigma_s(E', E)$. De gewone werkzame doorsnede (die we tot hier toe steeds hebben gebruikt) is gelijk aan de som over alle mogelijke "eindenergieën" E omdat we die voor de gewone werkzame doorsnede niet specificeren: $\sigma_s(E') = \int \sigma_s(E', E) dE$. We gaan de werkzame doorsneden vermenigvuldigen met de betreffende nuclidendichtheden, om de macroscopische werkzame doorsneden te vormen. De index s betekent "verstrooiing" (scattering in het Engels), de index a betekent "absorptie" en de index t betekent "totaal" wat de som is van s en a . De extra "bron" ten gevolge van de verstrooiing is gegeven door volgende uitdrukking:

$$S_s(E, x', y', z') = \int \Sigma_s(E', E) \varphi(E', x', y', z') dE'$$

Als we die bron nu meerekenen in onze eerdere uitdrukking, vinden we:

$$\varphi(E, x, y, z) = \int \frac{\left(S(E, x', y', z') + \int \Sigma_s(E', E) \varphi(E', x', y', z') dE' \right) \exp\left(-\int_R \Sigma_t(E, s) ds\right)}{4\pi R^2} dx' dy' dz'$$

Het bovenstaande is (een specifieke vorm van) *de wet van Boltzmann*, die niets anders is dan de gedetailleerde ruimtelijke boekhouding van de verplaatsing van de stralingsdeeltjes, en wat er hen kan overkomen. Zoals men ziet, is het een heel ingewikkelde vergelijking, waar de gezochte grootte (de scalaire flux) ook binnenin het rechterlid voorkomt. Er bestaan niet veel gevallen waarin men de wet van Boltzmann met een formulevorm kan oplossen. Maar bovendien zijn we er nog niet. Het bovenstaande is slechts een heel specifiek geval, onder de volgende voorwaarden:

- stationariteit: we beschouwen dat het stralingsveld niet in de tijd verandert, en dat er dus op elke plek een perfecte balans bestaat van de deeltjes die toekomen en de deeltjes die weggaan.
- Isotrope bronnen: de bronnen zijn verondersteld van isotroop hun straling uit te zenden.
- Isotrope verstrooiing. We veronderstellen dat neutronen die verstrooid worden, isotroop verstrooid worden, onafhankelijk van de invalrichting. Bij lage energieën voor neutronen verstrooiing is het meestal in goede benadering waar, en bij hogere energieën is het meestal fout. Soms kan men doen alsof de verstrooiing isotroop is, ook al is ze dat niet echt, maar is het vraagstuk niet gevoelig aan dat feit. Het is dan een soort (al dan niet goede) benadering.

Indien aan de voorwaarden van isotropie niet voldaan is, dan kan men de scalaire flux niet meer gebruiken maar moet men overstappen op de faseflux. We gaan de lezer niet lastig vallen met deze techniciteiten ; we hopen dat de bovenstaande afleiding van een speciaal geval een voldoende idee heeft gegeven van hoe dat in de praktijk in zijn werk gaat.

Indien de lezer de mening is toegedaan dat het bovenstaande een onmenselijk moeilijke vergelijking oplevert, en dat hij helemaal niet ziet hoe hij zelfs maar ruwweg een aanpak zou kunnen bedenken

om daar iets zinnigs mee te doen (de bedoeling is van numerieke waarden te vinden voor de flux), dan is hij niet alleen. De Boltzmann vergelijking is heel moeilijk om praktisch op te lossen, zelfs gewoon numeriek met een computer – in tegenstelling tot het eerder beschouwde geval van het radioactieve verval, waar de formules een suggestie geven van hoe men met kleine stapjes numerieke waarden kan bekomen voor de gezochte grootheden. Maar bovendien verbergt de vergelijking zoals ze is neergeschreven nog een aantal extra moeilijkheden. In het “eenvoudige” geval is de bron S gegeven, en zijn de macroscopische werkzame doorsneden gekend: vergeet niet dat de macroscopische werkzame doorsnede functie is van de positie, want ze is het product van een fysische, microscopische werkzame doorsnede en een nuclidendichtheid, die dus van punt tot punt kan veranderen in een niet-homogeen milieu. De vergelijking is dan al moeilijk genoeg. Maar in werkelijkheid is het vaak zo dat de bron S (meestal de splijtingen) functie is van de flux die we net aan het berekenen zijn, en is de nuclidendichtheid aan het veranderen, in functie van de flux die we aan het berekenen zijn. Men kan dus stellen dat het probleem een “serieuze wiskundige uitdaging is”. Niettemin is er veel gekend over dat probleem, en bestaan er technieken die toelaten om benaderde numerieke oplossingen uit te werken. Alleen maken die technieken nogal veel gebruik van hogere wiskunde die buiten het kader van dit werk valt, en zijn ze in alle gevallen heel reken-intensief.

4.3.b Monte Carlo technieken.

De wet van Boltzmann geeft een (heel ingewikkelde) vergelijking waaraan de scalaire flux (of, indien isotropie niet geldig is, de fase flux) moet voldoen. Als men die vergelijking op een of andere wijze (numeriek) kan oplossen, dan heeft men de flux gevonden in de hele ruimte. Maar jammer genoeg zijn de numerieke technieken om tot benaderde oplossingen te komen, heel zwaar. Men heeft daarom een totaal andere aanpak gesuggereerd, die ook reken-intensief is, maar die het voordeel heeft van veel minder gesofistikeerde wiskundige technieken te benodigen, en bovendien veel algemener is. Het is de “Monte Carlo” methode.

Het idee is vrij eenvoudig: *men gaat het pad volgen van een zeker aantal neutronen* (een zo groot mogelijk aantal, maar het moet natuurlijk nog uitvoerbaar blijven met een computer), en *die neutronen gaan kans fenomenen ondergaan*, net zoals echte neutronen. Men dient hiervoor natuurlijk de kansen te kennen (dat is meestal gegeven door de werkzame doorsneden) dat bepaalde dingen met een neutron gaan gebeuren, en dan gaat men “lotje trekken” volgens de berekende kansen, en volgens de “uitkomst van de trekking” het neutron laten ondergaan wat overeenkomt met de trekking. Hiervoor gebruikt men “generatoren van willekeurige getallen”. Men kan daarover hele boeken vullen, maar er bestaan computer algoritmen die getallen genereren waarvan de opeenvolging bepaalde statistische eigenschappen vertoont. Bijna elk wiskundig pakket dat zichzelf respecteert heeft zulke functies. In Scilab is dat de functie “rand”. Iedere keer dat men de functie “rand” uitvoert, krijgt men een nieuw “willekeurig getal” dat tussen 0 en 1 ligt, en waarvan de kans uniform is over dat interval. Dat wil zeggen dat de kans dat het volgende “rand” getal tussen 0.2 en 0.3 ligt, even groot is als de kans dat het tussen 0.6 en 0.7 ligt, bijvoorbeeld, en die kans is in beide gevallen gelijk aan $1/10$, omdat de lengte van het interval 0.2 tot 0.3 een tiende is van het totale interval van 0 tot 1.

Als men de “computer neutronen” dezelfde kansen laat ondergaan als de echte neutronen, en men gebruikt vele “computer neutronen”, dan kan men hopen dat het gemiddelde gedrag van die computer neutronen en hun interacties gelijk is aan het gemiddelde gedrag van de echte neutronen. Door te berekenen hoeveel “computer neutronen” langs gekomen zijn in een bepaald stukje van de

ruimte, heeft men als dusdanig een idee van de flux in dat stukje van de ruimte. Natuurlijk gaat men met minder “computer neutronen” werken dan er werkelijke neutronen zijn (het is op dit ogenblik met een computer niet denkbaar om 10^{15} deeltjes te gaan volgen), maar als men er genoeg kan berekenen, dan zullen de gemiddelden hopelijk proportioneel zijn. Men beseft onmiddellijk dat deze aanpak heel reken-intensief is. Aan de andere kant begrijpt men ook het grote voordeel van deze techniek: ongeveer gelijk wat een neutron overkomt is gemakkelijk berekenbaar. Men moet enkel maar de kans aangeven voor het betreffende fenomeen. Men is helemaal niet gebonden aan, bijvoorbeeld, een hypothese van isotropie, of stationariteit of... Als dusdanig zijn Monte-Carlo technieken heel realistisch: het vraagt niet veel moeite om fysische effecten “volledig correct” te implementeren, en het brengt geen noemenswaardig voordeel om een of andere benadering in te voeren in een interactie die een neutron kan ondergaan. Het nadeel van Monte Carlo technieken is dat de resultaten die men bekomt een statistische fout bezitten, die des te groter is naarmate men het resultaat met minder computer neutronen heeft berekend.

We gaan een voorbeeld behandelen. Jammer genoeg zullen er enkele elementen aan bod komen die eigenlijk buiten het kader vallen dat ik mij gesteld heb (namelijk, wetenschappelijk en wiskundig humaniora niveau). Het gaat hem om wat meetkunde in de ruimte (poolcoördinaten of bol coördinaten), en vooral, wat elementaire mechanica. Niettemin denk ik dat het “avontuur” de moeite waard is voor wie er de moed kan voor op brengen.

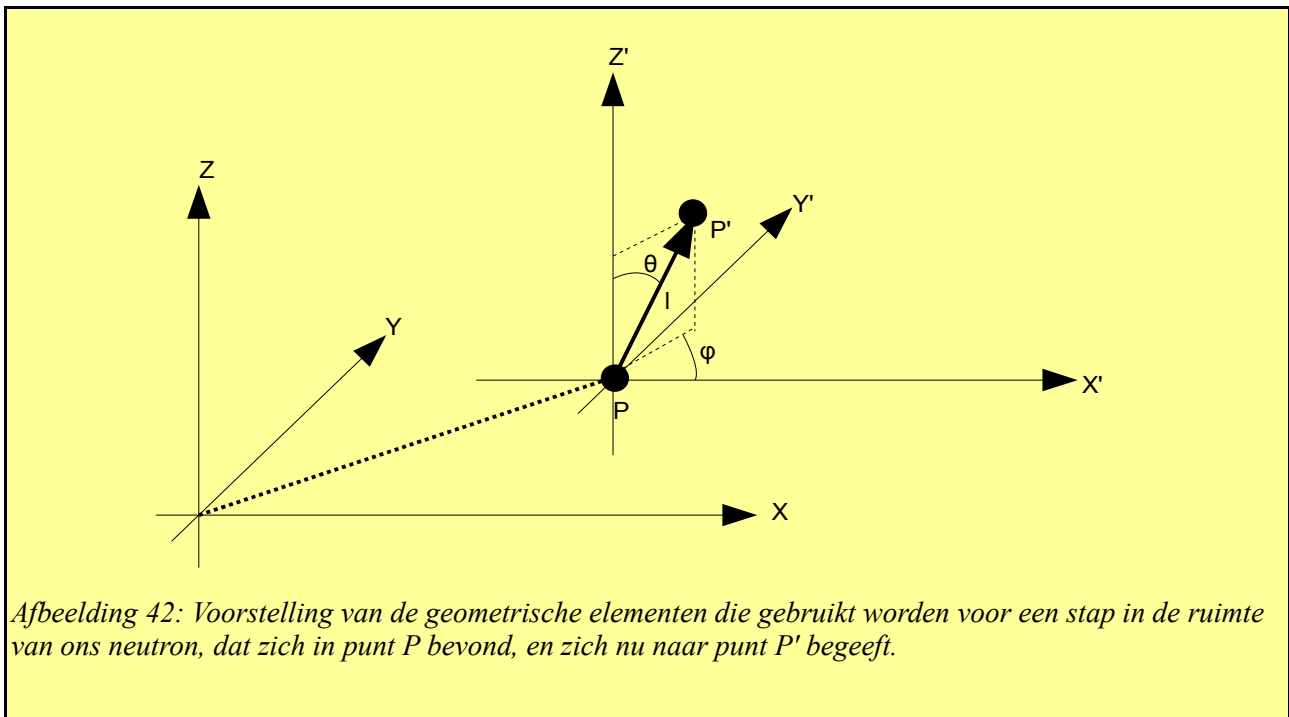
Het gekozen voorbeeld is een beetje artificieel, toegegeven, maar het laat toe om op een zo eenvoudig mogelijke wijze de principes te illustreren die bij de Monte Carlo techniek worden aangewend. We beschouwen een uniforme en isotrope neutronenbron die de vorm van een balkje heeft, met afmetingen: lengte (in x) 10 cm, breedte (in y) 3 cm, en dikte (in z) 1 cm. We nemen aan dat alle neutronen in dat bronnetje starten aan 1 MeV. We veronderstellen dat de neutronen zich voortplanten in vloeibare waterstof. Dat lijkt een bizar voorbeeld, maar er zijn wetenschappelijke toepassingen (niet in de kernenergie) die exact met dit probleem geconfronteerd zijn. Het is namelijk een techniek om “koude neutronen” te maken, die allerhande speciale eigenschappen hebben. Het voordeel van waterstof is dat de interactie werkzame doorsneden relatief eenvoudige tabellen zijn, en dat er maar twee reacties kunnen optreden: elastische botsing of absorptie. Dat houdt de zaak redelijk eenvoudig.

We hebben de waarden gekopieerd¹²¹ van de werkzame doorsneden van de elastische botsing en van de absorptie van neutronen op waterstof. Als we de energie kennen van ons neutron, kunnen we de bijhorende werkzame doorsneden van botsing en van absorptie berekenen door in de tabel te kijken. Natuurlijk vallen we meestal tussen de waarden die in de tabel staan. We moeten dan een interpolatietechniek gebruiken om een waarde te schatten. Daar bestaan wiskundige technieken voor, de techniek die we gebruiken heet “spline interpolatie”. We berekenen de macroscopische werkzame doorsnede, door de (getabelleerde) microscopische werkzame doorsnede te vermenigvuldigen met de nuclidendensiteit van vloeibare waterstof. De totale werkzame doorsnede is de som van de elastische en de absorptie werkzame doorsnede.

We gaan nu een neutron volgen. Het neutron “ontstaat” in de bron, met een willekeurige positie binnen in het balkje van de bron, en met een energie van 1MeV. Het beweegt ook in een willekeurige richting, die we beschrijven met twee grootheden die de ruimtehoek bepalen. Normaal zijn dat de hoeken θ en ϕ . Alleen werken we niet met θ , maar met de cosinus ervan, die traditioneel u genoemd wordt. De redenen hiervoor zijn essentieel dat we in berekeningen meestal toch de

¹²¹<http://www.nndc.bnl.gov/>

cosinus nodig hebben, maar vooral: dat de cosinus statistisch uniform verdeeld is tussen -1 en 1 als de ruimtehoek uniform verdeeld is in alle richtingen van de ruimte.



Uitgaande van de energie van het neutron, bepalen we de werkzame doorsneden. Als de totale macroscopische werkzame doorsnede gelijk is aan S , dan kan men tonen dat de lengte l over dewelke het neutron vrij (en dus rechtlijnig) zal kunnen vliegen alvorens een interactie te ondergaan, een willekeurige grootte is die verdeeld is, niet volgens een uniforme kansverdeling, maar *volgens een exponentiële kansverdeling* volgens $\exp(-S l)$. Om zo een willekeurige grootte “te fabriceren” vanaf een uniform verdeelde grootte r tussen 0 en 1 (zoals we er gemakkelijk kunnen trekken in de meeste computer talen), bestaat er een truc: het volstaat om $l = -\ln(r)/S$ uit te rekenen. Men kan tonen (maar ik kan dat hier niet doen, omdat het teveel hogere wiskunde vraagt) dat l dan de goede exponentiële verdeling heeft. Kortom, met bovenstaande formule kunnen we dus een statistisch juist verdeelde willekeurige “lengte tot volgende interactie” berekenen. Het neutron gaat rechtlijnig voortvliegen over die afstand, startende vanaf het punt waar we waren, en in de richting bepaald door de ruimtehoek die eerder bepaald (of gekozen) was. Het is een klein meetkundig probleem om de nieuwe positie (x', y', z') te berekenen als we de startpositie (x, y, z) , de ruimtehoek (u, ϕ) en de lengte (l) kennen. De oplossing is geïllustreerd in afbeelding 42:

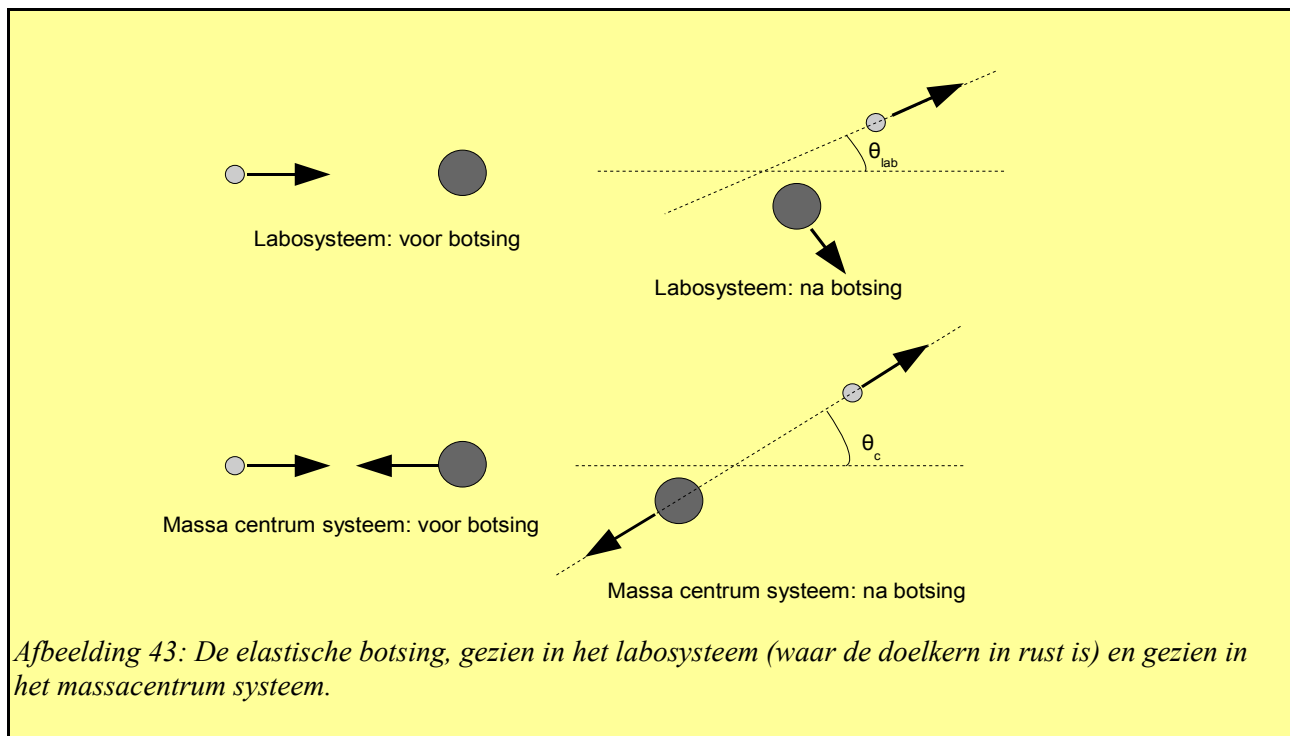
$$x' = x + l\sqrt{1-u^2} \cos \phi; y' = y + l\sqrt{1-u^2} \sin \phi; z' = z + lu$$

Opnieuw, voor de lezer die dat allemaal te lastig vindt: trek het U niet aan. Neem gewoon aan dat we de nieuwe positie van het neutron berekenen, uitgaande van de oude, en de afstand die het neutron vrij kan vliegen tot aan de volgende botsing.

Eens we op de nieuwe plek zijn aangekomen waar er een interactie gebeurt, dienen we uit te maken welke interactie plaatsvindt. We hadden immers de *totale* werkzame doorsnede gebruikt om de “afstand tot volgende interactie” te vinden, maar die is samengesteld uit twee bijdragen: de elastische botsing of de absorptie. Eens we weten dat er een interactie plaatsvindt, is de kans om een elastische botsing te hebben, gelijk aan de verhouding van de elastische werkzame doorsnede

op de totale werkzame doorsnede: $p_s = \frac{\sigma_s(E)}{\sigma_t(E)}$. Als we een willekeurig getal r nemen dat uniform verdeeld is tussen 0 en 1, dan is de kans dat r kleiner is dan p_s gelijk aan p_s . Het volstaat dus om een willekeurig getal r te nemen (via onze “rand” functie). Als dat getal kleiner is dan p_s dan beslissen we dat we een elastische botsing hebben, en in het andere geval zeggen we dat we een absorptie hebben ondergaan. Op die wijze is de kans dat we een elastische botsing kiezen, gelijk aan de kans op elastische botsing p_s .

Het geval van absorptie is gemakkelijk te behandelen: we stoppen ons neutron. Het is nu



Afbeelding 43: De elastische botsing, gezien in het labosysteem (waar de doelkern in rust is) en gezien in het massacentrum systeem.

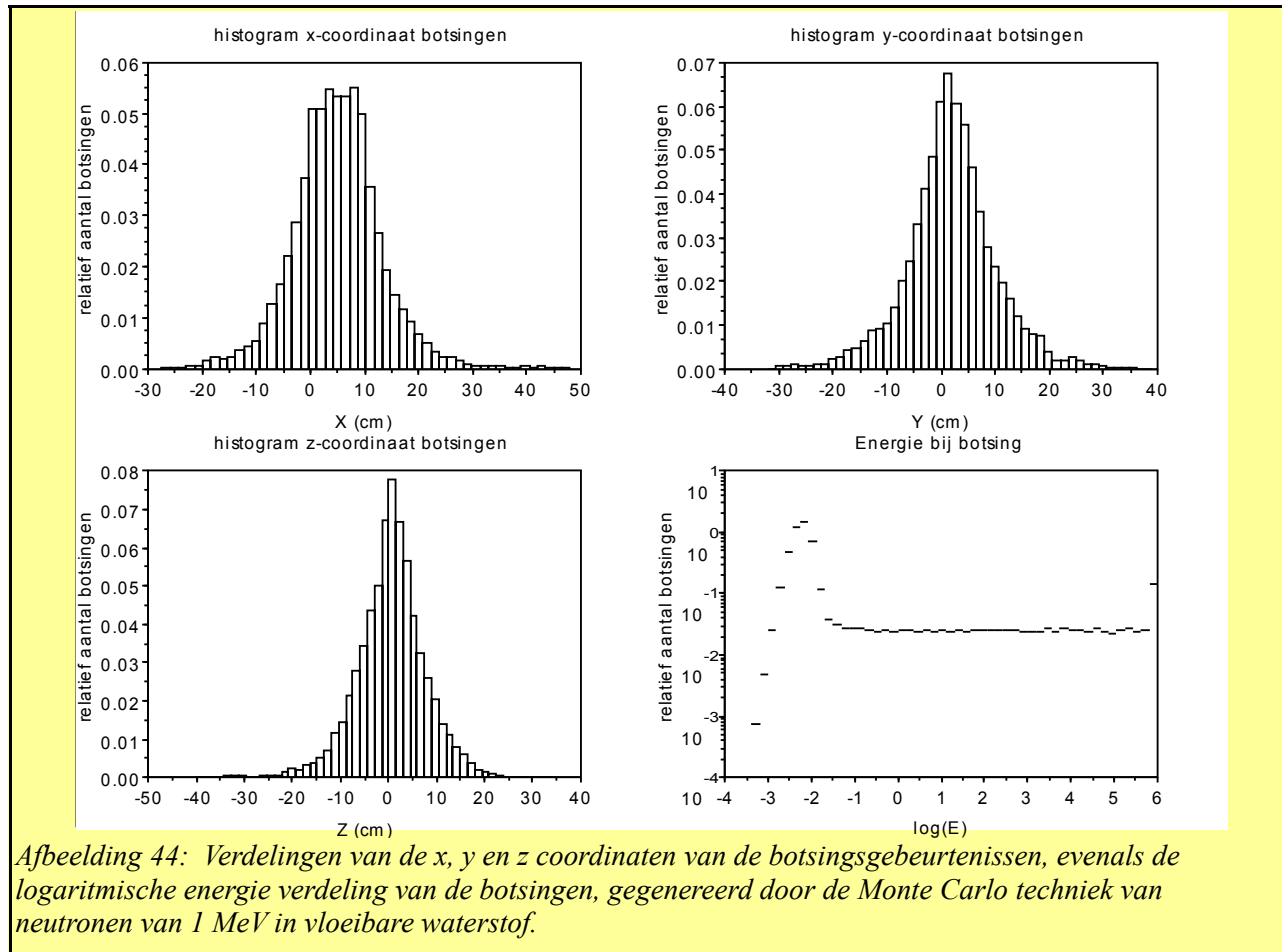
verdwenen. We kunnen vervolgens een nieuw neutron in de bron gaan halen.

Het geval van elastische botsing is ingewikkelder. Men moet nu de nieuwe richting en de nieuwe energie van het neutron bepalen. De kans om een bepaalde richting te hebben, kan afhangen van de invallende richting of niet. Dat is een natuurkundige eigenschap van de specifieke interactie, en moet gemeten worden. In het geval dat we zullen beschouwen, nemen we aan dat de nieuwe richting onafhankelijk is van de invallende richting *in het massa centrum dat in beweging is in het laboratorium* zoals getoond in figuur 43. Uit de wetten van de mechanica kan men aantonen dat als de uitgaande richting, in het massa centrum, een hoek θ_c maakt met de invallende richting, dat de energie (in het laboratorium systeem) na botsing gelijk is aan: $E_{na} = E_{voor} \frac{A^2 + 1 + 2Au_c}{(A+1)^2}$ waar A het massagetal is van de nuclide waarmee de botsing plaatsheeft, en $u_c = \cos \theta_c$. In het geval van waterstof is $A = 1$. De hoek, ten opzichte van de invalrichting, in het laboratorium systeem, is nu gegeven door:

$\cos \theta_{lab} = u_{lab} = \frac{1 + Au_c}{\sqrt{1 + 2Au_c + A^2}}$. Maar let op: dat is de hoek ten opzichte van de richting die het neutron had. We dienen de hoeken uit te rekenen ten opzichte van de coördinaatassen. Dat kan gedaan worden door wat meetkunde in de ruimte toe te passen, maar dat leidt ons hier veel te ver.

De formules zijn uitgetypt in het programma: we vinden dus de nieuwe ruimtehoek (u, ϕ) onder dewelke het neutron, met verminderde energie, tevoorschijn komt na de elastische botsing.

Maar we hebben nog een probleem overgeslagen. De waterstof nucliden staan niet stil, ze zijn wel koud maar hebben toch wel een thermische beweging. Als dusdanig kunnen ze tijdens de botsing een deel van hun thermische energie aan het neutron overstaan. Bij elke botsing krijgt het neutron

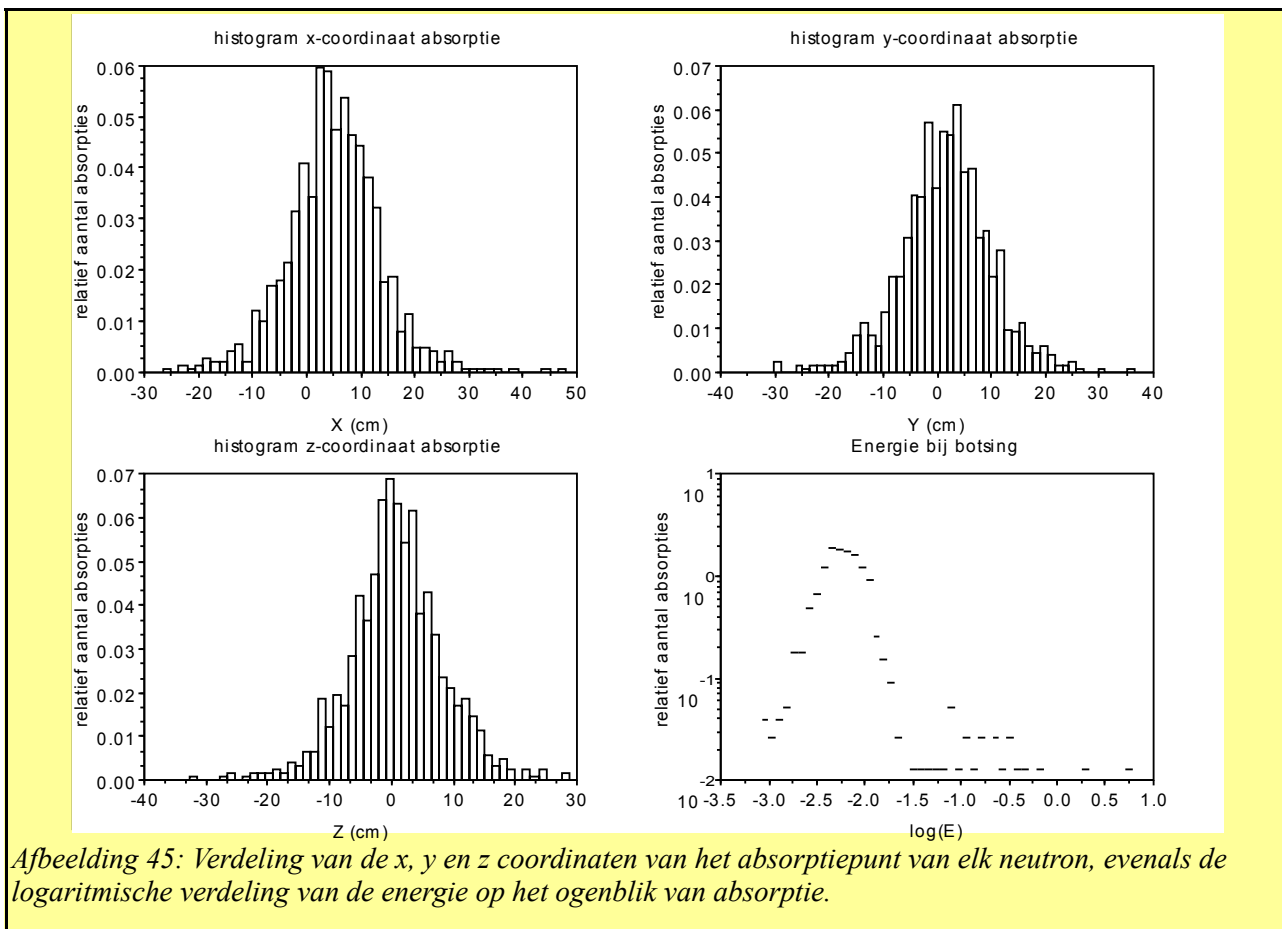


dus ook een beetje thermische energie van het waterstof. Om dat helemaal correct te doen, zouden we eigenlijk de botsing moeten beschouwen, niet van een neutron met een stilstaand waterstof atoom, zoals we dat gedaan hebben, maar met een bewegend. We kunnen echter een benadering doorvoeren, en een willekeurige thermische energie na de botsing toevoegen.

Als het neutron geabsorbeerd is, stoppen we, indien niet, gaan we verder met hetzelfde neutron (tot het uiteindelijk zal geabsorbeerd worden) uitgaande van de nieuwe positie, energie, en richting. We houden de gegevens van elke botsing bij (positie, uitgaande energie). Als we een zeker aantal neutronen behandelen, hebben we een aantal interactie gebeurtenissen bijgehouden.

Als dusdanig hebben we onmiddellijk de spreiding van de reacties in de ruimte. We kennen de hoeveelheid reacties, eventueel per blokje van de ruimte, gewoon door ze te tellen. We kunnen nu “achteruit” rekenen, en door deling met de (macroscopische) werkzame doorsnede, de lokale fluentie bepalen, ten gevolge van het aantal “bron deeltjes” die we hebben berekend. De regel van drie geeft ons dan de fluentie voor een “echte” bron, en het fluentie debiet als we de activiteit van de echte bron kennen.

Het Scilab programma dat het resultaat is van de bovenstaande beschouwingen kan men vinden in Appendix C. Als we het programma uitvoeren (de lezer die het programma zelf wil uitproberen zal merken dat dat een beetje tijd vraagt op een gewone computer), dan kunnen we uit het resultaat verschillende grootheden berekenen, maar we zullen ons hier beperken tot de distributies van de x,y en z coördinaten van de botsingen en de energie verdeling bij botsing zoals getoond in afbeelding 44. Het energiespectrum (in logaritmische schaal) is heel interessant. We zien een kleine piek rond de 1MeV (ontstaan van de neutronen), en dan een ongeveer constant spectrum tot aan het thermische gebied waar een grotere piek aanwezig is. We zullen in een volgende sectie zien dat de grootheid (energie in logaritmische schaal) een belangrijke grootheid is bij het neutrontransport probleem. Let wel, we hebben hier niet het neutronen energie spectrum, maar wel de energieverdeling bij botsing. Als dusdanig zouden we deze verdeling moeten delen door de werkzame doorsnede voor botsing om het werkelijke neutronenspectrum terug te vinden ; maar gezien de werkzame doorsnede van waterstof in dit gebied bijna constant is, is de voorstelling van het energiespectrum van de botsingen een goede indicatie voor het energiespectrum van de



neutronen zelf.

In afbeelding 45 stellen we dezelfde verdelingen voor, maar deze keer voor de absorptie gebeurtenissen. Als we naar de energie verdeling kijken, dan stellen we vast dat de neutronen volledig de thermische energie bezitten op het ogenblik dat ze in waterstof geabsorbeerd worden. De ruimtelijke verdelingen zijn ook wat breder in de y en z richting.

4.4 Reactorfysica en neutronentransport

4.4.a De vier factoren van Fermi en eenvoudige reactor-kinetica.

Toen Enrico Fermi in 1942 in Chicago in het grootste geheim zijn eerste kernreactor opstartte, de CP1, wist hij veel minder dan wat de aandachtige lezer tot hier toe heeft geleerd. Ten eerste had Fermi geen duidelijke getabelleerde werkzame doorsneden buiten het thermische domein, en ten tweede had hij geen persoonlijke computer waar hij alle bovenstaande berekeningen op kon maken. Hij moest zijn plan trekken met wat ruwe experimentele gegevens en potlood en papier.

Zijn bedoeling was om uit te rekenen (of beter, om een ruw idee te bekomen) of een bepaalde ruimtelijke structuur van materialen waarin splijststoffen voorkomen, kritisch kon worden, en indien zoiets het geval was, hoe snel het reactor vermogen ging stijgen. Beeldt U zich even Fermi in: men heeft nog nooit een kernreactor gebouwd, het idee bestaat enkel maar op papier. U heeft enkel beschikking over wat gebrekkige experimentele gegevens en U gaat proberen een gecontroleerde kettingreactie te veroorzaken door een hele grote stapel uranium en grafiet blokken op elkaar te plaatsen. Indien U zich vergist, kunnen er verschillende dingen gebeuren. Het kan zijn dat het ding, zoals U het bedacht heeft, niet werkt. Of het kan zijn dat de reactie zelfs al begint op te treden tijdens de opbouw van de installatie. Of het kan zijn dat het vermogen veel te snel gaat stijgen. Niemand voor U heeft het ooit geprobeerd... Ik neem aan dat de beste man wat zenuwachtig was! Hij moest zeker zijn van zijn stuk.

Hoe heeft Fermi het probleem aangepakt? De wijze waarop Fermi te werk ging is niet meer de manier waarop heden ten dage reactoren worden uitgerekend en ontworpen. Tegenwoordig pakt men meestal het stralingstransport probleem in zijn geheel aan, via technieken die we hier eerder hebben aangehaald. Niettemin is zijn werkwijze heel pedagogisch en geeft ze veel meer fysisch inzicht dan alles in een groot computer programma stoppen en de molen laten draaien. Men kan trouwens vaak de grootheden die Fermi gebruikte, achteraf, na de oplossing van het stralingstransport probleem, extraheren.

De grootheid die Fermi wilde uitrekenen was de volgende: voor 1 neutron dat door fissie in de brandstof was ontstaan, en dat dus op een of andere manier ook weer gaat verdwijnen, hoeveel neutronen gaan er vrijkomen door fissie in de brandstof die uiteindelijk het gevolg zijn van ons origineel neutron? Hij noemde dat getal k . Uiteraard is de bovenstaande grootheid heel belangrijk. Als er voor elk neutron dat verdwijnt, meer dan 1 nieuw neutron wordt geproduceerd, dan gaat de kettingreactie plaatsvinden, en zelfs hoe langer hoe intenser. Als er voor elk neutron dat verdwijnt, minder dan 1 nieuw neutron wordt geproduceerd, dan komt er geen kettingreactie op gang. *Om een stabiele kettingreactie te bekomen, moet die factor precies gelijk aan 1 zijn.*

In feite werkte Fermi niet met het getal k , maar met het getal k_{inf} voor het geval de reactor in kwestie oneindig groot is (maar uit de zelfde materiële opbouw bestaat als de beschouwde reactor).

Fermi schreef zijn formule: $k_{\infty} = \epsilon p f \eta$

Elke factor stond voor een conceptuele stap in het “leven van een neutron”. Fermi ging ervan uit dat er drie soorten materialen aanwezig waren in de reactor: er was natuurlijk de splijtbare brandstof, er waren de lichte materialen zoals de moderator en de constructie elementen, en er waren de zware nucleaire materialen die niet de brandstof zijn. Elk van deze materialen heeft zijn invloed op de vier factoren. Fermi ging ervan uit dat de splijtbare brandstof, evenals de lichte materialen, enkel maar thermische neutronen absorberen, en geen snelle neutronen. Dat is niet

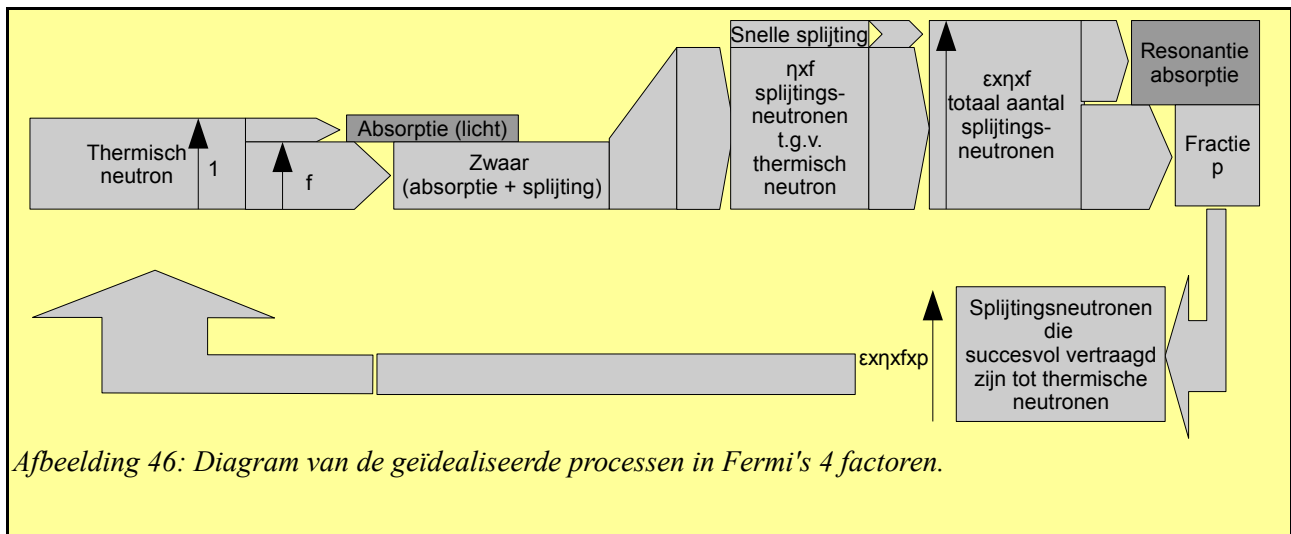
helemaal waar, maar goed. Daarentegen, hij stelde dat de zware nucleaire materialen niet alleen thermische neutronen kunnen absorberen, maar ook snelle. Bovendien kunnen ze ook een splijting aangaan met snelle neutronen, hoewel dat zeldzaam is. Fermi zag het “leven” van een neutron als volgt: het ontstaat in een splijtingsreactie en is een snel neutron. Het wordt vertraagd tot aan thermische energieën. Tijdens die vertraging kan het “opgegeten worden” door het zware nucleaire materiaal. Eens het neutron thermisch is, zal het vroeg of laat geabsorbeerd worden door een van de drie materialen. Indien het neutron door de brandstof geabsorbeerd wordt, kan het aanleiding geven tot een nieuwe fissiereactie. Die levensloop is geïllustreerd in figuur 46.

- De eerste factor, epsilon, ging net rekening houden met die splijting door snelle neutronen op het zware nucleaire materiaal. Epsilon is de verhouding van het totale aantal splijtingen, op het aantal splijtingen dat in de splijtbare brandstof gebeurt ten gevolge van thermische neutronen. Epsilon is dus een beetje groter dan 1 ; in een drukwater reactor is epsilon gelijk aan ongeveer 1.07. Men noemt het ook de snelle fissie factor.
- De tweede factor, p, geeft aan welke de fractie is van de (snelle) fissie neutronen die niet door het zware nucleaire materiaal worden ingevangen alvorens ze thermisch geworden zijn. Deze factor geeft dus de “overlevingskans” aan van een snel neutron, om kunnen vertraagd te worden tot aan thermische energie, en niet in een van de vele “resonantie pieken” van het zware nucleaire materiaal terecht te komen. Vanaf hier beschouwen we dat de neutronen nu thermisch zijn. In een druk water reactor is p ongeveer gelijk aan 0.75. Men noemt het soms ook de anti-val factor.
- De derde factor, f, geeft aan welke de fractie is van thermische neutronen die door de splijtstof of het zware nucleaire materiaal wordt geabsorbeerd (de complementaire fractie wordt in de lichte materialen geabsorbeerd). Met andere woorden, f geeft aan hoeveel thermische neutronen door het nucleaire materiaal worden geabsorbeerd. Men noemt f soms ook de thermische gebruiksfactor, en is in een druk-water reactor ongeveer gelijk aan 0.92.
- De laatste factor, η , geeft aan hoeveel neutronen er gemiddeld vrijkomen bij de absorptie van een thermisch neutron in de splijtbare brandstof. Eigenlijk bestaat die factor uit twee factoren: de fractie van de thermische neutronen die geabsorbeerd worden in het nucleaire materiaal (het zware materiaal en de splijtstof) die aanleiding geven tot een splijting, vermenigvuldigd met hoeveel neutronen er gemiddeld vrijkomen per splijting. Men noemt η ook wel de reproductie factor. In de verse brandstof in een druk-water reactor is deze factor gelijk aan 1.78.

Waarom deze 4 factoren ? Fermi trachtte de gegevens waarover hij beschikte, zo goed mogelijk te gebruiken, en de problemen in specifieke factoren af te zonderen. Hij trachtte dan met experimenten schattingen te bekomen van hun numerieke waarde. De eerste twee factoren waren zulke “probleemkinderen”. Fermi kende de werkzame doorsneden bij hoge energie niet goed, en zeker de niet de resonantie structuur van de zware atomen. Maar Fermi zou Fermi niet zijn als hij daar geen mouw kon aan passen, en hij heeft destijds aangetoond dat hij schattingen van p kon bekomen door enkele experimentele waarden te meten.

Daarentegen kende Fermi wel de thermische werkzame doorsneden. Vandaar zijn aandacht voor thermische neutronen, en om zo snel mogelijk uit het “onbekende” gebied in het thermische gebied te komen. Uitgaande van de thermische werkzame doorsneden kon Fermi gemakkelijk de factoren f en η uitrekenen. η was louter een eigenschap van het nucleaire materiaal (natuurlijk uranium voor zijn CP1), terwijl f afhing van de keuze van de moderator en de verhoudingen moderator en nucleair materiaal.

De vorige secties indachtig, begrijpen we wel dat Fermi's werk slechts een benadering was. Het stralingstransport van neutronen is niet zo netjes opgesplitst in vier vakjes. Terwijl neutronen vertragen door elastische botsingen in de moderator (of zelfs in de brandstof), kunnen ze natuurlijk zowel splijtingsreacties aangaan met het splijtbaar materiaal, als met de zware materialen als ze voldoende energie hebben. Ze kunnen ook geabsorbeerd worden bij gelijk welke energie door gelijk welk materiaal: de werkzame doorsneden zijn niet nul. De neutronen flux kan van plek tot plek verschillen, en als dusdanig zijn de bijdragen tot de verschillende reacties verschillend. Het is enkel door het volledige stralingstransport probleem op te lossen dat we met al die fenomenen tegelijkertijd rekening houden. Niettemin had Fermi de “hoofdmoot” te pakken. Zijn vier factoren komen er eigenlijk op neer dat we enerzijds sommige werkzame doorsneden gelijk stellen aan nul (wat een goede benadering is als die in werkelijkheid vrij klein zijn), en anderzijds sommige grootheden gaat uitmiddelen (over de ruimte, en over de energie).



Afbeelding 46: Diagram van de geïdealiseerde processen in Fermi's 4 factoren.

We hebben gezien dat als we de vier factoren voor onze druk-water reactor met elkaar vermenigvuldigen, we uitkomen bij 1.31, wat natuurlijk veel groter is dan 1. Dat komt omdat de factor f de maximaal mogelijke is, zonder dat er regelstaven in de reactor gebracht zijn, die natuurlijk de fractie geabsorbeerde neutronen in lichte materialen veel groter kunnen maken.

We moeten wat “overschot” hebben op onze k_{inf} voor twee redenen. De eerste reden is dat een echte reactor natuurlijk niet oneindig groot is, en er is dus een boord aan, waardoor neutronen kunnen ontsnappen. Er is dus een extra verliesfactor, de lek factor, die de k oplevert van een eindige reactor. De tweede reden is dat, gedurende het verblijf van de brandstof in de reactor, eta achteruit gaat: de splijtbare brandstof wordt opgebruikt, en vaak worden er zware nucliden geproduceerd die zeer neutronen-absorberend zijn. Men moet dus een zekere marge hebben op k_{inf} om de reactor bruikbaar te kunnen exploiteren.

Laten we heel even terug keren naar de wet van Boltzmann (in de speciale vorm die we eerder bepaald hadden):

$$\varphi(E, x, y, z) = \int \frac{(S(E, x', y', z') + \int \Sigma_s(E', E)\varphi(E', x', y', z')dE') \exp(-\int_R \Sigma_t(E, s)ds)}{4\pi R^2} dx' dy' dz'$$

Als de neutronen bron de splijting is van brandstof, dan zal die bronterm een reactiesnelheid zijn, die van de vorm is: $\Sigma_f(E, x', y', z')\varphi(E, x', y', z')$. Als we die in de wet van Boltzmann stoppen, dan zien we dat elke term proportioneel is met de scalaire flux, tenminste zolang de

macroscopische werkzame doorsneden geen functie zijn van de neutronenflux. Stel dat we op een of andere wijze een oplossing van de vergelijking hebben gevonden, die ons een scalaire flux oplevert. Als we die scalaire flux nu met gelijk welk getal vermenigvuldigen, zeg maar, zeven, dan vermenigvuldigen we elke term in de bovenstaande vergelijking, zowel in het linker lid als in het rechter lid. Maar als aan de vergelijking voldaan was voor de originele oplossing, dan is ze dus ook voldaan voor de nieuwe scalaire flux die de oude was, vermenigvuldigd met een getal. Een vergelijking die zich zo gedraagt noemt men in de wiskunde *een homogene vergelijking* en ze heeft als eigenschap (zoals we juist geargumenteed hebben) dat als we een oplossing met een getal vermenigvuldigen, we een nieuwe oplossing bekomen.

Als we een scalaire flux hebben die de flux is in een reactor, dan kan die flux ook, zeg maar, zeven keer groter zijn volgens de bovenstaande vergelijking. De verdeling van de flux over de ruimte (en over de verschillende energie-intervallen) blijft wel proportioneel dezelfde. Op het eerste zicht lijkt dat dramatisch! We kunnen niet bepalen wat nu precies de flux gaat zijn in een reactor! Maar dat komt omdat we een aantal dingen over het hoofd zien. De macroscopische werkzame doorsneden zijn namelijk niet, zoals we het zouden denken, totaal van de flux onafhankelijk, om twee redenen. De eerste reden is dat de flux de nuclidendensiteit kan veranderen (door de nucleaire reacties die plaats vinden, zoals we eerder hebben gezien). De tweede reden is dat de flux meestal ook de lokale temperatuur verandert, wat zowel de dichtheid van sommige materialen verandert (uitzetting onder warmte) als de thermische en andere werkzame doorsneden verandert (het “thermische” deel van het spectrum volgt de temperatuur, terwijl het niet-thermische deel een zogenaamd “Doppler effect” kan ondergaan – zie verder). Deze effecten zijn klein, maar ze maken dat linker- en rechter lid van de Boltzmann vergelijking zoals we ze geschreven hebben niet meer precies gelijk zijn. Maar de Boltzmann vergelijking zoals we ze geschreven hebben was een speciaal geval, onder speciale hypothesen, waaronder stationariteit. We hebben de scalaire flux uitgerekend op een bepaalde plek, die het gevolg was van neutronen die van ergens anders kwamen, en die beschreven was door diezelfde scalaire flux. Maar in werkelijkheid zijn de neutronen die **nu** op een waarnemingspunt P aankomen, hier geraakt door een tijdje te vliegen (de afstand R gedeeld door hun snelheid). *Hun bron was wat in het verleden*, en was gekoppeld aan de scalaire flux in het verleden. *Het gelijkstellen van de flux nu met de flux in het verleden is net wat de veronderstelling van stationariteit inhoudt*. Als dusdanig wil een ongelijkheid van linker en van rechter lid in de Boltzmann vergelijking zoals we ze hebben neergeschreven gewoon zeggen *dat de flux in de tijd aan het veranderen is*. Indien het verschil tussen linker en rechter lid klein is, dan behoudt de scalaire flux wel grotendeels zijn vorm, maar verandert van grootte. Dat was net de situatie waarover we het hadden: kleine veranderingen in de macroscopische werkzame doorsneden zorgen voor een kleine “onbalans” tussen het linker- en het rechter lid. Die onbalans wil gewoon zeggen dat er een verschil is tussen “inkomsten” en “uitgaven”, wat in boekhoudkundige termen wil zeggen dat de inhoud van de kassa gaat toenemen of afnemen met de tijd.

Als dusdanig wil dat zeggen dat de scalaire flux te schrijven is als het product van twee factoren: een “schaalfactor” die enkel van de tijd afhangt (en die dus de grootte van de flux bepaalt) enerzijds, en een “vorm factor” die enkel van plaats en energie afhangt:

$$\Phi(x, y, z, t, E) = \varphi(x, y, z, E) n(t)$$

Het bovenstaande is enkel geldig als de reactor bijna stationair werkt, en de tijdsvariaties traag zijn. Maar dat is hier voor onze beschouwingen voldoende. We gaan er dus van uit dat de vorm van de verdeling van de neutronen in ruimte en over de energie (hun spectrum) steeds dezelfde is, maar dat de grootte, de amplitude ervan, kan veranderen in de tijd. Het is die verandering in de tijd die we gaan beschouwen, en het was die verandering in de tijd die Fermi trachtte te vatten met zijn k-

factor. Natuurlijk is een meer gedetailleerde studie nodig als we alles in groter detail willen kennen, en in de praktijk gaat men natuurlijk een volledige berekening maken waarbij zowel de vorm als de amplitude kan veranderen in de tijd. Maar om een gevoel te krijgen over wat er gaande is, is de opsplitsing in een vorm en een amplitude, zoals hierboven, veel illustratiever (en niet zo fout!).

Als we terug naar de redenering van Fermi keren, dan kunnen we ons naïef gezien voorstellen dat de k-factor aangeeft met hoeveel de flux toeneemt “per neutron generatie”. Een generatie komt dan overeen met de gemiddelde tijd, nodig om van een neutron dat vrijkomt in een splijtingsgebeurtenis, terug een (thermische) splijting te veroorzaken. Men kan die tijd uitrekenen, bijvoorbeeld met een Monte Carlo berekening: het volstaat om de “vlieg” tijden tussen de opeenvolgende botsingen op te tellen, tot aan het ogenblik waarop het neutron een splijtingsgebeurtenis veroorzaakt. De andere neutronen (die die geen splijtingsgebeurtenis veroorzaken) moeten we niet beschouwen hierbij. Het blijkt dat die tijden heel kort zijn!

In een reactor met snelle neutronen duurt dit ongeveer 100 nanoseconden (10^{-7} seconden) en in een drukwater reactor duurt het ongeveer 25 microseconden. Dat wil zeggen dat er in een drukwater reactor er zich ongeveer 40 000 “generaties” hebben voorgedaan per seconde! Stel dat de “groei factor” gelijk is aan 1.001 (dus per generatie groeit de neutronen populatie met een duizendste). Na een seconde hebben we dan dat de neutronenpopulatie met een factor $(1.001)^{40000} = 2.3 \cdot 10^{17}$ is gegroeid! Zo een systeem zou totaal oncontroleerbaar zijn! Een promisse te weinig absorptie gedurende een seconde en het vermogen stijgt met een miljard keer een miljard!

Wat het verschil maakt, is een heel subtiel detail: sommige splijtingsproducten vervallen radioactief naar andere nucliden in een aangeslagen toestand, die een neutron uitzenden. Bijvoorbeeld, Br-87 (een splijtingsproduct) vervalt met een halfwaardetijd van 54.5 seconden naar Kr-87*. Hierbij staat het sterretje voor “aangeslagen toestand”. Dat wil zeggen dat het een Kr-87 nuclide is, maar die niet in zijn energetische grondtoestand is. Kr-87* zendt haast ogenblikkelijk een neutron uit, en wordt Kr-86 (stabiel). Het netto effect is dat er een neutron “met vertraging” is uitgestuurd. De vertraging komt van het bèta verval van Br-87, niet van het uitzenden van een neutron door Kr-86. Ander voorbeeld: I-137 vervalt in Xe-137* met een halfwaardetijd van 21.8 seconden. Xe-137* vervalt haast ogenblikkelijk door het uitzenden van een neutron, in Xe-136. Er zijn zo een honderdtal reacties bekend. De uitgezonden neutronen zijn wat minder energetisch dan de neutronen die vrijkomen bij de splijtingsreactie zelf, van 0.2 tot 0.6 MeV, maar dat maakt niet veel verschil uit en we kunnen beschouwen dat ze ongeveer hetzelfde “levensparcours” hebben als de “echte” splijtingsneutronen. We hebben splijtingsproducten die na een tijdje in hun vervalreeks een snel neutron vrijgeven. Het netto-effect is dat, ten gevolge van een splijtingsreactie, er direct een aantal neutronen vrijkomen ten gevolge van de splijting zelf, en wat later wat neutronen ten gevolge van dit verval. Men noemt deze neutronen *vertraagde neutronen*. Het aandeel van deze laatste bijdrage in het totale aantal geproduceerde snelle neutronen is vrij klein, we hebben het over 0.7% van de uiteindelijke neutronen ten gevolge van een U-235 splijting (en 0.2% ten gevolge van een Pu-239 splijting). Maar niettemin zorgt deze kleine fractie ervoor dat de kinetica van een reactor regelbaar wordt op een menselijke tijdschaal. Inderdaad, men kan nu de k-factor (eigenlijk, η) opsplitsen in twee bijdragen: de hoofdmoot (99.3%) is de bijdrage van de directe neutronen van de splijting, en een kleine fractie (ongeveer 0.7% voor U-235) de vertraagde neutronen van het verval van de fissieproducten. Dat wil dus zeggen dat men de k-factor wat kleiner dan 1 kan houden voor de directe neutronen, maar dat door de bijdrage van de vertraagde neutronen, de k-factor gelijk wordt aan 1 (of lichtjes groter wordt dan 1 als men het vermogen wil laten stijgen). Maar in plaats van met twee bijdragen tot de k-factor te werken, kunnen we ook een andere redenering houden. We hebben gezien dat het problematische effect leek te zijn dat de neutronengeneraties elkaar heel snel opvolgden omdat de gemiddelde levensduur van een cyclus in de kettingreactie heel kort was.

Het netto effect van de vertraagde neutronen is dat de gemiddelde levensduur van een neutronengeneratie langer wordt. We hebben nog steeds een groot deel neutronen die heel snel door de cyclus gaan, maar een deel gaat heel traag, en het gemiddelde wordt dus een stuk trager dan voorheen. Om dat kunnen te berekenen, moeten we wat meer in detail naar de vertraagde neutronen kijken.

De twee reacties die we eerder geciteerd hebben (Br-87 en I-137) zijn de belangrijkste, maar niet de enige reacties die vertraagde neutronen opleveren. In feite zijn er heel veel reacties die zoiets doen, en hoewel het heden ten dage mogelijk is met een computer al die reacties te volgen (een beetje zoals met de programmaatjes die we eerder hebben getoond), was dat in vroegere tijden een groter hoofdbreken, en trouwens nergens voor nodig. Men heeft het honderdtal reacties opgesplitst in 6 families, met 6 “halfwaardetijden” voor elke familie. De twee bovenstaande reacties vormen elk reeds een familie op zichzelf en vormen de traagste componenten:

Groep	Fractie	Halfwaardetijd
1 (Br-87)	0.024%	54.5 seconden
2 (I-137)	0.123%	21.8 seconden
3	0.117%	5.98 seconden
4	0.262%	2.23 seconden
5	0.108%	0.495 seconden
6	0.045%	0.179 seconden
Samen	Totaal: 0.679%	Gemiddelde: 7.84 seconden

Een gemiddelde halfwaardetijd van 7.8 seconden komt overeen met een tijdsconstante van 11.3 seconden. Als dusdanig wordt de gemiddelde levensduur van een generatie neutronen zoals Fermi het zag, niet meer gelijk aan 25 microseconden, maar aan $0.993 * 25 \text{ microseconden} + 0.007 * 11.3 \text{ seconden} = 77 \text{ milliseconden}$. In plaats van 40 000 generaties per seconde, hebben we er nu slechts 13, en als we dus een k-factor gelijk aan 1.001 hebben, is het vermogen na een seconde gestegen met een factor gelijk aan $(1.001)^{13} = 1.013$. Dus na een seconde is het vermogen gestegen met 1% en niet meer met een factor een miljard keer een miljard... We zien hier het dramatische effect van een klein fenomeen, de vertraagde neutronen! Van totaal oncontroleerbaar zitten we nu met een systeem dat op een menselijke tijdschaal goed regelbaar wordt. Historisch gezien had Joliot dat niet begrepen, terwijl Fermi dat wel door had. Als dusdanig zat Joliot wel met het moeilijke controleprobleem opgescheept, terwijl Fermi begrepen had dat de vertraagde neutronen het probleem oplossen (enfin, dat dacht hij toch – maar hij moet toch wel “oef” gezegd hebben als hij gezien heeft dat hij zich niet vergiste toen hij CP1 opstartte!).

Natuurlijk is het bovenstaande slechts een schatting. Als men het juist wil doen, dan moet men de evolutie van de zes families in de tijd beschouwen als functie van de neutronenflux. We hebben reeds gezien hoe dat in zijn werk gaat.

Laten we de totale neutronenboekhouding beschouwen, of beter, de dichtheid van splijtingsreacties n , evenals de boekhouding van de nuclidendichtheid van de 6 families. We noemen T de levensduur van een splijtingscyclus zonder rekening te houden met de vertraagde neutronen: het is de gemiddelde tijd tussen het vrijkomen van een neutron in een thermische splijting, en het ogenblik waarop dat neutron een nieuwe splijting veroorzaakt. We beschouwen de factor k van Fermi met de bijdrage van de vertraagde neutronen. We noemen $C_1, C_2 \dots C_6$ de precursordichtheden van de zes families, en p_1, p_2, \dots, p_6 hun kans per tijdseenheid op een neutron op te leveren door verval. Er is een subtiel verschil tussen de “precursoren” en de “nucliden” dichtheid. In de precursoren dichtheid hebben we reeds de fractie geïntegreerd van de neutronen die een splijting zullen veroorzaken. Dat kunnen we natuurlijk op voorhand niet weten, maar verhoudingsgewijs wel. Dus C_1, \dots, C_6 staan niet echt voor een fysische dichtheid, maar wel voor een “reservoir aan nuttige laatkomers in de veroorzaakte splijting”. Het is gelijk aan de hoeveelheid nucliden, vermenigvuldigd met de kans dat die nucliden een neutron opleveren die een splijting gaat veroorzaken. We hadden dat ook anders kunnen doen, maar we doen het op deze wijze. De fracties b_1, b_2, \dots, b_6 zijn de fracties van de totale neutronenbevolking die afkomstig zijn van respectievelijk de families 1, 2, 3, 4, 5 en 6. Verhoudingsgewijs zijn het ook de fracties van de splijtingen die veroorzaakt worden door neutronen afkomstig van families 1... 6 op het totale aantal splijtingen. We schrijven $b = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6$.

Beschouw nu een klein tijdsinterval dt . We gaan eerst de boekhoudkunde uitschrijven van het aantal splijtingen in dat tijdsinterval. De toename van de splijtingssnelheid in het tijdsinterval dt boven de splijtingssnelheid dat in een vorig tijdsinterval dt gebeurde, is gegeven door:

- de splijtingssnelheid veroorzaakt door het “vorige” splijtingssnelheid maal de Fermi factor van de directe neutronen min 1, vermenigvuldigd met dt/T (het aantal generaties in het tijdsinterval dt , want voor elke generatie hebben we een toename). De Fermi factor van de directe neutronen is gelijk aan de totale Fermifactor k , maal de fractie van directe neutronen, gelijk aan $(1-b)$.
- de extra splijtingssnelheid veroorzaakt door elke familie van vertraagde neutronen, die gelijk is aan de dichtheid van hun precursoren (C_i) vermenigvuldigd met de kans per tijdseenheid p_i en dt .

We kunnen dus schrijven voor de splijtingssnelheid (n):

$$dn = (k(1-b) - 1) \frac{dt}{T} n + (C_1 p_1 + C_2 p_2 + C_3 p_3 + C_4 p_4 + C_5 p_5 + C_6 p_6) dt$$

Voor elke familie vertraagde neutronen kunnen we ook een boekhouding uitschrijven. De toename aan precursoren dichtheid zal gegeven zijn door:

- de afname ten gevolge van de kans om te vervallen, gegeven door $C_1 p_1 dt$
- de toename ten gevolge van productie in splijtingen. Het is hier dat onze “rare” definitie van precursor een rol speelt: een precursor is een nuclide die een neutron zal opleveren dat tot een splijting leidt. Als dusdanig is die toename gelijk aan $k b_1 n dt/T$. Inderdaad, voor elke splijting hebben we een fractie b_1 van de neutronen die bij een splijting vrijkomen die aanleiding zullen geven tot een neutron in familie 1, en van die neutronen gaat een fractie k aanleiding geven tot een nieuwe splijting, en dat was de definitie van onze precursor. Als de splijtingssnelheid n is, dan gaan we dat in een tijdsinterval dt , $n dt/T$ keer bijdragen. Met andere woorden, in een tijdsinterval dt is onze stock van precursoren van familie 1 met een hoeveelheid $k b_1 n dt/T$ gegroeid.

Voor familie i (waar i dus staat voor 1, 2, 3, ... 6) vinden we dus volgende boekhouding:

$$d C_i = k b_i n \frac{dt}{T} - C_i p_i dt$$

Als dusdanig kunnen we, net zoals in de voorbeelden die we eerder hebben aangehaald, voor elk nieuw tijdstapje, de nieuwe waarden van n en C_i uitrekenen, en zo de precieze evolutie volgen van de fissiesnelheid (en dus de amplitude van de neutronen flux, en het vermogen van de reactor).

Gegeven bovenstaande vergelijkingen, bestaan er wiskundige technieken om de oplossing ervan te vinden zonder numeriek kleine stapjes te moeten maken, op voorwaarde dat we kunnen veronderstellen dat zowel k als T niet veranderen van waarde. De oplossingen kunnen dan in formulevorm gevonden worden, en men vindt in het algemeen dat de belangrijkste term in die formule van de vorm is: $\exp(w t)$, plus wat correctietermen. De waarde van w wordt dan gegeven door een andere vergelijking, die men soms *de vergelijking van Nordheim* noemt, of soms de “in hour equation”. De waarde van w geeft ons aan hoe snel het reactor vermogen gaat stijgen of dalen als functie van de tijd, voor een gegeven waarde van k en T . We kunnen hier niet dieper op ingaan omdat de benodigde wiskunde buiten het kader van deze tekst valt. Het grappige is dat er na al die ingewikkelde wiskunde, er in goede benadering uit voortkomt dat onze ruwe schatting (de gemiddelde cyclustijd wordt langer) essentieel correct is, zolang we dicht bij de kritische waarden blijven.

Daarentegen, uit deze berekening volgt ook het volgende: als de factor $(k-b)$ groter wordt dan 1, dan is het alsof de vertraagde neutronen gewoon niet bestaan, en zitten we in het potentieel gevaarlijke gebied van de heel snelle vermogensstijging. *Het is dus absoluut noodzakelijk om de reactor zo te ontwerpen dat $k-b > 1$ niet kan voorkomen bij hoge vermogens.* In werkelijkheid stijgt het vermogen natuurlijk niet met die gigantisch hoge factor van een miljard keer een miljard, omdat er zelf-begrenzing zal optreden, maar het is duidelijk dat de installatie totaal oncontroleerbaar wordt. Men noemt de (accidentele) situatie waarin $k-b > 1$ een prompte criticiteit. Zulke ongelukken zijn een paar keer voorgevallen (het SL-1 ongeluk en natuurlijk Chernobyl) en hebben reactor ontwerpers reactoren zo laten ontwerpen dat actief en passief veilige elementen er voor zorgen dat prompte criticiteit door zelfbegrenzende fenomenen onderdrukt wordt. Een reactor die gemakkelijk prompt kritisch kan worden is een gevaarlijke reactor.

Men definieert de *reactiviteit* als: $\rho = \frac{k-1}{k}$ De reactiviteit is 0 voor een kritische reactor, positief voor een reactor waarin het vermogen stijgt en negatief in een reactor waar het vermogen daalt. Een systeem zonder splijtstoffen heeft een reactiviteit van min oneindig.

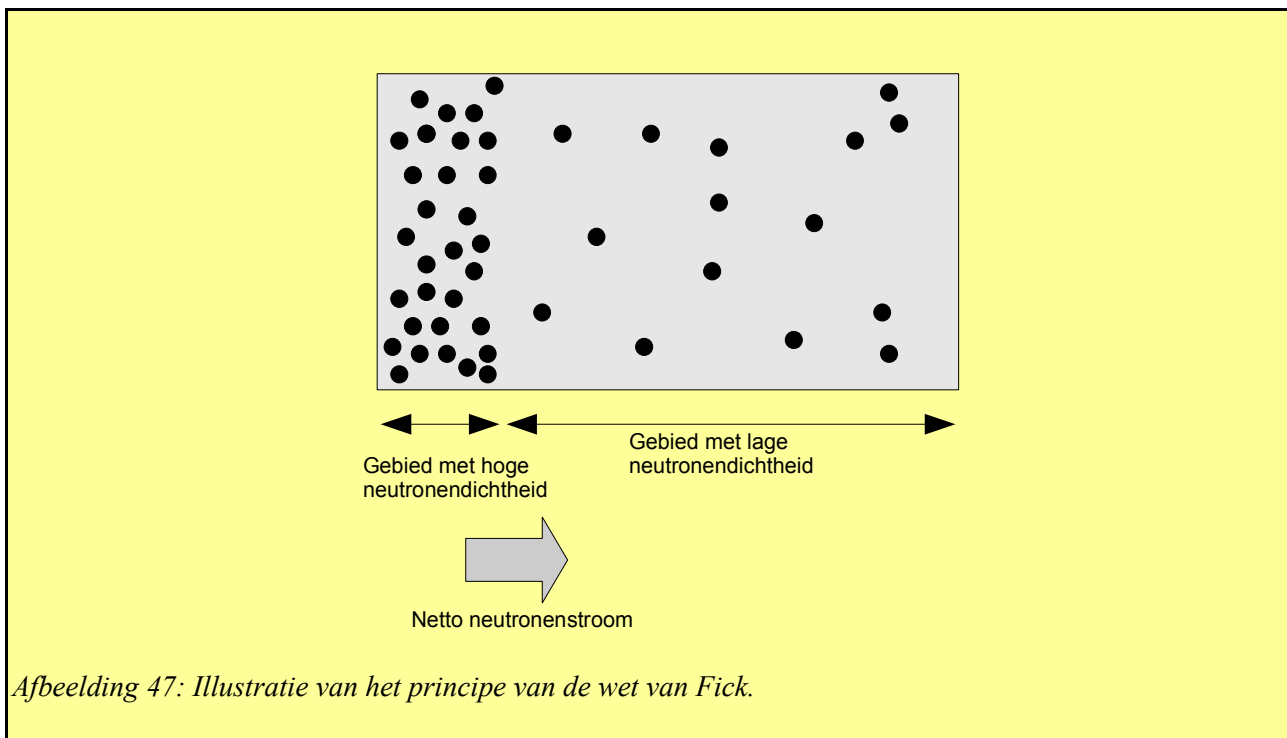
4.4.b Neutronen diffusie

De wet van Boltzmann (in een algemener vorm dan we ze hebben uitgeschreven, namelijk zonder hypothese van stationariteit en isotropie) geeft rigoureus weer hoe de neutronen zich verdelen over ruimte en energie en hoe die verdeling evolueert in de tijd. Het is het startpunt van verschillende berekeningstechnieken maar het is een complex wiskundig probleem. Men kan in sommige gevallen extra benaderde hypothesen maken, die de Boltzmann vergelijking omvormen tot een eenvoudiger wiskundig probleem. De hypothesen die we gaan invoeren, zijn:

- de materiële samenstelling varieert weinig over de gemiddelde afstand die een neutron aflegt tussen twee interacties. We kunnen dus veronderstellen in onze redenering dat, lokaal gezien, de werkzame doorsneden en dichtheden constant zijn.

- de fluxveranderingen in de tijd zijn traag ten opzichte van de levenstijd van de neutronen tussen twee interacties
- de fluxveranderingen zijn klein over de schaal van de afgelegde weg die een neutron aflegt tussen twee interacties
- de neutronen hebben altijd en overal een zelfde energieverdeling, die geconcentreerd is rond een gemiddelde snelheid van beweging
- de interacties zijn isotroop, of zelfs al zijn ze niet individueel isotroop, kunnen we die benadering maken over een statistisch significant aantal interacties.
- Er is meer elastische botsing dan absorptie.

Uit al deze benaderingen (waarvan men kan inzien dat ze niet altijd geldig zijn voor elk denkbaar neutronentransport!) kan men een vergelijking afleiden, die de wet van Fick genoemd wordt. De afleiding ervan vereist wiskunde die buiten het kader van dit werk valt, maar we zullen trachten intuïtief aan te geven waar het om gaat. Als alle neutronen ongeveer dezelfde snelheid hebben, dan bestaat er een eenvoudige relatie tussen de scalaire flux en *de ogenblikkelijke neutronen dichtheid*.



Afbeelding 47: Illustratie van het principe van de wet van Fick.

Onder ogenblikkelijke neutronendensiteit (of neutronendichtheid) verstaan we het volgende: veronderstel dat we een “foto” zouden nemen van alle rondvliegende neutronen op een zeker ogenblik. Zij hebben dan, op het ogenblik van de foto, een zekere positie in de ruimte, met andere woorden, de ruimte is gevuld met “vele kleine stipjes”, elk stipje een neutron positie voorstellende. De hoeveelheid stipjes per kubieke centimeter geeft ons de neutronendensiteit aan. Het is een grootte die ons in het algemeen niet interesseert, want wat voor ons van belang is, zijn voorbijkomende neutronen. Deze bepalen de kans op interactie. Als hetzelfde neutron vijfentwintig keer langskomt, dan is de kans op interactie vijfentwintig keer groter dan wanneer dat neutron maar een keer langskomt. De scalaire flux zal 25 keer groter zijn in het eerste geval, maar de neutronendichtheid zal dezelfde zijn in de twee gevallen. Interacties worden beschreven door de

scalaire flux, en niet door de neutronen dichtheid, vandaar dat we die grootheid nog niet hadden ingevoerd. Maar in de bovenstaande benaderingen speelt het concept van neutronendichtheid wel een rol, vandaar dat we dat begrip nu invoeren. Als de scalaire flux ϕ is, en de gemiddelde snelheid van de neutronen is v , dan is de neutronendichtheid n gegeven door

$$n = \frac{\phi}{v}.$$

Zoals gezegd valt de afleiding, en zelfs de formulering van de wet van Fick buiten het wiskundige kader van dit werk ; we kunnen wel met woorden trachten te formuleren wat die wiskundige expressie van de wet van Fick wil zeggen. *De wet van Fick zegt dat er een netto neutronenstroom ontstaat van gebieden met hoge neutronendichtheid naar gebieden met lage neutronendichtheid (zie figuur 47) en de hoeveelheid neutronen die netto van het ene naar het andere gebied stromen is proportioneel aan het verschil in neutronendichtheid, en omgekeerd evenredig met de afstand tussen de twee gebieden.* In wiskundige termen zal men spreken over een gradiënt van de neutronendichtheid ; dat is, grosso modo, de variatie van neutronendichtheid, gedeeld door de afstand waarover die variatie is waargenomen. Het merkwaardige is dat zulk een wet gekend is voor andere natuurkundige fenomenen, bijvoorbeeld warmtegeleiding. In materie gaat warmte van delen met een hoge temperatuur naar delen met een lage temperatuur, en de warmtestroom is daar ook evenredig met het temperatuursverschil gedeeld door de afstand waarover dat temperatuursverschil is waargenomen. Ook de diffusie van stoffen in de materie volgt deze wet: een druppeltje inkt in water zal zich (als men niet gaat roeren) verspreiden zoals de wet van Fick voorschrijft. De wet van Fick, afgeleid onder speciale voorwaarden en benaderingen, samen met de boekhouding die in de algemene Boltzmann vergelijking zit, geeft aanleiding tot een vergelijking die men *de diffusievergelijking* noemt. In tegenstelling tot de algemene Boltzmann wet, kent men wel vele wiskundige technieken om de diffusie vergelijking op te lossen in verschillende gevallen. De diffusievergelijking is trouwens net dezelfde vergelijking als de wiskundige vergelijking die het warmtetransport in materie beschrijft, en bijgevolg toelaat om de temperatuursverdeling in materie te berekenen als men de warmtebronnen kent.

We hebben verschillende hypothesen en benaderingen moeten invoeren om in de (correcte) Boltzmann vergelijking de wet van Fick kunnen in te voeren, en om de diffusievergelijking te bekomen. Het is dus niet altijd toelaatbaar om voor neutronentransport de diffusievergelijking te gebruiken, maar in die gevallen waar dat wel kan, is dat heel voordelig, want we kennen vele oplossingstechnieken (zelfs in formulevorm) van deze laatste vergelijking. Men vindt het zelfs zo praktisch om de diffusievergelijking kunnen te gebruiken, dat men ze zelfs gebruikt waar normaal gezien, de condities voor de benadering niet geldig zijn, maar waar men “effectieve” grootheden kan gebruiken (gemiddelden en zo). De wiskunde van de diffusie vergelijking valt buiten het kader van dit boek, maar we schrijven ze, voor de zottigheid en de volledigheid, toch maar neer voor die lezers die deze wiskunde wat kennen – voor de andere lezers: trek het U niet aan, en sla dit gewoon maar over:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi(x, y, z, t)}{\partial t} = S(x, y, z, t) - \Sigma_a(x, y, z) \phi(x, y, z, t) + \text{div}(D(x, y, z) \text{grad} \phi(x, y, z, t))$$

Hierin is Σ_a de macroscopische werkzame doorsnede voor absorptie, en $D(x, y, z) = \frac{1}{3\Sigma_s}$ de zogenaamde diffusiecoëfficiënt, die uitgedrukt is als functie van de totale macroscopische werkzame doorsnede (absorptie plus elastische botsing). S is de bron (neutronen geproduceerd per kubieke centimeter en per seconde). De diffusiecoëfficiënt heeft als dimensie een lengte. Men voert soms de grootheid *diffusielengte* in: $L = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}}$. We hebben twee typische lengteschalen voor een diffusieproces: de lengte gegeven door D zelf, en de diffusielengte, die rekening houdt met de

absorptie. Uit de diffusievergelijking kan men afleiden dat de diffusielengte die afstand is, waarop, in stationaire toestand, de neutronendichtheid ten gevolge van een kleine bron met een factor e ($2.78\dots$ de basis van de natuurlijke logaritmen) is afgenomen.

We stellen bijgevolg vast dat als we de bron kennen, en als we de macroscopische werkzame doorsneden voor absorptie en voor elastische botsing kennen – hiervoor is het nodig de microscopische werkzame doorsneden te kennen, evenals de nuclidendichtheden – dat de vergelijking volledig is vastgelegd. Zoals reeds gezegd bestaan er verschillende gekende technieken om bovenstaande vergelijking op te lossen, in tegenstelling tot de algemene Boltzmann vergelijking.

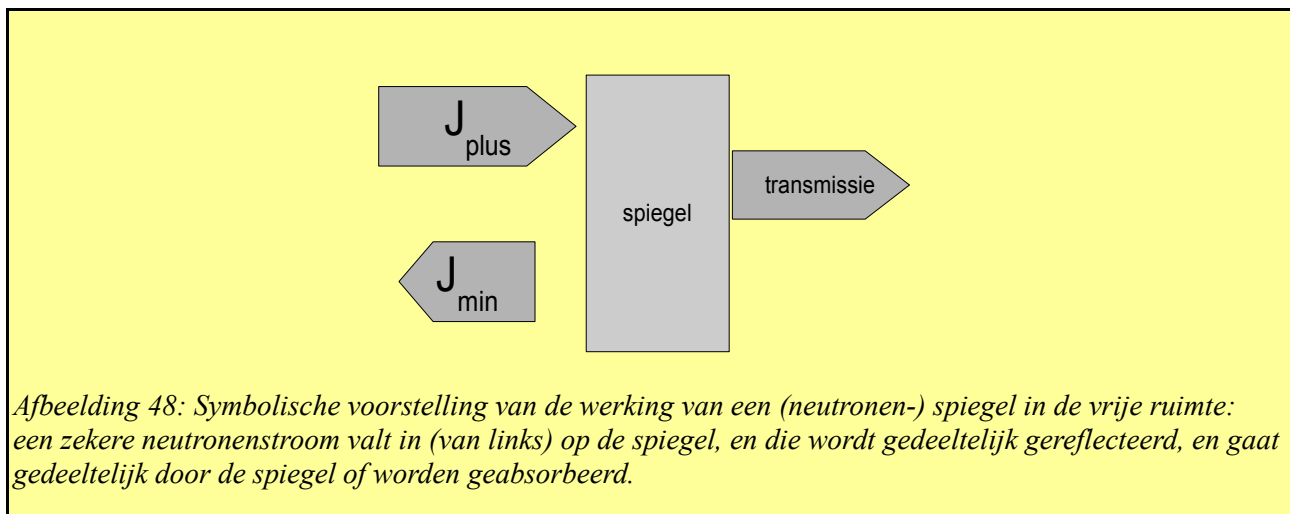
Er is een geval waar neutronendiffusie heel goed opgaat: thermische neutronen in een licht absorberend materiaal. Voor het uitrekenen van de stralingsbescherming van een neutronenbron door water of beton bijvoorbeeld kan men heel goed deze benadering gebruiken.

Een toepassing van de diffusievergelijking is wat men *het albedo van een neutronenspiegel* noemt. Als men (thermische) neutronen in een materiaal heeft, dan gaan die door elastische botsingen wat alle kanten op, maar eens ze natuurlijk het materiaal verlaten via het oppervlak, en in de vrije ruimte terecht komen (of in lucht, wat in de meeste gevallen als “lege ruimte” kan beschouwd worden), vliegen ze recht vooruit, en keren niet meer terug. Als dusdanig zijn neutronen die via het oppervlak een materiaal verlaten “voorgoed” verloren. Indien men nu in die lege ruimte een materiaal plaatst dat een relatief hoge werkzame doorsnede heeft voor elastische botsing, en een kleine voor absorptie, dan is het mogelijk om een groot deel van die verloren neutronen vroeg of laat terug in het originele materiaal te laten terugkeren, zoals aangegeven in figuur 48. Dat heeft zijn belang bij de criticiteit van kleine reactoren: de verliesfactor doorheen de wand van de reactor kan op die manier sterk verkleind worden, wat de k-factor net van een beetje kleiner naar een beetje groter dan 1 kan laten variëren. Het water in de koelmantel van het reactievat bij het Tokai-Mura ongeluk speelde bijvoorbeeld (ongewenst) die rol, en het verwijderen van dat water (van de “neutronenspiegel”) volstond om het systeem niet meer kritisch te maken. Met andere woorden, een neutronenspiegel is niets anders dan een stuk materie dat dient om een groot deel van de neutronen dat erop invalt, terug te ketsen. Het albedo van een neutronenspiegel is de verhouding van de neutronenstroom die terug geketst wordt op de de neutronenstroom die erop invalt: $\beta = \frac{J_{min}}{J_{plus}}$. Men kan de waarde van deze grootheid gemakkelijk afleiden uit de diffusie vergelijking (ook al valt dit buiten het wiskundige kader van dit boek, vraagt het ongeveer een kleine bladzijde rekenwerk met potlood en papier), en men vindt dan dat het albedo van een “dikke” plaat uit een bepaald materiaal gegeven is door:

$$\beta = \frac{1 - 2D/L}{1 + 2D/L}$$

waar D de diffusiecoëfficiënt is, en L de diffusielengte. We geven hier enkele typische waarden voor materialen die als moderator en dus ook als neutronenspiegel kunnen dienen:

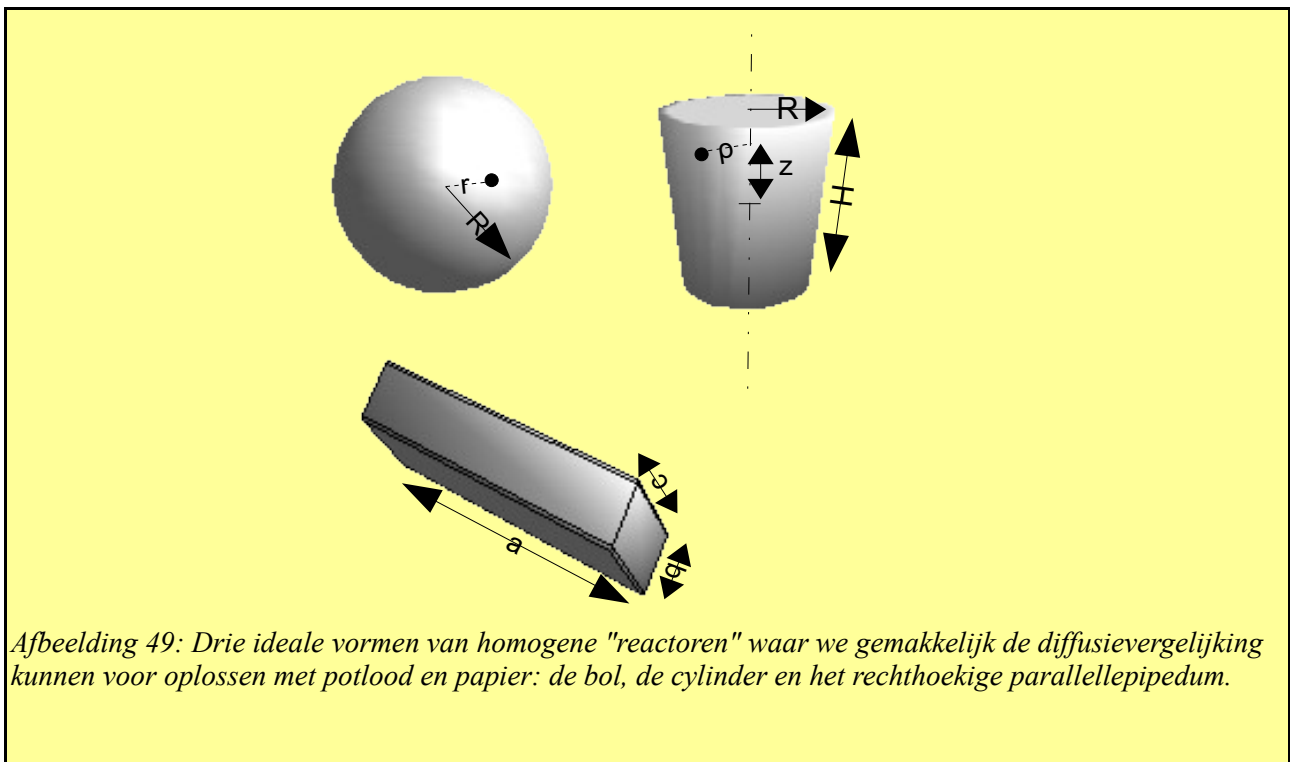
Materiaal	D (cm)	L (cm)	albedo
Water	0.2	2.8	80%
Zwaar water	0.8	130	97%
Grafiet	0.8	55	94%



Een “dikke” plaat wil zeggen een plaat met een dikte die drie keer of meer de diffusielenkte L bedraagt. We herhalen dat deze waarden af te leiden zijn uit de werkzame doorsneden (bij thermische energie 0.0253 eV) van absorptie en elastische botsing van de betreffende nucliden, evenals uit hun nuclidendichtheid. Merk op dat bovenstaande waarden merkwaardig zijn: een muur van zwaar water slaagt erin 97% van de neutronen terug te ketsen, wat beter is dan uw badkamerspiegel voor licht! Wel opletten: de bovenstaande reflectie is berekend voor een overgang van “lege ruimte” naar het materiaal in kwestie. Men kan bijna even gemakkelijk ook reflecties uitrekenen van materiaal 1 naar materiaal 2, maar we gaan hier verder niet op in. De enige bedoeling was hier enerzijds om aan te geven dat er een wiskundige vergelijking bestaat - de diffusie vergelijking - die het toelaat om gemakkelijk, met potlood en papier, neutronendichtheden en stromen uit te rekenen in eenvoudige gevallen, en anderzijds kwalitatief het concept van de neutronenspiegel in te voeren dat een belangrijke rol speelt in verschillende situaties. We wijzen op het grote verschil in moeilijkheid tussen de diffusievergelijking en de Boltzmann vergelijking. Voor de diffusievergelijking kan men, mits een paar bladzijden rekenwerk met potlood en papier, oplossingen vinden in formulevorm die tegelijkertijd een hele hoop situaties beschrijven. De Boltzmann vergelijking is zelfs moeilijk numeriek op te lossen met een computer voor een specifiek geval. Natuurlijk is er een prijs te betalen: de Boltzmann vergelijking is volledig correct en algemeen, terwijl de diffusievergelijking gebaseerd is op hypothesen en benaderingen. Men begrijpt al direct welke aanpak Fermi destijds heeft gekozen.

De bovenstaande diffusievergelijking kan ook gebruikt worden om de ruimtelijke distributie van de neutronendichtheid (en dus de flux) in een reactor te berekenen. Toen we hogerop de Fermi factor invoerden, waren we ervan uit gegaan dat we de scalaire flux in de reactor konden schrijven als een product van een ruimtelijke en energieverdeling enerzijds, en een tijdsafhankelijke vermogenfactor anderzijds: $\Phi(x, y, z, t, E) = \varphi(x, y, z, E)n(t)$ en om Fermi's factor af te leiden hadden we ons toen toegelegd op de tijdsafhankelijke factor. We gaan er nu van uit dat we een enkele energiewaarde E hebben (we zullen hier nog op terugkomen), en we zijn dus nu bezig met het trachten uit te rekenen van de ruimtelijke afhankelijkheid van de scalaire flux. In tegenstelling tot het eerder beschouwde diffusieprobleem waar de bron extern gegeven was, is die bron nu de splijtingsreactie zelf die afhangt van de flux. Als dusdanig vinden we: $S = v \Sigma_f \phi$, de bron van neutronen is gegeven door de fissie reactie snelheid maal het gemiddeld aantal vrijgemaakte neutronen per fissiereactie. Door deze term in de diffusievergelijking te stoppen, vinden we een vergelijking die het ons mogelijk maakt om de oplossing van de ruimtelijke afhankelijkheid van de neutronenflux te berekenen. De vergelijking is veel gemakkelijker oplosbaar dan de algemene

Boltzmann vergelijking, en men kent verschillende technieken om ze op te lossen. Natuurlijk is de oplossing slechts een benadering die slechts geldig is in de mate dat de hypothesen voor het afleiden van de diffusievergelijking geldig zijn, en men kan zich afvragen in welke mate dat hier zinvol is. Inderdaad, men kan eventueel aanvaarden dat thermische neutronen allemaal ongeveer dezelfde energie hebben (zelfs dat is niet waar, ze hebben een statistische verdeling rond een gegeven energie, en niet allemaal precies die waarde natuurlijk), maar men ziet moeilijk in hoe men splijtingsneutronen, die aan enkele MeV geproduceerd worden, kan mengen met thermische neutronen die ongeveer honderd miljoen keer minder energie bezitten. Maar weerom bestaat er een truc. Het is niet echt nodig dat de neutronen een welbepaalde energie bezitten. Wat wel moet gelden, is dat de neutronen overal ongeveer dezelfde energieverdeling bezitten. Met andere woorden, we wensen dat de verdeling in E overal dezelfde vorm aanneemt, en niet afhangt van plaats tot plaats. Dat komt neer op stellen dat de scalaire flux als een product kan geschreven worden: $\varphi(x, y, z, E) = \varphi(x, y, z) s(E)$. $s(E)$ is dan de vorm van het neutronen energie spectrum. De diffusievergelijking kan dan nog steeds gebruikt worden, als we gemiddelde grootheden over dit energiespectrum gebruiken. Bijvoorbeeld, de absorptie werkzame doorsnede dient uitgerekend te worden, niet bij een specifieke energie, maar men dient de gemiddelde waarde te nemen over alle energieën, met een gewicht gegeven door $s(E)$. In de praktijk berekent men dat door verschillende "energie doosjes" te beschouwen, en volgende gemiddelde waarde uit te rekenen (we nemen als voorbeeld, de absorptie werkzame doorsnede): $\bar{\sigma}_a = \frac{\int s(E) \sigma_a(E) dE}{\int s(E) dE}$ waarbij de som gemaakt wordt over alle energievakjes die we beschouwen.



We herinneren eraan dat de Fermi factor gegeven was voor een oneindig grote reactor ; met bovenstaande grootheden wordt dat $k_{\infty} = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a}$. Het uitrekenen van het profiel van de scalaire flux zal ons toelaten om de geometrische verliesfactor te vinden voor een eindige reactor. Men kan met een kleine bladzijde rekenwerk het probleem met potlood en papier oplossen in het geval van een aantal

“ideale” reactor geometriën. We zullen bij wijze van voorbeeld 3 zulke ideale gevallen van geometrie aangeven (zoals getoond in figuur 49).

De eerste geometrie die we beschouwen, is de bolvormige reactor met straal R : men kan tonen dat de oplossing in formulevorm kan geschreven worden, en de gedaante neemt:

$$\phi(r) = \frac{\sin(\pi \frac{r}{R})}{r} \text{ en de Fermi factor wordt: } k = \frac{k_\infty}{1 + \frac{\pi^2 L^2}{R^2}}$$

Voor een cilindervormige reactor met straal R en hoogte H (dat is al korter bij de reële geometrie) wordt de oplossing:

$$\phi(\rho, z) = J_0(2.4048 \frac{\rho}{R}) \cos(\frac{\pi z}{H}) \text{ en de Fermi factor: } k = \frac{k_\infty}{1 + L^2(\frac{\pi^2}{H^2} + \frac{2.404^2}{R^2})}$$

Hierin staat J_0 voor een speciale wiskundige functie, die een Bessel functie wordt genoemd. Die functie is goed gekend en er bestaan tabellen voor de numerieke waarden; moderne wiskunde programma's kunnen meestal ook de numerieke waarden van de Bessel functies uitrekenen. Het belangrijkste is te beseffen dat we een formule hebben die ons de ruimtelijke scalaire flux verdeling geeft, evenals de juiste Fermi factor die de conditie van kritische afmetingen aangeeft.

Laatste voorbeeld: een balkvormige reactor, met zijden a , b en c :

$$\phi(x, y, z) = \sin(\pi \frac{x}{a}) \sin(\pi \frac{y}{b}) \sin(\pi \frac{z}{c}) \text{ en Fermi factor } k = \frac{k_\infty}{1 + L^2(\frac{\pi^2}{a^2} + \frac{\pi^2}{b^2} + \frac{\pi^2}{c^2})}$$

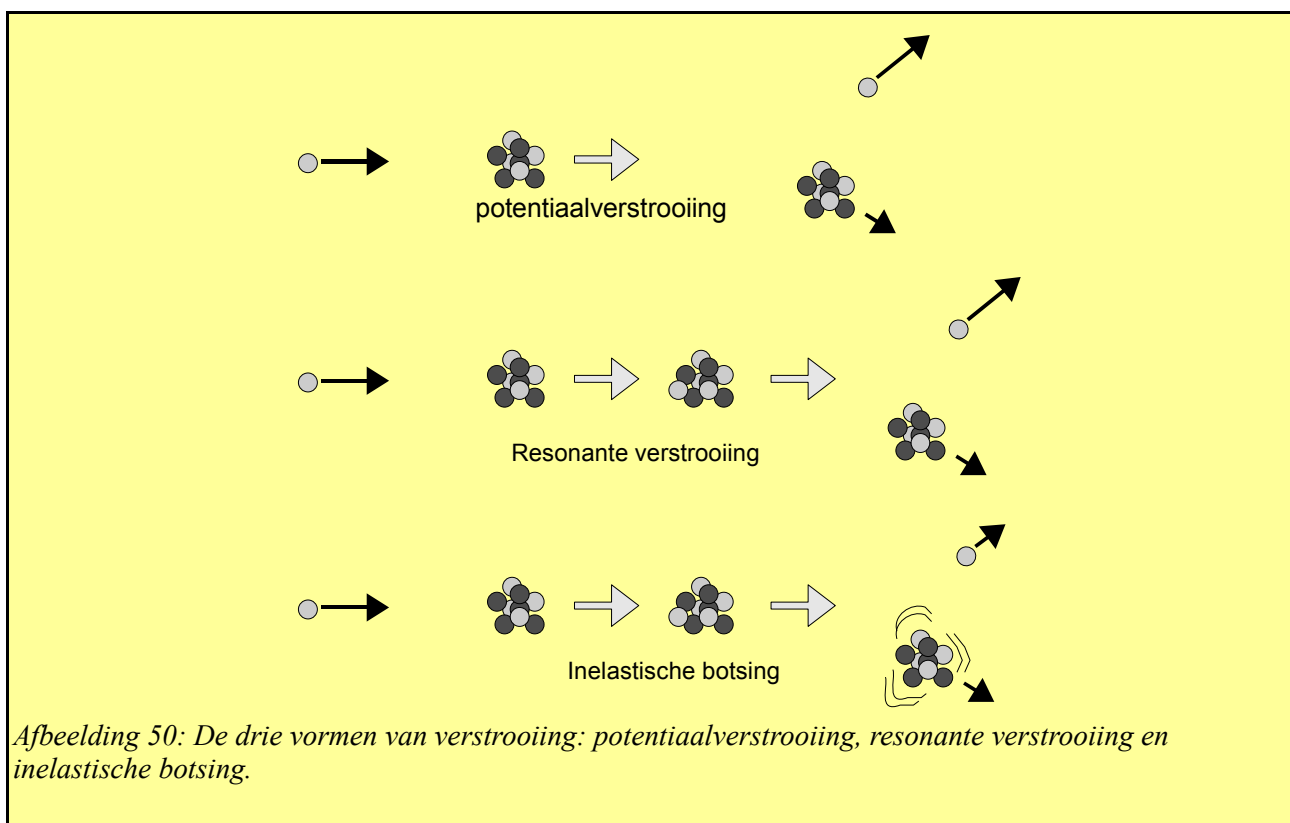
We zijn vrij ver gekomen! De vier factoren van Fermi, gevolgd door een bestudering van de reactiviteit van een reactor, rekening houdende met de vertraagde neutronen, hebben ons een idee gegeven van de afhankelijkheid van de tijd van het reactorvermogen. De hypothesen die toelieten om de diffusie theorie aan te nemen (wetende dat we slechts benaderingen maken) hebben ons toegelaten om een idee te krijgen van de ruimtelijke verdeling van de neutronen flux en van de geometrische verliezen in een eindige reactor. Er ontbreekt nog een aspect: het energie spectrum van de neutronen. Dat pakken we aan in het volgende stukje.

4.4.c Vertraging van neutronen

In de meeste reactoren worden neutronen aan relatief hoge energie geproduceerd in fissiereacties (enkele MeV) en ondergaan ze verschillende verstrooiingen alvorens geabsorbeerd te worden. Dat is het geval zowel bij een snelle reactor als bij een thermische reactor, maar het is natuurlijk zo dat men er tracht voor te zorgen dat er veel meer botsingen en veel meer energieverlies gebeurt in een thermische reactor dan in een snelle reactor. Fysisch gezien bestaan er twee soorten verstrooiing: *potentiaal verstrooiing* en *resonante verstrooiing*. In het geval van potentiaalverstrooiing kan men best denken aan het beeld van twee ballen van verschillende massa die met elkaar botsen: een zekere kracht tussen beide zal de baan van de ballen afbuigen in een andere richting dan de invallende richting. Resonante verstrooiing is fysisch totaal anders: een neutron wordt geabsorbeerd door de doelkern, om een nieuwe nuclide te vormen, en die nieuwe nuclide zendt haast onmiddellijk een neutron uit (niet noodzakelijk hetzelfde neutron, zou men kunnen stellen, mocht dat microscopisch enige zin hebben). Het kan nu zijn dat het uitzenden van een neutron die nieuwe nuclide terug transformeert naar de oude nuclide; maar het kan ook zijn dat de nieuwe nuclide teruggaat naar een aangeslagen toestand van de oude nuclide die dan op een of andere wijze zal vervallen, bijvoorbeeld door uitzenden van een gamma foton en terugkeren naar de grondtoestand, ofwel door radioactief te vervallen. In het eerste geval (terugkeer naar oude nuclide in grondtoestand) lijkt de resonante verstrooiing heel sterk op de potentiaalverstrooiing. Men kan

eigenlijk het verschil niet maken, behalve het feit dat de werkzame doorsnede voor verstrooiing een *sterke piek vertoont bij een welbepaalde energie*. Zowel potentiaalverstrooiing als resonante verstrooiing van dit type worden *elastische botsing* genoemd, omdat de totale hoeveelheid bewegingsenergie behouden is (dezelfde voor en na de botsing). Er is meestal een overdracht geweest van bewegingsenergie van het neutron naar de kern (dus het neutron heeft energie verloren en de kern heeft er gewonnen), maar de totale boekhouding klopt. Daarentegen, als we in het tweede geval van resonante verstrooiing zijn, en de doelnuclide dus in een aangeslagen toestand achterblijft, is er minder bewegingsenergie op het einde dan in het begin (het verschil zit hem in de verminderde bindingsenergie van de aangeslagen toestand). Men noemt dit een *inelastische botsing*.

We zien hier dus dat er twee totaal verschillende indelingen zijn van de verstrooiing: fysisch gezien maakt men onderscheid tussen potentiaal en resonante verstrooiing, terwijl “gedragsgewijze” we onderscheid maken tussen elastisch en inelastisch. Het is natuurlijk de gedragswijze die van belang is in neutrontransport. Voor lichte kernen treden resonanties slechts op bij hoge energieën en zijn dus voor ons van geen belang: (de meeste) lichte kernen ondergaan enkel potentiaalverstrooiing en bijgevolg enkel elastische botsingen. Zware kernen bezitten echter resonanties die veel lager in energie kunnen zijn, en geven aanleiding zowel tot inelastische als tot elastische botsingen. De drie “fysische beelden van verstrooiing” zijn aangegeven in afbeelding 50.



In onze beschouwing van de vertraging van neutronen gaan we eerst de benadering maken *dat er enkel maar elastische botsingen* zijn. We hebben dit reeds aangehaald maar we herhalen dit hier: de elastische botsing kan uitgerekend worden in elementaire mechanica alsof het een botsing is tussen twee ballen van ongelijke massa (een neutron, met massa “1” en een nuclide, met massa “A”). Hoewel er behoud is van totale bewegingsenergie (het is namelijk een elastische botsing!), zal er wel meestal energie overdracht zijn van het neutron naar de nuclide. Omdat deze mechanica buiten

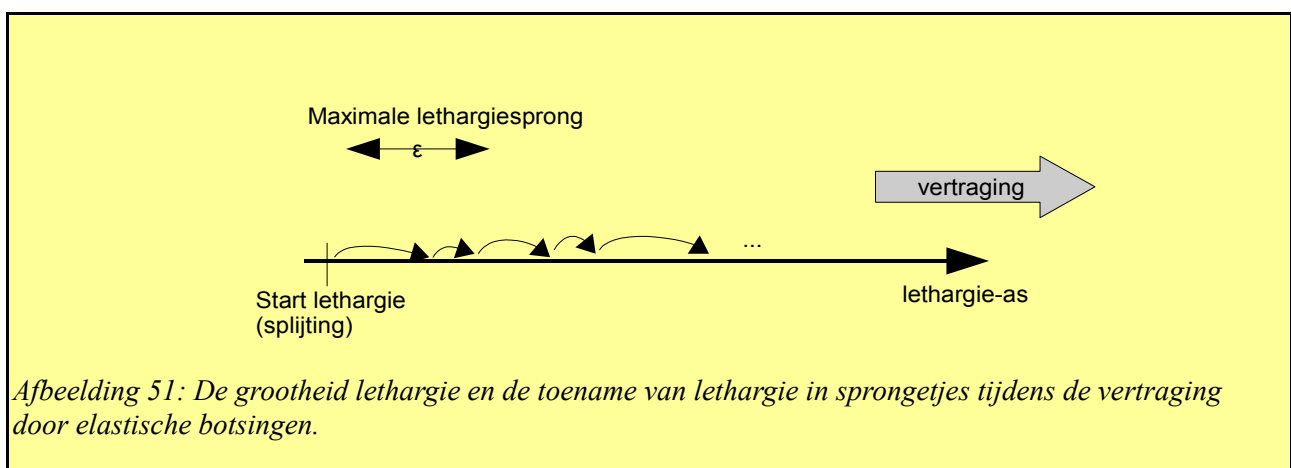
het kader valt van het niveau dat we ons gesteld hebben (meestal wordt dat in het eerste jaar na de humaniora onderwezen), geven we enkel het resultaat. De verhouding van de energie “voor” en “na” van het neutron is gegeven door:

$$E_{na} = E_{voor} \frac{A^2 + 1 + 2 A u_c}{(A + 1)^2}$$

Hierin is u_c de cosinus van de hoek tussen de richting van het invallende neutron (zie afbeelding 43), en van het uitgaande neutron, in het massacentrum van de twee deeltjes gezien. Als U dat niet duidelijk is, trek het U niet aan. De grootte u_c is gewoon een getal tussen -1 en 1, naargelang de hoek van vertrek na de botsing van het neutron.

Het is meestal ook zo, dat de botsing isotroop is in het massacentrum als de energie van de neutronen niet te hoog is. Dat wil zeggen dat voor vele botsingen, alle ruimtehoeken even waarschijnlijk zijn voor het uitgaande neutron. Er is dus geen “geheugen” van de richting van het invallende neutron in dit geval. Dat komt erop neer (hoewel dat wat wiskunde vraagt buiten het ons opgelegde kader om dat aan te tonen) dat u_c uniform verdeeld is tussen -1 en 1: de kans dat bij een gegeven botsing u_c tussen, zeg maar, -0.9 en -0.8 ligt, is dezelfde als de kans dat u_c tussen 0.2 en 0.3 ligt bijvoorbeeld (en is gelijk aan 1/20 omdat de lengte van het interval, namelijk 0.1, 20 keer kleiner is dan het totale interval van -1 tot 1, wat gelijk is aan 2). Let wel, het is in het massacentrum dat alle hoeken dezelfde kans hebben, niet in wat men het “laboratorium systeem” noemt, het systeem waar een snel neutron op een stilstaande nuclide invalt. Het verband tussen de hoek tussen de richting van het invallende neutron en het uitgaande neutron na botsing in het laboratorium systeem (die we voor de gelegenheid ψ noemen en voorgesteld was door θ_{lab} in figuur 43) en de grootte u_c is gegeven door: $\psi = \arccos\left(\frac{1 + Au_c}{\sqrt{A^2 + 1 + 2Au_c}}\right)$ Als dit soort formules de lezer in de war brengt, is het beste wat hij kan doen, er niet naar te kijken. Het wil gewoon maar zeggen dat we, voor een gegeven waarde van u_c (tussen -1 en 1), de uitgaande hoek en de energie kunnen bepalen na botsing. Al het voorgaande kan men afleiden uit elementaire mechanica van botsende ballen.

We gaan ons toelagen op de “energie evolutie” van een neutron, dat opeenvolgende botsingen kan



Afbeelding 51: De grootte lethargie en de toename van lethargie in sprongetjes tijdens de vertraging door elastische botsingen.

ondergaan. Gezien u_c uniform is verdeeld tussen -1 en 1, wil dat zeggen dat de energie na een botsing uniform is verdeeld tussen αE_{voor} en E_{voor} waarbij alfa het maximale relatieve energieverlies weergeeft dat het neutron kan ondergaan in een enkele botsing: $\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$.

Men voert nu een grootheid in die een andere manier is om de energie te beschouwen, en die men de *lethargie* noemt. Het is eigenlijk niets anders dan de energie in een logaritmische schaal. De lethargie u is gegeven door: $u = \ln \frac{E_{ref}}{E}$ waar men de referentie energie mag kiezen, maar meestal gelijk stelt aan 10 MeV, zodat alle beschouwde energieën kleiner zijn. De lethargie groeit als functie van de vertraging die een neutron ondergaat. Dit kan een nodeloze complicatie lijken – waarom werken we gewoon niet met energie – maar zoals we gezien hebben bij de Monte Carlo simulatie, is het vaak handig om grootheden (waaronder de energie) uit te zetten in een logaritmische schaal. Er is trouwens nog een andere reden waarom we met een logaritmische schaal werken. Elke botsing voert een *relatieve* energie vermindering in; als we dat in een logaritmische schaal beschouwen, wordt dat een *constante* vermindering. De energie relatie die we eerder hadden uitgeschreven, wordt, uitgedrukt in lethargie:

$$u_f - u_i = \Delta_u = -\ln\left(\frac{1}{2}(1 + \alpha + (1 - \alpha)u_c)\right)$$

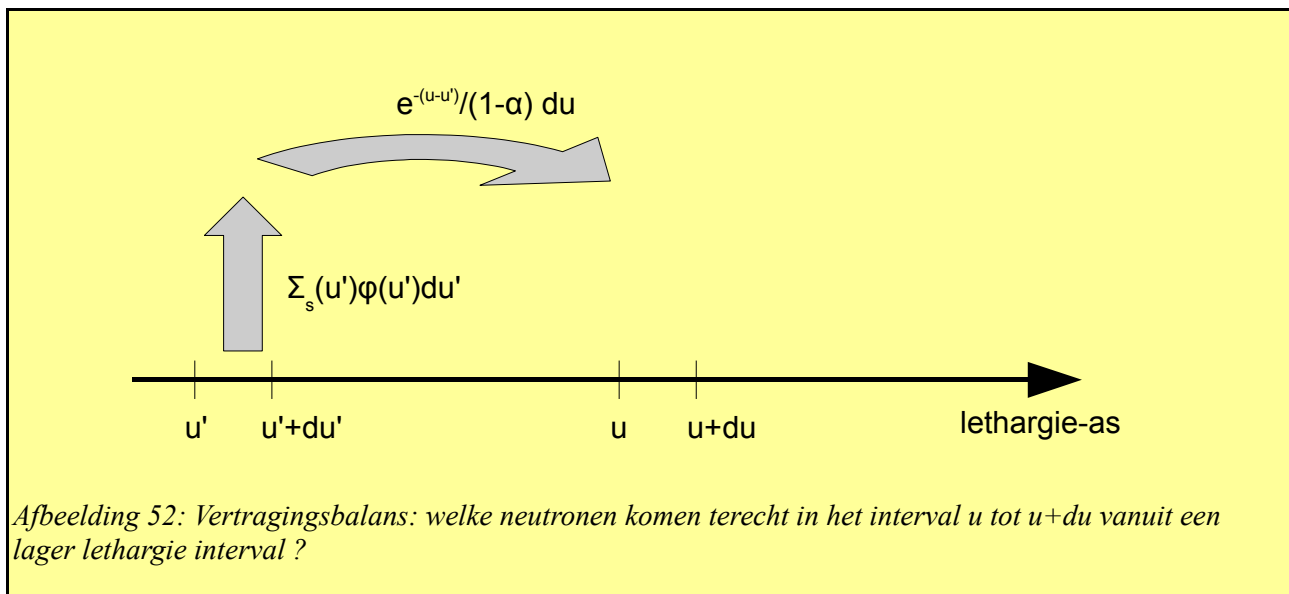
de maximale lethargiesprong is dus gelijk aan $\epsilon = -\ln(\alpha)$ en dat is dus een constante onafhankelijk van de energie van het invallende neutron (een van de voordelen van een logaritmische schaal). Daarentegen, de kansverdeling van de lethargiesprong (die dus tussen 0 en epsilon zal liggen) is niet meer uniform verdeeld. Men kan tonen dat die de vorm aanneemt van een exponentiële verdeling tussen 0 en epsilon: $P(\Delta_u) d\Delta_u = \frac{e^{-\Delta_u}}{1-\alpha} d\Delta_u$ (opnieuw, als dat U niet veel zegt, moet U zich dat niet aantrekken).

De *maximale* lethargiesprong per elastische botsing is gelijk aan epsilon; de *gemiddelde* lethargiesprong is gegeven door ksi: $\xi = 1 - \frac{\alpha\epsilon}{1-\alpha}$. De lethargie als met de sprongetjes wordt getoond in figuur 51. Merk op dat ksi niet gewoon epsilon gedeeld door twee is, zoals men foutief zou kunnen denken. Dat komt omdat de kansverdeling van de lethargiesprong niet uniform is, maar exponentieel verdeeld. Ksi geeft ons aan hoeveel de lethargie gemiddeld toeneemt per botsing. Als we de hele weg (in lethargie) kennen van een neutron dat vrijkomt in een fissie, en dat moet “aankomen” in het thermisch gebied, dan volstaat het die lethargieweg te delen door de “gemiddelde stap in lethargie per botsing” om het (gemiddeld) aantal botsingen te kennen die nodig zijn om de hele weg af te leggen. Beschouw even de weg van een 1 MeV neutron op zijn weg naar de thermische energie (0.0253 eV). De lethargieweg is gelijk aan $\ln(1\text{MeV}/0.0253\text{eV}) = 17.5$. We gaan na voor een aantal stoffen, welke de typische waarden zijn voor epsilon, ksi, en het aantal botsingen. Het zijn functies van het massagetal A:

Materiaal	A	Alfa	Epsilon	Ksi	Aantal botsingen
H	1	0	Oneindig	1	17.5
D	2	0.11	2.2	0.73	24
C	12	0.72	0.33	0.16	109
U	236	0.98	0.017	0.0084	208

We beschouwen nu het volgende probleem: er is een bron die voortdurend neutronen produceert met een gegeven start lethargie (energie), en die neutronen ondergaan opeenvolgende vertragingen door elastische botsingen. Ze kunnen ook geabsorbeerd worden. Na een zekere tijd ontstaat er een

stationaire toestand waarbij er voor elk lethargie interval een zeker aantal neutronen aanwezig is. We willen uitrekenen hoeveel neutronen er aanwezig zijn in elk lethargie interval. Dat is met andere woorden niets anders *dan willen uitrekenen wat het energie spectrum gaat zijn van de aanwezige neutronen in een logaritmische schaal*. We pakken dat probleem aan door de boekhoudkunde uit te schrijven voor een intervalletje lethargie, du . Veronderstel dat we de lethargie-as (de logaritmische energie-as) hebben opgesplitst in een aantal vakjes du . We gaan ervan uit dat er een scalaire fluxdichtheid $\phi(u)$ aan elk vakje du kan geassocieerd worden, wat erop neerkomt dat er een fluentie debiet van neutronen is in het energie interval dat overeenkomt met het gegeven lethargie interval gelijk aan $\phi(u) du$. Het is die scalaire fluxdichtheid die we wensen uit te rekenen als functie van de lethargie, want dat is het energiespectrum dat we zoeken.



Afbeelding 52: Vertragsbalans: welke neutronen komen terecht in het interval u tot $u+du$ vanuit een lager lethargie interval ?

We vragen ons in de eerste plaats af hoeveel neutronen gaan toekomen in ons interval dat loopt van u tot $u+du$, door botsing van ergens anders (op de lethargie as). Gezien we aannemen dat botsingen enkel maar energie laten verliezen aan de neutronen (en dus enkel maar de lethargie laten stijgen), kunnen de neutronen die toekomen in het interval van u tot $u+du$ enkel maar afkomstig zijn van lagere lethargiewaarden dan u . Laten we een lethargie interval $u'+du'$ beschouwen, met u' kleiner dan u . De hoeveelheid neutronen die we in het interval van u tot $u+du$ ontvangen die komen uit het interval u' tot $u'+du'$ is gelijk aan de kans dat een botsing ons van de waarde u' naar de waarde u brengt, vermenigvuldigd met het aantal neutronen in het interval u' tot $u'+du'$ die een elastische botsing ondergaan per tijdseenheid. Dat aantal botsende neutronen per tijdseenheid is gelijk aan de werkzame doorsnede voor elastische botsing vermenigvuldigd met de scalaire fluxdichtheid maal du' : $\sum_s(u')\phi(u')du'$; de kans om van u' naar u gebotst te worden is gelijk aan $\frac{e^{-(u-u')}}{1-\alpha} du$ zoals gegeven door de exponentiële verdeling van de lethargiestap $(u-u')$, tenminste zolang $(u-u')$ kleiner is dan epsilon. Inderdaad, geen enkel neutron kan in de buurt van u terecht komen in een enkele botsing als het van verder dan $u - \text{epsilon}$ komt. We illustreren het concept in figuur 52. Om de "toekomstige neutronen door een botsing" in het interval u tot $u+du$ te tellen, moeten we dus de bijdragen over alle intervallen u' tot $u'+du'$ samentellen, voor de waarden u' die gaan van $u - \text{epsilon}$ tot u zelf. Met andere woorden, de "binnenkomende neutronen door botsing" in het interval u tot $u+du$ wordt gegeven door de volgende som: $du \int_{u'=u-\epsilon}^{u'=u} \sum_s(u')\phi(u') \frac{e^{-(u-u')}}{1-\alpha} du'$. Als er nu ook een bron van neutronen is die direct neutronen produceert in het interval u tot $u+du$ met een debiet van $S(u) du$ neutronen per tijdseenheid, dan is de totale hoeveelheid neutronen die binnenkomt,

bovenstaande uitdrukking verhoogd met $S(u) du$. Dat moet, als we een stationaire toestand willen hebben, gelijk zijn aan het aantal neutronen die verdwijnen uit het interval u tot $u+du$. Dat aantal is gewoon gelijk aan het totale aantal interacties (absorptie en botsing) die de neutronen ondergaan per tijdseenheid in dat interval, met andere woorden, het totale aantal neutronen dat verdwijnt is gelijk aan: $\Sigma_t(u) \phi(u) du$. We dienen nu dus de inkomsten gelijk te stellen aan de uitgaven (en we delen beide kanten van de vergelijking door du):

$$S(u) + \int_{u'=u-\epsilon}^{u'=u} \Sigma_s(u') \phi(u') \frac{e^{-(u-u')}}{1-\alpha} du' = \Sigma_t(u) \phi(u)$$

Bovenstaande vergelijking wordt de *vertragingsvergelijking* genoemd. Het is de voorwaarde waaraan het spectrum (als functie van de lethargie) moet voldoen om stationair te blijven in de tijd, wanneer neutronen geproduceerd worden door een bron met spectrum $S(u)$. Men kent slechts oplossingen van deze vergelijking in formulevorm voor een heel beperkt aantal voorbeelden, maar men kan ze wel gemakkelijk numeriek oplossen. Men kent ook verschillende benaderde oplossingen die ons toelaten een gevoel te krijgen voor de vorm van het spectrum. We zullen enkele van deze speciale gevallen hier aanhalen omdat ze belangrijke gevolgen hebben voor verschillende aspecten van het gedrag van een kernreactor. We zullen er in de voorbeelden van uitgaan dat de bron enkel neutronen produceert met een specifieke energie (lethargie). $S(u)$ bestaat dus uit een sterke piek rond die lethargiewaarde u_0 , en is verder nul.

Het eerste geval dat we beschouwen, is dat waarbij er geen absorptie is. In dat geval kan men tonen dat enkele waarden¹²² van epsilon groter dan u_0 de flux de waarde aanneemt gelijk aan:

$$\phi(u) \approx \frac{S_0}{\xi \Sigma_s(u)}$$

Het tweede geval dat we beschouwen, is het geval van waterstof ($A=1$). Het is een van de weinige gevallen waarin een exacte oplossing van de vertragingsvergelijking in formulevorm is gekend. We gaan ervan uit dat de essentiële vertraging door botsing geleverd wordt door waterstof; we verwaarlozen de energieverliezen ten gevolge van elastische botsingen met andere nucliden, wat meestal een heel goede benadering is als er veel waterstof aanwezig is, vanwege de veel hogere “afremkracht” van waterstof in vergelijking met zwaardere nucliden. Daarentegen kunnen we nog steeds de absorptie beschouwen van de andere nucliden. Het spectrum is gegeven door volgende

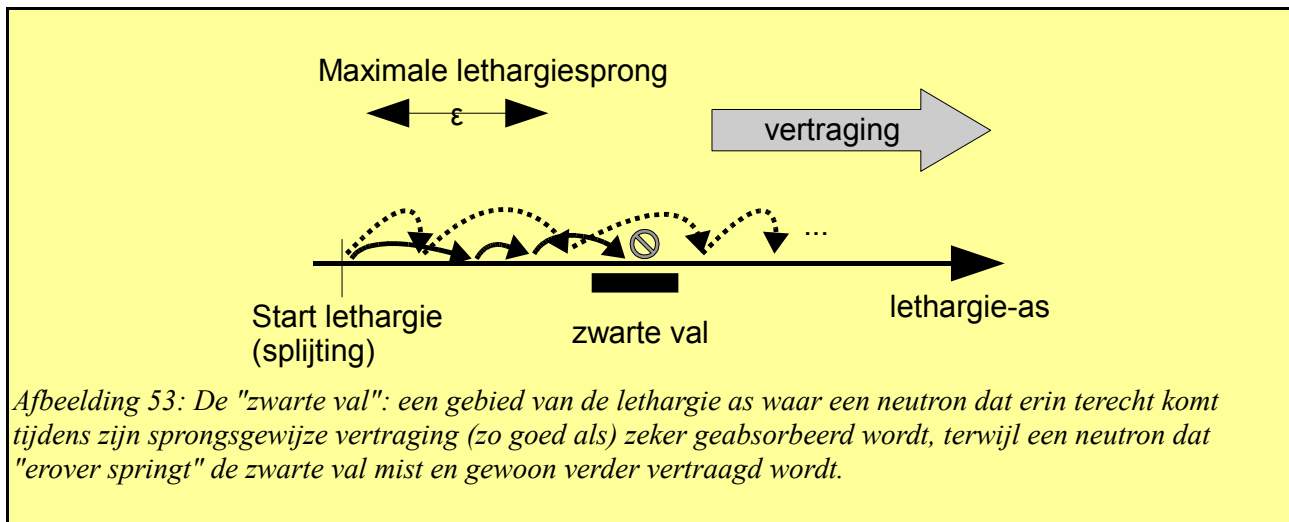
formule, voor $u > u_0$:

$$\phi(u) = \frac{S_0}{\Sigma_t(u)} \left(\frac{\Sigma_s(u_0)}{\Sigma_t(u_0)} \exp \left(- \int_{u'=u_0}^{u'=u} \frac{\Sigma_a(u')}{\Sigma_t(u')} du' \right) \right)$$

Hoewel die formule er ingewikkeld uit ziet, is ze eenvoudig te gebruiken: men dient enkel de absorptie macroscopische werkzame doorsnede en de elastische botsing macroscopische werkzame doorsnede te kennen (de totale macroscopische werkzame doorsnede is de som van beide) als functie van de lethargie (de energie), evenals de sterkte van de bron die neutronen produceert bij lethargie u_0 ; om de scalaire fluxdichtheid bij lethargie u te kennen, dient men dan de som te maken over alle lethargie-intervallen u' tot $u'+du'$ van de verhouding van de absorptie en de totale macroscopische werkzame doorsnede, voor die intervallen waarvan u' ligt tussen u en u_0 . De exponentieel van min deze waarde, vermenigvuldigd met de fractie van de botsingswerkzame doorsnede over de totale bij de bron lethargie, en gedeeld door de totale werkzame doorsnede bij u , geeft ons dan, vermenigvuldigd met de bron intensiteit, de gezochte fluxdichtheid.

¹²²Heel kort bij u_0 zijn er variaties op die flux, die beschreven zijn door een ingewikkelde formule die “de transient van Placzek” wordt genoemd; het heeft niet veel zin om daarover uit te wijden.

Het kan interessant zijn de fysische kant van deze uitdrukking te beschouwen. We gaan elke factor in bovenstaande vergelijking trachten een fysische interpretatie te geven. Dat het spectrum in u evenredig gaat zijn met de sterkte van de bron is nogal vanzelfsprekend. Dat het omgekeerd evenredig gaat zijn met de totale werkzame doorsnede in u is ook goed te begrijpen: de totale werkzame doorsnede geeft aan hoe snel het interval rond u gaat “leeglopen” en dus welke de gemiddelde levenstijd van een neutron in het interval rond u is. Hoe minder lang de neutronen in dat interval blijven, hoe minder er gemiddeld in dat interval aanwezig zijn voor een zelfde influx. De verhouding van de verstrooiingswerkzame doorsnede over de totale werkzame doorsnede bij u_0 geeft aan welke de kans is dat de eerste botsing die een neutron, vrijkomende uit de bron, een botsing en geen absorptie gaat zijn. Met andere woorden, die verhouding corrigeert de bron intensiteit voor al die neutronen die uitgezonden zijn door de bron, en direct geabsorbeerd worden. Het is immers alsof die er gewoon nooit geweest zijn. De laatste factor, de exponentieel van die som, is wat moeilijker te begrijpen. Het geeft de kans aan om op het pad van de lethargie u_0 naar u , steeds een elastische botsing te hebben ondergaan, en aan alle absorpties te zijn ontsnapt. Men dient de exponentieel van de som te zien als een produkt van factoren die elk de kans aangeven om een stap in u te overleven van u_0 tot aan u .



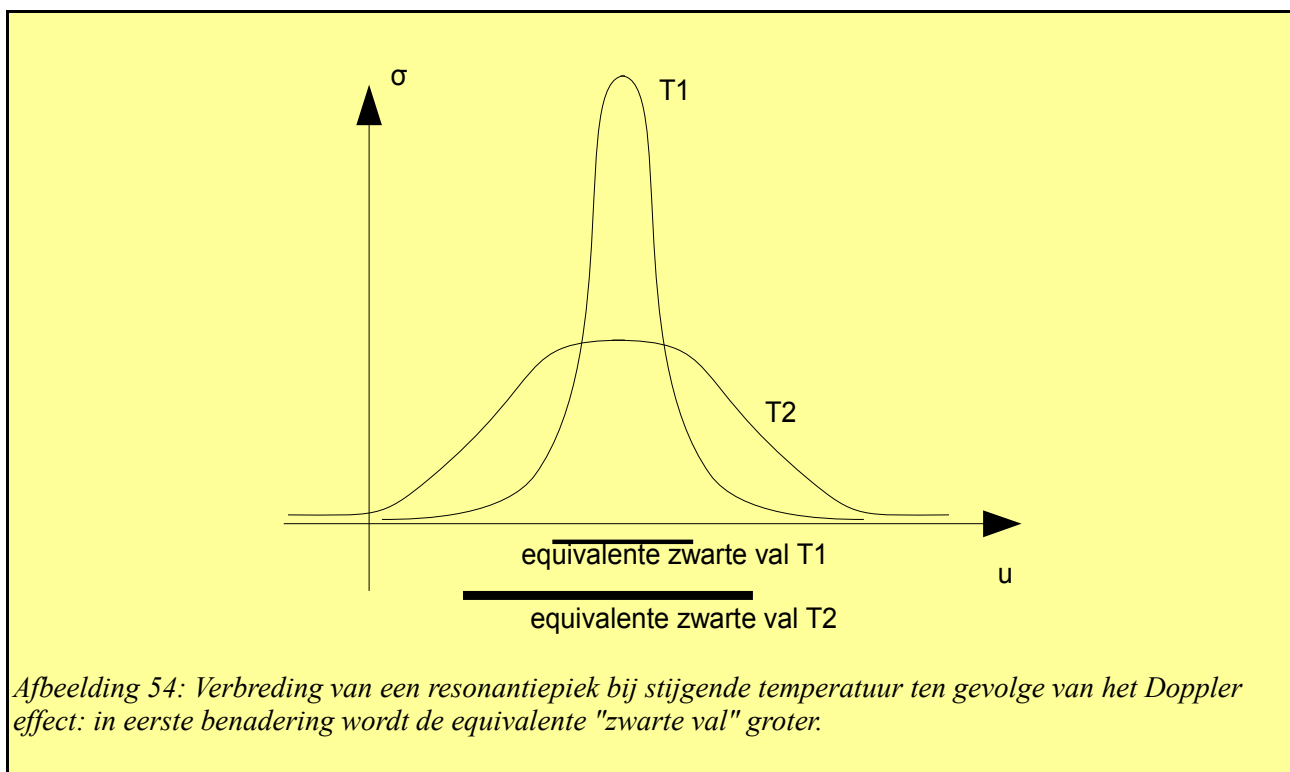
Een derde geval is geen algemene oplossing, maar het gedrag van het spectrum in de buurt van een "zwarte val", aangegeven in figuur 53. Dat wil zeggen, de absorptie werkzame doorsnede wordt in een klein lethargie interval γ , heel groot (zeg maar, oneindig, hoewel dat niet kan natuurlijk). Dit is een modelisatie van de resonantie pieken die we in sommige werkzame doorsneden vinden, bijvoorbeeld de uranium nucliden. Men kan tonen dat het spectrum voor de resonantie natuurlijk geen invloed ondervindt van de resonantie, en dat het spectrum na de resonantie is verkleind met een factor gelijk aan: $1 - \frac{1 - e^{-\gamma - \alpha \gamma}}{\xi(1 - \alpha)}$. γ is de lethargie-breedte van de zwarte val. Die factor is de kans om “de sprong over de val” te overleven.

Voor een eindige resonantie wordt die factor benaderend: $\exp\left(-\int \frac{\Sigma_a(u)}{\xi \Sigma_s(u)} du\right)$ waarbij de som gemaakt moet worden over kleine intervalletjes du die fijner zijn dan de resonantiepiek. We dienen te beseffen dat voor een eindige maar sterke resonantie, deze waarde vrij goed kan benaderd worden door de “zwarte val”. *Als dusdanig heeft de piekwaarde van de resonantie veel minder belang dan haar breedte.* Dit lijkt op dit ogenblik een ietwat technische opmerking waarvan de lezer het belang misschien niet onmiddellijk zal inzien. *Het gedrag van een resonantie heeft niettemin een groot*

belang, omdat een essentieel veiligheidsaspect van een reactor zal afhangen van dit gedrag, het zogenaamde Doppler effect. We gaan even dieper in op dit uiterst belangrijke aspect.

Ten gevolge van de thermische beweging van de atomen (en dus van de doelnucleïden) in de materie, hebben deze doelnucleïden een zekere snelheid ten opzichte van het “laboratorium systeem”, dat is het referentie systeem van de reactor, het gebouw en zo. Nu is de werkzame doorsnede uitgedrukt als functie van de energie in een systeem waar de doelnucleïde in rust is. Met andere woorden, een neutron met een zekere bewegingsenergie (in het laboratorium systeem) zal een lichtjes grotere of kleinere energie hebben in het systeem waar de doelnucleïde in rust is – naargelang de doelnucleïde eerder naar het neutron toe beweegt, dan wel van het neutron weg beweegt door zijn thermische agitatie. Als we toch de energie van het neutron in het laboratorium systeem willen gebruiken, dan moeten we de werkzame doorsneden wat “uitsmeren” met de energie van de thermische agitatie van de doelnucleïden. Normaal gezien heeft zo iets geen enkel effect, behalve voor een heel gepiekte distributie (een resonantie piek). Inderdaad, als we een heel hoge en fijne piek gaan uitsmeren, dan zal die minder hoog, maar wel breder worden. Hoe groter de thermische agitatie, hoe breder en hoe minder hoog de “effectieve” piek wordt. *Maar we hebben net gezien dat een brede, minder hoge piek de kans om de “sprong over de val” te overleven, kleiner maakt dan een scherpe, hoge piek.* Met andere woorden, bij een verhoogde temperatuur worden de “effectieve” resonantie pieken minder hoog maar breder (zoals getoond in figuur 54), en dat leidt tot een kleinere kans dat het neutron de pieken overleeft tijdens de vertraging. Dit betekent dat het Doppler effect voor een negatieve temperatuurscoëfficiënt zorgt die heel belangrijk is, omdat hij bijna “instantaan” werkt. De temperatuur die een rol speelt is namelijk die van de brandstof zelf, die haast ogenblikkelijk opwarmt ten gevolge van een verhoging van het nucleair vermogen.

We bezitten een “reactormengsel” dat bestaat uit “moderator” enerzijds dat een zachtjes verlopende



elastische botsing werkzame doorsnede heeft en een kleine absorptie werkzame doorsnede ; en een splijtstof gemengd met andere zware nucleïden (vooral U-238) anderzijds waarvan we het effect van

de elastische botsingen zo goed als volledig kunnen verwaarlozen, maar waar het absorptie spectrum (fissie maar vooral radiatieve neutronenvangst) een oerwoud van fijne resonantiepieken vertoont. We willen het neutronenspectrum in dit systeem benaderd uitrekenen voor neutronen die bij hoge energie worden geproduceerd.

De basis is gelegd door de uitdrukking die exact was voor het geval van waterstof. We hernemen de essentiële elementen: $\phi(u) \approx \frac{q}{\xi \Sigma_s(u)} \times p(u_0 \rightarrow u)$. Het spectrum bij lethargie u is gegeven door een effectieve bron q gedeeld door de gemiddelde lethargiestap en gedeeld door de totale werkzame doorsnede bij lethargie u , en vermenigvuldigd met de kans dat een neutron de vertraging heeft overleefd van zijn creatie lethargie u_0 tot aan u . Er zijn twee verschillende aspecten aan dat spectrum als functie van de lethargie. Enerzijds is er het feit dat het spectrum omgekeerd evenredig is met de totale werkzame doorsnede en anderzijds is er de afhankelijkheid van de kans om tot aan u te overleven. Die kans gaat traagjes afnemen als functie van u : hoe verder een neutron evolueert, hoe kleiner zijn kans is om te overleven, want iedere keer bestaat er een kleine kans om geabsorbeerd te worden. Anderzijds is er een heel snelle variatie van de totale werkzame doorsnede: buiten de resonantiepieken volgt die essentieel de botsing werkzame doorsnede van de moderator, en in de pieken volgt die essentieel de absorptiepiek van de zware nucliden.

We hebben gezien dat de kans op overleven bij elke resonantiepiek een klein beetje afneemt. De grootheid p ondergaat dus een klein “trapje” naar beneden toe bij elke resonantiepiek. Dat is wat berekend was als zijnde $\exp\left(-\int \frac{\Sigma_a(u)}{\xi \Sigma_s(u)} du\right)$ waar de som over de resonantiepiek in kwestie genomen wordt: het is de factor (bijna gelijk aan 1, een beetje kleiner) waarmee we de kans op overleven “voor” moeten vermenigvuldigen om de kans op overleven “na” te bekomen. Alles bij elkaar wil dat zeggen dat we een zekere waarde van het spectrum hebben voor de resonantie, een serieuze vermindering op de resonantiepiek, en nadien een waarde die een klein beetje lager kan liggen dan ervoor, na de resonantiepiek. Het feit dat het spectrum ter hoogte van de resonantiepiek sterk onderdrukt wordt, om erna weer toe te nemen, noemt men soms de eigenschap van *zelfbescherming*. Inderdaad, het is ergens alsof de neutronen in het spectrum net die plekken vermijden waar er sterke absorptie is. De gelijkmatige evolutie buiten de resonantiepieken noemt men soms het “macroscopische” spectrum, en de lokale “gaten” ter hoogte van de resonantiepieken noemt men de “fijnstructuur” van het spectrum.

Natuurlijk zijn we een punt vergeten in al het bovenstaande. We zijn ervan uitgegaan dat de lethargie onbegrensd toeneemt, en dat er bij elke botsing energie verloren gaat voor het neutron. Dat is enkel maar waar natuurlijk als het materiaal absoluut koud is. Bij kamertemperatuur hebben de doelnucleïden een thermische energie, en als het neutron die energie bereikt, gaat het soms energie winnen, en soms energie verliezen in een botsing en dus gemiddeld dezelfde energie behouden: we hebben thermische neutronen. Dat speelt geen rol in reactoren met snelle neutronen, omdat er zo goed als geen neutronen overleven tot in het thermische gebied. Daarentegen, het is een belangrijk aspect van een thermische reactor. In eerste benadering kunnen we stellen dat alle neutronen die voorbij de “thermische lethargie” komen, deel uit gaan maken van de populatie “thermische neutronen” en verder niet meer vertragen, maar een leven zullen leiden als thermisch neutron, als thermisch neutron zullen diffunderen en geabsorbeerd worden (en hierbij soms fissies veroorzaken).

De totale kans om vanaf de lethargie van creatie tot aan de thermische lethargie te komen (de opgehoopte kleine kans sprongetjes voor elke individuele resonantie) is niets anders dan Fermi's p factor.

We zijn nu helemaal rond in principe! We hebben een volledige, zij het eenvoudige en benaderende, theorie van het neutrontransport. Zij is gebaseerd op een factorisatie van de

afhankelijkheid van de neutronenflux in een deel ruimte, een deel tijd, en een deel spectrum. Dat is natuurlijk een benadering. We hebben ook de diffusie benadering gemaakt. Maar niettemin hebben we een manier om benaderde numerieke waarden te bekomen, op relatief eenvoudige wijze, voor de ruimtelijke afhankelijkheid, de tijdsafhankelijkheid, en het energiespectrum van de neutronenflux. Dat was ongeveer waarover de eerste pioniers die reactoren gingen bouwen, beschikten. Men heeft natuurlijk teveel benaderingen en hypothesen gemaakt om te hopen dat de numerieke waarden heel precies gaan zijn, maar we hebben wel een ruw idee van hoe een reactor gaat werken.

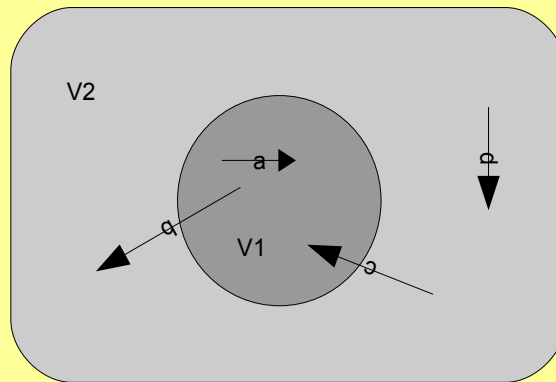
Even beseffen wat dit betekent: in het begin van dit hoofdstuk wisten we nog niet goed hoe we een gecombineerd radioactief verval moesten uitrekenen, en nu zijn we op hetzelfde niveau (zelfs een beetje verder) gekomen als Fermi, toen hij zijn eerste kernreactor bouwde! We kunnen nog beter doen. De twee aspecten die we hier zullen aanhalen, zijn enerzijds het feit dat een echte reactor *niet homogeen* is: we hebben meestal een reguliere afwisseling van “brandstofelementen” en “moderator/koelmiddel” in de ruimte. Anderzijds is er, zoals we aangehaald hebben, het probleem van *de thermische beweging van de nucliden*, die maken dat de neutronen niet onbegrensd vertragen, maar eerder op een “thermisch” energieniveau terechtkomen.

4.4.d Heterogene reactor structuur.

Een echte reactor is meestal samengesteld uit een samenstelling van “brandstof elementen” enerzijds, en “moderator/koelmiddel” anderzijds. We weten dat de werkzame doorsneden van beide een verschillend gedrag hebben: de moderator heeft essentieel een botsingswerkzame doorsnede, en ook een zwakke, en geleidelijk verlopende absorptie werkzame doorsnede, terwijl de brandstofelementen vooral een gepiekte absorptie werkzame doorsnede hebben en vaak de botsingswerkzame doorsnede kan verwaarloosd worden – zelfs in de mate dat er botsingen zijn, zijn deze, door het hoge massagetal van de brandstof, heel inefficiënt om de lethargie te laten toenemen.

Om rekening te houden met de heterogene structuur van de reactor, voert men *twee spectra*, twee fluxdichtheden in: een voor de brandstofelementen, en een andere voor de moderator. We beschouwen de reactor nu als een opeenvolging van “identieke elementaire cellen” en elke elementaire cel bevat bijvoorbeeld een brandstofstaaf en de omringende moderator. Het spreekt trouwens vanzelf dat, indien men 3 of meer verschillende soorten elementen heeft (bijvoorbeeld: grafiet, water, uranium in de RBMK reactor), dat men dan 3 of meer fluxen kan invoeren. Men maakt nu wel de hypothese dat binnen in een element (bijvoorbeeld binnenin een brandstofelement, of binnenin een moderator in de cel) de fluxdichtheid in de ruimte en het spectrum constant is. Dat is natuurlijk slechts een benadering, maar afhankelijk van het geval, kan die vrij accuraat zijn. Laten we het geval beschouwen van 1 moderator (m) en 1 brandstof cel (b), zoals aangegeven in figuur 55. Als we dat kunnen aannemen, dan kan men, per energie (lethargie) waarde, 4 verschillende kansen uitrekenen:

- De kans P_{mm} , de kans dat een neutron, afkomstig van de moderator bij de gegeven energie, zijn eerstvolgende botsing terug in de moderator zal doorvoeren
- De kans P_{mb} , de kans dat een neutron, afkomstig van de moderator bij een gegeven energie, zijn eerstvolgende botsing in het brandstofelement zal ondergaan
- De kans P_{bb} , de kans dat een neutron, afkomstig van het brandstofelement bij een gegeven energie, zijn eerstvolgende botsing terug in datzelfde brandstofelement zal ondergaan
- De kans P_{bm} , de kans dat een neutron, afkomstig van het brandstofelement, bij een gegeven energie, zijn eerstvolgende botsing in de moderator zal ondergaan.



Afbeelding 55: Heterogeen reactorelement met twee verschillende volumes en de 4 mogelijke verplaatsingen van een neutron: a) startend in V1 en toekomend in V1, b) startend in V1 en toekomend in V2, c) startend in V2 en toekomend in V1, d) startend in V2 en toekomend in V2. V1 staat bijvoorbeeld voor "brandstof" en V2 voor "moderator".

Men kan zich op het eerste gezicht afvragen hoe men die kansen toch wel zou kunnen uitrekenen. Maar toen we de wet van Boltzmann hebben afgeleid, hebben we dat gezien! Als een neutron in een zeker punt A ontstaat, dan kennen we de kans dat het zonder botsing in punt B aankomt en daar interageert per eenheid van volume langs de rechte lijn met lengte R die van A naar B loopt:

$$\sum_2 \frac{\exp(-\int_R \Sigma(E, s) ds)}{4\pi R^2}.$$

Als we van milieu 1 (m of b) naar milieu 2 (ook m of b) gaan, dan willen we de kans uitrekenen voor een neutron dat in punt A (in milieu 1) vertrekt, en gelijk waar in een punt B van milieu 2 uitkomt. Met andere woorden, we moeten de som maken over alle mogelijke punten (volume blokjes dV_2) B. Het neutron kan (uniform verdeeld) gelijk waar in milieu 1 (punt A) vertrekken, dus we moeten het gemiddelde berekenen voor alle volumeblokjes A (dV_1). Dat doen we door de som te maken over alle volumeblokjes A, en te delen door het totale volume van milieu A (de som van alle volumeblokjes A): $P_{1,2}(u) = \frac{\Sigma_2}{V_1} \int dV_2 \int dV_1 \frac{\exp(-\int_R \Sigma_t(u, s) ds)}{4\pi R^2}$. Het spreekt vanzelf dat de 4 kansen aldus uitgedrukt, een functie zijn van de energie, of lethargie, waarbij ze werden berekend, omdat de werkzame doorsnede functie is van die lethargie. Als dusdanig kunnen deze kansen ook sterke pieken en dalen vertonen als we in de buurt van een resonantie komen.

De vertragsingsvergelijking, die de balans weergaf van de neutronen die toekwamen in een zeker lethargie interval en de neutronen die eruit weg gingen, zal nu bestaan uit twee balansen: een voor het moderator milieu en een voor het brandstofelement milieu. Het is nuttig de eerder afgeleide vertragsingsvergelijking even te hernemen: $S(u) + \int_{u' = u - \epsilon}^{u' = u} \Sigma_s(u') \phi(u') \frac{e^{-(u-u')}}{1-\alpha} du' = \Sigma_t(u) \phi(u)$. Het linker lid zijn de "inkomsten" en het rechter lid zijn de "uitgaven". We hadden twee bijdragen in het linker lid: een eventuele bron bij lethargie u , en de neutronen die afkomstig waren van lagere lethargie, en die door een elastische botsing aan die lagere lethargie in ons beschouwde lethargie interval zijn terecht gekomen. We zullen nu zo een balans schrijven voor de twee verschillende milieus: moderator en brandstofelement. We zullen wel veronderstellen dat er geen directe bron aanwezig is (de enige bron is bij veel hogere energie). Dat is niet moeilijk om toe te voegen, maar geeft wat meer schrijfwerk. De "inkomsten" bestaan nu uit twee bijdragen, die beide neutronen beschrijven die van een lager lethargie interval via een elastische botsing tot in ons bestudeerd

interval botsen. Maar de eerste term heeft het over neutronen die uit het zelfde milieu komen, en de tweede term heeft het over neutronen die van het andere milieu in het huidige milieu zijn gekomen.

Voor het brandstofelement milieu kunnen we de volgende balans schrijven:

$$V_b P_{b,b} \int_{u'=u-\epsilon_b}^{u'=u} \Sigma_{s,b}(u') \phi_b(u') \frac{e^{-(u-u')}}{1-\alpha_b} du' + V_m P_{m,b} \int_{u'=u-\epsilon_m}^{u'=u} \Sigma_{s,m}(u') \phi_m(u') \frac{e^{-(u-u')}}{1-\alpha_m} du' = V_b \Sigma_{t,b}(u) \phi_b(u)$$

Dat ziet er heel ingewikkeld uit, maar dat is het eigenlijk niet. De eerste term aan de linkerkant geeft de “inkomsten” aan van neutronen die terecht komen in het brandstofelement, en die afkomstig zijn van het brandstofelement. De tweede term aan de linkerkant geeft de “inkomsten” aan van de neutronen die terecht gekomen zijn in het brandstofelement, maar die afkomstig waren van de moderator. We herkennen duidelijk dezelfde vorm, in elk van deze termen, als het linkerlid van de gewone vertragsingsvergelijking. Alleen hebben we de bijdragen vermenigvuldigd met de kans voor een individueel neutron om te doen wat het doet (in hetzelfde milieu blijven, of veranderen) en met het volume van het betreffende startmilieu (gezien de reactiesnelheid gegeven is per eenheid van volume).

Een gelijkaardige vergelijking kan uiteraard geschreven worden voor het moderator milieu:

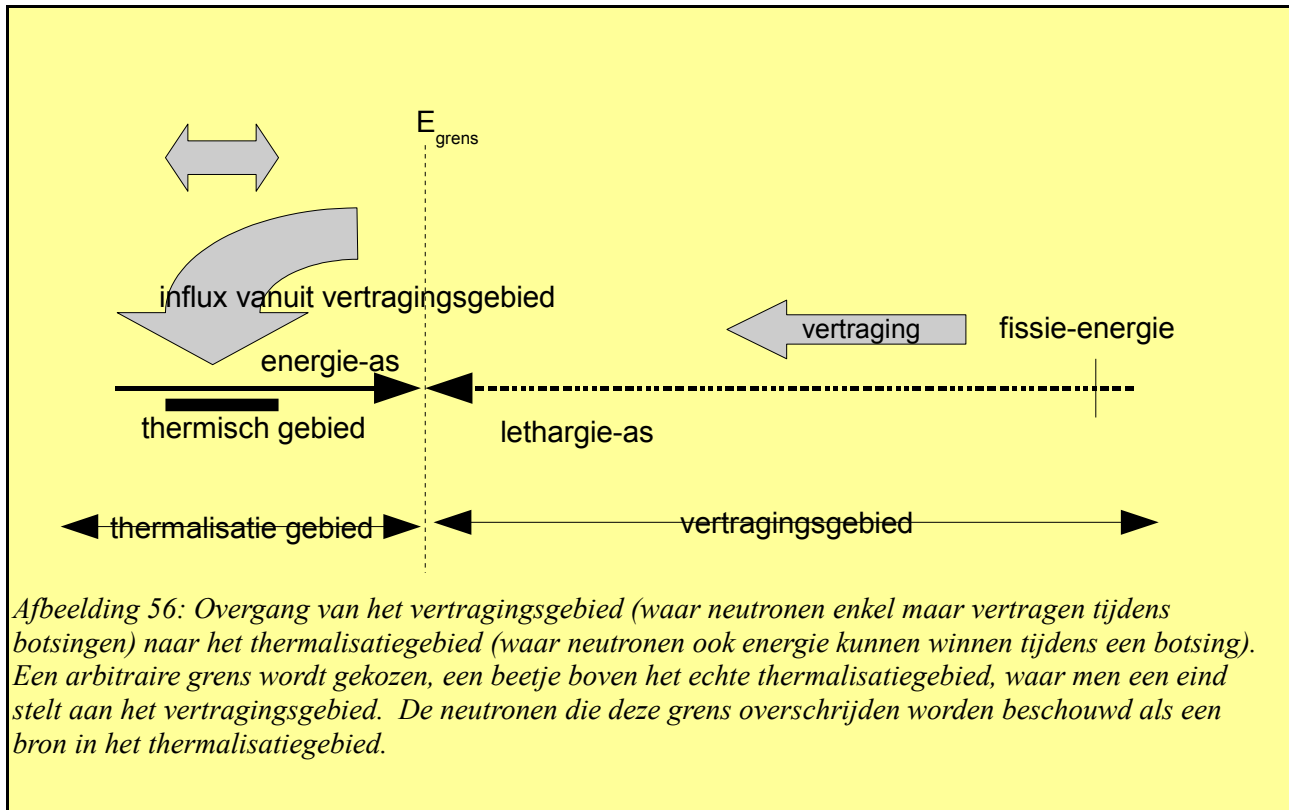
$$V_b P_{b,m} \int_{u'=u-\epsilon_b}^{u'=u} \Sigma_{s,b}(u') \phi_b(u') \frac{e^{-(u-u')}}{1-\alpha_b} du' + V_m P_{m,m} \int_{u'=u-\epsilon_m}^{u'=u} \Sigma_{s,m}(u') \phi_m(u') \frac{e^{-(u-u')}}{1-\alpha_m} du' = V_m \Sigma_{t,m}(u) \phi_m(u)$$

De oplossing van deze vergelijkingen is niet veel moeilijker dan de oplossing van de vergelijking voor een homogeen milieu. Het is zelfs mogelijk om het heterogene probleem met twee spectra om te vormen tot een (bijna) equivalent probleem van een homogeen milieu, maar deze technieken leiden ons te ver buiten het ons gestelde kader.

4.4.e Thermalisatie

We hebben bij het opstellen van de vertragsingsvergelijking twee hypothesen gemaakt: de elastische botsing gebeurt zoals bij biljart ballen, en de doelnucleide “staat stil”. Hieruit kan men, door elementaire mechanica beschouwingen, het energieverlies per botsing berekenen, waarop de vertragsingsvergelijking was gebaseerd. Men vond dat een neutron energie *verliest* bij elke botsing. Bijgevolg komen neutronen in een zeker lethargie interval enkel van *lagere* lethargiewaarden (en van een eventuele directe bron) binnen. Die hypothesen zijn volledig correct zolang het invallend neutron een energie heeft van ongeveer een electronvolt of meer. Maar wat fout gaat bij lagere energieën is dat de doelnucleiden niet stil staan, maar een thermische beweging bezitten, die enerzijds afhangt van de temperatuur van het materiaal waar ze deel van uit maken, en anderzijds van de chemische structuur (molecule, kristal...) en de bindingen die daarmee gepaard gaan. Dat compliceert de zaak. Als we de thermische beweging kennen, dan kunnen we beschouwen dat we te maken hebben met de botsing van biljart ballen, maar deze keer staat de “doelbal” niet stil, maar beweegt ook. Het resultaat is dat de invallende bal soms energie kan winnen en soms energie kan verliezen. Daarentegen is het vrij moeilijk om voor de meeste stoffen een goede beschrijving van de thermische beweging van de atomen te kennen. Men noemt dat de “vibratiespectra” van de stof in kwestie. Wat nog moeilijker is, is het feit dat bij die lage energieën, de wetten van de klassieke mechanica niet meer 100% geldig zijn, en afwijkingen kennen ten gevolge van wat men “kwantum effecten” noemt. Al dat is niet onoverkomelijk, maar men heeft enerzijds wel veel meer experimentele gegevens nodig (zoals het vibratiespectrum) en men dient wel een uitgebreide modellisatie door te voeren als men hiermee rekening wil houden.

Er bestaat een situatie waar al die moeilijkheden niet optreden: een mono-atomisch gas. De thermische beweging van een monoatomisch gas bij temperatuur T is gegeven door een bekende formule, de zogenaamde Maxwell verdeling. De kans dat een nuclide (een atoom) een bewegingsenergie heeft tussen E en $E+dE$ is gelijk aan: $P(E) dE = 2 \sqrt{\frac{E}{\pi k T}} \frac{\exp(-\frac{E}{k T})}{k T} dE$. Neutronen die volledig in thermisch evenwicht gekomen zijn met de materie hebben trouwens exact dezelfde spectrale verdeling – als een dichtheid van neutronen, en niet als een flux: de factor tussen de twee is de snelheid, die natuurlijk energie afhankelijk is.



Men kan voor een mono-atomisch gas de botsing nog steeds als een elastische botsing tussen twee biljartballen beschouwen. Voor vaste stoffen of stoffen die uit moleculen bestaan kan men dat eventueel als een al dan niet goede benadering gebruiken.

Wat uiteindelijk telt is de kans om van energie E' naar energie E te gaan als er een elastische botsing optreedt. We zullen deze kans $P(E' \rightarrow E)$ noteren. We kunnen opnieuw het (thermische) energiegebied opsplitsen in verschillende energievakjes (hier heeft het geen zin om in lethargie te werken), en de boekhoudkunde (schematisch voorgesteld in figuur 56) neemt dan de volgende vorm aan:

$\int_{E'=0}^{E'=E_{\text{grens}}} \sum_s (E') P(E' \rightarrow E) dE' + S_{\text{vertraging}}(E) = \sum_i (E) \Phi(E)$. Deze thermalisatievergelijking lijkt heel goed op de vertragingvergelijking, namelijk wat binnenkomt (linker lid) in een energievakje dE is gelijk aan wat er uit gaat (rechter lid) met een aantal verschillen:

- ze is direct in “energie” geschreven en niet in “lethargie”.
- we hebben arbitrair een grens gekozen tussen het “zuivere” vertraginggebied (dat we eerder hebben behandeld) en het thermische gebied. Die grens wordt meestal rond enkele eV

gekozen. We moeten nu alle mogelijke bijdragen beschouwen van een botsing die zowel een neutron van lagere als van hogere energie E' naar E kan brengen.

- We hebben symbolisch de kans neergeschreven om een neutron van E' naar E te brengen, maar hierin zit natuurlijk de hele kunst. Deze kans houdt enerzijds rekening met de thermische beweging van de doelkernen, en anderzijds eventueel met de kwantum correcties van de botsing. In het vertragsingsgebied, waar de doelkern als stilstaand kon beschouwd worden, en de botsing als die tussen twee biljartballen, nam deze de vorm aan van een uniforme verdeling¹²³ tussen E' en α maal E' en nul daarbuiten, wat de integraal beperkte voor E' gaande van E tot E/α . Maar hier neemt die een ingewikkelder vorm aan.
- Er is een “bron” aanwezig, die overeenkomt met wat er uit het vertragsingsgebied, volgens de daar heersende vertragsingsvergelijking, tot onder de grenswaarde van de energie wordt vertraagd. Telkens een laatste botsing in het vertragsingsgebied een neutron een grotere lethargie geeft dan de “grens lethargie”, wordt dat een “bron neutron” in de thermalisatievergelijking.
- De werkzame doorsnede moet genomen worden in het “rustsysteem van de doelkern” en is bijgevolg ook “uitgesmeerd” over de thermische beweging van die doelkernen als we energieën gebruiken in het laboratorium systeem.

Om het energiespectrum in het thermalisatiegebied te vinden, gebruikt men oftewel een computerprogramma waar een redelijk gedetailleerde beschrijving van de stoffen in kwestie bezit om de thermalisatievergelijking op te lossen, of men gebruikt een semi-empirische benadering, waar men gaat veronderstellen dat de neutronen min of meer volgens een Maxwell verdeling zijn verdeeld. Meestal gaat men in dat geval een effectieve “neutronentemperatuur” invoeren die wat hoger ligt dan de echte materiaalt temperatuur, eventueel zelfs aangevuld met een vloeiende interpolatie tussen die Maxwell verdeling en de staart van de vertragsingsverdeling. Met andere woorden, ofwel wil men heel precies weten hoe de verdeling eruit ziet in het thermische gebied, en dan is dat een wat ingewikkelde zaak, ofwel beperkt men zich tot een Maxwell-vormige verdeling met een staart en een hogere temperatuur. Afhankelijk van de toepassing is dat laatste goed genoeg of niet. We gaan dieper in op deze benadering.

Er is een rekenkundig voordeel bij het gebruiken van een Maxwell verdeling voor de neutronenergie. Ze heeft namelijk de volgende eigenschap: als een werkzame doorsnede in $1/v$ gaat, zoals dat het geval is voor de meeste absorptie werkzame doorsneden bij lage energieën, *dan is de gemiddelde werkzame doorsnede onder een Maxwell spectrum met temperatuur T precies gelijk aan de waarde van de werkzame doorsnede bij de energie die gelijk is aan $k T$* . Voor kamertemperatuur (20 graden Celsius) is $k T$ gelijk aan 0.0253 eV. In een reactor aan ongeveer 300 graden Celsius is dat eerder gelijk aan 0.05 eV.

Als we de benadering maken dat de neutronen in het thermische gebied een dichtheid hebben die de Maxwell verdeling volgt bij een temperatuur T_n (de “effectieve neutronentemperatuur” die dus wat hoger kan zijn dan de materiaalt temperatuur), dan moeten we natuurlijk nog uitvinden *hoeveel* neutronen er zich in dat thermische gebied bevinden in verhouding met de “influx” vanuit het vertragsingsgebied. Met andere woorden, we kennen (of hebben als benadering gesteld dat we dat kennen) de vorm van de verdeling, namelijk een Maxwell verdeling, maar we moeten nog de amplitude vinden. We kunnen dat eenvoudig vaststellen. Laten we veronderstellen dat onze fluxdichtheid $\Phi(E) = n(E)v(E)$ een Maxwellverdeling volgt met equivalente temperatuur T_n . Dat

¹²³Natuurlijk hebben we ze zo niet neergeschreven, omdat we niet in energie maar in lethargie werkten...

bepaalt de *vorm* van de fluxdichtheid. De *grootte* van de verdeling (het aantal neutronen) is dan bepaald door $N = \int \Phi(E) dE$, de totale flux. Als we N kennen, dan is de fluxdichtheid volledig bepaald.

In de staart van het vertragsingsgebied kunnen we de fluxdichtheid (uitgedrukt in lethargie) schrijven als: $\Phi_{\text{vertraging}}(u) = \frac{q}{\xi \Sigma_s(u)}$, waarbij q reeds rekening houdt met alle absorptie die plaats gevonden heeft bij lagere lethargieën (hogere energieën). Als we dat vergelijken met de oplossing van de vertragsingsvergelijking in het geval er geen absorptie was, namelijk $\phi(u) = \frac{S_0}{\xi \Sigma_s(u)}$, dan zien we dat q hier de rol kan spelen van de “bron” die net boven het energieniveau zit dat we beschouwen. Anders gesteld, q is wat er overblijft van de echte bron nadat we rekening gehouden hebben met alle vormen van absorptie vanaf de productie tot aan het binnendringen van het thermische gebied. En nu komt het cruciale punt: *die bron q is gelijk aan het aantal neutronen per seconde die in het thermische gebied moeten worden geabsorbeerd.* Inderdaad, dat is de enige “uitweg” van het thermische gebied: absorptie. De influx in het thermische gebied is gelijk aan q neutronen per seconde ; bijgevolg moet de “uitflux”, de absorptie, daar ook gelijk aan zijn in een stationaire toestand. De waarde van q kennen we uit de flux afkomstig uit het vertragsingsgebied. Het aantal geabsorbeerde neutronen in het thermische gebied is gegeven door: $\int \Sigma_a(E) \Phi(E) dE = N \Sigma_a(T_n)$ waar we gebruik gemaakt van de eigenschap van een Maxwell verdeling en werkzame doorsneden die in $1/v$ gaan (wat we veronderstellen voor de absorptie werkzame doorsnede). Dat aantal geabsorbeerde neutronen is ook gelijk aan q . We hebben uiteindelijk: $N = \frac{q}{\Sigma_a(T_n)}$, waar q afgeleid wordt uit de flux aan het einde van het vertragsingsgebied, en de absorptie werkzame doorsnede genomen dient te worden bij de effectieve neutronentemperatuur. We herhalen dat al dit het geval is wanneer we de benadering maken van een Maxwell verdeling in het thermische gebied, wat al dan niet een aanvaardbare benadering kan zijn. In het geval men een grotere precisie wil, dient men numeriek de thermalisatievergelijking op te lossen, met een goed model voor de energieverandering bij botsing. Die modellen bestaan, onder de vorm van computer programma's, maar we gaan hier niet verder op in.

4.4.f De 4 factoren van Fermi, epiloog.

We komen nu terug, a posteriori, op de 4 factoren van Fermi. De factor p hebben we reeds besproken tijdens de vertraging: het is de totale kans om het hele absorptiegebied te overleven. De factor f geeft de fractie aan van de thermische neutronen die geabsorbeerd worden in de brandstof, en niet in de moderator (en eventuele constructiematerialen, die ook “moderator” zijn). Die factor is gemakkelijk uitgedrukt: $f = \frac{V_b \Sigma_{a,b} \Phi_b}{V_b \Sigma_{a,b} \Phi_b + V_m \Sigma_{a,m} \Phi_m}$ waar we enerzijds gebruik gemaakt hebben van een “gemiddelde” werkzame doorsnede en een “gemiddelde” flux in het thermische gebied (die gelijk zijn aan de waarden bij de effectieve neutronentemperatuur als we een Maxwell verdeling kunnen gebruiken) en waar we verondersteld hebben dat we met een heterogeen model werken en dus twee verschillende fluxen hebben berekend, een voor de brandstofelementen en een voor de moderator. We kunnen die uitdrukking anders schrijven: $\frac{1}{f} - 1 = \frac{V_m}{V_b} \times \frac{\Sigma_{a,m}}{\Sigma_{a,b}} \times \frac{\Phi_m}{\Phi_b}$. De eerste verhouding in het product, de verhouding van de volumes moderator over brandstofelementen, heet de *moderatieverhouding*. Het is een essentiële parameter in het ontwerp van een reactorhart. De tweede factor geeft de verhouding van de absorptie werkzame doorsneden aan, en de derde factor heet de *nadeelfactor*. De reden is dat de flux meestal groter is in de moderator dan in de brandstof (zelf beschermingsfenomeen in de ruimte). Het is een klein effect dat slechts enkele procenten bedraagt. Duidelijk is de grootste invloed op f , de keuze van de moderatieverhouding.

De reproductiefactor in het thermische gebied, η , kan geschreven worden als: $\eta = \frac{\nu \Sigma_{f,b}}{\Sigma_{a,b}}$ en is louter een functie van de samenstelling van de brandstof, waar de werkzame doorsneden genomen worden bij de effectieve neutrontemperatuur, maar dat laatste heeft zo goed als geen invloed. In het geval van verrijkt uranium is het een functie van de verrijkingsgraad: bij natuurlijk uranium is η gelijk aan 1.345¹²⁴, bij een verrijkingsgraad van 3.25% is η gelijk aan 1.864 en voor 100% verrijkt uranium (dus zuiver U-235) is het 2.085. *Men stelt vast dat een verrijkingsgraad van enkele procenten η al heel dicht bij zijn maximum waarde brengt en dat men nadien nog heel veel moet verrijken, om een heel klein beetje in η te winnen.* Als dusdanig heeft het economisch niet veel zin om met hele hoge verrijkingsgraden te werken: dat kost veel moeite en levert weinig op.

Als men het spectrum kent, kan men ook epsilon, de “snelle fissie factor” gaan uitrekenen, door de hoeveelheid fissiereacties gaan uit te rekenen die zich voordoen buiten het thermische gebied.

Tenslotte komen we terug op de factor p , de overlevingskans vanaf het snelle gebied tot in het thermische gebied. We hebben gezien dat die factor gegeven wordt (in de homogene benadering, dat volstaat hier voor de discussie) door: $\exp\left(-\int \frac{\Sigma_a(u)}{\xi \Sigma_t(u)} du\right)$. Maar natuurlijk is de verhouding van de macroscopische werkzame doorsneden een functie van de moderatieverhouding die we gekozen hebben! Inderdaad, hoe groter die moderatieverhouding (dus hoe meer moderator in verhouding tot de brandstofelementen), hoe kleiner de macroscopische absorptie werkzame doorsnede in de resonantiepieken gaat zijn want de gemiddelde ruimtelijke dichtheid van absorberende nucliden, namelijk de brandstof nucliden, neemt af. *Als dusdanig gaat de overlevingskans p stijgen als functie van de moderatieverhouding.*

De twee factoren van Fermi die dus sterk afhangen van de moderatieverhouding zijn f en p . De anderen zijn daar vrij ongevoelig aan. De factor p stijgt met de moderatieverhouding, en de factor f daalt met de moderatieverhouding. Wat ons interesseert, is het product f maal p . Hoe gedraagt zich dat? Als we zuivere brandstof hebben (moderatieverhouding 0), dan is er zo goed als geen vertraging, en ongeveer alle neutronen worden geabsorbeerd alvorens ze thermisch worden. De factor p is dus ongeveer gelijk aan 0, en dus ook het product $p.f$. Als we zuivere moderator hebben, dan is p vrij groot (bijna 1, er is natuurlijk een beetje absorptie in de moderator ook), maar deze keer is f natuurlijk 0 want er is geen brandstof. Dus bij heel grote moderatieverhouding is $p.f$ ook ongeveer gelijk aan 0. Als dusdanig moet het product $p.f$ als functie van een toenemende moderatieverhouding eerst 0 zijn, dan stijgen en dan weer dalen om terug 0 te worden. *Dat wil zeggen dat er een maximum voor $p.f$ bestaat bij een zekere moderatieverhouding.* Men noemt die verhouding *het moderatie optimum*. Men zou nu naïef kunnen gaan denken dat dat de goede keuze is voor het ontwerp van een reactor. Maar er is een veiligheidsprobleem als men dat doet. Als de moderator om een of andere wijze “verloren gaat”, dan komt dat neer op een effectieve verkleining van de moderatieverhouding. Wat men wil bekomen in dat geval, is dat het nucleaire vermogen vermindert en zelfs stopt. Met andere woorden, *om veilig te zijn dienen we het ontwerp zo te maken, dat $p.f$ afneemt bij verminderende moderatieverhouding.* Men dient dus het ontwerp punt van de moderatieverhouding wat onder het moderatie optimum te kiezen. In dat geval zal, bij een gedeeltelijk verlies aan moderator/koelmiddel, de factor $p.f$ afnemen, en zal uiteindelijk het reactorhart zijn criticiteit verliezen. Als men op het moderatie optimum gaat werken, dan zal een kleine verandering van de moderatieverhouding in eerste instantie niets veranderen aan de waarde

¹²⁴We hebben dat misschien zonder het te beseffen, reeds uitgerekend in hoofdstuk 2! Voor natuurlijk uranium hadden we een gemiddelde hoeveelheid neutronen per fissie gelijk aan 2.4; we hadden een gemiddelde splijtingswerkzame doorsnede van 4.1 barn en een gemiddelde (n,gamma) werkzame doorsnede van 3.4. Als dusdanig is η geschat gelijk aan $2.4 \times 4.1 / (3.4 + 4.1) = 1.31$.

van p.f, en de beschermende actie zal pas veel later optreden. Maar erger, als men boven het moderatie optimum gaat werken, dan gaat bij verlies aan koelmiddel/moderator, factor p.f toenemen en de reactor dus naar hoger nucleair vermogen gaan. Dat is een heel gevaarlijk ontwerp (en was de basis fout in het RBMK ontwerp – de fameuze Chernobyl reactor). Bij een drukwater reactor ligt het moderatie optimum in de buurt van een moderatieverhouding van ongeveer 4, en men werkt in de praktijk rond een verhouding 2, wat dus een heel ruime veiligheidsmarge oplevert. In de praktijk is die veiligheidsmarge wat kleiner, omdat men wat boor toevoegt aan het water, maar men behoudt niettemin een redelijke veiligheidsmarge en blijft sterk “links” van het optimum, op de stijgende flank van het product p.f. De reden om wat boor toe te voegen is de volgende. In het begin van een reactor cyclus, met verse brandstof, is de verhouding eta wat hoger dan aan het einde, wanneer een deel van de splijtstoffen zijn opgebruikt (en dus de effectieve verrijkingsgraad is afgenomen). Als men wat boor toevoegt in het begin, dan zal dat f kleiner maken (want er is meer absorptie in de moderator). Naarmate de reactor werkt, zal een deel van dat boor opgebruikt worden (door, juist, neutronenabsorptie!) en de boorconcentratie in de moderator zal dus, over de tijd, langzaam dalen. Terwijl f gaat stijgen, gaat eta dalen, en als men dat heel goed doet, compenseren de twee effecten elkaar, wat maakt dat de reactor gedurende de hele cyclus op ongeveer zijn zelfde werkingspunt gaat functioneren.

4.4.g Verband tussen neutronentransport en passieve veiligheid

Een zorgvuldig ontwerp en studie van een reactor met passieve veiligheid houdt in dat er natuurkundige principes zijn die maken dat wanneer het begint fout te gaan, de effecten van deze principes het systeem in de goede richting sturen voor er ergere dingen gebeuren, zonder dat een operator of een actief systeem daar iets moet voor doen. Het zal blijken dat vele passieve veiligheidsmechanismen in een reactor sterk afhangen van het neutrontransport probleem in de reactor. Dat is een van de redenen waarom we daar trouwens zo uitgebreid en technisch zijn op in gegaan: men dient een zeker begrip van het neutrontransport te hebben om de werkingsprincipes van deze mechanismen te kunnen begrijpen en als dusdanig hun veiligheid kunnen te appreciëren. Alles komt hierop neer: *als het in een reactor begint mis te gaan, dienen er mechanismen te bestaan die de reactiesnelheid van fissie verminderen.* Hoe sterker die negatieve terugkoppeling is, hoe intrinsiek veiliger de reactor is – dat wil zeggen hoe exotischer de mis-toestanden kunnen zijn van waaruit de reactor zichzelf kan redden. De twee voornaamste mis-toestanden in een reactor zijn: hij wordt te warm, en er is te weinig koelmiddel. Als dusdanig zijn de twee “natuurkundige” signalen waarop men kan inspelen: de temperatuur en de partiële afwezigheid van koelmiddel. Men dient er nu voor te zorgen dat deze twee “signalen” de reactiesnelheid *voldoende snel* en *voldoende sterk* terugbrengen. De toename of afname van de reactiesnelheid wordt goed beschreven door de reactiviteit, de k-factor van Fermi. Men dient te beseffen dat een “kleine invloed” op k voldoende kan zijn om de reactor te stoppen.

We zullen deze mechanismen nu bespreken. We hebben reeds een mechanisme aangeraakt: *het Doppler effect*. Het is gebaseerd op de absorptie in U-238 (of in Pu-240 bijvoorbeeld) in de resonanties in het epithermische gebied: als de temperatuur van het uranium stijgt, gaan deze resonanties verbreden, en gaat, zoals we gezien hebben, de bijhorende absorptie gedurende vertraging verhogen. Het Doppler effect is het grootste voor de resonanties van lage energie omdat de relatieve breedte toename in de lethargie groter is voor kleine energieën dan voor grote energieën bij een zelfde temperatuurstoename. A priori stuurt het Doppler effect dus “in de goede richting”, maar dat hoeft niet steeds zo te zijn. Inderdaad, de resonantiepieken treden ook op voor de fissie werkzame doorsnede, en als dusdanig gaat een Doppler effect voor deze werkzame doorsnede er

eerder voor zorgen dat er meer fissies gaan optreden bij toenemende temperatuur. Alles is dus een kwestie van de verhouding tussen het Doppler effect voor absorptie, en het Doppler effect voor fissie. Alles bij elkaar kan men voor een gegeven reactor ontwerp meestal het volgende schrijven: $k(T) = k(0) - K_D \ln(T)$ waar K_D de Doppler constante is. We kunnen hieruit de Doppler coefficient uitrekenen, die ons aangeeft hoeveel k verandert per graad Celcius, en dat is dan gegeven door: $\alpha_D = \frac{-K_D}{T}$.

Een tweede effect is *het temperatuur-effect op het koelmiddel* (dat eventueel ook de moderator kan zijn). Een hogere temperatuur van het koelmiddel zal de neutronenbalans anders maken. In de meeste gevallen wordt het energiespectrum van de neutronen iets harder wegens minder absorptie en minder moderatie in het koelmiddel. Dat kan een positief of een negatief effect hebben op de k -waarde. In een thermische reactor heeft dat meestal een negatief effect, zodat het bijdraagt tot de veiligheid ; in een snelle reactor heeft men vaak een positief effect, zodat men moet opletten. Men drukt dat ook weer uit door de toename van k per graad Celsius: α_{koel} .

Een derde effect is de zogenaamde *void coëfficiënt*, is de toename in reactiviteit als de fractie koelmiddel/moderator vermindert. Als die coëfficiënt positief is, wil dat zeggen dat – bij gelijk blijvende temperatuur – de reactiviteit k toeneemt als er minder koelmiddel is ; een negatieve coëfficiënt wil zeggen dat bij gelijk blijvende temperatuur, de reactiviteit afneemt als er minder koelmiddel is. Water reactoren hebben negatieve void coëfficiënten ; het is zelfs de basis van functioneren van de kokend-water reactor. *A priori kan men stellen dat een positieve void coëfficiënt gevaarlijk is, tenzij die klein genoeg is om ruimschoots door een ander effect gecompenseerd te worden.*

Een vierde effect is de brandstof expansie, dat vooral een rol speelt in metallische brandstof elementen (veel minder in oxides en andere ceramische brandstoffen). De expansie van de brandstof bij hogere temperatuur maakt dat de nuclidendichtheid een beetje afneemt, wat dus de macroscopische werkzame doorsnede wat laat afnemen.

We hebben natuurlijk de verschillende effecten “in doosjes” geplaatst, maar wat telt is het algemene gedrag van de reactor in verschillende omstandigheden. Een veilige reactor dient, bij afwijkend gedrag, het vermogen te verminderen en zelfs te laten stoppen. Natuurlijk is de veiligheid gegarandeerd indien elk effect afzonderlijk “in de goede richting” gaat, en bij een drukwater reactor is dat het geval. Maar dat wil niet zeggen dat een reactor met, bijvoorbeeld, een kleine positieve void coëfficiënt, gevaarlijk is: wat dan dient te worden gegarandeerd, is dat andere effecten voldoende sterk zijn om het positieve effect van de void coëfficiënt voldoende te compenseren. Men oppert soms dat snelle reactoren onveilig zijn, omdat ze soms een positieve void coefficient en een positief temperatuur-effect hebben op het koelmiddel. Maar de proef op de EBR-II heeft aangetoond dat zulk een reactor toch volledig passief veilig kan gemaakt worden ; in dat geval was dat omdat de Doppler coëfficiënt samen met de expansie van de brandstof voldoende sterk was om de twee positieve bijdragen van het vloeibaar natrium tegen te gaan. Met andere woorden, men dient geen individuele eisen te stellen op de deeleffecten ; wat men dient te beschouwen is het gehele effect. Natuurlijk is het qua ontwerp gemakkelijker als elk deeleffect op zich in de goede richting werkt, men dient dan geen gedetailleerde studie te maken om zich van de passieve veiligheid te overtuigen. Maar zolang het gehele ontwerp aangetoond is om passief veilig te zijn, kan men zich permitteren op bepaalde deeleffecten een positieve bijdrage te hebben. Dat vergt echter wel een gedetailleerde modellisatie.

4.4.h Kernwapens¹²⁵

Hoewel dit werk een pleidooi is voor het vreedzaam gebruik van kernenergie en kernwapens bijgevolg totaal buiten dit kader vallen, denk ik dat een minimum aan kennis over de principes van een kernwapen nuttig kan zijn voor twee redenen. De eerste reden is dat het duidelijk moet zijn (en dat is het niet steeds) welke *de verschillen en gelijkenissen zijn tussen een kernwapen en een kernreactor*. Ten tweede is een van de kritieken op het gebruik van kernenergie, *de mogelijkheden die het opent om kernwapens te maken*. Er bestaan vele types kernwapens, maar ze zijn allemaal gebaseerd (volledig of gedeeltelijk) op fissiereacties. In dat opzicht hebben ze dus als energiebron exact hetzelfde procedé als een fissie kernreactor. Maar een kernwapen haalt zijn grote explosieve kracht echter uit de hele hoge temperaturen en drukken die het kan opwekken in een relatief klein volume en heel korte tijd ; met andere woorden, uit *de hoge graad van concentratie van vrijgemaakte energie in ruimte en tijd*. Het is in dat aspect dat een kernwapen verschilt van een kernreactor. Tijdens een nucleaire explosie worden gemakkelijk *tientallen miljoenen graden* bereikt. Om dat te bewerkstelligen moet de fissie energie, zoals gezegd, vrijkomen in een heel beperkte ruimte en gedurende een heel korte tijd. Inderdaad, als de energie over een te groot volume wordt verspreid, dan bereikt men veel minder hoge temperaturen en drukken en bijgevolg een veel kleinere explosie (ook al is de energie dezelfde) ; maar men moet de fissieenergie bovendien heel snel laten vrijkomen, want ten gevolge van de explosieve kracht die men aan het opbouwen is, zal de kritische structuur snel vernietigd worden. Een kernwapen is als het ware een wedloop tegen zichzelf: enerzijds wil men het wapen “zo lang mogelijk” laten werken (fissies laten plaatsvinden om energie vrij te maken) ; anderzijds gaat de vrijkomende energie een explosie veroorzaken die het wapen zelf gaat vernietigen. Om de gestelde doelen te bereiken, moet men bijgevolg zo veel mogelijk fissiereacties laten plaatsvinden in een zo kort mogelijke tijd. *Deze tijd bedraagt meestal slechts enkele microseconden* ; nadien is het wapen opgeblazen.

Het principe van energieopwekking in kernwapen door fissie, namelijk een kettingreactie, is hetzelfde principe als in een kernreactor, maar men dient de kettingreactie dus tot “vol vermogen” laten te komen in een tijdspanne van enkele microseconden, in een heel klein volume. Het is hierin dat de uitdaging ligt bij de bouw van een kernwapen en het verschil met een kernreactor. Beiden halen hun energie uit fissie, beiden zijn gesteund op de kettingreactie en op een kritische massa. Maar om een kernwapen te maken moeten we alles heel snel laten gebeuren.

We herinneren eraan dat de gemiddelde levensduur van een neutron tussen zijn ontstaan in een splijting, en zijn eventueel veroorzaken van een volgende splijting, in een water-gemodereerde reactor ongeveer 25 microseconden bedraagt. In andere thermische reactoren is dat lichtjes anders, maar de orde van grootte blijft dezelfde. *Als dusdanig is het totaal ondenkbaar om een kernwapen te bouwen met thermische neutronen*. Inderdaad, zelfs bij een prompt kritisch gaan stijgt het vermogen in een thermisch spectrum veel te traag om voldoende vermogen te bereiken om de conditie van miljoenen graden te bereiken voor het systeem zichzelf heeft opgeblazen. Bijgevolg is het noodzakelijk om een snel spectrum te beschouwen als we een kernwapen willen maken. *Kernwapens hebben dus een kettingreactie nodig in snel spectrum*.

Als we naar een snel spectrum kijken, dan zien we dat voor een snelle reactor de levensduur van een neutron tussen twee fissies ongeveer 100 nanoseconden bedraagt. Het strikte minimum bereikt men wanneer men de voortplanting van een neutron in, zeg maar, zuiver U-235 beschouwt. Een 1 MeV neutron heeft een vrij pad voor fissie van 17.2 cm, een vrij pad voor elastische botsing van ongeveer

¹²⁵<http://www.nuclearweaponarchive.org/>

5.7 cm. Men kan dat gemakkelijk berekenen uit de dichtheid van zuiver U-235 (18.9 g/cm^3 en dus $4.84 \cdot 10^{22}$ atomen per kubieke centimeter) en de werkzame doorsneden voor fissie (1.2 barn) en elastische botsing (3.6 barn) in U-235 bij 1 MeV. We herinneren eraan dat de vrije padlengte gelijk is aan het inverse van de macroscopische werkzame doorsnede. Een 1 MeV neutron heeft een snelheid van 14 000 kilometer per seconde en legt de 17 cm dus af in ongeveer 12 nanoseconden. *Als dusdanig is de levensduur van een neutron in een kernwapen, tussen twee fissies, van de orde van een tiental nanoseconden.* We kunnen dus hopen op een honderdtal generaties (onze microseconde gedeeld door de 10 nanoseconden per generatie) van neutronen in de kettingreactie alvorens de explosieve kracht het wapen heeft vernietigd en dus de kernreactie heeft gestopt. Een twintig kiloton wapen (Hiroshima bom) moet ongeveer $2.6 \cdot 10^{24}$ fissies veroorzaken om die energie vrij te maken. Inderdaad, een enkele fissie levert ongeveer 200 MeV of 32 pJ (picojoule). 20 kiloton komt overeen met 84 TJ. Om vanuit een enkele start fissie tot aan de benodigde $2.6 \cdot 10^{24}$ fissies te komen in 100 generaties, moet men dus de honderdste-machtswortel trekken uit $2.6 \cdot 10^{24}$ wat ons een Fermi constante van $k = 1.75$ oplevert. In een kernwapen moeten we dus niet alleen een heel snel spectrum gebruiken, *maar we moeten ook sterk superkritisch zijn, met een k-waarde liefst in de buurt van 2.* Als dusdanig moet men van subkritisch naar heel sterk superkritisch gaan in een heel korte tijd. En we bereiken nu het essentiële probleem bij het maken van een kernwapen. Het spreekt vanzelf dat, gelijk welke techniek men gebruikt om van een subkritische structuur naar een sterk superkritische structuur te gaan, de k-waarde continu gaat toenemen van wat kleiner dan 1 naar ongeveer 2. Van zodra k groter is dan 1 is de structuur kritisch, en elk neutron dat zich zal aandienen in het systeem zal een kettingreactie veroorzaken, die echter minder snel zal toenemen in vermogen dan de gewenste toename, maar wel voldoende energie kan vrijmaken om het wapen te vernietigen. Als dat gebeurt, is de kernexplosie “mislukt”, en men duidt dat met de Engelse term “fizzle” aan. De bom gaat “psssschhht” in plaats van “boem”. Een voorname bron van neutronen is de spontane fissie die elk splijtbaar materiaal op een of andere wijze toch wel ondergaat (naast relatief zeldzame kosmische straling).

Om dat te vermijden, moet men de k-waarde dus op zulke snelle wijze van subkritisch naar k ongeveer 2 brengen, dat het ontwikkelde vermogen door spontane fissiereacties gedurende die tijd klein genoeg is om het wapen intact te laten. Om een voldoende grote waarde van k te kunnen bekomen, dient men in het algemeen *ongeveer drie keer de kritische massa te hebben* ; men dient natuurlijk ook te vertrekken van sub-kritische massa's. Twee “halve bollen” bij elkaar brengen zal dus in de meeste gevallen niet lukken. Men heeft echter een oplossing: het blijkt dat de kritische massa omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de gemiddelde dichtheid van het materiaal. Als het materiaal dus twee keer zo dicht is, dan is de kritische massa vier keer zo klein. Men kan aantonen dat als men een cilindrisch deel wegsnijdt uit een bol die drie keer de kritische massa bevat, dat men dan twee subkritische massa's overhoudt.

Vandaar het eerste basis idee om een kernwapen te maken: neem een bol waaruit een cylinder is verwijderd, en schiet die cylinder met een kanon in de bol op het ogenblik van de explosie. Die techniek is gebruikt voor de Hiroshima bom. Het nadeel is dat zelfs met een krachtig kanon, de assemblage tijd toch ongeveer een milliseconde duurt. In dat geval kan men enkel een splijtstof gebruiken die relatief weinig neutronen genereert door spontane fissie ; bovendien zorgt de trage assemblage in elk geval voor een inefficiënt gebruik van de splijtstof. De enige splijtstof die hiervoor kan gebruikt worden, is U-235 (en eventueel U-233, het is niet geweten of hier ooit een wapen is mee gemaakt). Alle andere fissiematerialen ondergaan veel te veel spontane splijtingen (en produceren dus veel te veel neutronen) om de “fizzle” te vermijden. Men heeft voor zo een U-235 bom minstens 52 kilogram zuiver U-235 nodig (dat is een kritische massa bij normale

omstandigheden zonder reflectie) maar dus normaal gezien wat meer. Een plutonium wapen kan men op die manier niet gebruiken.

Om tot een snellere assemblage van de superkritische structuur te komen, dient men een andere, veel moeilijker techniek aan de dag te leggen: een implosie. Het idee van een implosie is om een zo goed als perfect symmetrische inwaartse schokgolf op te wekken met chemische explosieven die een subkritische bol kernmateriaal samendrukt tot ongeveer twee keer zijn dichtheid. Op dat ogenblik wordt de kritische massa dus ongeveer 4 keer kleiner (dichtheid twee keer groter) en verandert de subkritische massa in een drie keer kritische massa. Bovendien gaat die implosie heel snel: in 1 a 4 microseconden wordt de maximale compressie bereikt, en die duurt zelf ongeveer een microseconde. We zitten hier dus op de “perfecte tijdschaal” om een honderdtal neutronengeneraties toe te laten. Implosie heeft verschillende voordelen. Ten gevolge van de verhoogde dichtheid is de kritische massa die nodig is, veel kleiner (ongeveer vier keer kleiner) en men heeft dus minder nucleair materiaal nodig. Gezien de snelle compressie kan men materialen gebruiken die spontane fissie ondergaan (tot op zekere hoogte). Het wapen is in het algemeen ook veel kleiner en lichter (geen kanon nodig). Maar om de juiste implosie te bekomen, heeft men veel meer gesofistikeerde technologie nodig. Er is bovendien een andere moeilijkheid. Gezien de superkritische toestand gedurende slechts enkele microseconden bestaat, en men slechts een optimale kritische toestand van minder dan een microseconde heeft, moet men de kettingreactie zelf opstarten (men kan niet wachten op een spontaan verschijnsel). Het is dus nodig een gepulste neutronenbron laten af te gaan net op het ogenblik van maximale compressie. Er bestaan verschillende technieken, maar ze zijn allemaal technologisch uitdagend. Het punt is dat we met een nauwkeurigheid van enkele tientallen nanoseconden de neutronenpuls moeten synchroniseren met de implosie en dat we hiervoor geen neutronen mogen genereren.

Als dusdanig is de implosietechniek veruit superieur, maar technologisch veel moeilijker dan de “assemblage” techniek, die enkel maar kan gebruikt worden voor U-235.

Zelfs met implosie technieken is de aanwezigheid van spontane fissie een probleem vanaf een zeker gehalte wat de kwaliteit van het wapen vermindert bij gelijk blijvende technologie. Het belangrijke element is natuurlijk plutonium, maar er zijn een aantal andere potentiële spelers. De “goeie” plutonium isotoop is Pu-239, die ongeveer 30 neutronen per kg en per seconde produceert. Dat is goed genoeg om zelfs met de “assemblage” techniek een wapen op te leveren ; het probleem is dat men zonder isotoop scheiding geen zuiver Pu-239 kan bekomen, maar steeds een contaminatie Pu-240 heeft. Pu-240 produceert 2 miljoen neutronen per seconde en per kilogram, en veroorzaakt extra absorptie van neutronen. Als dusdanig maakt de aanwezigheid van Pu-240 de kans op “fizzle” groter, en maakt Pu-240 ook de nodige kritische massa groter. Vanaf de aanwezigheid van 1% Pu-240 dient men op implosie technieken over te stappen. Wapen-plutonium bevat minder dan 6% Pu-240. Dat wil niet zeggen dat men met hogere gehalten Pu-240 geen wapen kan maken, maar men heeft hogere en hogere eisen aan de implosie, men heeft grotere en grotere kritische massa's en men zal kleinere en kleinere efficiëntie veroorzaken. Er is bovendien een bijkomend probleem voor het gebruik van plutonium dat een hoge fractie Pu-240 bevat: de warmte die gegenereerd wordt door het radioactieve verval (ongeveer 15 W per kilogram) welke een probleem stelt als het materiaal in een (sferische) bal van explosieven zit. *Met voldoende gesofistikeerde technologie is het mogelijk aan al die nadelen te verhelpen, maar het is meestal opportuener, als men over al die technologie beschikt, om plutonium van betere kwaliteit te maken.* Niettemin is het ook mogelijk om met beperktere technologie een inefficiënt wapen te bouwen met “reactor plutonium”. Men heeft geschat dat het mogelijk is om op die manier een 0.5 kiloton wapen te maken (Hiroshima was 20 kiloton).

We kunnen bijgevolg enkele besluiten trekken. Het belangrijkste besluit is dat *een kernreactor van gelijk welk type nooit een nucleaire explosie van de stijl van een kernwapen kan opleveren*, om de eenvoudige reden dat de condities van energie concentratie in tijd en ruimte niet aanwezig zijn. Met de beste wil van de wereld is het niet mogelijk om een kernreactor in enkele microseconden superkritisch te maken met een $k=1.7$ of zo, en bovendien is de ruimtelijke spreiding van de energie productie veel te groot. De enige explosies die in een kernreactor kunnen plaatsvinden, zijn van klassieke aard en van “lage kwaliteit” zoals stoomexplosies: een materiaal zoals water of een gas warmt op tot enkele honderden/duizenden graden, de druk stijgt en een recipient begeeft onder de druk, die het materiaal explosief laat vrijkomen. Maar dat zijn explosies van “slechtere” kwaliteit dan buskruit, laat staan moderne militaire explosieven.

Het tweede besluit is dat materiaal dat afkomstig is van een kernreactor slechts met grote moeite kan gebruikt worden om kernwapens van te maken, en dat de technologische uitdaging hierbij groter is dan de technologische uitdaging om “via de gewone weg” (plutonium productie in lage fluxen, of hoge verrijking van uranium) kernwapens te maken. Niettemin bestaat de mogelijkheid om met plutonium, gerecupereerd uit reactoren, na scheiding, toch een kernwapen te maken. Men dient bijgevolg voorzichtig te zijn met afgescheiden plutonium uit de afgewerkte brandstof van kernreactoren.

Hoofdstuk 5 De druk-water reactor

5.1 Overzicht

De druk-water reactor is het reactor type dat op dit ogenblik het meeste gebruikt wordt om elektriciteit door kernenergie te produceren. Het principe van de drukwater reactor is bedacht door de Amerikanen, die het aanwendden als compacte reactor om hun nucleaire duikboten mee aan te drijven. De Belgische versie ervan vindt zijn oorsprong in een Belgisch-Franse samenwerking, met hulp van de Amerikanen, waarvan het eerste prototype in Chooz op de Frans-Belgische grens is gebouwd. De Fransen hebben deze samenwerking gebruikt als proef, en die proef is zo geslaagd, dat ze hun eigen ontwikkeling (de UNGG: Uranium Naturel Graphite Gaz) van de jaren '60 hebben opgegeven, en overgestapt zijn op de drukwater reactor om hun hele park kerncentrales te bouwen.

In dit hoofdstuk gaan we een beetje dieper in op de precieze bouw en het functioneren van zo een drukwater reactor. De Fransen hebben eenheden van 900 MW, 1300 MW en recent 1450 MW en hun volgende centrales zullen van het nieuwe EPR type zijn ; we zullen hier als voorbeeld een Franse eenheid van 1300 MW elektrisch beschouwen. De drie Tihange reactoren en Doel 3 en 4 zijn afgeleid van het 900 MW type (met rendementsverbeteringen: zij leveren ongeveer 1000 MW elk). Doel 1 en 2 lijken eerder op het Chooz prototype van ongeveer 300 MW. Andere drukwater reactoren hebben een gelijkaardige opbouw, hoewel ze in de details kunnen verschillen. De Nederlandse centrale van Borssele heeft niets met de Franse ontwikkeling te maken, maar is van Duitse makelij.

5.1.a Algemene bouw van een kerncentrale

Een kerncentrale bestaat uit verschillende bouwwerken, die kunnen opgedeeld worden in twee categorieën: het nucleaire deel en het conventionele deel. Het nucleaire deel bestaat uit de bunker die de eigenlijke reactor en het primaire circuit bevat, en een aantal bouwwerken extern hieraan. Er is de opslagplaats van verse en gebruikte brandstof (piscine opslag), er zijn de noodgeneratoren die in het geval van algemene elektriciteitspanne de noodsystemen kunnen blijven voeden, en een gebouw dat een grote voorraad aan water bevat. Tenslotte is er natuurlijk ook de controlekamer.

Het conventionele deel bestaat uit de zaal die de turbine-generatoren bevat en de verschillende gebouwen die met het koelwater en/of de koeltorens te maken hebben, evenals transformatoren die voor de aansluiting op het lichtnet zorgen.

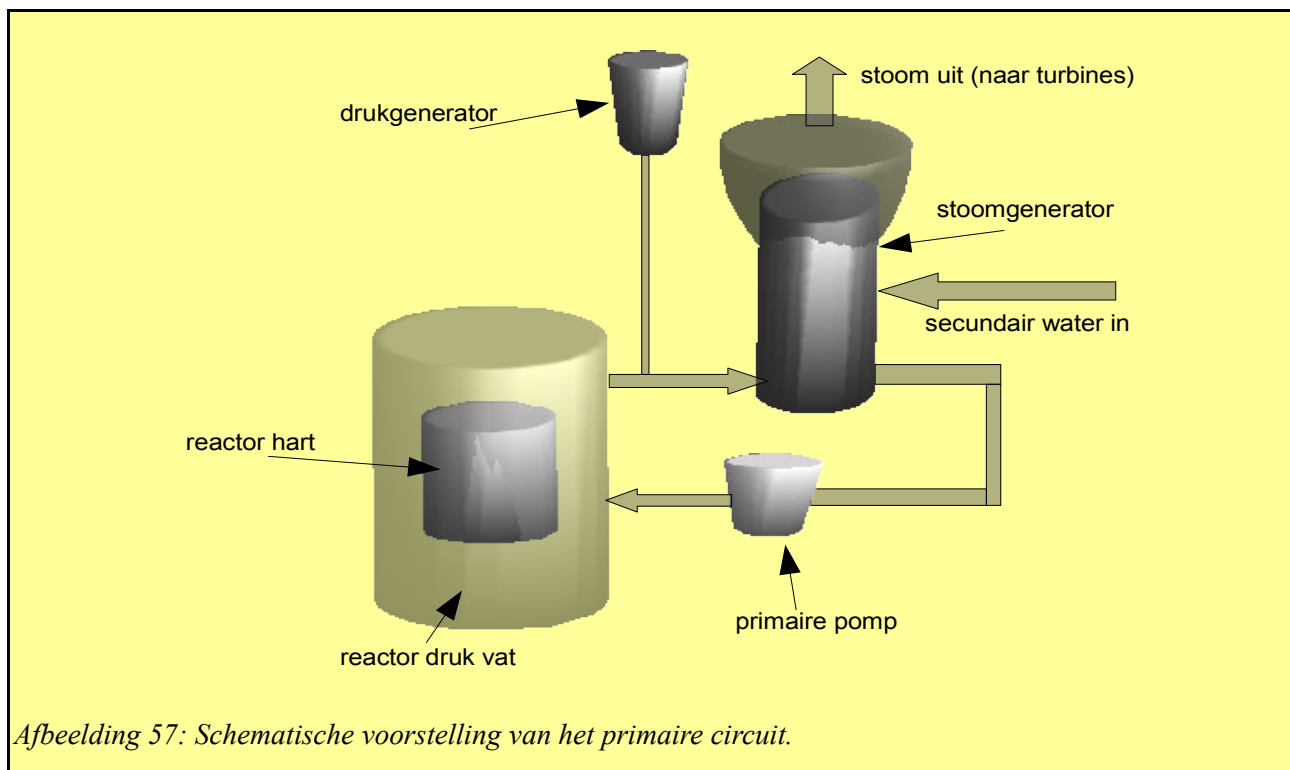
De bunkers die gebruikt worden zijn van volgende types:

- Externe betonnen bunker met inwendige staalbekleding (dit zijn het oudste type, het zijn enkelvoudige bunkers – tegenwoordig vereist men dubbele bunkers)
- Dubbele betonnen bunkers met of zonder inwendige staalbekleding. De Belgische centrales hebben een inwendige staalbekleding, de Franse centrales hebben een speciaal lek-vrij beton, maar geen inwendige staalwand.

De afmetingen van de bunker van een 1300MW centrale zijn de volgende: binnendiameter 44 meter, hoogte 58 meter. De dikte van de betonnen muur is 1.2 meter.

De algemene opbouw van het nucleaire deel (binnen de bunker) bestaat uit de volgende componenten (afgebeeld in figuur 57):

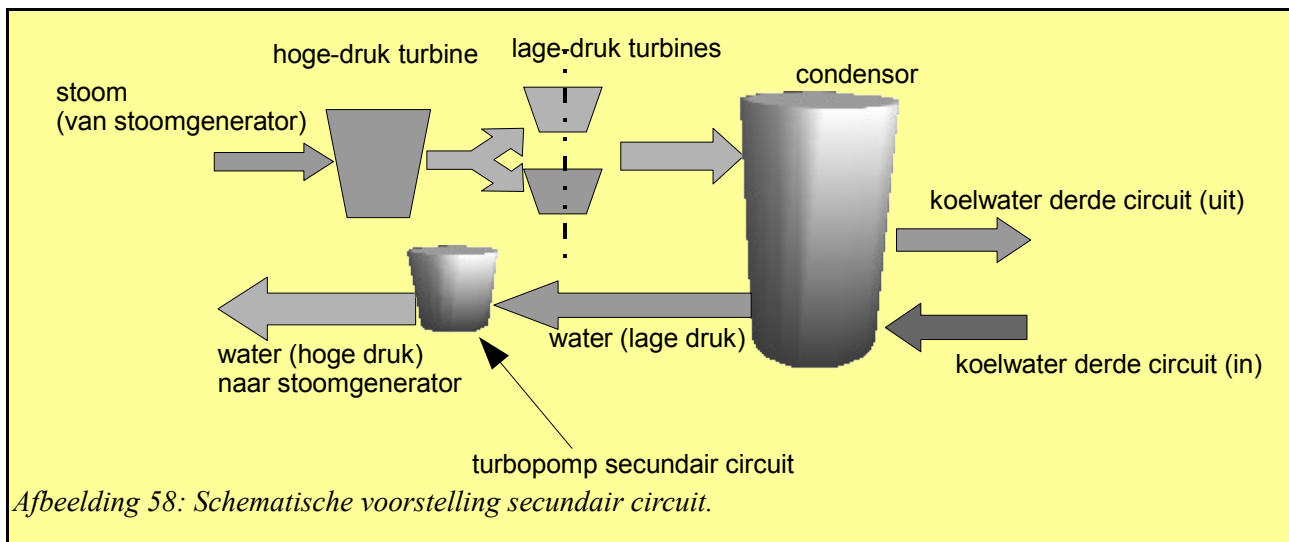
- er is natuurlijk het reactorvat zelf, dat het hart (de brandstof elementen en de regelsystemen en zo) van de reactor bevat, en dat vol zit met water onder druk: het primaire water. De binnendiameter van het reactorvat is 4.4 meter, de hoogte 13.6 meter.
- Aan het reactor vat zelf zijn 4 circuits gekoppeld (dus 8 aansluitingen op het reactorvat) die elk een stoomgenerator bevatten. Zij bestaan elk essentieel uit een dik buizenstel, een primaire pomp van groot vermogen (6 MW!) en een stoomgenerator waar het primaire water door een buizenstel het secundaire water aan de kook gaat brengen. Een stoomgenerator is als dusdanig een heel groot vat (22 meter hoog) waarin secundair water/stoom zit.
- Op een van de circuits heeft men de zogenaamde drukgenerator aangebracht. Het is een vat dat via een buis met het primaire circuit is verbonden (een enkele buis, die geen kringloop toelaat), en waarin men een water/stoom mengsel via elektrische verhittingselementen aan een zekere temperatuur houdt (hoger dan de rest van het primaire water), zodat het stoom/water evenwicht bij die temperatuur ons een zekere druk oplevert.



Het secundaire water komt van buitenuit in de bunker binnen, gaat in een stoomgenerator, wordt daar aan de kook gebracht en gaat dan als stoom onder druk terug buiten de bunker. In het conventionele deel (zie afbeelding 58) van de centrale vindt men dan:

- een hoge-druk turbine en een stel lagedruk turbines die de stoom ontspannen – een gedeeltelijke condensatie vindt hier plaats. Deze turbines zijn aangesloten op een alternator die elektriciteit produceert. Het is ook mogelijk om dit deel kort te sluiten en de stoom van de reactor direct aan de condenser te leveren. De nominale druk van de stoom is 65 bar bij 281 graden. Ongeveer 2000 ton water worden per uur in stoom omgezet bij nominaal vermogen in een stoomgenerator.

- Een condenser die de stoom condenseert (de latente warmte van condensatie afvoert), of helemaal de stoom afkoelt in het geval die direct in de condenser terechtkomt.
- Een turbocompressor die het secundaire water terug onder druk in de stoomgenerator pompt.
- Een nood-voedingcircuit dat de stoomgenerator onafhankelijk van water kan voorzien.
- Een derde koelcircuit dat die condenser afkoelt, en verbonden is met de omgeving (rivier, zee, koeltoren,...)



Elektrisch gezien kunnen de alternatoren aan het lichtnet gekoppeld zijn, maar het is ook mogelijk om losgekoppeld van het lichtnet de eigen belasting van de centrale op te vangen. Als dusdanig kan de centrale in “eiland-mode” werken.

5.1.b Overzicht van het functioneren van de centrale.

Bij normale werking staat het primaire circuit onder een druk van 155 bar en varieert de temperatuur van het primaire water tussen 292 en 330 graden. Er bestaat een effect van auto-regulatie in een drukwater centrale (die ook deel uitmaakt van de passieve veiligheid): als men een hoger thermisch vermogen vraagt (door meer water in de stoomgeneratoren te pompen, die meer water in stoom gaan omzetten, en meer warmte onttrekken aan het primaire water), gaat men de temperatuur van het primaire water verlagen, en gaat de reactiviteit van de reactor toenemen, die (gedeeltelijk) het gevraagde extra vermogen gaat compenseren. Omgekeerd ook, als men minder stoom vraagt, gaan de stoomgeneratoren het primaire water minder afkoelen, en gaat het primaire water dus warmer worden: door de negatieve temperatuurscoëfficiënt gaat het nucleaire vermogen afnemen. Als dusdanig zou men dus een reactor volledig kunnen laten “zelf-regelen”. Het probleem hierbij is dat de excursies in temperatuur te groot zouden zijn, wat een te grote cyclische belasting zou vormen voor alle componenten. Als dusdanig dient er ook een actieve regeling te bestaan.

De oudste regelmode was de zogenaamde “stuurmode A”: met een aantal volledig absorberende regelstaven regelt men de temperatuur van de reactor: men houdt het primaire water op een vaste temperatuur. Het probleem is dat men de regelstaven niet te veel kan bewegen, omdat dit de axiale stabiliteit van de neutronenflux negatief zou beïnvloeden. Als dusdanig is de regelcapaciteit van de

staven begrensd, en dient men, om het nucleair vermogen over een groot interval te regelen, boorzuur toe te voegen, of boorzuur aan het primaire water te onttrekken. Men heeft in deze mode dus een kleine, snelle regelcapaciteit (de regelstaven), en een trage, grote regelcapaciteit: oplossen of extraheren van boorzuur. Het is deze traditionele regelmode die aan kerncentrales de naam heeft gegeven van “slome” centrales, die enkel maar een constante basislast kunnen verdragen.

Maar men heeft een andere regelmode bedacht (stuurmode “G”), waarbij er regelstaven van verschillende absorptiedichtheden, en vooral, absorptie profielen gebruikt worden. Dat wil zeggen dat men regelstaven heeft waar de hoeveelheid neutronen-absorberend materiaal varieert als functie van de positie langsheen de staaf. Als dusdanig is het nu mogelijk om het vermogen over een heel grote waaier volledig met die regelstaven te regelen, zonder dat er axiale neutronen fluentie instabiliteiten ontstaan. Gezien men nu niet meer moet inspelen op boorzuur concentraties, is het regelen van het vermogen van de reactor veel flexibeler geworden.

In transient regime kan een centrale “brutaal” tot 10% van zijn nominaal vermogen opvangen, of continu veranderen aan maximaal 5% van het nominale vermogen per minuut (wat dus wil zeggen dat een kerncentrale over zijn hele vermogenwaaier kan gaan in een kwartier tijd). De reactor kan kritisch gehouden worden vanaf 2% van het nominale vermogen, maar in de praktijk neemt men als ondergrens voor normale werking, 30% van het nominale vermogen.

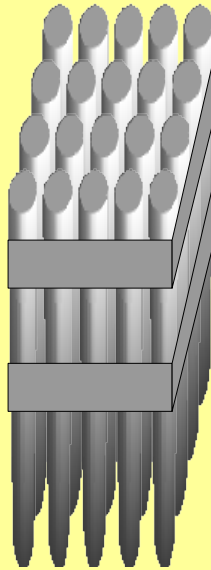
Het is de keuze van de exploitant om een centrale ofwel in basislast te gebruiken (constant vermogen, meestal dicht bij de 100% van het nominale vermogen), ofwel in geprogrammeerde belasting (dat wil zeggen, men heeft een a priori programma opgesteld van de variatie van het vermogen), ofwel in “volgmode”, waarbij de centrale het vermogen levert dat ogenblikkelijk gevraagd wordt. Indien een centrale niet in basislast werkt, dan kan ze niet aan 100% draaien, natuurlijk.

Al deze functioneringsmodes vallen binnen het normale gebruik van een kerncentrale. *Het is dus een fout beeld dat kerncentrales enkel maar een basislast kunnen dragen, en dat men een groot deel fossiele centrales nodig heeft om de variabiliteit van het verbruik op te vangen.* Dat was lang geleden zo, maar nu niet meer. Het zijn enkel grote variaties (meer dan 10% van het vermogen) die op enkele seconden plaatsvinden, die niet door een kerncentrale kunnen gedragen worden – enkel gasturbines en hydro-elektrische centrales kunnen zo iets doen – maar zulke variaties zijn uiterst zeldzaam (tenzij tijdens domme publieke acties, zoals “we schakelen allemaal samen het licht 5 minuten uit, om de planeet te redden”), en stellen een minieme fractie van het totale verbruik voor. Het is wel zo dat indien men slechts een minderheidsbijdrage kernenergie heeft, men er alle (economische) belang bij heeft die aan 100% te laten draaien, en dus bij te dragen tot de basislast.

5.2 Het primaire circuit

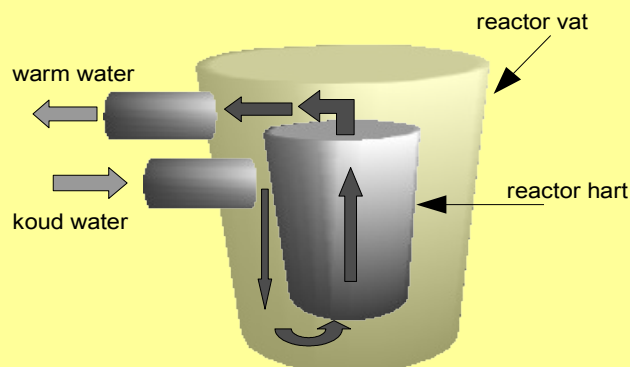
5.2.a Hart van een drukwater reactor

Het hart van een drukwater reactor bestaat uit een geheel van brandstofassemblages die regelementen (regelstaven) bevatten, die bevestigd zijn aan een interne structuur: een omhulling,



Afbeelding 59: Schematische voorstelling van een brandstof element, bestaande uit een vierkant van brandstofstaven (en regelstaven, hier niet voorgesteld).

een deksel en een bodemplaat, samen met verschillende hydrodynamische elementen die de primaire waterstroom in de goede banen leiden.



Afbeelding 60: Schematische voorstelling van de waterstroom in het reactorvat.

De brandstofassemblages zijn balkvormige metalen “kaders” waarin, volgens een vierkant rooster, 17 x 17 brandstofstaven zijn ingebracht. De zijden van deze balkvormige kaders zijn 21 cm op 21 cm en de lengte is wat langer dan 4.5m. Een 1300 MW-elektrisch reactor bevat 193 zulke

assemblages. Niet alle vakjes in het 17x17 raster zijn met brandstofstaven gevuld: 24 vakjes zijn geleidingsbuizen voor regelstaven of instrumentatie. De assemblages zijn grotendeels “open”, en de geometrische integriteit wordt gevrijwaard door verschillende roosters langheen de lengte van de assemblage, die trouwens ook hydrodynamisch zo zijn bestudeerd dat ze de waterstroom in goede banen leiden om optimaal de brandstofstaven te koelen.

De regelstaven die in de geleidingsbuizen zitten, zijn mechanisch allemaal samengebundeld en als dusdanig is er een enkele mechanische controle per brandstofassemblage. Deze is verbonden met een van de controlestangen van de reactor: elke controlestang controleert dus het geheel van een 24-tal regelstaven in een brandstofassemblage. Elke controlestang wordt mechanisch gecontroleerd door een geheel van elektromagneten die de stang kunnen verplaatsen. De brandstofassemblages worden op hun plaats gehouden door een geheel van mechanische structuren binnenin de omhulling van het hart (dat op zijn beurt is vastgemaakt aan de binnenkant van het reactorvat).

Over het geheel van het hart is instrumentatie verdeeld die de neutronenflux en de temperatuur van het water meet, zodat men een beeld heeft van de scalaire neutronenflux en van het temperatuursveld.

De watercirculatie is als volgt (zie figuur 60): het “koude” water dat terugkomt van de stoomgeneratoren vloeit aan de buitenkant van de omhulling van het hart (dus in de opening tussen die omhulling en de wand van het reactorvat) naar beneden, en stroomt dan binnenin de omhulling naar omhoog, waar het opgewarmd wordt door de brandstofelementen in de brandstofassemblages, en wordt naar de “warme” takken van de stoomgeneratoren geleid. Het voordeel van deze aanpak is dat de wand van het reactorvat steeds in contact is met het “koude” water dat op konstante temperatuur wordt gehouden (de vermogenvariaties gaan wat spelen op de temperatuur van het warme water). Als dusdanig vermindert men de thermische variaties op de wand van het reactorvat. Een ander voordeel is dat op die manier een passieve circulatie ook mogelijk is.

5.2.b Het reactorvat

Het reactorvat is een stalen vat dat bestaat uit een cilindrische wand met half-sferische bodem enerzijds, en een deksel anderzijds. De integriteit van het drukvat is een belangrijk onderdeel in de veiligheid van een centrale: het is de tweede grote barrière op de weg naar het vrijkomen van radioactieve stoffen (de eerste is de wand van de brandstofstaven, de derde is de bunker). De integriteit van het reactorvat wordt enerzijds gegarandeerd door het beperken van de sollicitaties (mechanische, thermische, chemische en bestraling), en anderzijds door de materiaal eigenschappen van het vat.

Bij het originele ontwerp van tweede generatie reactoren houdt men geen rekening met de mogelijkheid van het breken van het reactorvat - dat wil zeggen dat men geen garantie heeft dat men in alle denkbare omstandigheden de situatie meester zal blijven in dat geval – hoewel er natuurlijk wel middelen zijn om zelfs in dat geval de situatie aan te pakken. In derde generatie reactoren neemt men aan dat een reactor vat breuk een incident is waarop men in alle omstandigheden een adequaat antwoord dient te hebben. Zo heeft het EPR ontwerp onder het reactorvat een opvanginstallatie (“core catcher”) die de inhoud van het reactorvat kan opvangen en afkoelen. Men gaat geregeld (bijvoorbeeld met ultrasoon echografie) de integriteit van de reactorvaten na. Een verdere discussie over de materiele integriteit van het reactorvat vindt men in het hoofdstuk over materialen terug.

5.2.c De primaire pompen

De primaire pompen (er is zo een pomp voor elke tak die een stoomgenerator bevat: een 1300 MW elektrisch centrale heeft zo 4 takken) zijn grote motor/pomp gehelen die op de “koude” tak van de stoomgenerator lus zijn geplaatst, waar het water ongeveer 300 graden warm is. De druk is ongeveer 160 bar en de pompen kunnen een overdruk leveren van 10 bar, aan een nominaal debiet van ongeveer 25 000 kubieke meter per uur. Deze pompen dienen om dat groot waterdebiet doorheen de stoomgeneratoren te zuigen en terug in het reactorvat te pompen om als dusdanig een grote hoeveelheid warmte aan de reactor te kunnen onttrekken en aan de stoomgeneratoren leveren.

De pompen hebben een niet-verwaarloosbaar vermogen: 6 MW! De motoren zijn frequentiegestuurde asynchrone motoren. De reden voor deze keuze is de robuuste en eenvoudige opbouw van een asynchrone motor. Het motor-deel is olie-gekoeld. De primaire pompen zijn relatief complexe systemen. Zo bevatten zij bijvoorbeeld een begrenzing van het terugvloeien. Inderdaad, indien een van de 4 pompen zonder voeding zou vallen, dan zou door een hydraulisch effect en ten gevolge van de druk geleverd door de 3 andere, de stroming in de “dode” tak in omgekeerde richting gaan vloeien. Om dat te beletten bestaat er een passief blokkeersysteem dat terugvloeien belet. Er bestaan ook beveiligingen tegen lekken. We gaan hier niet verder in op de gedetailleerde opbouw van deze systemen, het zou ons te ver in de technische details leiden.

Passieve circulatie wordt onvoldoende van zodra het reactor vermogen groter is dan 10% van het nominale vermogen, maar dat is meer dan het residuele vermogen van radioactief verval als de reactor is gestopt. Men stelt dus vast dat deze pompen niet strict noodzakelijk zijn bij het uitschakelen van de reactor – in tegenstelling tot wat soms wordt beweerd: *zelfs bij een simultane panne van de 4 pompen, kan de (uitgeschakelde) reactor nog steeds voldoende gekoeld worden.* Passieve convectie kan ruimschoots de restwarmte van een gestopte reactor evacueren, maar dus niet de warmte geproduceerd door een reactor in gewone werking.

5.2.d De stoomgeneratoren

De stoomgeneratoren zijn imposante structuren: het zijn metalen cilindervormige vaten die groter zijn dan het reactorvat: zij zijn 22 meter hoog (ongeveer 7 etages!). In dat cilindervormig vat is een inwendige cilindrische omhulling geplaatst, waarbinnen er zich U-vormige buizen bevinden. Het primaire water wordt door de U-vormige buizen geleid, die zich binnenin de omhulling bevinden en waarin zich secundair water bevindt onder lagere druk (ongeveer 70 bar). Het secundaire water wordt door de temperatuur van het primaire water aan de kook gebracht: de stoom die de stoomgenerator verlaat heeft een temperatuur van ongeveer 280 graden. Een deel van dat secundaire water verdampt dus, en wordt “gedroogd” (dat wil zeggen, gescheiden van de vloeibare fase, de druppels en zo die met de stoom gemengd zijn). De droge stoom verlaat de stoomgenerator (richting turbine), terwijl de vloeibare fase aan de buitenkant van de omhulling terugvloeit om weer verhit te worden door de U-vormige buizen. De consumptie aan water door verdamping wordt gecompenseerd door vers aangebracht secundair water dat ook aan de buitenkant van de omhulling mede gaat terugvloeien om verhit te worden. Het meest ingenieuze deel zit hem in de mechanische structuur die de stoom moet “drogen”: verschillende geometrieën zijn hiervoor bedacht om op de meest efficiënte manier de stoom van het water te scheiden zonder teveel verliezen. Het nominale debiet is ongeveer 2000 ton stoom per uur.

De stoomgenerator moet mechanisch ontworpen zijn om aan twee typische incident situaties te kunnen weerstaan: een breuk in het primaire circuit (en dus grote drukgradienten in het primaire

circuit), en een breuk in de stoombuizen van het secundaire deel (zodat er plots drukverlies optreedt in het secundaire deel). Dit zijn de ernstigste mechanische sollicitaties die de stoomgenerator kan ondergaan, en dit bepaalt het ontwerp. In het geval de stoomleidingen op een of andere wijze zouden afgesloten worden, zodat de stoom nergens meer heen kan, is een stoomgenerator ook uitgerust met noodventielen die de druk aflaten van zodra de druk 10% boven de nominale druk stijgt.

5.2.e De drukgenerator

De drukgenerator is een stalen vat, aangesloten op het primaire circuit via een lange buis, en dient om het gehele primaire circuit onder druk (ongeveer 160 bar) te houden, en als dusdanig te vermijden dat het water in het primaire circuit gaat koken. Men zou natuurlijk als drukgenerator een zuiger met een gewicht of een grote veer of zo kunnen gekozen hebben, maar het systeem dat men aanwendt is “kokend water”. Inderdaad is, bij een gegeven temperatuur, stoom en water in evenwicht aan een zekere druk. Het volstaat dus om voor de gewenste druk, water en stoom aan de bijhorende temperatuur te brengen, en de druk zal de juiste zijn. Bovendien heeft een water/stoom evenwicht een groot voordeel over een of ander mechanisch zuiger systeem: zolang het water en de stoom samen aanwezig zijn bij de gegeven temperatuur, blijft de druk constant. Als dusdanig kan zo een evenwicht gemakkelijk volumeveranderingen opvangen bij gelijk blijvende druk.

Gezien men niet wil dat het primaire water gaat koken in het reactorvat, dient de temperatuur van het water in de drukgenerator (in evenwicht met zijn stoom) hoger te zijn dan de hoogste temperatuur die kan voorkomen elders in het circuit. Deze hogere temperatuur wordt bereikt door elektrische verwarmingselementen in de drukgenerator (bijvoorbeeld: 345 graden voor een druk van 155 bar). Het is de temperatuur van dit water die de druk in het hele primaire circuit bepaalt.

Men pompt, via een tweede, dunne leiding, een beetje primair water in de bovenkant van de drukgenerator waar dat water in de stoom gesprekeld wordt. Hiervoor zijn verschillende redenen waarvan de voornaamste is dat dit het water homogeen houdt en dat hierdoor het thermodynamisch evenwicht tussen de vloeibare en de dampfase verbetert. Het waterniveau in de drukgenerator wordt bepaald door het systeem (zie verder) dat de hoeveelheid water in het primaire circuit regelt ; men tracht dit waterniveau op een ongeveer constant niveau te houden.

De werking van de drukgenerator is als volgt. De elektrische verwarmingselementen verhitten het water in de drukgenerator tot aan de temperatuur die met de gewenste druk overeenkomt (bijvoorbeeld, 345 graden voor 155 bar). Het water in de drukgenerator zal dus gaan koken tot er stoom aanwezig is met een druk van 155 bar – op dat ogenblik is er evenwicht. Deze druk gaat zich natuurlijk voortplanten in het gehele primaire circuit op lokale kleinere drukvariaties na, ten gevolge van het stromen van water doorheen buizen, of het lokaal verhogen van de druk door de primaire pompen. Veronderstel nu dat het water in de reactor (dat kouder is dan 345 graden, en dus helemaal niet gaat koken) warmer wordt, zodat het primaire water gaat uitzetten. Het water gaat de drukgenerator binnenstromen, het niveau van het vloeibare water gaat stijgen, en het stoomvolume zal samengedrukt worden. Dit gaat de stoom (en dus het hele primaire circuit) onder een wat hogere druk zetten, maar bij een hogere druk gaat de stoom condenseren (hij was in evenwicht bij 345 graden en 155 bar). Trouwens, het binnenstromende water in de drukgenerator (afkomstig van het primaire circuit) is wat kouder dan het water dat daar aanwezig was. Al dat maakt dat de druk weer heel snel gaat dalen tot aan de richtwaarde. Als dusdanig ziet men dat de drukgenerator de druk ongeveer constant houdt... tenminste zolang er een zeker volume stoom aanwezig is waarin het water zich kan ontspannen. Indien om een of andere reden (bijvoorbeeld een vermindering van

nucleair vermogen) het primaire water afkoelt en dus gaat inkrimpen, dan gaat het waterniveau in de drukgenerator dalen (water van de drukgenerator gaat terugvloeien in het primaire circuit). Het stoomvolume gaat toenemen en dus gaat de druk afnemen. Maar opnieuw is nu het water aan 345 graden niet meer in evenwicht met de stoom, en bijgevolg gaat het water hard koken en stoom produceren tot de druk weer in evenwicht is.

Men ziet dat de drukgenerator prima werkt om de druk constant te houden, en volumeveranderingen van het primaire water op te vangen... zolang er zowel water als stoom aanwezig is in die drukgenerator. En men begrijpt nu ook de “primaire” reactie van de Three Miles Island nachtploeg, die water wilde afdalen omdat het niveau in de drukgenerator te hoog was. Het probleem was dat ze vergeten waren naar de temperatuur en de druk te kijken: de druk was te laag, waardoor het primaire water gaan koken was en veel water in de drukgenerator had gedrukt ; de rollen waren nu omgekeerd: het was het primaire circuit dat nu als “drukgenerator” werkte, en de drukgenerator als “watervat onder druk”. Een eenvoudige verificatie van druk en temperatuur had aangetoond dat de druk en de temperatuur in de drukgenerator veel te laag was en dat het primaire water waarschijnlijk aan het koken was, maar dat heeft de eerste nachtploeg nooit geverifieerd.

Het primaire circuit bevat ongeveer 400 kubieke meter water, en het grootste deel van dat volume bevindt zich natuurlijk in het reactorvat en de drukgenerator. Om een idee te geven: dat is het volume van een zwembad van 20 meter op 10 meter, 2 meter diep.

5.2.f Waterbehandeling

In de vorige delen hebben we de “grote componenten” van het primaire circuit besproken, die de principiële functies van een kerncentrale op zich nemen. Maar er zijn natuurlijk verschillende kleinere systemen die een essentiële functie vervullen. Zo is er het water controle systeem. Het onttrekt in normale omstandigheden van de orde van 20 ton water per uur aan het primaire circuit (en voegt natuurlijk ook weer ongeveer 20 ton water toe aan dat circuit). Een eerste functie bestaat erin uit de balans van het onttrokken water en het teruggepompte water, het precieze waterniveau in het primaire circuit (en dus de waterhoogte in de drukgenerator) te regelen.

Het water dat onttrokken wordt aan het primaire circuit wordt eerst afgekoeld (laten we niet vergeten dat het primaire circuit onder normale omstandigheden rond de 300 graden warm is) – de warmte wordt uitgewisseld met het water dat teruggepompt wordt in het primaire circuit – en ontspannen (geen druk meer van 160 bar, maar van 2 bar).

De voornaamste rol van het water controle systeem is het aanpassen van de concentratie aan boorzuur (die de “langzame” regeling van de reactor bepaalt): er wordt ofwel boorzuur, ofwel gedemineraliseerd water toegevoegd. Anderzijds wordt het water gefilterd (eventueel kleine stukjes roest of zo in suspensie) en chemisch gezuiverd (met ionen uitwisselaars), en wordt de pH gecontroleerd (eventueel toevoegen van reagentia). Eventuele opgeloste zuurstof wordt onttrokken, en de waterstofinhoud wordt gecontroleerd. Uiteraard past men ook verschillende chemische en radiologische analyses toe die toelaten na te gaan of er beschadigde brandstofstaven in de reactor aanwezig zijn . Het geherconditioneerde water wordt terug in het primaire circuit gepompt.

Dit systeem bevat ook een groot reservoir boor-rijk water dat kan dienen om in geval van incident de reactor subkritisch te maken.

Het spreekt vanzelf dat het hele waterbehandelingssysteem heel wat complexer is dan hier is aangehaald, en we hebben hier enkel de belangrijkste functies van dat systeem besproken.

Een ander systeem is het dubbele koelsysteem bij lage activiteit. Inderdaad, eens de temperatuur onder de 180 graden daalt, zijn de stoomgeneratoren geen efficiënte koelsystemen meer. Om het primaire circuit verder af te koelen, heeft men twee extra koelsystemen ingebouwd. Bij normale werking zijn deze circuits van het primaire circuit geïsoleerd. Zij dienen voornamelijk om, na het stoppen van de reactor, het water tot lage temperatuur af te koelen. Zij kunnen natuurlijk ook de functie van nood koelsysteem opvangen. Een lage-temperatuur koelsysteem heeft een debiet van 1000 ton per uur.

Zij hebben trouwens nog een andere functie. We hebben gezien dat de drukgenerator de druk in het primaire circuit constant houdt, tenminste zolang er zowel stoom als water in aanwezig is. Maar als het primaire circuit koud wordt, en de verwarmingselementen van de drukgenerator uitgeschakeld zijn, dan gaat de stoom verdwijnen, en is het primaire circuit vol met vloeibaar water. Er is dan geen “ontspanningsruimte” meer (de eerdere stoombel), en een druk-schokgolf (waterslag) kan zich dan gemakkelijk voortplanten in het hele primaire circuit. We zullen bovendien (materiaal sectie) zien dat het reactorvat het “breekbaarste” is bij lage temperatuur. Als dusdanig dient men schokgolven te vermijden. Het lage-temperatuur koelsysteem zorgt voor de buffering van de druk, om waterslag tegen te gaan.

5.2.g Noodsystemen

Er bestaan 3 noodsystemen die te maken hebben met het primaire circuit:

- het nood-injectiesysteem: het is een systeem dat extra water in het primaire circuit kan pompen in geval van een grote lek in het primaire circuit, of in het geval van een koelprobleem.
- het nood-voedingssysteem van de stoomgeneratoren: toevoegen van koud water in het secundaire deel van de stoomgeneratoren (indien het gewone secundaire circuit buiten dienst is): de stoom kan eventueel aan de atmosfeer worden vrijgegeven
- intern koelsysteem van de bunker: dit is het ultieme veiligheidssysteem, dat druk en temperatuur in de bunker controleert in geval van zwaar ongeluk, om te vermijden dat de integriteit van de bunker door temperatuur of druk in gedrang komt.

De noodsystemen zijn zo ontworpen, dat ze op elk ogenblik minstens 1 falen van hun componenten kunnen opvangen, vandaar dat de meeste onderdelen dubbel zijn uitgevoerd.

Het nood-injectie systeem dient om het hart van de reactor steeds onder water te houden in het geval van een breuk in het primaire circuit. Het systeem dient ook om plots een grote hoeveelheid boorwater in het primaire circuit kunnen te pompen. Dat is een functie die nodig kan zijn in het geval van het breken van de stoomleidingen van een stoomgenerator. Inderdaad treedt bij zulk een breuk een plots ontspannen van het secundaire circuit op, en het hevig koken van het secundaire water, wat voor een grote afkoeling van het primaire water zorgt. Zo een sterke afkoeling laat natuurlijk de “passieve veiligheid” omgekeerd werken, en zou de reactor naar een groter nucleair vermogen brengen, wat op dat ogenblik natuurlijk niet gewenst is. Een onmiddellijk “aanzuigen” van boorrijk water stopt de reactor in dat geval onmiddellijk, indien de actieve controlesystemen (regelstaven) ondertussen niet gereageerd hebben. Een derde type incident waar het nood-injectiesysteem kan tussenkomen, is bij de breuk van een U-vormige buis in een stoomgenerator, wat tot een lek en tot drukverlies in het primaire circuit kan leiden.

Het nood-injectiesysteem bestaat uit pompen die water beginnen te injecteren van zodra de druk onder de 110 bar daalt in het primaire circuit enerzijds, en uit grote reservoirs water die passief boor-rijk water injecteren van zodra de druk daalt onder de 40 bar. Tenslotte is er nog een derde systeem dat water kan inpompen aan groot debiet eens de druk onder de 20 bar is gedaald, verbonden aan een reservoir van 3000 kubieke meter. Maar het bestaat ook uit recuperatiepompen die het uitgelekte water op de bodem van de bunker terug in het reservoir kunnen brengen. Er zijn heel wat tussenkomst mogelijkheden met dit systeem. Er zijn nog extra elementen aanwezig, zoals mobiele pompen en koppelingen tussen alle noodsystemen. Bijvoorbeeld kan men bij simultane panne van alle pompen van het nood-injectiesysteem, een mobiele hulppomp, of een pomp van het intern koelsysteem van de bunker gebruiken als injectiepomp. We gaan dit complexe geheel niet beschrijven. Het is ontworpen in functie van een studie van vele denkbare scenario's, ook al zijn die vrij onwaarschijnlijk.

Het nood-voedingssysteem van de stoomgeneratoren dient om warmte af te voeren van de stoomgeneratoren, als dat op de normale manier (namelijk, stoomvorming in het secundaire circuit) om een of andere reden niet kan doorgaan. Inderdaad heeft men de koeling via de stoomgeneratoren nog wat nodig bij het stoppen van de reactor tot het koelsysteem bij lage activiteit de afkoeling kan overnemen. Omdat het hier weer om een noodstelsel gaat, is het dubbel uitgevoerd. Het bestaat essentieel uit een groot waterreservoir (ongeveer 1700 kubieke meter) en een waterpomp met onafhankelijke dieselveeding, die het water in de stoomgeneratoren kan pompen, evenals een stoom-aangedreven turbopomp die kan werken op de stoom zelf van de stoomgeneratoren (zolang er warmte, en dus stoom is, kan die pomp dus op eigen kracht verder water in de stoomgeneratoren pompen).

Het intern koelsysteem van de bunker zelf bestaat enerzijds uit een sprenkelsysteem dat water kan verspreken in de bunker om die af te koelen, en anderzijds uit een afpompsysteem dat het water kan onttrekken aan de bunker. Het is ook uitgerust met een extern, onafhankelijk koelsysteem. Er is ook een chemisch injectiesysteem aanwezig dat het toelaat om chemicaliën aan het water toe te voegen, naargelang de noden. Als dusdanig is het mogelijk om in het geval van een volledig falen van het primaire circuit, de residuele warmte van de (vrijgekomen) brandstof te evacueren.

Omdat de veiligheids- en controlesystemen van een kerncentrale op elektriciteit werken, is een elektrische voeding natuurlijk noodzakelijk. De normale elektrische voeding is natuurlijk het lichtnet, maar indien het lichtnet gestoord is, kan een centrale in "eiland-mode" bij laag nucleair vermogen, zichzelf van elektriciteit voorzien. Men dient ook te beseffen dat een kerncentrale steeds is aangesloten op minstens twee onafhankelijke elektrische hoogspanningsleidingen. Als dusdanig moeten er dus reeds twee onafhankelijke pannes aanwezig zijn op het lichtnet, alvorens de normale elektrische voeding in het gedrag komt.

Het is enkel bij het falen van de twee externe lichtnet aansluitingen, en bij het niet in eiland-mode werken van de centrale, dat er potentieel een elektrisch voedingsprobleem is. Om hieraan te verhelpen, zijn er twee onafhankelijke groepen dieselgeneratoren aanwezig op de site, evenals een stel accumulatoren. Bovendien bestaat er nog een mobiele generatorgroep die men kan aanwenden waar men wil, en zijn de essentiële veiligheidssystemen uitgerust met hun eigen, kleine, noodgeneratoren.

Een vanzelfsprekend noodstelsel is natuurlijk het laten vallen van alle controlestaven, een actie die de reactor onmiddellijk stopt. De noodsystemen worden automatisch geactiveerd als bepaalde werkingsparameters van de centrale zekere grenzen. Welke noodsystemen wanneer in actie treden is bepaald door algorithmen die op punt gesteld zijn bij de bestudering van verschillende mogelijke scenario's. Deze acties zijn geen "domme automatismen", maar elk van deze geautomatiseerde

acties is verregaand bestudeerd. Natuurlijk kan de controlekamer ook beslissen om bepaalde noodsignalen te activeren. De bedoeling van al deze systemen is in de eerste plaats om de integriteit van de 3 barrières te vrijwaren: de wand van de brandstofstaven, het reactorvat, en de bunker.

Zoals men ziet, zijn deze kerncentrales uitgerust met een heel stel veiligheidssystemen. Zij zijn ontworpen en bestudeerd in het kader van de “verdediging in diepte”, en men begrijpt nu misschien een beetje beter wat hiermee concreet bedoeld wordt: er moeten heel veel verschillende dingen simultaan fout gaan alvorens men geen “pijlen op zijn boog meer heeft”. Vandaar dat alarmistische berichten zoals “in kerncentrale X heeft men ontdekt dat pomp Z niet goed werkte, we zaten bijna met een nieuw Chernobyl opgescheept” totaal ontdaan zijn van enige vorm van realiteit. Wiskundig gezien is het natuurlijk juist dat de kans niet precies nul is: het is inderdaad niet wiskundig onmogelijk dat bijvoorbeeld een probleem voorkomt in het secundaire circuit, dat de motorpompen van de twee onafhankelijke nood-voedingssystemen van de stoomgeneratoren niet werken, dat de turbopompen van die twee circuits niet werken, dat de twee nood-injectie systemen in het primaire circuit niet werken, dat er net op dat ogenblik de twee onafhankelijke externe elektrische netten in panne vallen, dat de twee onafhankelijke dieselgeneratoren niet opstarten, dat de kleppen van het passieve injectiesysteem niet werken, dat de mobiele generatorgroep niet werkt, dat het intern koelsysteem van de bunker niet werkt... ja, als dat allemaal tegelijk voorvalt, en als men niets gaat ondernemen om hieraan iets te verhelpen in de komende uren/dagen dan begint men een probleem te krijgen, en gaat er misschien wel eens wat radioactiviteit vrijkomen, maar we zijn nog altijd mijlen ver van Chernobyl.

5.3 Werkingsmoden van een kerncentrale

5.3.a Elektriciteitsproductie

De normale werkingsmode van een kerncentrale is natuurlijk de elektriciteitsproductie voor het lichtnet. Het lichtnet heeft de onhebbelijke eigenschap van zo goed als geen eigen “inertie” te bezitten ; dat wil zeggen dat de “opslagcapaciteit” van elektriciteit in het lichtnet zo goed als onbestaande is, en dat impliceert dat in het lichtnet, op elk ogenblik productie en verbruik van elektrische energie precies aan elkaar gelijk zijn. Er is natuurlijk wel enige inertie in het lichtnet, maar die is indirect, en bestaat eigenlijk uit de rotatie-inertie van alle generatoren die eraan zijn gekoppeld: men kan gaan putten in de mechanische energie opgeslagen in de rotatiebeweging van de generatoren. Dat kan ons een aantal seconden “kopen”, maar niet meer. Het lichtnet heeft een nominale elektrische spanning (in de meeste Europese landen is dat 230V effectief) en een zekere frequentie (in Europa is dat 50 Hz). De meeste (maar niet alle) elektrische verbruiksystemen zijn zo, dat als de spanning stijgt, zij meer vermogen opnemen, en als de spanning daalt, zij minder vermogen opnemen.

De elektrische generatoren zijn meestal synchrone generatoren. Een synchrone generator bestaat enerzijds uit een draaiend deel (de rotor) en anderzijds uit een stilstaande omhulling waarin zich wikkelingen van elektrische geleiders bevinden (de stator). De rotor bestaat uit een elektromagneet die door een gelijkstroom gevoed wordt. Als dusdanig heeft men een magnetisch veld dat synchroon (vandaar de naam) met de rotor meedraait, en men gaat in de wikkelingen van de stator een wisselspanning opwekken, waarvan de frequentie uiteraard synchroon gaat zijn met de rotatiesnelheid van de rotor. De opgewekte spanning in de stator is evenredig met de gelijkstroom die men aan de rotor oplegt, evenals met de frequentie (dus met de rotatiesnelheid van de rotor),

indien de generator “vrij” is. Men kan als dusdanig gemakkelijk de spanning geleverd door de generator regelen door in te spelen op de gelijkstroom van de rotor. Daarentegen, indien de generator aangesloten is op het lichtnet, dan kan de generator natuurlijk de spanning van het hele lichtnet niet veranderen. Men dient in dat geval de rotor-stroom zo te regelen, dat de spanning hierdoor opgewekt in de stator ongeveer gelijk is aan de spanning van het lichtnet, want anders gaat er een veel te grote stroom vloeien die de geleiders van de generator kan stukmaken. Men zou nu kunnen denken dat als men een iets hogere spanning in de generator opwekt dan het lichtnet, dat de generator “stroom aan het lichtnet” levert, en vice versa, maar de zaken zijn ingewikkelder, en het valt wat buiten het kader van dit werk om hier heel diep op in te gaan. Het essentiële is dat *als de rotor “vooruitloopt” op het lichtnet, dat de generator dan vermogen aan het lichtnet levert, en als hij “achterloopt”, dan werkt hij eigenlijk als motor* (het lichtnet levert vermogen aan de “generator”). Hoe meer de rotor “voorloopt” op het lichtnet, hoe meer vermogen hij levert. Als men mechanisch tracht de rotor “aan te zwengelen” (dus trachten de rotor laten voor te lopen op het lichtnet), dan gaat men hoe langer hoe meer vermogen leveren. Hoe meer vermogen de generator aan het lichtnet levert, hoe harder de magnetische krachten in de generator de rotor gaan “remmen” en men gaat dus een evenwicht vinden waarbij het mechanische vermogen aan de rotor geleverd precies gelijk is aan het elektrische vermogen die de generator aan het lichtnet levert. Als in het hele elektriciteitsnet meer elektriciteit verbruikt wordt dan er geleverd wordt, dan kan men tonen dat het *netto effect van een groter verbruik dan productie niet alleen is dat de spanning van het lichtnet wat gaat dalen, maar voornamelijk dat de frequentie gaat afnemen* omdat alle generatoren die aan het net zijn gekoppeld, aan het vertragen zijn.

Voor de dagelijkse planning van de elektriciteitsproductie gaat men als volgt te werk. Men tracht een voorspelling van het vermogenverbruik van het lichtnet te maken, gebaseerd op technische en sociaal-economische criteria – het merkwaardige is dat men dat nu vrij goed kan. Als dusdanig stelt men een planning op, en draagt men aan verschillende centrales een dag-plan op dat het verloop van het te leveren vermogen aangeeft. Maar natuurlijk is die voorspelling niet helemaal precies juist (en soms kan die zelfs ernstig afwijken als onvoorzien verbruik optreedt).

De afwijking van de netfrequentie van de nominale waarde (50 Hz) zal dan het signaal zijn dat aangeeft hoeveel vermogen men meer of minder aan het net dient te geven dan gepland was. Men voert de volgende grootte in: $S = 100 \times \frac{\Delta F / F_0}{\Delta P / P}$, het zogenaamde statisme – hierin staat F voor de frequentie en P voor het vermogen. In Frankrijk stelt men dat gelijk aan 4. Het wil zeggen dat als men een frequentieafwijking vaststelt van de nominale frequentie $F_0 = 50$ Hz van zeg maar, 0.1%, dat het vermogen dan met 2.5% moet veranderen van het geplande vermogen. Met andere woorden, het statisme is de gevoeligheid waarmee men de vermogenproductie gaat bijsturen vanaf de planning ten gevolge van het “signaal” van de frequentieverandering van het lichtnet¹²⁶. Let wel dat dit een “beslissing” is, en geen “eigenschap” van het systeem: hoe groter de gekozen waarde voor het statisme, hoe “nerveuzer” men reageert op een afwijking van de netfrequentie. Dat houdt een compromis in: enerzijds zou men een perfecte balans willen en dus een heel hoge waarde van het statisme, maar anderzijds wil men geen te bruuske besturing van de centrales.

¹²⁶Voor de specialisten: men herkent hier duidelijk een proportionele regelaar. Zoals uit de regeltheorie gekend is, kan een proportionele regelaar nooit de fout volledig wegwerken. Naast het “statisme” signaal wordt daarom, op nationaal niveau, ook een “integrerend” regelsignaal uitgestuurd, die de lange-termijn afwijking van de frequentie van het lichtnet wegwerkt. Maar dat is een klein en traag variërend signaal, dat hier op geen enkele wijze in de argumentatie een rol speelt en enkel maar een technisch detail is. Men bekomt op die wijze, een PI-regeling zonder eindfout.

Men verdeelt, volgens een zekere planning, het park kerncentrales in in centrales die als “basislast” zullen werken, en centrales die in “volgmode” zullen werken. De centrales in basislast gaan aan constant vermogen (meestal het nominale vermogen) werken, de anderen gaan een planning volgen, en ook deelnemen aan de ogenblikkelijke regeling zoals hierboven uiteengezet.

De verbruikingsprofielen zijn heel verschillend van dag tot dag. Een typische winterdag in Frankrijk laat bijvoorbeeld het verbruik variëren van een minimum van 55 GW om 5 uur 's morgens tot een bijna constante waarde van 70 GW gedurende de dag, en dan een avondpiek rond 19 uur van 72 GW. Een vakantiedag in de zomer geeft ons eerder een minimum van 29 GW om 7 uur 's morgens, en twee uitgesproken pieken van 41 GW om 13 uur en om 23 uur. De veranderingen zijn gemiddeld van de orde van 1% per minuut, en variaties die groter zijn dan 2% per minuut komen minder dan 1 keer op honderd voor. Als dusdanig liggen de meeste “normale” variaties van het stroomverbruik volledig binnen de regelmogelijkheden van kerncentrales (die, laten we niet vergeten, tot 5% per minuut kunnen variëren). Het is enkel in het geval van incidenten (het plots uitvallen van een deel van het netwerk, of het terug inschakelen van een gerepareerd netwerk) dat de variaties bruusker kunnen zijn. Laten we niet vergeten dat een centrale ook ogenblikkelijk 10% variaties kan opvangen. Men tracht echter de regeling van een centrale in de mate van het mogelijke zo zacht mogelijk te maken.

Maar niettemin ziet men hier dat het perfect mogelijk is om louter door regeling van het park kerncentrales, aan de overgrote meerderheid van de verbruikingsprofielen perfect te voldoen. *Dat spreekt dus het argument tegen dat “kerncentrales, net als wind- of zonne-energie, ook een grote hoeveelheid gascentrales nodig hebben om de pieken op te vangen”, zoals men vaak hoort als totaal foutief argument.* Men heeft geen nood aan fossiele centrales, tenzij misschien enkele snelle gasturbines om in heel uitzonderlijke gevallen een hele sterke piek op te vangen ; maar een zekere capaciteit hydro-elektriciteit kan dezelfde functie vervullen.

Indien de centrale in “basislast” werkt, dan is de regeling vrij eenvoudig: men houdt de elektriciteitslevering constant – meestal gelijk aan het nominale vermogen van de centrale. Men houdt hiervoor gewoon het mechanische vermogen geleverd door de turbine constant. Als dusdanig leveren de stoomgeneratoren een constant stoomdebiet, en levert de reactor een constant nucleair vermogen. Niets is eenvoudiger. Het enige wat men dient te doen, is een hele trage aanpassing ten gevolge van de opbouw van de absorptie door fissieproducten, en de verminderende reactiviteit door het opgebruiken van de brandstof. Men kan dat gemakkelijk doen door in te spelen op de boorzuur concentratie in het primaire water. Dit was de oorspronkelijke regelmode van een kerncentrale in de jaren '70, en het is hier dat de bewering dat kerncentrales enkel in basislast kunnen werken, haar oorsprong vindt. Zolang kernenergie een minderheidsbijdrage is in de energieportefeuille, heeft men er inderdaad voordeel bij om ze in basislast te gebruiken, want op die manier benut men de investering in de centrale maximaal. Men kan aantonen dat, gezien een kerncentrale duur is in investering, en goedkoop in brandstof, men er alle economisch voordeel bij heeft om ze maximaal te gebruiken. Voor een centrale waar de brandstof duur is en de investering goedkoop (een gasturbine), heeft men er voordeel bij ze “zo min mogelijk” te gebruiken, en dus enkel in het geval van noodzaak, zoals piekbelasting.

Maar toen kernenergie het hoofdaandeel werd in Frankrijk, had men nood aan meer flexibiliteit, en dat is zonder probleem ingevoerd met de speciale regelstaven waarvan eerder sprake. Men noemt die functiewijze: “prioritaire turbine”: de reactor moet zich aanpassen aan het vermogen (de stoom) die men beslist aan de turbine te leveren, met een zo klein mogelijke variatie van de essentiële parameters van de reactor (temperatuur, druk), om de transitie belasting op de reactor elementen zo klein mogelijk te maken. Het stoomdebiet naar de turbine (en dus het mechanisch

turbinevermogen, en door reactie, het geleverde elektrische vermogen van de alternator aan het lichtnet) wordt geregeld door een grote klep aan de uitgang van de stoomgeneratoren. Nu bestaat er ook een “kortsluiting” van de turbine, die de stoom direct van de stoomgenerator naar de condenser leidt. Als dusdanig kan men wel bruusk het turbine vermogen verminderen, zonder dat het nucleaire vermogen onmiddellijk moet volgen, maar men “verspilt” op die manier natuurlijk energie.

Gezien de drukgenerator (en het geassocieerde regelsysteem van de temperatuur in de drukgenerator en het niveau van de vloeibare fase, via het water controle systeem) ervoor zorgt dat de druk in het primaire circuit zo goed als constant blijft, zelfs onder variërend vermogen, dient men er enkel voor te zorgen dat de temperatuur van het primaire circuit constant blijft.

Om het nucleaire vermogen aan te passen, gaat men de regelstaven besturen met een regelsysteem dat tracht de gemiddelde primaire watertemperatuur constant te houden. Indien men meer stoom vraagt (omdat men een hoger turbine vermogen vraagt), gaat de natuurlijke tendens het afkoelen van het primaire water zijn (meer warmte wordt nu afgestaan in de stoomgeneratoren). Het regelsysteem dat de gemiddelde primaire watertemperatuur meet, gaat trachten die temperatuursdaling tegen te gaan door de staven wat meer uit te trekken, en dus een groter nucleair vermogen te bewerkstelligen, zodat het primaire water meer warmte krijgt, en dus terug gaat opwarmen. Men gaat het nucleaire vermogen op die manier aanpassen aan de vraag door de turbines, bij een minimale wijziging van de temperatuur. Een regeling bij constante temperatuur beperkt de volumevariëaties in de drukgenerator, zodat ook de (kleine) drukvariëaties die hiervan het gevolg zijn, nog verder beperkt worden. In werkelijkheid is de regeling wat ingewikkelder: sommige regelstaven worden geplaatst als functie van het gevraagde vermogen terwijl andere regelstaven gaan reageren als functie van de gemeten temperatuur, maar op die technische details gaan we hier niet verder in.

De enige parameter die sterk verandert is het nucleaire vermogen, en de bijhorende neutronenflux en productie van fissieproducten. De andere parameters (druk en temperatuur) variëren maar heel weinig tijdens deze regelacties.

5.3.b Eiland mode

Indien belangrijke storingen op het elektriciteitsnet aanwezig zijn (kortsluiting bijvoorbeeld), dan koppelt men de alternatoren los van het lichtnet. Men tracht te vermijden de reactor stil te leggen om twee redenen: ten eerste dient men waarschijnlijk, eens de storingen van het lichtnet opgelost zijn, terug vermogen te leveren aan dat lichtnet, en anderzijds heeft men nu een gestoord lichtnet, zodat indien de reactor stopt, men reeds 1 stapje verder is op het pad naar “geen elektrische voeding meer”. Men gaat eerder de reactor werkende houden bij laag vermogen, waarbij de alternatoren zelf de centrale voeden. Dat is wat men “eiland-mode” noemt: de centrale is volledig autonoom en kan in die mode zo lang blijven werken als men wil. Nu is het natuurlijk zo dat bij het plots loskoppelen van de alternatoren van het lichtnet, deze zo goed als geen vermogen meer leveren. Men gaat plots veel minder stoom leveren aan de turbines als men wil vermijden dat die gaan versnellen, en in eerste plaats gaat men gewoon de stoom “kortsluiten” naar de condensor, op het kleine deel na dat nodig is om de turbines en dus de alternatoren nog te voeden. Dit vermogen komt neer op ongeveer 2% van het nominale vermogen. Vervolgens gaat men het nucleaire vermogen langzaam verminderen (het is nutteloos om bij nominaal vermogen 98% van de stoom te verspillen), tot ongeveer 30% van het nominale vermogen. Men dient dus ongeveer 28% van het vermogen te “verspillen” in de condensor tijdens de eilandmode. Men is op die manier wel ogenblikkelijk terug

operationeel. Indien de eilandmode lang moet duren, dan is het wel mogelijk om naar lagere vermogens te gaan. Een andere reden om niet onmiddellijk naar hele lage nucleaire vermogens te dalen is dat men wil vermijden dat er een sterke opbouw van xenon-vergiftiging optreedt in de reactor, wat, zoals we gezien hebben, de besturing minder stabiel maakt.

Het minimum nucleaire vermogen is ongeveer 2% van het nominale vermogen. Hieronder wordt het moeilijk zometer onmogelijk om de reactor kritisch te houden. Beneden de 30% nominaal vermogen heeft men gedeeltelijk een manuele regeling nodig. Men kan op die manier lange tijd in eilandmode blijven.

Omdat het afschakelen van de turbine een nogal bruuske operatie is, is het onvermijdelijk dat er een drukpiek (van ongeveer 5 bar, verdwijnt na een 30-tal seconden) en een temperatuurspiek (van ongeveer 10 graden, verdwijnt na een 10-tal minuten) optreden in het primaire circuit.

Het terug aankoppelen van de alternator aan het (gerepareerde) lichtnet is een veel zachtere operatie: na het hersynchroniseren van de alternator met het lichtnet, gaat men langzaam de stoomkortsluiting naar de condensor verminderen, en dus evenredig het turbinevermogen verhogen, tot de turbine aan het nucleaire vermogen draait (ongeveer 30% van het nominale vermogen). Nadien kan men progressief het vermogen van de centrale terug verhogen tot aan de richtwaarde.

5.3.c Stop-toestanden

Van zodra de reactor sub-kritisch is (wat op elk ogenblik kan bekomen worden door het laten vallen van de controlestaven), is men in een stop-toestand. In dat geval is het ogenblikkelijke nucleaire vermogen nul, maar er kan natuurlijk nog een redelijk vermogen ontwikkeld worden door radioactief verval van de fissieproducten. Dat is gelijk aan 5% van het nominale vermogen gedurende de eerste seconden na het stoppen, en daalt tot minder dan 1% na 2 uur. Naargelang de thermodynamische toestand van het primaire circuit, heeft men verschillende stop-toestanden:

- warme stop-toestand: het primaire water staat nog steeds onder nominale druk (155 bar) en temperatuur is nog vrij hoog (ongeveer 290 graden). Het residuele vermogen (radioactief verval) wordt afgevoerd door de stoomgeneratoren.
- intermediaire stop-toestand: het residuele vermogen wordt afgevoerd door het koelsysteem bij lage activiteit, de drukgenerator is buiten werking (is volledig gevuld met vloeibaar water).
- koude stop: de druk in het primaire circuit is beneden de 25 bar gedaald, het koelsysteem bij lage activiteit is in werking.
- volledige stop: het primaire circuit is onder atmosferische druk, de temperatuur is beneden de 60 graden. Deze toestand is nodig in het geval van een interventie of een brandstofwissel.

Het is belangrijk op te merken dat in geen enkele stop-toestand, de primaire pompen noodzakelijk zijn, hoewel men ze in de warme stop-toestand, wanneer ze beschikbaar zijn, wel laat functioneren.

5.3.d Opstarten van een koude reactor.

In een eerste fase wordt het primaire circuit, indien dat niet het geval was, volledig gevuld met water met het juiste boorgehalte. Een drukpomp plaatst het primaire circuit onder een druk van 25

bar. Men start even de primaire pompen op om eventuele gasbellen op te vangen aan de bovenkant van het reactorvat of van de drukgenerator (het hoogste punt van het primaire circuit), en die gassen worden geëvacueerd. De stoomgeneratoren worden met secundair water gevuld.

De primaire pompen worden vervolgens ingeschakeld om het water op te warmen (inderdaad levert elke pomp 6 MW!). Hiervoor is het nodig dat de centrale op het lichtnet is aangesloten (een centrale kan niet zelfstandig vanuit een koude toestand opstarten). De verwarmingselementen van de drukgenerator worden ingeschakeld. Men werkt nog steeds onder 25 bar (bepaald door een pomp in het waterbehandelingscircuit). Van zodra het water in de drukgenerator begint te koken, vormt er zich stoom in de drukgenerator, en men laat de stoom het waterniveau in de drukgenerator dalen, tot de richtwaarde hiervan wordt bereikt. Op dat ogenblik sluit men de drukpomp af, en regelt men de watertoevoer in functie van het watergehalte in de drukgenerator. Als dusdanig gaat de druk in het primaire circuit nu stijgen als functie van de temperatuur in de drukgenerator, en men laat die stijgen tot aan de nominale waarde. De primaire pompen warmen ondertussen het primaire water op tot aan de nominale temperatuur (290 graden), en die temperatuur wordt dan gestabiliseerd door het afdalen van wat stoom in de stoomgeneratoren. We hebben nu de warme stoptoestand bereikt!

Op dat ogenblik laat men de reactor divergeren, en brengt men het nucleaire vermogen op ongeveer 5%. De stoom van de stoomgeneratoren gaat nu de turbines aandrijven, tot de alternatoren synchroon draaien met het lichtnet. Men koppelt de alternatoren aan het lichtnet, en laat het nucleaire vermogen langzaam stijgen. De automatische vermogenregeling wordt ingeschakeld. De centrale is operationeel.

Hoofdstuk 6 Nucleaire brandstof en afval

6.1 Inleiding: brandstof en brandstof cycli

6.1.a Welke brandstoffen ?

Het woord “brandstof” komt eigenlijk uit de scheikunde. Er zijn verschillende stoffen die een chemische reactie kunnen ondergaan met zuurstof (uit de lucht), en waarbij energie vrijkomt ; zoveel energie zelfs, dat de temperatuur van de reagerende stoffen hoog oploopt, tot een duizendtal graden. De interessantste stoffen zijn die waarbij die reactie niet spontaan optreedt, maar enkel als ze bij hoge temperatuur in contact gebracht worden met zuurstof. In dat geval kunnen we zonder problemen de stof in kwestie aan zuurstof blootstellen zonder dat er iets gebeurt zolang ze koud is, en het volstaat om de stof (of een heel klein beetje van de stof) voldoende te verhitten om de reactie met zuurstof op gang te brengen. De temperatuursverhoging die die reactie meebrengt (door het vrijgeven van de bindingsenergie) zal wat omliggende stof voldoende verhitten zodat die op haar beurt kan gaan reageren, enzovoort. We hebben hier, met andere woorden, een kettingreactie! Deze kettingreactie is de mens reeds bekend sinds verschillende tientallen duizenden jaren en hij noemt dat: *vuur*. Een stof die aan bovenstaande vereisten voldoet, namelijk: brandt niet spontaan (als ze koud is), kan bij verwarming reageren met zuurstof, en levert hierbij zoveel energie dat de omliggende stof genoeg verhit wordt om op zijn beurt te reageren, noemt men een *brandstof*.

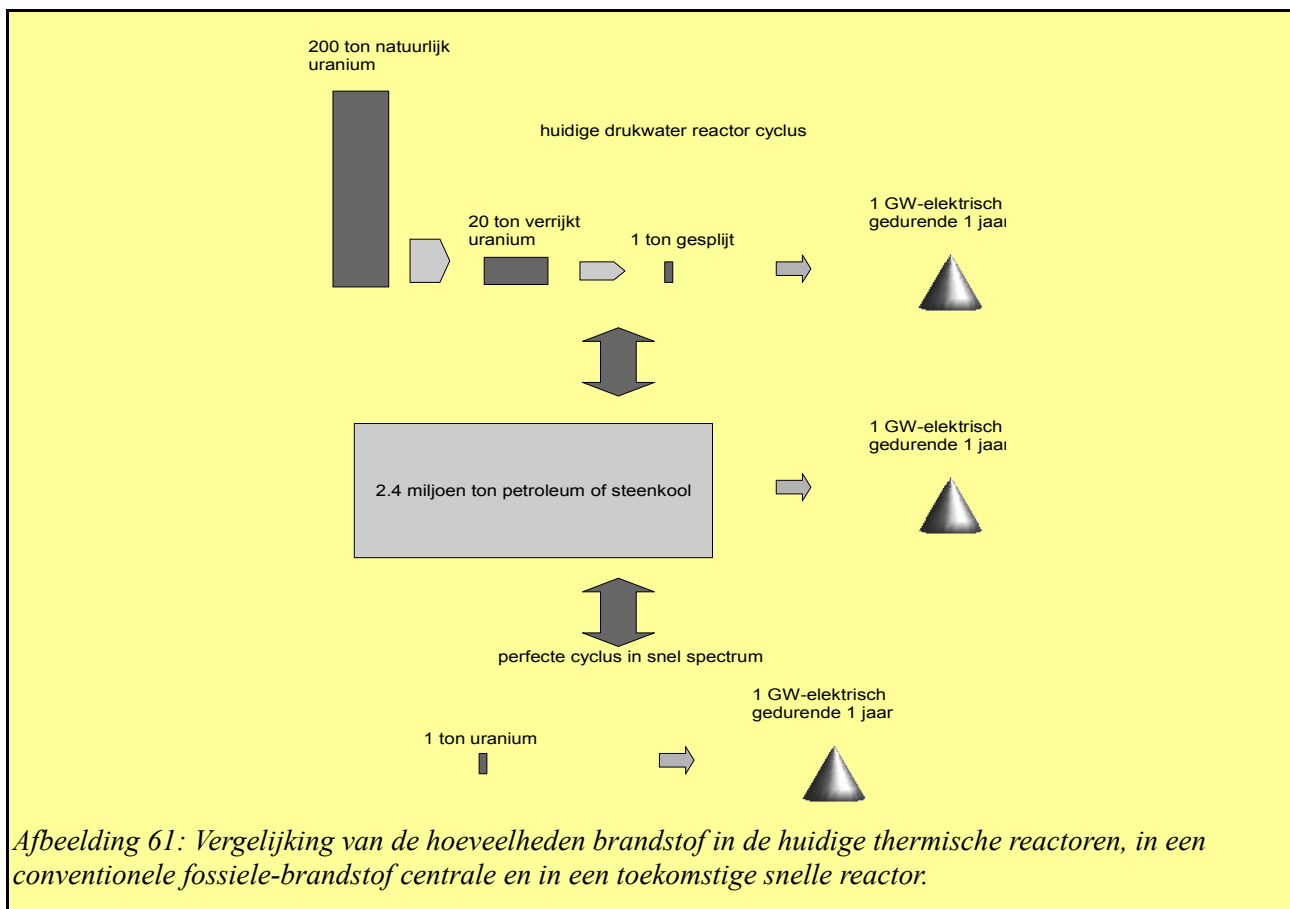
Naar analogie noemt men sommige stoffen “nucleaire brandstoffen”, maar het spreekt vanzelf dat ze niks te maken hebben met enige chemische reactie met zuurstof. Een nucleaire brandstof is een stof die (direct of indirect) aanleiding kan geven tot een splijtingskettingreactie waarbij energie vrijkomt. Het zijn de splijtbare nucliden en indirect, de “vruchtbare nucliden”. De splijtbare nucliden zijn nucliden die een splijtingsreactie kunnen ondergaan met een thermisch neutron en hierbij meer dan 1 neutron opleveren, op zulke wijze dat er potentieel een kettingreactie kan ontstaan. De vruchtbare nucliden zijn nucliden die via thermische neutron vangst kunnen omgezet worden in splijtbare nucliden.

Men vindt in de natuur splijtbare en vruchtbare nucliden in de rij chemische elementen die men de actiniden noemt, en die zware atomen vanaf element nummer 89 (actinium Ac) voorstellen. De natuurlijke actiniden zijn actinium (89), thorium (90), protactinium (91), en uranium (92). Kunstmatig wordt daaraan een hele resem toegevoegd waarvan voor ons van enig belang zijn: neptunium (93), plutonium (94), americium (95), curium (96) en californium (98). Men noemt de actiniden neptunium, americium, curium en californium ook de *kleine actiniden*. De reden hiervoor is dat ze meestal in kleine (en vaak ongewenste) hoeveelheden geproduceerd worden in kernreactoren – waar ze trouwens voor wat last zorgen.

Natuurlijk uranium bestaat voor 99.3% uit U-238 en voor 0.7% uit U-235. U-235 is een splijtbare nuclide, U-238 is een vruchtbare nuclide, die kan omgezet worden in Pu-239, een splijtbare nuclide, net zoals Pu-241. U-233 is ook een splijtbare nuclide, maar komt bijna niet voor in de natuur. Er bestaat echter een reactie die lijkt op de conversie van U-238 in Pu-239: natuurlijk thorium (100% Th-232) kan neutronvangst ondergaan. Dat verandert Th-232 in Th-233 dat onstabiel is, en met een halfwaardetijd van 22 minuten een bèta-verval ondergaat naar Pa-233 dat op zich ook weer met een

halfwaardetijd van 27 dagen een bèta-verval ondergaat naar U-233¹²⁷. Als we natuurlijk thorium bestralen met thermische neutronen, dan produceren we U-233. U-233 is ongeveer even splijtbaar als U-235 of Pu-239 ; men denkt zelfs, ook al is het waarschijnlijk nooit geprobeerd, dat men een nucleair wapen met U-233 kan bouwen, net zoals dat kan met U-235 of Pu-239. Het voordeel van deze omzetting is dat er grotere gekende reserves thorium dan uranium zijn ; India, dat een grote hoeveelheid thorium bezit, doet onderzoek naar de industrialisering van de thorium-U-233 omzetting.

De splijtbare kernen zijn de uranium en de plutonium nucliden met een oneven massagetal: U-233 en U-235 en Pu-239 en Pu-241. De interessante vruchtbare nucliden die in de natuur kunnen gevonden worden zijn Th-232 en U-238.



De potentieel recupereerbare energie-inhoud van nucleaire brandstoffen is veel groter, per hoeveelheid massa, dan die voor chemische brandstoffen. Een van de hoogste verhoudingen “vrijkomende chemische energie” over “massa” is de verbranding van waterstofgas. Bij het verbranden van een molecule waterstofgas komt 2.8 eV vrij, en het massagetal is 2.

Bij een fissie reactie komt ongeveer 200 MeV vrij – dat hangt een beetje af van welke nuclide, en of het neutron nu snel is of niet, maar dat speelt maar op enkele procenten. Het massagetal is ook wat groter dan 200. Als dusdanig vinden we dat per massa-eenheid, we in een nucleaire brandstof ongeveer een miljoen keer meer beschikbare energie vinden dan in chemische brandstoffen. 200 MeV per atoom uranium komt neer op $200 \text{ MeV} \times N_A / 238 = 83 \text{ GJ}$ per gram of 83 TJ per

¹²⁷<http://www.nndc.bnl.gov/chart/reCenter.jsp?z=90&n=143>

kilogram. Men spreekt soms ook in de eenheid van GW-dag per ton. Een GW-dag is gelijk aan $24 \times 3600 \text{ GJ} = 86\,400 \text{ GJ}$ of 86.4 TJ . Een ton zuivere splijtstof heeft dus het potentieel om een duizendtal GW-dag te leveren. Een drukwater reactor slaagt er op dit ogenblik in om, van 4% verrijkt uranium, ongeveer 5% als splijtstof te gebruiken (via plutonium productie). Men zit aan ongeveer 47.7 GW-dag per ton verrijkt uranium en dat getal stijgt lichtjes: in 1990 zat men nog maar aan 33 GW-dag, en men hoopt van uitiem in de buurt van 60 GW-dag te komen per ton verrijkt uranium. Men zit dus nog een factor van ongeveer 20 onder het potentieel voor het verrijkte uranium ; rekening houdende met het feit dat we ongeveer 10 keer meer natuurlijk uranium gebruiken om dat verrijkt uranium te maken, hebben we dus uiteindelijk ten hoogste 0.5% van het energetisch potentieel van het natuurlijke uranium aangesproken.

Een centrale die 1 GW e produceert, met andere woorden, die 1 GJ per seconde elektrische energie produceert, produceert per jaar (in een jaar zijn er $3600 \times 24 \times 365 = 31\,536\,000$ seconden) 31.5 PJ^{128} elektrische energie, en heeft hiervoor ruwweg 3 keer meer thermische energie nodig, dus ongeveer 100 PJ. Als we die energie met petroleum leveren, dan hebben we (gebruik makende van de conventionele eenheid van 42 GJ voor een ton petroleum equivalent) 2.4 miljoen ton petroleum (2400 olympische zwembaden vol olie of steenkool) nodig om dat te leveren. Dat wordt ook geleverd door ongeveer 1000 kilogram splijtstof te splijten. Met andere woorden, de echt gebruikte brandstof in een perfecte fissiereactor stelt, per jaar, een volume voor van een reiskoffer. Maar dat is niet de hoeveelheid uranium die gebruikt wordt! Van het verrijkte uranium (4% U-235) hebben we gezien dat slechts ongeveer 5% van de kernen worden gesplitst, dat wil dus zeggen dat er 20 ton verrijkt uranium moet gebruikt worden ; 20 ton verrijkt uranium aan 4% heeft ongeveer 200 ton natuurlijk uranium nodig om geproduceerd te worden, zoals geïllustreerd in figuur 61. Met andere woorden: van 200 ton natuurlijk uranium extraheert men 20 ton verrijkt uranium (en dus 180 ton verarmd uranium), en van die 20 ton wordt ongeveer 5% ofte 1 ton effectief gesplitst in een kernreactor (druk water reactor) die daarmee 1GW e produceert gedurende 1 jaar. Het “afval” bestaat dus uit 180 ton verarmd uranium, 19 ton “onaangerakt” uranium en 1 ton splijtingsproducten. Van onze initiële 200 ton zijn er nog 199 die een energetisch potentieel hebben (vruchtbare kernen), en 1 ton die effectief is opgebruikt. Het hangt af van wat men beslist te doen met al dat materiaal.

6.1.b Brandstof “cycli”

Natuurlijk is er niets echt cyclisch aan kernenergie – het is tenslotte een irreversibele operatie. Zelfs de zonne-energie is niet cyclisch: binnen 5 miljard jaar heeft de zon al haar brandstof ook opgebruikt. Maar we hebben in de bovenstaande snelle berekening gezien dat er van 200 ton natuurlijk uranium (volledig bestaande uit splijtbare en vruchtbare kernen) slechts ongeveer 1 ton echt is opgebruikt bij een doorgang in een verrijkingsfabriek gevolgd door een drukwater reactor. In die “afgewerkte brandstof” zitten dus nog heel veel (het overgrote deel) vruchtbare en zelfs splijtbare kernen, en het is uiteraard de moeite waard in principe om die te recupereren en een tweede keer (en eventueel meer) door een reactor te laten gaan om ze op te gebruiken. Dat is het “cyclische” aan de brandstof cyclus: het feit dat kernen verschillende keren in een kernreactor kunnen gaan, alvorens ze hun (eenmalige) energie leveren. Het precieze doorstroom diagram is wat ons hier gaat interesseren.

¹²⁸De P staat voor Peta en betekent 10^{15} net zoals G staat voor Giga en 10^9 betekent, en T voor Tera staat en 10^{12} betekent.

Er is natuurlijk een heel eenvoudig diagram: de zogenaamde “open cyclus” waar, na een enkele doorgang, “alles op het stort gaat”. Van de initiële 200 ton uranium wordt dus de 180 ton verarmd uranium, evenals de 20 ton “afval” waarvan 1 ton splijtstof is opgebruikt, als afval beschouwd. Het heeft het voordeel van eenvoudig te zijn, natuurlijk. *Het is wel heel jammer dat we slechts 0.5% van het energetisch potentieel van onze 200 ton uranium hebben gebruikt en dat we met 20 keer meer radioactief afval (qua volume) zitten dan echt nodig is.*

Een andere, veel intelligenter techniek is om van de twintig ton bestraalde brandstof de splijtbare en de vruchtbare kernen via scheidingstechnieken te recupereren, en uiteindelijk slechts de ongeveer 1 ton opgebruikte splijtstoffen, die nu veranderd zijn in splijttingsproducten en onbruikbare actiniden, als echt afval te beschouwen. De scheiding kan scheikundig gebeuren, omdat het over verschillende elementen gaat, wat natuurlijk veel gemakkelijker is dan een isotoop scheiding. Er is natuurlijk wel een moeilijkheid bij al die processen: vele van deze materialen zijn hoog-radioactief. Dat maakt het proces moeilijker, maar niet onmogelijk: de Fransen en de Engelsen doen het al sinds decennia op industrieel niveau. Tenslotte zijn er ook economische overwegingen: zolang “vers” uranium heel goedkoop op de markt aanwezig is, kan het economisch de moeite niet zijn om al dat scheidingswerk door te voeren. Maar dat is niet erg: afgewerkte brandstof kan gewoon bijgehouden worden voor tientallen jaren. Het zal hoofdzakelijk de radioactiviteit van de splijttingsproducten laten afnemen. Sommige splijtbare kernen zijn wel radioactief, en zij zullen ook langzaam vervallen (en we zijn ze dan kwijt – hoewel...). Dat is het geval van Pu-241, dat in 15 jaar naar Am-241 vervalt. Maar het overgrote deel van de “energetische” kernen (voornamelijk U-238) kunnen zonder problemen voor hele lange perioden (miljoenen jaren als men wil) bijgehouden worden.

6.1.c Begin en einde van de brandstofcycli.

Natuurlijk zijn er nog twee andere aspecten aan de “brandstof cyclus”: het begin en het einde! Het begin gaat over de mijnbouw en de conditionering van vers uranium, het einde gaat over de uiteindelijke afvalbehandeling. Beide zijn belangrijke aspecten, omdat ze de sleutel vormen tot enerzijds een wetenschappelijk vraagstuk, en anderzijds een polemiek die zeer onwetenschappelijk is, en gevoed wordt door de anti-nucleaire activisten. Zij zijn erin geslaagd twee grote onwaarheden als “algemene kennis” te laten kennen, die nu trouwens geregeld zelfs door “wetenschappelijke” televisieprogramma's en andere worden verkondigd (ik heb die zelf ook jaren geloofd). Het eerste punt is *dat er niet veel uranium meer beschikbaar is, en dat bijgevolg de brandstofcyclus binnen enkele decennia zal “droog vallen”*. Het tweede punt is *dat we geen raad weten met het hoog-radioactief afval* en dat dit een onverantwoord gebeuren is: we zadelen de toekomstige generaties voor vele millennia om niet te zeggen, miljoenen jaren op met een onoplosbaar probleem. *Deze twee beschouwingen zijn, wetenschappelijk gezien, totaal fout*. In de lijn van de rest van dit werk zullen we trachten de lezer laten in te zien *waarom* die twee stellingen fout zijn, maar we kunnen nu reeds summier antwoorden.

In 1997 schatte de AIAE dat de gekende en zekere reserves die aan minder dan \$80,- per kilogram gedelfd konden worden ongeveer 2.5 miljoen ton uranium was. Die schattingen zijn in 2003 niet veel veranderd: Men schat aan ongeveer 1.7 miljoen ton de gekende en zekere reserve aan uranium voor minder dan \$40 per kilogram, aan 2.5 miljoen ton de gekende reserve aan minder dan \$80 per kilogram en aan 3.2 miljoen ton, de gekende reserve aan minder dan \$130 per kilogram. Dat zijn schattingen van de huidige gekende reserves in gekende mijnen. Het is ook wel zo dat er op dit ogenblik, en sinds bijna 20 jaar, niet veel prospectie meer gebeurd is naar uranium. Niettemin heeft men sterke aanwijzingen dat er ongeveer 15 miljoen ton op ongeveer dezelfde wijze beschikbaar

zijn als de 3.2 miljoen gekende en zekere voorraad, alleen heeft men de delfwerken niet aangevangen. Het jaarverbruik aan uranium is wereldwijd ongeveer 60 000 ton per jaar, maar de productie is sinds 1990 ongeveer slechts de helft hiervan (ongeveer 30 000 ton per jaar), gewoon omdat de grote mogendheden, die enorme stocks hadden aangelegd tijdens de koude oorlog, die stocks sinds enkele jaren op de markt brengen, wat de uranium markt helemaal heeft laten instorten. Vandaar: geen prospectie, lage verse uranium prijs, en voorlopig nog geen economische nood aan brandstofherwerking. Men dient echter te beseffen dat de vraag ondertussen in evenwicht begint te komen met het aanbod, en de prijs van natuurlijk uranium is terug aan het stijgen de laatste jaren. Op dit ogenblik is, louter economisch gezien, de “open cyclus” nog de goedkoopste, maar dat zal niet lang meer zo blijven. Ook zeewater bevat een beetje uranium, en men weet dat er ongeveer 5 miljard ton uranium in de oceanen is opgeslagen. Het probleem is natuurlijk de economie van die ontginning die op dit ogenblik totaal onrendabel is en dat nog wel voor lange tijd zo zal blijven.

De bewering dat kernenergie in elk geval niet lang kan duren (een bewering van de anti-nucleaire lobby) komt van de eenvoudige schatting: 2.5 miljoen ton beschikbaar, 60 000 ton per jaar huidig gebruik, in 40 jaar tijd is alles opgebruikt. Er bestaan variaties op dat thema: 20 miljoen ton vermoedelijk beschikbaar, vijf keer meer verbruikt dan vandaag (uitbreiding van kernenergie: alle wereld elektriciteitsgeneratie nu op kernenergie, wat, laten we niet vergeten, de wereld CO₂ uitstoot met 40% zou laten verminderen), dus ongeveer 300 000 ton per jaar, binnen 60 jaar is alles erdoor. *Er is dus minder uranium reserve dan olie-reserve en het zou dom zijn om te investeren in een technologie die nog rapper in de penurie gaat geraken dan petroleum.* Zelfs mocht dat waar zijn, als we gedurende 60 jaar de wereld CO₂ uitstoot ongeveer kunnen halveren, en dus de essentie van het klimaatprobleem voor ten minste 60 jaar uitstellen, vind ik dat zo dom nog niet. Maar bovendien is het zelfs niet eens waar. Dat is vergeten dat er 1) geen prospectie meer gebeurt en er waarschijnlijk nog veel meer uranium kan gevonden worden als we zoeken ; 2) dat we duurdere reserves niet aanspreken: mijnen met lagere inhoud en eventueel oceanen ; *en vooral 3) dat we op dit ogenblik slechts 0.5% van het energetisch potentieel van dat uranium aanspreken* – dat laatste kan naar een veel hoger percentage (100% is natuurlijk utopisch, maar zeg maar 30% tot 50%) gebracht worden via kweekreactoren. Er is tenslotte nog een vierde reden waarom dat een fout standpunt is: op aarde zijn er veel grotere gekende thorium reserves dan uranium reserves, en thorium is ook een vruchtbare brandstof, die zelfs een aantal voordelen in vergelijking met uranium heeft. Met wat we op dit ogenblik weten qua goedkope beschikbaarheid van uranium (en thorium) en technologisch kunnen doen is er gemakkelijk nog een factor van enkele malen honderd te winnen boven de naïeve schatting van 40-60 jaar. Elke stap om dat te doen is geen “princiële theoretische mogelijkheid”, maar is al ergens industrieel aangetoond. De volledige brandstofherwerking is aangetoond, en kweekreactoren zijn aangetoond op industrieel niveau. *Als dusdanig is reeds industrieel aangetoond dat we met het huidige afval nog ongeveer 100 keer meer energie kunnen recupereren dan we er reeds hebben uitgehaald, wat ons in de grootte orde van enkele millennia brengt. De huidige gekende reserves en mijnbouw dienen enkel maar om de paar decennia die nodig zijn om een park van kweekreactoren te bouwen, te overbruggen, en daar is ruimschoots voldoende voor.* Wat wel een correcte bewering is, is dat *onder de open cyclus*, met enkel maar *drukwater reactoren*, er inderdaad een penurie binnen 40-60 jaar zal optreden als er geen nieuwe reserves worden gevonden. Als dusdanig is het binnen 20-30 jaar het goede ogenblik om de drukwater reactoren die aan het einde van hun leven komen, gedeeltelijk beginnen te vervangen door kweekreactoren. Een deel drukwater reactoren kan blijven bestaan indien ze (zoals de derde generatie reactoren) op plutonium kunnen werken zoals dat geproduceerd gaat worden in kweekreactoren. Op dat ogenblik zal de gestegen prijs van het natuurlijke uranium deze operatie economisch verantwoord maken.

Betreffende de uitspraak dat men geen raad weet met het eindafval kan men ook stellen dat dit een foute uitspraak is. Afhankelijk van wat men nu precies het “afval” noemt, is de problematiek licht verschillend natuurlijk, maar de basisprincipes blijven dezelfde. Men kan als afval, het echte afval beschouwen, dat wil zeggen, grotendeels de splijtingsproducten en eventueel enkele “verkeerd” getransformeerde actiniden, of men kan – denk aan de open cyclus – de afgewerkte brandstof die uit een kernreactor zoals een drukwater reactor komt, beschouwen als afval. Er zijn twee verschillen tussen beide, maar die geen fundamenteel onderscheid maken: het “open cyclus” afval is natuurlijk veel groter in volume – maar het gaat hem tenslotte toch maar om relatief kleine volumes op industriële schaal, en het afval van de open cyclus bevat veel meer lang levende radionucliden. *De standaard oplossing voor dit afval, in alle gevallen, is de diepe geologische berging.* Dat wil zeggen dat men het afval eventueel verglaast, in speciale containers stopt, en die in een diepe geologische laag op enkele honderden meter onder het oppervlak gaat opbergen. De radioactiviteit van het afval neemt af met de tijd en het probleem verdwijnt dus op hele lange tijden. Het probleem is op het eerste zicht dat die tijden toch wel heel lang zijn op menselijke schaal: tot vele duizenden jaren. Natuurlijk, hoe langer men wacht, hoe minder radioactiviteit er aanwezig is, want de actiefste kernen zijn natuurlijk ook de snelst vervallende. Het afval is na een paar honderd jaar al veel minder actief dan nu, en zal na een paar duizend jaar nog veel minder actief zijn. Men werpt dan vaak het argument op dat het pretentief en zinloos is om te beweren dat men een menselijke constructie gaat bouwen die dat afval moet beschermen voor een tijd die langer is dan de tijd die de Egyptische pyramiden bestaan hebben. Maar dat is het punt niet: *het is niet het menselijke bouwwerk dat zo lang moet bestaan, het is de geologische laag!* Het menselijke bouwsel dient enkel om gedurende de eerste honderden jaren, tijdens de “heetste” periode, de stoffen niet vrij te geven aan de geologische laag, en om vervolgens de diffusie van de nucliden zo goed mogelijk te remmen in allerlei “scenario's”. Men gaat er van uit dat na een zekere tijd de menselijke structuur weg is en dat de verglaasde afvalstoffen dan gaan deel uitmaken van die geologische laag. Als die laag stabiel is, en ondoordringbaar voor stromend grondwater, dan gaan die stoffen daar miljoenen jaren blijven zonder noemenswaardige migratie. Men heeft uit natuurlijke fenomenen gevonden dat de migratie van stoffen heel traag kan verlopen. Men dient natuurlijk wel de geologie in kwestie goed te kennen en dat vraagt wel serieus onderzoek. Maar indien men weet dat men een stabiele laag heeft en men heeft de ondoordringbaarheid van water van de laag vastgesteld, dan kan men met vrij grote zekerheid stellen dat die stoffen niet gaan vrijkomen voor vele honderdduizenden jaren, en op dat ogenblik speelt dat natuurlijk geen rol meer omdat de activiteit dan al lang teruggevallen is tot natuurlijke niveaus of nog lager. Gezien de kleine volumes die uiteindelijk moeten geborgen worden is deze oplossing, eens ze is gevalideerd, relatief goedkoop uit te voeren. Men beschouwt de geologische opberging nu als de “referentie oplossing” en elke andere voorgestelde oplossing wordt hiertegen gewogen. Het is als dusdanig een zeer weinig ecologisch belastende oplossing, gezien het afval normaal gezien niet in contact komt met de biosfeer eens ze geborgen is ; maar men tracht ook na te gaan wat er gebeurt in verschillende scenario's en tracht daarvan de invloed te schatten.

Het is trouwens interessant op te merken dat de anti-nucleaire activisten sterk tegen de geologische berging van nucleair afval zijn, omdat dat “te lang duurt voor het gevaar weg is”, maar ze hebben er tegelijkertijd geen probleem mee om (iets utopisch) geologische CO₂ opslag¹²⁹ voor te stellen. Welnu, het CO₂ heeft een oneindig lange levensduur. Het is niet alleen nog even sterk aanwezig binnen 300, 1000 of 100 000 jaar, het blijft daar voor miljoenen of miljarden jaren. In het uiterst onwaarschijnlijke geval dat de (tenslotte kleine hoeveelheid) radioactieve stoffen binnen 100 000

¹²⁹http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_storage

jaar meer vrijkomen dan gedacht, is dat probleem veel minder erg dan het vrijkomen, binnen 100 000 jaar, van het opgeslagen CO₂ in een keer ! Een ganse streek wordt vergast en een heel sterke CO₂ puls wordt in de atmosfeer vrijgemaakt. Het probleem is even erg binnen 100 000 jaar of binnen 10 miljoen jaar als nu voor CO₂ opslag, terwijl tegen dan het radioactieve afval dan allang niet meer schadelijk is. In de mate dat het dus pretentius is om te beweren dat we een kleine hoeveelheid verglaasde stoffen voor 10 000 of 100 000 jaar kunnen opslaan in een geologische laag zonder dat ze vrijkomen, is het nog veel pretentieuzer om te beweren dat we gigantische hoeveelheden (miljarden tonnen!) gassen gaan kunnen opslaan voor honderden miljoenen jaren. Niettemin zijn beide denkbaar en mogelijk, maar het dient toch wel aan de rationele lezer duidelijk te worden dat er met twee maten en gewichten wordt gewogen. Het feit dat beide mogelijk zijn, komt van “ervaringen uit het verleden”. De grote hoeveelheden gassen en vloeistoffen die we nu naar boven pompen onder de naam van aardgas en olie, zijn een paar honderd miljoen jaar opgeslagen geweest in geologische lagen zonder dat ze zijn vrijgekomen. Maar er is ook een voorbeeld van een natuurlijke reactor geweest in het verleden, de eerder vernoemde Oklo reactor in Gabon die 2 miljard jaren geleden heeft gefunctioneerd. Welnu, de resten van de fissieproducten en actiniden (hun stabiele nakomers natuurlijk, ze zijn allang radioactief vervallen) hebben in de meeste gevallen ten hoogste een paar centimeter gediffundeerd. Zowel de geologische opslag van olie en aardgas, als de kleine migratie van “radioactief afval” in Oklo moeten aangeven dat geologische opslag echt wel voor heel lang kan werken. De opslag van een relatief kleine hoeveelheid verglaasde stoffen voor enkele duizenden jaren op die wijze stelt dus echt wel geen probleem als men de geologie goed heeft bestudeerd.

Niettemin is het technisch mogelijk om verbeteringen aan te brengen – de vraag stelt zich enkel of die verbeteringen enige zin hebben, of enkel maar een technische oplossing voor een psychologisch probleem zijn. Deze verbeteringen bestaan erin om trachten de langstlevende radionucliden om te zetten in korter levende nucliden. Dit is technisch in principe mogelijk en daar wordt op dit ogenblik veel onderzoek naar gedaan om dat op realistische wijze industrieel kunnen toe te passen.

6.1.d Scheikunde van uranium en actiniden.

De scheikunde van de actiniden is heel ingewikkeld, omdat ze een heel gecompliceerde elektronenwolk bezitten, met vele elektronen, en vele mogelijke toestanden. De elektronenwolk van een atoom bestaat uit twee delen: een “volledige” elektronenwolk, en zogenaamde valentie-elektronen. We hebben eerder gezien dat de elektronenwolk rond een atoom in verschillende toestanden kan voorkomen, en wat ons vooral interesseert is de grondtoestand. Als atomen een molecule vormen, dan herorganiseren de individuele elektronenwolken van de deelnemende atomen zich in een gemeenschappelijke elektronenwolk van de verschillende atomen. Maar niettemin kan men nog stukken herkennen van de “oude” atoomwolken. Bepaalde configuraties van elektronen zijn bijzonder stabiel (dat wil zeggen, bijzonder hoge bindingsenergieën geven), en nemen niet snel deel aan “uitwisselingsspelletjes”. De meest stabiele zulke systemen zijn de zogenaamde “edelgas configuraties”, dat zijn elektronenwolken die bestaan uit 2, 10, 18, 36, 54 of 86 elektronen. Die structuren zijn zo stabiel, dat ze bijna nooit “vervormd” worden. Atomen met lading Z gelijk aan 2, 10, 18 ... gaan dus atomen zijn, die een elektronenwolk hebben die zo goed als niet vervormt en dus zo goed als nooit gaat “mengen” met anderen. Het zullen met andere woorden mono-atomische gassen zijn die chemisch zo goed als nooit interageren. Inderdaad, elementen 2 (helium), 10 (neon), 18 (argon), 36 (krypton), 54 (xenon) en 86 (radon) zijn de zogenaamde edelgassen.

Andere atomen (behalve waterstof) hebben elektronenwolken die een aantal elektronen hebben, gelijk aan een “edelgas” getal, plus “overschot”. Het aantal elektronen dat de “edelgas configuratie” vormt zal steeds een stabiele wolk rond de atoomkern in kwestie vormen en niet deelnemen aan chemische reacties. *Het zijn de extra elektronen in het overschot die volledig de chemische eigenschappen bepalen en zullen deelnemen aan “uitwisselingen” en in de gemeenschappelijke elektronenwolken gaan leven in moleculen.* Deze “overschot” noemt men de *valentie elektronen*. Maar zelfs binnen deze overschotten zijn er nog stabielere structuren aanwezig dan andere. Deze zijn minder stabiel dan de edelgas configuraties natuurlijk. Hoe “ingewikkelder” een atoom is, hoe meer van die “intermediaire” half-stabiele toestanden er zijn. Eenvoudige atomen (tot, zeg maar, $Z=18$ of argon) hebben dat niet of toch in veel mindere mate en hebben een veel eenvoudiger scheikunde: de atomen die veel “valentie elektronen” hebben – die er dus weinig mankeren om een volledige edelgas configuratie te bekommen – zullen in het algemeen een tendens hebben om elektronen naar zich toe te halen in chemische bindingen. Typisch voorbeeld: zuurstof, fluor, chloor, ... De atomen die weinig valentie elektronen hebben zullen tendens hebben om hun elektronen wat kwijt te raken of tenminste te delen met anderen. Vandaar dat het trouwens vaak metalen zijn: als ze bij elkaar zijn, willen ze allemaal van hun elektronen af en vormen als dusdanig een grote “vrije” elektronenzee, wat typisch is voor een metaal. Voorbeelden: lithium, natrium, magnesium. Al deze atomen hebben een duidelijke “valentie”, dat wil zeggen, een duidelijk aantal elektronen die ze willen opnemen of kwijtspelen. Stoffen die graag elektronen pikken van andere, noemt men *oxidatoren*. Stoffen die graag elektronen opdringen aan andere noemt men *reductoren*. Zuurstof is een heel sterke oxidator (vandaar de naam...) en vele metalen zijn vaak sterke reductoren (natrium bijvoorbeeld, maar ook ijzer,...). Elektronen opnemen noemt men “gereduceerd worden” en elektronen afgeven noemt men “geoxideerd worden”. Reductoren worden dus graag geoxideerd (en reduceren hierbij hun partner), en oxidatoren worden dus graag gereduceerd en oxideren hierbij hun partner.

Men noteert met een Romeins cijfer wat de “gewenste lading” van een atoom is: voor natrium en lithium is dat +I (ze willen 1 elektron kwijt spelen, want dan hebben ze respectievelijk de neon en de helium elektronenconfiguratie), voor magnesium en beryllium is dat +II (ze willen twee elektronen kwijt spelen, dan zijn ze in de neon en helium configuratie)... Fluor en chloor willen 1 elektron opnemen en willen dus graag in de toestand -I zijn ; dan zijn ze in de neon respectievelijk argon configuratie. Zuurstof wil twee elektronen opnemen. Natuurlijk is de gemeenschappelijke elektronenwolk in een molecule een soort “compromis” van de beste grondtoestand, en het bovenstaande zijn maar vuistregels. In een gemeenschappelijke elektronenwolk in een molecule worden de elektronen gedeeld door alle atomen, maar sommige elektronen vertoeven veel meer in de buurt van een atoom dan een ander. Als we de boekhouding maken van de elektronen die “het meeste” in de buurt van een atoom (binnen in een molecule) zitten, dan lijkt het alsof dat atoom een “netto lading” heeft gelijk aan een aantal elektronen “in overschot” of “te weinig”. Men noemt die “boekhoudkundige lading” de *oxidatietrap* van het atoom in een molecule. Neem bijvoorbeeld waterstof fluoride (een heel bijtend zuur), HF. In die molecule heeft het fluor atoom ongeveer volledig het elektron van het waterstof atoom naar zich toegehaald. Het lijkt er dus op dat waterstof een elektron (grotendeels) heeft verloren, en fluor er een heeft gewonnen. We vinden dat de oxidatietrap van waterstof gelijk is aan +I, en die van fluor gelijk is aan -I. Fluor vindt dat leuk, maar waterstof minder, vandaar dat de waterstof weg wil, en vandaar het zure karakter. Dat is anders met, zeg maar, lithium fluoride, LiF. Hier vindt lithium het prima om 1 elektron af te staan (in tegenstelling tot waterstof...). Als dusdanig neemt lithium de helium configuratie aan en heeft oxidatietrap +I (waar lithium altijd al van droomde), en fluor heeft dan oxidatietrap -I en neemt de neon configuratie aan (waar fluor altijd van droomt). LiF is een relatief neutraal zout. Daarentegen, als men lithium metaal in contact brengt met fluor, dan is de reactie heel hevig, om LiF te vormen.

Ander voorbeeld: kooldioxide CO_2 . Elk zuurstof atoom trekt 2 elektronen van het koolstof atoom naar zich. Als dusdanig heeft elk zuurstof atoom een oxidatietrap van -II, en heeft koolstof een oxidatietrap van +IV. Beide vinden dat OK: zuurstof benadert als dusdanig de neon configuratie, en koolstof, de helium configuratie. Vandaar dat kooldioxide een weinig reagerende stof is. Zoals gezegd hebben eenvoudige atomen een relatief goed gedefinieerde “oxidatietrap” in dewelke ze het stabielste zijn en waarnaar ze dus streven bij het maken van chemische bindingen.

Met zware atomen is de situatie niet zo duidelijk, omdat er “intermediaire stabiele toestanden” bestaan. Als dusdanig kunnen die atomen in verschillende oxidatietrappen verkeren. Het is in dat geval interessant om te weten in welke oxidatietrap dat zo een atoom verkeert, want dat geeft een idee van de mogelijke reactiviteit van dat atoom. Ijzer heeft twee “voorkeur” oxidatietrappen: +II en +III. In de verbinding FeCl_2 , heeft ijzer de oxidatietrap +II, en in de verbinding FeCl_3 heeft ijzer de oxidatietrap +III. Dat is niet denkbaar met een metaal zoals natrium. Mangaan heeft een voorkeur voor de oxidatietrappen +II, +IV en +VII ; soms ook +III. De zichtbare kleur van de stof wordt vaak bepaald door de oxidatietrap van het metaal.

Voor uranium is de elektronenconfiguratie van het atoom: $[\text{Rn}] 5f^3 6d^1 7s^2$ wat sommige lezers misschien met enige nostalgie zal laten denken aan hun scheikunde lessen. Het wil zeggen dat er rond een uranium kern een stabiele radon elektronenconfiguratie zit (met 86 elektronen), en dan nog 6 extra valentie elektronen, die verdeeld zijn als 3 elektronen in de sub-f schil nummer 5, 1 elektron in de sub-d schil nummer 6 en 2 elektronen in de sub-s schil nummer 7. We kunnen hier onmiddellijk al twee “gewenste” oxidatietrappen uit afleiden: uranium zou graag zijn 6 valentie-elektronen kwijt spelen om in oxidatietrap +VI te komen. Maar het kan ook aanvaarden om enkel de 3 f-elektronen en het d-elektron kwijt te spelen, want een s subschil met 2 elektronen is ook relatief stabiel. Als dusdanig kan het ook in oxidatietrap +IV zitten. Maar uranium kan ook voorkomen in +II, +III en +V in min of meer stabiele toestanden.

Plutonium heeft de elektronenconfiguratie $[\text{Rn}] 5f^6 6d^0 7s^2$. Plutonium kan oxidatietrappen +III, +IV, +V, +VI en +VII aannemen, hoewel het 8 valentie elektronen bezit. De voornaamste oxidatietrappen zijn +III en +IV, niettemin.

6.2 Begin van de cyclus

6.2.a Mijnbouw en conditionering van uranium.

Men schat dat uranium een relatief veel voorkomend element is in de aardkorst, evenveel als tin of wolfram, en meer dan kwik, goud of zilver. Het komt vooral voor in graniet en minder in basalt of in kalksteen.

Uranium ontginning gebeurt op twee manieren: klassieke mijnbouw, en de meer moderne “in situ leaching” mijnbouw.

We bespreken eerst de klassieke mijnbouw. Er bestaan “open lucht” mijnen en ondergrondse mijnen volgens de soort van minerale depositie die aanwezig is: sommige ertsen komen voor in eerder verticale nederzettingen, en andere komen voor in horizontale lagen. De klassieke mijnbouw – zoals alle mijnbouw – stelt twee ecologische problemen. Het eerste is vooral verbonden met de openlucht mijnen. Hoewel men vroeger een afgedankte mijn gewoon liet voor wat ze was, en dus een groot en beschadigd oppervlak achterliet, gaat men nu meer en meer het oppervlak herwerken na het einde van de mijnbouw ; vaak vult men de diepste putten met water, en gaat men de andere

delen beplanten met bomen. Een tweede problematiek die gemeen is aan elke vorm van mijnbouw, is de grote hoop afval die men heeft. In dit specifieke geval is dat afval wat problematisch, want meestal bevatten ertsen die uranium bevatten, ook radium en vooral: radon. Dit is niet specifiek aan de mijnbouw: er zijn streken waar veel natuurlijk radon gas vrijkomt. Maar men wil toch te hoge concentraties tegengaan. Men bedekt deze afvalhopen nu met erosie bestendige lagen, om het vrijgeven van het radon gas te verminderen en het indringen van regenwater af te remmen. Nadien beplant men de afvalbergen, en men controleert gedurende lange tijd hoeveel radioactieve stoffen vrijkomen en of dat niveau aanvaardbaar is. De uranium mijnbouw (zoals vele vormen van mijnbouw trouwens) is waarschijnlijk, van het gehele kernenergie gebeuren, de activiteit met de grootste ecologische impact. Zoals gezegd is het grootste probleem, de vrijlating van radon, dat een afval product is van radium, dat meestal in vrij hoge concentraties aanwezig is in uranium erts en dat dus ook aanwezig is in de residu's van de mijnbouw. Men hoopt natuurlijk niet op een lange opsluiting van het radon, dat zou een illusie zijn. Radon op zich is eigenlijk geen groot probleem, want het is een edelgas dat niet door het lichaam wordt opgenomen. Het probleem van radon is het volgende: het vervalt heel snel naar polonium, dat wel gemakkelijk in het lichaam wordt opgenomen. Als dusdanig is radon indirect schadelijk: het echte schadelijke product is het vervalproduct van radon, polonium, dat in het lichaam terechtkomt wanneer we radon inademen, en wanneer dat radon op dat ogenblik vervalt. De langste halfwaardetijd van radon is 3.7 dagen. Als we dus radon voldoende traag kunnen laten migreren naar buiten toe sinds zijn ontstaan (als vervalproduct van radium dat in het erts zit), dan zal het vervallen naar polonium op zijn weg naar buiten, en niet in onze longen. De opsluiting dient dus ten hoogste de migratie met enkele dagen uit te stellen.

Gezien de lage concentraties (behalve in enkele uitzonderlijke gevallen) uranium die men vindt in natuurlijke ertsen, is het interessant om reeds ter plekke op de landerij van de mijn, een eerste concentratie door te voeren. Meestal komt uranium in ertsen voor onder de vorm van de oxiden UO_2 , UO_3 of U_3O_8 (pechblende), maar men vindt ook fosfaten en andere vormen.

In de eerste plaats gaat men het gedolven erts in stukken breken en fijn malen, tot een poeder dat met water gemengd wordt, en een soort "pulp" oplevert. Afhankelijk van de chemische structuur van het erts wordt dat ofwel met zwavelzuur en natrium chloraat gemengd als het om oxiden gaat, en met natrium carbonaat (soda) onder druk en hoge temperatuur samen met zuurstof als het om basische ertsen gaat. De bedoeling in beide gevallen is om uranium in zijn hoogste oxidatietrap te krijgen (+VI) en het uranaat ion $U_2O_7^{(-2)}$ te vormen.

Het is deze behandeling, eerst met gedolven rots, die de inspiratie is geweest voor de modernere vorm van uranium mijnbouw: ISL (In Situ Leaching). Hierbij gaat men helemaal geen rots meer kappen. In plaats van eerst de rots naar boven te brengen, om het dan aan dat oplosmiddel bloot te stellen, doet men nu het omgekeerde: men pompt het oplosmiddel in de rots, en vangt het dan weer op, deze keer verrijkt met het opgeloste uranium. Deze mijnbouw kan niet overal gebruikt worden: eerst en vooral moet het erts poreus zijn, zodat men er de oplossing kan door pompen, en ten tweede moet de ertslaag gescheiden zijn van het grondwater, als men de pollutie hiervan wil vermijden. Men schat dat ongeveer een vijfde van het delfbare uranium toch wel op die manier kan ontgonnen worden. Daar waar deze mijnbouw kan toegepast worden is die heel voordelig: er zijn geen hopen afval meer, het geheel is veel minder energie-intensief, en alle problemen met radon vrijlating en dergelijke worden volledig vermeden. Ook de impact in het landschap is minimaal. Voor een specifieke minerale samenstelling van het erts, gebruikt men een zuur, een oxidator en vaak ook een complex-vormend chemisch product. Een vaak gebruikte mengeling is een waterstof peroxide oplossing, gemengd met zwavelzuur (dat zowel de functie van zuur als van complexvormer op zich neemt). In andere gevallen gebruikt men eerder een alkalische oplossing, als er teveel kalksteen

aanwezig is (die al het zuur zou neutraliseren). Een typische “mijn” bestaat dan uit een configuratie van “injectiepunten” en “extractiepunten” in een geometrie die aangepast is aan de erts depositie. Deze injectie en extractie punten liggen meestal tussen de 20 en de 60 meter van elkaar. Het principe is sinds de jaren '70 ontwikkeld, en neemt hoe langer hoe meer de uranium mijnbouw over: heden ten dage is wereldwijd ongeveer 26% van het gedolven uranium met deze techniek opgehaald, en de fractie stijgt. In de USA is dat bijna 100%. De meest geschikte geologische vorm van erts is erts dat zich in een laag zandsteen bevindt, tussen twee ondoordringbare lagen. Indien men bij deze techniek de nodige voorzorgen en controles verricht om er zeker van te zijn dat naburig grondwater niet wordt aangetast (bijvoorbeeld door eerst een overdruk test door te voeren en door rond het gedolven gebied, monitor punten te voorzien), dan is dit een heel milieuvriendelijke techniek die weinig middelen gebruikt, kosten-effectief is, en bovendien ertsen met lage gehalten goed kan ontginnen. Bovendien kan men met deze techniek ook hele kleine ertsdeposities ontginnen, die het de moeite niet zouden waard zijn om grote graafwerken op te zetten. De omhoog gepompte oplossing bevat meestal uranium in de vorm van uranyl sulfaat $UO_2(SO_4)_3^{(-4)}$ (als men zwavelzuur heeft gebruikt), of uranyl carbonaat $UO_2(CO_3)_3^{(-4)}$ (als men een alkalische oplossing heeft gebruikt). Een chemische behandeling zet het dan weer om in een uranaat ion.

Welke ook de mijnbouw techniek is die men aanwendt – klassieke mijnbouw of ISL – uiteindelijk heeft men dus een oplossing met uranium erin, en misschien nog andere spullen.

Een ionenuitwisseling (vaak met een organisch oplosmiddel) maakt dan dat het uranaat ion $U_2O_7^{(-2)}$ preferentieel wordt afgezonderd. Uiteindelijk gaat men een base gebruiken (magnesium hydroxide of ammoniak) om neerslag van het gewenste uraniumzout te hebben: magnesium uranaat $Mg U_2 O_7$ of di-ammonium uranaat $(NH_4)_2 U_2 O_7$. Het uiteindelijke product is slechts voor ongeveer 70% of 80% zuiver, en wordt “yellow cake” genoemd. Het is voldoende geconcentreerd om op een efficiënte wijze getransporteerd te worden. Het wordt meestal in gewone metalen vaten geplaatst van ongeveer 200 liter, zonder specifieke maatregelen: de radioactiviteit van natuurlijk uranium is vrij laag en stelt niet echt een probleem van stralingsbescherming.

Het onzuivere uranaat had als functie dat het relatief gemakkelijk bekomen werd door een chemische behandeling van het ruwe erts, en in geconcentreerde vorm kon neergeslagen worden, zodat men van de duizenden tonnen ruw erts, de paar ton “interessant” materiaal kon extraheren ter plekke alvorens het te transporteren. Het vergde geen gesofistikeerde installaties en liet toe, met een lokale transformatie, tot een veel grotere uranium concentratie te komen. Maar het is nog geen “chemisch zuiver” product. Als “chemisch product” is men geïnteresseerd in drie chemische vormen van uranium: uranium metaal (zuiver U), uranium oxide (UO_2) en uranium hexafluoride (UF_6). Uranium hexafluoride is een interessant materiaal om uranium te zuiveren, omdat het een vaste stof is die rond 56 graden sublimeert, dat wil zeggen, direct van vaste naar gas toestand overgaat.

Om van onzuivere “yellow cake” naar zuiver uranium hexafluoride te gaan, zijn er twee mogelijkheden: ofwel zuivert men eerst de yellow cake, en gaat dan hexafluoride produceren, ofwel produceert men direct hexafluoride, en gaat dan zuiveren. De essentiële stappen van dat “droge” proces zijn:

- transformatie van ammonium diuranaat in U_3O_8 door verhitting (we gaan dus “terug achteruit) en keren terug naar een “erts” toestand, maar veel meer geconcentreerd
- reductie (bijvoorbeeld met ammonium gas of waterstof gas) tot UO_2
- oplossen van uranium oxide in waterstof fluoride (bijtend zuur): UF_4

- in contact brengen met fluor F_2 : we bekomen UF_6

Het distilleren van uranium hexafluoride laat toe om het te zuiveren. Dit is historisch gezien trouwens hoe men uranium zuiverde. Maar men kan ook dit proces laten voorafgaan door een “natte” chemische zuivering.

Men kan ook stoppen bij UF_4 . Als men UF_4 met magnesium metaal in contact brengt, dan extraheert men zuiver uranium metaal.

Dat zijn moeilijke chemische processen. Werken met fluor gas bijvoorbeeld is potentieel gevaarlijk en men dient heel wat maatregelen te treffen betreffende de veiligheid van de installaties. Er zijn 5 of 6 installaties in de hele wereld die dit doen. De grootste productie capaciteit bevindt zich in Rusland, in Siberië (Angarsk, potentieel 20 000 ton uranium per jaar), maar de installaties zijn van bedenkelijke kwaliteit. De echte wereldleider is de Franse COMURHEX met zijn fabriek van 14 000 ton per jaar in Pierrelatte. Nadien komen de Amerikanen (Metropolis, Illinois) en de Canadezen (Port Hope, Ontario) met 12 000 ton elk, en tenslotte de Britten (Springfields) met 7 000 ton per jaar.

6.2.b Verrijking van uranium

We hebben gezien dat vele reactor types “verrijkt” uranium nodig hebben, dat wil zeggen, uranium (in een of andere chemische vorm, metaal, of oxides bijvoorbeeld – dat heeft geen belang) waarvan het gehalte aan U-235 hoger is dan het natuurlijk gehalte dat 0.7% bedraagt. Dat wordt bekomen door U-238 te elimineren¹³⁰. Historisch gezien was de verrijking natuurlijk niet bedacht voor reactoren, maar voor de productie van quasi-zuiver U-235 voor het maken van nucleaire wapens, waar men verrijgingsgraden van de orde van 93% nodig heeft. Kernenergie reactoren hebben een veel bescheidener verrijgingsgraad nodig, van enkele procenten (drukwater reactoren werken meestal rond de 4%) tot ongeveer 15% voor snelle reactoren – hoewel die eerder plutonium zullen gebruiken. Men is niet verplicht om uranium te verrijken. De Amerikanen hadden uranium verrijking van in het begin van het Manhattan project beschouwd als een van de twee wegen om een nucleair wapen te maken. Maar andere naties – die meestal ook geïnteresseerd waren in het maken van nucleaire wapens – hadden niet onmiddellijk de verrijkingstechnologie onder de knie, en hadden bijgevolg een programma opgestart met natuurlijk uranium in grafiet (of zwaar water) reactoren, en met het oog op plutonium productie.

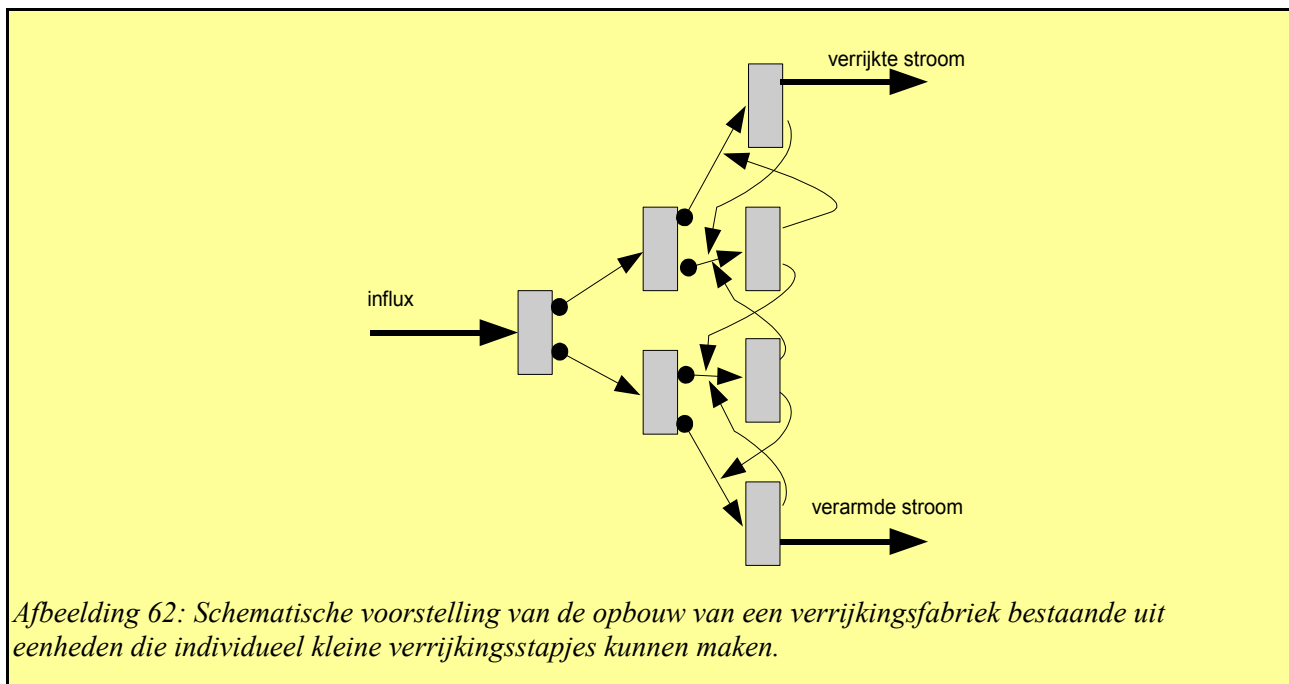
Maar uiteindelijk is uranium verrijking *in de huidige stand van de kernenergie technologie* een essentiële schakel die toelaat om een relatief hoge “verbrandingsgraad” van de splijtbare kernen te bekomen. Een reactor op natuurlijk uranium (met grafiet bijvoorbeeld) kan immers geen hoge verbrandingsgraad bereiken, want er is in deze structuur niet veel reactiviteitsoverschot die een doorgedreven verbranding kan compenseren. Eens men op grotere schaal kweekreactoren zal gebruiken, kan men van de verrijkingstap helemaal afzien.

Verrijking van uranium bestaat uit 3 product stromen: de “inkomende” flux (natuurlijk uranium, bijvoorbeeld) die een zeker gehalte x_f heeft¹³¹ ; de “product” flux van het gewenste materiaal (verrijkt uranium) die een zeker gehalte x_p heeft ; en tenslotte de “afval” flux van de overschot (het

¹³⁰http://en.wikipedia.org/wiki/Isotope_separation

¹³¹De indices p, w en f zijn standaard en komen van de Engelstalige benaming: Product, Waste en Feed voor respectievelijk product, afval en toevoer (inkomende flux).

verarmde uranium), en waarin nog een gehalte x_w aanwezig is. Ideaal gezien zou men natuurlijk x_w gelijk aan nul willen hebben, maar we zullen zien dat dat niet mogelijk is bij de meeste technieken.



Afbeelding 62: Schematische voorstelling van de opbouw van een verrijkingsfabriek bestaande uit eenheden die individueel kleine verrijkingsstapjes kunnen maken.

De meeste technieken die aangewend worden om isotopen te scheiden, kunnen dat slechts een heel klein beetje. Als dusdanig dient men heel veel “kleine stapjes” toe te passen, waarbij elk klein stapje zijn eigen “inkomende flux”, zijn eigen “product” en zijn eigen “afval” heeft, waarbij het “product” en ook het “afval” de “inkomende flux” zijn van volgende stapjes. Dit is schematisch voorgesteld in afbeelding 62. Het is duidelijk dat hoe lager de “afval concentratie” is ten opzichte van de inkomende concentratie, en hoe hoger de “product” concentratie is ten opzichte van de inkomende concentratie, hoe moeilijker, of beter, hoe arbeidsintensiever de scheiding gaat zijn. Als P de massa (uitgedrukt in kilogram) is van het product, W de massa is van het afval en F de massa van de inkomende flux dan is er natuurlijk een verband tussen die drie grootheden en de fracties x_p , x_w en x_f : de hoeveelheid U-235 zowel als de hoeveelheid U-238 dient dezelfde te zijn in de inkomende flux enerzijds, en in product en afval flux anderzijds. De balans voor U-235 geeft ons: $P x_p + W x_w = F x_f$ terwijl de balans voor U-238 (de complementaire fracties) luidt: $P(1 - x_p) + W(1 - x_w) = F(1 - x_f)$. Men kan hieruit, door wat eenvoudige algebra, afleiden dat:

$$F = P + W \text{ en } \frac{P}{W} = \frac{x_f - x_w}{x_p - x_f}.$$

Als men de fracties kent in de drie fluxen en men weet bijvoorbeeld hoeveel product men wenst te bekomen, dan weet men hoeveel afval men gaat produceren en hoeveel startmateriaal men nodig heeft (als niets verloren gaat). Een voorbeeld: men wenst een kilogram uranium met een verrijkingsgraad van 5%. Natuurlijk uranium heeft een gehalte van 0.7%. Als we een afval concentratie van 0.25% toelaten, dan hebben we ($x_f = 0.007$, $x_w = 0.0025$ en $x_p = 0.05$; $P = 1$ kg): $P/W = 0.104$ of $W = 9.5$ kg, en dus $F = 10.5$ kg. We hebben dus 10.5 kg natuurlijk uranium nodig om 1 kg uranium met een verrijkingsgraad van 5% te fabriceren, als we een afvalconcentratie van 0.25% toelaten. Als we die afvalconcentratie tot 0.1% verlagen, dan wordt dat: $W = 7.2$ kg en dus een totaal verbruik van natuurlijk uranium gelijk aan 8.2 kg. In de limiet van volledige separatie ($x_w = 0$), vinden we $W = 6.1$ kg en dus in totaal 7.1kg, in welk geval we alle U-235 atomen hebben

gerecupereerd (maar wat in de praktijk onmogelijk zal zijn). Het is natuurlijk gemakkelijk om te stellen dat we deze afvalconcentratie, en die product concentratie willen bekomen, maar we moeten ons ook afvragen hoeveel moeite (en energie!) het kost om zo iets te bekomen. We hebben gezien dat we in de praktijk slechts hele kleine stapjes kunnen maken – een “module” van een separatiefabriek ontvangt een zekere stroom van materiaal, en maakt daarvan twee stromen, een heel klein beetje verrijkt, en een heel klein beetje verarmd. Het aaneenschakelen van vele van die modules maakt dat er uiteindelijk een behoorlijke verrijking en verarming optreedt, maar hoe verder die twee gewenste fracties (verrijking en verarming) uit elkaar liggen, hoe meer van die modules we moeten installeren. Men kan uitrekenen hoeveel van die modules nodig zijn, en op basis daarvan heeft men een eenheid gedefinieerd, de zogenaamde “eenheid van arbeid van separatie”, die een nogal ingewikkelde definitie heeft omdat ze het resultaat van de berekening bevat. Voor een gegeven gehalte in de inkomende flux, en in de product en afvalstromen, definieert men het aantal benodigde “eenheden van arbeid van separatie” om dat te bekomen, als: $S = P V(x_p) + W V(x_w) - F V(x_f)$. Hierbij hebben we een functie ingevoerd:

$V(x) \equiv (1 - 2x) \ln\left(\frac{1-x}{x}\right)$, waarbij x een fractie is, dus een getal tussen 0 en 1. We kunnen gemakkelijk uitrekenen dat $V(0.007) = 4.89$; $V(0.0025) = 5.96$; $V(0.05) = 2.65$; $V(0.001) = 6.89$ als we die formule van V gebruiken. Met deze waarden vinden we voor ons eerste voorbeeld: $S = 1\text{kg } 2.65 + 9.5\text{kg } 5.96 - 10.5\text{kg } 4.89 = 7.93$ “eenheden van separatiewerk” voor het bekomen van 1 kg uranium aan verrijking van 5% met 0.25% concentratie in het afval. Voor ons tweede voorbeeld vinden we: $S = 1\text{kg } 2.65 + 7.2\text{kg } 6.89 - 8.2\text{kg } 4.89 = 12.2$ “eenheden van separatiewerk”. Zoals we zien, hebben we in ons tweede voorbeeld wat minder natuurlijk uranium verbruikt (8.2kg in plaats van 10.5kg), maar we hebben meer separatiewerk: 12.2 eenheden in plaats van 7.93 eenheden. *De eenheid van werk van separatie is een goede eenheid, in de zin dat ze evenredig is met de grootte van de benodigde installatie (aantal separatie modules, en dus kostprijs van investering), evenals met de benodigde hoeveelheid energie (kostprijs van functioneren) voor elke scheidingstechnologie die gebaseerd is op modules met kleine scheidingsstapjes.* Als dusdanig wordt vaak een economische balans opgemaakt tussen de prijs van het natuurlijke uranium en de kostprijs van de verrijking om te bepalen welke verarmingsgraad men wenst te bekomen. Het spreekt vanzelf dat voor een techniek die in een stap een volledige scheiding bekomt, bovenstaande grootte zinloos is, maar heden ten dage zijn “kleine stapjes” de enige technieken die industrieel kunnen worden toegepast.

Er bestaan verschillende principes van isotopenscheiding. Zij zijn gebaseerd ofwel op het kleine massaverschil tussen twee isotopen, ofwel op verschillen in interactie (die zelf vaak ook gewoon het gevolg zijn van het massaverschil). Een voorbeeld van dat laatste zijn de energietoestanden van de elektronenwolken in atomen of moleculen die de isotopen bevatten. Die zijn grotendeels identiek, maar er kunnen heel kleine verschillen bestaan. Men kan trachten daarop in te spelen. Er bestaan volgende principes:

- *gas diffusie.* De gas diffusie snelheid is omgekeerd evenredig met de vierkantswortel van de deeltjesmassa. Als dusdanig diffunderen lichtere deeltjes iets sneller dan zwaardere deeltjes. Dit is een techniek die op grote schaal is toegepast en we komen hierop terug. Dit is een techniek die “kleine stapjes” maakt.
- *Centrifuges.* In snelle centrifuges hebben de zwaardere deeltjes de neiging om aan de buitenkant van de centrifuge te gaan. Dit is ook een techniek die op grote schaal wordt toegepast. Dit is ook een techniek die “kleine stapjes” maakt.

- *Massa spectroscopie*: in een magnetisch veld is de kromtestraal van de baan van een geladen deeltje afhankelijk van de massa van dat deeltje. Als dusdanig is het mogelijk om (geïoniseerde) isotopen te scheiden met grote efficiëntie, en zelfs potentieel bijna 100%. Het is echter in de praktijk nogal moeilijk om dit op grote schaal toe te passen.
- *Laser scheiding*. Inspelende op de kleine verschillen in bindingsenergieën van de elektronenwolken kan men een laser preferentieel een of andere isotoop laten aanslaan of ioniseren. Dit is nog in een research stadium, maar heeft zijn mogelijkheden reeds in laboratorium condities aangetoond.
- *Chemische scheiding*. Hoewel de chemische eigenschappen van isotopen zo goed als identiek zijn, kunnen er soms toch wel hele kleine verschillen optreden, bijvoorbeeld betreffende de reactiesnelheden. Men kan trachten hierop in te spelen om een scheiding te bekomen. Dit is een techniek die goed werkt voor lichte atomen, maar veel minder voor zware.

De enige twee technieken die op grote schaal zijn toegepast voor de verrijking van uranium, zijn gas diffusie en centrifuges.

De Amerikanen waren de eersten (natuurlijk) om isotopenscheiding op grote schaal toe te passen, en hebben historisch gasdiffusie gebruikt. De Fransen hebben in de jaren '60 en '70 hun eigen versie van de gasdiffusie ontwikkeld, en dat proces is overgenomen door het consortium Eurodif (Frankrijk, België, Spanje, Iran (!) en Italië). In 1982 heeft dat consortium een grote verrijkingsfabriek gebouwd in het Franse Pierlatte (Rhone vallei), met 1400 diffusiemodules van elk ongeveer 8000 “eenheden van separatiewerk” per jaar. De verrijkingsfactor van een enkele stap, die

gedefinieerd is als $\alpha = \frac{N_p(1-N_f)}{N_f(1-N_p)}$ en grosso modo aangeeft hoeveel het gehalte aan U-235 relatief

kan toenemen in een stap, is ideaal gelijk aan de vierkantswortel van de verhouding van de massa's van de twee te scheiden moleculen (hier dus UF₆ met U-238 en UF₆ met U-235). Als men dat numeriek uitrekent, vindt men $\sqrt{\frac{238+6*19}{235+6*19}} = 1.0043$. Ideaal gezien kan een diffusiestap het gehalte aan U-235 relatief gezien met 0.43% laten toenemen. Van natuurlijk uranium met een gehalte van 0.7% gaan we naar $0.7 * 1.0043 = 0.703\%$ in de “product” uitgang. In de praktijk bereikt men natuurlijk die ideale verrijking niet, en de Eurodif modules hebben slechts de helft van deze verrijking, namelijk een verrijkingsfactor van ongeveer 1.002. Men begrijpt onmiddellijk waarom men heel veel modules nodig heeft – en bijgevolg ook het nut van de definitie van een “eenheid van werk van separatie”. Een diffusiemodule bestaat essentieel uit een compressor en een “diffunderend membraan” waardoor het gas moet diffunderen. Let wel, het moet diffunderen, en niet “stromen”. De gasdeeltjes moeten willekeurige botsingen ondergaan in het membraan, en zo, op arbitraire wijze, de “uitgang” vinden. Omdat de lichtere deeltjes sneller bewegen, gaan ze statistisch gezien, iets sneller de “uitgang” vinden, vandaar de isotopische scheiding. De hoge druk dient enkel om voldoende deeltjes aan te bieden, en dient niet “om de moleculen door het membraan te blazen” want dan zou er geen isotopische scheiding optreden. Achter het membraan dient men een lage druk te bezitten, want anders zouden er teveel deeltjes de “omgekeerde weg” gaan volgen. Men dient druk hier niet te zien als kracht, maar als de hoeveelheid deeltjes die aangeboden wordt. Het probleem is natuurlijk ook dat het samendrukken van een gas dat gas gaat verhitten (men oefent arbeid uit op het gas). Het is dus nodig om dat gas weer af te koelen. We hebben daarom een koeling aan elke module, naast een compressor en een diffusiemembraan. Het diffusiemembraan bestaat uit een stuk ceramiek met grote poriën, waarop het eigenlijke diffusiemembraan is gedeponerd. De precieze samenstelling van dat membraan is het resultaat van heel wat onderzoek. Al die compressoren verbruiken veel energie. De Eurodif fabriek bijvoorbeeld, verbruikt 3000 MW

aan elektriciteit als ze op volle toeren draait. *Er zijn 3 kerncentrales die de stroom leveren voor deze fabriek.* Zij heeft een totale capaciteit van ongeveer 11 miljoen “eenheden van werk van separatie”, *wat volstaat om een honderdtal water reactoren van de orde van 1 GWe te bevoorraden.* De isotoopscheiding betekent een “verlies aan rendement” van ongeveer 3% (3 centrales volstaan om 100 centrales te voeden). De Eurodif fabriek heeft een extreem kleine ecologische impact (naast zijn elektriciteitsverbruik en dus zijn thermische pollutie). Per jaar gaat minder dan 5 kg uranium verloren in water en lucht wat duizend keer minder is dan wat een enkele steenkoolcentrale aan uranium in de omgeving dumpst.

Centrifuges hebben een scheidingsgraad die afhankelijk is van de hoogste snelheid (de snelheid van het draaiende element aan de buitenkant ervan). De scheidingsgraad is ideaal gegeven door de volgende formule:

$\alpha_0 = \exp\left(\frac{\Delta_m v^2}{2 k T}\right)$ waar we het massaverschil invoeren tussen de twee soorten gasdeeltjes, de

hoogste snelheid en de thermodynamische temperatuur van het gas vermenigvuldigd met een natuur constante, de constante van Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K). Als dusdanig kan men hoge scheidingsgraden bekomen: tot 1.23. Men voert gas (F) in de centrifuge onder heel lage druk, en men recupereert een verrijking aan de zwaarste isotoop (W) aan de buitenkant, en een verrijking aan de lichtere isotoop (P) op een kleinere straal. Centrifuges hebben het grote voordeel ten opzichte van gas diffusie dat ze per eenheid van werk van scheiding veel minder energie nodig hebben. Daarentegen, ten gevolge van de lage druk zijn er heel veel eenheden nodig (tientallen duizenden), en bovendien is de betrouwbaarheid en levensduur van de eenheden veel kleiner dan die van diffusiemodules. Men dient dus een balans te maken tussen de investering en de reparatiekosten enerzijds, en de energierekening anderzijds. Voor kleine hoeveelheden hoog-verrijkt uranium (typisch voor militaire toepassingen) kunnen centrifuges het beste compromis zijn ; voor grote hoeveelheden laag-verrijkt materiaal aan grote cadans heeft Eurodif dus duidelijk voor de diffusie gekozen. Niettemin is er een ander Europees consortium, URENCO (GB, NL, D), dat voor centrifuges is gegaan en heeft met succes een totale capaciteit van 4.4 miljoen eenheden van werk van separatie per jaar opgebouwd. Japan, daarentegen, heeft vele moeilijkheden ondervonden bij zijn ontwikkeling van centrifuges. Het is dus niet duidelijk of op grote schaal de centrifuges of de diffusie de beste oplossing zijn op dit ogenblik ; in elk geval leveren ze beide een aanvaardbare technologie met niettemin nogal wat nadelen – en dus mogelijkheden tot verbetering. Gezien op dit ogenblik de markt druk voor verrijking niet groot is (de huidige capaciteit is ruimschoots voldoende) gebeurt er niet heel veel onderzoek naar. Een andere reden om niet te veel onderzoek naar isotoopscheiding te doen (laser isotoop scheiding) is dat het natuurlijk een proliferatie-gevoelige technologie is.

6.2.c Brandstof elementen: huidige situatie.

Eens men verrijkt uranium hexafluoride bezit, dient men dat om te vormen tot brandstofelementen voor drukwater reactoren. In tegenstelling tot de eerste grafietreactoren, wordt de brandstof niet “naakt” in een reactor geplaatst (zoals destijds het geval was met bijvoorbeeld staven uranium metaal), maar zit ze in een verpakking, die de “eerste barrière” vormt tegen het verspreiden van de radioelementen. De brandstofelementen hebben immers twee functies: enerzijds dienen als brandstofelement, dat wil zeggen, zo goed mogelijk de fissiereacties mogelijk maken en de warmte aan de warmtedrager (water) overdragen ; anderzijds dienen als de barrière en verpakking van de

eigenlijke actieve brandstof en van de fissieproducten, die opgesloten dienen te blijven in het brandstofelement.

Van het uranium hexafluoride maakt men uranium oxide UO_2 via een reductie reactie met waterstofgas en waterdamp. Men voegt hieraan sporen van andere producten toe, om uiteindelijk tot de fabricatie van ceramische pastilles te komen die de gewenste geometrie en eigenschappen hebben. De pastilles hebben standaard afmetingen: het zijn kleine cilindertjes met diameter 8.19 mm, met hoogte 13.5 mm, met afrondingen aan de randen, en met een kleine uitsparing aan de boven en onderkant. De porositeit bedraagt ongeveer 5%. De ceramische pastilles worden gebakken aan 1700 graden. Het voordeel van ceramische pastilles van uranium oxide is dat ze niet heftig reageren met water of lucht, mocht er een lek komen in de verpakking, en dat ze tegen heel hoge temperaturen bestendig zijn. Dat maakt ze veel aantrekkelijker dan bijvoorbeeld uranium metaal. Daarentegen heeft het ceramische materiaal een nadeel: de thermische geleiding is niet zo heel goed.

De “verpakkingen” zijn gestandaardiseerde buizen, meestal van een zirkonium legering. Het is een legering die tegelijkertijd mechanisch sterk is, corrosiebestendig in water, tegen hoge temperaturen kan, en weinig last heeft van hoge neutronenfluxen. De dikte van de wand is 0.57 mm, en de buitendiameter is 9.5 mm. Men plaatst 265 pastilles in zulk een zirkonium buis (dat maakt ongeveer 4 meter uit), en spant ze met een veer in de buis. De buis wordt dan verder gevuld met helium onder 25 of 30 bar, en hermetisch afgesloten. Het helium dient zowel om voor lekken te testen als om de thermische geleiding tussen pastilles en verpakking zo goed mogelijk te maken.

Een brandstofelement ondergaat een druk van ongeveer 150 bar en een temperatuur (aan de buitenkant) van 300 graden, en dient drie a vier cycli van elk 1 tot anderhalf jaar mee te gaan in een drukwater reactor. Het gemiddelde vermogen bedraagt van de orde van 175 watt per centimeter staaf, het centrum van de pastilles heeft onder normale omstandigheden een temperatuur van ongeveer 1000 graden, en in “probleem toestanden” 1850 graden. Men heeft een gabarit van normale en uitzonderlijke parameters gedefinieerd waaronder de verpakking intact dient te blijven, waarbij de radioactieve contaminatie buiten de staven niet plaats vindt. Men ontwerpt dan de reactor en de procedures om steeds trachten binnen deze parameter waarden te blijven, zelfs in uitzonderingstoestanden.

De brandstofelementen ondergaan sollicitaties die hun integriteit aanvallen. Men heeft die effecten heel goed bestudeerd. Het einde van een brandstofelement wordt niet zozeer bepaald door de volledige uitputting van de nucleaire brandstof, zoals men zou kunnen denken, maar wel door een beschadiging door gebruik die de integriteit in gevaar zou brengen mocht men verder gaan. De beschadigingen zijn van verschillende aard:

- beschadiging van de pastilles door thermische belasting (de pastilles worden heel heet en zijn bovendien niet uniform verwarmd) en door bestraling: stralingsschade en opbouw van fissieproducten. Dit heeft voor gevolg dat de geometrie van de pastilles verslechtert en dat de structuur van het ceramische materiaal beschadigd wordt (er kunnen stukjes afbreken, barsten in komen...).
- Beschadiging van de buizen door warmte, mechanische sollicitatie (ten gevolge van de beschadigde pastilles), stralingsschade, corrosie...

Uiteindelijk brengen deze beschadigingen de hermetische opsluiting in gevaar, evenals de mechanische vorm en integriteit van de buis zelf. Als dusdanig dient men de brandstofelementen te verwijderen alvorens dit optreedt. Dit geeft dan aan welke de maximale hoeveelheid energie is die

men aan een brandstof element kan onttrekken ; op dit ogenblik ligt dat rond de 47.7 GW dag per ton verrijkt uranium.

De marktleider¹³² in de productie van brandstofelementen voor drukwater reactoren is het Franse bedrijf Framatome dat 1/3 van de markt beheerst. Hierna komen de Amerikaan Westinghouse en de Duitser Siemens.

Voor betere performanties, en voor toekomstige reactortypes, voert men onderzoek uit aan de twee elementen die van belang zijn: de vorm van de brandstof en van de omhulling.

6.3 Huidige brandstofcycli met drukwater reactoren

6.3.a Gebruik van verse brandstof

We hebben gezien dat uranium de huidige brandstofcyclus “binnenkomt” onder de vorm van verrijkt uranium in brandstofelementen. Na enkele perioden in een water reactor te hebben doorgebracht (tijdens elke periode neemt een brandstofelement een verschillende plaats in in het reactorhart om de neutronenfluxen te optimaliseren), en het brandstofelement aan het einde van zijn bruikbaar leven is gekomen (wegens beschadiging van de materiële en mechanische structuur) heeft men ongeveer de volgende inventaris, die natuurlijk afhankelijk is van de graad van opstoken, die we hier als 47.7 GW-dag per ton verrijkt uranium aan 4% zullen beschouwen.

Aanvankelijk was er 96% U-238 en 4% U-235. Bij de uitgang is er ongeveer 92.5% U-238, 0.7% U-235, 0.5% U-236, met andere woorden, nog ongeveer 93.8% uranium. 6.2% zijn andere dingen geworden: 1.2% is plutonium geworden, 0.1% zijn actiniden geworden (neptunium, americium en curium) en 4.9% zijn fissieproducten geworden die voor 2/3 afkomstig zijn van de fissie van U-235, en voor 1/3 afkomstig zijn van de fissie van Pu dat van U-238 afkomstig was. 5% is “opgebruikt” in fissiereacties, en de energie is grotendeels vrijgegeven tijdens die reactie.

Voorlopig beschouwt men dat de fissieproducten en de actiniden “verloren” zijn, maar het is in de toekomst mogelijk om de actiniden op te branden in een snelle reactor of een subkritische installatie. Dat zou dan eerder om redenen van afval optimalisering zijn dan om redenen van energierecuperatie, want de actiniden stellen maar een kleine hoeveelheid voor – daarentegen, hun radiotoxiciteit is groot, en bijgevolg kan het eventueel voordelig zijn om ze op te stoken.

Van het uranium en het plutonium zijn de oneven isotopen (U-235, Pu-239 en Pu-241) splijtbaar met een thermisch spectrum, terwijl het U-238 een vruchtbare brandstof is. Als dusdanig is 94% van wat er uit de reactor komt, in principe herbruikbaar: 0.7% U-235 ; 0.8% splijtbaar plutonium, en 92.5% onaangeroerd U-238. 1.1% zijn “verloren” omdat het oftewel kleine actiniden zijn, oftewel eventallige uranium (U-236) of plutonium isotopen (Pu-240, Pu-242 en een piepkleine hoeveelheid Pu-238), maar ook deze isotopen kunnen in een snel neutronenspectrum gesplijt worden. Laten we ook niet vergeten dat we met ongeveer tien keer meer natuurlijk uranium vertrokken waren om ons verrijkt uranium te fabriceren. Gezien we 5% van het verrijkte uranium energetisch hebben opgebruikt, hebben we slechts 0.5% van het originele natuurlijke uranium opgebruikt, 0.1% verloren aan actiniden en onsplijtbare (in thermisch spectrum) eventallige uranium en plutonium producten en dus is 99.4% recupereerbaar.

¹³²Op de Russen na, die hun eigen, verschillend ontwerp hebben van drukwater reactoren (de VVER) die niet compatibel is met alle andere drukwater reactoren ter wereld, en dus hun eigen, gesloten markt hebben.

De fissieproducten zijn een heel breed gamma, maar bestaan voornamelijk uit de elementen Kr, Sr, Zr, Mo, Ru, Pd, Xe, Cs, Ba, Ce en Nd. Veruit de meeste fissieproducten hebben korte halfwaardetijden, maar er zijn twee “lastige klanten”: Cs-137 en Sr-90 met halfwaardetijden van ongeveer 30 jaar. De kunstmatige actiniden hebben veel langere levensduren, en de lastigste klanten hier zijn de plutonium isotopen.

Indien men de nuttige delen in deze afgewerkte brandstof wil hergebruiken, is de chemische scheiding, waarbij het uranium en het plutonium dienen te worden geëxtraheerd, en de andere actiniden samen met de fissieproducten als afval beschouwd worden uiteraard noodzakelijk. Voorlopig denkt men niet aan een isotopenscheiding van de gerecupereerde brandstof. Dat wil zeggen dat we wel met een “vervuilde” uranium component en een vervuilde plutonium component zitten, omdat die eventallige nucliden bevat, die in een thermisch spectrum niet splitsen, maar wel neutronen-hongerig zijn (grote absorptie werkzame doorsnede).

Men dient namelijk niet te vergeten dat behandelingen van de afgewerkte brandstof 3 problemen inhoudt:

- residuele warmte die moet afgevoerd worden en die zijn oorsprong vindt in het radioactieve verval
- hele hoge activiteit en dus heel strenge stralingsbeschermingsmaatregelen
- ingewikkelde chemie want heel veel stoffen zijn aanwezig (fissieproducten).

Om de eerste twee problemen te verlichten, gaat men een afgewerkt brandstofelement niet onmiddellijk behandelen, maar een tijdje laten “afkoelen” wat de activiteit zowel als de warmteproductie ervan serieus vermindert.

De brandstofelementen in een reactor die een lange tijd aan vol vermogen heeft gedraaid, geven 5 seconden na het stoppen van de kettingreactie (neutronenflux zo goed als nul) nog ongeveer 5% van het nominale vermogen af, door radioactief verval van de snel vervallende fissieproducten. Na twee en een half uur wordt dat nog 1% van het nominale vermogen, en op dat ogenblik kunnen de stoomgeneratoren worden uitgeschakeld en de “koeling bij stilstand” kan nu voor de koeling zorgen. Men laat een brandstofelement dat uit de reactor wordt verwijderd, nog 6 maanden tot een jaar afkoelen in de nabije piscine. Na die tijd gaat een brandstofelement meestal ergens in een gecentraliseerde stokeerplaats verder afkoelen gedurende nog enkele jaren. Na een jaar is het residuele radioactieve vermogen nog ongeveer 0.05% van het nominale vermogen en na vier jaar is dat 0.01% geworden. Men beschouwt dat men vanaf dat ogenblik de afgewerkte brandstof eventueel kan herwerken.

Niettemin is de activiteit nog heel hoog. Om een idee te geven, vers verrijkt uranium met een verrijkingsgraad van 4% heeft een activiteit alfa van 0.1 T Bq per ton (Tera becquerel per ton verrijkt uranium), wat ongeveer vier keer de activiteit is van natuurlijk uranium, maar niet om de reden die men zou denken: het grootste deel van de activiteit van natuurlijk uranium komt van de isotoop U-234 die slechts in sporen aanwezig en die mee is verrijkt. De brandstof die na vier jaar afkoelen wordt beschouwd, heeft (per ton verrijkt uranium) een alfa activiteit van 600 TBq ten gevolge van de zware kernen (hoofdzakelijk Cm-244 en Pu-238) en een bèta-activiteit van 34000 TBq waarvan 5700 TBq ten gevolge van Pu-241 en 28000 TBq ten gevolge van de fissieproducten. Daarnaast is er, ten gevolge van de aanwezigheid van Cm-244, ook een intense neutronenstraling: 10^9 neutronen per seconde per ton. *We kunnen ruwweg stellen dat het materiaal nu ongeveer 100 000 keer actiever is dan voor de reactor doorgang.* Deze brandstofelementen dienen dus onder een behoorlijke stralingsbescherming te worden behandeld.

Na zes maanden is 5 meter water ruimschoots voldoende als stralingsbescherming. Bovendien zorgt het water voor de nodige koeling om de residuele warmte af te voeren. Het is dus ideaal om de opslag van de bestraalde brandstofelementen in een piscine te laten plaatsvinden. Men dient enkel wel op te letten voor een criticiteitsongeluk, want het water is de moderator bij uitstek voor deze brandstof. De piscines voor tijdelijke opslag zijn uitgerust met warmte wisselaars om de warmte af te voeren en ionenuitwisselaars om het water zuiver te houden, ter vermijding van corrosie enerzijds, en om een eventuele radioactieve contaminatie te verwijderen anderzijds. In die condities kunnen brandstofelementen het tientallen jaren uithouden in een piscine, in afwachting van een herwerking.

6.3.b Verwerking van een brandstofelement

Indien men beslist van een bestraald brandstofelement te verwerken, dan wordt dat brandstofelement (na minstens vier jaar afkoelen, maar in de praktijk meestal acht jaar of meer) aan de ingang van het verwerkingsprocede aangeboden. We bespreken hier de verwerking die in La Hague gebeurt, en die de verwerking op zich neemt van de afgewerkte brandstof van de meeste Europese drukwater reactoren op het vaste land. De Engelsen hebben ook een opwerkingsfabriek (in Sellafield) die in grote lijnen hetzelfde proces toepast.

Gezien het hier om hoogradioactieve materialen gaat, gebeuren al de operaties in gesloten hete cellen die zelf in beschermende bunkers en gebouwen zijn geplaatst, en zijn uitgerust met verschillende ventilatie en filter systemen. Een brandstofassemblage bestaat uit een zeker aantal buisvormige brandstofelementen (zirkonium buizen met pastilles erin) en wat mechanische elementen die het geheel bijeenhouden en hadden gediend om bijvoorbeeld de regelstaven te geleiden. Om de gebruikte brandstof chemisch te herwerken dient men die natuurlijk ter beschikking te hebben, maar ze is opgesloten in de pastilles van de brandstofelementen. Men heeft een rustieke en robuuste techniek bedacht om van de hoogactieve brandstofassemblages de brandstof vrij te geven: in een cel knipt een hele grote kniptang de assemblage in kleine stukjes buis! Hierbij komen natuurlijk de gassen vrij van de splijtingsproducten in de mate dat die niet vervallen zijn. Het resultaat van deze operatie is dat er dus stukjes zirkonium buis en constructiemateriaal samen met (stukken van) pastilles vrijkomen, en dat wordt allemaal aan een bad salpeterzuur HNO_3 met een hoge concentratie (3 tot 4 M) aangeboden. De oxides worden gemakkelijk in dat zuur opgelost, terwijl de stukken zirkoniumbuis en constructie-elementen niet opgelost worden. Deze elementen worden gespoeld in het zuur, en dan verwijderd. In het zuur komen dus terecht:

- uranium oxide (200 a 250 gram per liter)
- plutonium oxide (2 a 3 gram per liter)
- actiniden (volledige inventaris, heel kleine absolute hoeveelheid)
- fissieproducten (ongeveer 80% van de inventaris, de rest was gasvormig of onoplosbaar) ;

uranium oxide (uranium heeft oxidatiestap IV in UO_2) wordt geoxideerd tot $\text{UO}_2^{(2+)}$ (oxidatiestap van het uranium: VI). Plutonium zal daarentegen hoofdzakelijk van PuO_2 naar $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ evolueren (hoewel er een kleine contaminatie is van $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2$). Als dusdanig is plutonium vooral in oxidatiestap IV aanwezig. De kleine actiniden (americium en curium) verschijnen in de oplossing onder oxidatiestap III, terwijl neptunium onder oxidatiestap V voorkomt. De meeste fissieproducten lossen ook op, behalve de platinoiden: ruthenium, rhodium, palladium zirconium, molybdeen en technetium die kleine deeltjes vormen, en xenon, krypton en jodium die in de gasfase ontsnappen. De oplossingsprocedure duurt enkele uren. Het spreekt ook vanzelf dat men de hele installatie op

kriticiteit moet verifiëren, gezien we hier potentieel kritische materialen aan het behandelen zijn. Als dusdanig is de afmeting en vorm van elk recipiënt bestudeerd om nooit tot een kritische situatie te komen. De activiteit van deze oplossing is vrij hoog: ongeveer 7.4 Tbq per liter ; er is ook 3 a 4 M salpeterzuur aanwezig.

Er bestaat een “mirakelproduct” die de chemische afzondering van uranium en plutonium mogelijk maakt. Het gaat hem om een organische stof, tributylfosfaat (TBF). Dat heeft, voor de kenners, de vorm van fosforzuur H_3PO_4 , maar waar de drie waterstof atomen zijn vervangen door een butyl groep C_4H_9 . En nu is het zo dat tributylfosfaat een relatief grote affiniteit heeft voor uranium en plutonium ionen die door nitraatgroepen gecomplexeerd zijn. Men gebruikt TBF meestal niet zuiver, maar zelf opgelost in een koolwaterstof zoals dodecaan. Meestal gebruikt men een oplossingsgraad van 30%. Het is een stof die niet met water mengt.

Als men die organische stof (dodecaan met 30% TBF erin) in contact brengt met een waterige oplossing die met nitraat gecomplexeerde uranium, neptunium of plutonium ionen bevat, dan ontstaat er snel een evenwicht tussen de twee fasen, waarbij er relatief veel van de actinide in de organische oplossing wordt opgenomen. Het evenwicht wordt bepaald door een eenvoudige vergelijking:

$$[M_{org}] = D [M_{water}]$$

waarbij D de zogenaamde verdelingscoëfficiënt is. De grootheden tussen rechthoekige haakjes stellen de concentratie van de actinide voor (aantal mol per liter). Bovenstaande relatie is een chemische eigenschap van de twee stoffen (water en TBF oplossing), en de verdelingscoëfficiënt D hangt af van de temperatuur en de concentratie van salpeterzuur in het water, evenals van de actinide en zijn oxidatietrap.

Om een idee te geven, als de salpeterzuur oplossing 2M of 2 molair is (twee mol salpeterzuur per liter oplossing bevat) dan is de verdelingscoëfficiënt voor uranium in de oxidatiestap IV gelijk aan 1.2 en in de oxidatiestap VI gelijk aan 15. Voor plutonium is dat respectievelijk 7.0 en 2.1. De kleine actiniden (die meestal in oxidatiestap III voorkomen) worden zo goed als niet in TBF opgelost.

Als we initieel een hoeveelheid stof M hebben die opgelost is in een waterige oplossing met volume A en neem aan dat we een volume O aan organische stof hebben, dan willen we weten welke de eindconcentraties zijn in het waterige milieu en in de organische stof. We kunnen twee vergelijkingen schrijven: een is gewoon bovenstaande evenwichtsvergelijking, en de andere geeft de totale boekhoudkunde van de stof M aan: de totale hoeveelheid van stof M in de waterige oplossing plus de totale hoeveelheid van stof M in de organische fase dient gelijk te zijn aan de originele hoeveelheid M die we hebben toegepast. Dat wordt:

$$[M_{org}] = D [M_{aq}]$$

en:

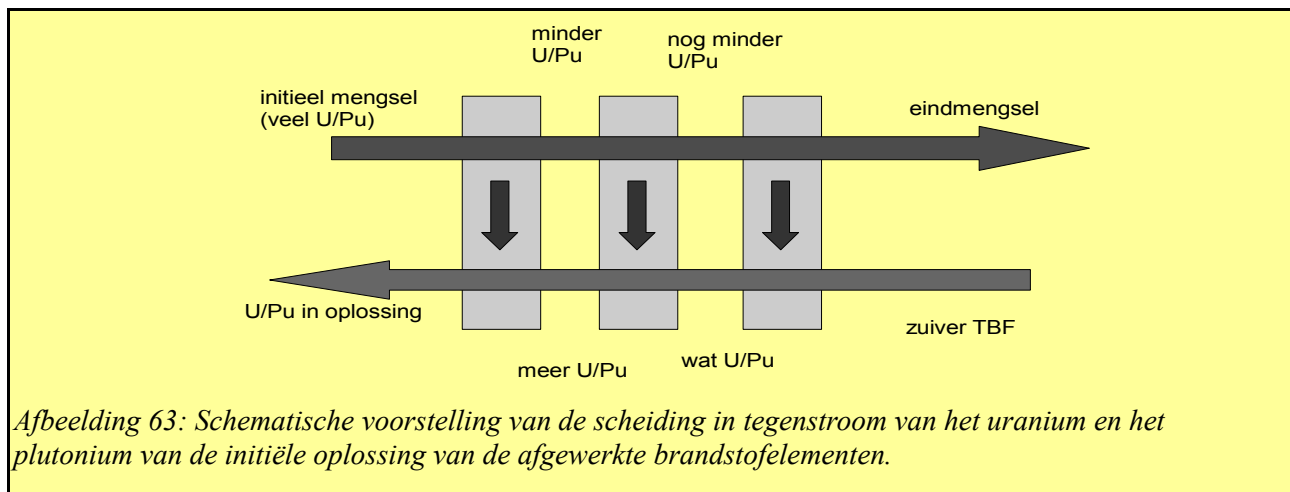
$$M = A \times [M_{aq}] + O \times [M_{org}]$$

Hieruit kan men afleiden: $M = A \times [M_{aq}] + O \times D \times [M_{aq}] = (A + O D) [M_{aq}]$; nu is $M = A [M_{start}]$ waarbij we de start concentratie hebben in de waterige oplossing alvorens die in contact is gebracht met de organische fase, en bijgevolg vinden we uiteindelijk:

$$[M_{aq}] = \frac{[M_{start}]}{1 + E} \text{ met } E = D \frac{O}{A}.$$

Als we een waterige oplossing van volume A met een zekere startconcentratie in contact brengen met een volume O van onze TBF oplossing, vinden we dat de concentratie die nog overblijft in het water gegeven is door deze vergelijking. De concentratie in het water wordt met een factor $E+1$ verminderd. Men kan E zo groot maken als men wil door een

groot volume organische stof in contact te brengen met een klein volume waterige oplossing. Na scheiding van de fasen (gewoon decanteren) kan men eventueel het proces herbeginnen. Het is op die manier mogelijk om een kwasi-volledige extractie te bekomen van de stof M in de organische fase. In de praktijk doet men dat wat anders en gaat men een continu tegenstroom procede installeren (zie figuur 63), waarbij de waterige oplossing rechts binnenkomt en de organische stof links binnenkomt. Als dusdanig komt de zuivere organische stof in contact met een arme waterige oplossing, waaruit nog wat stof wordt geëxtraheerd. De organische stof bevat nu reeds wat stof, en komt vervolgens in contact met wat rijkere waterige oplossing, waaruit die weer een deel extraheert (en zo de armere oplossing van daarnet produceert), enzovoort. In de laatste trap komt de reeds behoorlijk “geladen” organische stof in contact met de originele waterige oplossing.



Afbeelding 63: Schematische voorstelling van de scheiding in tegenstroom van het uranium en het plutonium van de initiële oplossing van de afgewerkte brandstofelementen.

De selectieve oplossing van de uranium en plutonium ionen (die complexen hebben gevormd met de nitraat ionen) zorgt ervoor dat men na het oplossen van de brandstof elementen, uit de ingewikkelde soep, uranium en plutonium heel goed kan extraheren. Er treedt, van alle fissieproducten, slechts een kleine contaminatie ten gevolge van ruthenium op dat ook een klein beetje door het TBF wordt geëxtraheerd en in de U-Pu stroom terecht komt ; ook technetium heeft die eigenschap. Maar we hebben uiteindelijk bekomen dat het uranium en plutonium in de organische fase zit, en niet meer in de waterige fase.

We hebben op dit ogenblik de volgende situatie:

- het uranium en plutonium is geëxtraheerd door gebruik te maken van de TBF oplossing ; hierin bevindt zich een kleine contaminatie van Ru en Tc.
- De stukken zirkonium buis en constructiemetaal, samen met een aantal onoplosbare fissieproducten, waren overgebleven als vast residu. Men scheidt het “grove” residu (stukjes zirkoniumbuis en constructie-elementen) van het fijne residu (onoplosbare fissieproducten).
- De gasvormige fissieproducten die in de ventilatieflux van de eenheid aanwezig zijn
- De salpeterzuur oplossing die het grote deel van de fissieproducten bevat evenals de kleine actiniden (voornamelijk Am en Cm).

De gasvormige fissieproducten onder de vorm van edelgassen (krypton en xenon, maar voornamelijk Kr-85) evenals een kleine hoeveelheid C-14 worden, na filtering en controle, vrijgegeven in de atmosfeer. Er is hierbij wel een kleine radioactieve belasting van het milieu die op het eerste zicht schokkend kan lijken, maar die is het niet echt. Er wordt ongeveer 300 000 Tbq per

jaar aan Kr-85 geloosd in de atmosfeer, maar de specifieke biologische impact van Kr-85 is heel klein¹³³. Dat komt omdat krypton een edelgas is dat niet in het lichaam wordt opgenomen, en dus enkel maar als “externe” bron van zwakke bèta straling dient (die bijvoorbeeld door kledij reeds wordt tegengehouden). Kr-85 wordt trouwens ook natuurlijk gevormd in de hoge atmosfeer.

De hoeveelheid C-14 is relatief klein, 20 T Bq worden per jaar geloosd, terwijl er veel grotere hoeveelheden in de natuur aanwezig zijn, voornamelijk ten gevolge van kosmische straling.

Men heeft ook I-129, de enige radioactieve isotoop van jodium die is overgebleven na de 4 jaar of meer afkoeling. Men dient I-129 niet te verwarren met de hoog-actieve I-131. *Men heeft in de huidige stand van zaken beslist om het I-129 in zeewater op te lossen*, waar het zich gaat mengen met de grote hoeveelheid natuurlijk jodium in de zee en als dusdanig een verwaarloosbare radiotoxiciteit voorstelt. I-129 is een zwakke bèta-emitter met een halfwaardetijd van 16 miljoen jaren, wat direct aangeeft dat hij een lage activiteit heeft. De keuze van het zeewater komt van het feit dat er in zeewater reeds een zekere concentratie aan niet-radioactief jodium aanwezig is. Het verdunnen van het licht actieve I-129 in deze veel grotere hoeveelheid niet-actieve jodium is hetzelfde principe als het innemen van jodium tabletten wanneer er een I-131 vrijgave is: men verdunt het actieve materiaal met een veel grotere niet-actieve hoeveelheid, wat de radiotoxiciteit van het actieve materiaal bijgevolg met dezelfde factor vermindert, want de opname in het lichaam of in een voedingsketen maakt geen isotopische scheiding.

Deze losingen zijn bestudeerd door het Franse agentschap van stralingsbescherming en worden als aanvaardbaar beschouwd op dit ogenblik. De impact voor de referentiegroep (de omwonenden) is 0.02 mSv per jaar (vergelijk met 2.4 mSv per jaar aan natuurlijke dosis), wat dus 50 keer kleiner is dan de wettelijke bovengrenzen voor het grote publiek, en op dit ogenblik dus als voldoende laag (ALARA) wordt beschouwd. Indien daar ooit verandering in komt, dan kan men daar wel een oplossing voor vinden, want de vrijgave is niet onoverkomelijk maar vrijwillig, gezien de verwaarloosbare impact op de gezondheid volgens de huidige stand van de kennis ter zake.

De grove stukken onopgelost materiaal (hoofdzakelijk stukken zirkoniumbuis) worden gecompacteerd en als afval beschouwd. De oplossing van de fissieproducten en kleine actiniden, evenals het fijne onopgeloste deel, is het uiteindelijke hoogradioactieve afval, en zal als dusdanig geconditioneerd worden. De uranium-plutonium oplossing is de gewenste “recuperatie” van het hele procédé, want deze bevat de vruchtbare en splijtbare nucliden.

6.3.c Het PUREX proces

Het PUREX proces is soms de oorzaak van polemieken, en was destijds gevisieerd door de Carter politiek. Het is een chemisch proces dat het toelaat om chemisch het uranium van het plutonium te scheiden. Als dusdanig heeft het PUREX proces een potentieel “proliferatie probleem” in dat het een ideaal middel is om vanaf relatief zwak bestraald natuurlijk uranium, plutonium te bekomen van militaire kwaliteit. Het is inderdaad zo dat het PUREX proces eerst op punt was gesteld voor militaire doeleinden. Niettemin is het een proces dat ondertussen heel goed is gekend en trouwens over meer dan 50 jaar is verbeterd. Men gaat op de oxidatietrappen van het uranium en het plutonium spelen, om als dusdanig verschillende verdelingscoëfficiënten voor het TBF/water te bekomen voor uranium en plutonium. Men kan deze oxidatietrappen veranderen door in te spelen op de zuurtegraad van de waterige oplossing, en door additieven toe te voegen. Bijvoorbeeld, bij

133 Zie bijvoorbeeld <http://www.ead.anl.gov/pub/doc/Krypton.pdf>

lage zuurtegraad gaat het plutonium van oxidatiegraad IV naar oxidatiegraad III evolueren, terwijl de oxidatiegraad VI van uranium nog steeds stabiel is. Hoewel bij 0.02 molair salpeterzuur, de verdelingscoëfficiënt van uranium VI slechts 0.28 bedraagt, kan men niettemin toch het uranium (wat moeizaam) gaan oplossen met TBF, terwijl het plutonium in oxidatietrap III helemaal niet oplost in TBF. Op dezelfde wijze kan men eventueel uranium van neptunium scheiden, door het neptunium in oxidatietrap V te brengen, waar het eveneens niet oplosbaar is in TBF. Als dusdanig kan men naargelang, de betreffende stof preferentieel in de organische fase of in de waterige fase laten terechtkomen. Na scheiding van de fasen heeft men dan de afzondering (meestal niet volledig) van de betreffende stof bekomen. Als men een grotere graad van zuiverheid wil bekomen, dient men gewoon het procedé te herhalen. Merk op dat het hier om een scheikundig proces gaat, dan geen isotopische scheiding inhoudt. Als dusdanig zullen de isotopische samenstellingen van de verschillende productstromen dezelfde zijn als die relatieve isotopische verhoudingen van de stof in de afgewerkte brandstof. Uit het PUREX proces komen dus de gescheiden uranium en plutonium componenten van de afgewerkte brandstof. De fabriek in La Hague slaagt erin om 99.88% van het plutonium te extraheren. De organische stoffen en het salpeterzuur komen voor in gesloten circuit: zij worden aan het einde van het proces gerecupereerd en gezuiverd om terug gebruikt te worden. Er komt als dusdanig bijna geen chemisch afval uit deze cyclus.

Eens men de scheiding heeft toegepast bekomt men 3 stromen:

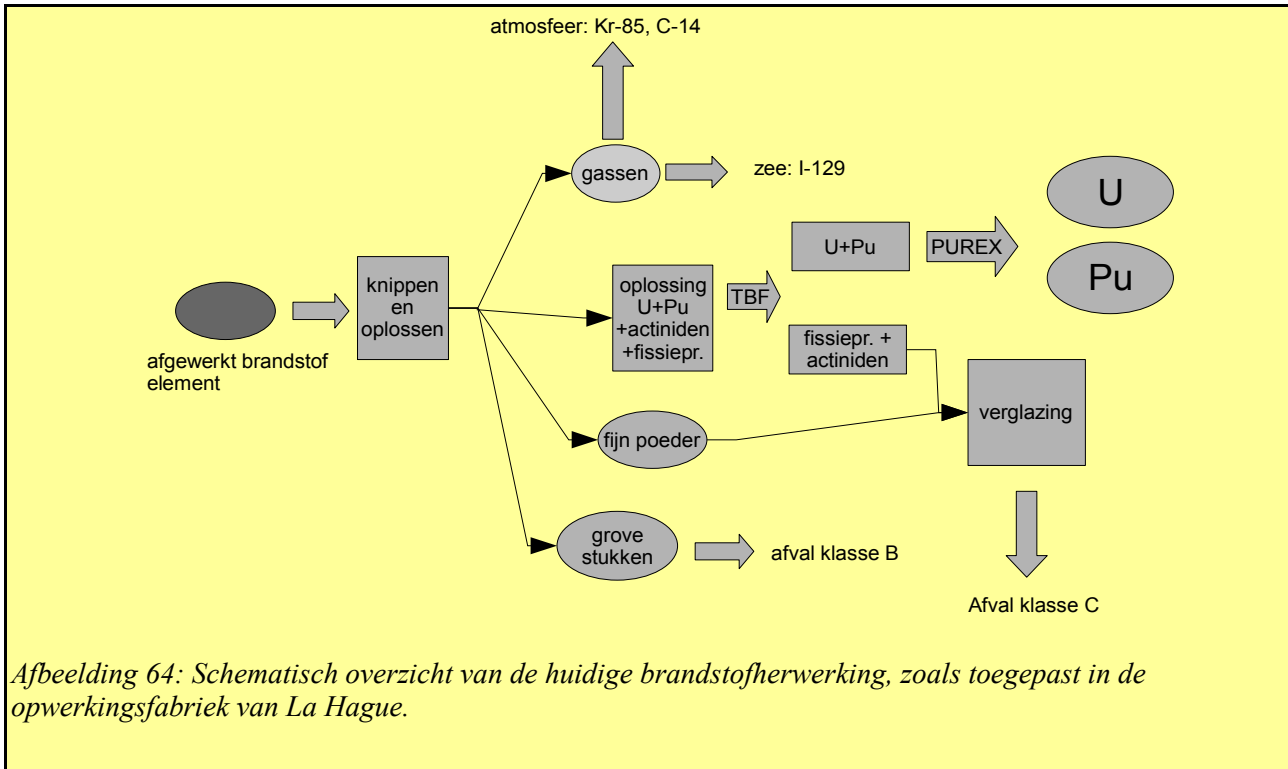
- de fissieproducten en kleine actiniden
- uranium in oplossing
- plutonium in oplossing

De eerste stroom vormt het uiteindelijke afval op dit ogenblik ; er bestaan plannen om ook de kleine actiniden te recupereren maar op dit ogenblik is dat in het stadium van onderzoek. Na droging wordt de stroom fissieproducten uit de oplossing, samen met het fijne onopgeloste afval van het begin van het procedé, verglaasd en zal afval van klasse C vormen. Een overzicht van de hele opwerking wordt getoond in afbeelding 64.

De uranium stroom bevat het te recupereren uranium, dat ongeveer overeenkomt met natuurlijk uranium, behalve dat het een kleine fractie U-236 bevat (ten gevolge van de absorptie zonder fissie van neutronen op U-235). Voorlopig doet men niet veel met dat uranium. Gezien het actiever is dan natuurlijk uranium wegens de contaminatie met U-236, verkiest men om dat uranium niet naar een verrijkingsfabriek te sturen die normaal met laag-radioactief materiaal werkt. Men verkiest om dat uranium voorlopig op te slaan (net zoals het verarmde uranium dat uit de verrijkingsfabriek komt) als toekomstige brandstof voor kweekreactoren.

De plutonium stroom wordt gezuiverd en in plutonium oxide omgezet via een proces dat gebruik maakt van oxaal zuur dat toelaat om het plutonium nitraat in oplossing neer te slaan als plutonium oxalaat. Het poeder wordt dan in een oven met waterdamp en zuurstof verhit om plutonium oxide te vormen. Bij al deze stappen dient men criticiteit te vermijden. Men gebruikt het bekomen plutonium oxide voorlopig om MOX brandstof voor drukwater reactoren te fabriceren, en als dusdanig zijn er strikte zuiverheidseisen en eisen van geometrie. Het uiteindelijke plutonium oxide wordt in een soort conserveblik van 3 kg geplaatst. Vijf zulke blikken gaan in een cilindervormige container, die zelf in een dikke container gaat en klaar is voor transport.

Jammer genoeg vervalt Pu-241 met een halfwaardetijd van ongeveer 15 jaar naar Am-241. Men kan dat plutonium dus niet te lang opslaan zonder een zware vervuiling door americium te bekomen, wat de neutron transport eigenschappen evenals de radiotoxiciteitseigenschappen slecht



beïnvloedt. Vandaar het idee om MOX gaan te gebruiken in drukwater reactoren; we kunnen immers het geproduceerde plutonium niet voor lange tijd opslaan voor later gebruik in een snelle reactor, gezien het plutonium voor een deel zal omgezet zijn in americium tegen dan.

Eventueel “mislukt” plutonium, of plutonium dat te oud geworden is en teveel americium bevat, kan terug vooraan in de verwerkingsketen toegevoegd worden, zodat het americium gescheiden wordt van het nog bruikbare plutonium.

6.3.d Transport van de nucleaire materialen

We hebben gezien dat er van natuurlijk uranium eerst een zuiver product (uranium hexafluoride) dient te worden gemaakt, dat er uranium verrijking is, dat de brandstofelementen worden gefabriceerd, dat de brandstof die uit een reactor komt, een koelperiode dient te ondergaan, dat die dan in de opwerkingsfabriek van La Hague dient te worden gescheiden in de fluxen “afval”, “uranium recuperatie” en “plutonium recuperatie”, dat van dat plutonium nieuwe MOX brandstof wordt gemaakt... Al dat impliceert dat er soms heel hoog actieve stoffen getransporteerd worden. Gezien mechanisch transport een veel gevaarlijker activiteit is dan kernenergie, heeft men het probleem dat men het transport dient te beveiligen. Men heeft twee klassen van transport: categorie A en categorie B. Voor elke radionuclide heeft men een maximale activiteit A1 en A2 aangegeven die rekening houdt met de mogelijke externe bestraling (A1) en met de interne contaminatie (A2). Indien de getransporteerde hoeveelheid materiaal kleiner is dan A1 of A2 naargelang, dan heeft men

een transport van type A. Zo niet, dan heeft men een transport van type B. Voor een transport van type A zijn er niet veel veiligheidsmaatregelen nodig:

- de container moet weerstaan aan een waterbesproeiing van 1 uur
- de container moet weerstaan aan een val van 1.2 meter op een hard oppervlak
- de container moet 5 keer zijn eigen gewicht kunnen verdragen
- de container moet een val van een scherp voorwerp van 6 kg van 1 meter hoog kunnen weerstaan.

Voor een transport van type B heeft men volgende extra vereisten:

- vrije val van 9 meter op hard oppervlak
- weerstaan in een vuur van 800 graden gedurende een half uur
- weerstaan aan een onderdompeling tot 200 meter diep gedurende 8 uur

deze eisen gaan er duidelijk van uit dat er een verkeersongeluk is gebeurd en dat de reddingsdiensten enige tijd nodig hebben om tussen te komen: in zulk een geval dient de integriteit van de verpakking gegarandeerd te zijn. Natuurlijk heeft men aan verschillende scenario's gedacht, en als dusdanig – zoals steeds in de westerse nucleaire sector – getracht om de objectieve risico's zo klein mogelijk te houden. Niettemin zijn de risico's bij transport niet geheel nul ten gevolge van de hoge risico's in het algemeen die mechanisch transport met zich meebrengen. Als dusdanig dient men toch wel het aantal transport activiteiten met grote hoeveelheden hoog-radioactief materiaal tot een minimum te herleiden. Het is deze factor die soms vergeten wordt bij rooskleurige schema's om bijvoorbeeld kleine actiniden gaan te verbranden in snelle reactoren of speciale installaties. Indien men al dat hoog-actief materiaal terug naar verschillende reactoren moet brengen, dan dient men de afweging te maken tussen de substitutie van twee (kleine) risico's:

- enerzijds het verminderde risico verbonden aan de mogelijkheid dat er actiniden vrijkomen binnen 10 000 jaar – zoals we zullen zien is dat een heel klein risico!
- Anderzijds toegenomen risico dat bij al het transport en de verwerking van deze actiniden ook stoffen vrijkomen

Afhankelijk van de techniek die men gaat aanwenden, en de strategie die men gaat toepassen, zal de balans in de ene of de andere richting uitslaan en men dient de reactie te vermijden analoog aan de reactie van de persoon die dan maar 2000 km met zijn auto gaat rijden omdat hij bang is dat het vliegtuig waarmee hij die reis ging maken, een ongeluk zou hebben.

6.3.e Uranium recyclage.

Het probleem met het uranium dat gerecupereerd wordt uit de afgewerkte brandstof, is dat het een vrij hoog gehalte aan U-236 bevat (bekomen door neutronenabsorptie op U-235 dat geen splijting heeft ondergaan). Dat stelt drie problemen: ten eerste is U-236 *een wat actieve stof* die maakt dat we een speciale radiologische bescherming tegen contaminatie nodig hebben als we ermee werken, wat niet het geval was met vers of verrijkt uranium. We wensen bestaande installaties niet te contamineren met actieve stoffen. Het tweede probleem is dat U-236 *een veel kleiner massaverschil* bezit met U-235 dan U-238. Een eventuele isotopische scheiding zou dus extreem moeilijk en arbeidsintensief worden. Het derde, voornaamste probleem is dat bij thermische energieën, U-236 een *sterke neutronenabsorptie* vertoont. Als dusdanig verstoort het de werking

van een thermische reactor. Al dat maakt dat het helemaal niet interessant is om trachten het afgezonderde uranium te recycleren in een park van thermische water reactoren. Daarentegen, het is best bruikbaar in een snel spectrum. In een snelle reactor is er niet echt een probleem om U-236 te ontvangen, dat evengoed gesplitst wordt en dus nuttige energie levert. Alleen, alvorens we enige nood zouden hebben om dit uranium in een kweekreactor gaan te gebruiken, hebben we nog enorme hoeveelheden verarmd uranium liggen die kunnen gebruikt worden. Dat uranium kan goed “opzij gelegd” worden als strategische brandstof-voorraad voor de verre toekomst. Het zou dus zonde zijn om het weg te gooien, maar de aanwezigheid van U-236 maakt dat het voorlopig geen aantrekkelijke eigenschappen heeft die het economisch verantwoord maken om het te gebruiken.

6.3.f Plutonium recyclage.

Uit de afgewerkte brandstof heeft men een plutonium stroom gerecupereerd die uit een “goed” en een “slecht” deel bestaat: het goede deel zijn de oneven massagetallen (239, 241), het slechte deel de even massagetallen (238,240,242). Niettemin is het plutonium een rijke brandstof die men a priori ook in een thermisch spectrum kan gebruiken. Er zijn echter moeilijkheden en de voornaamste is dat de huidige drukwater reactoren daar nooit op voorzien zijn en men het basisontwerp dus zou moeten veranderen om een efficiënte plutonium reactor te maken. Hoewel oppervlakkig analoog aan verrijkt uranium, zijn er toch wel verschillen tussen plutonium brandstof en uranium brandstof in een thermische reactor:

- de splijtbare plutonium isotopen hebben een resonantiepiek bij 0.3 eV en de niet-splijtbare plutonium isotopen bij 1.06 eV (Pu-240) en bij 2.5 eV (Pu-242). Dat maakt dat het thermische deel van het spectrum serieus vervormd en onderdrukt is (zelfbeschermingseigenschap van het energiespectrum). Als dusdanig zijn er relatief meer snelle neutronen aanwezig in een reactor met veel plutonium dan in een reactor met uranium. Het spectrum wordt harder.
- Dat houdt op zijn beurt in dat de resonanties veel belangrijker worden, en dat de temperatuurscoëfficiënt veel negatiever wordt. Dat is een goede zaak op zich, maar het verandert de controle van de reactor.
- Het hardere spectrum maakt dat de Xenon vergiftiging vermindert.
- Plutonium produceert ook gemiddeld meer neutronen per splijting dan uranium, en als dusdanig gaat er relatief meer absorptie optreden. Dat maakt dat het contrast met de controle-elementen vermindert. De fractie vertraagde neutronen neemt echter ook af, zodat de controle een beetje “nerveuzer” wordt.
- De resonanties zijn anders en belangrijker dan in het geval van uranium.

Alle bovenstaande eigenschappen zijn niet noodzakelijk negatieve eigenschappen! Maar zij veranderen wel de basis ontwerp parameters van een thermische reactor. Het is dus wel heel goed mogelijk om een goede, veilige “alles plutonium” thermische reactor te bouwen ; alleen zal dat ontwerp verschillen van een reactor die enkel is bedoeld om met verrijkt uranium te werken, en dat is het huidige probleem. De huidige reactoren van de tweede generatie zijn nooit ontworpen om met plutonium te werken – in tegenstelling tot de nieuwe ontwerpen van de reactoren van de derde generatie. Dat maakt dat men ze slechts beperkt met plutonium kan laden, om ze niet te ver van hun ontwerp parameters te brengen. Het wordt nog moeilijker om plutonium van een herhaalde cyclus (met een nog groter aandeel aan even-massa getal isotopen) te gebruiken in de huidige drukwater

reactoren. Dat plutonium zal veel gemakkelijker aangewend worden in een reactor met snel spectrum, waar zowel even- als oneventallige isotopen gesplitst kunnen worden.

Er is trouwens een extra moeilijkheid: het Pu-241 vervalt met een halfwaardetijd van ongeveer 15 jaar naar Am-241, een hoogst ongewenst product. Daar waar Pu-241 een splijtbare brandstof is, is Am-241 enkel maar een hoog-actieve neutronenabsorbeerder, alles wat men wil vermijden. Bij een te hoog gehalte aan Am-241 kan men het plutonium niet meer gebruiken, en dient men het geheel terug naar de opwerkingsfabriek te sturen, waar het Am-241 afgescheiden wordt. Men kan dus niet te lang wachten met een voorraad Pu zoals die uit de verwerking van de brandstof van een drukwater reactor komt om het te gebruiken. Met de afgewerkte brandstof van een snelle reactor is dat anders: daar is het plutonium vooral Pu-239, en worden er haast geen andere plutonium isotopen gevormd. Dat plutonium kan lang bijgehouden worden. Maar de isotopische samenstelling van het plutonium dat uit een drukwater reactor komt, bevat nu eenmaal verschillende isotopen.

Op dit ogenblik, met de bestaande drukwater reactoren, past men de zogenaamde MOX brandstof toe. Men mengt het gerecupereerde plutonium oxide *met verarmd uranium oxide*. Dat laat ons toe om eens iets te doen met die grote opslag van verarmd uranium. Het huidige proces heet het MIMAS proces, waarbij eerst het gerecupereerde plutonium oxide ongeveer in de verhouding ¼ gemengd wordt met het arme uranium oxide. Eens dit zorgvuldig is gehomogeniseerd, gebruikt men dit materiaal om de uiteindelijke MOX brandstof van het gewenste plutonium gehalte te fabriceren, door het toevoegen van extra uranium oxide. Gezien de hoge activiteit van deze materialen, dient al dat werk in “warme cellen” te gebeuren onder afstandsbediening. Bij de hele productie dient men te garanderen dat men steeds sub-kritisch blijft – dat is trouwens een van de redenen om het mengen in twee stappen te laten verlopen.

Omdat de reactoren van tweede generatie nooit bedoeld waren om plutonium te ontvangen, hebben we een gecompliceerd laadschema nodig om de werkingsparameters van de reactor aanvaardbaar te houden. Men heeft in een “gemoxte” drukwater reactor tot 1/3 van de brandstof assemblages zogenaamde MOX assemblages. De andere zijn standaard verrijkte uranium assemblages. De keuze van de plaats van de MOX assemblages is cruciaal om een goede neutronenflux verdeling in het reactor hart te bekomen.

Men fabriceert 3 verschillende soorten MOX: brandstofstaven met 1.8% splijtbaar plutonium, brandstofstaven met 3.87% splijtbaar plutonium, en brandstofstaven met 5.99% splijtbaar plutonium. Een MOX brandstof assemblage (17 maal 17) bevat 184 “centrale” MOX brandstofstaven van 5.99%, bevat 68 brandstofstaven van 3.87% op de randen, en bevat 12 brandstofstaven van 1.8% op de hoeken. De reden is dat de fluxdichtheid (wegens de hogere absorptie) in het plutonium lager is dan in de standaard uranium assemblages. Als dusdanig zou in de overgangzone het plutonium aan een hoger-dan-normale fluxdichtheid worden blootgesteld, en dus een te groot lokaal vermogen (en dus temperatuur) bereiken. Men heeft dus een geleidelijke overgang van lage plutonium concentratie aan de buitenkant naar hogere concentratie in het centrum van de assemblage, om de vermogensdichtheid zo constant mogelijk te houden.

De eigenschappen van MOX pastilles zijn iets minder goed dan die van UO₂ pastilles. Er komen meer gassen vrij, de temperatuursbelasting is hoger enerzijds omdat plutonium oxide een lagere warmtegeleidingscoëfficiënt heeft, en anderzijds door een soms hoger lokaal vermogen. Dat maakt dat men met MOX brandstof elementen een minder grote opbranding kan bekomen dan met gewone uranium brandstof elementen ; er wordt onderzoek verricht om daar iets aan te doen. Men heeft bijvoorbeeld vastgesteld dat het toevoegen van een klein beetje chroom aan de MOX veel betere mechanische stabiliteit toekent. Men werkt ook aan een betere kwaliteit MOX met het oog op hun

gebruik in een derde generatie reactor (bijvoorbeeld de EPR) waar men hogere verbrandingsgraden wil bereiken.

Het huidige schema van de eenmalige recyclage van plutonium in drukwater reactoren onder de vorm van MOX bespaart ongeveer 10% vers uranium. Dat is geen spectaculair resultaat, maar het is toch altijd dat. Daarentegen zadelt het ons voorlopig op met de afgewerkte MOX brandstof elementen waarvan het herwerken voorlopig is uitgesteld. Hoewel men hiervan ook het uranium en plutonium in principe zou kunnen scheiden, doet men dat niet. Men houdt deze afgewerkte brandstof elementen voorlopig bij om er een toekomstige generatie kweekreactoren mee op te starten. Indien het idee is om die MOX als eind afval te beschouwen, dan was dat uiteindelijk geen goed idee om in de eerste plaats MOX te fabriceren: het plutonium van deze afgewerkte MOX brandstof is, als afvalstof, vervelender dan het plutonium van “gewone” afgewerkte brandstof.

We zullen hier enkele verschillende scenario's beschouwen, die een idee geven van de hoeveelheid afval die per TWh-e wordt geproduceerd. Natuurlijk wordt er steeds ongeveer de zelfde hoeveelheid fissieproducten geproduceerd in alle opties. De vraag is gewoon van hoeveel zware kernen (actiniden) in de brandstof aanwezig zijn en uiteindelijk niet gesplitst worden. Het spreekt vanzelf dat de volgende cijfers slechts indicaties zijn, gezien de precieze cijfers afhangen van verschillende ontwerpdetails. Bron: cursus van Prof. R. Odoj.

- Eerste scenario: de open cyclus.
- Tweede scenario: brandstofherwerking voor de eerste doorgang, eenmalige MOX cyclus en nadien wordt de afgewerkte MOX brandstof als afval beschouwd.
- Derde scenario: brandstofherwerking, en nadien herhaald verbruik van het gerecupereerde plutonium in snelle reactoren.
- Vierde scenario: brandstofherwerking, herhaald verbruik van plutonium en van afgescheiden actiniden in snelle reactoren.

In de volgende tabel geven we de actiniden-inhoud aan van de als afval beschouwde stoffen (naast, zoals gezegd, de fissieproducten die in de 4 scenario's dezelfde zijn). We beschouwen het afval per geproduceerde elektrische TWh.

Scenario	1	2	3	4
Actiniden (alle)	1.7 ton	430 kg	2.6 kg	0.59 kg
U-235	14 kg	0.54 kg	0.5 gram	0.7 gram
Pu-239	11 kg	12 kg	43 gram	52 gram

Men ziet hier duidelijk dat een doorgedreven herwerking van de brandstof een gunstige invloed heeft op de totale massa van actiniden in het afval. In scenario's 1 en 2 bestaat die natuurlijk grotendeels uit U-238 die deel uitmaakt van het “weggegooide brandstof-element”.

6.3.g Sluiten van de brandstofcyclus

In een reactor met snel spectrum dient men helemaal niet zo nauwgezet te zijn met de samenstelling van de brandstof. Het onderscheid tussen vruchtbare en splijtbare nucliden vervaagt in een snelle

reactor. De meeste actiniden hebben een splijtingswerkzame doorsnede in een snel spectrum, en ook een absorptie werkzame doorsnede. Men dient in een snelle reactor gewoon voldoende splijtingswerkzame doorsnede te hebben, en geen te hoge absorptie werkzame doorsnede naast de U-238 absorptie werkzame doorsnede. Met andere woorden, men kan wel een zekere hoeveelheid kleine actiniden tolereren in zulke reactor ; die zullen dan mee opgestookt worden als splijtbare kernen bij snel spectrum. Men heeft als dusdanig de mogelijkheid om verschillende scenario's te bedenken qua brandstof herwerking. Dat gaat van een volledige scheiding van zowel plutonium als uranium als de kleine actiniden, tot het enkel scheiden van de gehele familie actiniden versus fissieproducten.

Zoals we gezien hebben, volstaat het PUREX proces reeds om de essentie van de operatie door te voeren: we scheiden een stroom uranium en plutonium met hoge zuiverheid af. Er is nog onderzoek naar om een goede, industrialiseerbare procedure te bekomen die de kleine actiniden kan afscheiden van de rest: het probleem ligt hem echter in het feit dat americium zich scheikundig heel sterk verwant weet met de lanthaniden waarvan er gemakkelijk 50 keer meer aanwezig zijn in de fissieproducten. Er bestaan reeds scheikundige processen die de scheiding van de actiniden en de lanthaniden kunnen doorvoeren, maar op dit ogenblik onderzoekt men of zij industrialiseerbaar zijn. Met andere woorden, met wat op dit ogenblik bestaat kunnen we de brandstofcyclus reeds grotendeels sluiten, en met wat enkel nog een stap van industrialisering moet ondergaan, kunnen we het laatste stukje, namelijk de afscheiding van de kleine actiniden, ook nog sluiten.

Alleen, het is niet evident dat dat de cyclus is in de beste vorm. Vandaar dat men op dit ogenblik onderzoek doet naar verschillende alternatieven. Het is echter belangrijk te beseffen dat we nu reeds een methode hebben om de brandstofcyclus te sluiten qua brandstofherwerking ; misschien vinden we er betere, dat zal het onderzoek en de toekomst uitwijzen.

Wat de brandstof cyclus betreft, geeft bovenstaande discussie aan dat we zeker zijn van de industriële toepasbaarheid van de scheiding der chemische elementen wat plutonium en uranium betreft, en dat het onderzoek reeds ver gevorderd is betreffende de kleine actiniden. Maar de brandstofcyclus bevat nog andere aspecten: we moeten nu nog van deze chemische stoffen brandstofelementen maken. De meeste geavanceerde reactorontwerpen van de vierde generatie stellen een hoop eisen aan die brandstofelementen, die verregaander zijn dan de brandstofelementen die men gebruikt heeft in de vorige reactoren met snel spectrum (bijna allemaal reactoren met natrium koeling). Men is ondertussen immers veel veeleisender geworden op het vlak van veiligheid en performantie en de huidige brandstofelementen voldoen niet echt aan die vereisten in een geavanceerde reactor. Er gebeurt dus op dit ogenblik vrij veel materiaalonderzoek om de karakteristieken van de brandstofelementen voor snelle reactoren te verbeteren.

6.4 Einde van de cyclus: afvalbehandeling

6.4.a Soorten nucleair afval.

Nucleaire activiteiten (zoals trouwens de meeste menselijke activiteiten) genereren afval, dat wil zeggen, materiële stoffen met dewelke we niets nuttigs meer kunnen doen, of materiële stoffen waarvan het eventuele verdere nut geen economische zin meer heeft. Soms zijn die stoffen zelfs storend, schadelijk of gevaarlijk. De natuur van de nucleaire activiteiten maken dat daar vaak radionucliden in zitten die een evident gevaar voor de gezondheid inhouden. Soms zijn het de radionucliden zelf die het hoofddeel van het afval uitmaken (denk maar aan splijtingsproducten),

vaak zijn het echter gewone materiële objecten (handschoenen, metalen onderdelen...) die gecontamineerd zijn met wat radioactieve stoffen, ofwel door extern contact, ofwel door activering. Onder “nucleair afval” verstaat men dus een hele waaier van afvalstoffen, met verschillende eigenschappen, gevaren en hoeveelheden. Men dient als dusdanig een verschil te maken tussen verschillende soorten “radioactief afval”. De plasticen overschoenen die men aandoet als men in een lokaal gaat met potentiële contaminatie, zijn na gebruik “radioactief afval”, en de fissieproducten die uit een reactor komen, zijn ook “radioactief afval”, maar er is duidelijk een wereld verschil tussen de toxiciteit van beide.

In Frankrijk heeft men 3 (en binnenkort 4) categorieën van nucleair afval. Deze categorieën zijn niet internationaal gestandaardiseerd, en elk land heeft een beetje zijn eigen, verschillende, classificatie. Maar niettemin zijn de grote ideeën wel overal dezelfde, ook al verschillen de definities. De classificatie van het afval draait om verschillende grootheden. De belangrijkste grootheid is natuurlijk *de activiteit*, maar de activiteit op zich zegt niet alles. Een alfa-activiteit stelt bijvoorbeeld geen problemen als de bron inert en ingekapseld is, terwijl een harde gamma activiteit meer maatregelen nodig heeft. Niettemin is de activiteit een min of meer goede indicator van de categorie van afval. Om een idee te geven: een kilogram aardkorst heeft een gemiddelde activiteit van 2000 Bq per kilogram. Het menselijke lichaam heeft een natuurlijke activiteit van 100 Bq per kilogram. Een liter melk: 80 Bq. Zeewater: 16 Bq. Een andere parameter die van belang is, is de *levensduur* (de halfwaardetijd) van de nucliden in kwestie. Langlevende nucliden zijn een “lastiger vorm” van afval dan kortlevende nucliden, tenminste bij gelijke activiteit en dus bij grotere hoeveelheden nucliden! Tenslotte is er een derde criterium: *het thermische vermogen* dat door de activiteit ontwikkeld wordt (en dus afhangt van de energie van het verval). Dat bepaalt of (passieve) koeling nodig is of niet. Als dusdanig heeft men de volgende categorieën:

- afval van *klasse A*: het gaat hem om lage activiteiten (eventueel van lange duur) of gemiddelde activiteiten met korte levensduur. Onder korte levensduur verstaat men: halfwaardetijd kleiner dan ongeveer 30 jaar. Dit soort afval is het meest voorkomende en stelt meer dan 90% van het volume van het afval voor, maar minder dan 0.1% van de activiteit. Dit soort afval wordt in een speciaal “stort” aan het aardoppervlak opgeslagen, meestal nadat het in cement of een of andere resine is ingegoten om de mobiliteit ervan te verminderen. Men beschouwt dat het na 300 jaar totaal inoffensief is geworden omdat de bèta-activiteit verdwenen zal zijn en de alfa-activiteit gelijk is geworden aan die van, zeg maar, natuurlijk graniet (die een activiteit heeft van 300 Bq – 12000 Bq per kilogram). De precieze maximum activiteiten worden opgegeven per radionuclide, maar het draait meestal rond activiteiten die kleiner zijn dan 200 Bq/g voor alfa emitters en minder dan 37 Kbk / g voor kortlevende bèta emitters.
- Afval van *klasse B*: bevat gemiddelde activiteiten van nucliden met lange levensduur (actiniden), maar zonder thermische belasting. Dit soort afval dient normaal geologisch te worden geborgen. Het gaat hem hier meestal om zwaar geactiveerde of zwaar gecontamineerde structuurmaterialen, zoals bijvoorbeeld de stukjes zirkonium buis die uit de eerste stap van de opwerking afkomstig zijn.
- Afval van *klasse C*: bevat hoge activiteiten van nucliden met lange levensduur, en heeft bovendien een niet verwaarloosbaar thermisch vermogen. Het gaat hem hier meestal over de uiteindelijke afval producten van de nucleaire brandstofcyclus. Dit soort afval dient ook geologisch geborgen te worden, maar men verricht ook onderzoek om eerst de radiotoxiciteit ervan te verminderen.

- Men plant om een nieuwe klasse in te voeren: *het afval van heel lage activiteit*. De reden hiervoor is dat men verwacht dat de ontmanteling van oude centrales een grote hoeveelheid van dit afval gaat opleveren, en het is “zonde” om die onder te brengen in klasse A, gezien de activiteit toch wel veel lager is: minder dan 10 Bq per gram. Het gaat hier om “bijna” gewoon afval, dat eigenlijk geen speciale behandeling nodig heeft, tenzij misschien wat extra toezicht en controle. Een speciale opbergplaats zal hiervoor geconstrueerd worden, die minder strenge condities oplegt en dus een goedkopere behandeling toelaat van dit soort afval ; bijvoorbeeld constructiemateriaal van een afgebouwde reactor dat slechts een heel klein beetje is geactiveerd of slechts een heel klein beetje is gecontamineerd.

Men rekent op een kost voor oppervlakte opslag (afval van type A) van ongeveer 2000 Euro per kubieke meter, en op een uiteindelijke kost voor geologische opslag van de orde van 40 000 tot 75 000 Euro voor afval van type B of C. Men verwacht een kost van 150 Euro voor afval van heel lage activiteit terwijl “gewoon” afval ongeveer 23 Euro per kubieke meter kost.

Zoals reeds gezegd is de classificatie van radioactief afval is niet internationaal gestandaardiseerd. Men spreekt in de Angelsaksische literatuur over “high level waste” (HLW), “intermediate level waste” (ILW) en “low level waste” (LLW) waarbij HLW meestal een activiteit van meer dan 10^{14} Bq/m³ heeft, LLW een activiteit van minder dan 10^{11} Bq/m³ heeft en ILW er tussen in zit. De Duitsers hebben een andere definitie: naar Duitse maatstaven heeft men warmte producerend afval of afval met verwaarloosbare warmte productie naarmate de materie in kwestie in specifieke omstandigheden meer of minder dan 3 graden warmer is dan zijn omgeving. De scheidingslijn ligt ergens rond de 10^{13} Bq/m³.

In 2003 was er wereldwijd ongeveer 171 000 ton verbruikte brandstof opgeslagen, geaccumuleerd over de voorbije 30 – 40 jaar. Louter qua hoeveelheid is dat heel weinig: vergelijk het met de 2.4 miljoen ton steenkool die *een enkele* steenkoolcentrale *per jaar* verbruikt. Dat bestaat dan nog wel voor meer dan 90% uit recupereerbaar materiaal. Hoeveel daarvan uiteindelijk als afval zal worden beschouwd is totaal afhankelijk van de verwerkingsstrategie die zal aangewend worden.

6.4.b Het afval van het einde van de cyclus.

Zoals we gezien hebben, bestaat het hoog actieve afval van het einde van de cyclus bij eerste doorgang, zoals dat nu in Frankrijk wordt toegepast, *uit verglaasd afval dat de kleine actiniden en de fissieproducten bevat*, welke afval van categorie C is, en uit gecompriemd afval dat bestaat uit de stukjes zirkonium buis en mechanische constructies van de brandstofelementen, die werden stukgeknipt bij de ingang van het verwerkingsproces. Dat gecompriemde afval is afval van categorie B.

Het verglaasde afval wordt als volgt bekomen: de oplossing van de fissieproducten wordt in een oven aan 850 graden gebracht samen met de onopgeloste fissieproducten, waar de oxiden gevormd worden van de fissieproducten (en kleine actiniden). Eens we de (droge) oxiden bekomen, worden hieraan stukjes glas toegevoegd (natrium boor silicaat) in een smeltpot die tot 1100 graden wordt verhit gedurende een paar uur. Op die manier worden de oxiden geheel een deel van het glas – het zijn geen stukjes oxide in glas ingebed, het is gewoon een soort vaste oplossing van de oxiden in het glazen materiaal zelf. Het vloeibare glas wordt vervolgens in een roestvrij stalen vat gegoten, en na afkoeling wordt een deksel op het vat gelast zodat het geheel hermetisch gesloten is. De vaten hebben een standaard inhoud van 180 liter en bevatten 400 kilogram glas ; ze hebben een roestvrij stalen wand dikte van 2 cm. Een ton verrijkt afgewerkt uranium geeft aanleiding tot ongeveer 280 kilogram glas terwijl het dus ongeveer 50 kilogram (~5% van 1 ton) fissieproducten bevat. Zo een

cilinder heeft een bèta en gamma activiteit van 16 000 T Bq en een alfa activiteit van 230 T Bq ; het thermische vermogen dat door het radioactieve verval wordt vrijgegeven is ongeveer 2 KW. Men slaat die cilinders op in een geventileerde bunker gedurende een dertigtal jaar om het vermogen te laten verminderen ; na ongeveer dertig jaar wordt slechts nog 500 W afgegeven en is de activiteit teruggevallen tot 4 000 T Bq, wat de eind opslag in geologische structuren gemakkelijker maakt. Het gebruikte glas is speciaal gekozen om van dezelfde structuur te zijn als natuurlijke glazen waarvan de bestendigheid in geologische condities over duizenden jaren is aangetoond. Men gebruikt dezelfde roestvrij stalen cilinders om de gecompacteerd mechanische afval van categorie B op te slaan, alleen past men daar geen verglazing op toe. De reden is dat op die manier de opslag uniformer is en waarschijnlijk gemakkelijker zal gebeuren (gezien zowel het afval van type C als B uiteindelijk bedoeld is voor geologische opslag). Frankrijk heeft voor verglazing gekozen, en doet daar reeds onderzoek naar sinds 1978, tot hier toe steeds met veelbelovende resultaten. Andere landen gebruiken soms andere technieken. Vaak gebruikt men cement of bitumen in plaats van glas. België bijvoorbeeld heeft destijds voor bitumen gekozen, maar het is wel niet duidelijk wat de kwaliteit van het bitumen gaat geven na lange perioden (radiolyse...). Door het optimaliseren van de procedures is men er toch wel in geslaagd om over twintig jaar het uiteindelijke volume hoog-radioactief afval serieus te verminderen: 0.5 kubieke meter per ton afgewerkt uranium (B en C).

We hebben gezien dat de belangrijkste langlevende fissieproducten een halfwaardetijd hebben van ongeveer 30 jaar, wat maakt dat hun activiteit na 300 jaar met een factor 1000 is afgenomen en we dus kunnen veronderstellen dat, wat de fissieproducten betreft, “het grootste gevaar geweken is” na enkele honderden jaren. Maar er zijn andere producten, de actiniden, die “lastige klanten” zijn. Het probleem is dat hun halfwaardetijd niet in de miljoenen jaren loopt (wat ze weinig actief zouden maken), en ook niet in de tientallen jaren, wat ze snel zou laten verdwijnen, maar eerder in de categorie van enkele honderden tot enkele duizenden jaren. Dat maakt dat ze toch nog vrij actief zijn – voor een gegeven aantal nucliden is de activiteit omgekeerd evenredig met halfwaardetijd – maar ook niet snel verdwijnen.

Als we naar een tijdschaal van duizenden jaren kijken, en we dus de fissieproducten verwaarlozen omdat die dan reeds vervallen zijn, dan is de inhoud van 1 ton afgewerkt verrijkt uranium dat een verbrandingsgraad heeft van 47.5 GW-dag per ton na 4 jaar koelen, de volgende wat betreft de actiniden inhoud (naast U-235 en U-238):

Nuclide	Massa per ton uranium (kg)	Halfwaardetijd	Verval
U-236	5.37	23 miljoen jaar	Alfaverval (Th-232)
Np-237	0.67	2.14 miljoen jaar	Alfaverval (Pa-233)
Pu-238	0.37	87.7 jaar	Alfaverval (U-234)
Pu-239	6.1	24 000 jaar	Alfaverval (U-235)
Pu-240	2.8	6 550 jaar	Alfaverval (U-236)
Pu-241	1.5	14.3 jaar	Betaverval (Am-241)

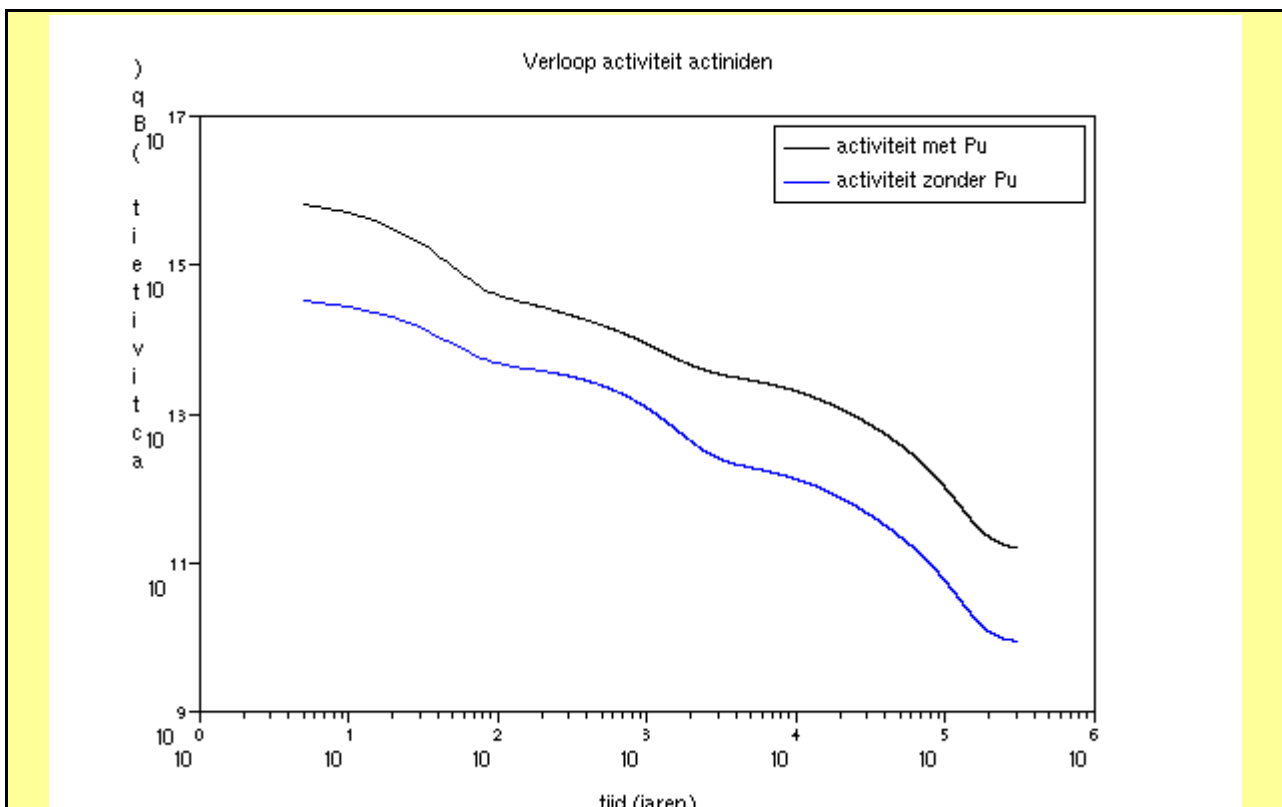
Nuclide	Massa per ton uranium (kg)	Halfwaardetijd	Verval
Pu-242	0.9	370 000 jaar	Alfaverval (U-238)
Am-241	0.37	432 jaar	Alfaverval (Np-237)
Am-243	0.26	7 360 jaar	Alfa+beta (Pu-239)
Cm-244	0.09	18 jaar	Alfaverval (Pu-240)

We zullen het radioactieve verval bestuderen zoals we dat reeds gedaan hadden in het deel over de radioactieve vervalketens. Wat ons interesseert, is te kijken naar het verloop van de totale activiteit van deze totale inventaris enerzijds, en van de inventaris zonder uranium, neptunium of plutonium anderzijds. We doen dat met een programmaatje in Scilab dat men kan terugvinden in Appendix C.

Als we dat programmaatje laten draaien, dan vinden we het resultaat zoals getoond in figuur 65. Het is de activiteit van 1 ton afgewerkte brandstof. Maar let wel op: ons programma (en dus de figuur) geeft de activiteit van de fissieproducten niet aan. Die is aanvankelijk gelijk aan 10^{17} Bq (voor 1 ton afgewerkte brandstof), valt na 10 jaar terug tot 10^{16} Bq, na 100 jaar terug op 10^{15} Bq en na 400 jaar op 10^{12} Bq. Na ongeveer 200 jaar is de actiniden activiteit de belangrijkste en is onze grafiek bruikbaar. Men veronderstelt dat “alles terug normaal” is *wanneer de activiteit van het afval gelijk is aan de originele activiteit van het uranium dat heeft gediend om die brandstof te maken*; met andere woorden, op dat ogenblik zit er niet meer activiteit in de grond dan we er uit gehaald hadden. Dat ligt dan rond de 1 Tbq. Men ziet dat met het plutonium, dat niveau wordt bereikt na 100 000 jaar, en zonder plutonium, dat niveau wordt bereikt na ongeveer 10 000 jaar. Natuurlijk is dat een ietwat arbitrair criterium! Het is niet hetzelfde materiaal, en het is niet op dezelfde plek. Maar het geeft wel een idee van welke de orde van grootte van de tijd is gedurende de welke we het afval als “onnatuurlijk actief” kunnen beschouwen. We zouden verschillende andere “filosofische” criteria kunnen gebruiken, maar ze zullen allemaal een limiet stellen aan het activiteitsniveau beneden de welke het “hoogradioactieve afval” nu “gewone materie” is geworden zoals we er in de natuur vinden. Dat is – zoals eerder gesteld – het grote verschil met andere vormen van afval, die “eeuwig” zijn. Het had natuurlijk perfect geweest indien die tijdschaal voor het “verdwijnen” van het afval in de orde van jaren of tientallen jaren was gevallen – in de werkelijkheid is het dus langer.

Wat wel duidelijk is, is *dat het afval meer dan 10 keer minder lang actief blijft als we het plutonium eruit halen. En als we de actiniden nu ook nog zouden kunnen verminderen of laten verdwijnen, dan gaan we van een tijdschaal van 10 000 jaar naar een tijdschaal van enkele honderden jaren.* Dat maakt een (psychologisch?) verschil omdat we ons moeilijk die tijdschalen op menselijk niveau kunnen indenken. Hoewel geologische berging dient om de geologische lagen te gebruiken als opslagmedium – en geologische lagen kunnen dat voor miljoenen jaren – zouden we ons misschien comfortabeler voelen als het ons eigen bouwwerk zou zijn dat het ding bijhoudt, en niet de geologische laag. De mensheid heeft relatief weinig voorwerpen gemaakt die 10 000 jaar meegaan, maar de muurtekeningen van Lascaux bijvoorbeeld tonen aan hoe een geschikte geologie toch wel menselijke dingen lange tijd kan bijhouden zonder veel migratie: de verf van die muurschilderingen is niet vrijgekomen bij de koeien die in de buurt aan het grazen waren. Er zijn wel vele

bouwwerken die het enkele honderden tot duizenden jaren hebben uitgehouden, zoals kathedralen, het Parthenon, de Egyptische piramiden en zo voort. Er zijn er nog veel meer die het geen eeuw hebben volgehouden. Maar al die analogieën zijn enkel maar dat: analogieën die in losse argumenten worden gebruikt, eerder om onze gemoedstoestand te beïnvloeden dan om een rationele beslissing te nemen. We kunnen de illusie koesteren dat een eigen bouwwerk op een of andere wijze “zekerder” is dan een geologische laag omdat we dat zelf gebouwd hebben. Maar dat zijn gevoelsmatige argumenten die niet noodzakelijk op enige vorm van realiteit zijn gesteund. Het opbergen van stoffen in een geologische laag heeft niets te maken met de piramiden van Egypte die aan het oppervlak zijn gebouwd door een beschaving die technologisch niet vergelijkbaar is met de onze. De bedoeling van die bouwwerken was niet om een hoeveelheid stoffen zo lang mogelijk van de biosfeer gescheiden te houden, en het zijn geen geologische opbergingen. Daarentegen, we hebben wel vele voorbeelden van stoffen die miljoenen jaren zijn opgeslagen in geologische lagen: steenkool, olie, aardgas. We hebben een historisch voorbeeld van (nakomers van) splijttingsproducten die op twee miljard jaar slechts enkele centimeters hebben afgelegd (Oklo). *Als dusdanig weten we dat het in principe mogelijk is om stoffen gedurende geologische tijden (miljoenen jaren) grotendeels van de biosfeer af te zonderen en dat is al wat nodig is.*



Afbeelding 65: Verloop van de activiteit (in Bq) van de actiniden in 1 ton verrijkt uranium dat tot een verbrandingsgraad van 47.5 GW-dag per ton is gebracht. In de afbeelding wordt geen rekening gehouden met de fissieproducten, die dominant zijn gedurende de eerste honderden jaren, maar dan verwaarloosbaar zijn. De schalen zijn in logaritmische eenheden (basis 10) uitgedrukt. Het activiteitsniveau van het natuurlijke uranium dat heeft gediend om die 1 ton verrijkt uranium te maken, ligt rond de 1 T Bq (dat is 10^{12} Bq).

In tegenstelling tot andere vormen van toxisch of gevaarlijk afval, is een groot voordeel van hoog radioactief afval *dat het, op geologische tijdschaal gezien, snel verdwijnt.* Men kan hetzelfde niet

stellen van, zeg maar, zware metalen, of van CO₂: die blijven bestaan. Kwik dat in de biosfeer is geloosd blijft er voor eeuwig. Een tweede punt is dat het hoog-radioactieve afval *op industriële schaal gezien, slechts een heel klein volume* betekent. Opnieuw kan men hetzelfde niet stellen voor CO₂ of voor vele andere schadelijke stoffen. En tenslotte heeft hoog radioactief afval een voordeel: sporen ervan *kunnen heel gemakkelijk waargenomen worden (met instrumenten)*. Dat is bijvoorbeeld niet het geval met virussen. Er is bovendien een extra voordeel, dat het gevolg is van de twee eerdere, namelijk dat de toxiciteit vermindert in de tijd en dat de volumes klein zijn: *er is geen haast!* We hebben het over enkele hectaren opslagruimte om het afval van een half continent, verzameld gedurende decennia bij te houden. Het verglaasde afval in roestvrij stalen vaten binnen in een bunker bevindt zich in een heel stabiele toestand. Eigenaardig genoeg, zoals zovele foute argumenten tegen kernenergie, wordt het feit dat er helemaal geen haast is bij de geologische berging gebruikt als een (totaal foutief) argument tegen kernenergie: gezien men alles voorlopig gewoon maar bijhoudt, laat dat doorschemeren dat dat het enige is dat we kunnen doen en dat het “afval probleem op lange termijn onoplosbaar is”. Net zoals de doorgedreven veiligheidscultuur, de precisie waarmee hele kleine hoeveelheden straling kunnen worden gemeten, en de relatieve precisie waarmee we de sanitaire gevolgen kunnen voorspellen, zijn ook deze keer de voordelen van nucleair afval in vergelijking met ander afval (het verdwijnt na een tijd, het is een klein volume, en we hebben nog alle tijd om ermee te doen wat we willen) gebruikt als een argument tegen deze technologie.

De bescherming van de biosfeer tegen de toxiciteit van de radionucliden van het hoog-radioactieve afval hangt af van twee elementen: *de bron*, en *de transfer*. Zoals we gezien hebben, “valt de bron stil” – tenminste volgens een of ander criterium van natuurlijke activiteit – na 400 jaar, 10 000 jaar respectievelijk 100 000 jaar voor de fissieproducten, de kleine actiniden en plutonium. Met het plutonium afgezonderd, kan men gaan discussiëren over een eventuele transmutatie van de actiniden in fissieproducten. Daar gebeurt onderzoek naar. Maar is er echt een probleem? De bedoeling van de geologische opslag is om de transfer van het hoog-radioactieve materiaal naar de biosfeer af te remmen, en gezien de eindige levensduur van de bron weten we nu dat we de mogelijkheden van transfer enkel maar moeten beschouwen voor een zekere periode, die op geologische tijdschaal vrij kort is. Gezien door goede keuze de geologische lagen van opslag stabiel zullen zijn, is de enige manier waarop de stoffen tot in de biosfeer komen, via grondwater of via diffusie. De menselijke constructie kan enkele honderden, misschien zelfs enkele duizenden jaren overbruggen, maar op een ogenblik dient men te beschouwen dat de stoffen “vrij” zijn. Dat heeft het voordeel dat we de “zekerheid” hebben dat een zwakkere bron zal worden vrijgegeven. Men plaatst meerdere barrières op de weg van de bron naar de biosfeer. De eerste barrière is natuurlijk het glas en de roestvrij stalen container, en waarschijnlijk zelfs een tweede container. Nadien komt er een “opvulsel” van de caviteit waarin zich de containers bevinden, liefst met een materiaal dat de diffusie van de radio-elementen zo veel mogelijk tegengaat. En dan komt men uiteindelijk aan de belangrijkste, natuurlijke barrière: de geologische lagen. Het is natuurlijk de “echte” barrière die telt als we het hebben over tientallen duizenden jaren. De echte kwaliteit van de opslagplaats over lange duur hangt essentieel af van de goede keuze van de geologische plek. Verschillende landen hebben reeds sinds 20 – 30 jaar onderzoek gedaan naar de beste geologische bergingsplaatsen op hun grondgebied. Men heeft als dusdanig modellisaties doorgevoerd van de 3 stappen: degradatie van de artificiële barrières, lokale diffusie en tenslotte lange-afstandsdiffusie. Met de kennis die men heeft, heeft men modellen gebouwd. Natuurlijk is elk model specifiek maar het SPA model (1999) toont aan dat er de eerste 10 000 jaar niets vrijkomt, en dat er dan hele kleine hoeveelheden stoffen vrijkomen, die in het ergste geval een dosis veroorzaken van ~0.001 mSv/jaar voor een “referentiegroep” die eraan is blootgesteld. Men dient zich te herinneren dat de natuurlijke dosis gelijk is aan 2.4 mSv/jaar gemiddeld maar met lokale variaties van verschillende mSv. Dit is

het soort extra dosis debiet dat men zou hebben mocht lokaal gezien, de bodem een heel klein beetje rijker zijn aan uranium. Het zou extreem moeilijk zijn, mochten we binnen 100 000 jaar rondlopen boven de plek van opslag, om door stralingsmetingen vast te stellen dat er iets vrijkomt. Het zou enkel met gedetailleerde analyses zijn dat we enkele nucliden kunnen terugvinden die een signatuur voor splijting zijn, maar het zou totaal onmogelijk zijn om uit achtergrond stralingsmetingen enige “afwijking van normaal” vast te stellen.

We hebben gezien dat de extractie van plutonium zorgt voor een factor van ongeveer 10 winst in de “bestaansduur” van de bron. We zien ook dat mochten we van de kleine actiniden afkunnen, we nog eens een factor 10 a 20 kunnen winnen op die levensduur, wat de nodige opsluitduur terugbrengt tot enkele eeuwen. Dat heeft inderdaad een voordeel omdat we er kunnen van uitgaan dat een opsluiting van een paar eeuwen wel binnen de huidige technologische mogelijkheden ligt. Het maakt ook dat we veel minder afhankelijk zijn van de keuze van de geologische laag.

Daarentegen moeten we ook niet overdreven bang zijn dat om een of andere reden, de producten vroeger vrijkomen dan de “officiële duur”. We hebben tenslotte die levensduur maar arbitrair gelijk gesteld aan de activiteit van natuurlijk uranium, die rond de 10 000 jaar bereikt wordt in het geval dat we het plutonium hebben verwijderd. Maar wat is het geval na 1000 jaar? Zoals men uit de grafiek kan afleiden, is de activiteit nu 10 keer groter. Dat is niet dramatisch. Op dat ogenblik is er toch reeds 99.99% van de radioactiviteit van het afval verdwenen door verval. We hebben op dit ogenblik dus nog een activiteit die gelijk is aan 0.01% van de initiële. Als we de eerste honderden jaren overbrugd hebben, is in elk geval het “ergste” voorbij, en de lange duren (10 000 jaar, 100 000 jaar...) komen enkel van onze arbitraire vereiste dat we geen 0.01% willen, maar 0.001% en dat het “staartje” nogal veel tijd nodig heeft om helemaal te verdwijnen. *Na enkele honderden jaren is de activiteit in elk geval met een factor 10 000 afgenomen, en de hele actiniden discussie draait hem om een overblijvende factor 10 alvorens we het afval “inoffensief” beschouwen, maar die afhangt van de wat arbitraire keuze van de definitie!* Natuurlijk, het ALARA principe indachtig, als het redelijkerwijs mogelijk is om die factor 10 te winnen, moeten we dat ook doen. Maar het is geen nationaal drama als die factor om een of andere reden niet gehaald wordt!

Er bestaat een principiële mogelijkheid om de “officiële levensduur” van de afvalbron binnen het bereik van enkele honderden jaren te brengen, en dus binnen het beschouwbare bereik van een ingenieursbouwwerk: het vernietigen van de actiniden. Maar men dient zich wel voor twee fouten te behoeden.

De eerste fout die we hebben aangeraakt, is de volgende: bij goede keuze van de geologische laag is de stralingslast voor de toekomstige generaties totaal te verwaarlozen: we hebben gezien dat sommige modellen in het ergste geval voorspellen dat binnen 100 000 jaar, de extra stralingslast minder dan een promille is van de natuurlijke stralingslast en zijn lokale variaties, en waarschijnlijk totaal onmeetbaar want verdronken in de natuurlijke achtergrondstraling. Het is een beetje alsof men zich druk maakt over de extra lichtvervuiling van een kleine zaklamp wanneer men in volle zon rondwandelt – dat is geen domme analogie: de zonnestraling is van de orde van 1 KW/m² terwijl een zaklamp van de orde van 1 W is: dat geeft een idee wat het wil zeggen: een promille boven de achtergrond. Naar alle ALARA normen is dat dus aanvaardbaar. De transmutatie van kleine actiniden is wel in principe mogelijk in snelle neutronspectra – ze ondergaan dan ook splijting – maar het is op dit ogenblik niet duidelijk hoe ingewikkeld zulke systemen gaan zijn, en in welke mate ze erin zullen slagen om die kleine actiniden volledig op te branden.

Men dient zich enerzijds de vraag te stellen of de extra menselijke activiteiten die hiervoor nodig zijn (extra scheidingsstappen bij de opwerking, transport, specifieke brandstof productie...) zelf niet voor een vergelijkbare of hogere stralingslast zorgen dan deze potentiële hele kleine belasting van

0.001 mSv/jaar binnen 100 000 jaar. Waarschijnlijk zal die extra huidige stralingslast ook wel totaal aanvaardbaar zijn, maar het zou rationeel bizar zijn om, bijvoorbeeld, vandaag voor een extra stralingslast gaan te zorgen van, zeg maar, 0.01 mSv per jaar, om een stralingslast die in het ergste geval 10 keer kleiner is gaan te vermijden enkel binnen 100 000 jaar. Zoals gezegd, beide stralingsbelastingen zijn veel kleiner dan de natuurlijke achtergrondstraling, en beide praktijken zijn qua stralingsimpakt aanvaardbaar. Maar men zondigt nu wel tegen het eerste principe van een nucleaire praktijk: de motivering van de praktijk! De enige echte motivering is een psychologische geruststelling. *Om transmutatie van kleine actiniden rationeel zinvol te maken dient men te garanderen dat de extra belasting door het proces wel degelijk kleiner is dan de minieme belasting die erdoor veroorzaakt kan worden binnen 100 000 jaar. Dat is verre van evident en enkel wetenschappelijk onderzoek zal dat kunnen uitmaken. Het is goed mogelijk dat men zo een oplossing vindt, maar men dient ook rekening te houden met de mogelijkheid dat zo een oplossing in de praktijk niet haalbaar is.*

Een tweede fout die men kan maken, is een communicatie fout. De publieke opinie, mede door toedoen van de anti-nucleaire lobby, is ervan overtuigd dat we “geen raad weten” met het radioactieve afval, terwijl vele studies hebben aangetoond dat de geologische berging in alle opzichten een objectief aanvaardbare oplossing is die voor een verwaarloosbare belasting zorgt van toekomstige generaties. *Indien we nu deze bestaande oplossing om louter psychologische redenen in twijfel gaan trekken door een hypothetische techniek voor te stellen, dan lopen we het risico dat indien die hypothetische techniek minder rooskleurig is dan aanvankelijk gedacht, we de bestaande oplossing nog meer in psychologisch diskrediet hebben gebracht.* Men kan namelijk vandaag niet stellen dat de industriële mogelijkheid bestaat om het overgrote deel van de kleine actiniden te splijten. Het principe bestaat, maar het is helemaal niet duidelijk hoe industrieel en economisch zinvol dat kan gemaakt worden. Het is interessant om daar onderzoek naar te doen, en dat gebeurt ook, maar het is gevaarlijk om vooruit te lopen op de resultaten van dat onderzoek. Men dient zich dus te behoeden voor een verkeerd maar aantrekkelijk tegenargument. Stel dat onderzoek uitwijst dat de uiteindelijke volledige transmutatie van kleine actiniden te complex is om industrieel zinvol te zijn. Als we nu reeds gaan beloven dat het afval uiteindelijk slechts 400 jaar “gevaarlijk” zal zijn, en we moeten uiteindelijk terug komen naar 10 000 jaar, hebben we dan niet zelf het argument versterkt dat we “geen raad weten met het huidige afval” en generaties tot 10 000 jaar “in gevaar” hebben gebracht, terwijl er nu reeds een hele goede oplossing aan dat probleem bestaat? Men dient zich dus ervoor te behoeden dat men, in een poging om een essentieel psychologisch probleem aan te pakken, men geen veel groter psychologisch probleem creëert dat zonder aarzelen zal worden aangesterkt door de anti-nucleaire lobby.

Het kan natuurlijk ook zijn dat het uiteindelijk opbranden van de kleine actiniden goed doenbaar is. In dat geval is het natuurlijk een positieve zaak: als de netto objectieve stralingsbalans (die reeds heel klein is) nog kan verbeterd worden op redelijke wijze, dan dient men dat te doen (ALARA). Maar men dient goed te beseffen: als dat niet lukt is dat helemaal niet erg, de huidige oplossingen zijn reeds meer dan adequaat genoeg, objectief beschouwd, ook al is men daar niet steeds van bewust.

Het is trouwens ook zo dat de actiniden enkel een serieus probleem zijn van thermische reactoren. In snelle reactoren worden er veel minder netto geproduceerd, gezien die actiniden in een snel spectrum ook gaan splijten. *Afval van vierde-generatie reactoren zal dus een veel kleinere hoeveelheid kleine actiniden bevatten.* Het is weerom ironisch dat net snelle reactoren de grootste weerstand hebben ondervonden van de Groene partijen, en dat zij erin geslaagd zijn (Superphenix, Kalkar) om het onderzoek in dat gebied met 10 a 20 jaar te vertragen. Indien dat onderzoek niet was gestopt in de jaren 1990, dan zouden de vierde-generatie reactoren nu op industriële schaal

kunnen worden geconstrueerd, en zouden we niet langs nog eens de derde generatie om gemoeten zijn die meer actiniden gaan produceren.

6.4.c Geologische berging

In het voorgaande hebben we reeds de standaard eindoplossing aangeraakt voor het hoog-radioactieve afval: diepe geologische berging. We gaan hier nu wat dieper op in. We hebben gezien dat de ideale opberging het hoogradioactieve afval voor enkele honderden duizenden jaren van de biosfeer dient te scheiden ; dat we, na het afscheiden van het plutonium, met 10 000 jaar al kunnen tevreden zijn, en dat het geen nationaal drama is als het maar 1000 jaar duurt.

We hebben gezien dat de vorm van het hoogradioactieve afval een verglaasde vorm is, die in een roestvrij stalen vat zit – in het geval het gaat om afval na brandstofherwerking. Hierrond zal nog een conditionering komen en dat zal dan in een diepe geologische bergplaats worden geplaatst. We hebben reeds aangegeven dat de zorgvuldige keuze van die bergplaats het belangrijkste element is in de efficiëntie van de opbergplaats, dat wil zeggen, in het vermogen van die opbergplaats om het overgrote deel van het afval voor de gewenste tijd van de biosfeer af te zonderen. Men heeft ondertussen al enkele sites bestudeerd. Behalve de Yucca Mountain gaat het om sites op grote diepte (200 – 700 meter onder de grond, of soms zelfs dieper). Ze vallen in 4 categorieën:

- Woestijnzone, opslagplaats in bergachtig gebied boven het grondwater (Amerikaanse Yucca Mountain). Men kan dit soort opslagplaatsen eventueel als een langdurige reversibele opslagplaats beschouwen. Men dient echter op te letten: woestijnen zijn oppervlakte verschijnselen, die op relatief korte perioden (geologisch gezien) kunnen veranderen. De Sahara was 100 000 jaar geleden niet de zandwoestijn die ze nu is. Als dusdanig is dit een opslagplaats van veel kortere geologische termijn dan de anderen die hieronder beschouwd worden. Zij heeft wel het voordeel dat, zolang de woestijntoestand heerst, alle consideraties van water doorstroming onbestaande zijn wat natuurlijk de duurzaamheid van de menselijke constructie ten goede komt.
- Graniet. Er zijn sites bestudeerd onder andere in Finland, Canada en Zweden. Het Scandinavische granietschild is een van de oudste geologische configuraties, en bestaat reeds meer dan 1.2 miljard jaar. De voornaamste voordelen zijn de grote mechanische stabiliteit en de uitzonderlijke ouderdom. Daarentegen zijn er twee serieuze nadelen: men kan niet uitsluiten dat er barsten bestaan waarin water zal voorkomen, en de chemische eigenschappen zijn niet heel sterk bindend voor sommige radionucliden.
- Zoutrots. Site die bestudeerd wordt: Gorleben¹³⁴ in Duitsland. De configuratie bestaat reeds 300 miljoen jaar (voor het begin van de dynastie van de dinosauriërs). De voornaamste voordelen zijn dat deze rots plastisch vervormt, zodat er geen openingen in kunnen komen (die bijvoorbeeld water vervoeren). Bovendien zijn de hitte-geleidingseigenschappen ook heel goed wat een dichtere stapeling mogelijk maakt van het afval. Daarentegen, een nadeel is dat zoutrots water oplosbaar is. Normaal is dat geen probleem gezien de lange

¹³⁴Er is een polemische anekdote over de Gorleben zoutkoepel. Er is jarenlang onderzoek naar gebeurd, maar toen kanselier Schroeder aan de macht kwam, was die koepel plotseling geen goede oplossing, en diende men naar een klei formatie te zoeken. De echte reden was dat Schroeder van Nedersaksen kwam, waar de zoutkoepel zich bevindt, en dat hij dacht dat hij politiek voordeel zou halen uit het opslaan van het kernafval in een andere deelstaat dan de zijne. Maar geen geluk: de beste kleiformaties bevonden zich ook in Nedersaksen! Sindsdien is de zoutkoepel weer een goed idee...

levensduur, maar mocht er op een of andere reden stromend water in terecht komen, dan gaat die rots niets tegenhouden. Maar dat is dus al 300 miljoen jaar niet gebeurd.

- Kleigrond. Sites zijn onder studie in Engeland, Frankrijk, en natuurlijk België (Mol). De voordelen zijn de plasticiteit (geen openingen) en de waterdichtheid. Bovendien heeft klei hele goede adsorptie eigenschappen: het gaat eventueel vrijgekomen radionucliden absorberen. Een nadeel is wel dat mijnbouw werken in kleirots nogal moeilijk zijn vanwege de zwakke mechanische eigenschappen. Het is daarentegen een van de beste chemische opsluitingen die men zich kan indenken.

De eerste site is een uitzondering in dat die zich boven het grondwaterniveau bevindt. Alle andere configuraties bevinden zich ver onder het grondwaterniveau. Dat zal een chemisch belangrijk gegeven zijn, omdat men zich dan in een chemisch reducerende omgeving bevindt wat in vele gevallen de oplossing van metalen in waterig milieu gaat tegengaan.

Gezien de lange bestaansduur van de geologische formaties in kwestie, is hiermee normaal gezien het verhaal afgelopen als het gebied geologisch stabiel is: wat men daar heeft geplaatst, zal daar ook blijven. Maar men dient zich te behoeden voor “niet-normale” omstandigheden, en het is duidelijk dat een niet ondenkbaar, en a priori problematisch geval, het grondwater is. Indien de opslagplaats op een of andere manier is blootgesteld aan een grondwater migratie, dan dienen we na te gaan wat daarvan de gevolgen zijn. In feite bestaat de hele studie van een geologische opslagplaats uit de studie van alle redelijk denkbare scenario's die een transportmogelijkheid vormen voor de radioactieve stoffen om terug te keren na een zekere tijd naar de biosfeer. Zoals gezegd, vormt de enige redelijke vector: *grondwater stroming*.

Als men stoffen met elkaar in contact brengt, dan dient men de zaak op twee niveaus te beschouwen: enerzijds is er *de thermodynamische beschouwing* (welke is de evenwichtstoestand) en anderzijds is er *de kinetische evolutie* (hoe lang duren de reacties). Gegeven een zeker systeem van stoffen, bestaat er een theoretisch thermodynamisch evenwicht tussen die stoffen, evenwicht dat een andere vorm kan aannemen dan de aanvankelijke samenstelling. Het is de basis van alle chemische reacties. Eens dat evenwicht is bereikt, zal er normaal gezien niets meer gebeuren, tot er zich een externe sollicitatie voordoet. Meestal kent men de thermodynamische evenwichtstoestand vrij goed, uitgaande van interne energie en entropie waarden van de verschillende producten. Daarentegen, de kinetica (de snelheid van reactie) van de evolutie naar dat thermodynamisch evenwicht is een veel moeilijker te voorspellen gebeuren.

Beschouw het voorbeeld van waterstofgas gemengd met zuurstofgas. Waterstofgas kan normaal gezien lang blijven bestaan in contact met zuurstofgas zonder verandering maar dat is geen evenwichtstoestand. De evenwichtstoestand van dit voorbeeld is water. Dit is een voorbeeld van een niet-evenwichtstoestand, die echter (zonder vonken) heel lang kan blijven bestaan wegens een trage kinetica bij lage temperatuur ; bij hoge temperatuur (2000 graden zeg maar) gaat de reactie wel doorgaan tussen waterstof en zuurstof. Een ander voorbeeld is roestvrij staal in contact met water en zuurstof. Als dusdanig is de evenwichtstoestand: ijzer oxide en water! Het is echter zo in roestvrij staal, dat er zich een chroom oxide laagje op het geheel van het blootgestelde materiaal heeft neergezet. Dat laagje is nogal ondoordringbaar voor water en maakt dus dat de rest van het metaal niet in contact komt met het water, ... of tenminste zo goed als niet. Als dusdanig wordt de reactie sterk vertraagd, en hoewel roestvrij staal dus uiteindelijk zal moeten eindigen in zijn thermodynamische evenwichtstoestand, kan roestvrij staal niettemin een lange periode blijven bestaan omdat de kinetica gehinderd is en dus heel traagjes verloopt. Maar vroeg of laat gaat roestvrij staal in een water/zuurstof omgeving terugkeren tot roest, en roestvrij staal is dus enkel maar “roestvrij” omdat het roesten heel traag verloopt.

We zien hier, in deze eenvoudige voorbeelden, dat de thermodynamische evenwichtstoestand op zich niet voldoende is om aan te geven wat er gaat gebeuren: ook de kinetica is van belang. Een niet-evenwichtstoestand kan lang blijven bestaan als de kinetica klein is, maar uiteraard gaat op hele lange termijn de evenwichtstoestand bereikt worden. Alleen kan die termijn soms heel lang zijn, soms zelfs veel langer dan de levensduur van de aarde!

De vraag die zich stelt is: in een ongunstig scenario wanneer er een zekere grondwater stroming doorheen de opslagplaats en naar het oppervlak toe is, hoe snel en wanneer worden welke stoffen in welke hoeveelheid getransporteerd? Hiervoor moeten de stoffen 3 barrières doordringen: ten eerste dienen ze vrij te komen uit het vat, ten tweede dienen ze door het opvulsel te geraken, en ten derde dienen ze hun watertransport doorheen de geologische laag te overleven. Het is van dit transport dat men tracht modellen te maken om hierop voorspellingen te baseren van de hoeveelheden stoffen die gaan vrij komen op een zeker ogenblik.

Roestvrij staal is niet thermodynamisch stabiel in een natte omgeving. Hoewel de kinetica traag is, zal het toch wel gaan roesten. Glas is ook niet stabiel in een natte omgeving: glas lost (heel traag) op in water. Als dusdanig zullen, indien de afvalcontainers aan een vochtige omgeving worden blootgesteld (wat het geval is in een diepe opberging), de radioactieve stoffen vroeg of laat vrijkomen, omdat de container is verroest en het glas is gaan oplossen.

De meeste radioactieve producten zijn metalen. Als dusdanig lossen zij op in water als ze in een oxiderende omgeving terecht komen. Nu is grondwater op grote diepte anaeroob en dus relatief reducerend. Maar door het radioactieve verval wordt er ook stralingsschade aan het water veroorzaakt (radiolyse), en hierbij wordt een oxiderende omgeving veroorzaakt. Het lijkt er dus op dat het radioactieve afval zelf zorgt voor zijn eigen oxidatie en dus oplossing. Maar laten we niet vergeten dat het opgeloste glas in een container van verroest ijzer zit. Nu is roest een heel erg reducerend product, en bijgevolg komen eventueel opgeloste radionucliden nu in die reducerende omgeving terecht, en slaan ze neer. Als dusdanig is de roestvrij stalen container, die eerst als mechanische barrière gefunctioneerd heeft, nu een chemische barrière geworden. Men schat dat de roestvrij stalen container het vele honderden en waarschijnlijk enkele duizenden jaren uithoudt alvorens hij doorgeroest is; vanaf dan gaat hij dus functioneren als chemische roestbarrière.

Koper is, in tegenstelling tot ijzer, wel thermodynamisch stabiel in een anaerobe vochtige omgeving. Als dusdanig wordt een koperen vat nooit aangetast. De Zweden hebben bijvoorbeeld beslist om hun afval in een koperen overcontainer te stoppen. Die heeft een levensduur van meer dan 100 000 jaar omdat hij thermodynamisch stabiel is. Indien zou blijken dat we de stalen containers een langere levensduur moeten geven, dan kunnen we die nog steeds in een koperen buitenvat stoppen – maar dat is wel een redelijk dure oplossing.

Rondom de roestvrij stalen container heeft men het opvulsel. Meestal is dat klei, behalve in die gevallen waar men reeds in een kleilaag gaat werken, zoals in Boom. Daar heeft men een betonnen omgeving gekozen. Het voordeel van beton is dat het een gelijkaardige functie heeft dan het roest: beton dat oplost in water geeft een hele alkalische oplossing. Als dusdanig gaat dat nog meer aanleiding geven tot het neerslaan als hydroxides van de metaalionen. Het betonnen opvulsel dient dus ook als chemische barrière en doet dat voor enkele duizenden jaren op zijn minst.

Het volgende effect is klei. Klei heeft een chemische structuur die actiniden in zijn kristalstructuur opneemt. Als dusdanig hebben actiniden het heel moeilijk om doorheen een laag klei te migreren, gezien ze chemisch deel gaan uitmaken van de klei. Men is hierbij echter op een potentieel probleem gevallen: colloïden (dat zijn suspensies van hele kleine onoplosbare deeltjes in water). Als “geladen” klei zich in de vorm van colloïden in stromend grondwater gaat laten meevoeren, dan dient die klei nu plotseling wel als transportmiddel van de actiniden. Dat is dus wel een

mogelijkheid waar men rekening dient te houden bij het uitrekenen van de effecten van sommige scenario's.

Om vrij te komen dient het glas op te lossen in water. Dat gebeurt heel traagjes, maar niettemin gebeurt het. Maar het blijkt nu dat dat opgeloste glas aanleiding geeft tot de vorming van een secundaire fase van mineralen: smektiet, powelliet en baryt, en het blijkt dat actiniden en lanthaniden heel gemakkelijk in die structuren worden geabsorbeerd. Men schat dat het ongeveer 10 000 jaar duurt voor deze glas-geïnduceerde chemische barrière doorbroken wordt.

Het bovenstaande geeft een kleine indicatie van het onderzoek dat men heeft gedaan sinds de jaren '80. Met wat men op dit ogenblik weet, lijken de actiniden helemaal niet kunnen vrij te komen, omdat ze, na de mechanische barrière, zo vreselijk veel chemische barrières tegenkomen. Niettemin moet men voorzichtig zijn met dat argument: men kent nog de volledige chemie van het hele verschijnsel niet met 100% zekerheid. Men kan enkel vandaag stellen dat met wat men weet, *er normaal gezien geen actiniden kunnen vrijkomen voor verschillende 10 000 jaren.*

Komt er dan niets vrij ? Toch wel. We hebben steeds herhaald dat de fissieproducten levensduren hebben die kleiner zijn of gelijk aan ongeveer 30 jaar. Dat is juist voor het overgrote deel van de fissieproducten, maar er zijn enkele uitzonderingen die in kleine dosis aanwezig zijn: C-14 (5730 jaar), I-129 (15 miljoen jaar) , Cl-36 (300 000 jaar) en Se-79 (480 000 jaar), tenminste als men de volledige inventaris beschouwt, want indien de brandstof herwerkt is, dan is de I-129 reeds in de zee geloosd en dus niet meer in het afval aanwezig. Chemische modellatie toont dat deze stoffen het eventueel wel naar buiten kunnen maken. Zij stellen niet veel voor, maar zij zijn de enige overlevende fissieproducten, en ook de enigen die er chemisch eventueel in kunnen slagen om door alle chemische barrières heen toch meegevoerd te worden door het hypothetische stromende grondwater. Het zijn deze stoffen die volgens ongeveer alle scenario's eventueel voor een minuscule dosis kunnen zorgen die tot enkele microsievert per jaar kan gaan.

De huidige richtnorm voor de opslag van radioactief afval is dat na het “einde” van de bewaakte opslagperiode, in het ergste realistische geval, er geen grotere dosis voor het eventuele publiek van de verre toekomst dan 0.3 mSv per jaar mag opgedaan worden – herinnert U zich dat voor een nucleaire praktijk, die bovengrens gelijk is gesteld aan 1mSv. Deze norm wordt dus zonder het minste probleem gehaald volgens onze huidige kennis van zaken. Voorzichtigheid is echter toch wel geboden, want niet alle elementen van de chemie van de actiniden zijn gekend. Het is dus niet ondenkbaar dat men sommige aspecten van de huidige modellatie moet herzien als men dingen hierover bijleert.

Het lijkt er dus op dat de diepe geologische berging in het ergste geval een minuscule dosis, duizend keer kleiner dan de achtergrondstraling, kan veroorzaken binnen enkele tientallen tot honderden duizenden jaren, en dat die dosis dan nog afkomstig is van enkele langlevende fissieproducten ; de actiniden blijven geïmmobiliseerd. In de mate dat dat waar is, heeft elke vorm van actiniden afscheiding of verbranding dus geen invloed. Indien die inzichten niet veranderen in de komende jaren als we meer leren over de actiniden chemie, dan hebben we dus een heel goede oplossing voor gelijk welke vorm van radioactief afval, of het nu het afval van de open cyclus, afval waaruit men het uranium en het plutonium heeft verwijderd, of afval waaruit men bovendien nog eens de kleine actiniden heeft verwijderd.

Met andere woorden, met wat we vandaag weten, kunnen we zonder probleem stellen *dat hoog-radioactief afval een totaal aanvaardbare oplossing heeft: de diepe geologische berging.* Zij zorgt normaal gezien voor geen enkele, en in de ongunstige gevallen voor een verwaarloosbare stralingslast van de eventuele generaties die binnen 100 000 jaar nog zouden rondlopen op aarde net boven de plek van de opslag.

We gaan wat meer in op het Belgische geval van de Boomse klei¹³⁵. Als we even naar de specifieke scenario's kijken voor de Boomse klei, dan vinden we volgende besluiten voor het scenario waarbij er een diepe waterput wordt gebruikt in de buurt van de opslagplaats. De voornaamste dosis ten gevolge van verglaasd afval krijgt de toekomstige gebruiker van die waterput door Se-79, binnen 200 000 jaar, en die is gelijk aan 8.8 microsievert per jaar ; deze “hoge” dosis is hoofdzakelijk het gevolg van onzekerheden op sommige parameters in het migratie model, zodat men steeds de meest “pessimistische” waarde heeft gekozen. Ter herinnering: de jaargemiddelde natuurlijke dosis is 2400 microsievert per jaar. De actiniden zorgen voor een maximum dosis van 0.003 microsievert per jaar, na 13 miljoen jaar – waar het model trouwens allang niet meer geldig is.

Als men kijkt naar het geval van begraven splijtstof (zonder herwerking), dan komt men tot een dosis van wat meer dan 10 microsievert, waarvan 7 microsievert ook weer door Se-79 na 160 000 jaar.

Het is natuurlijk wel zo dat die modellen heel vele onzekerheden bevatten in de mate dat men niet met zekerheid kan stellen dat de numerieke voorspellingen strikt juist zijn ; in tegendeel, de auteurs van dit rapport beseffen dat heel goed. Wat telt is dat men, met pessimistische schattingen van de onzekerheden, nog steeds aan belachelijk kleine dosissen komt.

Zoals reeds eerder een paar keer vernoemd, met alle studies die op dit ogenblik zijn uitgevoerd, lijkt de diepe geologische opslag, op voorwaarde dat die goed bestudeerd is, een volledig aanvaardbare oplossing in die zin dat het objectieve risico voor toekomstige generaties echt wel verwaarloosbaar is in vergelijking met de natuurlijke dosis. Men kan terecht opwerpen dat men op sommige vlakken nog onzekerheden bezit betreffende bepaalde fysische en chemische processen, maar op dit ogenblik lijkt niets erop te wijzen dat die het besluit fundamenteel gaan wijzigen. In de mate dat men het nodig acht, kan men nog steeds verder onderzoek doorvoeren om zich van deze onzekerheden te ontdoen – zoals gezegd is er geen haast want het geconditioneerde afval kan het in zijn voorlopige opslagplaatsen nog vele decennia uithouden.

Men dient ook wat afstand te nemen en zich af te vragen in hoeverre we met twee maten en gewichten aan het oordelen zijn. In welke mate heeft men geëist dat er studies over de sanitaire impact binnen 100 000 jaar zijn gemaakt voor andere menselijke activiteiten, zoals bijvoorbeeld “gewone” afvalverwerking (zware metalen, chemicaliën,...) en vooral klimaatsveranderingen! Naar alle andere gangbare noties in andere domeinen, is de geologische opslag van radioactief afval een heel veilige techniek.

6.5 Ontwikkelingen en toekomst

Voorspellingen zijn moeilijk, vooral als ze de toekomst betreffen. Niettemin is de stap van wetenschappelijke en technologische kennis die vandaag ter beschikking staat, naar een grootschalige industriële toepassing in de nabije toekomst, voor verschillende scenario's heel goed uitvoerbaar (en in vele gevallen reeds aangetoond). Het gaat hem meestal over de keuze tussen verschillende mogelijke alternatieven waarvan men de verschillende voor en nadelen nog wat wil overwegen, niet zozeer over principiële mogelijkheden waarover nog veel onderzoek wordt verricht. Bij verre de grootste onzekerheid zit hem in het sociale en politieke, niet zozeer in het

¹³⁵http://www.nirond.be/nederlands/PDF/Doc_Strat_NL_OK.pdf

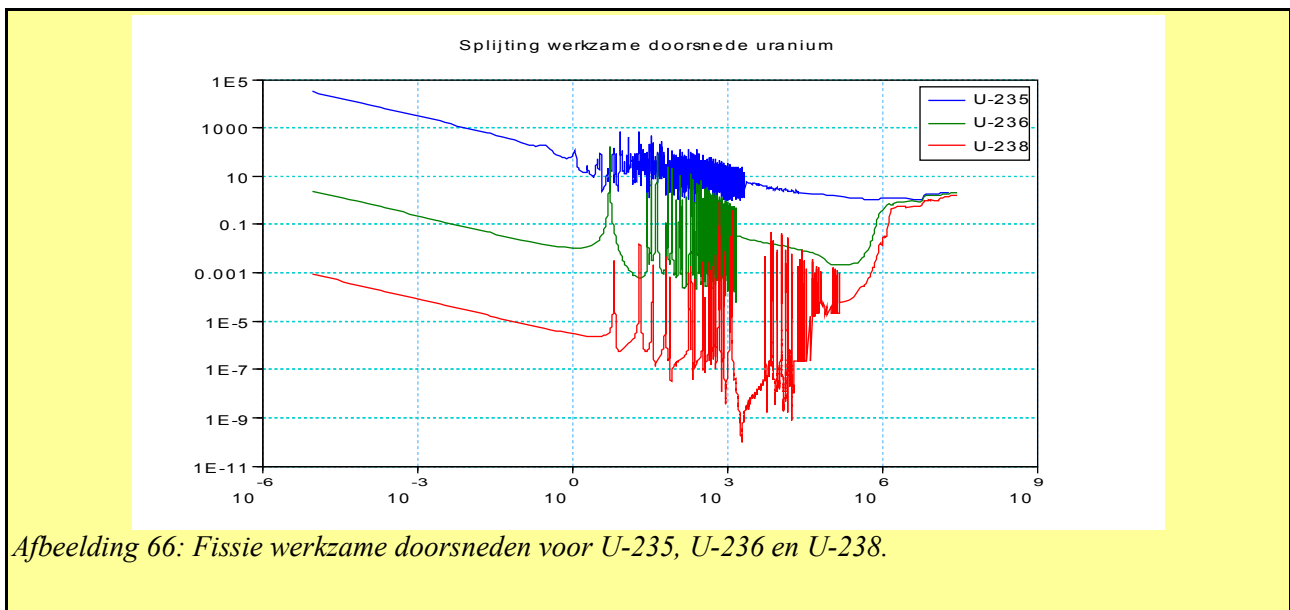
http://www.nirond.be/nederlands/8.2.2_pubs_nl.php

http://www.nirond.be/nederlands/PDF/Safir_NL_pub.pdf

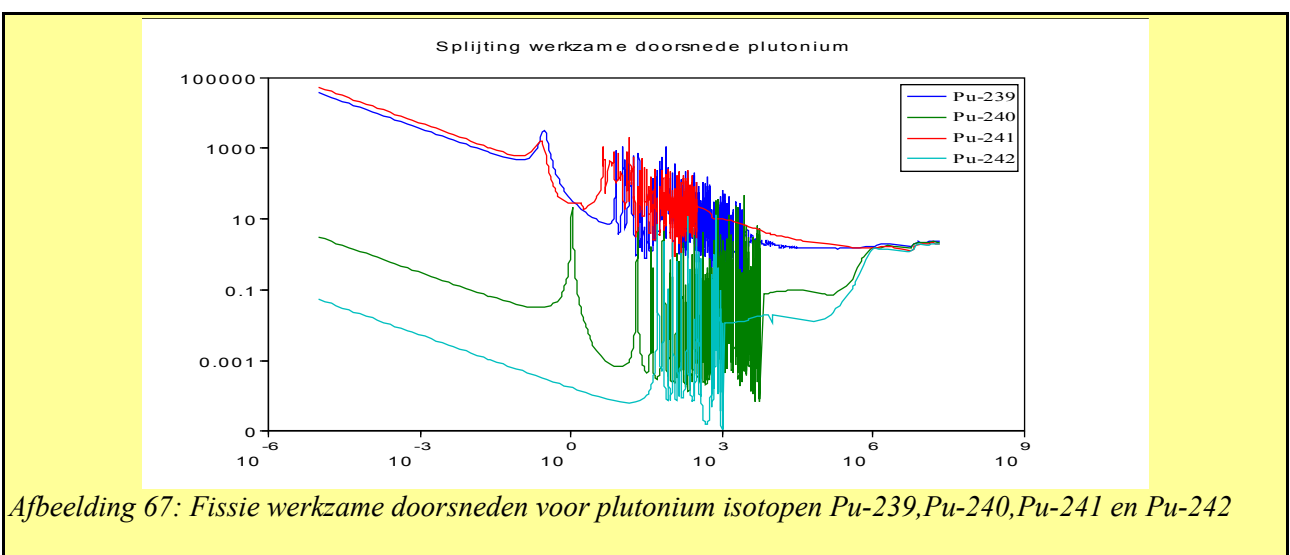
technische, wetenschappelijke en industriële. Vandaar de moeilijkheid van voorspelling. De nabije toekomst in de kernenergie draait rond 2 essentiële componenten die intiem met elkaar verbonden zijn: enerzijds de reactoren van de vierde generatie (die bijna allemaal snelle reactoren zijn) en anderzijds de bijhorende brandstofcyclus. In dit deel gaan we in op het aspect van de mogelijke brandstofcyclus in de nabije toekomst, maar we moeten wel even een excursie maken in het domein van de snelle reactoren om dat beter te begrijpen.

6.5.a Reactoren met snel spectrum

Reactoren met snel spectrum zijn reactoren waarin de energie flux van de neutronen zich ver boven

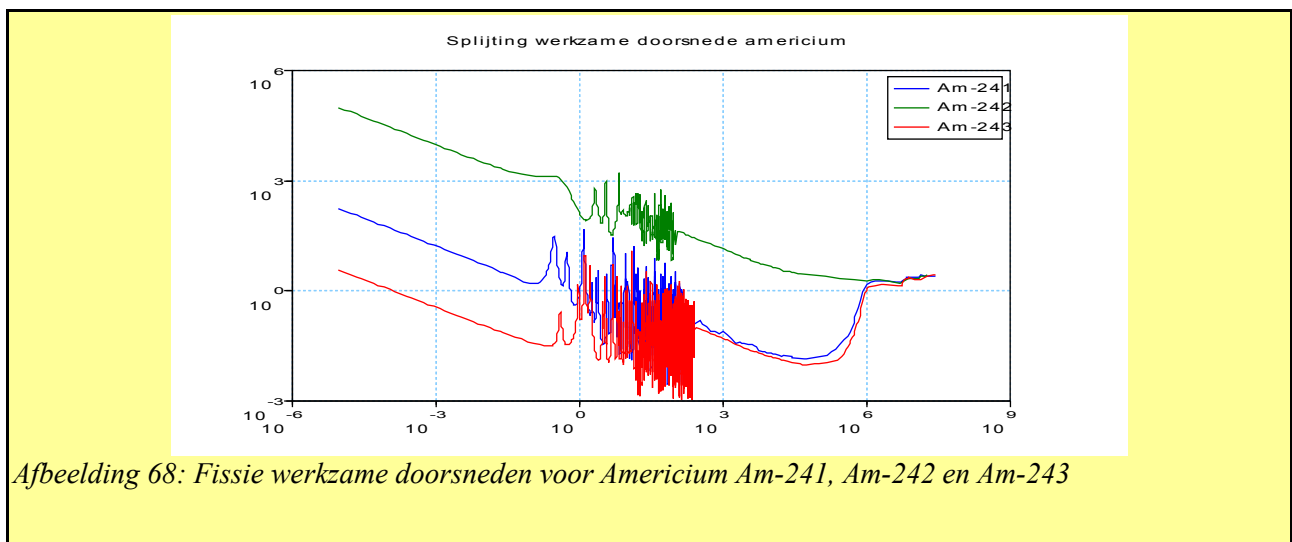


het thermische gebied bevindt ; ideaal zou het spectrum gelijk zijn aan het fissiespectrum (gemiddelde energie ongeveer 1 MeV), maar men kan natuurlijk een beetje moderatie niet tegen gaan.



Voor de verschillende gangbare splijtstoffen (uranium en plutonium) ziet men (in figuren 66 voor uranium en 67 voor plutonium) dat het splijtingsgedrag boven de 1 MeV heel gelijklopend is voor alle isotopen (zowel de “splijtbare” met oneven massagetal als de “vruchtbare” met even massagetal): allemaal draaien ze rond 1 barn. De splijtbare isotopen behouden deze waarde tot ongeveer 10 KeV terwijl de niet-splijtbare isotopen meestal onder de enkele 100 KeV een verwaarloosbare splijtswerkzame doorsnede hebben.

Voor americium (kleine actinide) stelt men een gelijkaardig gedrag vast, zoals getoond in figuur 68. *Dat wil zeggen dat in een snel spectrum, alle actiniden ongeveer even splijtbaar zijn.* Bovendien hebben ze vergelijkbare werkzame doorsneden, wat maakt dat ze op het eerste gezicht “ongeveer uitwisselbare brandstoffen” lijken te zijn. Daar zal een nuancering in komen, maar in eerste benadering is dat correct. Als we naar de absorptie werkzame doorsneden kijken, dan stellen we vast dat op het eerste gezicht, de werkzame doorsneden ook vergelijkbaar zijn, behalve voor Am-241 en Pu-240 die ongeveer 10 keer hogere werkzame absorptie doorsneden hebben dan de anderen.



Afbeelding 68: Fissie werkzame doorsneden voor Americium Am-241, Am-242 en Am-243

Als dusdanig heeft men het volgende idee: in een snelle reactor kunnen alle actiniden dienen als brandstof (zolang we maar een kritische massa hebben die meestal wel splijtbare isotopen vereist) en worden opgebrand; bovendien is de absorptie werkzame doorsnede relatief klein en zijn absorpties niet echt een probleem, gezien die oftewel vruchtbare nucliden omzet in splijtbare, ofwel splijtbare in vruchtbare, maar aan een veel kleiner tempo dan dat die verbrand worden.

Als dusdanig is een reactor met snel spectrum een “allesbrander”.

Natuurlijk is het bovenstaande een beetje een snelle analyse van de situatie, maar het hoofd idee is correct: in een snel neutronenspectrum kunnen alle actiniden gesplitst worden, en zij die absorptie ondergaan zijn niet “verloren”. Een snelle reactor is dus veel minder kieskeurig betreffende zijn brandstof en kan bijgevolg “voort” met de 99.5% brandstof die voor een thermische reactor “afval” waren – voornamelijk U-238, maar ook alle kleine actiniden, en de “onsplijtbare” eventallige plutonium en uranium isotopen, op voorwaarde dat we een kritisch systeem hebben.

Om een kritisch systeem te bekomen, heeft men toch wel een hart van splijtbare nucliden nodig. Om na te gaan welke stoffen een snelle reactor kritisch kunnen maken, bekijken we de Fermi kinf waarde voor zuivere isotopen in hun eigen fission spectrum (snel spectrum). Als die waarde groter is dan 1, wil dat zeggen dat we een kritische massa in snel spectrum kunnen vormen. Als die waarde

groter is dan 2, wil dat zeggen dat we, naast elk neutron dat dient om de kettingreactie op gang te houden, nog een tweede neutron kunnen absorberen om een vruchtbare kern (U-238 bijvoorbeeld) in een splijtbare om te zetten. Met andere woorden, als die k-waarde groter is dan 2, dan is een kweekreactor mogelijk die evenveel, of zelfs meer, brandstof aanmaakt van vruchtbare kernen dan hij er verbruikt. Ik heb volgende benaderde waarden berekend:

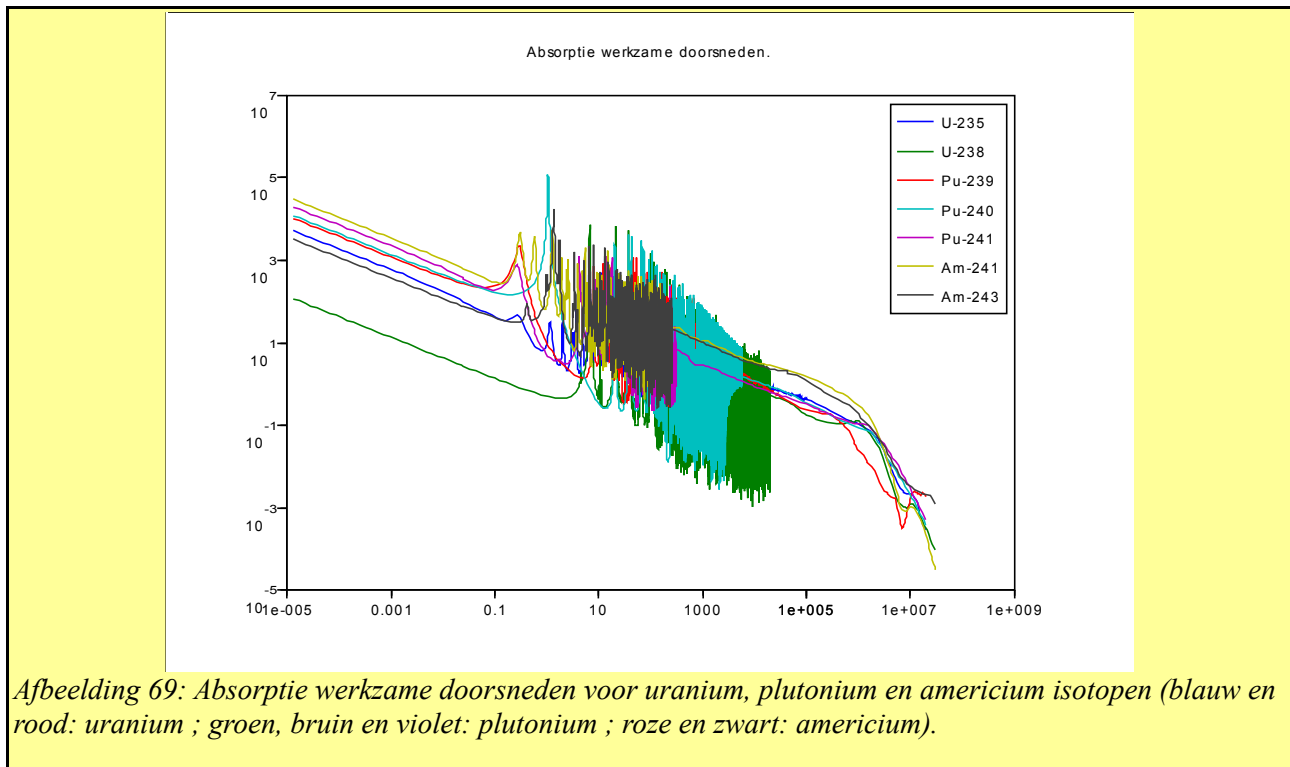
U235	U236	U238	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242	Np237	Np238	Am241	Am243
2.3	0.7	0.3	2.8	2.9	2.2	2.8	1.9	1.6	2.9	2.0	1.6

Met de donker gekleurde isotopen kan men in principe een hart van een kweekreactor bouwen, en met de licht getinte isotopen kan men wel een snelle reactor bouwen, maar die geen kweekreactor is. Met de ongekleurde isotopen kan men geen snel reactorhart bouwen. Men kan natuurlijk ook een mix van verschillende van die materialen gebruiken. In de praktijk kan men een kritisch hart van een snelle reactor bouwen met relatief hoog opgewerkt uranium, met een verrijkingsgraad van 15-20%, wat vrij veel scheidingsarbeid vraagt, maar het plutonium dat uit een drukwater reactor komt is beter zoals men kan zien. Als we voldoende zulk plutonium kunnen verzamelen om een reactor hart te bouwen, dan hebben we geen uranium verrijking meer nodig, en eens een snelle reactor is opgestart, kan hij voldoende nieuw plutonium kweken om niet alleen zichzelf aan de praat te houden, maar zelfs nieuwe plutonium harten te genereren door transmutatie van U-238 – dat is wat het betekent, een “kweek” reactor: hij zet meer uranium om in splijtbaar plutonium dan hij zelf plutonium verbruikt.

Men kan verder die reactor voeden met ongeveer alle actiniden die we hebben: het verarmd uranium, het gerecupereerde uranium, het gerecupereerde plutonium,... *maar met de kleine actiniden, en dan vooral americium, hebben we een probleem als het gehalte eraan te hoog wordt.* Het probleem van americium zit hem in de absorptie werkzame doorsnede, die veel hoger ligt dan de U-238 absorptie werkzame doorsnede, en bovendien veel minder resonantiepieken vertoont. Dit is getoond in figuur 69. Als dusdanig onderdrukt het americium de absorptie in het resonantiegebied van U-238, wat net zorgde voor een goed Doppler effect. Americium onderdrukt dus het Doppler effect, en als er teveel van aanwezig is, dan onderdrukt americium dus de passieve veiligheid van een reactor. *Om een passief veilige reactor te bekomen kan men zich dus maar enkele procenten americium in het reactorhart permitteren.* Dat is meer dan goed genoeg om zijn eigen geproduceerde americium te verbranden, maar men kan een snelle reactor dus niet beschouwen als een massieve “americium dump” om bijvoorbeeld op grote schaal alle americium van alle eerdere afgewerkte brandstof van drukwater reactoren op te stoken. Het is op dit ogenblik een actief onderzoeksgebied om trachten snelle reactoren te ontwerpen die een zo groot mogelijke hoeveelheid kleine actiniden kunnen ontvangen en toch veilig blijven, maar men dient dus als boodschap te onthouden dat er daar een moeilijkheid in zit, als men grote hoeveelheden extern ingebrachte kleine actiniden wenst te verbranden.

Daarentegen, het uranium en het plutonium dat nu uit de afgewerkte brandstof van een drukwater reactor komt, is meer dan “goed genoeg” om in een snelle reactor te dienen. Bovenstaande gegeven verandert de filosofie van de brandstofherwerking. De huidige brandstofherwerking, gebaseerd op het PUREX proces, scheidt met hoge precisie de uranium en de plutonium componenten van de rest van de afgewerkte brandstoffen, zodat de kleine actiniden en de splijtingsproducten overblijven als afval. Maar voor een snelle reactor heeft men zo geen precieze scheiding van uranium en plutonium nodig enerzijds, en zou men best de kleine actiniden in zekere mate kunnen extraheren. Met andere woorden: de voornaamste scheidingslijn bevindt zich eerder tussen (alle) actiniden en

de fissieproducten, eerder dan tussen plutonium en uranium enerzijds, en “de rest” anderzijds. Dat heeft bovendien het voordeel van de langdurige radio-toxiciteit van het uiteindelijke afval te verminderen door het verminderen van de hoeveelheid kleine actiniden in de uiteindelijke afvalstroom. Met andere woorden: hoewel de huidige manier van brandstofherwerking volstaat om een park van snelle reactoren te voeden, is het niet de meest optimale techniek: enerzijds zijn we te precies in de scheiding van uranium en plutonium, en anderzijds recupereren we niet optimaal alle actiniden. Het doorgedreven scheiden van uranium en plutonium stelt ook een proliferatie probleem dat we reeds aangehaald hebben: het zuivere plutonium kan eventueel dienen om een (slecht werkend) wapen te bouwen.



Het zou dus met andere woorden wenselijker zijn om een andere doorstroming van de afgewerkte brandstof te bekommen, doorstroming die beter is aangepast aan de noden en mogelijkheden van een park snelle reactoren.

Zoals reeds eerder uiteengezet, bestaat de technologie van snelle reactoren en is die reeds op pre-industriële schaal aangetoond. Er zijn in de wereld 18 reactoren gebouwd die kweekreactoren op basis van vloeibaar natrium zijn, en de grootste installatie is super-phenix geweest. Maar ondertussen zijn er extra eisen gekomen aan die klasse van reactoren op drie gebieden: op het vlak van de veiligheid dient men nog inspanningen te doen om op het zelfde niveau van veiligheid te komen als de (toch wel heel veilige) drukwater reactoren ; men dient ook – wat vroeger helemaal geen beschouwing was – zoveel mogelijk kleine actiniden te kunnen verbranden om in de mate van het mogelijke de radio-toxiciteit van het afval op lange termijn te verminderen ; en tenslotte dient men een economisch competitief systeem te bedenken zodat snelle reactoren een industrieel haalbaar concept worden.

Zoals reeds eerder aangehaald is het voornaamste veiligheidsprobleem van een natrium-gekoelde reactor het mogelijk explosief reageren van water met natrium. Dat probleem is niet zo

onoverkomelijk als het lijkt, want men dient zich het volgende voor ogen te houden: een natrium-gekoelde reactor staat niet onder druk, in tegenstelling tot water reactoren die onder een druk van 70 tot 160 bar werken. Niettemin verricht men ook onderzoek aan enkele alternatieven. Vloeibaar lood wordt beschouwd als alternatief voor het vloeibare natrium ; lood heeft het voordeel van geen heftige reactie met water of met lucht te ondergaan. Daarentegen is vloeibaar lood een relatief corrosief materiaal, in tegenstelling tot vloeibaar natrium. Maar lood heeft nog enkele voordelen. Ten eerste is de void coëfficiënt minder groot (wat een kleinere compensatie vereist om een passief veilige reactor te maken). Maar bovendien is lood zwaarder dan de brandstof, zodat bij een eventuele meltdown de vrijgekomen brandstof aan de oppervlakte gaat drijven, waar die gemakkelijk kan gerecupereerd worden. Een ander alternatief is het gebruik van helium gas. Dat is natuurlijk de ideale oplossing op het eerste gezicht, maar men werkt weer met een reactor onder druk. Tenslotte beschouwt men ook reactoren waar men een vloeibaar zout gebruikt als koelmiddel. Het probleem met de drie laatste types van reactoren (lood, gas, zout) is dat men, in tegenstelling tot het geval van de natrium-gekoelde reactoren, zo goed als geen ervaring heeft en dat dit essentieel nog papieren concepten¹³⁶ zijn, terwijl er dus reeds 18 realisaties zijn geweest van natrium-gekoelde reactoren. De keuze tussen de verschillende technologieën zal een technologische en misschien ook politieke keuze zijn, maar men dient goed te beseffen dat er geen fundamenteel probleem is en dat de technologie, ten minste in het geval van de natrium koeling, bestaat en operationeel is.

6.5.b Versneller aangedreven systemen (ADS)

Naast kritische reactoren met snel spectrum, heeft men ook een ander concept bedacht. Het idee is origineel afkomstig van Carlo Rubbia, een nobelprijswinnaar in de elementaire deeltjes fysica, en het gaat als volgt. In plaats van een kritische structuur te beschouwen, met een k-factor gelijk aan 1, gaat men een sub-kritische structuur beschouwen, met een k-factor van zeg maar, 0.95 of zo. Natuurlijk kan zo een systeem geen blijvende kettingreactie onderhouden, maar het is wel zo dat voor elk extern neutron dat een splijting veroorzaakt, er ongeveer 20 splijtingen (die 20 komt van $1/(1-k)$) zullen veroorzaakt worden alvorens alle neutronen verloren zijn. Als dusdanig hebben we hier geen zelf-onderhoudende reactie, maar wel een soort “neutronenversterker” die een extern invallende neutronenflux met een factor 20 versterkt. Waar komen die externe neutronen vandaan ? In het voorstel van Rubbia komen die van een spallatie reactie van een protonenbundel op zware atomen. Het is namelijk zo dat vrij energetische protonen (meerdere tientallen of honderden MeV of zelfs enkele GeV) die op relatief zware atomen (kwik, lood,...) invallen aanleiding geven tot reacties waarbij verschillende neutronen vrijkomen (naast andere, geladen deeltjes). Zulke reactie wordt een *spallatie reactie* genoemd. Het idee van Rubbia is van een sterke protonenversneller een bundel protonen op een spallatiedoel te laten schieten, die een zekere flux snelle neutronen produceert, in het midden van een sub-kritische reactor. De flux snelle neutronen wordt daar dan versterkt met de versterkingsfactor van het sub-kritische systeem en er worden ook evenveel splijtingsreacties ondergaan. Als dusdanig is het nucleaire vermogen van zo een systeem ongeveer 20 keer groter dan het versneller vermogen, wat het moet mogelijk maken om het geheel energetisch rendabel te maken. Men ziet onmiddellijk de twee grote voordelen in van zulk een systeem: ten eerste is het vermogen volledig en snel regelbaar door het vermogen van de versneller, en volstaat het om de versneller uit te schakelen om het nucleair vermogen tot nul terug te brengen. Ten tweede heeft men geen temperatuurseffecten nodig qua passieve veiligheid, zoals Doppler

¹³⁶De Russen hebben duikboten met snelle loodgekoelde reactoren, maar gezien dat een militaire toepassing is, is daar maar weinig over gekend.

effecten. Men kan positieve temperatuurscoëfficiënten hebben en al wat men wil, en als dusdanig zoveel kleine actiniden in de reactor stoppen als men wil. Op het eerste gezicht hebben we dus de perfect veilige, snelle reactor die een perfecte allesbrander is in alle denkbare verhoudingen, en dus alle actiniden kan opstoken zonder het minste probleem... of niet soms? Hoewel het principe juist is, zal deze oplossing in de praktijk ingewikkelder zijn dan op het eerste gezicht lijkt. Dat wil niet zeggen dat de problemen onoverkomelijk zijn, en er gebeurt op dit ogenblik heel veel onderzoek naar een mogelijke realisatie. Maar even een lijstje van de punten die maken dat men niet te vroeg hoera moet roepen:

- De grote uitdaging is het grote vermogen van de spallatiebron. Men heeft nog nooit een deeltjesversneller gebouwd die dat vermogen op continu wijze kan leveren; men heeft er wel veel sterkere gebouwd in gepulste mode, maar er zijn extra moeilijkheden om een continu werkende versneller op die schaal te bouwen. Bovendien heeft men een serieus probleem met de afkoeling van het spallatiedoel, midden in een reactor hart. De enige haalbare doelen zijn vloeibare metaal doelen.
- De reactor is normaal gezien subkritisch, en men dient er zich toch wel van te gewissen dat die subkritisch blijft! Anders heeft men een totaal ongecontroleerde kernreactor gebouwd. Hier dient men dus een compromis te maken tussen de versterkingsfactor enerzijds die k zo dicht mogelijk bij 1 wil hebben, en een veiligheidsmarge die k ver van 1 wil houden om de subkriticiteit te garanderen.
- De veiligheid bestaat niet enkel uit de mogelijkheid om de nucleaire reactie te kunnen stoppen. In feite is dat in een goed ontworpen passief veilige reactor ook het geval! De veiligheid bestaat er ook in om de radioactieve stoffen kunnen bij te houden en om voldoende koeling kunnen aan te brengen om de radioactieve vervalwarmte van de splijtingsproducten af te voeren nadat de nucleaire reactie is gestopt. Deze aspecten worden niet noodzakelijk positief beïnvloedt door de aanwezigheid van de versneller.
- De installatie zal vele keren complexer en duurder zijn voor waarschijnlijk een veel kleiner thermisch vermogen dan een kritische reactor.

Met andere woorden, met wat we op dit ogenblik weten is een ADS (Accelerator Driven System) niet het ideale vervangmiddel voor een kritische reactor: qua veiligheid is dat niet noodzakelijk zoveel beter, alles bij elkaar beschouwd, er zijn op dit ogenblik serieuze technische uitdagingen en waarschijnlijk zal de installatie economisch gezien niet rendabel zijn om energie te produceren. Maar een ADS systeem heeft wel een heel groot voordeel ten opzichte van een snelle reactor: *we kunnen hele grote hoeveelheden kleine actiniden op een vrij efficiënte wijze opbranden in zo een installatie*; veel meer dan kan gebeuren in een kritische snelle reactor. Als dusdanig is een ADS de ideale “kleine actiniden verbrandingsinstallatie” waarin veel of alle van het bestaande afval hun langlevende kleine actiniden in kwijt kan. Zoiets vermindert de duur van de radio-toxiciteit dus van 10 000 jaar naar 300 a 400 jaar van het overblijvende afval, op enkele kleine hoeveelheden langlevende splijtingsproducten na.

Een ADS systeem is ook een ideale testinstallatie om aan materiaalonderzoek te doen betreffende de materiële bestandheid tegen langdurige blootstelling aan hoge fluxen van snelle neutronen, bijvoorbeeld om materialen te kwalificeren voor de constructie van kritische snelle reactoren. Dat gebeurt op dit ogenblik ook in Europa in the Phenix reactor, maar een ADS installatie is een flexibeler test installatie dan een reactor.

In het Belgische SCK-CEN te Mol doet men reeds een hele tijd onderzoek naar ADS systemen. De eerdere versie van ontwerp was MYRRHA¹³⁷ maar de hoop is nu van een Europees ADS systeem te kunnen bouwen in het EUROTRANS project dat wel heel goed lijkt op het MYRRHA ontwerp¹³⁸ (niet te verwarren met het Europese transportbedrijf Eurotrans...)

Men dient nog veel onderzoek te verrichten alvorens men kan weten of een ADS systeem op industriële basis een commerciële mogelijkheid is om de kleine actiniden in grote hoeveelheden en met grote efficiëntie op te branden en dat onderzoek is goed van de grond aan het komen. In de mate dat zulk een systeem realiseerbaar zal blijken te zijn, kan zo een systeem de duur van de radio-toxiciteit van het uiteindelijke afval serieus verminderen (van 10 000 jaar tot enkele honderden jaren) door het vernietigen van de kleine actiniden, die voornamelijk geproduceerd worden door reactoren met thermisch spectrum zoals de huidige drukwater reactoren – snelle reactoren produceren er veel minder, gezien ze ze zelf kunnen opbranden. Zoals we gezien hebben, geven de kleine actiniden onder de huidige staat van kennis geen probleem, gezien het niet zij zijn die voor een (minuskule) stralingsbelasting kunnen zorgen binnen heel lange tijd, maar eerder enkele langlevende fissieproducten die in kleine hoeveelheden aanwezig zijn ; de actiniden lijken niet goed te kunnen migreren. Niettemin kan het zijn dat onze huidige kennis ter zake onvolledig is ; bovendien zorgen de kleine actiniden ook voor een serieuze vermogenbijdrage in het warmtevermogen van het afval. Bijgevolg: *hoewel niet strikt noodzakelijk, kan men het toch wel als een interessant voordeel beschouwen als we op een efficiënte manier die kleine actiniden uit het afval kunnen verwijderen. Enkel onderzoek zal kunnen aangeven of dat een haalbare zaak zal zijn binnen enkele decennia.*

6.5.c Herwerkingsprocessen

Zoals reeds uiteengezet is het PUREX proces, dat uit de afgewerkte brandstof chemisch de uranium en plutonium componenten kan halen met hoge efficiëntie en hoge zuiverheid, een voldoende basis om een gesloten brandstof cyclus met snelle reactoren in uitvoering te brengen en het PUREX proces is reeds sinds tientallen jaren in industriële uitvoering. Maar we hebben ook gezien dat het niet de meest optimale manier is om de brandstof te herwerken en men doet onderzoek naar beter aangepaste processen.

Er zijn essentieel twee wegen om aan brandstofherwerking te doen: de “droge” en de “natte” chemie. Het PUREX proces is een voorbeeld van een nat proces: alles gebeurt in waterige en organische oplossingen. Droge processen gebeuren meestal in een oven, waar gassen en vaste stoffen met elkaar interageren. We geven hier een kort overzicht van de bestudeerde processen die kunnen deel uit maken van een toekomstige brandstofcyclus. Het voornaamste werk is gebaseerd op technieken om de kleine actiniden te scheiden van de fissieproducten, en daar zit een chemische moeilijkheid: americium lijkt chemisch heel sterk op de lanthaniden. De lanthaniden zijn de elementen 57 tot 71: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd... Yb en Lu en zij komen vrij veel voor in de fissieproducten.

In de richting van de natte chemie tracht men een vervolg aan het PUREX proces toe te voegen. In de eerste plaats tracht men de kleine actiniden te recupereren, maar hierbij stelt zich het probleem van de chemische verwantheid met de lanthaniden. Men heeft het DIAMEX/SANEX proces

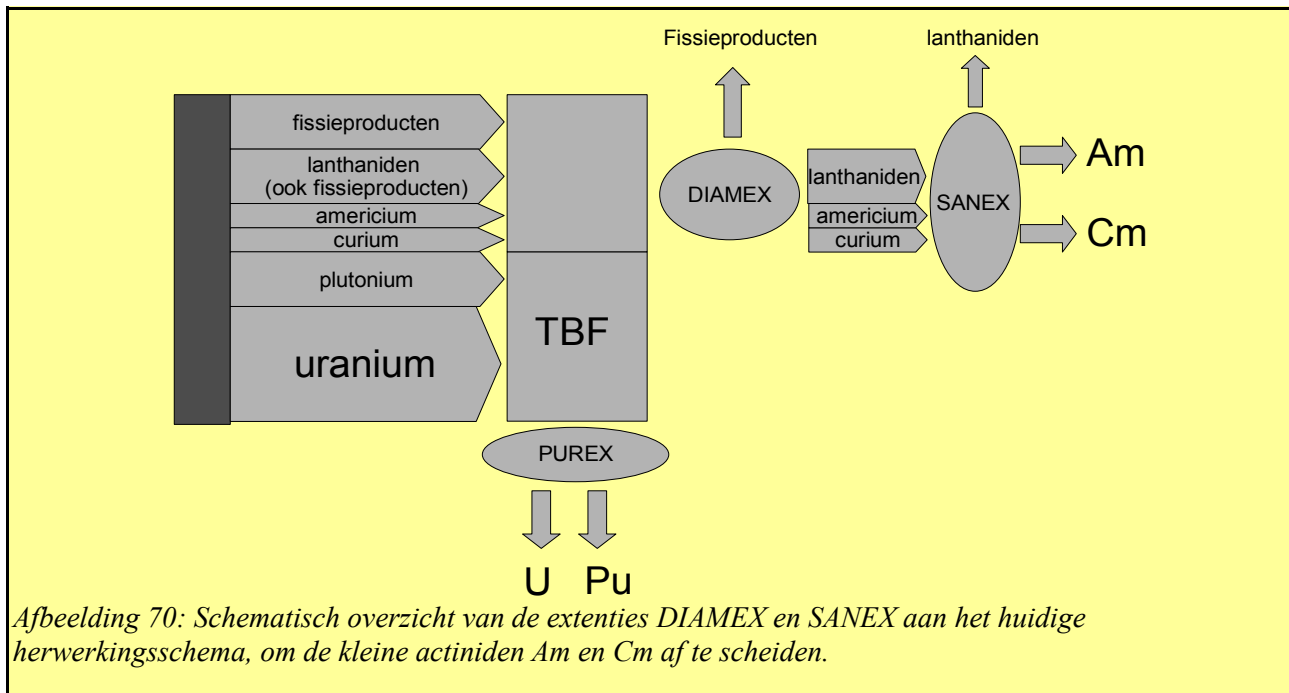
¹³⁷<http://www.sckcen.be/myrrha/home.php>

¹³⁸<http://nuklear-server.ka.fzk.de/eurotrans/>

uitgewerkt en op prototype schaal getest. Het DIAMEX proces extraheert vanuit de afval stroom van het PUREX proces (waar dus reeds het uranium en het plutonium zijn verwijderd) de kleine actiniden, samen met sommige lanthaniden. Het SANEX proces scheidt uit deze mengeling van lanthaniden en actiniden de actiniden af.

Het PUREX proces was gebaseerd op het onderscheid tussen verschillende oxidatietrappen van de zware metalen. Op die manier kan men ook neptunium afscheiden als men dat wil. Voorlopig wordt dat niet gedaan, maar er is geen principiële moeilijkheid om via dezelfde weg het neptunium af te scheiden. Americium en curium kunnen echter niet op die manier worden afgezonderd, gezien ze in oxidatietrap 3 blijven zitten, terwijl men in het PUREX proces minstens oxidatietrap 4 nodig heeft.

Men heeft een organische stof gevonden, DMDOHEMA, die americium en curium, samen met lanthaniden met hoge efficiëntie kan afscheiden van een waterige fase. Proeven in een prototype installatie op afgewerkte MOX brandstof hebben aangetoond dat men 99.7% van het americium, 99.9% van het curium, en ongeveer 99% van de lanthaniden op die manier kon extraheren van de afval stroom van het purex proces. (Bron: cursus Prof. Madic, de uitvinder van deze processen). Dit scheidingsprocede heet het DIAMEX proces.



Afbeelding 70: Schematisch overzicht van de extensies DIAMEX en SANEX aan het huidige herwerkingschema, om de kleine actiniden Am en Cm af te scheiden.

De afscheiding van het americium van de lanthaniden is een scheikundig meer ingewikkelde zaak, maar men heeft een proces op basis van 3 moleculen op punt gesteld: het SANEX proces, dat gebruik maakt van DMDOHEMA en HDEHP in de organische fase, samen met HEDTA in de waterige oplossing, en die het mogelijk maakt om americium af te zonderen. Men heeft zelfs een post-verwerking toegevoegd die het americium van het curium scheidt. Deze processen zijn op een prototype schaal uitgetoet met veel succes, en het lijkt niet echt een probleem om ze op te schalen tot aan het niveau van een industrieel proces. Een schematisch overzicht vind men in figuur 70. Dit onderzoek, dat vooral door de Fransen gebeurt, is ook Europees omkaderd in een project dat EUROPART heet.

Zoals men hieruit ziet, is er geen reden om te twijfelen dat we binnen afzienbare tijd een volledige scheiding op industriële schaal kunnen doorvoeren van de afgewerkte brandstof in zijn verschillende onderdelen afzonderlijk: uranium, plutonium, neptunium, americium, curium en de fissieproducten.

Om redenen van proliferatie kan het eventueel wenselijk zijn om de actiniden niet afzonderlijk af te scheiden, maar alle actiniden samen af te scheiden van de fissieproducten ; dat verplicht een eventuele bommenmaker om zelf de verdere gecompliceerde scheidingsstappen door te voeren, wat het hem werk natuurlijk stukken moeilijker maakt. In welke mate zulke overwegingen zinvol zijn laat ik hier in het midden. Men doet daarom onderzoek naar andere processen, waarvan we hier een soort heel summier gaan bespreken: de pyroprocessen.

In een pyroproces gaat men de te verwerken stoffen (afgewerkte brandstoffen, of resultaat van een PUREX proces...) oplossen in een bad van gesmolten zout, bijvoorbeeld een LiCl/KCl mengsel dat rond de 500 graden smelt. Men gaat dan via elektrolyse (dat wil zeggen, men plaatst elektroden in het zoutbad en zet hierop een elektrische spanning van enkele volt, wat aanleiding geeft tot een grote elektrische stroom, want gesmolten zout is een goede geleider) en afhankelijk van de keuze van het materiaal van de elektrode en de gekozen elektrische spanning, componenten van deze zoutoplossing afzonderen in metaalvorm of in zout vorm. Deze aanpak heeft een aantal voordelen.

- Ten eerste heeft men een veel kleinere en eenvoudiger scheikundige installatie, zodat de herprocessing fabriek bij een reactor kan geplaatst worden, en dient men geen grote gecentraliseerde chemische fabriek te bouwen, wat wel het geval is voor natte chemie die complexer is. Dat elimineert heel wat veiligheidsproblemen verbonden aan het transport.
- Ten tweede stelt een zout oplossing minder eisen aan de aard van de afgewerkte brandstof. We hebben tot hier toe steeds uranium en plutonium oxiden beschouwd, maar – zie het hoofdstuk over materialen – voor toekomstige reactoren zou men wel eens op andere chemische structuren voor de brandstof kunnen overstappen – we denken hierbij voornamelijk aan nitriden. Een gesmolten zout is veel minder “kieskeurig” voor de chemische vorm van het aanvangsmateriaal dan een nat proces.
- Ten derde komen er geen ingewikkelde organische moleculen bij kijken, die onderhavig zijn aan stralingsschade ; als dusdanig is een gesmolten zout veel stralingsbestendiger dan een organische natte stof. Het zal dus mogelijk zijn om afgewerkte brandstof na een veel kortere afkoeltijd te verwerken dan met een nat proces.
- Dit is een technisch/chemisch argument, maar men heeft een breder venster van elektrochemische potentialen in een zoutbad dan in een waterige oplossing. Voor de kenners: dat komt omdat een waterige oplossing, qua redox potentiaal, begrensd is enerzijds door de oxidatie van water tot zuurstof gas aan de positieve potentiaal zijde, en anderzijds door de reductie van water tot waterstofgas aan de negatieve potentiaal zijde, wat maakt dat we een potentiaalverschil van ongeveer 1.2 V kunnen aanleggen. In een zoutbad kan men tot 3.7V gaan alvorens men een scheiding in lithium metaal enerzijds en chloorgas anderzijds bekomt. Dat opent veel meer elektrochemische mogelijkheden
- Het is denkbaar om een totaal gemengde actiniden extractie te bekomen op die manier, zonder U, Pu, en de kleine actiniden van elkaar te scheiden. Dat maakt deze aanpak veel aantrekkelijker voor proliferatie vraagstukken.

De nadelen van deze aanpak ten opzichte van de natte chemie zijn:

- Er is veel minder kennis en ervaring beschikbaar: hoewel dit pad een beetje is onderzocht in het verleden, is er veel minder onderzoek gebeurd en weet men dus veel minder over deze processen dan over natte processen die reeds tientallen jaren in industrieel gebruik zijn.
- Er is een verhoogd veiligheidsprobleem dat moet opgelost worden: de hoog-actieve stoffen bevinden zich aan hoge temperaturen in een soms heel agressieve omgeving.
- Het is op dit ogenblik niet duidelijk hoe deze processen een schaalvergroting kunnen ondergaan naar industriële niveaus, in tegenstelling tot de natte processen.

Als dusdanig is het nodig om verder onderzoek naar deze technieken te verrichten – het is niet duidelijk of ze ooit een rol zullen spelen, maar ze zijn op langere termijn op het eerste gezicht wel beloftevol.

Hoofdstuk 7 Materialen

7.1 Heel korte inleiding tot de materiaalwetenschappen

7.1.a Soorten vaste stoffen: kristallen

Materialen zijn heel belangrijk in de kernenergie. De uiteindelijke veiligheid berust op materiële barrières, en de werkingscondities zijn extreem: hoge temperaturen, drukken, stralingsbelasting... Bovendien zijn er specifieke eisen van nucleaire aard aan de materialen die gebruikt worden: niet te veel activeren, niet te veel neutronen absorberen enz... Een groot deel van het onderzoek naar de verbetering van de performanties en veiligheid van kernreactoren is in feite materiaal onderzoek.

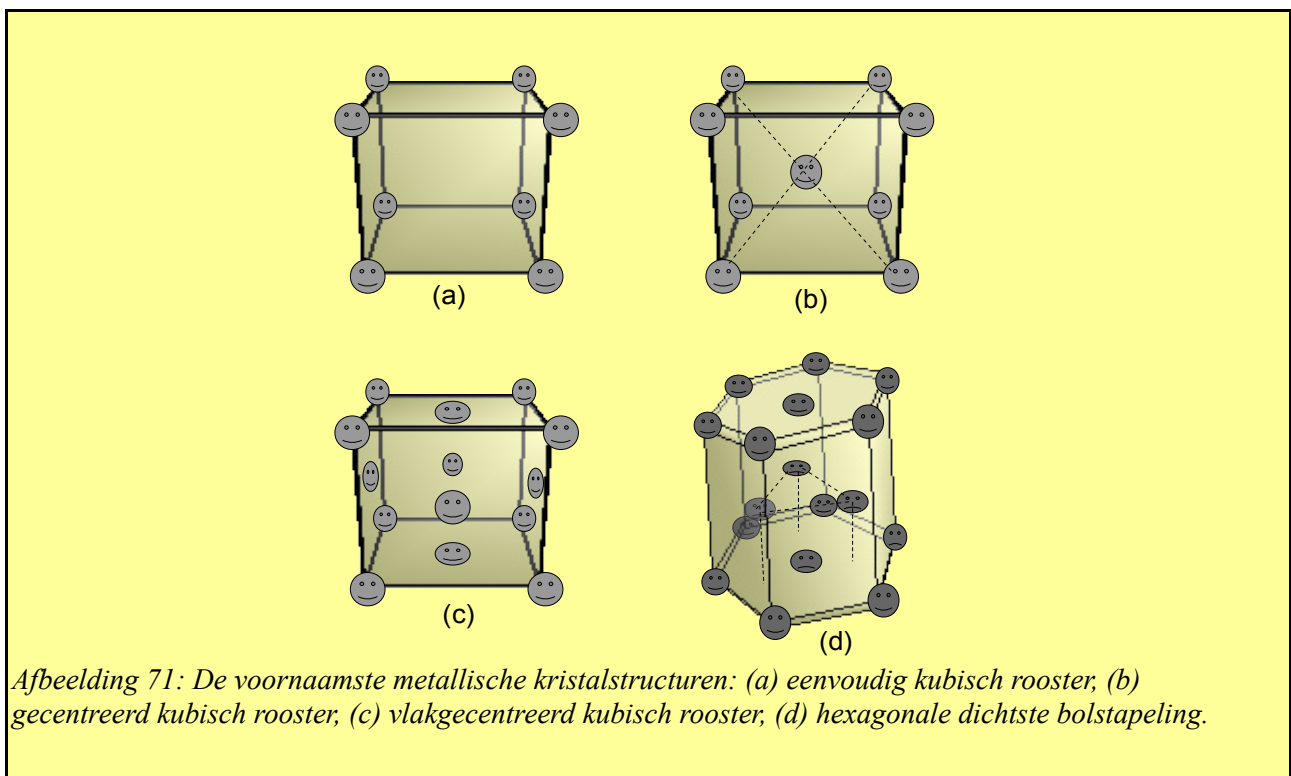
Materiaalwetenschap is de studie van vaste stoffen en de relatie tussen de microscopische structuur enerzijds en de mechanische, chemische en thermische eigenschappen anderzijds. Materiaalwetenschappen zijn geen fundamentele wetenschap, maar het is ook geen totaal empirische wetenschap. Er is theoretische kennis, maar de voorspellende kracht van die theoretische kennis is relatief klein, zij dient eerder om een conceptueel kader te scheppen, en een kwalitatief begrip van de materiaaleigenschappen te verlenen. Veel werk is sterk empirisch, maar men begint wel hoe langer hoe meer kwantitatieve modellen te bouwen.

Veruit de meeste vaste stoffen zijn opgebouwd uit kristallen. Er zijn wel uitzonderingen, zoals glazen die amorfe stoffen zijn, maar het overgrote deel van de materialen die we in de nucleaire sector beschouwen zijn van kristallijne aard. Het kan mensen soms verbazen, maar metalen zijn ook kristallijn (op enkele exotische uitzonderingen na die hier geen rol spelen). Men vindt kristallijne materialen in de vorm van ionische, covalente en metallische materialen, en dat onderscheid wordt essentieel bepaald door hoe de elektronenwolken verdeeld zijn over de atomen. Als elk atoom zijn relatief duidelijke eigen elektronenwolk heeft, maar sommigen hebben in hun wolk een elektron te veel en anderen een elektron te weinig (zodat de atomen *ionen* zijn) dan heeft men *een ionisch kristal*. Een typisch voorbeeld is keukenzout, waarin zich enerzijds natrium atomen bevinden die een elektron te weinig hebben (een positieve lading bezitten), en chloor atomen die een elektron te veel hebben (dat ze van dat natrium atoom gepikt hebben) en negatief geladen zijn. Het is de elektrostatiche aantrekkingskracht die de ionen bij elkaar houdt in het kristal. Als er een elektronenwolk is die gemeenschappelijk is aan alle atomen, dan heeft men *een metaal*. Men kan zeggen dat het “metaalachtige” dat van een metaal een metaal maakt, net die elektronenwolk is. Indien er elektronenwolken zijn die verdeeld zijn over een klein aantal atomen (meestal 2) maar niet over het ganse materiaal, dan heeft men *een covalent kristal*. Een typisch voorbeeld is diamant. Een *halfgeleider* is een covalent kristal, maar waar de elektronen heel gemakkelijk een gemeenschappelijke elektronenwolk kunnen vormen zoals in een metaal.

Een kristal is een regelmatige ruimtelijke opstapeling van atomen, op zulke wijze dat eenzelfde patroon zich regelmatig herhaalt in de ruimte. Men heeft sinds lang al alle denkbare manieren om zoiets te doen, opgesomd en men kent dus alle denkbare soorten “kristal stapelingen”. De studie van deze stapelingen heet de kristallografie. Het eenvoudigste denkbare zulke kristalrooster is het “*eenvoudig kubische*” rooster. Dat is als ruitjespapier in drie dimensies en op elk hoekpunt zit er een zelfde patroon, zoals getoond in figuur 71. In het eenvoudigste geval bestaat dat patroon gewoon uit een enkel atoom. Metaalkristallen zijn slechts heel zelden eenvoudig kubisch. Een iets

ingewikkelder kristalrooster is *het lichaamsgecentreerde kubische rooster*. Dat is net zoals het eenvoudig kubische rooster, behalve dat het patroon ook nog een keer voorkomt in het centrum van de kubusjes (dat vrij was in het eenvoudig kubisch rooster). Vele metaalkristallen hebben deze vorm, en het is ook voorgesteld door het Brusselse Atomium. Sommige ijzerkristallen hebben die vorm. Een variant is de *zijde-gecentreerde kubische roosters*. In plaats van een extra patroon in het midden van de kubus, zijn er nu 6 extra patroontjes, een in het midden van elk (vierkant) vlakje van de kubusjes.

Een op het eerste zicht totaal verschillend en in feite heel verwant rooster is *het dichtstgestapelde hexagonale rooster*. Dat is een op het eerste zicht veel ingewikkelder rooster. Het is een herhaling van de volgende figuur: een zeshoekig prisma met een patroontje op elk hoekpunt en in het midden van de zeshoekige vlakken, en een driehoek van patroontjes midden in het prisma. Het



dichtstgestapelde hexagonale rooster en het zijde-gecentreerde kubische rooster zijn heel verwant, en vormen samen de twee dichtst-gestapelde bol configuraties die er in de kristallografie bestaan.

Andere kristalroosters zijn vaak “vervormingen” van deze kristalroosters.

7.1.b Polykristallijne materialen, kristalfouten

Als men zich nu inbeeldt dat een stuk kristallijn materiaal zo een perfect rooster bevat, dan is men mis om twee redenen. De eerste reden is dat de meeste materialen niet uit een enkel groot kristal bestaan, maar wel uit een ingewikkeld netwerk van vele kleine kristalletjes die kriskras door elkaar zitten. Men spreekt van een *polykristallijn materiaal*. Dit in contrast met de eerder zeldzame monokristallijne materialen. Een silicium monokristal zoals dat in de elektronica gebruikt wordt als halfgeleider om geïntegreerde circuits te maken is zo een uitzondering, maar men moet heel veel

moeite doen om dat te fabriceren. Ook de meeste edelstenen zijn monokristallen. Maar het overgrote deel van de materialen die we gebruiken zijn polykristallijn.

De tweede reden is dat zelfs elk individueel kristalletje geen perfecte opeenstapeling is, maar dat er “fouten” in het kristalrooster zitten: atomen die niet op de juiste plaats zitten, missende atomen... Ionische kristallen bevatten veel minder kristalfouten dan metalen. De reden is dat de atomen in ionische kristallen elektrisch geladen zijn, en een afwijking van het perfecte kristal levert lokale elektrische ladingen op. Dat is iets wat veel energie kost. Daarentegen, de meeste metalen bevatten kristallen met veel fouten.

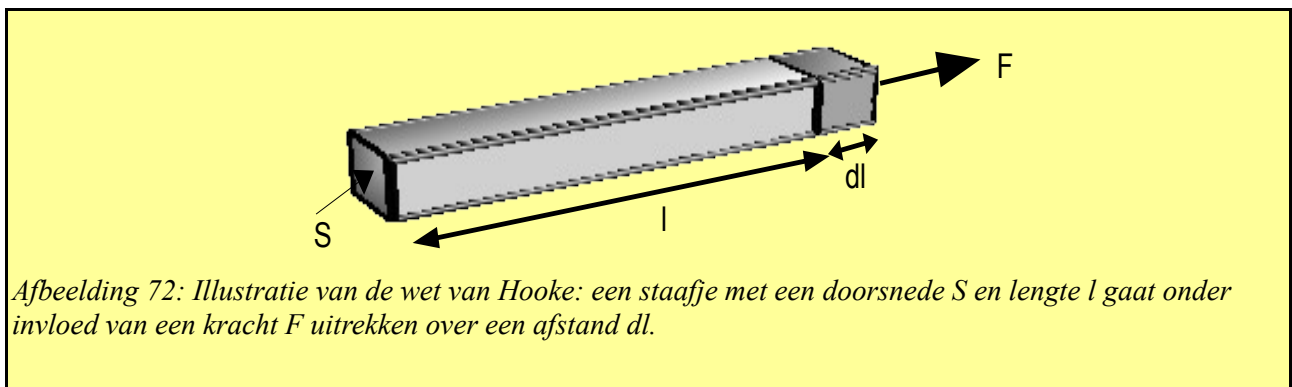
Het kan op het eerste zicht een beetje bij de haren getrokken lijken om hieraan veel aandacht te besteden, maar het is nu eenmaal zo dat het net die twee eigenschappen zijn (het ingewikkeld netwerk van kleine kristalletjes, en de fouten in het kristal) die voor een heel groot deel verantwoordelijk zijn voor de mechanische eigenschappen van metalen. En nu komt de kat op de koord: de precieze manier waarop de kleine kristalletjes in elkaar zitten, evenals de hoeveelheid en soort fouten in het kristal is bepaald door de ganse geschiedenis van het stuk materiaal: hoe het gefabriceerd is, welke mechanische vervormingen met eraan heeft opgelegd, hoe lang het bij welke temperatuur is geweest enzovoort. Een materiaal heeft een thermodynamische evenwichtstoestand maar meestal is de vorm waarin het materiaal zich bevindt niet in die evenwichtstoestand. Het materiaal zal dan streven naar die evenwichtstoestand, maar dat kan snel gaan of zo lang duren dat er in de praktijk geen verandering in structuur wordt waargenomen, zelfs na tientallen jaren wachten. Dat “streven naar evenwicht” wordt meestal wel bevorderd door de temperatuur te verhogen, maar het kan zijn dat het gezochte evenwicht bij hoge temperatuur anders is dan bij lage temperatuur. Als dusdanig kan men soms door “snel afkoelen” een evenwichtstoestand bij hogere temperatuur “bevrozen” en bij lage temperatuur behouden, ook al is dat daar geen evenwichtstoestand.

Men begrijpt nu dat er een hele resem “kunsten” bestaat om materialen thermische en mechanische behandelingen te laten ondergaan om de precieze structuur die we wensen te bekomen, te bewerkstelligen. Als het om metalen gaat, heten die kunsten “metallurgie”. Door het mengen van verschillende metalen en andere stoffen, en door ze verschillende thermische en mechanische behandelingen te laten ondergaan, bekomt men een haast onbegrensde hoeveelheid van materiaalstructuren, kristalvormen en fouten hierin, allemaal met verschillende eigenschappen. Dat vakgebied is de materiaalkennis.

De fouten in een kristalrooster zijn van verschillende aard. De eenvoudigste fout is een patroon of een atoom dat ontbreekt. Men spreekt van een *lacune*. Soms kan er ook een atoom tussen de correct geplaatste patronen “tussengevoelfeld” zijn. Men spreekt dan van een *interstitieel* atoom. Soms kan een verkeerd atoom op de juiste plaats zitten ; men spreekt van een *substitutie*. Het zijn de eenvoudigste fouten, omdat ze slechts 1 of enkele atomen betreft. Men noemt ze *punt defecten*. Een ander, heel belangrijk, soort fouten is een ganse rij of een gans vlak van atomen dat “fout” zit. Men kan zich een kubisch rooster indenken, waarin zich een “extra halfvlak” bevindt. De “grenslijn” van het vlak dat er teveel aan is (of, zoals men wil, dat mist) vormt een rechte lijn. Men noemt zulke lijnvormige defecten: *dislokaties*. De rechte lijn is een academische idealisatie ; in de praktijk zijn dislokaties kronkelende lijnen. Dislokaties zullen een dominante rol spelen in de vervorming van metalen. Naast punt- en lijndefecten is er een derde vorm van “defect”: de scheidingsvlakken tussen kleine kristalletjes.

7.1.c Mechanische eigenschappen van materialen.

Als men op een materieel voorwerp een kracht uitoefent, dan gaat de geometrische vorm van dat voorwerp veranderen: men vervormt het materiaal. Indien die krachten klein zijn, dan zijn de vervormingen ook klein, en zowat alle gekende materialen gaan onder invloed van een kleine kracht proportioneel vervormen. Dat wil zeggen dat de geometrische verandering voor een twee keer zo grote kracht, twee keer zo groot gaat zijn. Als men de kracht verwijdert, dan neemt het voorwerp zijn oorspronkelijke geometrische vorm in, met andere woorden, er is geen blijvende vervorming. Voor voldoende kleine krachten ondergaan alle kristallijne materialen zulke evenredige vervorming. Men beseft dat misschien niet, maar zelfs als men op een dikke stalen balk gaat zitten, gaat die een



heel klein beetje vervormen, en als men terug opstaat, dan neemt die balk terug zijn originele vorm in. We bevinden ons in *het elastische gebied van het materiaal*. Als men een prismatisch stuk materiaal neemt (zeg maar, een staafje) van lengte l , en men gaat daar in de lengterichting aan trekken met een kracht F , dan gaat dat staafje wat langer worden: l wordt $l+dl$. Het blijkt, voor een gegeven materiaal en een gegeven afmeting van het staafje, dat dl proportioneel is zowel met l als met F . Men kan nu een staafje in gedachten beschouwen als twee staafjes van halve dikte die tegen elkaar zijn geplaatst. Op elk half staafje zal natuurlijk slechts de halve kracht $F/2$ uitgeoefend worden (gezien de totale kracht de som van beide is). De lengtetoe name van beide halve staafjes is natuurlijk dezelfde als van de originele staaf. Als dusdanig heeft een half zo dikke staaf, onder de halve kracht, een even grote verlenging. Met andere woorden, de verlenging is evenredig met de verhouding van de kracht over de dwarsdoorsnede S . We zijn nu rond:

$$dl = \frac{1}{E} \times \frac{F}{S} \times l$$

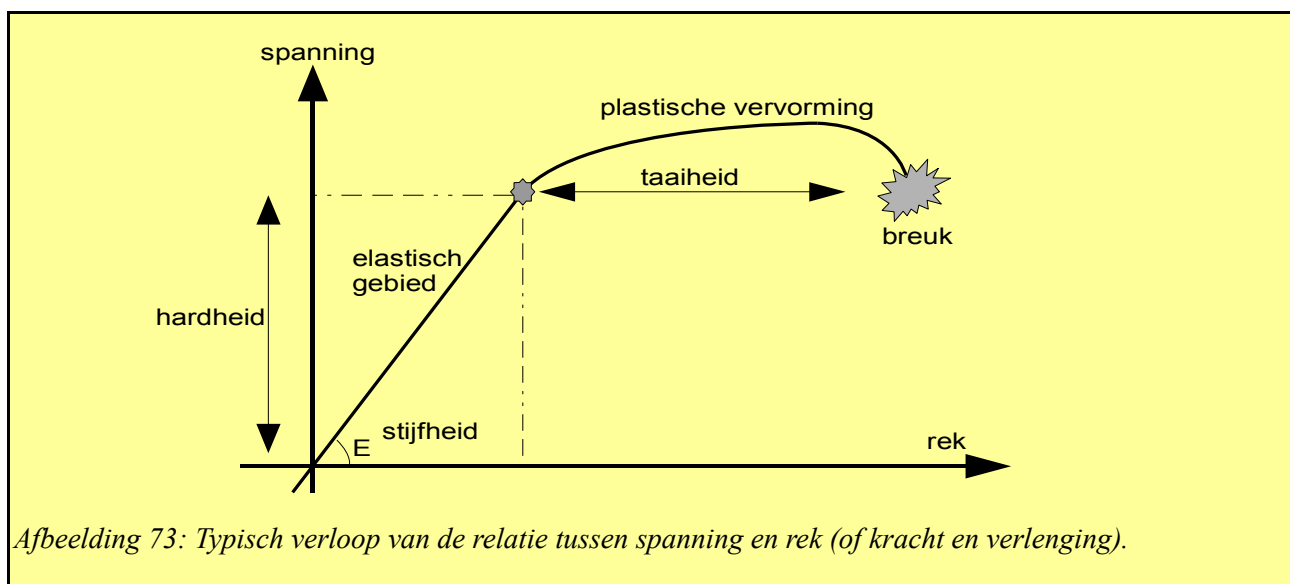
waarbij E een constante is die specifiek is voor het materiaal, maar die niet afhangt van de geometrie van het staafje. Men noemt ook wel: $\epsilon = \frac{dl}{l}$ de *rek* van het materiaal (de relatieve

verlenging) en men noemt $\sigma = \frac{F}{S}$ de *spanning* in het materiaal. De rek is een dimensieloze grootheid die de relatieve verlenging aangeeft en de spanning is uitgedrukt in een eenheid die kracht per oppervlakte weergeeft, met andere woorden, de eenheid van druk. In SI eenheden is dat de Pascal (Newton per vierkante meter). We vinden dus:

$\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ en de constante E heet *de Young modulus*. De vergelijking zelf noemt men soms de wet van Hooke. De Young modulus heeft ook de eenheid van druk.

De Young modulus geeft aan hoe *stijf* een materiaal is, dat wil zeggen, hoeveel kracht men moet uitoefenen om het een bepaalde vervorming te geven. Maar dat is niet de sterkte van het materiaal! De wet van Hooke is maar geldig tot aan een zekere rek, of spanning, en het is niet omdat de modulus van Young groot is, dat die grens van het elastisch gebied ook groot is. Eens men de grens van het elastisch gebied overschrijdt, dan kunnen er twee dingen gebeuren: ofwel breekt het materiaal, ofwel vervormt het verder, maar als men de belastingskracht verwijdert dan komt het materiaal niet meer in zijn originele geometrische toestand, maar blijft een gedeeltelijke vervorming behouden. Men heeft nu het elastische gebied verlaten, en bevindt zich in het gebied van *de plastische vervorming*. Materialen die geen, of heel weinig plastische vervorming ondergaan alvorens te breken, noemt men *brosse of breekbare materialen*. Vele ionische kristallijne materialen zijn zulke materialen. Metalen daarentegen ondergaan meestal plastische vervorming.

Experimenteel stelt men het vervormingsgedrag vast door een zogenaamde rekproef. Een staafje van het materiaal wordt in een machine aan een constante snelheid uitgerokken, en men meet de kracht die de machine hiervoor nodig heeft als functie van de rek, zoals getoond in afbeelding 73. Men stelt dan meestal vast dat die kracht eerst proportioneel toeneemt met de rek (we zijn in het elastische gebied), maar dan doorbuigt en niet veel meer toeneemt als functie van de rek: we zijn in het plastische gebied, en het materiaal vervormt zich continu onder rek. Vanaf een zekere rek, echter, begint het materiaal van het staafje samen te trekken in de dwarse richting (om de volumeverandering in de lengterichting te compenseren). Als dusdanig neemt de dwarse doorsnede van het materiaal af. Dat wil zeggen dat bij constante spanning de totale kracht kleiner en kleiner wordt. Vanaf een zekere rek is het staafje zo vervormd dat de belasting onevenredig verdeeld wordt, en het materiaal scheurt.



Materialen die een hoge elastische limiet hebben, noemt men *harde* materialen. Materialen die veel plastische vervorming toelaten alvorens ze scheuren, zijn *taai* materialen. Men zou voor constructies eigenlijk harde, stijve en taai materialen willen, maar meestal zijn er compromissen nodig. Een te hard materiaal is meestal niet erg taai en vice versa. Taai is eigenlijk het omgekeerde van bros. Brosse materialen kunnen vaak heel hard zijn.

De taaiheid van een materiaal speelt een rol bij de voortplanting van scheuren en barstjes. Men kan bepalen welke de maximale spanning is in een materiaal waarbij een geïdealiseerde scheur van een zekere diepte (voorgesteld als een wig) zich niet voortplant, en die is in verband te brengen met de

taaiheid van het materiaal. De taaiheid kan men meten in een proef die men de “proef van Sharpy” noemt: een slinger met een zeker gewicht werkt als een “hamer” die een gestandaardiseerd staaltje doorbreekt ; men meet de energie (als slingerhoogte) die de slinger nog heeft na het doorbreken van het staaltje. Hoe lager die energie, hoe meer energie het heeft gekost om het staaltje te doorbreken, wat een mate is voor de taaiheid van het materiaal van het staaltje.

Zoals gezegd kan men de aldus gemeten “taaiheid” rechtstreeks in verband brengen met de spanning die barstjes nog net niet laat voortplanten. Het spreekt vanzelf dat een veilige constructie in alle omstandigheden de materialen niet aan die spanning mag blootstellen, want men kan nooit garanderen dat er ergens geen klein barstje aanwezig is.

Men verklaart de plastische vervorming als zijnde het gevolg van de verplaatsing van dislokaties. Inderdaad laten dislokaties het toe om atoomrij per atoomrij op te schuiven, en dus niet het hele kristalrooster in een keer moeten “los” te maken, wat tot een breuk zou leiden. Hoe meer dislokaties aanwezig zijn (tot op een zeker punt) en hoe gemakkelijk ze kunnen bewegen, hoe gemakkelijker men een kristalletje plastisch kan vervormen. Nu is het wel zo dat punt defecten, andere dislokaties, en kristalgrenzen de beweging van dislokaties hinderen. Als dusdanig is een materiaal met kleine kristalletjes en met vele punt defecten redelijk hard, en meestal ook veel minder taai.

Plastische vervormingen veroorzaken op hun beurt meestal ook defecten. Als dusdanig kan een materiaal, dat voortdurend kleine plastische vervormingen ondergaat in een cyclische belasting, defecten accumuleren en dus harder, maar minder taai worden. Het kan zijn dat op een zeker ogenblik de opgelegde plastische vervormingen, die tot dan toe nog steeds goed uitvoerbaar waren, voorbij de taaiheidsgrens (die aan het opschuiven is) valt. Op dat ogenblik scheurt het materiaal dus, na een groot aantal cyclische belastingen. Men noemt zoiets, *de vermoeidheidsfout*. Zij beperkt de levensduur van bepaalde mechanische onderdelen die aan een cyclische belasting zijn blootgesteld. Als men onder een bepaalde grens van vervorming blijft, dan treden vermoeidheidsverschijnselen niet op.

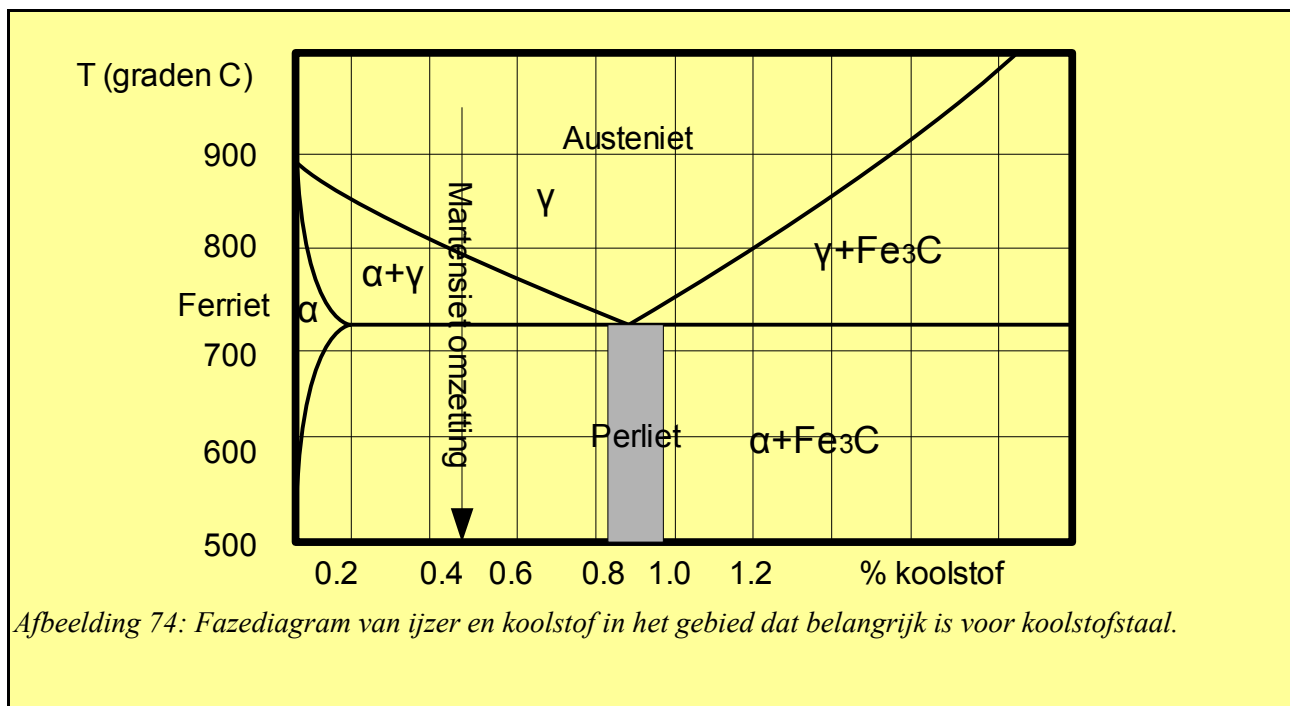
7.1.d Staalsoorten

Staal speelt een heel belangrijke rol in de nucleaire (en in bijna elke andere) industrie. Er bestaan vele staalsoorten: staal is de generieke naam die men geeft aan elk metaal dat voor een groot deel uit ijzer bestaat en niet teveel koolstof bevat. Maar niet enkel de samenstelling bepaalt de staalsoort ; ook de precieze microstructuur bepaalt de staalsoort. Inderdaad, microscopisch gezien bestaan verschillende staalsoorten uit een geheel van kleine kristalletjes van al dan niet gelijke samenstelling. Het zijn deze configuraties die de eigenschappen van het staal grotendeels bepalen.

De eenvoudigste staalsoort is koolstof staal. Het is een mengeling van ijzer (Fe) en koolstof (C), met slechts minieme toevoegingen van andere elementen. Koolstof staal is het “vertrekpunt” van meer ingewikkelde staalsoorten, die we zullen tegenkomen.

Het eerste punt wat telt als men een koolstof – ijzer mengsel beschouwt bij een zekere temperatuur, is de thermodynamische evenwichtstoestand. Zuiver ijzer (0% koolstof) is beneden de 910 graden stabiel in de “alfa-fase”, ook *ferriet* genaamd. Ferriet heeft een lichaams-gecentreerde kubische kristalstructuur. Het is een ferro-magnetisch materiaal (dat wil zeggen dat het aangetrokken wordt door een magneet). Men kan in ferriet slechts heel heel weinig koolstof oplossen ; ferriet kan

beschouwd worden als zuiver ijzer. Boven de 910 graden¹³⁹ is ijzer stabiel in de “gamma-fase”, ook wel *austeniet* genoemd. Het is een zijde-gecentreerd kubisch kristalrooster, en het is een niet-magnetische vorm van ijzer. Austeniet wordt dus niet aangetrokken door een magneet. In tegenstelling tot ferriet, kan men in austeniet wel nogal wat koolstof oplossen. Het is trouwens zo dat tussen de 727 graden en de 910 graden, de austenitische vorm van ijzer kan bestaan op voorwaarde dat er voldoende koolstof in opgelost is. Bijvoorbeeld, bij 800 graden moet er minstens 0.3% koolstof aanwezig zijn in het ijzer om in de austeniet fase te kunnen bestaan. Wat gebeurt er als we, zeg maar, 0.2% koolstof in ons ijzer gemengd hebben, en we bij 800 graden kijken ? Wel, een deel van het ijzer zal als zuiver ferriet (alfa-fase) bestaan, met zo goed als geen koolstof erin, en de rest van het ijzer zal al het koolstof in zich opnemen en in de austeniet fase (of gamma fase) bestaan. We zullen een mengeling hebben van ferriet kristalletjes en austeniet kristalletjes – tenminste, bij thermodynamisch evenwicht!



Wat als we trachten 0.3% koolstof in ijzer op te lossen bij, zeg maar, 500 graden ? Nu hebben we een probleem, want austeniet is niet stabiel bij 500 graden, en ferriet neemt geen koolstof op. Het blijkt echter dat er een chemische verbinding tussen ijzer en koolstof bestaat, Fe_3C , *cementiet* of ijzer carbide genaamd. Het is geen metaal, maar een ceramische stof ! We zullen bij 500 graden dus een thermodynamisch evenwicht hebben dat bestaat uit kristalletjes cementiet en kristalletjes ferriet.

De laagste temperatuur waarbij austeniet nog stabiel is, is 727 graden, en in dat geval moeten we 0.77% koolstof aan het ijzer toevoegen. Die samenstelling noemt men een *eutectoïde samenstelling*, en als men ze relatief traag beneden de 727 graden brengt, dan zullen er zich opeenvolgende lamellaire kristalletjes vormen van ferriet en van cementiet. Staal van die samenstelling, met die lamellaire vorm, noemt men *perliet*. Hoe sneller (maar niet te snel) men koelt, hoe fijner de opeenvolgende lamellen zullen zijn. Als er wat meer dan 0.77% koolstof aanwezig was, dan bekomt men perliet met hier en daar een extra kristalletje cementiet ; als er wat minder koolstof aanwezig

¹³⁹Er is nog een derde fase, de zogenaamde delta-fase, die optreedt bij nog hogere temperaturen, net voor het ijzer gaat smelten: zij is kristallografisch identiek aan de ferriet-fase. Dat speelt geen grote rol in de metallurgie die we hier beschouwen.

was, dan zullen er extra kristalletjes ferriet aanwezig zijn. Perliet is een staalsoort die wat hard (in vergelijking met zuiver ferriet) en toch wel taai en goed vervormbaar is en vaak gebruikt wordt om draden en kabels van te maken.

Als men het bovenstaande perliet een lange tijd aan 700 graden houdt, dan gaat er zich een migratie van het koolstof voordoen, zodat men meer sferische of cilindervormige kristallen van cementiet bekomt in een matrix van ferriet. Dit maakt het materiaal veel zachter: het is in feite de zachtste vorm van staal die men kan bekomen. Het voordeel is dat men een heel gemakkelijk werkbaar materiaal bekomt op die manier.

Indien men het austeniet sneller gaat afkoelen, dan vormt zich ook weer een mengeling van ferriet en cementiet, maar niet meer als een lamellaire structuur, maar eerder als grovere structuren die men *bainiet* noemt. Bainiet heeft vrij goede mechanische eigenschappen: het is redelijk hard en toch vrij plastisch vervormbaar (taai). Bainiet is harder dan perliet.

Daarentegen, als men austeniet heel snel afkoelt, dan kan men wat men noemt *een martensiet transformatie* bekomen. *Martensiet* is een “scheefgetrokken” austeniet kristalstructuur, die eigenlijk niet thermodynamisch stabiel is, en die een beetje lijkt op een uitgerokken ferriet structuur. Men noemt zo een kristalstructuur: een meta-stabiele structuur. Het is als het ware ferriet waarin teveel koolstof zit opgesloten. De koolstof zit in het martensiet opgesloten en heeft de tijd niet gehad, tijdens de afkoeling, om cementiet te vormen. De austeniet-martensiet transformatie geeft aanleiding tot een kleine geometrische vervorming op microscopisch niveau: de martensiet kristalletjes passen niet perfect in de plek waar de austeniet kristalletjes zaten. Op die manier worden er dus op microscopisch vlak heel sterke mechanische spanningen gegenereerd, en dus ook vervormingen, die veel kristalfouten introduceren. Martensiet is een heel harde staalsoort ten gevolge van die interne spanningen en kristalfouten. Daarentegen is martensiet niet heel taai ; men kan bijna zeggen dat het bros is. Als men martensiet verhit (tempert) tot een temperatuur onder de 700 graden, zodat geen austeniet gevormd wordt, dan zal het zich in een ferriet-cementiet mengsel transformeren dat veel zachter is. Het is bijgevolg mogelijk om martensiet wat taaier (maar minder hard) te maken door het een tijdje te temperen.

Soms wenst men een harde oppervlaktelaag op een anders relatief taai mechanisch onderdeel (bijvoorbeeld een tandwiel). Het volstaat dan om het stalen onderdeel aan de oppervlakte voldoende te verhitten om in het austeniet gebied te komen, en dan het oppervlak heel snel af te koelen (met water bijvoorbeeld). Er zal zich dan een laagje martensiet vormen.

Het is meestal niet mogelijk in koolstofstaal om de martensiet transformatie in een heel dik stuk staal te bekomen, gewoon omdat men het staal “aan de binnenkant” niet snel genoeg kan afkoelen.

Koolstof staal is een heel eenvoudige staalsoort, enkel maar bestaande uit ijzer en koolstof. Men heeft vele staalsoorten bedacht met samenstellingen die ook chroom (Cr), nikkel (Ni), mangaan (Mn), Vanadium (V) en Molybdeen (Mo) bevatten. Men voegt nog andere elementen toe bij nog meer exotische staalsoorten. Het fase-diagramma van koolstofstaal blijft voor vele van deze staalsoorten kwalitatief correct, maar de toevoeging van andere elementen vervormt het wel. Zo gaat het toevoegen van nikkel of mangaan de austenitische fase (gamma-ijzer) stabiliseren, zelfs tot aan kamertemperatuur. Daarentegen gaan molybdeen en chroom de neiging hebben om de stabiliteitsgrens (temperatuur) van austeniet naar boven de schuiven.

Verschillende toegevoegde elementen (voornamelijk chroom, maar ook nikkel) in voldoende hoeveelheid kunnen staal “roestvrij” maken. Het mechanisme is het volgende: het chroom gaat heel snel een heel dun oxidelaagje vormen aan de oppervlakte van het staal. In tegenstelling tot roest (ijzer oxide) is dat oxidelaagje zo goed als ondoordringbaar voor lucht of water, en zal dus het

verdere roesten tegengaan. Mocht het laagje door krassen beschadigd worden, dan vormt er zich heel snel een nieuw laagje, nog voor het ijzer significant kan roesten. Opdat dit zou werken, moet er voldoende chroom in het staal zitten.

Austenitisch roestvrij staal is een geheel van staalsoorten met minstens 16% chroom en voldoende mangaan en/of nikkel om de austenitische fase volledig te stabiliseren. Een typische samenstelling is 18% chroom en 10% nikkel (vaak gebruikt voor tafelmessen). Het is de meest gangbare vorm van “roestvrij staal”. Het voordeel van deze staalsoort is dat ze thermodynamisch stabiel is.

Ferritisch roestvrij staal heeft geen gestabiliseerde austenitische fase, door de afwezigheid van nikkel. In tegendeel, men voegt vaak molybdeen toe om er zeker van te zijn dat de transitie naar de ferriet fase doorgaat. Ferritisch roestvrij staal is heel erg corrosiebestendig, maar wel zachter.

Men kan ook een martensiet transformatie toepassen op chroom/molybdeen stalen. Men bekomt dan een heel erg harde roestvrij staalsoort, maar die veel minder corrosiebestendig is. De toevoeging van molybdeen maakt dat de martensiet transformatie kan optreden bij kleinere afkoelingsnelheden, wat het mogelijk maakt om martensiet te bekomen in dikke stukken staal.

Hoge-sterkte staalsoorten. In tegenstelling tot roestvrije stalen, die relatief grote fracties chroom en andere metalen bevatten, hebben hoge-sterkte staalsoorten relatief lage gehalten aan andere elementen. Deze zorgen voor de precipitatie van carbides doorheen een aanvankelijke perliet of bainiet structuur en geven aanleiding tot hele kleine kristalletjes (vele kristalgrenzen). Deze maken het materiaal meestal heel erg hard aangezien er heel veel hindernissen aan de beweging van dislokaties aanwezig zijn. Zoals zo vaak, is dit harde materiaal niet erg taai.

7.2 Stralingschade in metalen

7.2.a Algemeenheden

Ioniserende effecten spelen in metalen zo goed als geen rol, omdat de gemeenschappelijke elektronenwolk die typisch is voor metalen elke vorm van ladingsonbalans ten gevolge van ionisatie onmiddellijk compenseert. Als dusdanig zijn metalen bijvoorbeeld heel goed bestand tegen gamma en bèta straling. Het gevolg is dat de stralingsdosis die we in dosimetrie gebruiken om biologische schade te meten, weinig of geen zin heeft om de stralingschade aan metalen te kwantificeren. Metalen zijn wel gevoelig aan straling, maar dan enkel ten gevolge van de volgende twee vormen van interactie:

- nucleaire interacties, transmutatie. Inderdaad, als we de scheikundige natuur van de samenstellende elementen van het metaal veranderen, kunnen we ons wel goed indenken dat dat enige invloed heeft op de materiaaleigenschappen
- elastische botsingen met kernen, die deze kernen (atomen) verplaatsen en dus kristalfouten invoeren.

Dit zijn typisch de interacties met zware deeltjes, vooral neutronen. Elastische botsingen met neutronen veroorzaken enkel schade als het energetische neutronen zijn. De enige schade die thermische neutronen kunnen aanbrengen is door absorptie en transmutatie.

Om schade kunnen te veroorzaken door elastische botsing moet een zekere drempel energie worden overwonnen. Het is de energie die het kost om een deeltje van zijn kristalplaats te duwen. Maar eens een kern van zijn plaats is, en een zekere energie heeft, kan die kern zelf verderop andere

kernen verplaatsen, tot er niet voldoende energie meer beschikbaar is om verder nog andere kernen van hun plaats te duwen. We krijgen dus een cascade van atomen die van hun plek worden geduwd en die dan op hun beurt andere atomen van hun plek gaan duwen. Een enkele elastische botsing met een invallend deeltje kan dus vele atomen in een kristal van hun plek duwen.

Men neemt vaak als grootheid die de stralingsschade op die wijze in metalen kwantificeert: “het aantal verplaatsingen per atoom” (meestal dpa genoteerd: “displacements per atom”). Dat wil zeggen dat voor een zekere bestraling van een materiaal, men beschouwt hoeveel atomen een verplaatsing hebben ondergaan, en dat deelt door het aantal atomen in het materiaal. *Het is nu wel zo dat niet alle verplaatste atomen ook punt defecten geven.* Inderdaad, tijdens zo een cascade worden vele atomen van hun plek geduwd en komen dus dicht in de buurt interstitieel te zitten, maar evenveel atomen hebben hun plek ook verlaten, en laten een lacune achter. Als dusdanig gaat er heel snel lokaal in het kristal een dynamiek optreden waarbij vele van die interstitieel geplaatste atomen zich tot aan een lacune gaan verplaatsen, om daar dus een goede kristalplaats in te nemen. De cascade ontwikkelt zich meestal in de orde van een paar tienden van picoseconden, en de recombinaties in interstitieel/lacune treden op in een paar picoseconden. Er blijven van het hele stoot- en duwwerk uiteindelijk maar een paar lacunes en een paar interstitiële achter, maar er zijn veel meer atomen verplaatst.

Er bestaat een eenvoudig model om het aantal verplaatsingen te schatten. Natuurlijk gebruikt men tegenwoordig veel meer gedetailleerde computersimulaties, maar het eenvoudige model geeft toch wel een relatief goed beeld van wat er gebeurt. In dat model worden de elastische botsingen beschreven als de botsing van twee biljartballen, net zoals het geval was bij neutronen vertraging. De gemiddelde energie die per botsing van een deeltje n op een deeltje c wordt overgedragen, is

gegeven door de volgende eenvoudige formule: $T = \frac{2 m_n m_c}{(m_c + m_n)^2} E_n$. Hieruit leidt men af dat als twee

gelijkaardige deeltjes botsen, gemiddeld de helft van de energie wordt overgedragen. Indien er een drempel energie E_d is om een atoom vrij te maken, dan kan een initiële hoeveelheid energie in een cascade ongeveer $\frac{T}{2 E_d}$ atomen van hun positie brengen. Voor een gegeven invallende

fluxdichtheid met gegeven werkzame doorsnede, vinden we dus dat er $G = \frac{\sigma_{el} \phi T}{2 E_d}$ verplaatsingen per atoom en per seconde plaatsvinden (de nuclidendichtheid valt weg in teller en noemer). Het volstaat om dat met het aantal blootgestelde seconden te vermenigvuldigen om de uiteindelijke totale dpa waarde te kennen, volgens dit eenvoudige model. Het geeft meestal de goede orde van grootte aan.

In een thermische reactor is de stralingsschade aan de zirkonium buizen van de orde van 2 a 5 dpa, terwijl dat voor het reactorvat 0.005 dpa per jaar is. In een snelle reactor dienen de brandstofbuizen eerder van de orde van 100 dpa te ondergaan – daarentegen zal het vat veel minder blootgesteld worden dan in het geval van een waterreactor. We herinneren eraan dat 100 dpa wil zeggen dat elk atoom zich 100 keer heeft verplaatst!

De verplaatste atomen kunnen aanleiding geven tot puntdefecten, en als er veel in elkaars buurt zijn, kunnen die zich groeperen, in 2 of 3 dimensies. Afhankelijk van de temperatuur van het metaal, kunnen puntdefecten ook migreren (hoe hoger de temperatuur, hoe sneller die migratie plaatsvindt) en elkaar ontmoeten. Zij kunnen dan agregaten vormen, en circulaire dislokaties opleveren (die bijvoorbeeld een 2-dimensioneel plakje van interstitiële afbakenen). Als dusdanig veroorzaken hoge bestralingen een toename van het aantal dislokaties. Indien er een preferentiele richting voor

de dislokaties bestaat in het materiaal, dan geeft dat aanleiding tot een macroscopische geometrische vervorming van het materiaal – daarentegen indien deze dislokaties totaal willekeurig verdeeld zijn, gaat er hierdoor geen vervorming optreden. De preferentiele oriëntatie van dislokaties kan het gevolg zijn van anisotrope opbouw van het materiaal, of ten gevolge van mechanische spanningen. In het eerste geval spreekt men van *groei onder bestraling*, in het tweede geval spreekt men van *vloeien* onder bestraling.

De puntdefecten kunnen zich ook groeperen in 3-dimensionele clusters die caviteiten vormen. Het materiaal *zwelt op* in dat geval. Dit is bijvoorbeeld het geval van sommige staalsoorten bij 400 – 500 graden onder bestraling. Indien er (n,alfa) reacties optreden (energetische neutronen), dan vormen die alfadeeltjes helium, en dat gas kan zich opstapelen in de caviteiten. Zoiets bevordert trouwens de vorming van caviteiten want eens er wat gas in zo een caviteitje zit, zijn de puntdefecten daar vastgepind.

Een ander gevolg van hoge dpa dosissen is dat *de atomaire diffusie in legeringen bevordert wordt*. Inderdaad geven die verplaatsingen van atomen natuurlijk een “duwtje in de rug” van die diffusie. Indien men op “trage kinetiek” rekende om een thermodynamisch onstabiele legering toch een lang leven te geven, dan kan deze versnelde diffusie voor een probleem zorgen. Een typisch voorbeeld is een legering waarvan een metaal oplosbaar is in het ander bij hoge temperatuur, maar dat niet meer (in die verhouding) is bij een lagere. Zolang de diffusiesnelheden laag zijn, kan die legering toch blijven bestaan. Maar als men de diffusie versnelt door bestraling, dan gaat de oververzadigde oplossing “uitkristalliseren”: het over-opgeloste metaal gaat dan zijn eigen kristalletjes vormen, wat een totale verandering van de legering en de metallurgische structuur inhoudt. Soms kan dat een verbetering zijn, maar soms ook niet!

7.2.b Toepassing: levensduur van het drukvat van een drukwater reactor

Een polemieek heerst soms rond wat men de “levensduur-verlenging” van een kerncentrale noemt. Het zou een onverantwoord gebruiken van een “versleten” centrale zijn zodat men een hoger risico voor ongeluk zou hebben, een soort “slordigheid” om nog wat extra winst te boeken ten koste van elke veiligheidsregel die we ons eerst hadden gesteld. Anti-nucleaire drukkingsgroepen roepen vaak op om bij wet te verbieden dat een centrale langer in gebruik blijft dan zijn initieel geplande levensduur. We zullen (weeral) zien dat het de extra veiligheid is in de nucleaire sector misbruikt wordt om een foutief argument tegen kernenergie te bedenken.

Een drukwater reactor heeft een onvervangbare component: het reactor drukvat. Inderdaad is dat zo een grote structuur, die totaal is ingebouwd in de bunker, dat die niet (of heel moeilijk) kan verwijderd worden ; in elk geval zou het economisch waarschijnlijk veel duurder zijn om het drukvat te verwijderen en een nieuw te bouwen in een bestaande bunker, dan gewoon een nieuwe kerncentrale te bouwen. Als dusdanig betekent het einde van het drukvat ook het einde van de centrale. Het drukvat is een stalen “drukkookpan” die ongeveer de vorm van een cylinder heeft, ongeveer 4 meter in diameter en 12 meter hoog, met een wand dikte tussen de 20 en de 30 centimeter. Het is uiteraard een belangrijke component: het catastrofaal falen (zeg maar, het in twee stukken breken) van het drukvat is ongeveer het ergste ongeluk dat men zich kan indenken. Natuurlijk hebben we nog de bunker als bescherming, maar we komen dan toch wel dicht bij een punt waar de controle van de situatie delicaat wordt. Het drukvat is echter wel een heel stevig onderdeel, en normaal gezien heeft het geen enkele moeite om de druk (160 bar) en de temperatuur (320 graden) te ondergaan. Maar over de jaren ondergaat het warmte cycli (starten en stoppen van de centrale)... en vooral, een redelijk zware bestraling.

Bij het ontwerp van de centrale heeft men daar natuurlijk rekening mee gehouden, en men heeft, met vrij grote veiligheidsmarges, berekend dat na 30-40 jaar bestraling van het vat de mechanische eigenschappen door stralingschade in elk geval niet zo zullen veranderd hebben dat er enig gevaar voor een breuk zou bestaan. Vandaar de initiële levensduur van 30, 35 of 40 jaar voor een kerncentrale. Het was een initiële schatting welke stralingschade in elk geval nog aanvaardbaar zou zijn, met onzekerheden en dus veiligheidsmarges.

De staalsoort gebruikt voor het drukvat van de meeste drukwater reactoren zijn van de stijl van de hoge-sterkte stalen, met 0.2% koolstof, 1.5% mangaan, 0.6% nikkel, 0.5% molybdeen, 0.25% chroom en 0.2% silicium of een vergelijkbare samenstelling. Het is een ferritische staalsoort die vanuit de austeniet fase relatief snel is afgekoeld om bainiet te vormen, met precipitaties van carbides van de toegevoegde elementen. Het is een vrij harde staalsoort, met een elastische limiet van ongeveer 480 MPa (wat veel hoger is dan de ongeveer 250 MPa voor gewone staalsoorten). Men heeft deze staalsoort gekozen als een compromis van vele factoren. Ten eerste heeft men voor het drukvat een heel hard (sterk) materiaal nodig, dat grote mechanische spanningen en drukken kan opvangen. Gezien de afmetingen van het drukvat (en dus de grote hoeveelheid materiaal) kan men geen te dure materialen gebruiken. Daarentegen staat het drukvat normaal gezien niet bloot aan heel hoge temperaturen, en ook niet aan hele hoge bestralingen. Uit al die overwegingen, en uit de beschikbare materialenkennis destijds, heeft men voor deze staalsoort (of een verwante) geopteerd.

Zoals elke ferritische staalsoort, ondergaat zij een taai/bros transitie beneden een zekere temperatuur. Dat wil zeggen dat de taaiheid (zoals bijvoorbeeld gemeten in een Charpy proef) beneden een zekere temperatuur plotseling sterk afneemt. Het probleem van zulke transitie is dat scheurtjes en barsten zich beneden deze temperatuur veel gemakkelijker kunnen voortplanten dan boven deze temperatuur.

Men kan een grootheid definiëren, KI genaamd, die een functie is van de toegepaste stress (spanning) σ in het materiaal en van de diepte a van een scheur: $KI = \sigma \sqrt{\pi a}$ en als die waarde van KI kleiner is dan een limietwaarde voor het materiaal, gaat de scheur zich niet voortplanten. Men heeft een empirische formule die voor deze staalsoort een schatting geeft van de limietwaarde als een functie van de temperatuur:

$KI_{limiet} = 29.43 + 1.355 e^{0.0261(T - T_{trans} + 88.9)}$ waarin T in graden Celsius is gegeven, en de taai-bros transitietemperatuur ook. De eenheid van KI is dan $\text{Mpa m}^{1/2}$.

Het blijkt nu dat onder stralingsbelasting, deze taai/bros transitietemperatuur gaat stijgen, wat maakt dat men voor een gegeven temperatuur, slechts een kleinere KI waarde kan tolereren.

Men neemt als hypothetische scheur, een scheur die een kwart van de dikte van de vatwand diep is (dat is een behoorlijke scheur!). De mogelijke spanningen in de wand hangen natuurlijk af van de operatiecondities (druk, eventuele temperatuursverschillen die mechanische spanningen opleveren), en voor elke operationele mode (opstarten van de reactor, ongeluk waarbij men in een hete reactor plots koud water dient te pompen,) kan men een verloop in de temperatuur/spanning grafiek tekenen. Met een gegeven spanning komt er met onze hypothetische scheur, ook een KI waarde overeen, en men eist nu als veiligheidsconditie dat die KI -waarde een zekere factor beneden de KI -limiet waarde zit in alle mogelijke omstandigheden. Dat wil zeggen dat men eist dat in alle operationele modes (van druk en temperatuur), normale en accidentele, een scheur van $1/4$ van de dikte van de wand zich niet kan voortplanten. Het toenemen van de transitie temperatuur wil zeggen dat voor een gegeven temperatuur, de KI -limiet waarde gaat afnemen, en men gaat na in welke mate die limiet nog aanvaardbaar is. Vanaf een zekere verhoging van de transitietemperatuur zal men niet meer aan de eisen voldoen, en moet men besluiten dat het vat aan zijn einde is gekomen (zie

verder), omdat men niet meer in alle omstandigheden kan garanderen dat een scheur van $\frac{1}{4}$ van de dikte van de wand zich niet zal voortplanten.

Het is uit schattingen van de evolutie van de transitietemperatuur dat men destijds een garantie kon geven voor de levensduur van het vat. Alleen, het blijkt dat de verhoging van de transitietemperatuur taai-bros als functie van de stralingsdosis sterk afhankelijk is van de temperatuur waarbij die stralingsschade is opgetreden. Hoe hoger die temperatuur, hoe minder groot de toename is van de transitietemperatuur voor een gegeven stralingsdosis (gemeten in dpa). Inderdaad, men vermoedt dat de verklaring hiervoor is dat bij hogere temperaturen, de veroorzaakte defecten sneller kunnen verdwijnen dan bij lagere temperaturen, en de tijd niet hebben om ring dislokaties of caviteiten te vormen. Er is bijgevolg een verschil tussen een garantie en de werkelijke toestand van het materiaal.

Maar men heeft ook mandjes met stalen van het drukvat materiaal dichter bij de reactorkern geplaatst, zodat die een hogere stralingsdosis ontvangen dan het eigenlijke vat. Als dusdanig kan men “vooruitlopen” op de stralingsschade van het vat. Het blijkt meestal uit de analyse van deze stalen, dat het vat zich in een betere toestand bevindt dan men 30 jaar eerder (met veiligheidsmarges) had gegarandeerd. Dat wil dan zeggen dat het vat langer kan meegaan dan initieel geschat.

Maar men heeft nog iets anders vastgesteld. Het blijkt dat als men deze staalsoort enige tijd tot 430-500 graden verhit, dat men de transitietemperatuur kan terugbrengen tot een waarde die vergelijkbaar is met een niet-bestraald materiaal. Nadien, onder stralingsbelasting, gedraagt dat materiaal zich dan ook alsof het nooit eerder bestraald was. Het lijkt er dus op dat deze thermische behandeling de stralingsschade “uitwist”. Als dat onderzoek zich bevestigt, dan heeft men in principe qua stralingsschade, een mogelijke “oneindige” levensduur voor een reactorvat, want deze warmte-behandeling kan ter plaatse worden toegepast.

Voorlopig bestaat de “levensduurverlenging” van een kerncentrale (naast natuurlijk het controleren/vervangen van alle kleinere vitale onderdelen, zoals pompen enzovoort) uit de vaststelling dat de beperkte stijging van de brost-taai transitietemperatuur van het reactorvat het nog toelaat om enige tijd (5, 10 of meer jaar) voort te werken in dezelfde veilige omstandigheden als aangewend bij het initieel plannen van de centrale. Hiervoor baseert men zich op de staaltjes die men sterker heeft bestraald sinds de reactor is in gebruik genomen. Men heeft ook uit onderzoek een beloftevolle techniek om de stralingsschade “terug op nul” te zetten. Alle andere onderdelen van een reactor kunnen vervangen worden, en stellen dus geen principiële limiet aan de uiteindelijke levensduur van de centrale.

Daarentegen, er is een risico verbonden aan de keuze van ferritisch staal, dat niet van nucleaire oorsprong is. De binnenwand van het drukvat is bekleed met een laag austenitisch roestvrij staal dat dient om het constructiestaal van het drukvat niet bloot te stellen aan de corrosiebelasting van het primaire water. In normale omstandigheden staat het constructiestaal zelf van het drukvat dus niet bloot aan enige vorm van corrosie (waarvoor het trouwens ook niet is gekozen). Maar het kan soms zijn dat een klein lekje aan een of andere leiding, klep of pomp een heel klein beetje primair water aan de buitenkant van de installatie laat ontsnappen, en dat primair water bevat boorzuur. Bij de normale temperaturen (rond de 300 graden) gaat dat water onmiddellijk verdampen bij atmosferische druk, maar het boorzuur blijft dus achter. Het is op die manier mogelijk dat een geconcentreerd plasje boorzuur achterblijft, dat het constructiestaal aan de buitenkant van het drukvat gaat aanvallen. In Frankrijk had men dat voorzien en van zodra men een kleine lek vaststelde, paste men een systematische inspectie toe op alle ferritische staal onderdelen in de buurt, maar in de Besse reactor (Ohio, VS) heeft men vrij laat vastgesteld dat er een serieuze holte was

gevreten in het stalen deksel van het drukvat. Het was enkel het deel roestvrij staal (aan de binnenkant) dat nog intact was. Had dat er niet geweest, dan zou dat aanleiding hebben gegeven tot een LOCA (verlies van koelmiddel ongeluk). Het incident heeft aanleiding gegeven om dezelfde procedures als in Frankrijk aan te wenden.

De interne structuren van het drukvat, die soms aan hogere temperaturen, en vooral, aan hogere stralingsdosissen blootgesteld zijn, worden traditioneel uit austenitische roestvrije staalsoorten gemaakt. Naargelang de temperatuur tijdens de bestraling, kan zo een staal harder of zachter worden. Men heeft ook vastgesteld dat deze stalen soms een verzwakking vertonen langsheen de kristalgrenzen, waar corrosie kan optreden.

Een ander structureel element is een bron van mogelijke problemen: de stoomgeneratoren (dat is: de warmtewisselaars tussen het primaire water en de secundaire kringloop). De stoomgeneratoren zijn zo goed als niet onderhevig aan enige stralingsbelasting, en als dusdanig heeft de structurele integriteit hiervan niets met “typisch nucleaire” omstandigheden te maken: in de chemische industrie heeft men vaak zulke structuren. De stoomgenerator is essentieel een vat waarin secundair water aanwezig is, en waardoor een buizenstel loopt dat heet primair water voert. De integriteit van deze buizen is zeer belangrijk, niet alleen omdat het een onderdeel vormt van het primaire circuit (een lek kan aanleiding geven tot de initiële gebeurtenis op het pad naar een LOCA), maar het is ook een element dat voor de afvoer van warmte zorgt en een lek kan bovendien het secundaire circuit contamineren mocht het primaire water gecontamineerd zijn. Het voornaamste probleem is dat deze buizen vervormd zijn (in U-vorm), en dat ze andere mechanische sollicitaties ondergaan (namelijk daar waar ze zijn vastgehecht), terwijl ze aan een behoorlijke temperatuur werken, onder druk staan, en in een licht corrosief milieu (boorrijk water aan de binnenkant, kokend, bellenvormend water aan de buitenkant) aanwezig zijn. Men heeft vastgesteld dat de combinatie van beide nefast is: een staalsoort die enerzijds de mechanische spanningen kan weerstaan, en anderzijds de corrosie kan weerstaan, als individuele sollicitaties, kan niet noodzakelijk beide tegelijk ondergaan. Men spreekt van “corrosie onder belasting”, dat wil zeggen: corrosie die enkel maar optreedt wanneer er ook mechanische spanningen aanwezig zijn. Inderdaad, men heeft vastgesteld dat er in dat geval in sommige staalsoorten chemische processen gaan optreden aan de kristalgrenzen, wat aanleiding kan geven tot het vormen van barsten langsheen deze kristalgrenzen. In het begin heeft men hierdoor problemen ondervonden. Onderzoek heeft aangetoond dat sommige nikkel-rijke stalen hiervan veel minder last hebben. Een typische samenstelling is dan: 59% Ni, 30% Cr en 11% Fe, een materiaal dat men nu courant gebruikt voor de buizen in de stoomgenerator. Merk op dat dit niet meer essentieel ijzer is, maar essentieel nikkel.

7.2.c Toepassing: zirkonium legeringen

Zirkonium legeringen worden gebruikt als de omhulsels van de brandstofpastilles in een drukwater reactor. Dat omhulsel is ook de “eerste barrière” tegen het vrijkomen van radioactieve stoffen. De reden voor deze keuze is de combinatie van volgende eigenschappen van zirkonium: *hele lage interactie werkzame doorsnede met thermische neutronen*, en bovendien *stabiele vangstproducten* – dat wil zeggen dat verschillende stabiele zirkonium isotopen elkaar opvolgen. Zoiets heeft het grote voordeel van geen activatie op te leveren. Maar dat heeft ook het voordeel van geen chemische transmutatie te ondergaan, die de materiaalstructuur zou kunnen veranderen. De tweede reden is de *hoge corrosiebestendigheid in heet water*.

Zuiver zirkonium is stabiel in de alfa fase tot 864 graden, waar de kristalstructuur een lichtjes vervormde hexagonale dichtste bolstapelingsstructuur is; hierboven is de bèta-fase stabiel in een gecentreerde kubische structuur tot aan het smeltpunt bij 1855 graden.

Men heeft ontdekt dat men de corrosiebestendigheid van zuiver zirkonium kan verbeteren door een legering te maken met tin (ongeveer 1.5% tin). Die legering noemde men Zircaloy, en men heeft toevallig ontdekt dat het toevoegen van een heel klein beetje ijzer, chroom en nikkel de zaak nog verbeterde: Zircaloy2 was uitgevonden. Men heeft tenslotte een betere mengeling van ijzer en chroom gevonden, zodat men het nikkel kon weglaten, wat enkele voordelen opleverde: Zircaloy4.

Via een andere weg heeft men ontdekt dat men ook een heel goede legering bekomt als men niobium aan zuiver zirkonium toevoegt. Het wordt onder de naam M5 gecommercialiseerd.

Een speciale eigenschap van de vervormde hexagonale kristalstructuur van de alfa fase is dat zij een asymmetrie heeft tussen het hexagonale vlak enerzijds, en de prismatische as (loodrecht hierop) anderzijds. Zo zijn de stijfheid en de uitzetting bij opwarming verschillend in die twee richtingen. Ten gevolge van de asymmetrie van de zirkonium kristallen gaan zirkonium buizen onder bestraling verlengen. Ook gaat zijn hardheid sterk toenemen, en zijn taaiheid sterk afnemen onder bestraling. Zirkonium vertoont ook "kruip" onder de combinatie van hoge temperaturen en bestraling: dat wil zeggen dat onder een mechanische spanning die normaal in het elastische gebied blijft, het metaal toch heel traagjes plastisch gaat vervormen.

Zirkonium gedraagt zich, wat oxidatie betreft, een beetje zoals chroom: een laagje zirkonium oxide wordt gevormd in contact met water, en verdere oxidatie wordt sterk afgeremd door de aanwezigheid van dat laagje. Het is de diffusie van zuurstof doorheen het oxide laagje die de verdere oxidatiesnelheid beïnvloedt. Onder bestraling wordt dat oxidelaagje wat beschadigd, en gaat de oxidatie dus wat sneller.

Een ander aspect van de oxidatie is dat de waterstof die vrijkomt bij de oxidatie van het zirkonium kan opgelost worden in het metaal bij hoge temperatuur (350 graden). Als het metaal afkoelt tot kamertemperatuur, dan kan er zoveel waterstof niet in oplossing blijven, en gaat kleine precipitaties van zirkoniumhydride vormen, wat een broos materiaal is. Als dusdanig verhard, en verbroost dit het zirkonium bij kamertemperatuur, iets waar men rekening moet mee houden als men afgewerkte brandstofelementen manipuleert. De verbrozing door waterstof zal ook een grens stellen aan de levensduur van een brandstofstaaf in de reactor.

De veilige werking van een brandstofelement eist dat men niet meer dan 0.1 mm zirkonium oxide heeft op de brandstof elementen, iets waarmee men rekening moet houden bij de bepaling van de levensduur van een brandstofelement. In feite is het niet zodanig de eigenlijke oxidelaag die een rol speelt (ook al verhoogt die de thermische weerstand een beetje), maar is de dikte van de oxidelaag een mate voor de geabsorbeerde waterstof die is vrijgekomen bij het vormen van het oxide. Bij hoge verbrandingsgraden van brandstof-elementen gaat dit de begrenzende factor zijn (vandaar de interesse om op beter corrosie-bestendige materialen over te stappen). Inderdaad bereikt de huidige zircaloy4 legering in typische omstandigheden de grens van een 0.1 mm laag oxide tussen de 50 en 60 GW dag per ton brandstof. Daarentegen, de nieuwe legering M5 (Areva) of de gelijkaardige legering Zirlo van Westinghouse (beide bevatten niobium) heeft bij 60 GW dag per ton slechts een laagje oxide van een 20-tal micrometer, en laat dus in principe toe om de verbrandingsgraad op te drijven wat de oxidelaag betreft. De andere beperkende factor (zie verder) is de pastille-wand interactie tussen de brandstofpastilles en de wand van de brandstofstaaf.

Men heeft het gedrag van de brandstofstaven bestudeerd onder typische accidentele situaties. Zo heeft men bij een LOCA (verlies van koelmiddel, in casu een lek of een verkeerde manipulatie in

het geval van een drukwater reactor) het mogelijke probleem dat de staaf zonder koelwater heeft gezeten, en dat bij re-injectie van vers koelwater, dat koelwater in contact kan komen met heel heet zirkonium. Er is immers een chemische reactie mogelijk waarbij het zirkonium met water reageert, zirkonium oxide vormt, en waterstof laat vrijkomen (met gevaar op explosie van die waterstof). Experimenten hebben aangetoond dat deze reactie gegarandeerd niet voorkomt zolang het zirkonium de 1027 graden niet heeft bereikt: dat is dus een “randvoorwaarde” voor de herinjectie: men dient dit bij voorkeur te doen voor de bovenstaande temperatuur is bereikt. Een andere accidentele situatie die men heeft bestudeerd is een RIA (reactiviteitsongeluk): als bij ongeluk brutaal een controlestaaf wordt weggenomen, gaat het vermogen in enkele brandstofstaven sterk toenemen. De pastilles brandstof (zie verder) kunnen dan een mechanische druk uitoefenen op de brandstofstaaf, die, als ze te broos is geworden, barsten kan vertonen, met als gevolg een contaminatie van het primaire water. Nu is het wel zo dat in een moderne drukwater reactor, zo een RIA een veel te trage vermogensstijging gaat veroorzaken om een probleem te vormen, maar in kleine experimentele reactoren dient men met deze mogelijkheid rekening te houden.

7.2.d Toepassing: in-core staalsoorten

Voor de huidige drukwater reactoren gebruikt men “in core” geen constructiestaal zoals voor het drukvat, maar eerder austenitische roestvrije stalen. Zij zijn meestal blootgesteld aan dosissen van 2 en meer dpa. Naargelang de temperatuur waarbij deze bestraling optreedt geeft dit aanleiding tot een verharding of een verzachting van het materiaal: beneden ongeveer 450 graden gaat bestraling het materiaal verharden, hierboven, gaat het materiaal zachter worden. *In een drukwater reactor kent roestvrij staal meestal geen enkel serieus probleem voor de meeste structuren.*

Dit is anders voor reactoren met snel spectrum, en vooral voor de toekomstige generatie van reactoren, waar de werkingstemperaturen veel hoger zullen zijn. In een snel neutronenspectrum is de werkzame doorsnede van vangst voor alle materialen vergelijkbaar (van de orde van 0.1 barn) ; het heeft als dusdanig niet veel zin om hiervoor een exotisch materiaal te kiezen. In natrium-gekoelde reactoren dient men bovendien geen rekening te houden met corrosie-bestendigheid tegen water. Het heeft als dusdanig geen zin om zirkonium gaan te gebruiken in een snelle reactor. De brandstofstaven worden uit roestvrij staal gemaakt. Daarentegen *wil men naar heel hoge verbrandingsgraden gaan* (tot 15%, of 150 GW-dag per ton brandstof), gezien een kweekreactor kan ontworpen worden om “zelf-genererende” brandstof elementen te hebben (U-238 wordt aan hetzelfde tempo omgezet in Pu-239 als het tempo waaraan Pu-239 verbruikt wordt). Dat maakt dat de stralingsbelasting van de brandstofelementen heel hoog gaat zijn: men zou tot 200 dpa willen bereiken.

Aanvankelijk heeft men (in de jaren 1970) voor austenitische roestvrije stalen geopteerd. Maar men heeft vastgesteld dat de thermische eigenschappen (thermische uitzetting en thermische geleiding) beter waren voor ferritisch-martensitische roestvrije stalen. Deze hebben een hele ontwikkeling ondergaan, die het mogelijk maken om bij steeds hogere temperaturen nog aanvaardbare mechanische eigenschappen te bekomen. Bovendien blijken ferritisch-martensitische staalsoorten zich beter te gedragen onder bestraling dan austenitische staalsoorten ; *de kruip eigenschappen* (het langzaam plastisch vervormen bij hoge temperatuur onder een belasting die normaal nog in het elastische gebied zit) bijvoorbeeld zijn veruit superieur. Ook *de zwel onder bestraling* is veel kleiner voor ferritisch-martensitische stalen. Inderdaad heeft men vastgesteld dat men met austenitische staalsoorten niet veel verder kan gaan dan ongeveer 100 dpa, terwijl ferritisch-martensitische staalsoorten tot 160 dpa geen enkele invloed lijken te tonen ten gevolge van de

bestraling (men heeft nog geen experimenten gedaan bij hogere bestralingen). Er gebeurt op dit ogenblik veel onderzoek naar varianten van deze staalsoorten, waarin men oxidepartikeltjes heeft verspreid. Deze verharden het materiaal, en maken het mogelijk om bij hoge temperaturen (600 graden of meer) nog een mechanische belasting te kunnen verdragen.

Om de passieve veiligheid van natrium-gekoelde reactoren te verbeteren, dient men de hoeveelheid natrium aanwezig tussen de brandstofpinnen tot een minimum te herleiden (de void factor van natrium is positief, en vermindert dus de passieve veiligheid – vandaar dat men er zo weinig mogelijk van wil hebben daar waar er veel neutronen zijn). Dat wil zeggen dat de brandstofpinnen dicht bij elkaar geplaatst zullen worden, met kleine mechanische toleranties. Als dusdanig zijn zwel-eigenschappen en kruip eigenschappen onder bestraling heel belangrijk. Vandaar het grote belang van een staal soort die weinig vervormt. Alles wijst dus in de richting van het gebruik van ferritisch-martensitische staalsoorten.

Voor snelle gas-gekoelde reactoren bij hoge temperatuur zijn de materiaaleisen veel draconischer, gezien de hele hoge temperaturen (800 graden en hoger) die men wenst te gebruiken. Men kent op dit ogenblik geen staalsoorten die hiertegen bestand zijn en die tevens een goed mechanisch gedrag hebben (geen kruip etc...). Men kijkt uit naar andere materialen, en er is een heel beloftevol materiaal: siliciumcarbide (SiC). Het is een ceramische stof die mechanisch heel sterk is, goed stralingsbestendig enz... Daarentegen is men nog slechts in het begin van de onderzoeksfase van het gedrag van dit materiaal. We gaan er niet verder op in, gezien het in elk geval niet denkbaar is dat dit materiaal gangbaar wordt op relatief korte termijn.

7.3 Brandstof

We hebben in het vorige hoofdstuk reeds relatief uitvoerig de verschillende mogelijke brandstof cycli besproken, maar dat was op het vlak van de “actieve” elementen (uranium, plutonium, ...). Men dient aan die brandstof elementen een specifieke materiële en chemische vorm te geven, en hun mechanische, fysische en chemische eigenschappen spelen natuurlijk ook een belangrijke rol. Het is ook in de brandstof dat de fissieproducten en andere hoog-radioactieve elementen zich zullen opstapelen, en het is eveneens in de brandstof dat zich de warmte zal ontwikkelen die de centrale laat werken. Met andere woorden, de brandstof staat centraal in het grootste deel van de veiligheidsproblematiek in de kernenergie. Vandaar het grote belang van zijn materiële vorm.

7.3.a Brandstofelementen in drukwater reactoren.

Hoewel men in eerste-generatie reactoren gewoon blote staven metallisch uranium als brandstofelement gebruikte, behoren deze gevaarlijke praktijken gelukkig maar tot het verleden. In alle moderne reactoren worden er brandstofpastilles gebruikt, die opgesloten worden in een hermetisch gesloten (dichtgelaste) buis. In drukwater reactoren zijn dat meestal Zircaloy buizen waarin pastilles uranium- en/of plutonium oxide zijn opgesloten. De buis dient als eerste barrière tegen het vrijkomen van radioactieve stoffen, en het is trouwens enkel in het geval van een falen van zo een buis dat het primaire water van de reactor radioactief besmet wordt. Het is diezelfde buis die na verwijdering uit de reactor in een opwerkingsfabriek zal stukgeknippt worden om de afgewerkte brandstof te recupereren. Normaal gezien komt in een reactor dus nooit “blote brandstof” voor. Men noemt zo een buis ook wel een “brandstof staaf”.

Het ontwerp van een brandstof staaf dient rekening te houden met verschillende aspecten. Enerzijds dient men in zoveel mogelijk omstandigheden *de integriteit van de buis* te vrijwaren, en te vermijden dat ze aan te grote mechanische spanningen of aan te hoge temperaturen wordt blootgesteld. Anderzijds dient de brandstofstaaf voor *een voldoende thermisch contact* te zorgen tussen de eigenlijke brandstof en de moderator/het koelmiddel, het SL-1 ongeluk indachtig. Inderdaad, bij een ongewenste snelle vermogenstoename dient de hitte, ontwikkeld in de brandstof, *snel genoeg* de moderator te verhitten opdat de passieve veiligheid snel genoeg kan ingrijpen. Men vult de brandstof elementen daarom met helium gas onder relatief hoge druk (30 bar of zo), want helium onder druk is een heel goede warmte geleider. De spleet tussen de brandstof pastilles en de wand van de buis dient klein genoeg te zijn om voldoende de warmte te transporteren. Daarentegen dient men te vermijden dat de pastilles mechanisch te hard op de wand gaan drukken zodat die zou beschadigd worden. Het is ook de thermische geleiding die maakt dat we geen te dikke oxide laag kunnen toelaten op de wand van de buis.

Het vullen van de buizen met helium onder druk heeft een extra voordeel: men kan systematisch nagaan of er geen helium is vrijgekomen in het primaire koelwater, wat erop zou wijzen dat er een brandstofstaaf is gaan lekken.

In drukwater reactoren heeft men geopteerd voor oxiden voor de eigenlijke brandstof. Men gebruikt uranium en plutonium oxide. De voornaamste reden is dat deze oxiden *hele hoge smeltpunten* hebben, wat dus toelaat om een grote veiligheidsmarge te hebben tussen de gewone werkt temperatuur enerzijds, en een accidentele verhoging van de temperatuur, alvorens de brandstof gaat smelten. De tweede reden om voor een oxide te kiezen is dat oxiden *stabiel zijn in heet water*. Normaal gezien is er geen contact tussen beide, maar mocht een brandstof staaf gaan lekken, en er zou primair water in de buis binnendringen, dan wil men vermijden dat er een hevige chemische reactie zou gaan optreden, of dat de brandstof zou gaan oplossen in het water zodat het water zwaar zou gecontamineerd worden.

Daarentegen, oxiden hebben een serieus nadeel: hun warmtegeleiding is vrij slecht: slechts 0.035 Watt per centimeter en per Kelvin voor uranium oxide en nog lager voor plutonium oxide.

Men fabriceert de brandstof pastilles door poedervormig uranium oxide (en/of plutonium oxide) samen met wat additieven in pastilles te persen en dan te sinteren aan ongeveer 1700 graden. Het poeder is meestal geproduceerd op zulke wijze dat het uit korreltjes van enkele micrometer bestaat, die op hun beurt uit een aggregaat van kristalletjes van enkele tientallen nanometer bestaan. Sommige additieven verdampen onder de sintering, en geven de pastilles als dusdanig een gecontroleerde porositeit. Men vormt pastilles met een standaard diameter van 8.19 mm die van de juiste geometrie zijn om in de zirkaloy buizen te passen met de juiste speling. Men stopt een zeker aantal van die pastilles in een buis, en houdt het geheel op hun plaats met een veer. Op die wijze is er een extra volume in de buis waar gas zich kan opstapelen (men noemt die ruimte: het *plenum*).

Gezien de relatief slechte warmtegeleiding in het oxide, en gezien de warmte (door de fissiereacties) geproduceerd wordt over de hele pastille, is de temperatuur in het centrum van een pastille veel hoger dan aan de rand. Indien men een thermisch vermogen P_L per centimeter buis ontwikkelt, dan kan men een eenvoudige berekening maken die aangeeft dat de temperatuur op een afstand r van de centrale as-lijn van de cilindervormige pastille gelijk is aan: $T(r) = T_s + \frac{1}{4\pi} \frac{P_L}{\lambda_T} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$; hierin is

T_s de temperatuur aan de buitenkant van de pastille, R de straal van de pastille (dus de halve diameter) en λ de warmtegeleidingscoëfficiënt. Deze formule is slechts een benadering, want het vermogen is niet helemaal constant over het volume van een pastille (hogere flux aan de buitenkant dan aan de binnenkant) en de warmtegeleidingscoëfficiënt hangt ook wel wat af van de

temperatuur zelf, maar ze geeft toch wel een idee. De hoogste temperatuur treedt op op de aslijn ($r = 0$). Een typisch verloop is het volgende: bij een vermogen van 270 Watt per centimeter staaf is de buitenkant van de zirkonium buis aan 345 graden, de binnenkant aan 384 graden, de buitenkant van de pastille aan 546 graden, en vindt men op de centrale as 1254 graden. Als het vermogen stijgt tot aan 420 Watt per centimeter brandstofstaaf, dan vindt men een centrale temperatuur van maar liefst 1850 graden. Merk op dat er niet alleen een hoge temperatuur in het centrum heerst (maar nog steeds veel lager dan het smeltpunt), maar dat er vooral ook een groot temperatuursverschil tussen binnen- en buitenkant heerst. De thermische expansie in het centrum van de pastille zal dus groter zijn dan aan de buitenkant, wat tot hoge mechanische spanningen zal leiden en tot barsten in de pastille. Het is zo goed als onmogelijk om te vermijden dat de pastilles gaan barsten.

In de brandstof heeft men uiteraard een vrij sterke transmutatie: het is het werkingsprincipe zelf van de brandstof! Als dusdanig gaat een deel van het uranium splijten, en fissieproducten vormen. Deze fissieproducten zijn van allerlei aard, en worden geproduceerd binnenin de kristalletjes van de brandstofpastilles. Een deel van de fissieproducten zijn gassen: krypton en xenon isotopen. Aanvankelijk blijven zij opgesloten in de pastilles, maar bij hogere verbrandingsgraden gaan zij natuurlijk vrijkomen. Zij zorgen ook mede voor een verbrijzelen en verpulveren van de pastilles naast de spanningen opgewekt door de andere fissieproducten, die meer plaats innemen dan de originele uranium atomen in de oxide kristalletjes. Het gevolg hiervan is dat de pastilles gaan zwellen, en dat stelt een probleem, want we willen natuurlijk vermijden dat die pastilles mechanische spanningen gaan uitoefenen op de binnenkant van de wand van de brandstofstaaf, en we weten dat de spleet tussen de aanvankelijke pastilles en de wand vrij klein is. De vrije ruimte om te zwellen is dus beperkt. Het is dit fenomeen van “pastille-wand interactie” dat een einde kan stellen aan de maximale verbrandingsgraad die men kan toestaan in een brandstofstaaf. Deze verbrandingsgraad is over de jaren verhoogd dankzij onderzoek naar betere manieren om de brandstofpastilles te produceren. Inderdaad kan men enkel een verbrandingsgraad toelaten waarbij men nog kan garanderen dat de brandstofstaven, zelfs bij abnormale werking, hun integriteit zullen behouden. Anderzijds is het laten toenemen van de verbrandingsgraad tot op zekere hoogte equivalent met een zekere brandstof besparing: hoe hoger de verbrandingsgraad, hoe meer U-235 men zal opgebruikt hebben, maar vooral, hoe groter de fractie gaat zijn van de vermogenproductie door gekweekt plutonium. Vanaf een zekere verbrandingsgraad gaat men geen winst meer boeken, want men dient een hogere initiële verrijking aan U-235 toe te passen. Voor 4-5% verrijkt uranium ligt dat nuttige maximum rond de 60-70 GW dag per ton verrijkt uranium.

Plutonium oxide heeft, zoals reeds gezegd, een nog slechtere warmtegeleidingscoëfficiënt ; bovendien wordt er meestal meer vermogen in een plutonium pastille ontwikkeld, en zijn de mechanische eigenschappen van de pastilles ook wat slechter (zwellen meer op en zo verder). Als dusdanig is de toelaatbare verbrandingsgraad van MOX (uranium en plutonium oxide mengsel) brandstofstaven lager dan die van gewoon verrijkt uranium.

7.3.b Brandstofelementen in natrium-gekoelde snelle reactoren

Reactoren met snel spectrum kunnen verschillende vormen aannemen, maar we beperken ons tijdens deze discussie tot het meest gekende model: de natrium-gekoelde reactor. Traditioneel gebruikte men in het verleden in dit soort reactoren oxide brandstoffen (uranium/plutonium) in austenitische roestvrij stalen buizen. Dat heeft in het verleden goed gewerkt.

Men wil in snelle reactoren echter heel hoge verbrandingsgraden bereiken (tot 15% van de inhoud van de staaf, wat in de buurt van 150 GW-dag per ton komt) gezien men evenveel plutonium kan

kweken (uit U-238) dan men er verbruikt. Als dusdanig blijft een brandstofstaaf heel lang “stabiel” wat zijn splijtbare inhoud betreft, en raakt dus niet uitgeput – zolang er voldoende U-238 aanwezig is om de conversie gaande te houden. Het is het principe zelf van een kweekreactor. Als dusdanig zou het economischer zijn mochten we de brandstof veel langer in de reactor kunnen laten alvorens ze te herwerken. Men wil ook hogere vermogensdichtheden, en hogere werkingstemperaturen bekomen, om een meer efficiënt systeem te bouwen. Natuurlijk kan men ook lagere verbrandingsgraden gebruiken in een kweekreactor – dat tast het principe van de kweekreactor niet aan – maar het wil dan wel zeggen dat dezelfde brandstof herhaaldelijke keren doorheen een opwerkingsfabriek moet. Hoe minder van die cycli nodig zijn, hoe beter (economischer, veiliger, praktischer...) natuurlijk.

Al dat maakt dat oxides als chemische vorm van de brandstof wel mogelijk zijn, maar waarschijnlijk niet aan de nieuwe vereisten zullen kunnen voldoen. Enerzijds hebben ze de vervelende eigenschap van slechte warmtegeleiding. Bovendien heeft een oxide in natrium het nadeel wat zijn voordeel was in water: in water waren de oxides chemisch zo goed als inert (wat de voornaamste reden voor die keuze was) ; in natrium kunnen oxides een reactie met natrium aangaan.

Men heeft minder ervaring, maar men doet veel onderzoek, naar carbides: uranium carbide en plutonium carbide ; ook nitrides worden bestudeerd. Zij zijn inert in natrium, en hebben bovendien het voordeel van een veel hogere warmtegeleiding. Hun smeltpunt is vergelijkbaar met de oxides. Daarentegen, carbides zwellen meer op bij bestraling dan oxides. Dat is een serieus nadeel, en de pastille-wand interactie kan hierdoor nadelig beïnvloed worden. Men tracht dat op te vangen door een meer poreuze pastille te bouwen. Het voornaamste nadeel van carbiden op dit ogenblik is dat er veel minder ervaring mee is opgedaan dan met oxiden.

Ferritisch-martensitische staalsoorten met oxide dispersie lijken materialen te zijn die voorbij de 100 dpa barrière kunnen geraken, zoals eerder uiteengezet. Het onderzoek is beloftevol, maar men heeft nog een hele weg af te leggen voor dit een gangbare praktijk kan worden. Voor de eerste nieuwe prototypes natrium-gekoelde snelle reactoren zal men waarschijnlijk nog voor de (goed gekende) oxides opteren, waarschijnlijk in een ferritisch-martensitisch staal als buis materiaal. Eens men voldoende vertrouwen in carbides ontwikkeld zal hebben (dat vraagt enkele jaren experimenteren) zal men waarschijnlijk overstappen op uranium/plutonium carbide pastilles, gezien hun a priori superieure eigenschappen.

Een ander aspect in het onderzoek naar nieuwe brandstoffen in snelle reactoren is het eventueel insluiten van kleine actiniden (om die mee te verbranden, en als dusdanig de radiotoxiciteit van het afval een veel kortere levensduur te geven). Hier is nog maar weinig onderzoek naar verricht: in welke mate beïnvloedt het insluiten van oxides of carbides van kleine actiniden het materiaalgedrag van een brandstofpastille ? Toch zijn er enkele experimenten in die richting (met succes) uitgevoerd op kleine schaal in de Phenix reactor.

Alles bij elkaar stelt men vast dat er voor toekomstige snelle reactoren beloftevolle materialen bekend zijn, maar dat er anderzijds toch nog wel heel wat onderzoek en ontwikkeling nodig is alvorens men kan stellen dat men een oplossing heeft die op commerciële basis betrouwbaar, veilig en economisch op grote schaal kan aangewend worden. Vandaar dat het niet realistisch is om te stellen dat we op dit ogenblik zulke reactoren kunnen bouwen, maar dat het wel goed doenbaar lijkt om dat binnen 20 of 30 jaar te verwachten. Er zijn immers geen principiele moeilijkheden waar een “onverwachte doorbraak” nodig is: met een evolutie van gekende technologie met men de doelstellingen kunnen bereiken.

Hoofdstuk 8 Alternatieve energiebronnen.

8.1 Inleiding

8.1.a Alternatieven of kernenergie, of alternatieven, waaronder kernenergie ?

In tegenstelling tot sommige voorstellingen van kernenergie, is mijn bedoeling niet om hernieuwbare (alternatieve) energievormen te zien *als antagonisten* met kernenergie. Ik zie hernieuwbare energieën eerder *samengaan* met kernenergie om het fossiele-brandstof verbruik en de CO₂ productie ervan zo sterk mogelijk terug te dringen. Onder hernieuwbare energieën begrijpen we: energiebronnen die enkel een investering vragen in installatie en grondgebied, *en geen vorm van brandstof verbruiken maar enkel constructiemateriaal en grondoppervlak*. Typische voorbeelden: zonne- en wind energie, hydro-elektrische centrales, biomassa verbruik, geothermische centrales en dergelijke meer. De bedoeling van dit betoog is zeker niet om te pleiten *tegen* deze energiebronnen, in tegendeel. *Het enige waar we tegen pleiten is om deze energiebronnen te gebruiken om kernenergie te vervangen, alvorens zij fossiele brandstof verbruik hebben vervangen*. Ik denk dat we op de “ecologische waardeschaal” sommige hernieuwbare bronnen als hoger kunnen inschatten dan kernenergie – hoewel dat nog te bekijken valt als men de totale balans maakt, gezien de grote hoeveelheid materiaal en grondgebruik die sommige van die “alternatieven” vereisen. Daarentegen, *kernenergie staat op diezelfde waardeschaal nog steeds veel hoger dan fossiele-brandstof verbruik*. Het dient dan geen lang betoog om in te zien dat als men zowel kernenergie als hernieuwbare bronnen gebruikt om fossiele brandstoffen te vervangen, men een betere ecologische score gaat bekomen dan wanneer men gedeeltelijk (een klein beetje) hernieuwbare bronnen en gedeeltelijk (vooral) fossiele brandstoffen gaat gebruiken om kernenergie te vervangen. *De essentie van mijn betoog is dat de Groene politiek die erin bestaat om kernenergie gedeeltelijk door hernieuwbare bronnen te vervangen, ecologisch slechter is dan wanneer we die hernieuwbare bronnen gebruiken om fossiele brandstof centrales te vervangen*. Veruit de meest ecologisch – en trouwen ook economisch en geopolitiek – verantwoorde keuze is: *het aandeel verhogen van zowel kernenergie als alternatieve energiebronnen, beide ten koste van fossiele brandstof gebruik*.

Natuurlijk is de voor de hand liggende vraag dan: waarom gewoon *alles* niet door hernieuwbare bronnen vervangen ? Ik zou daar ook voorstander van zijn, mocht het economisch en technisch mogelijk zijn om op die manier *overvloedig goedkope elektriciteit* te produceren. Maar zoals we in dit hoofdstuk zullen zien, hebben – in de huidige stand van de technologie – hernieuwbare bronnen economische en technologische begrenzingsen die maken dat hun aanbod niet onbeperkt is. Men dient dan te overwegen op welke wijze we dat beperkte kapitaal het beste kunnen aanwenden.

Laten we alternatieven ontwikkelen, die in de eerste plaats fossiel brandstof verbruik terugdringen en dus iets doen aan de problemen die dat stelt. Wanneer dat grotendeels gebeurd is, kunnen we eventueel denken aan het uitfaseren van kernenergie met behulp van hernieuwbare bronnen, maar zolang er een niet-verwaarloosbaar aandeel van fossiel brandstof gebruik aanwezig is, is het ecologisch, economisch en geopolitiek niet verantwoord om lage-CO₂ technieken tegen elkaar uit te spelen.

Wereldwijd¹⁴⁰ was het totale *primaire* vermogen (dat wil zeggen, het vermogen van de bron) van energiegebruik (alles inbegrepen: vervoer, verwarming, ...) gemiddeld over het jaar 2005: 16 TW (11435 Mtoe per jaar). Dat was 35% olie, 25% steenkool, 21% aardgas, 6.5% kernenergie (primaire thermische kernenergie), 2.2% waterkracht en 10% vernieuwbaar (voornamelijk het verbranden van hout en afval)..

In 2005 was het wereldwijd *elektriciteitsverbruik* gelijk aan een gemiddeld vermogen van 2.1 TW (totale jaarproductie 18235 TW-uur), dus op het eerste gezicht 8 keer kleiner dan het wereld *primaire* energie verbruik, dat ook verwarming en transport inhoudt... maar laten we een eerdere discussie hierover indachtig zijn en elektrisch vermogen niet vergelijken met thermisch (primaire) vermogen! Als we dat in rekening brengen is er slechts een factor $8/3 = 2.7$ tussen het wereld elektriciteitsverbruik en het wereld energie verbruik. Wereldwijd is van die 2.1 TW, 40.3% door steenkool geproduceerd, 6.6% door olie, 19.7% door aardgas, 15.2% door kernenergie, 16% door waterkracht, en 2.2% door alle andere technieken (hernieuwbare technieken zoals wind- en zonne-energie, biomassa enz...). Ongeveer 67%, twee derde, van de elektriciteitsproductie komt van fossiele brandstoffen. Kunnen we die elektriciteitsproductie in principe CO₂-vrij maken? Wereldwijd is er 370 GW aan kernenergie geïnstalleerd in een 400-tal kerncentrales. *Het wereld elektriciteitsverbruik kan in principe bereikt worden met ongeveer 1300 centrales*, of ongeveer drie keer meer dan er nu staan (huidige centrales hebben een hoger elektrisch vermogen dan oudere centrales: de EPR reactor heeft een vermogen van 1.6 GW elektrisch), wat dan een derde betekent van de wereldwijde energie toepassing, en ongeveer evenveel winst betekent in CO₂ uitstoot. We hebben dan wereldwijd 25% a 30% gewonnen op de CO₂ uitstoot. We moeten 50% tot 75% bereiken. We zijn goed halfweg. De andere helft zal moeten komen van niet-elektrische toepassingen: transport en huisverwarming. *Als we de elektriciteitsproductie grotendeels CO₂ vrij kunnen maken, dan hebben we het probleem van een mogelijke klimaatsverandering meer dan half opgelost.* Kernenergie reikt ons die mogelijkheid aan (drie keer meer reactoren dan nu is geen onoverkomelijke opgave). Misschien doen andere technologieën dat ook. We kunnen trachten in onze elektriciteitsportefeuille andere CO₂-arme technieken te gebruiken: we moeten niet noodzakelijk alle elektriciteit met kernenergie opwekken, zolang we maar fossiele brandstof gebruik terugdringen. Maar we weten dat er ten minste reeds *een* oplossing is die volledig uitvoerbaar is: kernenergie. De huidige belangrijkste bron van elektriciteitsproductie is steenkool. Aardgas heeft ongeveer de halve uitstoot ten opzichte van steenkool. Als we de elektriciteitsproductie door aardgas laten gebeuren, dan hebben we de helft van de mogelijke besparing op uitstoot doorgevoerd. Steenkool vervangen door aardgas is “de halve weg” en aardgas door “CO₂-vrije” technieken zoals kernenergie vervangen is de tweede helft van de weg... Het zou jammer zijn om van onze potentiële 30% uitstoot vermindering slechts 15% te maken door aardgas gaan te gebruiken, winst die we bijna volledig kwijtspelen als we de ongeveer 15% reeds bestaande kernenergie zouden uitfaseren. Kernenergie en steenkool door aardgas vervangen helpt dus helemaal niet in het CO₂ probleem. Bovendien is aardgas veel duurder dan zowel kernenergie als steenkool, en speelt aardgas op een markt die sterk gekoppeld is aan de olie markt waar de prijzen waarschijnlijk sterk gaan stijgen.

8.1.b Perspectieven voor de komende decennia in Europa.

De Europese standpunten inzake energievoorziening zijn de volgende:

140 Deze gegevens komen van het IEA http://www.iea.org/Textbase/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=1199

- het zeker maken van de energievoorziening in Europa (verminderde afhankelijkheid van buitenland)
- het garanderen van de economische competitiviteit en dus de beschikbaarheid van economisch competitieve energiebronnen
- duurzame energie technologieën die geen overdreven belasting voor het milieu vormen
- vermindering van de uitstoot van broeikas gassen zodat in 2020 de uitstoot minstens 20% lager ligt dan die het was in 1990.

In het Europa van 2002 wordt 33% van de elektriciteit door kernenergie geproduceerd (EU-15). De EU-15 landen (de 15 lidstaten van Europa voor 2004) hadden in 2004 het volgende profiel betreffende CO₂ en energie¹⁴¹: 3506 miljoen ton CO₂ is uitgestoten door de hele energie sector (tegen 3357 miljoen ton in 1990). Hiervan kwam 30% van de elektriciteitsproductie (1008 miljoen ton), 24% van de transportsector, 16% van de industrie en de constructie, 12% van de residentiële energieproductie (huisverwarming en warm water...); de rest betreft commerciële en openbare gebouwen, petroleum raffinaderijen en dergelijke. De elektriciteitssector (30% dus) deed dit door 77 miljoen ton CO₂ te produceren door olie te verbranden, 687 miljoen ton door steenkool te verbranden, 215 miljoen ton door aardgas te verbranden en nog eens 27 miljoen ton door andere brandstoffen te gebruiken. Deze getallen veranderen niet veel over de jaren. Merk op dat de slechts 30% van de elektriciteitssector in EU-15 overeenkomt met de ongeveer 40% in de Verenigde Staten, als we rekening houden met de 33% kernenergie in EU-15 die dus (zo goed als geen) CO₂ uitstoten. Het is ook interessant om naar de verdeling van die CO₂ door elektriciteit per land te kijken: Duitsland: 32%, het Verenigd Koninkrijk 16%, Italië: 12.4%, Spanje 9.9%, Nederland 5.6%, Frankrijk 4.5%, België 2.4%, Denemarken 2.3%. Merk op dat de “lessengever” in “Groene elektriciteit en alternatieven”, Duitsland, verreweg de grootste vervuiler is, en dat Frankrijk minder CO₂ produceert dan Nederland! België produceert de helft van Nederland. De CO₂ uitstoot gespaard door kernenergie in Europa (EU-15) komt ongeveer overeen met een kleine helft van de uitstoot door de transportsector! *Als we kernenergie in Europa zouden uitfasen zonder iets anders te doen, dan was het alsof we er een halve transportsector bij kregen.* Nog anders gesteld: stel dat we het verbruik van de transportsector door twee konden delen (minder rijden, zuiniger auto's en vrachtwagens...), dan zou die moeite volledig verloren zijn door kernenergie uit te faseren. Merk ook op dat Denemarken, “wind energie kampioen”, ongeveer dezelfde uitstoot heeft als België, voor een half zo grote bevolking. Weerom komen we tot dezelfde besluiten als in hoofdstuk 1.

Vandaag beschikt Europa over een geïnstalleerd elektriciteitspark van ongeveer 760 GWe waarvan er in 2030 nog ongeveer 300GW zal overblijven; de rest zal aan het einde van zijn leeftijd zijn gekomen. Men schat dat Europa tegen dan een geïnstalleerde capaciteit zal nodig hebben van ongeveer 1100 GWe wat dus wil zeggen dat er in de komende 20 jaar ongeveer 800 GWe moet geïnstalleerd worden. Natuurlijk zijn die schattingen onnauwkeurig, maar het geeft toch een idee van wat er gaande is. *Er zal dus in de komende twintig jaar meer nieuwe elektriciteitsproductie capaciteit dienen geïnstalleerd te worden dan er vandaag aanwezig is.* Een deel van deze 800 GW zal door derde generatie reactoren zoals de EPR kunnen geleverd worden en we moeten er reeds een 100-tal bouwen om de fractie kernenergie in het Europese aanbod niet te verminderen, maar het is duidelijk dat *er meer dan plaats genoeg zal zijn voor alternatieve bronnen – de vraag zal maar zijn of zij hun belofte kunnen waar maken.* Alternatieven gaan aanwenden om kerncentrales te vervangen is het laatste wat men zal willen doen in de komende decaden, tenzij men om een of

¹⁴¹ http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2006_6/en/EC-GHG-Inventory-2006.pdf en <http://www.eurelectric.org/Statistics/Latest.htm>

andere (ideologische ?) reden een energieschaarste wil veroorzaken. Er zijn 800 fossiele centrales te vervangen!

We gaan enkele hernieuwbare technieken wat korter bij bekijken. Hoewel het interessante voorstellen zijn, dient men er zich toch wel van bewust te zijn dat deze technologieën ook hun eigen problematiek hebben. Zoiets uit het oog verliezen als men een grootschalige energiepolitiek wil uitwerken is totaal onverantwoord, want men gaat dan utopische plannen beschouwen, die in de praktijk niet gaan werken.

8.2 Zonne-energie

Zonne-energie¹⁴² is een veelbelovende alternatieve energie vorm. De aarde ontvangt constant 1366 W per vierkante meter zonne-energie vanuit de ruimte, in dwarsdoorsnede. Als we rekening houden met nacht/dag, reflectie en absorptie van de atmosfeer, en de hoogte van de zon boven de horizon, *dan bekomen we in gematigde gebieden aan ongeveer jaargemiddeld 200W per vierkante meter landoppervlak aan ontvangen zonne-energie.*

De wereld ontvangt gemiddeld een zonne-energie vermogen van 174 PW, wat ongeveer 10 000 keer groter is dan de 16 TW die de mensheid aan energie verbruikt. Er is dus ruimschoots voldoende zonne energie om al onze energieproblemen volledig op te lossen.

Men moet bij zonne-energie (evenals bij windenergie) het onderscheid maken tussen *vier vermogens* :

- Het *ontvangen piekvermogen* van zonne-energie. Dat kan gaan tot ongeveer 1.2 KW per vierkante meter land, en bepaalt wat er maximaal geïnstalleerd dient te worden als men alles wil gebruiken.
- Het *ontvangen jaargemiddelde zonnestralingsvermogen* is in onze contreien ongeveer 200W per vierkante meter land. Dat is wat er potentieel beschikbaar is. *Merk de factor 6 op tussen het gemiddelde ontvangen vermogen, en het piekvermogen.*
- Het *jaargemiddelde geproduceerde vermogen* in nuttige vorm (bijvoorbeeld, het jaargemiddelde elektrische vermogen dat uit een zonnepaneel komt). Dat is wat we er werkelijk uit halen.
- Het *geïnstalleerde of piekvermogen* is het maximale ogenblikkelijk vermogen dat de installatie in optimale omstandigheden kan geven, bijvoorbeeld 's middags in volle zon in de zomer. De verhouding tussen geïnstalleerd vermogen en jaargemiddelde geproduceerd vermogen is vergelijkbaar met de verhouding tussen ontvangen piekvermogen en ontvangen gemiddelde vermogen. We hebben gezien dat in onze contreien er een factor 6 zit tussen beide. Het geïnstalleerde piekvermogen bepaalt de investering van de installatie. In zonniger landen kan die factor dalen tot 3.

142 Zie bijvoorbeeld http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power en ook <http://www.zonne-energie-info.be/informatie/>

8.2.a Fotovoltaïsche omzetting.

Fotovoltaïsche omzetting¹⁴³ is de directe omzetting van licht in elektriciteit. Dat gebeurt in zonnecellen, ook wel fotovoltaïsche cellen genaamd. Er bestaan verschillende technieken om zulke cellen te bouwen.

Het wereld elektriciteitsverbruik, aannemende dat we een conversie efficiëntie van 15% hebben in zonnecellen (multikristallijne silicium, de enige betaalbare vorm die enige efficiëntie heeft op dit ogenblik), en we dus netto gemiddeld 30W per vierkante meter land kunnen recupereren, kan dus in principe gedragen worden door 60 miljard vierkante meter zonnecel, of een zonnecel oppervlak van 100 kilometer op 600 kilometer. Als we twee keer de oppervlakte van België vol zonnecel plakken, hebben we het gemiddelde wereld elektriciteitsverbruik met zonnecellen opgelost. Dat lijkt dus potentieel veelbelovend te zijn.

In 2005 was het wereldwijde jaargemiddelde productieniveau van elektriciteit met fotovoltaïsche technologieën ongeveer 700MW (dat is ongeveer 0.04% van het wereld stroomverbruik) maar is in sterke stijging. De hoofdmoot van deze productie bevindt zich in Japan, Duitsland, de Verenigde Staten. Portugal en Australië doen grote inspanningen om bij deze club te komen.

Heeft het enige zin om kernenergie door fotovoltaïsche cellen te laten vervangen op grote schaal ?

We gaan een korte schatting maken, “op de hoek van een enveloppe”. De paneel kostprijs per geïnstalleerde W *piekvermogen* (ongeveer 5-6 keer het gemiddelde vermogen) is van de orde van 2-3 Euro¹⁴⁴, maar dat is natuurlijk zonder de prijs van de installatie of het gebruikte land gerekend. De levensduur van een fotovoltaïsche cel is op dit ogenblik geschat op 30 – 40 jaar¹⁴⁵. 1 GWe effectief kost dus 10-15 miljard Euro, maar de prijs is wat aan het dalen. Ter vergelijking, de constructie van een kerncentrale kost ongeveer 2 Euro per geïnstalleerde effectieve Watt (dus een 1GWe centrale kost ongeveer 2 miljard Euro, dat is 5 keer minder). 1 GWe effectief heeft een land oppervlak nodig van 30 miljoen vierkante meter, of 30 vierkante kilometer in de bovenstaande condities. Dat is de Belgische kust, 500 meter diep het land in. Dit is equivalent aan een 1GWe kerncentrale. België heeft 5.5 GWe kernenergie, en dat komt dus neer op een band fotocellen, 2.7 kilometer het land in, de hele Belgische kust lang. Aan de huidige prijs kost dat ongeveer 70 miljard Euro (zonder de prijs van de grond). Om een idee te geven: dat is *het Belgische defensie budget voor ongeveer 35 jaar*. Gezien dat ook de levensduur van de installatie ongeveer is, wil dat zeggen dat we voor deze optie het hele Belgische defensie budget moeten blijven uitgeven, om 7 kerncentrales door zonnecellen te vervangen.

Maar hiermee is de kous niet af. Het voornaamste probleem met zonne-energie is *dat het aanbod variabel is*. We moeten hierbij dus nog de kost rekenen voor de energie opslag, aangezien fotovoltaïsche cellen uiteraard 's nachts niet werken, en minder werken in de winter dan in de zomer. Dat houdt bijvoorbeeld de bouw van stuwmeren in waar we water naar boven kunnen pompen bij overschot productie, en hydro-elektriciteit genereren wanneer die productie stilvalt. 's Nachts daalt het water, overdag wordt het weer omhoog gepompt met de elektriciteit van de fotocellen. Dit is geen gek idee: de centrale van Coö¹⁴⁶ is zo een kleinere versie die ongeveer 1GW

143 Zie http://nl.wikipedia.org/wiki/Fotovolta%C3%AFsche_cel en <http://nl.wikipedia.org/wiki/Zonnepaneel> en <http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>

144 Zie <http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar/renewables/page/solarreport/highlights10.html>

145 http://optical-components.globalspec.com/LearnMore/Optics_Optical_Components/Optoelectronics/Photovoltaic_Cells

146 Zie <http://www.geo.vu.nl/users/rondeel/ardennenweb/trois-ponts.html>

kan leveren gedurende 6 uur. Zo een installatie kost ongeveer 2 Euro per geïnstalleerde watt. De prijs van dit geheel moet aan de originele prijs van de fotovoltaïsche eenheden worden toegevoegd: met andere woorden: fotovoltaïsche energieopwekking op grote schaal veronderstelt een bijna even grote hydro-elektrische capaciteit in parallel.

Met bovenstaande installatie hebben we de dag-nacht wisseling opgevangen, maar niet de meer problematische zomer/winter wisseling waar er meer verbruik voor minder productie is, wat enkel kan opgevangen worden door de installatie een factor drie¹⁴⁷ keer groter te maken, om in de winter aan een gemiddelde productie te zitten die gelijk is aan het verbruik. Als dusdanig is de prijs van de installatie eerder 30 tot 50 miljard Euro voor een elektrische GW.

We hebben hier een op-de-hoek-van-de-tafel schatting van de afmeting en kost van de installatie die gebouwd moet worden als we volledig kernenergie door fotovoltaïsche energie willen vervangen, gebruik makende van huidige aangetoonde technologie. De levensduur van een fotovoltaïsche cel is vergelijkbaar met de levensduur van een kerncentrale en waarschijnlijk zelfs korter, als we kerncentrales levensduren van 60 jaar geven. Beide systemen (kernenergie en fotovoltaïsche energie) hebben kleine exploitatiekosten in vergelijking met de investering, en de investering in fotovoltaïsche technieken is een goed tien tot twintig keer duurder dan in kernenergie.

Met andere woorden, een grootschalige, autonome fotovoltaïsche energievoorziening is een orde van grootte duurder in investering dan kernenergie met huidige aangetoonde technologie.

Onze schatting was nogal snel. Misschien denkt de lezer dat ik, als een goochelaar, wat snel tot een besluit gekomen ben dat past in het kader van mijn argumentatie. Maar er zijn studies¹⁴⁸ die veel professioneler zijn die tot ongeveer dezelfde besluiten komen.

Het is een goed idee om experimentele installaties te bouwen, en om de techniek verder te bestuderen. In de mate dat die experimenten positief zijn, kunnen we naar steeds grotere schalen gaan, en nagaan op welke manier we die techniek het beste kunnen aanwenden. Maar op dit ogenblik is het roekeloze extrapolatie om te denken dat zonne-energie 1) kernenergie kan vervangen, 2) de meeste CO₂ uitstoot bij elektriciteitsproductie kan terugschroeven, 3) de levensstandaard van de mensen kan behouden of verbeteren in de komende decennia. Er is reeds plaats genoeg voor experimentele installaties die 2) trachten te bewerkstelligen.

Het is ook heel goed mogelijk dat deze technologie evolueert. Als we naar hogere omzettingsefficiënties kunnen gaan (zeg maar, 50% in plaats van 15%) en naar veel lagere productieprijs en langere levensduur, dan wordt fotovoltaïsche omzetting een heel interessante optie. Als bovendien het probleem van de energie opslag kan opgevangen worden op een of andere wijze, dan wordt fotovoltaïsche elektriciteitsopwekking een heel beloftevolle optie die eventueel zelfs het leeuwendeel van de elektriciteitsopwekking voor zich kan nemen. Maar voorlopig bestaat zulke oplossing niet, en zeker niet op industriële schaal. We kunnen er bijgevolg op dit ogenblik

147 Deze factor komt van het volgende: in onze contreien is er een factor ongeveer 9 tussen het gemiddelde zonnevermogen in de winter en in de zomer. Dat wil zeggen dat we in de winter 3 keer minder energie ontvangen, en in de zomer 3 keer meer dan het gemiddelde.

148 Zie bijvoorbeeld blz 26 van een rapport in het Verenigd Koninkrijk:
http://www.ippr.org/uploadedFiles/research/projects/Sustainability_Programme/policies_for_low_carbon.pdf :

- kernenergie: 3.9 p/KW-uur (de p staat voor "pence")
- offshore wind energie: 8.2 p/KW-uur (een factor 2)
- fotovoltaïsche elektriciteit: 42 p/KW-uur (een factor meer dan 10)

niet van uitgaan dat die oplossing op grote schaal industrieel implementeerbaar zal zijn binnen enkele decaden, en elke politiek die zulke hypothese als uitgangspunt neemt, doet aan dagdromen.

8.2.b Thermische zonne-energie.

Een veel realistischer gebruik van zonne-energie is het lokale thermische gebruik bij lage temperaturen, voor *de productie van warm water en de huisverwarming*. De technologie is veel eenvoudiger toepasbaar, en vervangt bovendien in vele gevallen een fossiel gebruik direct. Vele huizen zijn immers met fossiele brandstoffen verwarmd, en maken ook warm water met fossiele brandstoffen. Elke KWuur op die manier gerecupereerd *vermindert onmiddellijk* het verbruik van fossiele brandstoffen met een KWuur.

Een “zonneboiler” voor een individuele woning kost van de orde van 4000,- Euro, en kan voor 300 liter warm water voorzien. Men verwacht een “terugbetaling” van de investering in ongeveer 20 jaar, wat dus nog net economisch verantwoord is: de winst is essentieel enkel ecologisch, maar de gebruiker verliest er niet teveel aan: het is dus een techniek die op grote schaal kan toegepast worden zonder een excessieve financiële aderlating.

Met andere woorden: *de realistische en op dit ogenblik mogelijke grootschalige toepassing van zonne-energie is thermische zonne-energie, dat met succes kan gebruikt worden om fossiele brandstof verbruik of elektriciteitsverbruik voor thermische doeleinden terug te schroeven*. We denken aan het maken van warm water en het verwarmen van woningen.

Er is wel een vorm van thermische zonne-energie die relatief goedkoop elektriciteit kan produceren, en dat is door met spiegels het directe zonlicht op een toren te concentreren, waar water aan de kook kan worden gebracht. Deze techniek is echter alleen aanwendbaar in streken waar men overvloedige gegarandeerde directe zonneshijn heeft (geen wolken), zoals de Magreb landen, of het zuiden van Spanje. Het is, net zoals geothermische energie, en zoals waterkracht, een geografiegebonden mogelijkheid die niet algemeen toepasbaar is. Daar waar ze mogelijk is kan men er natuurlijk gebruik van maken. Het probleem van de zomer/winter variabiliteit blijft echter actueel. Voor de dag/nacht variabiliteit heeft men een oplossing, in de zin dat men thermische energie kan opslaan tijdens de dag, om de stoomcyclus te laten doorbollen tijdens de nacht. Opslag van thermische energie is gemakkelijker dan opslag van elektrische energie (door middel, bijvoorbeeld, van gesmolten zouten of dergelijke).

8.3 Wind energie

Windenergie¹⁴⁹ is een interessante optie, in de zin dat de prijs niet waanzinnig hoog is, en bijgevolg competitiever is dan fotonvoltaïsche energie.

Grote turbines zijn ongeveer 70-100 meter hoog, met een rotor van 60 meter diameter. Zo een turbine heeft een geïnstalleerd vermogen van 1 tot 5 MWe in optimale omstandigheden, en de verhouding tussen geïnstalleerd en gemiddeld vermogen is in de beste gevallen een factor 3, en vaak slechter. Enkele waargenomen factoren¹⁵⁰: 2.6 (heel goed) is enkel vastgesteld bij een Marrokaanse installatie bij Amogdoul. De Denen vinden een factor 4, Spanje, Portugal, Nederland

149 Zie <http://nl.wikipedia.org/wiki/Windenergie> en http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_energy

150 Men kan een compilatie hier vinden: <http://lightbucket.wordpress.com/2008/03/13/the-capacity-factor-of-wind-power/>

vinden eerder een factor 5, en Duitsland een factor 6. Het wereldgemiddelde ligt op ongeveer 5. Dat is niet zo zeer afhankelijk van de technologie, maar wel van de variabiliteit van het windaanbod. Niet alle plekken zijn gelijkwaardig wat dat betreft. Vaak zijn offshore plekken veel interessanter dan gebieden in het binnenland.

Wind turbines dienen minstens vijf keer hun rotor diameter van elkaar te staan, dus bovenstaande turbines dienen om de 300 meter geplaatst te worden.

Laten we concreet gezien naar een Belgisch voorbeeld kijken: de Thornton bank, met het C-Power project van 60 5MWe turbines¹⁵¹. Kostprijs: 800 miljoen Euro. Geïnstalleerd vermogen: 300 MW elektrisch, gepland gemiddeld vermogen: 1000 GW h per jaar, ofte jaargemiddeld vermogen 114 MW, wat in mijn opinie een heel optimistische schatting is, gezien ze rekenen op een factor 2.6, het beste wat ooit is vastgesteld! We hebben hier een kostprijs van ongeveer 7 Euro per gemiddelde Watt ; maar zonder de prijs van de buffer te rekenen! Kernenergie draait rond de 2 Euro per Watt. *De stroom van deze windmolens is dus meer dan 3 keer duurder dan kernenergie en waarschijnlijk meer, gezien we de buffer capaciteit niet hebben meegerekend.* Gezien andere studies aantonen dat wind energie ongeveer twee keer duurder is, lijkt dit project dus wat duurder dan gemiddeld te zijn.

Om het gemiddelde vermogen van de Belgische kerncentrales te vervangen, dienen we 55 zulke projecten te bouwen... en we hebben nog steeds de buffer niet, en nog geen gram CO₂ uitstoot verminderd.

Laten we even naar een ruwe materiaalbalans kijken. Een EPR reactor heeft een reactor vat van ongeveer 500 ton staal. Hieraan moeten we nog 4 stoomgeneratoren toevoegen, zodat de totale hoeveelheid staal voor de nucleaire machinerie ongeveer 2000 ton is. De zwaarste constructie is echter de dubbele bunker: 55 meter hoog en 48 meter diameter, 1.3 meter dik (twee keer), geeft ons een totaal beton volume van 22 000 kubieke meter voor de muur en 37 000 kubieke meter voor dak en bodem plaat (dubbele uitvoering inbegrepen). Dus in totaal ongeveer 60 000 kubieke meter beton. Gewapend beton heeft ongeveer 5% van het volume in staal, dus dat wil zeggen, nog 3000 kubieke meter staal, of ongeveer 20 000 ton versterkingsstaal. We kunnen dus besluiten dat het overgrote deel van de materiaalinspanning in een EPR reactor in de dubbele bunker gaat. Het echte reactordeel is piepklein in vergelijking daarmee. Men kan nagaan dat de koeltorens ook heel weinig materiaal verbruiken in vergelijking met de bunker. Alles bij elkaar heeft een EPR reactor ongeveer 70 000 kubieke meter beton nodig, en 30 000 ton staal.

Hoe vergelijkt zich dat met een windmolenpark zoals de Thornton bank ? Het vermogen van een EPR reactor is 1.6 GW elektrisch. Dat wil zeggen: 16 keer meer dan men hoopt gemiddeld van het Thornton bank project te bekomen (ongeveer 100 MW). De equivalentie van een EPR centrale, zonder buffer, komt dan overeen met 16 keer 60 of ongeveer 1000 turbines.

Elke windturbine is ongeveer 120 meter hoog (meer dan 1/3 van de Eiffel toren). Aanvankelijk had men kleinere turbines van 3.6 MW beschouwd, en de beschrijving hiervan geeft aan dat elke turbine een fundering van ongeveer 400 ton heeft (voor 1000 turbines is dat dus 400 000 ton) als monopaal fundering. De mast zelf is een 6 cm dikke 5 meter diameter stalen buis, die 70 meter hoog is. Dat stelt 66 kubieke meter staal voor, of te 450 ton staal. 1000 turbines stellen dus 450 000 ton staal voor.

Vergelijking van de materiaalbalans tussen wind en EPR voor 1.6 GW elektrisch (1 EPR reactor): wind: 450 000 ton staal voor de masten, en 400 000 ton beton voor de fundering. EPR: 30 000 ton staal, en 70 000 ton beton. Een van de kritieken die vaak wordt geuit ten aanzien van kernenergie is

151Zie de website: http://www.c-power.be/applet_mernu_nl/index01_nl.htm

de grote materiaal kost (en bijhorende energie kost) voor de materialen voor een kerncentrale, maar zoals we zien is een equivalente (zonder buffer) windkrachtcentrale veel gulziger in materiaalkost. *Wind energie is veel materiaal intensiever dan kernenergie voor hetzelfde gemiddelde vermogen.*

Dat wil niet zeggen dat wind energie slecht is natuurlijk, maar het plaatst een argument tegen kernenergie in perspectief: sommigen beweren dat kerncentrales veel te materiaal intensief zijn, en dat dat materiaalgebruik een grote ecologische impact heeft. In de mate dat dat argument enige steek houdt, is de impact van wind energie dan nog veel erger.

Wind turbines zijn een relatief volwassen industrie met een redelijk grote markt, wat wil zeggen dat de prijzen redelijk stabiel zijn. We kunnen niet echt meer hopen op technologische doorbraken zoals in de fotovoltaïsche elektriciteitsopwekking het geval zou kunnen zijn. *De prijs van elektrische wind energie is gemiddeld twee a drie keer groter dan de prijs van elektrische kernenergie, en dat zal niet veel meer veranderen.* Niettemin is het genereren van elektriciteit op grote schaal haalbaar, als men daar die wat hogere prijs voor wil betalen, in tegenstelling tot de fotovoltaïsche optie in de huidige stand van de technologie, waarvan we denken aangetoond te hebben dat ze zoveel duurder is dat het gewoon niet realistisch is.

In de mate dat Frankrijk de referentie is voor kernenergie, is Denemarken de referentie voor windenergie. Denemarken is ideaal geplaatst om windenergie te gebruiken, dank zij zijn offshore windmolenparken¹⁵².

In Denemarken, het land waar de grootste fractie elektrische energie uit wind energie komt, wordt 16% van de elektriciteit op die wijze geproduceerd, en dat is, volgens experts, ongeveer de hoogste fractie die haalbaar is om nog een bestuurbaar elektriciteitsnetwerk te bekomen. Sommigen denken dat men nog wat verder kan gaan, maar niemand gaat er van uit dat men meer dan de helft van zijn verbruik door windenergie kan opwekken. *Het probleem is de variabiliteit en in zekere mate zelfs de onvoorspelbaarheid in het wind aanbod.* Soms zit men een week zonder wind. Denemarken lost dat op door als klein land elektriciteit uit te wisselen met zijn veel grotere burens (die dus de variabiliteit opvangen), vooral de Scandinavische landen zijn hierbij heel behulpzaam, omdat die een heel groot park aan hydro-elektriciteit hebben, wat een ideaal middel is om vraag- en aanbodsvariaties op te vangen. Maar als we dan eerlijk zijn, moeten we de fractie windenergie niet bekijken op het nationale grondgebied van Denemarken, maar op de totale productie van de landen die als buffer dienen, en dan wordt de fractie windenergie piepklein.

Wind energie kan ten hoogste een relatief kleine fractie van het elektriciteitsverbruik op zich nemen en “verbruikt” hierbij veel regelcapaciteit van het netwerk. Niettemin is elke KW-uur opgewekt door windenergie toch wel een KW-uur die niet door fossiele brandstoffen moet opgewekt worden, en heeft wind energie wel degelijk een beperkt maar daadwerkelijk potentieel om de CO₂ uitstoot wat terug te schroeven. Als dusdanig is het een goed idee om windenergie beperkt in zijn energieportefeuille te hebben.

De enige hoop op lange termijn om op grote schaal een serieuze fractie van het elektriciteitsverbruik door windenergie te laten verzorgen, is *om over een grote, goedkope opslagcapaciteit voor elektriciteit te beschikken.* De Denen gebruiken hun burens, maar dat is natuurlijk een praktijk die je niet kan veralgemenen. De enige techniek die vandaag operationeel is en dat kan doen, is hydro-elektriciteit. Alle andere technieken, zoals bijvoorbeeld, waterstof productie en het gebruik van brandstofcellen zijn nog veel te duur en te kleinschalig om zinvolle opties te zijn. Hier ook kan het

152 Zie http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_Denmark en <http://incoteco.com/upload/CIEN.158.2.66.pdf>

zijn dat er in de toekomst verandering komt, maar voorlopig is daar dus geen industriële demonstratie van gegeven.

Natuurlijk zijn de “eerste procenten” windenergie niet problematisch, en in de mate dat ze fossiele brandstoffen gemiddeld wat kunnen terugdringen kan men stellen dat de hogere elektriciteitsprijs gecompenseerd wordt door de kooldioxide uitstoot die ze op die manier vermijden. Elke KW-uur die ze op die manier op zich nemen, is een KW-uur minder door fossiele brandstoffen. Enkele procenten variabiliteit is gemakkelijk opgevangen door de reeds bestaande regelcapaciteit van het elektrische netwerk. Bovendien zal de gebruiker het prijsverschil niet voelen, omdat het maar enkele procenten van de totale productie bedraagt. *Maar het gevaar bestaat dat de gemakkelijke van het invoeren van de eerste procenten windenergie ons de illusie geeft dat we de lijn nu maar onbeperkt kunnen doortrekken en een groot deel van de nodige elektriciteit door wind kunnen opwekken, als er maar voldoende politieke wil voor bestaat.* Net zoals bij zonne-energie zijn er fundamentele technische obstakels die dat niet gemakkelijk uitvoerbaar maken. De dag dat we een goedkope, massieve opslag voor elektriciteit hebben, kan wind energie eindelijk grootschalig doorbreken. Maar dat hebben we nog niet.

Als dusdanig is windenergie economisch wel realistischer dan fotonvoltaïsche omzetting op dit ogenblik, ook al blijft het duurder dan kernenergie of steenkool. *Door de grote variabiliteit van de bron kan men windenergie slechts als minderheidsfractie van de totale productie beschouwen.* De windturbines hebben een stadium van maturiteit bereikt, en er valt dus niet veel evolutie meer te verwachten op het niveau van prijs of van efficiëntie. Zolang het probleem van elektriciteitsopslag (dat erger is dan in het geval van fotonvoltaïsche opwekking) niet industrieel kan worden opgelost, is windenergie geblokkeerd op het niveau een minderheidsfractie, maar deze minderheidsfractie kan niettemin zijn steentje bijdragen.

8.4 Bio-brandstoffen

Onder bio-brandstoffen¹⁵³ verstaat men: het gebruiken van plantaardig materiaal om daaruit brandstoffen te maken. De best gekende “bio-brandstof” is... hout, natuurlijk. Het begin van de industriële revolutie was gebaseerd op die bio-brandstof, en heeft voor het omkappen van een groot deel van de wouden in Europa gezorgd. Nadien is men overgeschakeld op... steenkool.

Bio-brandstoffen geven natuurlijk wel CO₂ vrij, maar het idee is dat als men evenveel nieuw plantaardig materiaal plant dan men er verbrandt, dan is de netto-balans opname/vrijgave nul.

Bio-brandstoffen kunnen eventueel een hulp zijn in het vervangen van fossiele brandstoffen in de transport sector. Maar om het op grote schaal voor elektriciteitsproductie gaan te gebruiken is waarschijnlijk een illusie, of eerder zelfs een gevaarlijk idee. Inderdaad stellen bio-brandstoffen het probleem dat ze menselijke voeding in commerciële competitie stellen met de waarschijnlijk meer lucratieve activiteit van het kweken van gewassen voor bio-brandstoffen. Als dusdanig gaat een deel van de landbouw, die normaal diende om de mensen te voeden, nu aangewend worden om brandstoffen te produceren, wat natuurlijk de voedselprijzen de lucht gaat injagen.

Er is natuurlijk wel een aanbod aan biobrandstoffen dat het bovenstaande probleem niet kent, en dat is gebruik maken van de “nutteloze biomassa” die uit de agrarische sector komt – zeg maar organisch afval. In de mate dat men hier nuttige brandstof uit kan maken is dat natuurlijk een heel goed idee, maar het aanbod is natuurlijk beperkt.

153 Zie <http://en.wikipedia.org/wiki/Biofuel>

Er is ook wel een beloftevol nieuw idee in de biobrandstoffen wereld: algengroei. Algen groeien heel snel, kunnen in offshore installaties gekweekt worden, en kunnen relatief gemakkelijk in een soort bio-diesel omgezet worden. Enkele eenvoudige berekeningen tonen aan dat het potentieel bestaat om het huidige wereld petroleum aanbod hierdoor integraal te vervangen, zonder serieuze principiële problemen. Het is bovendien een biobrandstof die niet direct in concurrentie staat met voedselproductie of landgebruik. De techniek is echter nog maar heel recent en het hele idee staat nog in zijn kinderschoenen. Nieuwe ideeën zijn altijd rooskleuriger dan technologieën die maturiteit bereikt hebben, gewoon omdat men alle moeilijkheden nog niet heeft onderkend, dus opletten...

Het is nog niet heel duidelijk in welke mate bio-brandstoffen op grote schaal voor een elektriciteitsproductie kunnen voorzien: er is enerzijds het gevaarlijke idee van landbouw van biobrandstoffen (competitie met voedsel), maar er is het beloftevol nieuw idee van algenkweek. In elk geval is dat een activiteit die in de eerste plaats zal groeien in de transport sector, waar inderdaad biobrandstoffen een veel kleinere technologische ingreep zouden vereisen dan een eventueel overstappen op elektrische voertuigen. *Biobrandstoffen zijn veel nuttiger aangewend bij het verdringen van fossiele olie in de transportsector dan in het vervangen van elektriciteitscentrales.* Gezien de stijgende petroleum prijs is er voldoende economische aanmoediging om deze technieken verder te ontwikkelen.

8.5 CO₂ sekwestratie¹⁵⁴

Het idee is om de CO₂ uitlaat van fossiele brandstofcentrales niet aan de atmosfeer vrij te geven maar eerder om die CO₂ ergens “weg van de atmosfeer” op te slaan “voor eeuwig”. Er zijn zelfs fantasten die voorstellen om installaties te bouwen die de CO₂ terug uit de atmosfeer gaan halen, om die dan weg te bergen. Natuurlijk doet dat eventueel iets aan een mogelijke klimaatsverandering, maar niet aan het verbruik van fossiele brandstoffen en de bijhorende economische en geopolitieke moeilijkheden.

Men komt, als men naar de technische mogelijkheden kijkt, ongeveer tot dezelfde besluiten als bij het bergen van radioactief afval, met drie verschillen van formaat:

- Het gaat hem hier over *gigantische* hoeveelheden *gasvormig* product dat gemakkelijk een zwak *zuur* vormt in contact met water (dat zich dus gemakkelijk een weg baant doorheen vele gesteenten). Dat zijn drie eigenschappen die het probleem van de opslag wel wat moeilijker maken dan in het geval van radioactief afval (*kleine* hoeveelheden *verglasde* stoffen die eerder *chemisch tegengehouden* worden)
- Het gaat hem om afval met een eeuwige levensduur (radioactief afval vervalst over enkele duizenden jaren)
- De installaties om de CO₂ op te slaan die men aan de steenkoolcentrales en gas centrales moet toevoegen, en het transportprobleem (de CO₂ weegt ongeveer 3 keer meer dan de originele hoeveelheid steenkool) drijven de kost in geld en energie van de productie serieus op.

Waar heeft men bedacht om de opslag door te voeren ?

¹⁵⁴ Zie http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_sequestration

- In de oceanen. Het is namelijk zo dat de condities van druk en temperatuur het in principe moeten toelaten om vloeibaar CO₂ op de oceaانبodem te houden... maar hier is een probleem: men stelt vast dat dat CO₂ langzaam in het water oplost, en enerzijds als gas aanwezig is, en anderzijds de zuurtegraad van het water lichtjes omhoog drijft door vorming van koolzuur. Dit is een gevaarlijk spelletje: men kan op die manier een CO₂-tijdbom bouwen, die vroeg of laat alles gaat weergeven aan de atmosfeer! In de mate dat men zo iets zou aanvaarden, zie ik niet in waarom men niet zou kunnen aanvaarden om alle radioactief afval sinds 40 jaar in de wereld geproduceerd in de oceanen te dumpen, wat de activiteit per liter water met slechts 1 Bq zou verhogen. In de wereldoceaan zitten er ongeveer 1.3 10²¹ liter water, en na 30 jaar is de activiteit van de 171 000 ton afgewerkte brandstof ongeveer gelijk aan 4000 T Bq per ton afgewerkte brandstof – de natuurlijke radioactiviteit van zeewater is heel laag en is 16 Bq.
- In geologische lagen (Waar hebben we dat nog gehoord ?). Men denkt hierbij aan oude olievelden, omdat die hun “hermetische afsluiting” bewezen hebben, door daar olie en gas bij te houden voor miljoenen jaren. Alleen zijn er twee grote onzekerheden: door alle boorgaten die men erin heeft gemaakt om het olieveld te exploiteren, kan men van die opsluiting niet zeker meer zijn. Maar vooral: CO₂ vormt met grondwater een zwak zuur: koolzuur. Het is helemaal niet duidelijk of de hermetische opsluiting voor organische stoffen dat ook is voor koolzuur. Kalksteen bijvoorbeeld kan best organische stoffen opsluiten, maar lost op in koolzuur. En een relatief kleine lek in het veld kan de hele inhoud (gas onder ongeveer 80 bar) op relatief kleine periode grotendeels laten ontsnappen.

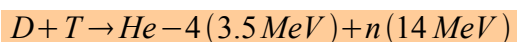
Men voert tegenwoordig veel onderzoek uit naar deze en andere opslagmogelijkheden. Zo heeft men bijvoorbeeld gevonden dat CO₂ blijkbaar aan steenkool kan geadsorbeerd worden (zoals actiniden dat doen in klei) wat de migratiesnelheid ervan zou moeten verminderen...

Het is in feite heel grappig te zien dat de problemen die zich stellen bij CO₂ sekwestratie, vergelijkbare punten hebben met de problematiek van de geologische berging van radioactief afval, maar dat de problemen en de onzekerheden veel groter zijn bij CO₂ sekwestratie. In de mate dat men CO₂ sekwestratie zelfs maar in beschouwing kan nemen, moet men het bergen van radioactief afval als een kinderspelletje beschouwen.

8.6 Kernfusie

8.6.a Wat is kernfusie ?

Kernfusie wordt soms de energie van de toekomst genoemd. Het is een andere vorm van kernenergie, waar men de energie haalt uit de fusie van deuterium (D, of H-2) en tritium (T, of H-3):



Er bestaan nog andere reacties, maar dit is de eenvoudigst realiseerbare. Wat kernfusie veel moeilijker maakt dan kernsplijting, is dat men de reagentia met elkaar in contact moet brengen, en dus de Coulomb barrière overwinnen. Men doet dat door het D,T mengsel tot waanzinnig hoge temperaturen te brengen, zodat de thermische bewegingsenergie groot genoeg is om de Coulomb barrière te overwinnen. De temperatuur die men moet bereiken is van de orde van 100 miljoen graden. En nu komt men onmiddellijk tot de technologische uitdaging: men moet een D,T mengsel

voldoende kunnen verhitten en bovendien bijhouden: het zal niet lukken in de pizza-oven. Er bestaan twee “wegen” naar deze temperaturen en “opsluitingen”:

- magnetische opsluiting: dit is veruit de meest onderzochte en meest beloftevolle weg op dit ogenblik
- inertie opsluiting

In de magnetische opsluiting maakt men van het D,T mengsel een plasma (men ontdoet de atomen van hun elektronen, en men heeft een mengeling van de vrije atoomkernen en vrije elektronen) dat men kan opsluiten in een sterk magnetisch veld, en men gaat door dat plasma een hele grote elektrische stroom jagen (die trouwens het plasma in de eerste plaats laat ontstaan). Die stroom verhit het plasma tot hoge temperaturen. Jammer genoeg wordt verhitting door elektrische stroom minder efficiënt bij hoge temperaturen, en men dient andere technieken toe te passen om het plasma tot aan de gewenste temperatuur te brengen. Maar deze technieken brengen instabiliteiten voort in het plasma, dat uit het magnetisch veld kan ontsnappen. De problematiek die men dient op te lossen is: men dient het plasma *heet genoeg* te krijgen om *voldoende kernfusie reacties* op gang te brengen, en dat *lang genoeg vol te houden* voor het plasma onstabiel wordt. Men moet op die manier voldoende energie van fusie hebben gerecupereerd om op zijn minst alle energie die men heeft gebruikt om het plasma op te bouwen en extern te verhitten, te compenseren. Het is pas vanaf dat punt dat men mogelijk netto energie productie krijgt natuurlijk.

In inertie opsluiting maakt men in feite piepkleine waterstofbommetjes. Een echte waterstofbom is gebaseerd op dezelfde fusiereactie, en om die in een bom op gang te brengen, gebruikt men een “gewone” fissie-atoombom. Inderdaad bereikt men de juiste condities van temperatuur en druk om fusie te bekomen tijdens de explosie van een fissiewapen (atoombom). In een inertie opsluiting neemt men hele kleine pellets die de fusiebrandstof bevatten, en men schiet daar dan op met een stel gigantisch grote lasers. Kwaai tongen beweren dat dit onderzoek niet zozeer dient om tot een energieproductie te bekomen, maar eerder om miniatuur kernexplosies te bekomen om meer te leren over wapenbouw.

Wat er ook van zij, op dit ogenblik staat het onderzoek naar magnetische opsluiting verder dan het onderzoek naar inertie opsluiting – maar dat kan ooit wel veranderen.

De voordelen van kernfusie zijn duidelijk: deuterium is voor 1% aanwezig in zeewater, en tritium kan in grote hoeveelheden gemaakt worden door lithium met snelle neutronen (van de reactor!) te bestralen. Men bekomt op die manier brandstof die ons voor honderden miljoenen jaren zonder probleem van energie kan voorzien. Er is ook geen “afvalprobleem”: helium is een onschuldige stof. *In de mate dat men er dus in zou slagen om deze reactie commercieel uit te baten, zijn al onze energieproblemen voorgoed opgelost.* Dat is slechts gedeeltelijk waar natuurlijk, want de hele installatie wordt behoorlijk geactiveerd door de sterke neutronenflux. Maar er is ten minste geen direct nucleair afval meer van de brandstof. Ook qua veiligheid dient men te stellen dat een fusiereactor inherent passief veilig is ; bovendien heeft men veel kleinere hoeveelheden radioactieve stoffen in de reactor (milligrammen in plaats van tonnen) dan in een fissiereactor¹⁵⁵. Kernfusie heeft nog een ander voordeel. We zien dat bij de reactie enerzijds een helium atoom (alfa-deeltje) vrijkomt dat binnen in het plasma zal blijven (en de 3.5 MeV moeten dienen om het plasma verder te verhitten), terwijl 14 MeV vrijkomt onder de vorm van snelle neutronen, en die zullen dienen om extern warmte te produceren (en bijvoorbeeld stoom te maken om een turbine aan te drijven). Maar

¹⁵⁵Dat stoort natuurlijk de anti-nucleaire beweging niet om hier hevig tegen te protesteren en met dezelfde “problemen” voor de dag te komen als ze gewoon waren tegen kernsplijting op te werpen: “het is gevaarlijk”, “radioactief afval”, etc...
Vooral geen bruikbare oplossing aan het energieprobleem, a.u.b.

we hebben hier ook een “snel neutronenspectrum” zoals in een kweekreactor. Als dusdanig kan een fusiereactor ook dienen om bijvoorbeeld kleine actiniden te bestralen, net zoals een ADS-systeem.

Kortom, kernfusie is in alle opzichten (brandstof, afval, veiligheid) veel beter dan kernfissie... behalve een. *Het werkt nog niet.*

8.6.b Onderzoek

Het grapje (en het is jammer genoeg geen grapje) wil dat men nu reeds sinds 50 jaar zegt dat kernfusie binnen 30 jaar operationeel gaat zijn. De wetenschappelijke en technologische uitdagingen zijn jammer genoeg enorm, en men heeft tijdens het hele onderzoek (dat dus al meer dan 50 jaar aan de gang is) het probleem gekend dat men “voor elk opgelost probleem men er twee nieuwe vond”. Niettemin maakt men vooruitgang. Er is een Europees project, JET (Joint European Torus) dat in 1978 van start ging en tot heden ten dage loopt (het apparaat staat in de UK, Culham). In een eerste fase heeft men er niet-nucleaire plasma's bestudeerd, en in de jaren '90 heeft men er uiteindelijk D-T mengsels in toegepast. Een belangrijke waarde is de verhouding tussen hitte, geproduceerd in het plasma door de kernreactie, en externe verhitting. Men noemt die verhouding: de Q -factor. Principieel gezien moet Q natuurlijk groter dan 1 zijn in een echte reactor, maar om het geheel zelfs maar potentieel exploiteerbaar te maken, schat men dat men een Q -factor van 15 of 20 moet bereiken. Met JET is men er in geslaagd $Q = 0.7$ te bereiken in 1997.

Het volgende project is ITER (zal in Cadarache in Frankrijk gebouwd worden en moet vanaf 2011 zijn werkzaamheden beginnen). ITER is een grotere installatie waar men gedurende 30 jaar onderzoek gaat doen, en de bedoeling van ITER is (binnen 30 jaar...) aan te tonen dat men $Q = 10$ kan bereiken. ITER moet de technologische haalbaarheid van een nog te ontwerpen reactor DEMO aantonen. Men gaat de ITER resultaten gebruiken om DEMO te ontwerpen, en men hoopt daar dus een beeld van te hebben tegen 2030. De bedoeling van DEMO is om $Q=25$ aan te tonen, en een 2 GW elektrische productie kunnen aan te tonen. Met andere woorden: ITER moet alle technisch/wetenschappelijke problemen van fusie aanpakken, en DEMO moet dan dienen om de industriële haalbaarheid te onderzoeken tegen 2040 of 2050... De commerciële haalbaarheid zal dan voor na DEMO zijn.

8.6.c Praktisch

Zoals uit het bovenstaande volgt, weet men dus nog niet goed of en wanneer, en tegen welke condities het industrieel mogelijk gaat zijn om elektriciteit met kernfusie te produceren. Het potentieel is groot (een uiteindelijke oplossing voor het energieprobleem), maar het ziet er niet naar uit dat we praktische resultaten moeten verwachten in het grootste deel van de 21ste eeuw. Met andere woorden, kernfusie kan geen deel uitmaken van enige maatschappelijke planning op dit ogenblik: het verkeert louter in een onderzoeksstadium.

8.7 Besluit

Van de alternatieve energiebronnen zonne- en wind energie stellen we het volgende vast: *thermische zonne-energie kan gemakkelijk een niet verwaarloosbaar deel van het fossiele brandstof gebruik, en een deel van het elektriciteitsgebruik vervangen*, in al die toepassingen waar we warm

water, of verwarming bij relatief lage temperatuur nodig hebben. De technologie bestaat, is niet te duur en zou best zo snel mogelijk op grotere schaal toegepast worden.

Daarentegen, wat betreft het produceren van elektriciteit op grote schaal, en dus *voor het bijna volledig vervangen van fossiele brandstof centrales en eventueel kernenergie*, zijn er drie soorten problemen met fotovoltaïsche energie en wind-energie:

- de plaats die het inneemt en andere ecologische impact: op grote schaal fotovoltaïsche centrales, of windcentrales bouwen, neemt heel veel ruimte in. We hebben het over gigantische installaties. Dat is het gevolg van de lage energiedensiteit van zonne- en wind energie.
- De kostprijs: voorlopig is fotovoltaïsche omzetting economisch onhaalbaar. Men moet hopen op serieuze verbeteringen in de kostprijs van de elektriciteitsproductie alvorens die optie zelfs maar aanschouwelijk wordt. Die hoop bestaat natuurlijk wel, want de technologie staat aan het begin van een schaalvergroting. De toekomst zal uitwijzen of de factor 10 of meer kan gehaald worden. Windenergie, hoewel duurder dan elektriciteit uit fossiele brandstof of uit kernenergie, en zonder veel hoop dat de prijs gaat veranderen in de toekomst, is betaalbaar als we daar een zeker offer voor willen opbrengen.
- De variabiliteit van de bron. Dit is het voornaamste probleem dat zowel aan zonne- als aan wind energie is gesteld: zij kunnen niet aan de ogenblikkelijke vraag voldoen. Als dusdanig stelt dat geen echt probleem zolang deze bron een minderheidsbijdrage in de elektriciteitsproductie heeft, omdat de regelcapaciteit van de andere bronnen deze variabiliteit kan opvangen. Daarentegen is dit probleem moeilijk oplosbaar vanaf het ogenblik dat we een groot aandeel van de elektriciteitsproductie door zulk een bron willen laten produceren. Voor zonne-energie wil dat zeggen dat we de schaal van de installatie zo moeten vergroten dat we op sombere winterdagen nog aan de gemiddelde vraag kunnen voldoen, en dat we een grote hydro-elektrische buffer moeten bouwen die de dag/nacht fluctuaties kan opvangen ; voor windenergie is het probleem zo goed als onoplosbaar wegens de wispelturigheid en de onvoorspelbaarheid van de bron.

Met andere woorden: *de productie van elektriciteit door zonne- of wind energie op grote schaal, zodat het de voornaamste bron wordt, is op dit ogenblik zowel economisch als technisch zo goed als onmogelijk*. Enkel een relatief dure minderheidsbijdrage is denkbaar. Niettemin is die minderheidsbijdrage altijd “zoveel gewonnen” en dient men die niet te verwaarlozen. Het installeren van zulke centrales helpt ook om de technologie beter te ontwikkelen. Maar deze technieken moeten eerst hun “leergeld” nog betalen, en men moet eerst aantonen dat ze serieuze spelers zijn, alvorens men hierop een politiek kan baseren en eventueel, wie weet, de huidige obstakels overkomen. Indien men het vel van de beer verkoopt voor die geschoten is – zoals men doet door deze technieken voor te stellen als meerderheidsproducenten die zowel kernenergie als fossiele brandstoffen moeten vervangen, dan zou men wel eens heel bedrogen kunnen uitkomen. *Laten we deze technieken dus de middelen geven om zich te ontwikkelen, maar laten we voorlopig niet rekenen op resultaten die ze nog niet getoond hebben*.

De Engelstaligen zeggen: “the proof of the pudding is the eating”. Als men naar de huidige stand van zaken kijkt, dan stelt men het volgende vast. Enkele landen die serieuze inspanningen gedaan hebben om een significant deel van hun elektriciteitsproductie door niet-fossiele middelen te laten gebeuren (buiten hydro-elektrische opwekking), zijn Frankrijk, Zweden, Zwitserland, België en Denemarken. Frankrijk en in wat mindere mate België, Zweden en Zwitserland, hebben voor de nucleaire optie gekozen, en Denemarken voor windenergie. Niemand heeft de fotovoltaïsche weg gevolgd. Men stelt vast dat Frankrijk, startende in 1976, op een goeie twintig jaar van zo goed als

niks tot zo goed als de volledige elektriciteitsproductie door kernenergie heeft kunnen laten doorvoeren. België heeft (Doel 1 en 2 in 1975, Doel 3 in 1982, Doel 4 in 1985 ; Tihange 1 in 1975 ; Tihange 2 in 1982, Tihange 3 in 1986) in 11 jaar tijd, 56% van zijn elektriciteitsvoorziening uit kernenergie betrokken. Frankrijk is een netto exporteur geworden van elektrische energie, naar die landen die vaak met een tekort zitten (zoals Duitsland). *Met andere woorden, op een relatief korte tijd kan kernenergie ingezet worden om een groot deel van de elektriciteitsvoorziening over te nemen.*

Denemarken is gestart met zijn windenergie programma in 1988 en 15 jaar later had het nationaal 16% (en in West-Denemarken, 20%) van zijn elektriciteitsproductie door windenergie opgewekt ; het moet hierbij op zijn grote burens steunen om als buffer te dienen.

Het Deense voorbeeld, geconfronteerd met het Franse en Belgische voorbeeld, toont aan dat men op dezelfde tijdsschaal een veel kleinere fractie van het elektriciteitsverbruik, met veel meer problemen, kan overschakelen van fossiel naar “alternatief”, dan van fossiel naar “kernenergie”. In de mate dat er enerzijds haast is om weg te gaan van fossiele brandstoffen, en een grote fractie van het fossiele brandstof gebruik voor elektriciteitsproductie dient vervangen te worden, is, op dit ogenblik, kernenergie een economisch en technologisch veel meer bewezen technologie is dan alternatieve bronnen. Het lijkt wel helemaal niet het ogenblik om uit de kernenergie te stappen.

Natuurlijk weet men niet wat de toekomst zal brengen. Het is heel goed mogelijk dat binnen 20 of 30 jaar, de kaarten anders liggen. Het kan zijn dat binnen 30 jaar, een alternatieve vorm van energieopwekking technisch en economisch interessanter is dan kernenergie. Niettemin kan men dat vandaag niet stellen. Vandaag kan men enkel maar spreken over de ervaringen uit het recente verleden. Dat verleden toont ons het volgende aan: in de mate dat kernenergie voor geen noemenswaardige problemen zorgt, is er geen reden om geen grote stap te maken die met kernenergie fossiele brandstoffen bespaart. De oplossing bestaat, is op grote schaal aangetoond, en is relatief snel uitvoerbaar. Indien men ernstig is met het terugdringen van fossiel brandstof verbruik, is dit de aangetoonde oplossing. Een poging tot grootschalig gebruik van alternatieve energieën is er niet in geslaagd om in eenzelfde tijdsinterval een gelijkaardige prestatie neer te zetten met eenzelfde mate van succes, ook al is dit later gebeurd en dus met meer technologische kennis.

We zijn geconfronteerd met twee mogelijke manieren om de fractie fossiele brandstof verbruik in de elektriciteitsproductie terug te schroeven:

- een manier die is aangetoond sinds 30 jaar, op minder dan 20 jaar in werking kan treden, en quasi volledig is (dat wil zeggen: de fractie fossiele brandstof verbruik is zo goed als volledig teruggedrongen, tot minder dan 10%), economisch en autonoom (dat wil zeggen, rekent niet op de capaciteit van anderen om bij te springen).
- een manier die reeds is geprobeerd sinds meer dan 15 jaar, en een kleine fractie fossiele brandstoffen (~20%) kan terugdringen, aan een hogere prijs, en die steunt op de buffercapaciteit van de burens en twee tot drie keer duurder is.

Met deze praktische, empirische gegevens, *lijkt het redelijk om de eerste oplossing niet alleen niet verder uit te werken, maar zelfs terug te dringen, op basis van de tweede oplossing ?*

In de tekst van de Groenen¹⁵⁶ vindt men een globale visie (droom) voor een energie-verbruikspatroon in 2030. Dat is niet ver meer weg. In die visie wordt kernenergie (natuurlijk) uitgefaseerd, en gaat men uit van allerhande hypothetische of vermeende besparingen en efficiëntie verbeteringen, om uiteindelijk uit te komen op een globaal energie gebruik (p 7) verdeeld zoals daar is voorgesteld. Ze stellen voor om 39% vernieuwbare bronnen te hebben. Laten we nu naar de elektriciteitsvoorziening kijken. In dat (wat optimistische) scenario wordt er in gans Europa in 2030 de elektriciteit voor 26% door wind geproduceerd, voor 16% door hout te verbranden, 16% hydro-elektriciteit op te wekken, door voor *ongeveer 10% steenkool en bruinkool* te verbranden *en neemt het gasverbruik met 55% toe* om 26% van de elektriciteitsvoorziening over te nemen. Deze verdeling kan er enkel komen door de groeiende tendens van groter verbruik om te buigen, en daar waar het elektriciteitsverbruik in Europa nog gestegen is met 34% tussen 1990 en 2004, gaat men ervan uit dat over een bijna twee keer zo lange periode, het verbruik met slechts 7% gaat toenemen, wat dus een relatieve besparing inhoudt van een factor 10 in de groei, zo niet “missen” we bijna een derde van in onze energie-portefeuille. Zoals we gezien hebben is het heel optimistisch, gezien het Deense experiment, om te denken dat we in 2030 26% van de elektriciteitsproductie *over gans Europa* door windenergie gaan laten opwekken zonder grote bufferbuur, tenzij de Russen die rol op zich willen nemen – als compensatie voor de grote gasfactuur misschien – en waarschijnlijk zal dat aandeel lager liggen. Maar goed. We hangen dus voor een deel af van steenkool en vooral, nog 50% meer dan nu, van aardgas (de Russen...). Gezien de heel optimistische inschattingen voor de wind-energie productie en de “optimistische” schatting van de daling in (economische ?) groei, zal het echte aandeel in aardgas en steenkool waarschijnlijk veel hoger liggen. Op 1 maart 2007 heeft Duitsland bijvoorbeeld gepland om 26 nieuwe bruinkool centrales te bouwen... die zullen daar in 2030 nog staan.

In het “kernenergie” scenario hebben we zo goed als geen fossiele brandstoffen meer nodig voor de elektriciteitsproductie binnen 20 jaar, gezien de Franse (maar ook in mindere mate, de Zweedse en Zwitserse en ook Belgische) ervaring, en kan het verbruik groeien, of niet, naargelang de burger en de economische evolutie dat beslist. Men kan ook zoveel, of zo weinig, hernieuwbare bronnen toevoegen als men wil en men is niet gebonden aan hun prestaties, maar men kan ze best mee opnemen. Men vervangt gewoon, in het bovenstaande scenario, het gas- en steenkool verbruik door kernenergie en eventuele hernieuwbare bronnen, met kernenergie in een hoeveelheid die niet veel groter is dan vandaag het geval is als de optimistische visie uitkomt, en die des te groter is naarmate het optimisme over wind, zon, hout en gebrek aan economische groei luwt. Met andere woorden, *de extra conditie die hier is gesteld, namelijk het uitfaseren van kernenergie, is haast volledig verantwoordelijk voor de nood aan fossiele brandstoffen voor elektriciteitsproductie!* Dit brengt ons terug tot het originele argument waarop dit pleidooi is gesteund: elke vorm van terugdringen van CO₂/fossiele brandstof gebruik zonder kernenergie zal minder efficiënt zijn dan met de optie van kernenergie. In het voorgestelde scenario dat, we herhalen het, van heel optimistische premissen uitgaat, komt nog ongeveer 36% van de elektriciteitsproductie uit fossiele middelen. Met de kernenergie optie kan dat zo goed als volledig worden geëlimineerd met de huidige bestaande fractie kernenergie – heden ten dage is inderdaad 33% van de elektriciteitsproductie in Europa van kernenergie. *Het Groene voorstel heeft dus kernenergie effectief... door fossiele brandstoffen vervangen.*

In de mate dat het terugdringen van CO₂ uitstoot/fossiel brandstofverbruik een belangrijk probleem vormt, en kernenergie een aanvaardbare optie is, is het onbegrijpelijk dat die optie wordt geweerd

156 Men kan de tekst hier vinden: http://www.greens-efa.org/cms/topics/dokbin/155/155777.a_vision_scenario_for_climate_and_energy@en.pdf

om het probleem aan te pakken, gezien het een significante bijdrage kan geven, tenzij die optie een obstakel vormt voor het doorduwen van een ideologisch gedreven agenda.

8.8 Uitdaging!

Ik daag hierbij mijn Belgische mede-ecologen die uit de kernenergie willen stappen uit om volgende opdracht te aanvaarden:

Uitstappen uit fossiele brandstoffen voor elektriciteit tegen 2030.

Twee randvoorwaarden:

1. Een **onmiddellijk moratorium** op elke nieuwe constructie van elektriciteitscentrales die op fossiele brandstoffen werkt (gas, steenkool, stookolie...)
2. Een **uitfasering van steenkool centrales tegen 2025**.
3. Een uitfasering van alle centrales op fossiele brandstoffen tegen 2030.

Toegelaten uitzonderingen:

1. Alles wat noodvoedingen en piekvoedingen betreft, die normaal gezien minder dan 5% van de tijd operationeel zijn
2. Alle centrales die CO₂ sekwestratie gebruiken en hierbij kunnen aantonen dat die CO₂ voor minstens 50 miljoen jaar niet gaat vrijkomen.

Je doet het zoals je wil, met zoveel windmolens, zonnepanelen, biobrandstoffen, eenhoorns en boskabouters als je lief is.

Ik zal zelf 2 oplossingen voorstellen, die tonen dat mijn uitdaging realiseerbaar is:

- Gezien het totale Belgische jaar-stroomverbruik gemiddeld ongeveer 10 GW elektrisch is, volstaan 10 EPR reactoren die elk 1.6 GW-elektrisch kunnen voorzien, wat ons een reserve capaciteit van 60% geeft voor pieken. *Vanaf 2010, om de twee jaar de bouw van een nieuwe centrale beginnen brengt ons tot de nodige capaciteit tegen 2030.* België heeft destijds 7 centrales gebouwd op 11 jaar, dus dit is een uitvoerbaar voorstel. De ontwerp leeftijd van EPR-reactoren is 60 jaar, dit brengt ons dus doorheen een groot deel van de 21ste eeuw. Ondertussen bouwen we zoveel windmolens en andere alternatieven als men maar wil, en in de mate dat die *betrouwbare* elektriciteit leveren, kunnen we het misschien met minder kerncentrales doen. Stel dat men tot 20% wind- en andere alternatieven gaat, dan spaart ons dat 2 EPR centrales. We volgen gewoon de evolutie van het verbruik, en de evolutie van de alternatieven. Indien tegen 2020 reeds 40% van het verbruik betrouwbaar is voorzien van elektriciteit met alternatieven, dan kunnen we tegen dan stoppen, en 6 centrales (die tegen dan in aanbouw zijn) volstaan dan. Ik geloof dat voorlopig niet, maar mijn “plan” houdt rekening met dit soort aangename verrassingen. Het kan ook zonder problemen extra (economische ?) groei ondervangen.
- Ga *elektriciteit kopen in Frankrijk*, het enige land met een betrouwbare export. Verwacht U aan een redelijk gepeperde factuur.

Merk vooral op dat mijn plan zonder problemen de doelstelling zal halen, geen economische crisis veroorzaakt en volledig flexibel is. De beurt is aan U!

Hoofdstuk 9 Argumenten tegen kernenergie

9.1 Inleiding

Zoals reeds in het inleidende hoofdstuk vernoemd, is er volgens mij een collectief bewustzijn van het verwerpelijke en onaanvaardbare van kernenergie, waarvan we de oorzaken wat geanalyseerd hebben. Dat collectief bewustzijn is deels gecreëerd en wordt onderhouden door een vocale groep anti-nucleaire activisten die meestal sterke banden hebben met de Groene ideologie, en zichzelf uitroepen als ecologische voorvechters. Vele argumenten, gebruikt door deze groepen, worden vaak zonder enig kritisch denken als “waar” aanvaard, omdat ze in resonantie zijn met wat we collectief denken te weten. Niettemin zijn vele vaak gehoorde argumenten, hoewel op het eerste zicht “evident”, in feite totaal fout op wetenschappelijk, ecologisch en economisch vlak. Met de opgedane kennis in de tekst hoop ik dat de lezer in staat is zelf de fouten in de voorgestelde argumentatie in te zien. Er bestaan vele “pamfletten tegen kernenergie” ; ze gebruiken bijna allemaal gelijkaardige argumenten. We hebben beslist om er enkele in detail te analyseren.

9.2 De 40 redenen tegen nucleaire energie van de Europese Groenen.

Als illustratie van de bovenstaande algemene argumentatie, zie hier de officiële lijst¹⁵⁷ van argumenten van de Europese Groenen tegen kernenergie. Ze argumenteren waarom we bestaande centrales zouden moeten sluiten, of waarom we geen nieuwe centrales zouden moeten bouwen, of waarom we geen verbeteringen aan de kernenergie technologie zouden mogen inbrengen.

Het document begint met enkele vermeende argumenten van de “vijand” die voor kernenergie pleiten. Deze zijn: het voorziene gebrek aan fossiele brandstoffen, de mogelijke klimaatsverandering en de nood van de ontwikkelingslanden om energiebronnen te ontwikkelen. Een heel korte samenvatting van de 40 argumenten is dan gegeven, die moeten duidelijk maken dat kernenergie geen enkele oplossing kan brengen.

De eerste resem argumenten valt onder de titel “kan kernenergie ons klimaat redden?”

1. Elektriciteit is niet synoniem met energie. Elektriciteitsproductie is een verwaarloosbaar klein onderdeel van de totale energieproductie in Europa, waar elektriciteitsverbruik slechts 6% is van het totale energieverbruik.
2. Kernenergie productie is beperkt vergeleken met fossiele productie. Slechts 17% van de wereldwijde elektriciteitsproductie is van nucleaire oorsprong.
3. Kernenergie productie is aan het verminderen wegens de vermindering in bouw van nieuwe centrales. Er worden op dit ogenblik niet genoeg nieuwe centrales gebouwd om de bestaande reactoren in de komende twintig jaar te vervangen.
4. De reserves van nucleaire brandstof zijn beperkt en zelfs kleiner dan die van fossiele brandstoffen. De geschatte uraniumreserves stellen minder dan de helft van de energie voor

¹⁵⁷http://www.greens-efa.org/cms/default/dokbin/170/170666.nuclear_and_climate_change@en.pdf

dan de geschatte fossiele brandstof reserves. We kunnen, aan huidig tempo, nog maar 60 jaar voort met de bestaande uranium reserves.

5. Het klimaatprobleem is te dringend om nu nog opgelost te worden door kernenergie. We moeten in de komende twintig jaar drastisch de kooldioxide uitstoot verminderen, en geen enkel nucleair programma zal op tijd komen.
6. Er is geen internationale consensus over het gebruik van kernenergie, sommige landen verwerpen het. Kernenergie kan enkel een oplossing vormen als het internationaal aanvaard is door een groot aantal landen, wat vandaag niet het geval is.
7. De investering in kernenergie is veel hoger dan in andere vormen van energieonderzoek. Onderzoek naar bijvoorbeeld besparingen is veel minder kostenrovend dan onderzoek naar kernenergie.
8. De mensheid kan nu een keuze maken. Kernenergie kan de CO₂ uitstoot binnen de 20 volgende jaren met slechts 5 gigaton verminderen, terwijl we dat met 25 tot 50 gigaton moeten doen. Kernenergie is dus slechts een optie.
9. Kernenergie is niet compatibel met andere opties die meer gedecentraliseerd zijn.
10. Kernenergie is gevoelig aan klimaatverandering (probleem met koelwater). Tijdens de hittegolf in 2003 moest men in Frankrijk het dak van sommige reactoren met water afkoelen.
11. Emissies van kerncentrales zijn niet 0, als men ook met de bouw rekening houdt. Men zal bovendien altijd gascentrales nodig hebben om de piekproductie op te vangen.
12. Hernieuwbare energieën groeien sneller dan kernenergie.
13. Vernieuwbare energiebronnen nemen nu al over van kernenergie productie wereldwijd. In China zijn waterverwarmers op het dak nu reeds equivalent aan de helft van de huidige nucleaire capaciteit.
14. Er is veel meer werkgelegenheid in de vernieuwbare energieën dan in kernenergie.

De volgende serie argumenten “kernenergie en ontwikkeling”

15. kernenergie leidt niet tot ontwikkeling
16. kernenergie leidt tot corruptie in zuidelijke landen
17. Er zijn voorbeelden van mislukte pogingen tot het bouwen van centrales in het zuiden
18. Kernenergie en nationalisme.
19. Internationale akkoorden zijn ambigu
20. Kernenergie en geopolitieke invloeden
21. Kernenergie is door de zuidelijke landen geweigerd in het Kyoto akkoord
22. Vertragingen in de bouw van centrales veroorzaken veel kosten voor arme landen
23. Er is geen goed elektriciteitsnet aanwezig om gecentraliseerde productie te verdragen
24. Kerncentrales zijn te groot voor arme landen
25. Er bestaan geen kleine reactoren
26. Kernenergie lost het probleem van de armoede en ongelijkheid niet op
27. De afwezigheid van democratie maakt kernenergie gevaarlijk in sommige landen

Algemene argumenten tegen kernenergie

28. Het risico op een ongeluk in een centrale, of tijdens het transport is niet nul.
29. Het vraagstuk van het afval: er bestaat geen oplossing voor het langdurig hoogradioactief afval dat dus door toekomstige generaties zal moeten worden aangepakt.
30. De mythe van de brandstofherwerking: in tegenstelling tot de beweringen van de nucleaire sector, kan men het plutonium maar 1 keer hergebruiken in MOX, en nadien is het ongeschikt voor een tweede doorgang.
31. Het vraagstuk van de ontmanteling van oude kerncentrales. We zadelen de toekomstige generaties op met het probleem en de kosten voor de ontmanteling van de bestaande centrales.
32. Proliferatie. Civiele nucleaire technieken kunnen omgevormd worden tot militaire toepassingen.
33. Doelwit van oorlog en terrorisme: kerncentrales zijn niet bestand tegen terroristische aanslagen, evenals heropwerkingsfabrieken. De heropwerkingsfabriek in La Hague bevat 67 keer meer Cesium dan is vrijgekomen tijdens het Chernobyl ongeluk.
34. Europa is vastgeraakt in het moeras van Euratom. Sinds de oprichting van Europa is Euratom er deel van en bevordert de civiele toepassing van kernenergie.
35. Kernenergie betekent unfaire handel (subsidies in onderzoek). Er zijn duistere subsidies waar de kernenergie sector van profiteert.
36. Kernenergie is verbonden met nationalisme. De problemen die kernenergie stelt kunnen enkel maar op internationaal vlak aangepakt worden, terwijl het vaak nationale programma's zijn. Naties kunnen verdwijnen.
37. De mythe van waterstof: het idee om waterstof te produceren (met kernenergie) om die waterstof dan als transport brandstof te gebruiken is geconfronteerd aan technische en economische problemen. Bovendien komt die oplossing veel te laat uit de bus, en is ze gebaseerd op de hypothese van goedkope elektriciteit.

Posities voor en tegen kernenergie

38. Publieke opinie is ertegen in het algemeen. Opinie peilingen in Europa sinds dertig jaar tonen aan dat de publieke opinie in het algemeen een slecht beeld heeft van de kernenergie activiteit. Nieuwe kernenergie projecten zullen dus te kampen hebben met een publiek verwerpen.
39. Groene organisaties zijn ertegen. Zij vinden kernenergie ecologisch niet verantwoord.
40. Voorstanders van kernenergie zijn bizarre mensen (een voorbeeld is geciteerd). Onbegrip is getoond voor wetenschappers die op andere vlakken ecologisch bewustzijn tonen, en toch argumenteren in het voordeel van kernenergie.

Ik behoor dus tot die klasse van bizarre mensen.

Behalve de argumenten voor kernenergie in ontwikkelingslanden (waarvan sommige juist zijn, en sommige ietwat lachwekkend, zoals dat kernenergie plots ongelijkheid en armoede zou moeten oplossen), die ons hier niet aangaan – we pleiten hier niet voor kernenergie in ontwikkelingslanden, maar in Westerse landen ; beter nog, we pleiten voor het behoud van kernenergie in landen zoals

België die al een kernenergie programma hebben, en waar de argumenten in de klasse “ontwikkelingslanden” dus niet van toepassing zijn, vallen de argumenten in drie klassen:

- de klasse van argumenten die de anti-nucleaire beweging zelf veroorzaakt heeft of veroorzaakt (Z)
- de klasse van wetenschappelijk foute argumenten (F)
- de klasse van stroman argumenten: het zijn geen argumenten tegen kernenergie, maar worden zo voorgesteld (S)

Sommige argumenten behoren tot meerdere van deze categorieën tegelijk.

Laten we ze analyseren: we beginnen met de “nieuwe” argumenten tegen kernenergie in verband met de eventuele klimaatsverandering.

1. elektriciteit is niet synoniem met energie.

Dat is gedeeltelijk juist natuurlijk, maar een stroman argument (S). Wat telt is het aandeel van de elektriciteitsproductie in de CO₂ uitstoot, niet in de “energie-aanwending”. Dat draait wereldwijd rond de 30-40%. Niettemin is het ook gedeeltelijk fout (F), want met de aanwezigheid van overvloedige elektriciteit kan men naar elektrische transportmiddelen (trein, elektrische of hybride auto’s) overstappen. We hebben ook eerder gezien dat dat argument kracht verliest als men de juiste vergelijking maakt, en geen thermisch vermogen met elektrisch vermogen gaat vergelijken. In dat geval ziet men dat elektriciteit in het Westen bijna de helft van de totale toegepaste energie uitmaakt.

Zonne- of windenergie kan (behalve zeilboten) ook niet direct zorgen voor het energieprobleem van de transportsector zonder via elektriciteit om te stappen. Als dusdanig is kernenergie niet beter of slechter dan vernieuwbare bronnen om het transportprobleem aan te pakken. In de mate dat dit dus een argument tegen kernenergie is, is het ook een argument tegen alternatieve bronnen of besparingen in de elektriciteitssector. Maar in de mate dat vernieuwbare energiebronnen niet over voldoende aanbod beschikken om overvloedig en goedkoop elektriciteit te produceren, zal dit een sterke rem zijn op de overschakeling van fossiele brandstof motoren op elektrische motoren voor personenverkeer. Het heeft immers geen zin om een elektrische auto te bouwen als de elektrische centrale die de stroom levert, zelf op fossiele brandstoffen draait. Overstappen op treinvervoer bijvoorbeeld, heeft enkel maar een positief effect indien de energie van die trein zelf niet van fossiele brandstoffen komt, of het nu diesellocomotieven zijn, of elektrische treinen die hun elektriciteit van steenkoolcentrales betrekken.

2. kernenergie productie is beperkt vergeleken met fossiele productie

(Z,S). Ten eerste, wiens schuld is het dat er niet meer kernenergie wordt gebruikt? Wie is hier met zijn twee voeten op de rem gaan staan? En ten tweede, het is toch niet omdat het aandeel kernenergie kleiner is, dat we het nog kleiner moeten maken om de fossiele productie terug te dringen? Bovendien kan men hetzelfde zeggen van zonne- of windenergie... is het omdat de zonne-energie productie vandaag (veel) kleiner is dan de fossiele productie dat men elke vorm van zonne-energie productie moet opgeven?

3. Kernenergie productie is aan het verminderen wegens de vermindering in bouw van nieuwe centrales

(Z,S). Ja, en opnieuw, door wiens toedoen zijn er veel minder centrales gebouwd de laatste tijd? En in welke mate is de penurie in kerncentrales als we niet starten met er nieuwe te bouwen, een argument tegen de bouw van nieuwe centrales?

4. Reserves van nucleaire brandstof zijn beperkt en zelfs kleiner dan die van fossiele brandstoffen

(F) We verwijzen naar hoofdstuk 6. De bewering is fout als we beseffen dat de huidige verbruikte brandstof nog ongeveer 99% van de energie bevat die kan gebruikt worden. Er in ons huidig "afval" nog voldoende energie aanwezig om een paar duizend jaar aan hetzelfde tempo voort te gaan, door het toepassen van kweekreactoren (die hun functie al getoond hebben). Het is ook nog om een andere reden fout: zelfs al mochten we slechts voor, zeg maar 60 of 80 jaar nucleaire brandstof hebben, dan is dat nog steeds goed genoeg om het dringende probleem van CO₂ uitstoot in de 21ste eeuw op te lossen, en ons tijd te kopen om bijvoorbeeld, hernieuwbare bronnen of kernfusie ten volle tot ontwikkeling kunnen te brengen of met een andere oplossing voor de dag te komen.

5. Het klimaatprobleem is te dringend om nu nog (volledig) opgelost te worden door kernenergie.

(Z,S) Dit is waarschijnlijk waar op korte termijn (zeg maar, 15 jaar). Maar waarom moeten we het probleem erger maken? En wiens schuld is het dat het aandeel kernenergie op dit ogenblik niet groot genoeg is om het probleem vermeden of verminderd te hebben in de eerste plaats? Wie heeft destijds gepleit voor steenkool in plaats van kernenergie? Maar er is een ander serieus probleem met dit argument. Indien dringendheid aan de orde van de dag is, en zelfs de meest optimistische Groene jongen zal wel niet beweren dat alternatieve bronnen alle fossiele brandstofproductie van elektriciteit kan vervangen binnen 15 jaar, dan moeten we het onderste uit de kan halen. Als kernenergie zijn steentje kan bijdragen (zeg maar, 36% of zo in Duitsland), waarom dat steentje dan weigeren? Is het probleem dringend, of is het niet dringend?

We verwijzen naar de argumentatie uiteengezet in hoofdstuk 1 waar het effect van kernenergie op de CO₂ uitstoot wordt besproken. Men kan niet stellen dat kernenergie een verwaarloosbaar effect heeft op de kooldioxide uitstoot.

6. Er is geen internationale consensus over het gebruik van kernenergie, sommige landen verwerpen het.

(Z) Opnieuw, dankzij wie? Maar is het omdat men mensen overtuigd heeft van het slechte van kernenergie, door verkeerde argumenten, dat kernenergie nu plotseling ook echt slecht geworden is? Is het omdat Hitler de Duitsers overtuigd had van de schuld van de Joden, dat de Joden ook echt slecht waren?

7. De investering in kernenergie is veel hoger dan in andere vormen van energie onderzoek.

(F) Behalve in enkele landen, zoals Frankrijk, gebeurt er maar weinig onderzoek naar kernenergie, gefinancierd buiten de sector zelf, in vergelijking met andere onderzoekstakken. Het grootste deel van het onderzoek is trouwens reeds achter de rug. De klassieke kernenergie is een volwassen technologie. Het is enkel op het vlak van de reactoren met snelle neutronen dat nog veel verbeteringen zijn te verwachten, maar daar gebeurt op dit ogenblik slechts een bescheiden hoeveelheid onderzoek naar; voorlopig gaan daar geen monster budget naar toe. Vier vijfde van het Europese budget voor "kernenergie" gaat naar kernfusie (ITER), en slechts een vijfde naar fisische kernenergie (nieuwe reactoren, afvalverwerking en opberging...)

Maar zelfs in de mate dat dit argument juist zou zijn, moeten de (vele) landen waar geen onderzoek naar kernenergie gebeurt nu een enorme voorsprong hebben in andere energievormen en de toepassingen moeten nu de markt overstromen... In al die landen moet men nu het fossiele brandstof gebruik serieus hebben teruggedrukt als dat waar is... maar dat is duidelijk niet het geval. Het blijkt dat de landen die de hoogste fractie van kernenergie hebben, ook de laagste productie hebben van kooldioxide, en bovendien de sterkste daling van die productie over de laatste 30 jaar

hebben gekend. *M.a.w. de afwezigheid van onderzoek naar kernenergie is geen oorzaak van hoog niveau van onderzoek naar andere technologieën, en helemaal geen positieve invloed op het terugdringen van kooldioxide productie.* Het stoppen van het onderzoek naar kernenergie zou dus geen significante invloed hebben op de ontwikkeling van andere takken (het gaat hem bovendien om andere specialisten). Zowel naar alternatieven als naar kernenergie moet onderzoek gedaan worden. Hoe meer we weten, hoe beter we die kennis intelligent kunnen aanwenden. Een pleidooi voor het stoppen van onderzoek komt altijd enkel uit de hoek van het ideologisch gedreven fundamentalisme. Kennis schaadt enkel zij die leugens willen vertellen. Tenslotte kan men stellen dat de voorbije investeringen in kernenergie rendabel waren: ze hebben ons een werkende technologie opgeleverd die het energieprobleem daadwerkelijk kan oplossen als we dat willen. Het is verre van duidelijk dat, indien men dat geld anders geïnvesteerd had, we nu over een werkende, bruikbare en operationele technologie zouden beschikken.

8. De mensheid kan nu een keuze maken. Kernenergie kan de CO₂ uitstoot binnen de 20 volgende jaren met slechts 5 gigaton verminderen, terwijl we dat met 25 tot 40 gigaton moeten doen. Kernenergie is dus slechts een optie.

(S) Ok, als dat waar is – we denken dat het potentieel van kernenergie veel groter is en eerder van de orde van de helft van het probleem kan oplossen – dan kan kernenergie in de 20 komende jaren zeg maar 20% van het probleem oplossen. Kernenergie is 20% van de oplossing is een argument tegen kernenergie? De meeste “Groene” voorstellen van energieverbruik stellen trouwens een kleinere reductie in CO₂ uitstoot voor dan de voorstellen met kernenergie (zie mijn uitdaging!).

9. Kernenergie is niet compatibel met andere opties die meer gedecentraliseerd zijn

(F) Dat is technisch totaal fout. Er is geen enkel probleem om lokale productie met gecentraliseerde productie te combineren in een vertakt netwerk zoals dat in Europa aanwezig is. Het gebeurt nu reeds en is enkel een kwestie van netwerkbeheer. Reeds vandaag zijn in Duitsland verschillende lokale windcentralities op het algemene net aangesloten. Het is zelfs ironisch dat de grootste netwerkproblemen helemaal niet van kerncentrales, maar wel van windmolens komen en dat dit het grote probleem van windenergie op grote schaal is. Gelukkig maar dat de netwerken heel vertakt zijn, zodat men kan trachten de Deense fluctuaties van hun windenergie op te vangen door Zweedse waterkracht- en kerncentrales!

10. Kernenergie is gevoelig aan klimaatverandering (probleem met koelwater).

(S,F) Het hangt er ten eerste van af hoe en waar de centrales gebouwd zijn: aan de zee is dat geen probleem, bijvoorbeeld, er is altijd zeewater. Het probleem van koelwater is trouwens niet enkel verbonden met kernenergie, maar met elke vorm van thermische elektriciteitsopwekking. Gecombineerde cyclus gascentrales of centrales op biobrandstoffen lijden aan dezelfde problemen.

Maar een argument tegen kernenergie zou dus zijn dat als we geen oplossing vinden voor het klimaatprobleem dat door CO₂ veroorzaakt wordt (en waartoe kernenergie zijn steentje kan bijdragen) en Europa bijvoorbeeld een woestijn wordt, dat kerncentrales dan een probleem gaan hebben in die woestijn. Bizarre logica: een mogelijke oplossing van een probleem is geen oplossing, omdat de oplossing in de problemen komt als we geen oplossing vinden...

11. Emissies van kerncentrales zijn niet 0, als men ook met de bouw rekening houdt. Men zal bovendien altijd gascentrales nodig hebben om de piek productie op te vangen.

(S,F) Als we de emissies van de hele kernenergie sector beschouwen, dan zijn die ongeveer even groot als die van windkracht centrales, een beetje slechter dan die van stuwmeren, en veel beter dan

die van zonne-energie. Maar de emissies zijn in elk geval veel kleiner dan die van de gas-centrales (of steenkoolcentrales) die *in de praktijk* kerncentrales gaan vervangen in elk uitstap schema!

Het grappige is trouwens in de omgekeerde richting waar: *een steenkoolcentrale brengt meer radioactieve stoffen in de omgeving dan een kerncentrale!* Inderdaad, de kleine hoeveelheid uranium en vooral radium die aanwezig is in steenkool, komt ofwel in de rook, ofwel in het as terecht, en als men de balans maakt, zijn de emissies per jaar veel groter dan van een equivalente energieproductie door kernenergie! Steenkool bevat ongeveer 2 tot 10 ppm (parts per million, miljoenste) uranium en radium. Een 1 GW elektrisch centrale verbruikt ongeveer 2 miljoen ton steenkool per jaar, en *brengt bijgevolg tussen de 4 en de 20 ton uranium en radium per jaar* in de omgeving.

(F) Kerncentrales hebben geen gascentrales nodig om het variërende verbruik op te vangen, terwijl variabele bronnen dat natuurlijk wel nodig hebben. Kerncentrales kunnen het verbruik volgen tot variaties van 5% per minuut, en 10% bruusk. In Frankrijk, waar dus 78% van de elektriciteit uit kernenergie komt, heeft men geen noemenswaardige problemen om het verbruik, zonder massief gebruik van gas centrales, te volgen. Het is zelfs zo dat Frankrijk zijn burens helpt met hun verbruikspieken! We verwijzen naar hoofdstuk 5.

12. Vernieuwbare energieën groeien sneller dan kernenergie.

(S,Z) Ten eerste, het feit dat kernenergie niet veel meer groeit is wiens schuld? Wie heeft daarvoor hard geijverd? Maar “groei” is natuurlijk relatief. Als ik vandaag 1 Euro verdien, en morgen 2, dan heb ik mijn omzet met 100% verdubbeld op 1 dag tijd, iets wat Microsoft niet kan. Ben ik daarom veel meer waard dan Microsoft? In het begin groeit men altijd veel meer dan wanneer men maturiteit bereikt.

Maar ten tweede, het is een goede zaak dat vernieuwbare energieën (die nog in een embryonaal stadium zijn op dit ogenblik) snel groeien. We zullen ze hard nodig hebben om de fossiele brandstoffen helpen weg te drukken. Maar als een “volwassen” techniek zoals kernenergie al “te laat komt” in de komende 20 jaar, hoe kan men dan hopen dat een embryonale techniek op tijd gaat komen, en bovendien nog die andere techniek helemaal gaat vervangen? Opnieuw, is 't dringend, of is 't niet dringend?

13. Vernieuwbare energiebronnen nemen nu al over van kernenergie productie wereldwijd.

(S,F) De meeste plaatsen waar de bijdrage van kernenergie in de elektriciteitsproductie is verminderd, is die productie overgenomen door fossiele brandstof centrales. Nergens ter wereld heeft men massief kernenergie door alternatieven kunnen vervangen.

14. Er is veel meer werkgelegenheid in de vernieuwbare energieën dan in kernenergie.

(S) We moeten een energieprobleem oplossen, geen werkloosheidsprobleem. Bovendien is de ontwikkeling van vernieuwbare energieën een goede zaak, waar ik zeker niet tegen pleit. Ik pleit voor een samengaan van kernenergie en vernieuwbare energieën om het CO₂ probleem, het fossiele brandstof penurie-probleem en een geopolitiek probleem aan te pakken. Ik zou zeggen dat indien we ons zowel toelagen op kernenergie als op vernieuwbare energieën, dan hebben we nog meer werkgelegenheid. Het is in de sector van de fossiele brandstoffen dat er niet veel hoog-technologische banen te scheppen zijn... (F) *De kernenergie sector is een energiesector waar meer dan 90% van de investeringen in Europa blijven*, en bovendien is het een hoog-technologische sector die de competitiviteit van de industrie bevordert door toegepast wetenschappelijk onderzoek (veel materiaalonderzoek bijvoorbeeld) te stimuleren, op dezelfde wijze, of misschien nog sterker

dan de sector van de alternatieve energieën. Het is bijgevolg fout te beweren dat er veel meer hoog-technologische banen gaan gecreëerd worden door alternatieven dan door kernenergie.

We slaan, zoals gezegd, de argumenten tegen kernenergie in ontwikkelingslanden over. We zijn er inderdaad ook van overtuigd dat dit geen goed idee is. Chernobyl indachtig, maar zovele andere ecologische rampen in ex-communistische landen en ontwikkelingslanden indachtig, hebben veilige centrales slechts zin in hoog-ontwikkelde landen met een zekere democratische (en dus veiligheids-) cultuur. Kernenergie is een hoog technologisch gebeuren als het veilig wil gebruikt worden, en er is bovendien een potentieel proliferatie probleem.

Daarentegen, laten we naar de algemene argumenten tegen kernenergie (deze keer los van het klimaatprobleem) kijken. Zij zijn de oudste argumenten (nog voor het klimaatprobleem aan de dagorde kwam). Zij raken een aantal echte aspecten aan, die niet ideologisch gekleurd zijn in tegenstelling tot vele van de bovenstaande argumenten. Er zijn ook wetenschappelijk verantwoorde antwoorden op deze legitieme vragen:

28. Het risico op een ongeluk in een centrale, of tijdens het transport

Dat risico is langs alle kanten geanalyseerd, we hebben dat uitvoerig behandeld. Indien men als “aanvaardbaar risico” de andere risico’s beschouwt die maatschappelijk aanvaard worden (autoverkeer, vliegtuigverkeer, medisch onderzoek...), of die ons door de natuur opgelegd worden (zoals kosmische straling), dan kan men gemakkelijk aantonen dat het objectieve risico van kernenergie verwaarloosbaar klein is in vergelijking hiermee, en dat men (in het Westen) bovendien draconische maatregelen treft om zelfs een elders aanvaard risico (zoals in de chemische industrie) nog orden van grootte kleiner te maken. Zelfs een “verschrikkelijk” ongeluk (dat van een veel grotere schaal is dan denkbaar in een Westerse installatie) als Chernobyl is het einde van de wereld niet, en als men de objectieve cijfers bekijkt, gebeuren er veel vaker veel ergere dingen in de wereld. Het totale aantal doden wereldwijd ten gevolge van het Chernobyl ongeluk is op ongeveer tien duizend geschat (een kleine honderd direct, en de rest door schatting van het aantal extra kanker gevallen in de komende 50 jaar). Dat is veel minder dan het aantal doden *per jaar* op de weg in Europa. Binnen tweehonderd jaar is de lokale contaminatie radioactief vervallen. *Men heeft ook de zeevaart niet afgeschaft omdat de Titanic gezonken was.* Niettemin kan men inderdaad niet ontkennen dat het kernenergie gebeuren een *potentieel* gevaarlijke technologie is, wat wil zeggen dat ze gevaarlijk kan worden als men geen maatregelen treft. De manier om van een potentieel gevaarlijke techniek een techniek met objectief laag risico te maken, is door het toepassen van een strikte veiligheidscultuur.

29. Het vraagstuk van het afval

Het vraagstuk van het kernafval is ook grondig bestudeerd ; we verwijzen naar hoofdstuk 6. Er bestaat een referentieoplossing, die echter door de Groenen heel sterk bevochten wordt (zonder veel rationele argumenten). De referentieoplossing bestaat erin het hoog-radioactief afval diep geologisch te bergen. Het kan aangetoond worden dat tegen dat die elementen vrij komen in de biosfeer, ze grotendeels radioactief vervallen zijn indien ze aan hun lot overgelaten worden en dat zelfs in de ergste gevallen, de dosissen hieraan te wijten veel kleiner zijn dan de natuurlijke achtergrond straling. Er zijn ook studies om radioactief afval om te vormen in minder langdurig radioactief afval, indien dat om een of andere reden gewenst zou zijn. Het is dus goed mogelijk dat we binnen 50 jaar een nog betere oplossing hebben voor dat afval. Gezien de kleine volumes afval die gegenereerd worden, is deze oplossing heel goed uitvoerbaar voor beperkte kosten, en perfect veilig en is er ondertussen geen enkele haast om het afval definitief gaan te bergen.

30. De mythe van de brandstofherwerking

Brandstofherwerking is geen mythe, gezien ze is toegepast: Phenix draait reeds 35 jaar op zijn eerste “brandstoflading”. Het is wel juist dat een reactor *met thermisch spectrum* beperkt is in het hergebruik van nucleaire brandstof. Dat is waarom prototype reactoren in het verleden gebouwd zijn met snel spectrum, die wel de brandstofherwerking volledig aankunnen. De 250 MW-elektrisch snelle reactor Phenix draait reeds 35 jaar zonder problemen. Twee realisaties van grotere industriële prototypes zijn: Superphenix in Frankrijk (een schaalvergroting van de goed werkende Phenix), en een quasi-kopie in het Duitse Kalkar. Het grappige is dat Kalkar door toedoen van de Duitse Groenen, aan het einde van de constructie, de toelating niet heeft gekregen om te functioneren, en is omgebouwd tot een van de duurste pretparken ter wereld. Superphenix heeft meer dan 10 jaar gefunctioneerd, in het begin met wat technische problemen (wat normaal is voor een prototype). In 1997, toen de Groenen in Frankrijk aan de macht kwamen in de coalitie van Lionel Jospin, is het eerste wat ze bekomen hebben, de sluiting van Superphenix, net toen die reactor sinds een paar jaar zonder problemen draaide. Als dusdanig was een essentiële schakel in de brandstofherwerking door toedoen van de Groenen in Europa volledig aan de grond gezet. De “generatie IV” reactoren die gepland zijn om het huidige park binnen 20-30 jaar beginnen te vervangen zijn door deze prototypes geïnspireerd en kunnen in principe ongeveer alle brandstof hergebruiken.

Het is dus totaal fout om te zeggen dat brandstofherwerking technisch niet mogelijk is: het is reeds gebeurd. Wat wel juist is, is dat de Groenen zich er succesvol tegen verzet hebben. Maar erger. De Groenen hebben in Duitsland bekomen dat de afgewerkte brandstof in zijn geheel als onherwerkbaar afval moet beschouwd worden, bij wettekst. Ze hebben bekomen dat het bij wet verboden is om het afval te herwerken om het volume ervan te verminderen, en de bruikbare elementen ervan te recupereren. In Duitsland is brandstofherwerking dus inderdaad een mythe geworden, maar bij wet, en door toedoen van de Groenen, niet omdat het technologisch of industrieel onmogelijk is, maar omdat het ideologisch verboden is.

Indien men bij wet zou eisen dat windmolens enkel ondergronds geplaatst mogen worden voor een of andere ideologische reden, dan zou men ook snel kunnen argumenteren dat windmolens heel inefficiënt zijn...

31. Het vraagstuk van de ontmanteling van oude kerncentrales.

De ontmanteling van een oude centrale is geen probleem want het levert grotendeels laag radioactief afval op. Maar bovendien is de prijs hiervan reeds in de huidige productieprijs van de elektriciteit geïntegreerd. Als dusdanig was de nucleaire sector de eerste om een “ecotax” op zijn product in te voeren, lang voordat dat de mode was in andere sectoren. Het stelt ook geen echte problemen, en er zijn reeds centrales in ontmantelingsproces.

Men kan zich bovendien de vraag stellen van het zinvolle van het afbreken van een oude kerncentrale. Uiteraard dient men het hart weg te halen, maar nadien blijft er enkel maar een licht geactiveerd reactorvat en wat pijpwerk over, binnenin een ongelooflijk sterk bouwwerk (de bunker). Het is trouwens de sterkte van dat bouwwerk die de afbouw relatief prijzig maakt. Men gaat dus relatief veel geld uitgeven om licht radioactief materiaal dat zich in een sterk gebouw bevindt, in stukken te snijden, en dat dan naar een opbergplaats voor licht radioactief afval te voeren. De vraag die ik me persoonlijk stel is of de netto balans van die operatie enig voordeel heeft. Men heeft veel geld uitgegeven, een heel sterk gebouw afgebroken, en een belangrijke hoeveelheid licht-radioactief afval bekomen, dat ergens in een opbergplaats veilig moet worden opgeslagen. Men heeft dus enerzijds een klein stukje grond gewonnen (waar de reactor stond), en anderzijds een stukje grond verloren (de opbergplaats). Het licht radioactief materiaal is nu ondergebracht in een plek die in elk geval minder beschermd is dan in het originele reactor gebouw. Is het niet gewoon beter om dat

reactor gebouw te laten staan ? Het is een perfecte bescherming van het licht radioactieve materiaal. Binnen 100 jaar is de activiteit zo goed als weg, en is het dus gewoon een bunker met een stalen drukkookpan in. De Egyptenaren hebben ook hun piramiden niet afgebroken. De plaats ingenomen door een aantal reactoren is veel kleiner dan de plaats ingenomen door (andere) historische monumenten. Oude reactor gebouwen zouden dan de “piramiden” van ons tijdperk zijn.

32. Proliferatie

In de mate dat dit inderdaad een probleem is met civiele kernenergie in landen die het verlangen hebben een stiekem kernwapen programma op te zetten, is zo iets uiteraard van geen enkel belang in landen die reeds kernwapens bezitten of die helemaal geen zin hebben om er te ontwikkelen, zoals in het Westen het geval is. Maar niettemin wil men bij toekomstige reactoren met deze kritiek rekening houden, en het ontwerp zo maken dat die heel moeilijk bruikbaar zijn om militair bruikbare materialen uit te halen.

33. Doelwit van oorlog en terrorisme

Dit is een overweging die de moeite waard is. Maar het is waarschijnlijk moeilijker een kerncentrale op te blazen dan een chemische fabriek: het is een compact en heel robust geheel dat goed bewaakt is en met weinig personeelsverkeer. Er is een polemiek over de vraag of een kerncentrale de impact kan weerstaan van een groot passagiersvliegtuig, omdat de testen enkel met kleinere vliegtuigen zijn doorgevoerd. Maar vliegtuigen zijn geen rigide structuren en de impact door een groot vliegtuig is niet vele malen erger dan die van een klein vliegtuig (het zijn “schijfjes vliegtuig” die een voor een op het gebouw invallen). We zijn hier bovendien weer volledig in het ijdele aan het praten: farmaceutische laboratoria die met gevaarlijke virussen werken bijvoorbeeld kunnen ook het doelwit zijn van oorlog en terrorisme. Stuwdammen nog veel meer.

34. Europa is vastgeraakt in het moeras van Euratom

Op zich is dat geen argument tegen kernenergie. Euratom tracht kernenergie en het onderzoek naar veiligheid erover te bevorderen. Dat is enkel een probleem voor tegenstanders van kernenergie.

35. Kernenergie betekent unfaire handel (subsidies in onderzoek).

Er zijn vele landen waar helemaal geen onderzoek naar kernenergie gebeurt. Toch kan men niet zeggen dat het onderzoek naar alternatieve energievormen daar een heel groot voordeel uithaalt. In verschillende landen genieten alternatieve energiebronnen reeds van hele ruime subsidiëring: als U een zonnepaneel op uw dak wil installeren, dan krijgt U in vele landen een deel van de prijs terugbetaald en moet de elektriciteitsmaatschappij die wispelturige stroom van U sterk boven de marktprijs aankopen. Twee landen staan aan de top wat betreft alternatieve energievormen: Duitsland en Japan. Duitsland heeft relatief veel kernenergie, maar wil daar dank zij de Groenen vanaf ; Japan heeft een ambitieus kernenergie programma. De meeste landen die niks met kernenergie te maken hebben, doen ook niet veel aan alternatieven. De vraag is ook of dat onderzoek naar alternatieven zoveel meer waard is dan onderzoek naar (nog veiliger en efficiënter) kernenergie, als dat onze problemen kan oplossen. Bovendien is het onderzoeksbudget een piekleine bijdrage vergeleken met de investeringskosten in de elektriciteitssector.

36. Kernenergie is verbonden met nationalisme

Dat is het geval geweest in het verleden voor sommige landen die een militair nucleair programma hadden, en het is nog steeds waar voor sommige ontwikkelingslanden (Iran bijvoorbeeld). Maar men kan niet stellen dat die uitspraak voor de meeste Westerse landen nog van toepassing is. Als de Finnen beslissen om kernenergie te gebruiken, dan is dat niet uit nationalistische motieven. Bovendien is de nucleaire sector een sector waar de veiligheidsnormen veruit bepaald worden door

internationale organismes. Kernenergie stelt geen “grensoverschrijdend” probleem, tenzij voor zij die daar om ideologische redenen wakker van liggen. Kooldioxide productie is veel grensoverschrijdender dan kernenergie “problemen”, die zelfs in het geval van de ergste incidenten, slechts voor grotendeels lokale of regionale last zorgen – dat heeft Chernobyl ons geleerd. De paniek was grensoverschrijdend, maar de echte problemen niet.

37. De mythe van waterstof

Heel goed mogelijk dat waterstof geen goed idee is. Dat is echter totaal onafhankelijk van kernenergie. Wat vrij zeker is, is dat het probleem van de fossiele brandstoffen in het transport op een of andere wijze dient te worden aangepakt, ofwel door vervangingsbrandstoffen (die dus op een of andere wijze dienen geproduceerd te worden), ofwel via elektriciteit (elektrische voertuigen (treinen?), ofwel voertuigen op een brandstof zoals waterstof die via elektriciteit geproduceerd wordt). In het laatste geval kan kernenergie helpen. Indien niet, dan kan kernenergie niet helpen, maar ook zonne- of windenergie niet. Als dusdanig is dit geen argument tegen kernenergie. Het grappige is trouwens dat het vooral onstabiele bronnen zijn, zoals zonne- of wind energie die in een waterstof economie hun nut zouden kunnen bewijzen. Men zou dan waterstof kunnen produceren zolang het waait of zolang de zon schijnt. Een argument tegen waterstof is dus een sterker argument tegen wispelturige bronnen dan tegen controleerbare bronnen zoals kernenergie.

38. De publieke opinie is tegen kernenergie.

Ik ben ervan overtuigd dat dat essentieel komt door desinformatie. Als dusdanig moeten we de mensen beter informeren, en ik hoop hier dus mijn kleine bijdrage te leveren. Maar bovendien is het niet zo evident dat een overgroot deel van de publieke opinie alle argumentatie van de anti-nucleaire beweging koopt. Enkele opiniepeilingen¹⁵⁸ geven een gemengde trend aan, die echter niet zo duidelijk negatief is als dit argument meent aan te brengen.

39. De ecologische beweging is tegen kernenergie.

In de mate dat dit een argument is tegen kernenergie kan men evengoed stellen dat de nucleaire sector voor kernenergie is. Dom argument: de tegenstanders zijn ertegen. De voorstanders zijn ervoor. Maar er wordt hier ook geïnsinueerd dat enkel de “ecologische beweging” de wijsheid in pacht heeft wat betreft ecologische vraagstukken, of dat indien men hierover een andere mening koestert, men bij definitie niet tot “de ecologische beweging” kan horen.

40. Als laatste argument geldt dat mensen die voorstander zijn van kernenergie, bizarre mensen zijn.

Als “bewijs” wordt aangehaald dat het vaak geleerden zijn, die zichzelf ook het etiket van ecologisch verantwoord aanmeten. Het laatste argument is veelzeggend: mensen (vaak wetenschappers en professoren) die zowel een ecologisch bewustzijn als een pro-kernenergie houding aannemen, zijn bizarre mensen volgens de Groenen. Hierbij wordt de typische associatiefout gemaakt van ideologen die denken de wijsheid in pacht te hebben: de “Groenen” gaan ervan uit dat zij de enig-zaligmakende houding bezitten die ecologisch bewust is. Ze associëren zichzelf met deze houding. Gezien voor de Groenen, “de Groene ideologie aanvaarden” equivalent is met “ecologisch bewust zijn” vinden ze het uiteraard een bizar idee dat er mensen kunnen zijn die zichzelf ecologisch bewust verklaren en niettemin sommige dogma's van de Groene ideologie tegenspreken. “*Vous n’avez pas le monopole du coeur*” had Valéry Giscard d’Estain

¹⁵⁸<http://www.guardian.co.uk/environment/poll/2008/mar/06/nuclearpoll> ; <http://www.gallup.com/poll/109342/Nuclear-Power-Less-Popular-Than-Other-Energy-Strategies.aspx> ; <http://www.reuters.com/article/environmentNews/idUSL2132992220080121>

destijds aan de socialistische tegenkandidaat gezegd, wat hem de presidentsverkiezing opleverde. Op dezelfde manier kunnen we aan de Groenen zeggen: “U heeft het monopolie van het ecologisch bewustzijn niet”. Als dusdanig vind ik dat laatste argument serieuze stof tot nadenken... voor de Groenen! Hoe komt het dat wetenschappers, die bewezen hebben een ecologisch bewustzijn te hebben, toch pro kernenergie kunnen zijn ? Zou dat misschien toch een goed idee zijn ?

9.3 Altijd bijna zware ongelukken zonder gevolgen

9.3.a Greenpeace's lijst van nucleaire 'ongelukken'¹⁵⁹

Een kalender met een “dagelijks” nucleair ongeluk: bijna elke dag van het jaar is gezien als de verjaardag van een nucleair incident in het verleden. We selecteren in de lijst de gebeurtenissen in de Westerse civiele kernenergie na 1975, gezien we eerder gesteld hadden dat er een verschil is tussen kernenergie hiervoor en hierna (koppeling met het militaire deel). Als dusdanig hebben we hier de exhaustieve (ik neem aan dat de jongens van Greenpeace hun huiswerk wel zullen gemaakt hebben) lijst van alle potentieel zware incidenten die ooit *in de Westerse kernenergie sector* zijn gebeurd in de periode 1975-1996.

Er is, bij de meeste incidenten hierna gemeld, nooit echt iets ernstigs gebeurd. In totaal tel ik 92 incidenten. Dat wil zeggen dat er gedurende twintig jaar in het Westen, in de hele nucleaire kernenergie sector, 92 keer technisch een probleem geweest is. In slechts een kleine fractie van die incidenten is er een beperkt menselijk gevolg geweest (we hebben deze aangeduid). Het is heel jammer dat deze gebeurtenissen niet op de INES schaal zijn genoteerd, want veruit de meeste vallen in schaal 2 of lager.

Laten we deze 92 incidenten vergelijken met een andere menselijke activiteit, de transportsector, zeg maar, vrachtwagenverkeer. Ik tracht hier een equivalent probleem in het vrachtwagen verkeer te vinden, dat qua echte impact een vergelijkbaar gevolg heeft gehad als het vernoemde nucleaire incident.

Vele incidenten zijn van het type: “linker remlicht was stuk, vrachtwagen moet naar de garage”, zoals: *Technical failure at Sizewell nuclear power plant (UK)*. Natuurlijk kan men gaan fantaseren: een vrachtwagen die in het donker met een stuk remlicht rijdt, kan een zwaar ongeluk veroorzaken”. Of: “bij de technische controle is vastgesteld dat de voortrein niet aan de normen van balans voldeed, terug naar de garage”. *“Eight control rods show delays in emergency shut- down insertion time at Millstone Point nuclear power plant”*

Men moet opletten met de termen “radioactiviteit geloosd”. De kleinste hoeveelheid niet-geplande vrijgeving van radioactiviteit is gemeld. Wat natuurlijk telt is de hoeveelheid radioactiviteit die is vrijgekomen, onder welke vorm, en de contaminatie die hiervan het gevolg is geweest. De milieu-impact van de meeste gemelde radioactieve lozingen zijn van de vorm: “lekkende darm in benzinstation gevonden, 1000 liter diesel olie zijn de natuur in gegaan”. Qua nociviteit zijn beiden vrij equivalent. *“ Release of 100 cubic metres of radioactive water from Salem nuclear power plant”*

Sommige dingen zijn wat erger: “bij het rijden is vastgesteld dat een deel van de remmen van een vrachtwagen niet goed functioneerden. De chauffeur heeft onmiddellijk de vrachtwagen in

¹⁵⁹<http://archive.greenpeace.org/comms/nukes/chernob/rep02.html>

reparatie gebracht”, bijvoorbeeld: *“Reactor shut-down due to failure of control equipment at Pilgrim nuclear power plant”*, of *“Technical fault at the Oyster Creek nuclear power plant triggers emergency shut-down”*

Er gebeurt soms echt iets: “bij het rijden heeft een vrachtwagen zijn benzine tank beschadigd, en benzine is vrij gekomen”. *“Steam generator ruptures at R.E. Ginna nuclear power plant”*

Sommige ongelukken zijn echte ongelukken, van dezelfde schaal als ongelukken met een echte vrachtwagen: “vrachtwagen heeft vuur gevat, er komt rook vrij”, *“Fire in the generator of the Baersbeck nuclear power plant”*, of erger: “bij zware botsing met een vrachtwagen is een dode en twee zwaargewonden gevallen, de benzine van de vrachtwagen is in de natuur gelopen”, zoals: *“High pressure steam accident kills one worker and injures two others at Fukushima nuclear power plant”*.

Op enkele uitzonderingen na zijn de incidenten die in deze lijst vermeld zijn echt van het bovenstaande type, er is niets metaforisch aan. De “vrachtwagen” in het voorbeeld staat niet symbolisch voor iets anders, het staat voor een echte, gewone vrachtwagen. Het ontsnappen van 100 kubieke meter “radioactief” koelwater is sanitair echt niet erger met het dumpen van 1000 liter diesel olie.

En natuurlijk is er Three Miles Island dat uitvoerig besproken werd, waar men veel schrik heeft gehad, maar waar niemand is gestorven.

We hebben hier dus de angstwekkende lijst, samengesteld door fervente tegenstanders van kernenergie voor wie deze lijst een argument is om met de hele kernenergie sector te stoppen, van de 92 ergste incidenten... die qua impact equivalent zijn aan een even groot aantal incidenten en accidenten in het vrachtwagen verkeer in de hele Westerse wereld, over 20 jaar genomen.

Denk U het volgende in: een activistengroep die wil bekomen dat de mensheid afziet van vrachtwagen verkeer. In deze hypothetische situatie maken vrachtwagens wel geen lawaai of stoten ze wel geen rook uit. Het enige wat er soms gebeurt is een incident, en heel zelden een verkeersongeluk. Het zijn die ongelukken die dienen als basis van de argumentatie dat de mensheid af moet van vrachtverkeer. Zij vinden vrachtwagen verkeer een veel te gevaarlijke activiteit, die ten gevolge van de ongelukken veel te veel milieubelasting en slachtoffers eist. Om dat te doen, stellen ze een angstwekkende lijst op, waarin ze 92 incidenten (de ergste die ze gevonden hebben) naar voor schuiven, die ze in de hele Westerse wereld gedurende 20 jaar hebben verzameld. Ze tonen aan dat er bij deze ongelukken enkele keren diesel olie in de natuur is gelekt en dat er enkele chauffeurs zijn omgekomen of zwaargewond zijn geraakt. Ze tonen aan dat er soms meer ongelukken hadden kunnen gebeuren (het gebroken achterlicht).

Natuurlijk zou niemand zo een activistengroep ook maar 5 seconden serieus nemen. Indien het vrachtverkeer werkelijk zo veilig was, als deze lijst zou aangeven, dan zou dat denkbeeldige vrachtverkeer duizenden keren veiliger zijn dan echt vrachtverkeer! Maar bovendien zou het haast onmogelijk zijn om zo een lijst op te stellen, want er zou geen enkele gecatalogiseerde vorm bestaan van het soort incidenten die in het vrachtverkeer voorkomt. Welk organisme houdt in de Westerse wereld bij wanneer een vrachtwagen-chauffeur ergens gemerkt heeft dat zijn achterlicht niet werkte ?

9.3.b Het “residual risk” rapport¹⁶⁰

De toon in dit rapport is als volgt gezet in het voorwoord:

“However, the fact that there has not been another accident with a core meltdown since Three Mile Island does not mean that it will never happen again. Every year there are thousands of incidents, occurrences and events in nuclear installations and, simply because there was no catastrophic radioactive leakage, the world reacts as if there was no problem.”

Vrij vertaald: “Het feit dat er nog geen ander ongeluk met een smeltend reactorhart sinds TMI is gebeurd wil niet zeggen dat het nooit meer zal gebeuren. Elk jaar zijn er duizenden incidenten en gebeurtenissen in nucleaire installaties, en het is eenvoudigweg omdat dat niet tot een catastrofale radioactieve vrijgave heeft geleid dat de wereld doet alsof er geen probleem is.”

En wat verder:

“The permanent risk of a core meltdown is a strong argument against the use of nuclear power. The lifetime extension of nuclear power plants heightens the risk of a major accident considerably. The question of how to dispose of nuclear waste safely not only remains unanswered, no answer can be imagined. Every country using nuclear power could build a nuclear bomb if it decided to do so. These dangers are no less terrifying given the challenges of climate change.”

Vrij vertaald: “Het permanente risico van een smeltend reactor hart is een sterk argument tegen het gebruik van kernenergie. Het verlengen van de levensduur van kerncentrales vergroot het risico op een zwaar ongeluk behoorlijk. De vraag hoe nucleair afval veilig moet geborgen worden blijft niet alleen zonder antwoord, men kan zich bovendien zelfs geen antwoord op die vraag inbeelden. Elk land dat kernenergie gebruikt kan een atoomwapen bouwen als het besliste van dat te doen. Deze gevaren worden er niet kleiner op met de uitdaging van de klimaatsverandering.”

We zien hier een verwarring tussen verschillende facetten. *Het lijkt alsof het ultieme dramatische ongeluk het smelten van het hart van de reactor is, zoals in Three Miles Island is gebeurd*, en het hele dossier is opgebouwd om aan te tonen dat, hoewel dat sindsdien niet meer is gebeurd, het nog steeds kan gebeuren, en een heel groot deel van het betoog geeft cijfers en voorbeelden aan om te tonen dat het “voor morgen” kan zijn.

Het smelten van het hart is reeds een vrij zeldzame gebeurtenis in een kernreactor, en dat is geen ijdele bewering: het is een keer voorgekomen in het Westen in 30 jaar tijd. Het is dus niet mogelijk te beweren dat de kans veel groter is dan 1 per 30 jaar. De ene keer dat het gebeurd is, is er geen enkele noemenswaardige impact geweest buiten de centrale. Het hele argument van de tekst wil ons laten geloven dat die kans vrij hoog is, maar we weten reeds, door waarneming, dat die van de orde van 1 keer om de 30 jaar (of beter) moet zijn. Een hypothetische afleiding wint niet van een experimentele waarneming.

Hoe dramatisch is zo een zeldzame core meltdown ? Laten we niet vergeten dat er bij Three Miles Island geen slachtoffers zijn gevallen, en er slechts een kleine hoeveelheid radioactiviteit is vrijgekomen, die trouwens op geen enkel ogenblik voor een bestraling heeft gezorgd die boven de wettelijke normen is gekomen. *Met andere woorden, qua ecologische gevolgen, of qua menselijke gevolgen, is er bij het Three Miles Island ongeluk (het zo gevreesde core meltdown ongeluk) dus zo goed als niks gebeurd.* Een banaal auto-ongeluk is erger, en dat is nu dus bijna 30 jaar geleden.

¹⁶⁰http://www.greens-efa.org/cms/topics/dokbin/181/181995.residual_risk@en.pdf

Gezien de ondertussen sterk toegenomen veiligheid zal de echte kans op een core meltdown waarschijnlijk zelfs veel kleiner geworden zijn.

Er wordt echter de impliciete associatie gemaakt tussen een smelten van het hart, en een maximaal ongeluk (Chernobyl). Dat is vergeten dat er nog twee ernstige barrières zijn tussen de twee: het reactor drukvat en de (vaak dubbele) bunker waarin de Westerse centrales staan, en niet de Chernobyl reactor enerzijds, en de principes van passieve veiligheid anderzijds. Als dusdanig is het ongeluk van een smeltend reactor hart wel een heel ernstig ongeluk (INES schaal 5), *maar zonder externe gevolgen*. Het veroorzaakt wel serieuze kosten voor de eigenaar van de centrale, omdat die centrale enerzijds volledig om zeep is, en omdat anderzijds de opruimwerken van die centrale, na afkoelen, duurder en moeilijker zullen zijn dan bij het afbouwen van een reactor die dat niet heeft ondergaan – maar die afbouwwerken zijn betaalbaar en uitvoerbaar, zoals is aangetoond: in 1990 is TMI volledig ontmanteld van zijn beschadigd hart.

Om van Three Miles Island naar Chernobyl te gaan, moeten we de kans op een reactor hart dat gaat smelten, vermenigvuldigen met *de kans dat ten eerste het reactor druk vat stukgaat, dat de bunker helemaal stuk gaat* en dat bovendien er *zo een hevige brand woedt*, of zo een zware ontploffing gebeurt dat een groot deel van het materiaal van het hart hoog in de atmosfeer wordt geslingerd. We weten niet wat die kans is maar die moet vrij klein zijn. De bunker is erop gebouwd om niet stuk te gaan, en alle tests die gebeuren, verifiëren normaal gezien dat hij niet stuk gaat. Het reactor drukvat (25 centimeter dik staal) is ook niet stuk gegaan.

Maar goed, laten we veronderstellen dat die kans 1 % is dat de zowel het reactor vat als de twee opeenvolgende bunkers stuk gaan tijdens het smelten van het hart, wat waarschijnlijk veel te hoog is – bouwkunde is een vrij zekere aangelegenheid - wat bekommen we dan ? Stel dat we om de dertig jaar een reactor hart hebben dat smelt (gezien het tot hier toe een keer is gebeurd), dan hebben we om de 3000 jaar, in de hele Westerse wereld, een reactorhart dat smelt, dat het vat stukmaakt en dat niet beschermd is door een bunker. Maar we hebben nu nog steeds geen Chernobyl type ongeluk want er is geen grafiet brand en de reactor is niet meer aan het werken door passieve veiligheid!

Wat de grote verspreiding van de radioactieve stoffen bij Chernobyl heeft veroorzaakt, is de enorme hitte die gedurende meer dan een dag een hoge rookpluim in de atmosfeer heeft gestoten *omdat de reactor nog werkte* (geen passieve veiligheid) en omdat *het grafiet aan het branden was*.

Ons denkbeeldig ongeluk om de 3000 jaar (ergens ter wereld) is dus van veel kleinere, veel lokalere impact dan het Chernobyl ongeluk.

*Maar laten we de advocaat van de duivel spelen en stellen dat we toch een Chernobyl type ongeluk hebben. Dus een keer om de 3000 jaar een Chernobyl type ongeluk ergens in de Westerse wereld, in deze bijzonder pessimistische schattingen. We wensen hier te wijzen op het feit dat we speciaal hoge kansen hebben genomen voor het opgeven van de integriteit van de bunker(s) en het falen van de bedachte passieve veiligheid. Chernobyl heeft ongeveer 10 000 slachtoffers geëist en voor een regionale bezoedeling gezorgd in een regio gedurende ongeveer 200 jaar. 10 000 slachtoffers om de 3000 jaar met een hele pessimistische schatting, wie zegt beter ? *Schaft men autorijden af mocht het 10 000 slachtoffers in het totaal, over 3000 jaar veroorzaken ? Autorijden veroorzaakt, als we zo doorgaan, 3 miljard doden in 3000 jaar.* Maar laten we hierbij niet vergeten dat dit een heel pessimistische schatting is: een core meltdown om de 30 jaar, het simultaan falen van het reactor vat en de bunkers in 1% van de gevallen, en het op een mysterieuze wijze omvormen van een gesmolten hart in een brandende en reagerende rookpluim zoals in Chernobyl het geval was. Met andere woorden, 10 000 slachtoffers in 3000 jaar is een zware overschatting van het werkelijke gevaar dat we enkel als illustratieve bovengrens hanteren, en zelfs in dat geval is kernenergie nog steeds 300 000 keer veiliger dan mechanisch transport (autoverkeer, treinverkeer, vliegtuigverkeer).*

We kunnen dus niet echt stellen dat het een groot gevaar betekent dat we niet kunnen aanvaarden voor ons welzijn of ons comfort, gezien we zonder aarzelen een 300 000 keer gevaarlijker technologie gebruiken om ons te verplaatsen en op vakantie te gaan.

Het nieuwe EPR type reactor is zelfs zo gebouwd dat een “core meltdown” een “routine-ongeluk” moet zijn, en er is een speciale opvanginstallatie voorzien voor de gesmolten kern onder de reactor.

Het rapport tracht zijn sterkte te halen uit een opsomming van kleine problemen die geregeld gebeuren in kerncentrales, van inspecties die op een probleem vallen, tot een pomp die niet werkt, en zo verder. De auteurs van dat rapport nemen als basis betoog aan dat er fouten gebeuren, dat er ontwerp fouten zijn, dat er verkeerde manipulaties gebeuren en zo verder in het kernenergie gebeuren, en lijken te eisen dat alles perfect dient te zijn. *Dat is echter niets begrijpen van een veiligheidscultuur.* Een veiligheidscultuur bestaat er niet in van te verwachten dat er geen fouten gemaakt worden! Een veiligheidscultuur bestaat erin er van uit te gaan dat er voortdurend fouten gemaakt worden, en trachten een systeem op te stellen zodat zelfs een heel onwaarschijnlijke samenloop van verschillende fouten geen erge gevolgen heeft. Als dusdanig is een essentieel element dat fouten gemeld worden. Men vindt dat nergens anders. In welke industrie vindt men een lijst van kleine incidenten, wereldwijd? Waar vindt men de wereldwijde lijst van de niet-werkende achterlichten die bij routine controle op vrachtwagens is vastgesteld? Waar is de lijst van pompen die bij geregelde controle in de petroleum nijverheid niet werkten zoals het hoorde? Het is een essentieel onderdeel van de veiligheidscultuur dat het kleinste incident gemeld wordt. Het is onmogelijk dat er nooit fouten gemaakt worden en dat alles altijd perfect werkt. Zij die in een wereld leven waar ze denken dat dat het geval is, dromen. Het feit dat kleine dingen gemeld worden is een garantie voor een goed functioneren van de veiligheid. En het is ironisch dat die meldingen gebruikt worden om te beweren dat het systeem niet veilig is. In de voormalige Sovjet Unie waren er nooit problemen. Daar meldde men nooit kleine problemen. Het “altijd fouten zonder zware gevolgen” is net waar het om gaat in een veiligheidscultuur!

Het rapport zegt dan: *“These dangers are no less terrifying given the challenges of climate change”*. Denkt men werkelijk dat, als het fenomeen van de opwarming van het klimaat waar is, dat het een kleiner probleem is over 3000 jaar? De hittegolf van 2003 heeft in Frankrijk alleen al die zomer naar schatting 15 000 mensenlevens opgeëist. Indien men door kernenergie een eventuele klimaatsverandering kan helpen tegengaan, dan is dat een gigantische winst in mensenlevens en als het die klimaatsverandering niet kan tegengaan, zal het (door de hogere levensstandaard) nog steeds een hoge winst in mensenlevens betekenen.

Twee andere typische argumenten tegen kernenergie worden weer erbij in gegooid: Ten eerste het eeuwige *“The question of how to dispose of nuclear waste safely not only remains unanswered, no answer can be imagined.”* terwijl de oplossing van de diepe geologische berging geen enkel zwaar objectief probleem oplevert, en in elk geval veel minder ecologische gevolgen heeft dan de CO₂ productie of het opgebruiken van alle fossiele brandstoffen. Maar dat is een oplossing die de auteur van het rapport zich “niet kan inbeelden”. Het probleem bevindt zich dus eerder in de verbeeldingscapaciteit van de auteur dan in een technische moeilijkheid. Daar kan inderdaad niet veel aan gedaan worden.

Tenslotte: *“Every country using nuclear power could build a nuclear bomb if it decided to do so.”* wat natuurlijk in het Westen een zinloze opmerking is, gezien die landen ofwel reeds over nucleaire wapens beschikken, of er geen willen bouwen. Ik denk bijvoorbeeld dat het geen probleem stelt voor België of Nederland, Duitsland of Zweden, de Verenigde Staten of Zwitserland. Het is wel een opmerking die men in rekening moet nemen als men in bepaalde landen met twijfelachtige regimes kerncentrales wil gaan leveren. Zoals ik reeds eerder gezegd heb, ben ik daar ook geen voorstander

van. In mijn betoog heb ik het over kernenergie in het Westen, en in landen zoals India en China, die in elk geval reeds een militaire nucleaire infrastructuur hebben. Nu is het wel zo dat er gevoelige materialen zijn, die eventueel kunnen gebruikt worden om een nucleair wapen te maken en dat dat materiaal eventueel zou kunnen gestolen worden. Het is juist dat men daar moet op letten, maar dat lijkt niet echt onoverkomelijk als moeilijkheid. Kwaliteitsmateriaal voor nucleaire wapens (U-235 met een zuiverheid van meer dan 93%, of Pu-239 met hoge zuiverheid) komt niet echt voor in de brandstofcyclus. Er komen wel materialen voor die eventueel voor een slecht werkend wapen zouden kunnen gebruikt worden, indien men over grote hoeveelheden beschikt, en over de nodige technologie om zulk een wapen te bouwen. Men dient het onderscheid te maken tussen een land en een terroristengroep. Persoonlijk denk ik dat als een land echt een nucleair wapen wil ontwikkelen, dat het onafhankelijk van het vreedzaam gebruik of niet van kernenergie ergens anders, daarin zal slagen of niet ; met andere woorden, *ik denk niet dat het sluiten of niet van de kerncentrales in Duitsland de kans dat Iran een wapen kan maken, op enige wijze zal beïnvloeden*. Daarentegen, ik denk dat de brandstof cyclus van kernenergie in het Westen te ver af ligt van een bruikbaar wapen voor een terroristen groep om daar iets mee kunnen te doen. Er moet een hele technologie aangewend worden om daarvan een wapen te maken. De meer realistische mogelijkheid om een “vuile bom” te maken (een klassiek explosief, maar met radioactief materiaal dat door de explosie verspreid wordt) bestaat, op dezelfde manier dat er andere giften of besmettelijke stoffen kunnen verspreid worden. In welke mate het stoppen van het gebruik maken van kernenergie dat risico verwijdert is niet duidelijk, gezien er reeds heel veel radioactieve stoffen bestaan in de wereld. Met andere woorden, we kunnen bovenstaand argument eerder schrijven: elk land dat voldoende technologie in huis heeft, kan een kernwapen maken en dit, onafhankelijk van het gebruik van kernenergie ergens anders.

9.4 Echte argumenten tegen kernenergie

Men zou kunnen denken, als men al het bovenstaande leest, dat ik denk dat kernenergie dan perfect is. Dat is fout. Kernenergie heeft nadelen, zoals elke technologie. Het voornaamste nadeel van kernenergie, zoals ik het zie, is dat het *een maatschappelijk engagement betekent voor een lange periode*, en voor een belangrijke investering, zowel op het vlak van de bouw, als op het vlak van de uitbating, als op het vlak van de controle als op het vlak van de afvalverwerking en berging. Men engageert zich voor verschillende decaden, ideaal zelfs voor veel langer in *een relatief grootschalige activiteit*. Men kan niet een “heel klein beetje aan kernenergie doen in zijn achtertuin”, kleinschalige kernenergie heeft geen zin. Over die periode dient men te garanderen dat men de hele cyclus zal volgen en er de veiligheid van garanderen. Als dusdanig is kernenergie niet compatibel met kleinschaligheid, wispelturigheid, en het volgen van modeverschijnselen en maatschappelijke of politieke grillen. Kernenergie is ook *kapitaalsintensief*, en men dient engagementen aan te gaan om de hoge initiële investeringen ook over lange tijd rendabel uit te baten, evenals gedurende die ganse tijd een veiligheidscultuur toe te passen.

Men dient zich de vraag te stellen of deze nadelen opwegen tegen het fundamentele voordeel van kernenergie, dat, laten we het herhalen, heden ten dage door geen enkele andere technologie kan geëvenaard worden: de zo goed als onbegrensde, relatief goedkope, schone en flexibele productie van elektriciteit met zo goed als geen buitenlandse afhankelijkheid, en als dusdanig een efficiënt middel in de verzoening tussen economisch welzijn en de strijd tegen een mogelijk dramatische klimaatverandering in de komende eeuwen.

Het andere nadeel van kernenergie (dat echter sterk overdreven wordt door anti-nucleaire activisten) is dat het potentiële gevaar niet nul is. We hebben gezien dat het objectieve risico veel kleiner is dan dat van de meeste andere activiteiten, maar het kan niet gesteld worden dat het nul is. Hoewel de risico's op lange termijn van het gebruik van fossiele brandstoffen veel groter zijn dan die van kernenergie (vooral als men de hypothese van klimaatsverandering in rekening brengt, maar zelfs los van die hypothese), kunnen er in de toekomst misschien technologieën ontwikkeld worden die een risico zo goed als nul hebben. Maar voorlopig hebben we er zo geen en het ziet er niet naar uit dat daar zonder onverwachte doorbraak verandering in komt in de komende decennia.

Er zijn verder geen *onoverkomelijke* moeilijkheden met kernenergie. Het vaak geciteerde afvalprobleem heeft afdoende oplossingen en andere problemen die geciteerd worden in verband met kernenergie technologie zijn goed oplosbaar of zelfs onbestaand. Men heeft geen fundamentele doorbraken meer nodig – op zijn hoogst wat onderzoek naar de meest geschikte vorm van industrialisering. Natuurlijk hebben al die oplossingen ook een kostprijs. Dat is zo met elke technologie.

Men dient de nadelen van kernenergie af te wegen ten opzichte van de nadelen van geen kernenergie, rekening houdende met volgende aspecten:

- klimaatsverandering en CO₂ uitstoot
- economische ontwikkeling en armoede, levensstandaard en confort
- objectieve nadelen van kernenergie (in tegenstelling tot vermeende nadelen)
- de realistische mogelijkheden geboden door andere technologieën.

Ik wil hier ook wijzen op een verkeerd argument *voor* kernenergie. De oliesector en de elektriciteitssector zijn zo goed als ontkoppeld. De oliesector bevoorraadt grotendeels de transportsector, waar de elektriciteitssector slechts een klein aandeel in heeft. Als dusdanig is het een fout argument voor kernenergie om te wijzen op problemen met het olieaanbod (prijs, geopolitiek). Kernenergie kan op korte termijn niet veel doen aan het oliegebruik. Kernenergie kan vooral steenkool en gasverbruik vervangen. Het is slechts wanneer het vervoer essentieel elektrisch zou worden, of op waterstof zou gaan werken, dat kernenergie een bijdrage kan leveren. Daarentegen dient men wel te beseffen dat de gas-sector wel gekoppeld is aan de oliesector en dus de transportsector.

Hoofdstuk 10 Besluit

Kernenergie is een door de mensheid ontworpen technologie en brengt een aantal voordelen, maar ook een aantal nadelen met zich mee, zoals dat voor elke technologie het geval is. Het is als dusdanig aan de burgermaatschappij om uit te maken of de voordelen opwegen tegen de nadelen, een beslissing die een samengaan is van politieke, sociale en maatschappelijke overwegingen enerzijds, en van wetenschappelijke gegevens en onzekerheden anderzijds. Dat is het geval voor bijna alle maatschappelijke beslissingen. *Het specifieke aan kernenergie is dat het in het vizier ligt van een ideologie*, zoals weinig andere technologieën dat zijn. Daardoor bestaat er een collectief bewustzijn dat denkt een hele hoop feiten over kernenergie te weten, die totaal fout zijn. *Als dusdanig wordt het beslissingsvermogen van de burger aangetast*, omdat hij foute gegevens aan zijn waardenschaal gaat meten. Ik heb in dit werkje geprobeerd om een middenweg te vinden tussen een zo accuraat mogelijke uiteenzetting van de wetenschappelijke feiten betreffende kernenergie die een invloed kunnen hebben op deze waardenschaal versus een niveau dat leesbaar moet zijn voor de burger die zich wenst te informeren, en heb hierbij vooral getracht de meest gangbare misverstanden rond kernenergie niet alleen recht te trekken, maar ook trachten uiteen te zetten waarom dat zo is.

Het voornaamste voordeel van kernenergie is dat het voor de komende duizenden jaren in principe in staat is de elektriciteitsproductie voor een groot deel op zich te nemen, op een economisch competitieve wijze, en zonder inherente capaciteitsbeperking, en met een vrij beperkte milieu impact. Het is op dit ogenblik de enige industrieel aangetoonde technologie die zo een balans kan voorleggen: fossiele brandstoffen, die op dit ogenblik in de meeste delen van de wereld voor het grootste deel van de elektriciteitsproductie zorgen, kunnen zo geen langdurigheid voorleggen, en hebben een grote milieu impact ; alternatieve bronnen hebben nergens aangetoond hoe ze een groot deel van de elektriciteitsproductie voor hun rekening kunnen brengen en zijn op dit ogenblik meestal economisch niet competitief. Hun ecologische impact is in de praktijk ook vaak minder rooskleurig dan men soms wil toegeven. Hoewel het goed mogelijk is dat ooit alternatieve bronnen wel aan die vereisten zullen voldoen, is dat heden ten dage ten eerste niet zeker, en ten tweede zeker niet aangetoond.

De louter feitelijke gegevens betreffende de twee meest geciteerde “problemen” met kernenergie – en dit in tegenstelling tot wat algemeen “gekend” is – zijn eerder geruststellend: *kernenergie is, qua risico, een van de veiligste menselijke activiteiten die er bestaan, en er is een afdoende oplossing voor het afval.*

Ik geef zelf zonder blozen toe dat het nog beter zou zijn mochten die twee nadelen helemaal niet bestaan. Mocht kernenergie totaal risicoloos zijn, en helemaal geen afval genereren, dan zou dat nog veel beter zijn. Mochten alternatieven zonder problemen overvloedig en op economische wijze elektrische energie produceren, dan zou dat inderdaad beter zijn. Maar gezien deze twee “droom” condities niet bestaan, vind ik persoonlijk, dat een technologie die van alle menselijke activiteiten, een van de laagste risico's inhoudt, en waarvan het afval verdwijnt met de tijd, zo een slechte keuze nog niet – *maar dat is natuurlijk aan de maatschappij om die keuze te maken.* Maar om die keuze te maken, moet de burger weten waar hij over praat.

De huidige “industriële” kernenergie, gebaseerd op thermische reactoren, heeft aangetoond flexibel en competitief te zijn, maar heeft een groot nadeel dat maakt dat het geen oplossing op lange termijn kan zijn: ze verbruikt minder dan 1% van het energetisch potentieel van de brandstof.

Snelle reactoren en een gesloten brandstofcyclus kunnen de overige 99% van de energie uit het huidige “afval” halen. Deze technologie, waarvan de industrialiseerbaarheid principieel is aangetoond (men heeft geen doorbraken meer nodig), heeft heel veel politieke weerstand van de Groenen ondervonden en hierdoor zal er nog 10 – 20 jaar onderzoek nodig zijn alvorens men kan denken aan een grootschalige, veilige en competitieve toepassing ervan. Het is deze laatste stap die van kernenergie een duurzame technologie kan maken: we hebben geen verse brandstof meer nodig (het huidige “afval” kan dienen voor duizend jaar) en bovendien blijft het uiteindelijke afval minder lang toxisch (afwezigheid van kleine actiniden).

Kernenergie stoort blijkbaar de aanhangers van een zekere ideologie. Men kan de mening toegedaan zijn dat een onbeperkte economische, technologische en consumentgerichte evolutie van de mensheid een fundamenteel verkeerde zaak is ; dat is een volledig respecteerbaar politiek standpunt. Het kan zijn dat men vanuit die hoek tot het besluit komt dat een techniek zoals kernenergie enkel maar die machine aanzwengelt en de mensen niet tot inkeer brengt, of beter, die het moeilijker maakt om de mensen te dwingen “tot inkeer te komen” ten gevolge van een globaal energie probleem gezien ze een oplossing aanreikt die dat niet vereist. Karikaturaal gesteld: we hadden misschien het vuur niet moeten uitvinden¹⁶¹, en in de bomen moeten blijven leven. Het is goed mogelijk dat daar een grote wijsheid in schuilt. Alleen, indien het om *die* reden is dat men tegen kernenergie is, dan dient men dat ook duidelijk te zeggen. In dat geval moet men *geen verkeerde informatie* gaan verspreiden betreffende wetenschappelijk onjuiste uitspraken die andere, vermeende problemen met kernenergie aan de kaak menen te stellen, en die mensen gaan aanzetten *om verkeerde redenen* kernenergie af te wijzen. Dat is voor mij, manipulatie en boerenbedrog.

Als ik erin geslaagd ben om aan mijn medeburger voldoende informatie te verstrekken betreffende kernenergie, of tenminste voldoende elementen heb aangebracht zodat deze medeburger de gezochte informatie kan vinden, om in alle eer en geweten een beslissing te nemen betreffende zijn standpunt omtrent kernenergie, of het nu pro of contra is, dan ben ik in mijn opzet geslaagd.

161 Het zal de lezer wel niet verbazen dat ik daar persoonlijk een andere opinie over heb. Het gebruik van werktuigen is waarschijnlijk reeds met ons sinds Australopithecus, en het gebruik van vuur (energie!) is wat Homo Erectus zo succesvol heeft gemaakt. Of we het nu willen of niet, onze specificiteit is technologie en energiegebruik sinds enkele miljoenen jaren...

Appendix A: Eenheden

Het SI systeem van eenheden

In tegenstelling tot wiskundige grootheden, hebben fysische grootheden meestal een eenheid die de kwaliteit uitdrukt van de fysische grootheid: gaat hem om een lengte, een massa, een elektrische stroom, ... Er zijn twee redenen hiervoor. De eerste is het feit dat fysische grootheden meestal, ook al beseft men dat meestal niet, vergelijkingen zijn tussen twee grootheden van dezelfde natuur, en heel zelden een “absolute” waarde hebben. Als men zegt dat een stok 2 meter lang is, dan bedoelt men eigenlijk dat men een kwaliteit van de stok, namelijk zijn lengte, vergelijkt met de identieke kwaliteit van een ander voorwerp/fenomeen/verschijnsel dat dient als basis voor de vergelijking ; in dit geval de “standaard meter stok”. Zeggen dat een stok 2 meter lang is wil dan gewoon zeggen dat zijn kwaliteit “lengte” twee keer zo groot is als de kwaliteit “lengte” van de standaard meter stok. De tweede reden is dat de numerieke waarde van de fysische grootheid afhangt van de keuze van de referentie grootheid. De numerieke waarde van de lengte van de stok in meter is een ander getal dan de numerieke waarde van de lengte van diezelfde stok in, zeg maar, voet. Niet alle fysische grootheden zijn van die natuur, maar wel de meeste. Om een tegenvoorbeeld te geven: het aantal appels in een mand is geen vergelijking met een referentie. Als men zegt dat er acht appels in de mand liggen, dan is dat gegeven absoluut en bijgevolg ook zonder eenheid. Men heeft geen referentie nodig – of zo men wil is de referentie triviaal: een appel – om uit te drukken wat het aantal appels is in de mand. Verschillende beschavingen of culturen hebben totaal geen probleem om overeen te komen dat er in de mand acht appels liggen. Daarentegen, verschillende culturen hebben wel een moeilijkheid om te zeggen dat de lengte van de stok “twee” is, want de referentie (voet, meter...) zal natuurlijk verschillend gekozen zijn door de twee culturen. Dat was trouwens historisch gezien het geval: elk land, elke cultuur, elke stad, elk dorp had een beetje zijn eigen referentie grootheden en dat maakte handel en wetenschappelijke beschrijvingen extreem gecompliceerd. Het SI systeem heeft getracht, met redelijk succes, om een wereldwijd referentie systeem in te stellen voor verschillende fysische grootheden.

Een tweede observatie is dat er grootheden zijn van verschillende kwaliteit, maar die toch wel een heel sterke relatie hebben en het zou heel gecompliceerd zijn mochten de referentiegrootheden onafhankelijk gekozen zijn zonder rekening te houden met die relatie. Een voorbeeld geeft dit aan: beschouw de fysische grootheden lengte, tijd en snelheid. Dat zijn drie fysische grootheden van verschillende kwaliteit en men zou op het eerste gezicht kunnen denken aan drie verschillende referenties. Lengte is gegeven door een meterstok die als referentie dient (ergens opgesloten in een instelling in Parijs). Aanvankelijk was de meter geijkt op de omtrek van de aarde: ter hoogte van de evenaar werd de omtrek van de aarde gelijk gesteld aan 40 000 kilometer, en een kilometer gelijk aan 1000 meter. Men kan ook vele lichaamsgebonden referenties: duimen, voeten, ellen, ... invoeren. Qua tijdseenheid kan men de duur van een of ander fenomeen beschouwen, en tot lang heeft men de “sterredag” gekozen als referentie, wat neerkomt op de draaisnelheid van de aarde om zijn as. Die sterredag werd opgedeeld in 24 gelijke stukken, die uren werden genoemd ; de uren werden opgedeeld in 60 gelijke stukken die minuten werden genoemd, en een minuut werd opgedeeld in 60 gelijke stukken die een seconde werd genoemd, en die seconde werd de basis eenheid van tijd. We hebben een eenheid voor lengte en een eenheid voor tijd. Men zou nu onafhankelijk een eenheid voor snelheid kunnen kiezen: bijvoorbeeld, de snelheid van een Boergondische slak van middelbare leeftijd wanneer ze 3 centimeter verwijderd is van een blaadje sla. Maar de fysische grootheid “snelheid” heeft een natuurlijke band met “lengte” en met “tijd”: snelheid is een zekere afstand afgelegd gedurende een zekere tijd. Als dusdanig is het “natuurlijk” om als eenheid van snelheid, de “meter per seconde” te kiezen. Dat heeft het voordeel dat als we de

afgelegde weg numeriek uitdrukken in “meter” en de tijd dat hiervoor nodig is numeriek uitdrukken in seconden, dat we gewoon de numerieke deling kunnen doorvoeren en dat we direct de numerieke uitdrukking bekomen in de goede eenheid. Als een fietser 200 meter aflegt in 10 seconden, dan volstaat het de 200 te delen door 10, wat numeriek 20 oplevert, en de snelheid van de fietser is dan 20 “eenheden van snelheid”, of te 20 meter per seconde. Hadden we onze Boergondische slak snelheid als referentie gekozen, dan zou zoiets niet waar zijn.

Een eenheden systeem heeft dus een aantal “basis eenheden” die een (arbitraire) referentie nodig hebben, en dan een aantal “afgeleide grootheden” die van die basis grootheden afhangen via de “natuurlijke relatie” tussen deze grootheden. In het bovenstaande voorbeeld waren “lengte” (of afstand) en “tijd” de basis grootheden die een referentie hadden, en was de afgeleide grootheid “snelheid” die geen onafhankelijke referentie heeft (onze Boergondische slak) maar waarvan de referentie gegeven werd door de juiste combinatie van de basisgrootheden.

Alle denkbare fysische grootheden in het SI systeem hebben hun referentie afgeleid van 5 basis eenheden: de meter voor lengte, de seconde voor tijd¹⁶², kilogram voor massa, ampère voor elektrische stroom, en Kelvin voor temperatuur. Met deze vijf basisgrootheden construeert men alle meetbare grootheden in het SI systeem.

De eenheden van afgeleide grootheden zijn producten en breuken van de basisgrootheden. We hebben reeds een voorbeeld gezien: de eenheid van snelheid is een breuk die in de teller de eenheid van lengte heeft, en in de noemer, de eenheid van tijd. Men kan normaal gezien enkel maar sommen en verschillen maken van grootheden die in dezelfde eenheid zijn uitgedrukt. Het heeft geen zin om een aantal seconden bij een aantal meter op te tellen. Als men producten of breuken maakt van grootheden, dan is de eenheid van het resultaat het product of de breuk van de eenheden van de factoren. Een aantal meter gedeeld door een aantal seconden levert een resultaat op in “meters per seconde”. Als we een snelheid vermenigvuldigen met een tijd, “meter per seconde” maal “seconde” levert ons “meter” op. Inderdaad, als men de snelheid van een voorwerp vermenigvuldigt met de tijd waarover men dat traject volgt, dan bekomt men de afgelegde weg van het voorwerp gedurende die tijd.

Versnelling is de (verandering van) snelheid per tijdseenheid ; als dusdanig is de SI-eenheid van versnelling: meter per seconde-kwadraat.

Uit de wet van Newton volgt dat kracht gelijk is aan versnelling maal massa ; als dusdanig is de eenheid van kracht in het SI systeem: kilogram meter per seconde-kwadraat. Men heeft deze eenheid ook een andere naam gegeven: de Newton. Maar een Newton is dus niets anders dan een kilogram meter per seconde-kwadraat.

Arbeid (energie) is kracht maal verplaatsing ; als dusdanig is de eenheid van energie in het SI-stelsel: kilogram meter-kwadraat per seconde-kwadraat. Ook aan deze eenheid heeft men een andere naam gegeven: de Joule.

Vermogen is energie per tijdseenheid ; als dusdanig is de SI-eenheid van vermogen gelijk aan de kilogram meter-kwadraat per seconde-derde macht. Opnieuw heeft men deze eenheid met een naam bedacht: de Watt.

Elektrische stroom is gegeven door de eenheid Ampère die een fundamentele eenheid is waarvan de definitie van de referentie is gegeven door de magnetische kracht die twee stroomvoerende

¹⁶²Dit is zelfs anders nu: de basisgrootheden zijn tijd en snelheid, en lengte is een afgeleide eenheid geworden. Maar dat speelt geen rol op het niveau van onze uiteenzetting.

geleiders op elkaar uitoefenen. Elektrische stroom is de hoeveelheid lading die per tijdseenheid voorbij stroomt, en als dusdanig is de (afgeleide) eenheid van elektrische lading in het SI-systeem gegeven door Ampère seconde. Ook hier heeft men een naam aan gegeven: de Coulomb.

Men kan op die manier verder gaan en hele vele afgeleide eenheden invoeren.

Omdat de numerieke waarden van sommige grootheden, uitgedrukt in de SI-eenheden, soms heel klein of heel groot zijn, heeft men gestandaardiseerde veelvoudenvan die eenheden bedacht. We zullen als voorbeeld de veelvoudenvan lengte eenheden beschouwen, maar ze zijn toepasselijk voor alle SI-eenheden. De eenheid die overeenkomt met 10 keer de basis eenheid wordt aangeduid door het voorzetsel “*deca*”. Een decameter, stelt een lengte van 10 meter voor. Als dusdanig is een draad die 5 decameter lang is, een draad die 50 meter lang is.

Honderd keer meer wordt gegeven door het voorzetsel *hecto* en duizend keer meer door het voorzetsel *kilo*. Een kilometer is dus duizend meter, wat we wel begrepen hadden.

Een miljoen keer meer is gegeven door het voorzetsel *mega*, een miljard keer meer door het voorzetsel *giga*, duizend miljard keer meer, door het voorzetsel *tera* en een miljoen miljard keer meer, door het voorzetsel *peta*.

In de andere richting hebben we ook onderdelen ingevoerd: een tiende van een meter is een decimeter : het voorzetsel *deci* staat dus voor een tiende van de basis eenheid. Een honderdste is gegeven door het voorzetsel *centi*, en een duizendste is gegeven door het voorzetsel *milli*. Inderdaad is een millimeter duizend keer kleiner dan een meter. Een miljoenste is gegeven door het voorzetsel *micro*, en een miljardste door *nano*. Een duizend miljardste staat voor *pico* en een miljoen miljardste is aangeduid met *femto*.

Energie-eenheden

We hebben gezien dat de SI-energie eenheid de Joule is, wat staat voor een kilogram meter-kwadraat per seconde-kwadraat. Men zou denken dat daarmee alles gezegd is. Maar jammer genoeg gebruiken de mensen heel veel andere energie eenheden, omdat ze praktisch zijn in een zekere context.

Voor microscopische processen gebruikt men vaak *de elektronvolt*. De elektronvolt (eV) is gebaseerd op de elementaire elektrische lading van een elektron, en is gelijk aan $1.6 \cdot 10^{-19}$ Joule. Men past op de elektronvolt dezelfde veelvoudenvan toe als in het SI systeem: de MeV is de mega-elektron volt en is gelijk aan een miljoen elektronvolt.

Elektrische energie die gebruikt wordt, wordt soms uitgedrukt in een vermogen eenheid vermenigvuldigd met een tijdseenheid. Waarschijnlijk is de meest bekende eenheid de kilowatt-uur. Een Joule is een Watt-seconde zo men wil. Een watt-uur is dus 3600 Joule (want er zijn 3600 seconden in een uur), en *een kilowatt uur is duizend keer meer, en dus 3 600 000 Joule*, of 3.6 Megajoule.

Een doorsnee kerncentrale produceert meestal van de orde van een GW (gigawatt) vermogen. Als die centrale dus dag en nacht draait gedurende een jaar, wil dat zeggen (in een jaar zijn er 8 760 uren) dat zo een centrale 8 760 GW-uur of 8.76 TW-uur (tera-watt uur) levert. Men had ook kunnen spreken van 365 GW-dag. Een TW-uur is gelijk aan 3.6 PJ. 1 GW-jaar is dan 31.5 PJ.

Een “kiloton” is gelijk aan 4.2 TJ ; een “megaton” gelijk aan 4.2 PJ. Dit zijn eenheden die vaak gebruikt worden bij de beschrijving van kernwapens. 1 GW-jaar is 7.5 megaton.

Het opbranden van de nucleaire brandstof in een drukwater reactor draait rond de 50 GW-dag per ton verrijkt uranium, wat dus wil zeggen dat bovenstaande centrale iets meer dan 7 ton verrijkt per

jaar nodig heeft om te werken – we hadden het over een 1 GW-thermisch of ongeveer 300 MW-elektrisch centrale.

Tenslotte nog een energie eenheid: ton equivalent petroleum is ongeveer 42 GJ of 12 000 KW uur.

Microscopische massa eenheden en energie eenheden

Proton massa: $1.6726 \cdot 10^{-27}$ kg. Als we Einstein's formule gebruiken om het energie-equivalent van deze massa te berekenen, namelijk $E = mc^2$, (met c de licht snelheid in vacuum, gelijk aan 299 792 458 m/s) dan vinden we: $1.50326 \cdot 10^{-10}$ Joule, of 938.27231 MeV.

Voor een neutron wordt dat: $1.674\ 927\ 29 \cdot 10^{-27}$ kg, met een energie equivalent van 939.565 560 MeV. Een neutron is dus een heel klein beetje zwaarder dan een proton, het verschil zit hem op een promille niveau.

De “atoom massa eenheid”¹⁶³ is gedefinieerd als zijnde 1/12 van de massa van de C-12 atoom, en is gemeten gelijk te zijn aan $1.660538782 \cdot 10^{-27}$ kg wat een energie equivalent heeft van 931.494028 MeV ; dat is een beetje minder dan de massa van een proton (een kleine procent minder). De reden zit hem in de bindingsenergie van de koolstof-12 kern. Het is in deze eenheid dat de massa's van nucliden meestal uitgedrukt worden en de waarde ligt numeriek vrij dicht bij het massagetal van de nuclide in kwestie. Een waterstof atoom heeft een massa, uitgedrukt in atoom massa eenheden, gelijk aan 1.00794 ; een neutron heeft een massa van 1.008665. Men dient, om het massa-equivalent van de bindingsenergie uit te rekenen, het aantal protonen in de kern te vermenigvuldigen met de waterstof *atoom massa*, en het aantal neutronen te vermenigvuldigen met de neutronen massa om de massa van de “vrije delen” te berekenen ; inderdaad, de nuclidetafels geven meestal de atoom massa's aan, en niet de kern massa's. De elektronen dienen dus meegerekend te worden.

Het “getal van Avogadro” is gelijk aan 0.001 gedeeld door de numerieke waarde van de atoom massa eenheid uitgedrukt in kilogram. Het getal blijkt gelijk te zijn aan: $N_A = 6.02214 \cdot 10^{23}$. Als een deeltje (een nuclide, een molecule...) k atoom massa eenheden weegt en als we N_A deeltjes nemen, dan is de massa van het geheel k gram. Men noemt N_A deeltjes ook *een mol* deeltjes, een beetje zoals men 12 eieren ook een dozijn eieren noemt. Gezien het massagetal van een nuclide vaak een heel goede benadering is van de massa van een nuclide uitgedrukt in atoom massa eenheden, is de massa van een mol van die nucliden ongeveer gelijk aan het massagetal gram. Een mol C-12 atomen weegt dus 12 gram en een mol Al-27 atomen weegt 27 gram.

163 http://en.wikipedia.org/wiki/Unified_atomic_mass_unit

Appendix B: sommen, integralen en al dat

Sommen

Beschouw het volgende vraagstuk: er zijn 21 mensen met rood haar, 15 mensen met bruin haar, en 7 personen met blond haar in een vertrek. Hoeveel mensen zijn aanwezig in dat vertrek die rood, bruin of blond haar hebben? Het antwoord is natuurlijk triviaal: $21 + 15 + 7 = 43$. Er zijn 43 mensen aanwezig. We hebben, met andere woorden, de som gemaakt van de aantallen over de deel categorieën om het aantal in de totale categorie te vinden. Let wel op, de deel categorieën dienen hierbij mutueel exclusief te zijn, en het geheel volledig te bedekken. Het volgende grapje illustreert dat: in een lokaal bevinden zich 2 vaders en 2 zonen, en toch zijn ze maar met zijn drieën. Er is namelijk een grootvader, een vader en een zoon, en de middelste vader is zowel een “vader” als een “zoon”. De categorieën “zoon” en “vader” waren niet mutueel exclusief en dus kon men niet gewoon de som maken om het totale aantal mensen te kennen. In dagelijkse omstandigheden herkent men die situaties natuurlijk onmiddellijk, en gaat dan ook die fout niet maken.

Sommen over deelcategorieën zijn niet beperkt tot aantallen voorwerpen of mensen of zo. Ze kunnen ook over andere grootheden gaan; maar dan hangt het van de fysische natuur van die grootheid af of die som enige zin heeft of niet. We geven twee voorbeelden. Boer Janssens gaat naar de markt, en koopt 50 kilogram aardappelen, 15 kilogram wortelen en 20 kilogram bakkersbloem. Wat is de totale massa van zijn aankoop? Dat is natuurlijk eenvoudig: de totale massa is gegeven door $50 \text{ kg} + 15 \text{ kg} + 20 \text{ kg} = 85 \text{ kg}$ die hij naar huis zal moeten sleuren. De som van massa's om een totale massa te vinden heeft fysisch zin. Maar beschouw nu het volgende: op een kookplaat staat een waterketel aan 90 graden, een pan met soep aan 60 graden en een braadpan aan 150 graden. Wat is de totale temperatuur van wat er op de kookplaat staat? Deze vraag heeft geen zin, en een som maken levert geen zinvol resultaat op.

In de sommetjes die we tot nu toe hebben aangehaald, waren de deelcategorieën gewoon een opsomming van kwalitatief verschillende eigenschappen. Men formuleert dat soms iets formeler. Veronderstel dat we een verzameling deelcategorieën hebben: $C = \{\text{rood haar, bruin haar, blond haar}\}$. Aan elke deelcategorie van C is een grootheid verbonden: $G_{\text{rood haar}}, G_{\text{bruin haar}}, G_{\text{blond haar}}$ zijn, weet ik veel, het aantal mensen in iedere categorie, of de totale massa van die mensen, of... In de mate dat het concept van “totale grootheid G ” enige fysische zin heeft, schrijft men dan formeel:

$$G = \sum_{i \in C} G_i$$

Dat staat voor het volgende: een “dummy” index i neemt achtereenvolgend alle “categorieën” aan die in de verzameling van de beschouwde categorieën zit, namelijk C , en we maken de som van alle waarden G_i . In ons geval staat dat symbolische schrijven dus voor:

$$G = G_{\text{rood haar}} + G_{\text{bruin haar}} + G_{\text{blond haar}}$$

Al het voorgaande kan de lezer misschien wat triviaal en pedant lijken, maar beschouw nu het volgende. Neem als “categorie verzameling” de verzameling van de chemische elementen, die we voor de gelegenheid M noemen. Dus M staat voor $\{\text{H, He, Li, Be, ... U, Pu, Am, Cm, ...}\}$. Veronderstel nu dat we een staal van een materiaal hebben waarvan een chemische analyse ons het aantal atomen van elk element aangeeft, en die getallen schrijven we: N_i , waar i dus een index is die “over M loopt”. N_{Fe} staat dus voor het aantal ijzer atomen in ons staal, bijvoorbeeld. Een eerste grootheid die we kunnen uitrekenen is het totaal aantal atomen in ons staal, N :

$$N = \sum_{i \in M} N_i$$

Dat wil zeggen dat we de som maken over alle verschillende getallen N_i . We tellen dus het aantal waterstofatomen bij het aantal helium atomen bij het aantal lithium atomen... en we vinden bijgevolg het totale aantal atomen. Laten we de atoom massa van elk element (een grootheid die we

in elke periodieke tabel kunnen terugvinden) A_i noteren ; we gaan de totale massa van ons staal uitrekenen. We doen dat door de massa uit te rekenen van ieder element in ons staal, welke gelijk is aan $A_i N_i$ voor element i en dan tellen we al die bijdragen bij elkaar. Als dusdanig kunnen we schrijven: $A = \sum_{i \in M} A_i N_i$

Het som symbool staat voor een compacte notatie van een lange som.

Weerom was de “verzameling van deelcategorieën” (hier: M , de verzameling van de chemische elementen) een discrete verzameling, met kwalitatief verschillende elementen ; in dit geval de verschillende chemische elementen. Er is niet zoiets als “halverwege tussen helium en lithium”. Maar niets verplicht ons om enkel kwalitatief verschillende deelcategorieën te beschouwen. Deelcategorieën kunnen ook “vakjes” zijn volgens een bepaalde fysische grootte. Beschouw het volgende. In een kamer zijn er geen mensen aanwezig die kleiner zijn dan 1.2 meter, of groter zijn dan 2 meter. Er zijn 4 mensen aanwezig die tussen 1.2 en 1.4 meter groot zijn, er zijn 8 mensen aanwezig die tussen 1.4 en 1.6 meter groot zijn, er zijn 20 mensen aanwezig die tussen 1.6 meter en 1.8 meter groot zijn, en er zijn 6 mensen aanwezig die tussen 1.8 en 2.0 meter groot zijn. Uit de beschrijving volgt dat deze deelcategorieën mutueel exclusief en volledig zijn. Hoeveel mensen zijn er aanwezig in de kamer ? Opnieuw maken we de som over de vier deel categorieën: $4 + 8 + 20 + 6 = 38$ mensen zijn aanwezig in die kamer. Het kan zijn dat iemand een nauwkeuriger indeling heeft gemaakt: 3 mensen zijn aanwezig tussen 1.2 meter en 1.35 meter ; 5 mensen zijn aanwezig tussen 1.35 en 1.5 meter, 10 mensen zijn aanwezig tussen 1.5 en 1.65 meter, 14 mensen zijn aanwezig tussen 1.65 en 1.8 meter, 5 mensen zijn aanwezig tussen 1.8 en 1.95 meter, en er is een persoon die groter is dan 1.95 meter. De som is nu: $3 + 5 + 10 + 14 + 5 + 1 = 38$ mensen. Geen wonder dat het totaal aantal mensen in de kamer onafhankelijk is van de wijze waarop we ze in deelgroepjes hebben opgesplitst. Laten we de grootte “totale lengte” van de groep uitrekenen. Ik geef toe dat dat wat bij de haren getrokken is als fysische grootte, maar kom, als we aan elke persoon een stok willen geven die gelijk is aan zijn hoogte, dan is deze grootte dus de totale hoeveelheid stok die we moeten kopen. Bij de eerste opsplitsing wordt onze som: $4 \times 1.3m + 8 \times 1.5m + 20 \times 1.7m + 6 \times 1.9m = 62.6m$ Hierbij hebben we als lengte voor alle leden van een groep, het “midden” van het betreffende lengte interval gekozen. Doen we hetzelfde voor onze tweede opdeling in groepen, dan vinden we: $3 \times 1.275 + 5 \times 1.425 + 10 \times 1.575 + 14 \times 1.725 + 5 \times 1.875 + 1.975 = 62.2m$

We zien dat de “totale lengte” in beide gevallen ongeveer gelijk is. Het kleine verschil komt van het feit dat we telkens het “midden” gekozen hebben van elk lengte interval, terwijl het natuurlijk niet noodzakelijk het geval is dat alle leden van een interval als gemiddelde lengte exact dat midden hebben. Het zal natuurlijk zo zijn dat hoe kleiner we onze vakjes kiezen, hoe nauwkeuriger die waarden zullen worden, want hoe kleiner de mogelijke “fout” op het middelpunt versus het gemiddelde per vakje zal worden.

Integralen

Om zich van die “afhankelijkheid van de gekozen vakjes” te ontdoen, hebben de wiskundigen een nieuw soort som bedacht dat zich daar ideaal van ontdoet: de integraal. Wiskundigen hebben zich op het vraagstuk toegelegd wat er gebeurt wanneer we de vakjes oneindig klein maken (en dus oneindig veel vakjes hebben). Het is dat deel wat de menselijke geest voor bijna 1500 jaar heeft bezig gehouden, van de Grieken die zich het probleem wel konden indenken, maar geen gepaste oplossing konden bedenken (Archimedes is er heel dicht bij gekomen) tot uiteindelijk de Engelsman Isaac Newton en de Duitser Leibniz onafhankelijk van elkaar de differentiaal en integraal rekening hebben uitgevonden. Het is nu wel zo dat deze wiskundige technieken pas aan het einde van de

humaniora aangehaald worden, en van een abstracter natuur zijn dan wat ik van de lezer aanneem. Maar het punt is dat de moeilijke stap in de integraalrekening de stap is naar “oneindig kleine vakjes”, en dat als we praktische numerieke berekeningen maken met een computer, we nooit oneindig veel oneindig kleine stapjes kunnen beschouwen. *Als dusdanig kan ik eigenlijk blijven werken met sommen over verschillende kleine vakjes, zoals men dat uiteindelijk in de praktijk altijd op een computer doet.* Hoewel ik dus in dit werk heel vaak de symbolische voorstelling van een (abstracte) integraal neerschrijf, is dat steeds met het idee dat die een gewone som voorstelt – wetende dat we op die manier wel een kleine numerieke fout maken (zoals in het voorbeeldje was aangetoond) maar dat dat in elk geval de praktische wijze is waarop men in werkelijkheid de berekening maakt.

Laten we naar een ander voorbeeld overstappen, om dit verder te illustreren. Laat ons aannemen dat we een trein volgen die van station A naar station B rijdt. Als functie van de tijd schrijft de machinist geregeld de snelheid van de trein in een schrift: in de stijl van: 10:00 hr, 30 m/s. 10:05 hr: 35 m/s ; 10:10: 40 m/s en zo voort. We wensen, uitgaande van die gegevens in het schrift, uit te rekenen hoe ver de trein gereden heeft tussen 10 uur en 11 uur. Ideaal gezien is de afgelegde weg de integraal van de snelheid over de tijd ; in de praktijk wil dat zeggen dat we voor elk tijdsinterval de waarde van de snelheid vermenigvuldigen met de duur van het interval in kwestie, en daarover dan de som maken. Wetende dat een minuut 60 seconden is, en onze tijdsintervallen in het schrift 5 minuten of dus 300 seconden voorstellen, wordt de afstand dan: $300s \times 30 \text{ m/s} + 300s \times 35\text{m/s} + \dots$

Maar stel nu dat de tweede machinist veel nauwgezetter is, en elke minuut de snelheid heeft genoteerd. Bijvoorbeeld: 10:00 hr: 30 m/s ; 10:01 hr: 31m/s ; 10:02 hr: 31 m/s ; 10:03 hr: 32 m/s ; 10:04 hr: 34 m/s enz... We kunnen, uitgaande van dit tweede schrift, een “betere” schatting van de afstand bekomen, door nu $60s \times 30 \text{ m/s} + 60s \times 31\text{m/s} + 60s \times 31\text{m/s} + 60s \times 32\text{m/s} + \dots$ uit te rekenen. Dat is een andere som, maar het resultaat zal goed lijken op het vorige resultaat. We rekenen dus uit: $d = \sum_i v_i \Delta t_i$ waarbij de som genomen wordt over de relevante tijdsvakjes: in het eerste geval (om de 5 minuten) waren dat er 12, en in het tweede geval (om de minuut) zijn dat er 60 tussen 10 uur en 11 uur. De abstracte integraal notatie voor dit geval is $d = \int v(t) dt$ welke wiskundig gezien het limiet geval is van de vorige som wanneer de tijdsvakjes oneindig klein, en hun aantal oneindig groot wordt, maar als men numeriek een integraal wil uitrekenen, dan vervangt men die weeral door de gewone som waar men de tijdsvakjes “relatief klein” kiest. Als dusdanig stellen de integralen die ik in de tekst aanwend gewoon de som voor. Natuurlijk maakt men zo een kleine fout, en is dat wiskundig gezien onnauwkeurig, maar het is in elk geval op die manier dat men de dingen in de praktijk aanpakt. Dus, geen paniek: als ik in de tekst $d = \int v(t) dt$ schrijf, dan kan men heel goed aan $d = \sum_i v_i \Delta t_i$ denken en zich niets aantrekken van “oneindig kleine vakjes”.

Dichtheden

Veronderstel dat we een machine hebben die koperdraad maakt door van een blok koper een draad te trekken, maar dat de machine niet goed werkt en dat de draad soms wat dikker is en dan weer wat dunner is. Om te weten hoe goed of slecht onze machine werkt, gaan we een draad produceren, die dan in stukjes snijden, en de stukjes wegen. We kunnen de draad in stukjes van 10 cm lang knippen, en dan vinden we bijvoorbeeld: eerste stukje: 1.8 gram ; tweede stukje: 1.6 gram ; derde stukje: 1.4 gram... Maar we hadden natuurlijk ook in stukjes van 5 cm kunnen snijden, en dan zouden we iets vinden als: eerste stukje: 0.8 gram, tweede stukje: 1.0 gram ; derde stukje 0.9 gram ; vierde stukje 0.7 gram ; ... Als dusdanig zouden we langsheen de draad een waarde kunnen aangeven, maar de vraag is: moeten we na 10 cm nu de waarde 1.8 gram (van de 10 cm reeks) of eerder de waarde 1.0 gram (van de 5 cm reeks) bijhouden ? Het spreekt vanzelf dat lokaal gezien,

de grootheid die enige fysische zin heeft, *onafhankelijk dient te zijn (op kleine foutjes na) van onze willekeurige keuze van de lengte van de stukjes die we gekozen hebben om te wegen*. Met andere woorden, wat zin heeft, is de “hoeveelheid gewicht van een stukje per eenheid van lengte”. Om het arbitraire van de keuze van de lengte van onze stukjes draad te elimineren, dienen we dus het gewicht van een stukje draad te delen door zijn lengte. Op ons punt geeft de eerste reeks dus 0.18 gram per centimeter, en onze tweede reeks 0.2 gram per centimeter, wat numeriek bijna hetzelfde is, en het verschil komt hem van het feit dat onze stukjes nog wat te groot zijn en dus nog wat “variatie” bevatten. De grootheid “per centimeter” is een *dichtheid*. Als m_i de massa is van stukje i , l_i de lengte van stukje i , dan is de dichtheid ter hoogte van waar we stukje i uit de draad hebben geknipt: $\rho_i = \frac{m_i}{l_i}$. Als dusdanig is de dichtheid niet echt meer afhankelijk van het precieze stukje in

kwestie, maar eerder van de positie langsheen de draad. We kunnen eigenlijk de dichtheid als een functie zien van de positie langsheen de draad, en de individuele waarden ρ_i als specifieke waarden van die functie op bepaalde plekken. We kunnen schrijven: $\rho(x)$ als functie van de positie langsheen de draad (hier voorgesteld door de coördinaat x). We kunnen dan stellen dat $\rho(x_i) = \rho_i$, specifieke waarden van de functie op specifieke plekken.

Stel nu dat we de totale massa van onze draad willen kennen, nadat we die in stukjes hebben geknipt. De totale massa van de draad is natuurlijk gegeven door de som van de massa's van al de stukjes. We kunnen dus schrijven: $M = \sum_i m_i$ waar we impliciet veronderstellen dat we de goeie som maken. Zoals we gezien hebben, was de interessante grootheid niet zozeer m_i , maar eerder de dichtheid $\rho(x)$. In de mate dat we (benaderde) waarden van die functie kennen voor alle denkbare posities x , kunnen we nu, a posteriori, nieuwe “stukjes” draad bedenken (of dat nu de stukjes waren die gediend hebben voor het vinden van de waarden van $\rho(x)$ of niet) van, zeg maar, lengte Δ_i die allemaal gelijk kunnen zijn, of verschillen als we ons het leven moeilijk willen maken, en we nemen nu ook posities x_i , die ergens midden in elk van onze nieuwe stukjes vallen. Een goede schatting van de massa van ons nieuwe stukje nummer i is natuurlijk gegeven door: $m_i \approx \Delta_i \rho(x_i)$. Hoe kleiner onze nieuwe stukjes zijn, en hoe preciezer we de dichtheid $\rho(x)$ kennen, hoe beter die benadering gaat zijn. Als dusdanig kunnen we de totale massa van de draad uitrekenen: $M = \sum_i m_i = \sum_i \Delta_i \rho(x_i)$. In “integraal notatie” schrijven we: $\int \rho(x) dx$ maar dat staat dus voor net dezelfde grootheid. Wiskundigen beschouwen dat de integraal nieuwe stukjes van oneindig kleine lengte aanneemt, maar in de praktijk, zoals reeds eerder gezegd, voeren we gewoon de som uit die we net hebben neergeschreven. De grote sigma van de som wordt vervangen door een gekrulde grote S , het integraal symbool, en de lengte van de stukjes wordt vervangen door de notatie dx . Al dat is enkel maar een kwestie van notatie.

Meerdere dimensies

We hebben gezien dat we een totale grootheid kunnen uitrekenen door de som te maken van de grootheden die horen bij deelcategorieën. Als deze deelcategorieën kwalitatief verschillend waren en dus aanleiding gaven tot een discrete opsomming, dan was dat idee heel voor de hand liggend. We hebben nadien gezien dat deelcategorieën ook kunnen beschouwd worden als zijnde gegeven door (wat arbitrair gekozen) aaneensluitende intervallen van een continue fysische grootheid; in het bovenstaande voorbeeld was die grootheid de lengte langsheen een koperdraad. Maar in vele gevallen gaat men deelcategorieën vinden die gespecificeerd kunnen zijn door intervallen van waarden van *meerdere fysische grootheden tegelijkertijd*. Het basis idee blijft hierbij net hetzelfde: we moeten gewoon een som maken over alle deelcategorieën. Alleen wordt de “boekhouding” een beetje ingewikkelder als we meerdere grootheden hebben.

Stel dat we een pot verf hebben uitgegoten over de vloer en dat die verf ongelijkmatig is opgedroogd. We willen de totale massa kennen van de opgedroogde verf, en we kunnen nu de vloer opdelen in kleine rechthoekjes. We tekenen een rooster over de vloer met een x -as en een y -as, en we beschouwen (aaneensluitende) rechthoekjes i met boorden p_i en q_i . Het oppervlak van het rechthoekje nummer i zal gelijk zijn aan $p_i q_i$ en de massa van de hoeveelheid droge verf op dat rechthoekje is m_i . Het zou de lezer duidelijk moeten zijn dat de relevante dichtheid hier gegeven zal zijn door de hoeveelheid massa per oppervlakte eenheid: $\rho_i = \frac{m_i}{p_i q_i}$, omdat het deze grootte zal

zijn die (grotendeels) onafhankelijk zal zijn van de precieze keuze van de afmetingen van het rechthoekje. Inderdaad, als de verf niet heel erg onregelmatig is verspreid, dan zal een rechthoekje met twee keer zo grote oppervlakte ook wel ongeveer twee keer zoveel massa gedroogde verf bevatten. We kunnen aannemen dat de dichtheid als dusdanig gevormd, specifieke waarden zijn van een dichtheidsfunctie $\rho(x, y)$ die hier afhangt van twee fysische grootheden: de x -coördinaat en de y -coördinaat. We kunnen een gelijkaardige redenering toepassen als met de koperdraad, en nieuwe rechthoekjes invoeren. De massa gaat nu gelijk zijn aan: $M = \sum_i m_i = \sum_i \rho(x_i, y_i) \Delta x_i \Delta y_i$. We hopen dat de lezer deze som begrijpt: we maken de som over de massa's van de nieuwe rechthoekjes (genummerd door i), en de massa van een rechthoekje is gegeven door de dichtheid ergens in een punt midden in dat rechthoekje (met coördinaten x_i en y_i) vermenigvuldigd met de oppervlakte van het rechthoekje; dat laatste oppervlak is gelijk aan het product van de x -kant en de y -kant van het rechthoekje. Bovenstaande som wordt ook in "integraalnotatie" geschreven: $M = \int \rho(x, y) dx dy$. Voor onze toepassingen wil deze formule exact hetzelfde zeggen als de eerder vernoemde som. Voor wiskundigen stelt deze formule het limiet geval voor waarbij de rechthoekjes oneindig klein worden.

In het bovenstaande voorbeeld waren de twee fysische grootheden (x en y) van dezelfde natuur, namelijk een lengte, maar dat is helemaal niet nodig. Een grootte kan bijvoorbeeld "energie" voorstellen, een andere een hoek... *Het belangrijke is te beseffen dat de "doosjes-onafhankelijke" grootte meestal een dichtheid is, dat wil zeggen, de grootte (zoals massa) in een zeker vakje, gedeeld door de afmetingen van dat vakje. Vaak is de grootte in kwestie namelijk proportioneel met de afmetingen van het vakje (zolang de vakjes klein blijven); dat was het geval voor de massa van ons stukje koperdraad, waar we in goede benadering konden aannemen dat de massa van een individueel stukje ongeveer evenredig was met de lengte van het stukje; dat was ook het geval voor onze opgedroogde verf, waar de massa van de verf op een rechthoekje ongeveer evenredig was (voor kleine rechthoekjes) met de oppervlakte van het rechthoekje. In zulk een geval is het opportuun de grootte in kwestie te delen door de relevante afmeting van het vakje, omdat we op die manier onafhankelijk zijn van de relatief arbitraire keuze van de vakjes. De grootte die we als dusdanig bekomen, de dichtheid, kan dan beschouwd worden als een fysische grootte die een functie is van de grootheden die de vakjes hebben afgebakend (de positie x in het geval van de draad, en de (x, y) coördinaten in het geval van de verf).*

Als we nu terug willen keren van een dichtheid naar de globale grootte, dan moeten we artificiële vakjes invoeren, de dichtheid vermenigvuldigen met de afmetingen van die vakjes, en de som maken over al die vakjes. Die procedure heet: de dichtheid integreren, via een "integraal" die dus, op ons niveau, niets anders is dan een som.

Appendix C: SciLab rekenprogramma

Hoe Scilab bekomen ?

Men vindt het gratis rekenprogramma Scilab op de volgende website: <http://www.scilab.org/>

Het is een vrije kloon van het commerciële pakket MATLAB dat gecommercialiseerd wordt door The Mathworks <http://www.mathworks.nl/>. Hoewel MATLAB een beetje de industrie standaard is in wetenschappelijk numerieke berekeningen, is het niettemin een vrij duur pakket voor de individuele gebruiker en de vrije kloon Scilab is voor onze toepassingen meer dan goed genoeg. Voor een Windows PC kan men onmiddellijk het pakket neerladen, voor andere installaties moet men een beetje zijn weg zoeken op de site. De installatie is vrij eenvoudig.

Er bestaan andere vrije klonen van MATLAB. We hadden trouwens eerst Octave gebruikt <http://www.gnu.org/software/octave/octave.html>, in de versie GNU Octave. Het probleem is echter dat dit een pakket is dat essentieel voor Linux is geschreven, en hoewel er een emulatie bestaat voor Windows, is deze heel traag in uitvoering. Dat heeft ons uiteindelijk laten beslissen om eerder Scilab te gebruiken.

Wat is Scilab ?

Scilab is een numeriek rekenprogramma dat zowel interactief kan gebruikt worden als kan dienen om programma's uit te voeren. Als dusdanig staat Scilab ook voor een programmeertaal die vrij gelijklopend is met de MATLAB programmeertaal, hoewel er toch wel kleine verschillen zijn. Er is geen groot verschil tussen het interactief gebruik en het programmeren.

In interactieve mode heeft men een “rekenblad” ter beschikking, waar men commando's in de Scilab taal in tikt, en de resultaten ervan ziet.

Als men bijvoorbeeld:

```
8 + 5
```

tikt, en op de return knop duwt, dan vindt men:

```
ans =  
13.
```

als antwoord. Op die manier werkt Scilab dus als zakrekenmachientje.

Men kan ook variabelen invoeren:

```
a = 8
```

wat als onmiddellijk antwoord geeft dat a nu de waarde 8 heeft aangenomen:

```
a =  
8.
```

Als men het antwoord niet wil zien, dan kan men aan het einde van zijn commando, een punt-komma tikken:

```
b = 9;
```

Intern is b dus wel degelijk gelijk aan 9 gesteld, maar we zien het antwoord niet verschijnen.

Als we nu tikken:

```
a * b
```

dan vinden we als antwoord:

```
ans =
```

```
72.
```

wat natuurlijk het resultaat is van 8 maal 9.

We kunnen de inhoud van een variabele overschrijven, gewoon door er een nieuwe waarde aan te geven:

```
a = 3;
```

Als we nu opnieuw uitvoeren:

```
a * b
```

dan vinden we deze keer:

```
ans =
```

```
27.
```

want b was nog steeds 9, en a was nu 3 geworden.

“ans” is ook een variabele, die telkens van waarde verandert, en als waarde het laatste berekende antwoord bevat (ook als we een punt-komma schrijven).

Een variabele is gewoon elk denkbaar naampje dat we met letters kunnen schrijven (en per toeval geen commandowoord is).

We kunnen op die manier relatief ingewikkelde berekeningen maken (een nietszeggend voorbeeld):

```
a = 8.87;
b = 7.120;
c = log10(sqrt(a^2 + b^2)-sqrt(a+b))
```

geeft:

```
c =
```

```
0.8677856
```

In het bovenstaande zijn `log10` en `sqrt` ingebouwde functies die respectievelijk het logaritme in basis tien berekenen, en de vierkantswortel trekken.

Scilab is dus een gesofistikeerd wetenschappelijk rekenmachientje met geheugens (alle denkbare variabelen, tot de computer geen geheugen meer heeft).

Maar er is meer. Een variabele hoeft niet een enkel getal te zijn. Een variabele kan ook een tabel getallen zijn, in 1, 2 of zelfs meerdere dimensies.

```
a = [1,5,7,9,3]
```

geeft ons een 1-dimensionele tabel (een rij) met 5 getallen.

Als we tikken:

```
c = a+a
```

dan bekomen we:

```
c =
```

```
2.    10.    14.    18.    6.
```

met andere woorden, de optelling is uitgevoerd op alle elementen van de rij.

Als we een enkel element uit de rij willen halen, dan kunnen we dat op de volgende wijze doen:

```
d = c(4)
```

wat ons als resultaat geeft:

```
d =
```

```
18.
```

We hebben hier dus het vierde element van de tabel met 5 elementen genomen.

Op dezelfde wijze kunnen we ook een element veranderen:

```
c(2) = 20.5
```

waar we dus het tweede element van de tabel c veranderen in de waarde 20.5 ; we krijgen als antwoord de volledige tabel c:

```
c =
    2.    20.5    14.    18.    6.
```

waar de “oude” waarden behouden zijn behalve op plaats nummer 2, die de nieuwe waarde heeft aangenomen.

Er zijn commando's die automatisch tabellen genereren. Het eenvoudigste commando is waarschijnlijk de rekenkundige rij. Het wordt geschreven: “beginwaarde” : “stapgrootte” : “eindwaarde”

```
t = 0:0.3:2.1
t =
    0.    0.3    0.6    0.9    1.2    1.5    1.8    2.1
```

In het bovenstaande voorbeeldje hebben we een rijtje gecreëerd van de opeenvolgende waarden, startende vanaf 0, en toenemende met 0.3, tot aan 2.1.

Als we heel grote rijen genereren is het nuttig om het punt-komma commando te gebruiken.

We kunnen rijen manipuleren: bijvoorbeeld twee of meer rijen aan elkaar plakken:

```
u = [t,t,t]
u =
    column 1 to 9
    0.    0.3    0.6    0.9    1.2    1.5    1.8    2.1    0.
    column 10 to 18
    0.3    0.6    0.9    1.2    1.5    1.8    2.1    0.    0.3
    column 19 to 24
    0.6    0.9    1.2    1.5    1.8    2.1
```

Er bestaan ook “programmeer” commando's. We bespreken er 2. Het eerste commando dat we bespreken is de zogenaamde “for-lus”. Een for-lus voert een aantal commando's verschillende keren achter elkaar uit, terwijl een variabele voor elke uitvoering een andere waarde aanneemt ; deze waarden zijn opgeslagen in een rij.

De algemene vorm is:

for “variabele” = “rij”

“commando's die herhaaldelijk uitgevoerd dienen te worden”

end

Voorbeeldje:

```
u = 0;
for i = t
u = u + i;
end
u
```

geeft als antwoord:

```
u =
    8.4
```

De commando's doen het volgende: u wordt eerst gelijk gesteld aan 0. Vervolgens gaan we het commando: $u = u + i$; herhaaldelijk uitvoeren, waarbij i achtereenvolgend alle waarden van de rij t aanneemt. Dus de eerste uitvoering gaat worden: $u = 0 + 0$ (want i neemt de waarde 0 aan, de eerste waarde in de rij t). De tweede uitvoering gaat worden: $u = 0 + 0.3$ (want i neemt nu de waarde 0.3 aan, de tweede waarde in de rij t). De derde uitvoering wordt: $u = 0.3 + 0.6$ (want u was eerder gelijk gesteld – tweede uitvoering – aan 0.3, en nu neemt i de waarde 0.6 aan), de vierde uitvoering wordt: $u = 0.9 + 0.9$ (want u was 0.9, en i, de vierde waarde in t, is ook 0.9). De vijfde uitvoering wordt: $u = 1.8 + 1.2$ (want u was 1.8, en nu is i de vijfde waarde van de rij t, namelijk 1.2). Dat gaat zo verder tot de laatste uitvoering, waar $u = 6.3 + 2.1$ wordt uitgevoerd, en u dus gelijk wordt aan 8.4. De laatste waarde van t is bereikt, en het for-commando neemt zijn einde. Het commando “u” laat gewoon de waarde van u zien.

Het bovenstaande geheel heeft ons toegelaten om de som van alle waarden in de rij “t” te vinden.

Het tweede programmeercommando dat we gaan bespreken, is het if-else commando. Het if-else commando laat toe om commando's uit te voeren of niet, naargelang een bepaalde bewering “waar” is of “fout”. Het neemt de volgende vorm aan:

```
if “bewering”
“commando's A”
else
“commando's B”
end
```

Als de bewering “waar” is, dan worden de commando's A uitgevoerd, maar niet de commando's B ; als de bewering “fout” is, dan worden de commando's B uitgevoerd, maar niet de commando's A.

Men kan ook een verkorte versie schrijven:

```
if “bewering”
“commando's A”
end
```

In dat geval worden de commando's A uitgevoerd als de bewering waar is, en anders wordt niets uitgevoerd.

Voorbeeld:

```
a = 5;
if a > 2
    b = a - 3;
else
    b = a + 3;
end
b
```

wat de waarde 2 oplevert, omdat enkel het commando “ $b = a - 3$ ” is uitgevoerd: inderdaad is onze bewering $a > 2$ “waar” (a is 5, en is inderdaad groter dan 2).

Het is mogelijk om een hele lijst commando's in een tekstbestand op te slaan: zo een lijst commando's heet dan gewoon een Scilab programma.

Om een programma in te voeren, volstaat het op het menu “Editor” te klikken: een venster verschijnt waar men tekst kan intikken, zoals een eenvoudige tekst editor. Laten we het bovenstaande lijstje commando's (`a = 5 ; if`) in het tekstvenster intikken.

We kunnen dat bestand nu opslaan ergens op een harde schijf of gelijk waar. Nadien kunnen we dat bestand weer openen, en vanuit de editor kunnen we het menu “Execute” (load into Scilab) uitvoeren. Op het Scilab rekenblad verschijnen nu alle resultaten alsof we de commando's een voor een hadden ingetikt.

De programmaatjes in de tekst zijn net op die manier uitgevoerd: de tekst werd in een editor venster ingetikt, en het programma werd uitgevoerd. De programma's hebben hun eigen “plot” commando's die een grafisch venster oproepen.

We illustreren hier in interactieve mode het basis “plot” commando:

```
t = -6:0.01:6;
v = sin(t);
w = cos(2*t)/3;
plot(t,v,t,w)
legend("trage sinus","snelle cosinus")
```

We nodigen de lezer uit om deze commando's uit te voeren door ze een voor een in te tikken in het rekenblad van Scilab.

Het bovenstaande was een heel summiere inleiding tot het gebruik van Scilab, hopelijk net voldoende om de programma's die in deze tekst voorkomen, kunnen te lezen. Op de webstek van Scilab vindt men uiteraard een veel uitgebreider handleiding, in het Frans of in het Engels.

Monte Carlo programma

```
clear
timer();

// we voeren de gegevens in van de elastische werkzame
// doorsnede op waterstof
// de gegevens zijn afkomstig van http://www.nndc.bnl.gov/
// de eerste kolom geeft de neutron energie in eV aan,
// de tweede geeft de bijhorende werkzame doorsnede in barn.

pi = 3.1415926;

stacksize(4000000)

sigmaelastic = [1.0E-5          1170.27074 ;
                1.31241E-5      1021.57193 ;
                1.70876E-5      895.333917 ;
                2.2426E-5       781.590952 ;
                2.91987E-5      685.033237 ;
                3.83206E-5      598.036411 ;
                5.0E-5          523.628977 ;
                6.56205E-5      457.167846 ;
                8.54381E-5      400.755759 ;
                1.1213E-4       349.939308 ;
                1.45993E-4      306.813904 ;
                1.91603E-4      267.974275 ;
                2.49468E-4      235.02143 ;
                3.27404E-4      205.354165 ;
                4.26281E-4      180.195235 ;
                5.59456E-4      157.558347 ;
                7.28412E-4      138.37675 ;
                9.55976E-4      121.135712 ;
                0.001244683     106.545801 ;
                0.001633535     93.4547847 ;
```

```

0.002126866      82.4017853 ;
0.002791322      72.5133304 ;
0.003634306      64.1958856 ;
0.004769703      56.7909575 ;
0.006210162      50.6012707 ;
0.008150285      45.1343234 ;
0.010611685      40.6102526 ;
0.015167197      35.5620056 ;
0.021678353      31.5805627 ;
0.023489176      30.8158001 ;
0.0253           30.1468052 ;
0.036161087      27.4088918;
0.056737712      24.91876 ;
0.088316911      23.27193 ;
0.165666496      21.8472062 ;
0.404610435      20.8479735 ;
1.68857715       20.2987935 ;
34175.2288       16.8198014 ;
71731.8          14.1859813 ;
109776.5        12.3866401 ;
150000.0        10.9237767 ;
200000.0        9.6435294 ;
300000.0        7.95225415 ;
400000.0        6.8765977 ;
500000.0        6.12556804 ;
650000.0        5.34944422 ;
850000.0        4.63652031 ;
1097765.0       4.05270026 ;
1400000.0       3.5417792 ;
1900000.0       2.99291594 ;
2500000.0       2.55105746 ;
3300000.0       2.14945497 ;
4400000.0       1.77518189 ;
5750000.0       1.46585499 ;
7250000.0       1.22453199 ;
9250000.0       1.00022484 ;
1.15E7          0.824916844 ;
1.4E7          0.687115518 ;
1.7E7          0.568970497 ;
2.0E7          0.482756764 ];

// van deze gegevens maken we een functie (door een techniek
// die spline-interpolatie heet), zodat we ook de waarden tussenin
// de bovenstaande tabelpunten kunnen berekenen

sigmaelasticx = log(sigmaelastic(:,1));
sigmaelasticy = sigmaelastic(:,2);
ppelastic = splin(sigmaelasticx,sigmaelasticy);

// we doen hetzelfde met de absorptie werkzame doorsnede:

sigmaabsorption = [ 1.0E-5          16.7057159 ;
1.30374E-5      14.6308658 ;
1.71104E-5      12.7712972 ;
2.22778E-5      11.1925568 ;
2.92376E-5      9.7699925 ;
3.80674E-5      8.5622635 ;
4.996E-5        7.47401344 ;
6.50481E-5      6.55009907 ;
8.53698E-5      5.71758928 ;
1.11152E-4      5.01080091 ;
1.45877E-4      4.3739284 ;
1.89932E-4      3.83324365 ;
2.49268E-4      3.34604524 ;
3.24548E-4      2.93241676 ;

```

4.2594E-4	2.55971049 ;
5.54575E-4	2.24328751 ;
7.2783E-4	1.95816842 ;
9.47636E-4	1.71610637 ;
0.001243688	1.49799113 ;
0.001619284	1.31281457 ;
0.002125166	1.14595731 ;
0.00276697	1.00429733 ;
0.003631402	0.876652363 ;
0.004728092	0.768283489 ;
0.0062052	0.670635254 ;
0.008079181	0.587733451 ;
0.010603206	0.513033246 ;
0.013805394	0.449612651 ;
0.01811835	0.39246772 ;
0.024445062	0.337884596 ;
0.0253	0.332126704 ;
0.033203998	0.289913219 ;
0.043231664	0.254075023 ;
0.056737712	0.221782492 ;
0.073872601	0.194366348 ;
0.096951214	0.169662071 ;
0.126230653	0.148689084 ;
0.165666496	0.129790536 ;
0.215698072	0.113745841 ;
0.283084521	0.099287422 ;
0.368576549	0.087012323 ;
0.483723914	0.075952894 ;
0.629809395	0.066570407 ;
0.826568772	0.058112101 ;
1.07619401	0.050919584 ;
1.41240885	0.044451618 ;
1.83895883	0.038961483 ;
2.41346978	0.034010512 ;
3.14234194	0.029806597 ;
4.1240441	0.02601695 ;
5.36951274	0.022802214 ;
7.04700754	0.019904943 ;
9.17521634	0.017440951 ;
12.0416548	0.015225427 ;
15.6782559	0.013343815 ;
20.5763154	0.011645575 ;
26.7903992	0.010205689 ;
35.1600143	0.008907253 ;
45.7784011	0.007805963 ;
60.0800767	0.006813768 ;
78.2243667	0.005970766 ;
102.662519	0.005210831 ;
133.666782	0.004565318 ;
183.142754	0.003898443 ;
238.460697	0.003415109 ;
321.68446	0.002939417 ;
441.019835	0.002507248 ;
597.429991	0.002153242 ;
818.74649	0.001834936 ;
1132.63852	0.001556554 ;
1474.64099	0.001360569 ;
2002.32598	0.001164416 ;
2732.94177	9.90182E-4 ;
3623.90877	8.55868E-4 ;
4818.44867	7.36138E-4 ;
6512.21718	6.26267E-4 ;
8828.11804	5.29742E-4 ;
10000.0	4.93848E-4 ;
15000.0	3.90772E-4 ;

20000.0	3.28388E-4	;
40000.0	2.08326E-4	;
60000.0	1.55086E-4	;
80000.0	1.24127E-4	;
100000.0	1.03786E-4	;
150000.0	7.45176E-5	;
200000.0	5.92844E-5	;
300000.0	4.46077E-5	;
400000.0	3.82767E-5	;
500000.0	3.52914E-5	;
650000.0	3.36205E-5	;
800000.0	3.32443E-5	;
2000000.0	3.67662E-5	;
2600000.0	3.72143E-5	;
9000000.0	3.2164E-5	;
2.0E7	2.72237E-5];

```
sigmaabsorptionx = log(sigmaabsorption(:,1));
sigmaabsorptiony = sigmaabsorption(:,2);
ppabsorption = splin(sigmaabsorptionx,sigmaabsorptiony);
```

```
// afmetingen van het bronnetje:
xlengte = 10;
ylengte = 3;
zlangte = 1;
```

```
// beginenergie 1 MeV:
estart = 1e6;
```

```
// nuclidendensiteit van vloeibare waterstof
// (0.07 gram per kubieke centimeter)
nu = 6.2e23 * 0.07;
```

```
nofneutrons = 1000;
```

```
for ineutron = 1:nofneutrons
```

```
    // lotje trekken voor de beginpositie
```

```
    x = rand() * xlengte;
    y = rand() * ylengte;
    z = rand() * zlangte;
```

```
    // lotje trekken voor de beginrichting
```

```
    u = 2*rand() - 1; // u is de cosinus van theta
    phi = 2 * pi * rand();
```

```
    energie = estart;
```

```
    levend = 1; // zolang die leeft....
```

```
    // we gaan nu stapjes maken
```

```
    stapnummer = 1;
```

```
    xx(ineutron,stapnummer) = x;
    yy(ineutron,stapnummer) = y;
    zz(ineutron,stapnummer) = z;
    ee(ineutron,stapnummer) = energie;
    leeft(ineutron,stapnummer) = 1;
```

```
    while levend == 1
```

```
        // we berekenen de (macroscopische) werkzame
```

```

// doorsneden bij onze huidige energie:
sel = nu * interp(log(energie),sigmaelasticx,sigmaelasticy,ppelastic)
* 1e-24;
sabs = nu *
interp(log(energie),sigmaabsorptionx,sigmaabsorptiony,ppabsorption) * 1e-24;
stot = sel + sabs;

// de afstand die een neutron zal vliegen tot zijn volgende
// interactie is exponentieel verdeeld volgens de totale
// werkzame doorsnede. We kunnen van een uniforme verdeling
// (zoals onze rand functie) een exponentiele maken door een truc:

// lotje trekken voor de volgende interactie afstand

linteractie = - log(rand()) / stot;

// berekening van de nieuwe positie:
// we starten van de vorige positie, en voegen een stukje
// rechte lijn toe met lengte linteractie en in de richting
// gegeven door de richtingsgrootheden u en phi.
// de kenners zullen de typische bolcoördinaten zien tevoorschijn
// komen

x = x + linteractie * sqrt(1 - u^2) * cos(phi);
y = y + linteractie * sqrt(1- u^2) * sin(phi);
z = z + linteractie * u;

// lotje trekken of het een botsing of een absorptie is:

if (rand() < sel/stot)
    // het is een elastische botsing
    // we moeten nu een nieuwe richting bepalen en een nieuwe
    // energie.
    // we veronderstellen de verstrooiing isotroop, dus de nieuwe
    // richting is uniform willekeurig verdeeld in het massacentrum
    // van het neutron en het waterstof atoom.

    unieuwc = 2 * rand() - 1;
    phic = 2 * pi * rand();

    // daarentegen, als de botsingsrichting gekend is, dan volgt het
    // energie verlies uit de wetten van de mechanica. Dus geen
    // lotje trekken voor de energie, maar de mechanica gebruiken:
    // berekening van het bijhorende energieverlies:

    energienieuw = energie * 1/2 * (1 + unieuwc);

    // berekening van de hoek in het labo systeem ten opzichte van
    // de vorige bewegingsrichting:

    ulab = (1 + unieuwc)/sqrt(2 + 2 * unieuwc);
    philab = phic;

    // uitrekenen van deze hoeken ten opzichte van de z-as in ons
    // coördinatensysteem (en niet ten opzichte van de
    // invalrichting). Nogal ingewikkelde meetkunde. Geloof me.

    unieuw = u * unieuwc - sqrt(1-u^2)*sqrt(1-unieuwc^2)*cos(phic);
    phixnieuw = sqrt(1-u^2)*unieuwc*cos(phi) + sqrt(1-unieuwc^2)*...
        (u*cos(phic)*cos(phi)-sin(phic)*sin(phi));
    phiynieuw = sqrt(1-u^2)*unieuwc*sin(phi) + sqrt(1-unieuwc^2)*...
        (u*cos(phic)*sin(phi)+sin(phic)*cos(phi));

```

```
        phinieuw = atan(phiynieuw,phixnieuw);

        u = unieuw;
        phi = phinieuw;

        // we voegen willekeurige thermische energie toe aan de
        // temperatuur van vloeibare waterstof.
        energienieuw = energienieuw + ...
            sqrt(rand(1,'normal')^2 + rand(1,'normal')^2 +
rand(1,'normal')^2)*0.002;

    else
        // het is een absorptie
        levend = 0;
    end //if

    // opslag van de berekende stap
    stapnummer = stapnummer + 1;
    xx(ineutron,stapnummer) = x;
    yy(ineutron,stapnummer) = y;
    zz(ineutron,stapnummer) = z;
    ee(ineutron,stapnummer) = energie;
    leeft(ineutron,stapnummer) = levend;
    energie = energienieuw;

end //while

// opslag van de absorptie plaats van ons neutron RIP.

xlaatste(ineutron) = x;
ylaatste(ineutron) = y;
zlaatste(ineutron) = z;
elaatste(ineutron) = energie;

end //for

// extractie van de interactieplekken, los van het neutron nummer
xxa = xx;
xff = xx(xx~=0);
yff = yy(xxa~=0);
zff = zz(xxa~=0);
eff = ee(xxa~=0);
timer()

subplot(2,2,1)
histplot(50,xff)
xtitle("histogram x-coordinaat botsingen","X (cm)","relatief aantal botsingen")
subplot(2,2,2)
histplot(50,yff)
xtitle("histogram y-coordinaat botsingen","Y (cm)","relatief aantal botsingen")
subplot(2,2,3)
histplot(50,zff)
xtitle("histogram z-coordinaat botsingen","Z (cm)","relatief aantal botsingen")
subplot(2,2,4)
histplot(50,log10(eff),logflag="nl")
xtitle("Energie bij botsing","log(E)","relatief aantal botsingen")

scf

subplot(2,2,1)
histplot(50,xlaatste)
xtitle("histogram x-coordinaat absorptie","X (cm)","relatief aantal absorpties")
subplot(2,2,2)
histplot(50,ylaatste)
xtitle("histogram y-coordinaat absorptie","Y (cm)","relatief aantal absorpties")
```

```

subplot(2,2,3)
histplot(50,zlaatste)
xtitle("histogram z-coordinaat absorptie","Z (cm)","relatief aantal absorpties")
subplot(2,2,4)
histplot(50,log10(elaatste),logflag="nl")
xtitle("Energie bij botsing","log(E)","relatief aantal absorpties")

```

Actiniden activiteit in nucleair afval.

```

clear                // met een schone lei beginnen.
dt = 5;              // het kleine tijdsinterval, in jaren.
t12u236 = 2.37e7;
t12np237 = 2.14e6;
t12pu238 = 87.7;
t12pu239 = 2.42e4;
t12pu240 = 6.55e3;
t12pu241 = 14.3;
t12pu242 = 3.73e5;
t12am241 = 432;
t12am243 = 7.36e3;
t12cm244 = 18;

pu236 = log(2)/t12u236;
pnp237 = log(2)/t12np237;
ppu238 = log(2)/t12pu238;
ppu239 = log(2)/t12pu239;
ppu240 = log(2)/t12pu240;
ppu241 = log(2)/t12pu241;
ppu242 = log(2)/t12pu242;
pam241 = log(2)/t12am241;
pam243 = log(2)/t12am243;
pcm244 = log(2)/t12cm244;

t = 0:dt:3e5;        // alle tijdsintervallen van 0 tot 300000 jaar
lti = size(t);
steps = lti(2) - 1;  // aantal stappen (een minder dan het aantal intervallen)
tikjes = lti(2);

// hoeveelheden nucliden, uitgedrukt in kilogram

u236 = zeros(tikjes,1);
np237 = zeros(tikjes,1);
pu238 = zeros(tikjes,1);
pu239 = zeros(tikjes,1);
pu240 = zeros(tikjes,1);
pu241 = zeros(tikjes,1);
pu242 = zeros(tikjes,1);
am241 = zeros(tikjes,1);
am243 = zeros(tikjes,1);
cm244 = zeros(tikjes,1);

u236(1) = 5.37 ; // kilogram per ton verrijkt uranium uit een reactor
np237(1) = 0.67;
pu238(1) = 0.37;
pu239(1) = 6.1;
pu240(1) = 2.8;
pu241(1) = 1.5;
pu242(1) = 0.9;
am241(1) = 0.37;
am243(1) = 0.26;
cm244(1) = 0.09;

for i = 1:steps      // we gaan over het aantal stappen lopen
    u236(i+1) = u236(i) - dt * u236(i) * pu236 + dt * pu240(i) * ppu240;

```

```

np237(i+1) = np237(i) - dt * np237(i) * pnp237 + dt * am241(i) * pam241;
pu238(i+1) = pu238(i) - dt * pu238(i) * ppu238;
pu239(i+1) = pu239(i) - dt * pu239(i) * ppu239 + dt * am243(i) * pam243;
pu240(i+1) = pu240(i) - dt * pu240(i) * ppu240+dt * cm244(i) * pcm244;
pu241(i+1) = pu241(i) - dt * pu241(i) * ppu241;
pu242(i+1) = pu242(i) - dt * pu242(i) * ppu242;
am241(i+1) = am241(i) - dt * am241(i) * pam241 + dt * pu241(i) * ppu241;
am243(i+1) = am243(i) - dt * am243(i) * pam243;
cm244(i+1) = cm244(i) - dt * cm244(i) * pcm244;

end //for

activity = pu236*u236 + pnp237*np237 + ppu238*pu238 + ...
          ppu239*pu239 + ppu240*pu240 + ppu241*pu241 + ppu242*pu242 +...
          pam241*am241 + pam243*am243 + pcm244*cm244;

// omzetten van de activiteit in Bq: we dienen kilogram om te zetten
// in aantal nucliden (avogadro gedeeld door uranium massagetal geeft
// aantal nucliden per gram, maal duizend dus per kilogram)
// en omzetten van tijdsconstante in per jaar in per seconde

// gezien de initiële massa's die zijn voor 1 ton verrijkt uranium, hebben
// we hier dus de activiteit van 1 ton verrijkt uranium na bestraling, in Bq.

activity = activity * 6.022e23/238 * 1e3 * 1/(365*24*3600);

// herhalen van de berekening, maar zonder plutonium en neptunium

u236 = zeros(tikjes,1);
np237 = zeros(tikjes,1);
pu238 = zeros(tikjes,1);
pu239 = zeros(tikjes,1);
pu240 = zeros(tikjes,1);
pu241 = zeros(tikjes,1);
pu242 = zeros(tikjes,1);
am241 = zeros(tikjes,1);
am243 = zeros(tikjes,1);
cm244 = zeros(tikjes,1);

u236(1) = 0; // kilogram per ton verrijkt uranium uit een reactor
np237(1) = 0;
pu238(1) = 0;
pu239(1) = 0;
pu240(1) = 0;
pu241(1) = 0;
pu242(1) = 0;
am241(1) = 0.37;
am243(1) = 0.26;
cm244(1) = 0.09;

for i = 1:steps // we gaan over het aantal stappen lopen

u236(i+1) = u236(i) - dt * u236(i) * pu236 + dt * pu240(i) * ppu240;
np237(i+1) = np237(i) - dt * np237(i) * pnp237 + dt * am241(i) * pam241;
pu238(i+1) = pu238(i) - dt * pu238(i) * ppu238;
pu239(i+1) = pu239(i) - dt * pu239(i) * ppu239 + dt * am243(i) * pam243;
pu240(i+1) = pu240(i) - dt * pu240(i) * ppu240+dt * cm244(i) * pcm244;
pu241(i+1) = pu241(i) - dt * pu241(i) * ppu241;
pu242(i+1) = pu242(i) - dt * pu242(i) * ppu242;
am241(i+1) = am241(i) - dt * am241(i) * pam241 + dt * pu241(i) * ppu241;
am243(i+1) = am243(i) - dt * am243(i) * pam243;
cm244(i+1) = cm244(i) - dt * cm244(i) * pcm244;

end //for

```

```
activity2 = pu236*u236 + pnp237*np237 + ppu238*pu238 + ...
           ppu239*pu239 + ppu240*pu240 + ppu241*pu241 + ppu242*pu242 +...
           pam241*am241 + pam243*am243 + pcm244*cm244;

activity2 = activity2 * 6.022e23/238 * 1e3 * 1/(365*24*3600);

// genereren van de afbeelding

plot2d([t+dt;t+dt]',[activity,activity2],logflag="l1")

legend('activiteit met Pu','activiteit zonder Pu');
xtitle('Verloop activiteit actiniden','tijd (jaren)','activiteit (Bq)')
```

Appendix D: Bibliografie.

Zoals gesteld in de inleiding, hebben we in dit werk voornamelijk vrije bronnen gebruikt, die via het internet ter beschikking staan. Zij zijn verdeeld over de hele tekst in de vorm van voetnoten. Het is natuurlijk zo dat het internet voortdurend verandert en bronnen kunnen komen en gaan. Bij het schrijven van deze tekst heb ik mij natuurlijk ook gebaseerd op een groot deel technische vakliteratuur die niet hetzelfde doelpubliek beoogt als deze tekst, en waarvan de toegankelijkheid niet steeds eenvoudig is. Niettemin tracht ik hier een korte lijst van werken te presenteren waar de geïnteresseerde lezer die zich wil verdiepen in sommige aspecten, hopelijk zijn gading kan vinden. Het zijn allemaal Franstalige of Engelstalige werken.

Technische en wetenschappelijke werken

De werken die hier geciteerd worden zijn professionele werken die materiaal op universitair niveau bevatten. Zij zijn waarschijnlijk niet leesbaar voor een groot deel van het doelpubliek van dit boek: een groot deel van mijn bedoeling is net geweest om een leesbare transpositie van dat materiaal te schrijven. De “ruggengraat” van de technische kennis die in het boek naar voren komt, is geïnspireerd door een Franse reeks boeken die dienen als basis cursus materiaal voor de Franse nucleaire ingenieurs. Het zijn werken in de reeks “Génie atomique”¹⁶⁴ uitgegeven door de uitgeverij EDP-Sciences, in opdracht van het INSTN, “l’Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires”. Sommige hoofdstukken in dit werk beschrijven materiaal dat overeenkomt met het materiaal behandeld in sommige van die werken. Meer specifiek vindt men:

- *L'épopée de l'énergie nucléaire* (geschiedenis van het nucleaire gebeuren, hoofdstuk 1)
- *Radioprotection et ingénierie nucléaire* (hoofdstuk 3)
- *Précis de neutronique* (hoofdstuk 4)
- *La chaudière des réacteurs a eau sous pression* (hoofdstuk 5)
- *Le cycle du combustible nucléaire* (hoofdstuk 6)
- *Science des matériaux pour le nucléaire* (hoofdstuk 7)

Er is ook een (vrij zwaar) Amerikaans werk dat de technische en wetenschappelijke kant van het nucleaire gebeuren behandelt:

- *Nuclear Reactor Physics* door W. M. Stacey, uitgegeven door Wiley-VCH.

Algemene, polemische en geschiedkundige werken

Deze werken zijn goed leesbaar voor groot publiek (die de taal van Shakespeare machtig is, op een werk na welk in het Frans is).

- *The making of the Atomic Bomb* door Richard Rhodes (Simon & Schuster Paperbacks) is een heel dik geschiedkundig werk dat het Manhattan project beschrijft.
- *The Los Alamos Primer* door Robert Serber (University of California Press) is de eerste eenvoudige inleiding tot de wetenschappelijke kennis die aanleiding heeft gegeven tot de eerste kernwapens.

164 Zie http://www-instn.cea.fr/rubrique.php3?id_rubrique=115

- *Nuclear energy now* door Herbst en Hopley (John Wiley and Sons) is een analyse, eerder door economen, van de noodzaak van kernenergie. De technische en wetenschappelijke inhoud is eerder mager.
- *Power to save the world* door Cravens (Alfred A. Knopf) is het verhaal van een anti-kernenergie activiste die een reis maakt doorheen “kernenergie land” in de USA en een voor een van haar vooroordelen ontdaan wordt. Een beetje simplistisch op technisch vlak.
- *Nuclear power is not the answer* door Caldicott (the New Press) is een hartstochtelijk pleidooi tegen kernenergie doorspekt met een ongelooflijke hoeveelheid technische en wetenschappelijke misvattingen
- *Ecologie, la grande arnaque* door Christian Gerondeau (Albin Michel) is een analyse van de Groene ideologie en de inefficiënte en contraproductieve maatregelen tot dewelke zij aanleiding heeft gegeven in Frankrijk en Europa.