

### **Kernenergie**

De vaststelling dat massa en energie equivalent zijn, wekte indertijd de vraag op of hiermee ook op gecontroleerde wijze energie opgewekt kon worden. De **on**gecontroleerde manier was al mogelijk gebleken: de “atoombom” en de “waterstofbom”. Om energie gecontroleerd op te wekken, moest men deze bommen zien te temmen. Bij de atoombom, die met kernsplitsing van uranium werkt, bleek dit al snel mogelijk. De kernfusie, waarbij waterstofisotopen tot helium gefuseerd worden, heeft men, ook nu (2007), nog steeds niet onder de knie!

Door het temmen van de atoombom kon men de kernenergie, vrijkomend in de vorm van warmte, toepassen om elektriciteit op te wekken. Er zijn thans in veel landen vele atoomcentrales op basis van kernsplitsing werkzaam, die redelijk goedkope (én schone) stroom produceren.

Het enorme voordeel van atoom- of liever kernenergiecentrales ten opzichte van conventionele, gas-, olie- of kolengestookte centrales, is het ontbreken van de uitstoot van schadelijke gassen zoals koolzuurgas, zwavel- en stikstofoxiden. Het is vooral koolzuurgas (CO<sub>2</sub>) dat verantwoordelijk gehouden wordt voor het broeikas-effect. Gaan we geheel over naar kernenergie (en elektrische auto's) dan hoeft er nauwelijks meer steenkool gedolven te worden en de resterende aardolie kunnen we dan puur gebruiken voor de fabricage van kunststoffen in plaats van het te verbranden!

Het nadeel van centrales, die met kernsplitsing werken, is natuurlijk allereerst de (on)veiligheid, maar ook het probleem van het radioactieve afval. Daar weet men eigenlijk nog steeds niet goed raad mee. Men heeft er over gedacht om dit afval in beton te gieten of in glas te smelten en dan in zee te gooien. “Onvoldoende”, zeggen deskundigen, “Men zou het dan in centimeters dikke gouden (!) containers op moeten sluiten!” Ondergronds opbergen, bijvoorbeeld in zoutkoepels, daarvoor is (nog steeds) geen draagvlak. Daarom slaat men het maar bovengronds op, dan kan het in de gaten gehouden worden! Het afval wordt in speciale, zeer solide containers opgeborgen en deze plaatst men in een voor dit doel ontworpen, stevig gebouw. Het duurt echter zó ontzettend lang vóórdat dit afval ongevaarlijk is, dat men deze containers en gebouwen in de toekomst misschien wel tientallen keren moet vervangen voor dat het spul uitgestraald is. Toch maar onder de grond opslaan dan? Niet koosjer! Men verschuift de problemen dus maar naar de toekomst, in de hoop dat er later wel een oplossing komt. Men zadelt eigenlijk onze nazaten met het probleem op!

Er zijn intussen inderdaad al veelbelovende oplossingen beschikbaar: zo kan men een deel van het afval “opwerken”, waardoor het weer (als kernbrandstof) bruikbaar wordt. Men kan het omzetten in stoffen die veel korter gevaarlijk zijn en het is nu ook al mogelijk om kerncentrales te bouwen die veel minder afval produceren. De kerncentrale in Borsele, om er één te noemen, levert slechts één á twee kubieke meter kernafval per jaar! Maar over deze toch betrekkelijk kleine hoeveelheid afval doen we veel moeilijker dan over de enorme luchtvervuiling, tonnen CO<sub>2</sub> (broeikasgas), vliegias, fijn stof, kolentransport, enz. enz. van de conventionele centrales. Is dat terecht? Volgens mij niet! En wat te denken van de vele mijnwerkers die elk jaar weer omkomen, en de milieuproblemen met aardoliewinning en raffinage? En gas kan flinke branden en explosies veroorzaken. Kernenergie kan en zal juist onze redding worden!

Maar.... het kernafval blijft natuurlijk wel een probleem. Transport, opwerking en opslag hiervan, worden met argusogen bekeken. Dan is er nog de angst voor een kernramp en het eventueel vrijkomen van radioactieve stoffen. De populariteit van kerncentrales is door dit alles, bij het grote publiek én de politiek, klein. Enige landen hebben zelfs onder druk van de (linkse) politiek moeten besluiten om maar helemaal te stoppen met kernenergie, vanwege

deze problemen. Toch zullen we er wel mee door móeten gaan: het alternatief is een modern soort stenen tijdperk!

Voor het kernafval heb ik trouwens nog een leuke oplossing! Schiet af en toe een raket met een flinke hoeveelheid van dit afval richting de zon, misschien een dure en (zullen de tegenstanders zeggen) ook wel enigszins riskante oplossing, maar beter toch dan het afval honderden of duizenden jaren op aarde op te slaan? In Rusland heeft men uiterst betrouwbare raketten om deze klus te klaren.

Om helemaal te stoppen met kernenergie is ook geen goede beslissing. Daar zijn andere landen al lang achter. Neem maar Frankrijk en België. Die zijn respectievelijk voor 70% en 40 % afhankelijk van kernstroom. Terwijl een groot deel van Nederland niets van kernstroom wil weten, importeren wij wel vlijtig volop (kern)stroom uit die landen. Hypocriet toch? Daarbij raakt ook onze kennis over kernenergie natuurlijk steeds verder achterop. Maar... er wordt nu (2007) toch weer voorzichtig gesproken over een tweede kerncentrale, dus wie weet! Gaan we door met fossiele brandstoffen? We zijn nu (in 2007) al op het punt gekomen dat de aardolieproductie niet veel verder meer kan stijgen en gelijk is aan het huidige verbruik (ruim 80 à 90 miljoen vaten per dag). Deze productie zal misschien nog wel iets stijgen, tot, laten we zeggen 100 à 120 miljoen vaten per dag. Uiteindelijk zal de olieproductie toch gaan dalen. Niets duidt er echter op dat het verbruik ook zal gaan dalen, integendeel, niet-westerse landen zoals China en India, hebben een snel stijgend verbruik en eisen hun deel van de olie op. Gevolg de olieprijs zal sterk stijgen en ons wel dwingen wat anders te zoeken.

Een dreigend olietekort kan misschien nog een tijdje uitgesteld worden, bijvoorbeeld door te beginnen met olie te winnen uit “teerzanden”. Daarvan zijn enorme hoeveelheden aanwezig in o.a. Canada. Nu nog iets te duur, maar als de huidige olieprijs nog wat verder stijgt (hij zit nu half 2006 rond de 70 dollar), wordt dit zeker lonend. Ook steenkool is er nog voor honderden jaren, en de Duitsers maakten er in de tweede wereldoorlog al synthetische benzine van. Ook nu wordt er al op kleine schaal dieselolie uit gemaakt.

Men praat ook steeds over “schone” kolencentrales. Maar wat je ook doet, het grote nadeel van steenkool voor elektriciteitsopwekking is, dat bij verbranding ervan in de stoomketels van centrales, zeer veel CO<sub>2</sub> vrijkomt, waardoor het gehalte CO<sub>2</sub> in de lucht verder zal stijgen, terwijl men steeds meer inziet dat dit fatale gevolgen (voor het wereldklimaat en de zeespiegel) kan hebben en al heeft. Zeer lang lag dit rond de 0,03 % en steeg nauwelijks! In de laatste decennia is het CO<sub>2</sub> gehalte van de atmosfeer intussen angstig snel gestegen, tot boven de 0,04 %. Toch wil men weer kolencentrales gaan bouwen en dan de CO<sub>2</sub> ondergronds opslaan..... Tsjonge jonge, wat een geweldige oplossing!

Aardgas bestaat vooral uit methaangas: CH<sub>4</sub>. Hierin zit dus veel waterstof dat tot water (H<sub>2</sub>O) verbrandt en relatief weinig koolstof (dat tot kooldioxide = CO<sub>2</sub> verbrandt). Bij de verbranding van aardgas is het CO<sub>2</sub> probleem dus wat kleiner. Maar....., hoewel er op aarde nog veel van is, ook de aardgasvoorraad is eindig. Daarbij heeft het gebruik van aardgas zo z'n eigen problemen, zoals druk, opslag en transport.

Dan hebben we ook nog “biobrandstof”. Er wordt al veel van dit spul in centrales verbrand maar ook dat is niet meer dan de bekende druppel op de gloeiende plaat! We gaan nu biospul door de benzine en dieselolie mengen, want dan zal de (netto) CO<sub>2</sub> uitstoot verminderen. Maar luitjes, die biobrandstof verbrandt ook tot kooldioxide! Het enige verschil is dat die zonnebloemen (en dat koolzaad en dat suikerriet en die bieten) de CO<sub>2</sub> uit de lucht omgezet hebben in O<sub>2</sub> (zuurstof) en C (koolstof) in de vorm van “plantaardig materiaal. Als wij daaruit olie, alcohol, biomassa en zo maken en verbranden, dan komt die CO<sub>2</sub> weer vrolijk terug in de lucht! “CO<sub>2</sub> neutraal” noemt men dat! Ja,ja jongens, ik ben zwáár onder de indruk! Peanuts is het!

Of we het nu leuk vinden of niet, om elektriciteit op te wekken kunnen we eigenlijk niet om kernenergie heen. Aan de enorme vraag naar elektriciteit kan door kernenergie veel gemakkelijker voldaan worden dan door alternatieve bronnen zoals zon- en windenergie.

Als alternatieve energie zie ik die hele windenergie eigenlijk helemaal niet zitten. Door het lage soortelijk gewicht is het helemaal geen verstandige keuze om lucht als energiedrager te nemen. De molens moeten enorm groot zijn om enigszins lonend te zijn. En.... wat vind je



van het uitzicht op die windmolens? Landschapsvervuiling is het! Wind is ook onbetrouwbaar, wind is niet op bestelling leverbaar. Je krijgt een schokkerige energielevering, slecht voor het net.

fig. 9.1 Landschap in de Flevopolder

Windstroom is bovendien erg duur en het is de vraag of de stroom er ooit wel goedkoper door wordt! En..... helaas: ook de opslag van grote hoeveelheden elektriciteit is nog steeds moeilijk, in ieder geval zeer duur. En nog wat, als we de kerncentrale van Borsele willen vervangen door windmolens, dan moet de hele kust van Nederland vol gezet worden met windmolens, en ....., die moeten dan wel altijd draaien! “Ja, maar ze worden toch in zee gezet?” Zeer duur en... arme vogels! En.... wat doen we als het niet waait? Precies, dan hebben we toch die kern- of een andere centrale weer nodig!

Een stuk beter zou het gebruik van waterkracht in plaats van windkracht zijn. Water als energiedrager heeft een veel hoger soortelijk gewicht dan lucht, waardoor de installaties relatief klein kunnen zijn. In de Alpen en Scandinavië wordt waterkracht voor de opwekking van elektriciteit al lang en volop toegepast. Ja, maar zij hebben bergen! Wij zijn te plat! Toch zouden wij, op bescheidener schaal misschien, wel degelijk elektriciteit uit waterkracht kunnen opwekken! Hoewel Nederland te vlak is voor stuwwerken en stuwdammen, zou men toch niveauverschil, eb/vloedverschil, stroming, golven en dergelijke, kunnen gebruiken om stroom van waterkracht kunnen toepassen. 't Is natuurlijk jammer dat wij geen bergen hebben, maar toch.... Wij zouden bijvoorbeeld hooggeplaatste waterreservoirs als opslag kunnen bouwen. Of gebruik maken van de verlaten kolenmijnen. Een reservoir boven en een reservoir beneden! Daarmee kan je bijvoorbeeld verbruikspieken opvangen! Hoe? Overdag bij hoog verbruik, laat je het water door turbines naar beneden stromen. Die turbines drijven generatoren aan en daarmee vang je de pieken op. 's Nachts, bij laag “dal”verbruik, pompt men het water weer omhoog!

Hoe vangt men nú de pieken op? Met speciale centrales met door gasturbines aangedreven generatoren. Die kan men heel snel opstarten, maar ze verbruiken wel ons kostbare gas en hebben een slecht rendement. Jongens .... er moeten toch slimme methodes te bedenken zijn om eb en vloed, golfslag en zo in elektriciteit om te zetten? Moet ik als ouwe vent mee helpen denken?

Er is nog een andere veelbelovende energiebron, die (voor mij onbegrijpelijk) nog maar mondjesmaat wordt toegepast: geothermische energie! Als je diep genoeg de aarde indringt wordt het steeds warmer! En die warmte kun je benutten, in ieder geval als verwarming: ieder huis of huizenblok z'n eigen "geopot", een pompinstallatie en je hebt verwarming. Het mooiste zou zijn als je die put al vóór de bouw zou boren en dan het huis er bovenop bouwen. Die put moet behoorlijk diep zijn, honderden meters liefst. Maar... dat kan tegenwoordig toch? In IJsland en Nieuw Zeeland zijn er al volop elektriciteitscentrales die van geothermische energie ("geostoom") gebruik maken. Oké, het is daar wat makkelijker, de warmte ligt daar vlak onder de oppervlakte. Maar ook in Nederland zou het kunnen. De eerste huizen met geothermische verwarming zijn er trouwens al.

Een andere alternatieve bron zouden zonnecellen kunnen zijn! We moeten er dan wel onze daken mee vol leggen. Zonnecellen zetten licht direct om in elektrische stroom, maar... helaas, ze zijn nogal duur, hebben (nog) een slecht rendement en een beperkte opbrengst per vierkante meter! Ze zouden zelfs in hun hele levensduur minder energie opleveren dan hun fabricage heeft gekost! Nog niet lonend. Intussen is de technologie van de "fotovoltaïsche" cellen sterk verbeterd. Bij grootschalige toepassing zouden zonnecellen sterk in prijs kunnen dalen en van groot belang kunnen worden, ook in Nederland. Maak toch eens dakpannen met zonnecellen! Als ze op grote schaal toegepast zouden worden, gaat de prijs wel omlaag! Zonnecellen werken het best als de zon schijnt maar ook op bewolkte dagen leveren ze nog wat, helaas 's nachts leveren ze... NIETS.

Een oplossing die er nu aan zit te komen, voor de gezinshuishoudens, is de "totaalunit" in plaats van de verwarmingsketel! Zo'n miniwarmtekrachtcentrale zorgt per huishouden of wooncomplex voor stroom én verwarming. Voordeel: beter rendement, minder transportverliezen. Wel zal de aansluiting op het hoofdnet voorlopig moeten blijven bestaan, om een eventueel tekort op te vangen en een teveel aan stroom weer terug te voeden in het net! En... zo'n unit gebruikt natuurlijk wel (fossiele) brandstof, aardgas dus. Toekomstmuziek? Deze units zijn al te koop!

En kerncentrales met hun kernafval? We mogen verwachten dat we niet zeer lang meer met dit afvalprobleem zullen zitten. Het is vrij zeker dat men in de niet al te verre toekomst een bruikbare oplossing zal vinden. De hoeveelheid afval zal in ieder geval steeds minder worden. Opwerking van bepaalde soorten afval tot bruikbare brandstof is al mogelijk. Omzetting van radioactief afval in stoffen, die veel sneller vervallen, bijvoorbeeld door neutronenbestraling, lijkt eveneens veelbelovend. Ook kan men de hoeveelheid afval tot steeds kleinere hoeveelheden reduceren.

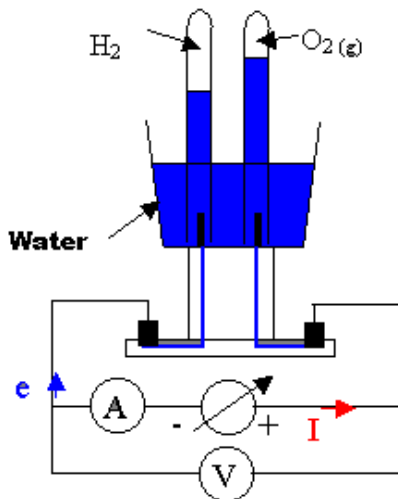
Als er nou eens een beetje harder aan deze problemen gewerkt zou worden, dan konden we snel weer aan kerncentrales gaan denken met het enorme voordeel: geen CO<sub>2</sub> uitstoot, geen oliecrisis, geen broeikas-effect, geen kolencentrales, geen vlieg-as noch zwaveloxide, minder kolenmijnen, minder dode mijnwerkers enzovoort. Met kerncentrales zouden we ook waterstof in grote hoeveelheden kunnen produceren. Dan zou het autoverkeer over kunnen schakelen op deze brandstof en is het uitlaatgasprobleem ook opgelost! Of hollen we toch liever richting energiecrisis? Zeer waarschijnlijk wel: **De mensheid reageert altijd pas als het te laat is!**

### **"Elektrolyse"**

Een tiental jaren geleden was er ineens hoopvol nieuws: enige Amerikaanse geleerden beweerden dat ze de zogenaamde "koude kernfusie" bereikt hadden! Het was voorpaginanieuws. Hoe deden zij dat? Met "elektrolyse"! Wat is dat nu weer? We moeten dus eerst iets weten over "elektrolyse" van water en... over "zwaar" water.

Water, chemische formule  $H_2O$ , bestaat uit waterstof en zuurstof. “H” is de afkorting van “Hydrogenium”, de Latijnse naam voor waterstof, “O” is de afkorting van “Oxygenium” ofwel zuurstof. Uit de formule  $H_2O$  blijkt dat één molecuul water uit twee atomen waterstof en één atoom zuurstof bestaat.

Neemt men nu een bak water en hangt men daarin twee omgekeerde reageerbuisjes met in elk buisje een stroomdraad, die men aan de plus en de min van een gelijkstroombron (bijv. een accu) aansluit, dan verzamelt zich bij de “kathode”(-) draad waterstof en bij de “anode”(+) draad zuurstof. Puur water geleidt geen elektriciteit, dus het water moet wel enigszins geleidend gemaakt worden, bijvoorbeeld met wat zout of zwavelzuur. Deze manier om water om te zetten in waterstof en zuurstof noemt men “elektrolyse” van water en zou natuurlijk ook in ’t groot toegepast kunnen worden. Nadeel is wel dat het “rendement” niet al te hoog is, maar dat kan misschien nog wel verbeterd worden!



**Fig. 9.2 Elektrolyse van water**

Nu men steeds meer hoort en leest dat de waterstofeconomie er aankomt, kan elektrolyse wel eens erg belangrijk worden. Waterstof is inderdaad een ideale, schone brandstof omdat er bij verbranding slechts water(damp) ontstaat. Maar... ik lees alleen over allerlei andere manieren dan elektrolyse om aan waterstof te komen, methodes die mij niet erg bevallen: bijvoorbeeld uit aardgas of aardolie. Maar... als je waterstof uit bijvoorbeeld aardgas maakt heb je wel een schone brandstof, maar bij de fabricage verbrandt de koolstof © uit het aardgas ( $CH_4$ ) weer tot kooldioxide, dus toch weer “broeikasgas”. Van de regen in de drup. Ook komt waterstof bij diverse fabricageprocessen vrij als afvalproduct, heel leuk, maar als werkelijk alle auto’s overgaan op waterstof, dan is dat soort fabricage natuurlijk maar een druppel op een gloeiende plaat. Gebruik je elektriciteit van “conventionele” centrales, dan geldt hetzelfde: de uitstoot van ongewenste gassen wordt verplaatst maar verdwijnt niet.

Wat ikzelf een goed idee (voor de toch wel nabije toekomst) zou vinden is om toch met zonnecellen elektriciteit op te wekken en daarmee door elektrolyse van (zee)water, waterstof op te wekken. Een ideale locatie daarvoor zou de Sahara zijn: volop zon en zeewater dichtbij. Op ’t ogenblik zijn zonnecellen nog zo duur dat de zo opgewekte elektriciteit en dus ook de waterstof erg duur zal zijn. Maar... als dit proces écht op grote schaal toegepast zou worden, kan de fabricage van zonnecellen enorm opgevoerd worden waardoor deze een stuk goedkoper en vanzelf ook beter zouden worden. Het zou ook een enorme opsteker voor de landen in de Sahara zijn! Transport van waterstof is natuurlijk een probleem, maar niet echt veel moeilijker dan de huidige energiedragers zoals olie en gas. Aan de slag jongens, investeren! Ideeetje voor de “grote oliemaatschappij” van Nederland? Diverse grote firma’s zouden trouwens al bezig zijn en plannen hebben. Ze moeten wel....

### **Zwaar water**

Bij kernenergie hoort men vaak spreken over “zwaar water”. Zwaar water heeft een geheimzinnig imago en klinkt ook enigszins vreemd, het soortelijke gewicht van water is toch één? Toch bestaat het, maar het blijkt moeilijk te maken. In de tweede wereldoorlog heeft Duitsland van alles geprobeerd om een zwaar-waterfabriek in Noorwegen te pakken te krijgen. De Duitsers waren namelijk met een atoombom bezig en dachten dat je zwaar water nodig had om een kettingreactie van uranium te verkrijgen. Zwaar water kan namelijk als

“moderator”, als rem gebruikt worden om de neutronen, die uranium uitstoot en voor kernsplijting veel te snel zijn, af te remmen. Snelle neutronen vliegen dwars door het uranium heen. Alleen “langzame“ neutronen kunnen uraniumkernen splijten, daarbij komen dan weer nieuwe neutronen vrij die weer volgende kernen kunnen splijten. Er waren wel meer neutronenremmende stoffen bekend, maar die absorbeerden weer te veel neutronen, waardoor de kettingreactie niet zou plaats hebben of geheel zou stoppen ..... dachten ze! In Amerika en andere landen wist men toen al dat bijvoorbeeld ook grafiet en nog andere stoffen (later zelfs gewoon water), toegepast kon worden, maar men is er, zij het met moeite, in geslaagd dit geheim te houden voor de Duitsers. De Duitsers wisten ook al van kernfusie, het kan dus ook zijn dat ze “zwaar” water voor de productie van waterstofisotopen nodig hadden, waarmee je een waterstofbom kan maken! De tweede wereldoorlog had dan wel eens heel anders af kunnen lopen!

Wat is dat toch, dat “zware water”? Normaal water, weten we, wordt chemisch geschreven als “ $H_2O$ ”: 2 atomen Waterstof (H) verbonden met 1 atoom Zuurstof (O) vormen één molecuul water. Een waterstofatoom is het eenvoudigste atoom dat er bestaat, namelijk een atoomkern bestaande uit één “proton” (een positief geladen kerndeeltje) waaromheen één “elektron” (negatief geladen deeltje) cirkelt. Nu blijken er af en toe waterstofatomen voor te komen die een andere kern hebben. In zo’n andere kern bevindt zich behalve een proton ook nog een “neutron”, een neutraal deeltje dat verder niets doet maar wel de massa van het atoom sterk doet toenemen, daar een neutron ongeveer even zwaar is als een proton. Atomen met gelijke aantallen protonen, maar afwijkende hoeveelheden neutronen noemt men “isotopen”, Grieks voor “gelijke plaats”. Men doelt daarmee op het feit dat isotopen van een element dezelfde plaats in het periodieke systeem (de lijst van elementen) innemen. Isotopen hebben dus dezelfde chemische eigenschappen, maar een afwijkend atoomgewicht door een zwaardere (of lichtere) kern. De chemische eigenschappen van een stof worden immers bepaald door de elektronen en het aantal elektronen in een neutraal atoom is gelijk aan het aantal protonen. En het aantal protonen bepaalt het element!

Over de bouw van een atoom beschrijf ik trouwens nog van alles in een later hoofdstuk (10), waarin ook de “Lijst van elementen”, “Periodiek systeem” en “Deeltjes”.

De genoemde isotoop van waterstof, met één proton en één neutron in de kern, noemt men “Deuterium”, chemisch symbool D, of “zware waterstof”. De verbinding met zuurstof wordt dan dus  $D_2O$ , “zwaar water”. Iedere liter normaal water bevat een zeer kleine hoeveelheid “ $D_2O$ ”: één op de zeventuizend moleculen water blijkt “zwaar”. Weet men deze van het normale  $H_2O$  te scheiden dan heeft men dus water met een hoger soortelijk gewicht. Dit kan men onder andere bereiken met elektrolyse van water (in het overgebleven water komt steeds meer zwaar water voor) en door centrifugeren (het zware water beweegt naar de buitenkant van de trommel).

Er is een nóg zwaardere “isotoop” van waterstof en dat is “Tritium”, chemisch symbool T. Deze isotoop heeft zelfs twee neutronen in de kern en geeft dus nog zwaarder water. Door dit tweede neutron is deze kern echter niet stabiel en dus radioactief! Dit nog zwaardere spul gaat wel een belangrijke rol spelen bij kernfusie.

### **Koude fusie**

De eerder genoemde Amerikaanse geleerden pasten elektrolyse toe op zwaar water ( $D_2O$ ) en beweerden op deze wijze kernfusie bij lage temperatuur verkregen te hebben, met enorm veel vrijkomende energie. Onmiddellijk werd het experiment door wetenschappers in allerlei landen herhaald, maar..... niemand stelde kernfusie vast! Zouden die Amerikanen de zaak belazerd hebben? Zij zelf beweerden van niet, er was bij het experiment zelfs zoveel energie (=warmte) vrijgekomen dat de betonnen vloer ter plaatse zou zijn weggesmolten! Helaas

konden zij hun eigen experiment evenmin herhalen, dus was het dan toch nep? Maar... de betonvloer zou gesmolten zijn! Een gesmolten vloer is toch door iedereen te controleren? Misschien is het toch één keer gelukt, maar ik heb er nooit meer wat anders over gelezen, dan dat het nep was, jammer! Wel vernam ik dat de betrokken Amerikaanse professor ontslag heeft moeten nemen!

Zoals al eerder gezegd is, bestaat er behalve Deuterium, een nóg zwaardere isotoop van Waterstof, namelijk "Tritium" met één proton en twee neutronen in de kern. Tritium, symbool T, komt niet of zeer weinig in de natuur voor, maar kan wel gemaakt worden. Het wordt in de hogere atmosfeer op kleine schaal gevormd door kosmische straling en dat kunnen we beneden op aarde dus ook! Tritium is licht radioactief en met dit Tritium kan men dus nóg zwaarder water maken. Ook maar eens elektrolyse van  $T_2O$  proberen? Het blijkt al geprobeerd te zijn en men zegt zelfs dat men daarbij op (zeer) kleine schaal kernfusie heeft bereikt, maar geen energiewinst! Daar hebben we dus niet veel aan, we moeten eindelijk ons energieprobleem eens oplossen!

Maar..... genoemde isotopen: Deuterium en Tritium gaan wel een belangrijke rol spelen bij de toekomstige energieopwekking!

### **Kernfusie**

Bij kernfusie worden dus de relatief lichte kernen van Waterstofisotopen, gefuseerd, samengesmolten, tot zwaardere kernen, namelijk Helium. Hierbij komt energie vrij, die men wil gebruiken om elektriciteit op te wekken. De temperatuur nodig voor deze fusie is zo hoog, dat kernfusie nog niet op commerciële schaal plaatsvindt, maar men denkt over enige tientallen jaren zover te zijn!

De waterstofbom gebruikt kernfusie als allesvernietigende kracht en het is déze energie die we moeten temmen. Men is al tientallen jaren aan 't proberen om gecontroleerde kernfusie onder de knie te krijgen. Bij kernfusie smelten Waterstofkernen tot Heliumkernen samen, waarbij dus een beetje massaverlies optreedt, dat dan in (heel veel) energie omgezet wordt. Zou men dit proces onder de knie krijgen, dan hebben we pas echt een onuitputtelijke, redelijk schone, bron van energie, geen radioactief afval. Waterstof is (in water) volop aanwezig. De ongelooflijk hoge temperatuur die nodig is voor de fusie: zo'n 100 á 150 miljoen graden Celsius, is tot nu toe een te hoge drempel gebleken; er is bij mijn weten dan ook nog nergens een kernfusiecentrale in werking.

Men is echter wel zoekende en proberende. Af en toe staat er wat over in de krant. Onlangs was de kernfusiecentrale weer in 't nieuws: men praatte (in 2005) over de bouw van de eerste kernfusiecentrale "Iter", maar men ruziede vooral over de plaats ervan: in Europa of in Azië en waar dan precies. Intussen heeft men uiteindelijk besloten dat hij in Frankrijk komt met een Japanner als baas (lekker handig). De plaats heet Cadarache (bij Marseille), onthoud die plaats maar. Op een dag zullen we horen: "Ohaio gozaimasu, dozo, nuclear ffjusion denki arimasu...." (Goedemorgen, we hebben kernfusiestroom..)

De kernfusie waar men thans over na denkt is de Deuterium – Tritium fusie. Deuterium komt dus als waterstofisotoop (kern met 1 proton en 1 neutron) in water voor. Tritium (1 proton en 2 neutronen) kan uit Lithium (6) gemaakt worden door deze isotoop met neutronen te bestoken.

Kernen fuseren kan op verschillende manieren: het kan met twee Waterstofkernen en ook zelfs met Heliumkernen, maar het "makkelijkst" of "gunstigst" blijkt kernfusie toch te gaan met D en T! Fuseert een Deuteriumkern met een Tritiumkern dan krijg je, naast een hoop energie, een Heliumkern en ook nog een neutron! Ja, die neutronen, daar moet je dan ook nog wat mee doen, maar wat? Dat zien we tegen die tijd wel! (Je zou er bijvoorbeeld Lithium 6

mee kunnen bestoken.....). Ze leven sowieso maar een kwartiertje en hebben ook energie, zeer veel energie!

Over “makkelijk” gesproken, verwarmen tot 150 miljoen graden is natuurlijk een groot probleem! Er zijn geen materialen tegen deze hitte bestand dus men moet het te fuseren mengsel “vrij ophangen” met behulp van sterke elektromagneten. Die moeten natuurlijk gekoeld worden en als er dan een overschot aan fusie-energie is kan men die warmte met het koelmiddel afvoeren en ook dan weer gebruiken om stoom voor turbogeneratoren op te wekken! (Voor die magneten hebben we trouwens ook nog “supergeleiding”).

Het is dus zeker geen eenvoudig proces en men denkt nog wel minstens dertig jaar nodig te hebben voordat we kernfusiestroom hebben!

### **Isotopen**

We weten waarschijnlijk nog wel dat met isotopen de atomen van een element worden bedoeld, waarvan het aantal protonen gelijk is, maar het aantal neutronen in de atoomkern (“nucleus”) verschilt. Het aantal protonen in een atoomkern bepaalt het element en dit getal noemt men het “atoomgetal” of “atoomnummer” van een element. Nog even voor de zekerheid: protonen zijn de positief geladen kerndeeltjes, neutronen de ongeladen kerndeeltjes.

Het totale aantal “nucleonen” (kerndeeltjes): dat zijn dus de protonen en neutronen in de kern, bepaalt het “massagetal”. Eigenlijk zijn alle atoomsoorten van één element dus isotopen en de meest voorkomende is dan de “uitgangsisotoop”. Als we over een bepaald “element” spreken, hebben we het dus over de uitgangsisotoop. Heeft men het over een “isotoop” dan doelt men meestal op de afwijkende, vaak radioactieve atomen, wat dus eigenlijk onjuist is. Alle verschillende atoomkernen van één element zijn “isotopen”, want “gelijke plaats” in het periodieke systeem!

Bij isotopen, die afwijken van de “uitgangsisotoop”, geeft men dan ook vaak het massagetal aan, zodat men kan zien om welke isotoop het gaat. De juiste aanduiding voor een isotoop van een element geeft eerst het totale aantal kerndeeltjes, dan het elementsymbool en daarna het atoomnummer, dat het element bepaalt en het aantal protonen aangeeft. Voorbeeld:

$^{208}\text{Pb}$  82: Lood (Plumbum), isotoop met 208 kerndeeltjes, 82 protonen en  $208 - 82 = 126$  neutronen in de kern.

$^{90}\text{Sr}$  38: Strontium, isotoop met 90 kerndeeltjes, 38 protonen en  $90 - 38 = 52$  neutronen in de kern.

Toch merk ik dat men een isotoop, die afwijkt van de uitgangsisotoop, meestal aangeeft met het chemische symbool gevolgd door het massagetal, daar het atoomgetal (het aantal protonen) toch vastligt voor ieder element. Voorbeelden: Pb 208, U 235, Sr 90, J 130, Po 210, dit zijn isotopen van resp.: lood, uranium, strontium, jodium en polonium. En.... men draait deze getallen ook om, of zet ze er allebei voor, of boven elkaar.... Ja, ik kan het ook niet helpen dat deze wereld zo’n moeite heeft met standaardisatie!

De uitgangsisotopen van alle elementen tot nr. 92 (uranium) zijn stabiel. Van de meeste elementen bestaan echter meerdere isotopen en die zijn vaak wel instabiel en dus radioactief. Ze komen in zeer kleine hoeveelheden in de elementen voor, maar men kan diverse isotopen thans ook kunstmatig fabriceren. Zo worden in de kernreactor in Petten, Noord-Holland, allerlei (radioactieve) isotopen gefabriceerd, door bestraling, (beschieting zo je wilt), met deeltjes... inderdaad: neutronen. Deze isotopen zijn bestemd voor de medische wereld en worden veelal gebruikt om tumoren te bestralen. Ze spelen een belangrijke rol in de strijd tegen kanker.



Een andere nuttige techniek voor de medische wetenschap is de zogenaamde “tracertechniek”. Hierbij worden radioactieve elementen met een korte halfwaardetijd (in zeer kleine hoeveelheden) in het lichaam ingebracht, waarbij je met detectiesystemen de verplaatsing van de radioactieve stof kunt volgen. Dit kan heel handig zijn bij onderzoek naar hersentumoren of bijvoorbeeld bij specifieke problemen in het maag/darmstelsel of bij de opnamekarakteristiek in de bloedbaan.

De elektronen, die om de kern cirkelen, spelen voor de massa van een atoom nauwelijks een rol daar ze slechts zeer weinig massa hebben. Een elektron is tot nu het lichtste massadeeltje dat men kent en één proton heeft zelfs 1836 maal de massa van een elektron, een neutron iets minder! Maar de elektronen, die zelf negatief geladen zijn, bepalen wél de lading van een atoom. Zijn er te weinig (minder dan het aantal protonen in de kern) elektronen, dan is het atoom positief geladen en noemen we een dergelijk atoom een “kation”, zijn er teveel elektronen dan spreken we over een negatief atoom of “anion”. Verzamelnaam hiervoor: “ionen”! Een “normaal” atoom is neutraal, dat wil zeggen: net zoveel elektronen als protonen!

Elektronen spelen een belangrijke rol in chemische processen, “chemie” speelt zich af in de buitenste “elektronenschillen” van atomen. “Schillen”? Ja, de elektronenwolk om de atoomkern zou namelijk gezien kunnen worden als een wolk deeltjes, die in “schillen” om de kern zwermen. Later daarover meer!

### **Uranium**

Uranium is het zwaarste (natuurlijke) element en heeft atoomnummer 92. Het in de natuur voorkomende Uranium bestaat grotendeels uit uranium 238. Daar Uranium atoomnummer 92 heeft, houdt dit in dat er zich in de atoomkern  $238 - 92 = 146$  neutronen en 92 protonen bevinden. Echter, het Uranium dat in de kernenergie de belangrijkste rol speelt is de isotoop Uranium 235. In natuurlijk Uranium komt maar weinig van deze isotoop voor (0,7 %), maar... alleen dit U 235 (met dus slechts 143 neutronen) is bruikbaar want het is “splijtbaar”. Dit houdt in dat een U 235 kern, na geraakt te worden door een (langzaam bewegend) neutron, in twee stukken splijt. Eigenlijk gebeurt het volgende: een U 235 kern wordt geraakt door een neutron en verandert dan in een U 236 kern, die zeer onstabiel is en (meestal) in twee stukken splijt.

Door deze splijting ontstaan andere elementen, bijvoorbeeld Barium en Krypton. Zo’n U 236 kern splijt dan in een Barium 144 kern en een Krypton 90 kern, samen 234 kerndeeltjes. Er missen dus twee kerndeeltjes, dat zijn de neutronen die bij de splitsing vrijkomen. Er komen bij splijting ook allerlei andere elementkernen vrij, bijvoorbeeld Xenon, Strontium, Cesium, Jodium en vele andere.

Bij zo’n splitsing komen dus steeds twee of drie nieuwe neutronen vrij. Deze kunnen (als ze niet te snel zijn) weer andere U235 kernen splijten en heeft men dus voldoende U235 dan kan een kettingreactie in gang gezet worden. En... bij deze kettingreactie komt energie vrij, heel veel energie! Waarom ook alweer? Omdat er bij de splitsing wat massaverlies plaats heeft die in energie wordt omgezet volgens:

$$E = mc^2.$$

Dit massaverlies houdt verband met de zogenaamde “bindingsenergie”.

### **Bindingsenergie**

Wat is dat nu precies: “bindingsenergie”? En...., waarom komt er eigenlijk energie vrij bij het splijten van deze zware atoomkernen? En waarom eveneens bij fusie van lichte kernen? Dat blijkt helemaal niet zo eenvoudig te beantwoorden. En als ik over het begrip “bindingsenergie” lees, bemerk ik, dat ik niet de enige ben die moeite met dit onderwerp

heeft. Men noemt deze energie ook “massadefect” omdat bij kernenergie het massaverschil in energie omgezet wordt.

Eerst maar eens de definitie van “bindingsenergie”:

*Definitie 1: “De bindingsenergie is de energie die vrijkomt als een aantal deeltjes een gebonden toestand vormen!”*

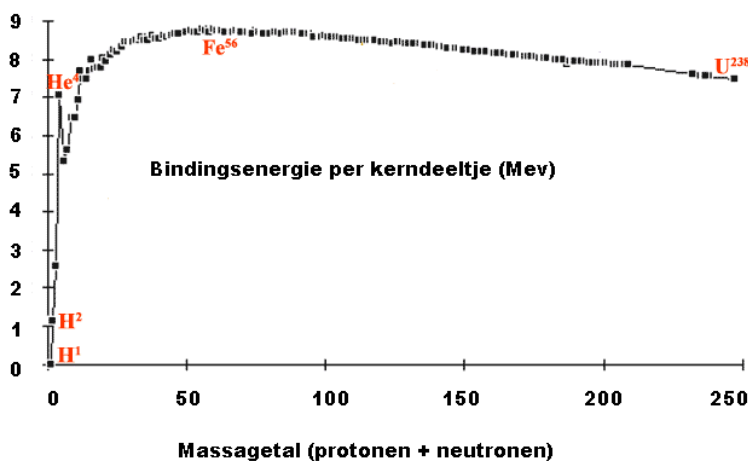
Een beetje onbegrijpelijke definitie, maar zo staat het in de “encyclopie”. Het kan ook omgekeerd:

*Definitie 2: “De bindingsenergie is de energie die nodig is om een aantal gebonden deeltjes uit elkaar te halen!”*

Kijk, dat is al veel duidelijker, je moet dus kracht uitoefenen om (bijvoorbeeld) een atoomkern uit elkaar te trekken en die energie komt weer vrij als die deeltjes weer een kern vormen. Maar... die kernen zijn toch bij de “schepping”, nou ja, bij de oerknal, gevormd? Daar moet dus flink wat energie vrij gekomen zijn ....

Deze bindingsenergie wordt ook het “massadefect” genoemd en we kunnen nu begrijpen waarom. Het blijkt namelijk dat de deeltjes die een atoomkern vormen, samengevoegd minder “wegen” (minder massa hebben) dan de afzonderlijke deeltjes. Er moet dus bij de vorming van het atoom wat massa omgezet zijn in “bindings”energie.

Er blijkt met die bindingsenergie van de atoomdeeltjes van “onze” elementen wat merkwaardigs aan de hand te zijn. De bindingsenergie zou je in Joules aan kunnen geven maar wordt meestal in MeV (mega elektronvolt) aangegeven, waarbij  $1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-13}$  joule is. Als we nu de bindingsenergie per atoom bekijken en dan loopt deze van 30 MeV voor Helium He 4 naar 493 MeV voor ijzer Fe 56 naar ongeveer 1735 MeV voor Uranium U 238.



Maar het blijkt interessanter te zijn om de bindingsenergie per “nucleon” (kerndeeltje) te bekijken. Daar is een grafiek van die hiernaast staat.

**Fig 9.3 Grafiek bindingsenergie**

Uit deze grafiek blijkt dus dat een, in een atoom gebonden “nucleon” een bindingsenergie heeft die loopt van 1 MeV voor de Waterstofisotoop  $^2\text{H}$  (Deuterium) naar bijna 9 MeV voor  $^{56}\text{Fe}$  (nr. 26) en  $^{62}\text{Ni}$  (nr.28) en dan weer langzaam daalt tot ongeveer 7,3 MeV voor de nucleonen van Uranium (nr 92).

Bekijken we eerst element nr. 2 Helium. De bindingsenergie van Helium is 30 MeV. Helium heeft 2 neutronen en 2 protonen in z'n kern, dat komt dus neer op 7,1 MeV per kerndeeltje. We zien ook dat de kerndeeltjes van IJzer, maar ook Nikkel, de hoogste bindingsenergie hebben, namelijk 8,8 MeV per kerndeeltje. IJzer en nikkel worden dan ook beschouwd als de stabielste elementen! Worden de elementen nog zwaarder dan zakt de bindingsenergie weer langzaam.

Ook volgt uit deze grafiek, dat óf het fuseren van kernen van lichte elementen (tot nr. 30) óf het splijten van zware kernen (vanaf nr. 30 omhoog) iets massaverlies oplevert, dat in energie omgezet wordt.

Bekijken we eerst eens de kernfusie. De waterstofisotopen Deuterium en Tritium hebben naast één proton respectievelijk 1 en 2 neutronen in de kern. De bindingsenergie is, volgens de grafiek, ongeveer 1 en 3 MeV per “nucleon”! Als we deze kernen weten te fuseren krijgen we een Heliumkern met 2 protonen en 2 neutronen (plus nog een los neutron) en komt er bindingsenergie vrij: Dit vormt de kernfusie-energie, want de kerndeeltjes van deze isotopen hebben samen meer massa dan die ene Heliumkern!

Nu de kernsplitsing van Uranium: als we een Uraniumkern (alleen U 235) splitsen (door beschieting met een neutron) krijgen we twee nieuwe, lichtere, atoomkernen. Die beide kernen, waarvan de kerndeeltjes dus iets minder bindingsenergie hebben, bezitten samen opgeteld ook iets minder massa. Ook hier komt dus energie vrij (plus één of twee neutronen). Dat is dan dus kernsplitsingenergie. Voor IJzer heeft noch splijten nog fusie zin, het kost energie in plaats van energie opleveren.

Maar .... hoe moeten we die bindingsenergie nu zien? Kunnen we het als een soort lijm zien? Misschien wel, maar dan is het wel een raar soort lijm. We doen eens een “gedachte experiment”: we gaan een atoompje maken! We pakken het receptenboek en besluiten welke atoomkern we zullen “scheppen”. We kijken op het recept en nemen uit onze voorraad “nucleonen” van allebei de soorten (protonen en neutronen) het juiste aantal en wegen het totaal: A gram. Nu maken we er een bol van . Daar de deeltjes voorzien zijn van een lijmlaagje plakken ze goed aan elkaar, er blijft zelfs een hoeveelheid lijm over. Die bewaren we maar even. Nu wegen we de bol en... ja hoor iets minder dan A gram! Het teveel aan lijm is dus het “massadefect”, de massa die we kwijtraken.

Maar..... nu komen we in de moeilijkheden. Als we deze atoomkern weer uit elkaar willen halen moeten we volgens “Definitie 2” de “bindingsenergie” er weer in stoppen! De overgeschoten lijm? Ja, maar dan moeten we die lijm wel in energie, fotonen of zo, veranderen! Volgens Einsteins “ $E = mc^2$ ” kan dit ook, maar met dit gedachte experiment: “bindingsenergie als lijm” komen we voor een verklaring niet verder. We stoppen dus maar even met de schepping van atoomkernen met lijm! Toch moeten we verklaren “hoe het zit”!

Nemen we een zware atoomkern: die bestaat uit protonen en neutronen. Door de sterke kernkracht “plakken” de protonen samen, maar ze willen niet al te dicht bij elkaar zitten, ze zijn immers positief geladen en stoten elkaar af. Geen probleem, de (neutrale) neutronen houden ze wel uit elkaar. Maar toch zit een atoomkern wel stevig in elkaar, daar zorgt dan die bindingsenergie voor. We kunnen het, denk ik, het beste zo zien: bij de vorming van atoomkernen indertijd hebben de nucleonen (protonen en neutronen) wat “massa” ingeleverd en die is omgezet in bindingsenergie. En die bindingsenergie, die zorgt bij kernsplitsing voor de “kernenergie” in kerncentrales.

Zoals gezegd, ijzerkernen splitsen of fuseren heeft, volgens de grafiek, geen zin, dat kóst energie. Ook blijkt dat maar weinig atoomkernen splijtbaar zijn. Zo zijn alleen de kernen van Uranium 235 splijtbaar, splitsen van “normale” Uranium 238 kernen gaat niet eens! En kernfusie gaat het beste met Deuterium en Tritium!

Nog één opmerking: materie volledig omzetten in energie is op aarde nog nooit gelukt..... Is materie eigenlijk wel geconcentreerde energie? Zijn het misschien toch twee verschillende zaken?

### Massadefect berekenen

Willen we echt begrijpen wat er gebeurt bij kernfusie en kernsplijting dan zullen we toch moeten gaan rekenen. Om het massadefect (de bindingsenergie) hierbij te berekenen moeten we wel wat getallen kennen. De eenheid van massa is het (kilo)gram. De massa van protonen, neutronen en elektronen kunnen we dus in kilogrammen aangeven. Het blijkt echter dat men meestal met de eenheid: “AMU” of kortweg “u” werkt. AMU staat voor Atomaire Massa Unit. Men heeft indertijd de massa eenheid “AMU” gedefinieerd als “het twaalfde deel van de massa van een  $^{12}\text{C}$  (koolstof)nucleïde”.

Hoe is men daar eigenlijk toe gekomen? Dat heeft te maken met een zekere “Avogadro”, een slimme Italiaan die in de 18<sup>e</sup> eeuw leefde en een belangrijke ontdekking deed: Een bepaald volume gas van de zelfde temperatuur en druk heeft altijd hetzelfde aantal moleculen, wát voor gas het dan ook is! Ja, en dan kan je zo’n volume natuurlijk wegen en bemerk je bijvoorbeeld dat zuurstof precies 16 maal zoveel weegt als waterstof, waardoor men uiteindelijk steeds meer van atomen en hun bouw begreep.

Enfin, uiteindelijk heeft men toen de eenheid “mol” ingesteld, die prettig werkt bij berekeningen van chemische reacties. Hierbij speelt het zogenaamde “getal van Avogadro” een rol, want een “mol” is 22,4 liter van een gas van 0<sup>o</sup> Celsius en 1 Atmosfeer en bevat een constant aantal moleculen. Dat aantal is het “**getal van Avogadro**”. Avogadro zelf kende dit getal niet, hij kon toen nog geen atomen tellen. De waarde ervan heeft men pas later kunnen berekenen, Einstein heeft daar nog een rol in gespeeld. Dat getal van Avogadro zegt dat één “mol” van iedere stof:  $6,022 \times 10^{23}$  deeltjes bevat. Deeltjes? Ja, bij water zijn dat moleculen H<sub>2</sub>O, bij gassen moleculen gas, bij elementen atomen, het kunnen ook ionen zijn, etc, “kortom “entiteiten”. Het moeten wel stoffen zijn met allemaal dezelfde deeltjes, dus geen mengsels en zo, maar wel verbindingen!

Men kon dit getal steeds nauwkeuriger berekenen en ging bij de vaststelling van de mol eerst uit van Zuurstof: 1 mol Zuurstof = 16 gram, maar later heeft men de mol definitief(?) gebaseerd op het aantal atomen in 12 gram van de Koolstofisotoop:  $^{12}\text{C}$ , waar Koolstof grotendeels uit bestaat en is de “mol” toen ook iets in waarde veranderd. Men zegt het thans zo:

*“Een “mol” van een bepaalde stof bevat het zelfde aantal stofdeeltjes als het aantal atomen in een hoeveelheid Koolstof ( $^{12}\text{C}$ ) met een massa van 12 gram!”*

Zoals ik al eerder heb vermeld is het met de standaardisatie in de wereld droevig gesteld en zo vind ik voor dit getal van Avogadro verschillende waarden:

- $6,022045 \times 10^{23}$  (Encarta)
- $6,0221415 \times 10^{23}$  (Wikipedia)
- $6,0221367 \times 10^{23}$  (Scholierennet)
- $6,02214199 \times 10^{23}$  (Britse site)
- $6,0225 \times 10^{23}$  (Andere Britse site)

Ik heb dan ook maar besloten bij eventuele eigen berekeningen uit te gaan van:

$$6,022 \times 10^{23} = N$$

Nu de “Atomaire Massa Unit” AMU of kortweg “u”. Deze is gebaseerd op dit getal van Avogadro. Neemt men 1 mol waterstof dan bevat dit dus N atomen gelijk aan: N protonen en N elektronen. En, ja, daar gaan we al fout, want die elektronen zijn 1836 maal zo licht dus die worden, denk ik, door de één wel meegerekend en door de ander niet. Verder bevat de waterstof in water ook een heel klein beetje Deuterium en misschien ook wel Tritium, en die

hebben zwaardere kernen dan Waterstof! In ieder geval heeft men de AMU gesteld op:

$$1 : N = 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Nu de Koolstof 12 isotoop. Een atoom  $^{12}\text{C}$  bestaat uit 6 protonen, 6 neutronen en 6 elektronen. Nemen we nu 6 mol protonen plus 6 mol neutronen en 6 mol elektronen dan hebben we ongeveer 12,1 gram als we van de losse deeltjes uitgaan. Meten we nu 1 mol Koolstof,  $^{12}\text{C}$ , dan hebben we 12,0107 gram zeg maar 12 gram! Hoe komt dit verschil? Door het “massadefect”! Bij het vormen van dit atoom hebben de deeltjes wat massa ingeleverd voor de binding: de bindingsenergie dus. Een atoom Koolstof weegt dus iets minder dan z’n losse delen! Maar toch.... men gaat bij de definiëring van de AMU uit van de massa van één atoom  $^{12}\text{C}$ . En .... pure Koolstof 12 bestaat helemaal niet, er zit altijd nog wat andere Koolstof in zoals de isotoop  $^{14}\text{C}$ .

Toch zegt men:

**1 AMU is gelijk aan het twaalfde deel van de massa van één  $^{12}\text{C}$  atoom!**

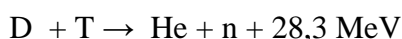
We krijgen nu de volgende betrekkingen en waarden:

$$\begin{aligned} 1 \text{ AMU} = u &= 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 1,492419 \times 10^{-10} \text{ J (vlgs } E = mc^2) \\ &= 1,492419 \times 10^{-10} : (1,602 \times 10^{-19}) = 931,597 \text{ MeV} / c^2 \end{aligned}$$

De massa’s van de “losse” nucleonen heeft men vastgesteld op:

Proton	=	1,0078252 u	=	$1,6735342 \times 10^{-27} \text{ kg}$	=	$938,887 \text{ MeV} / c^2$
Neutron	=	1,0086654 u	=	$1,6749294 \times 10^{-27} \text{ kg}$	=	$939,670 \text{ MeV} / c^2$
Elektron	=	0,0054858 u	=	$0,91093 \times 10^{-29} \text{ kg}$	=	$0,511 \text{ MeV} / c^2$

Nu kunnen we gaan rekenen en we beginnen met de fusie van Waterstof tot Helium. Als we echt kernfusie gaan toepassen doen we dit dus niet met normale waterstof, maar met de waterstofisotopen Deuterium (D) en Tritium (T). Deuterium heeft 1 proton en 1 neutron, Tritium heeft 1 proton en 2 neutronen in de kern. We krijgen dan het volgende massaoverschot met ook nog een extra neutron!



2 protonen	2 x 1,0078252	=	2,01565 u
2 neutronen	2 x 1,0086654	=	<u>2,01733 u +</u>
			4,03298 u
Massa He kern			<u>4,00261 u -</u>
Massadefect			0,03037 u = 28,3 MeV = 7,1 MeV/nucleon

Dit klopt aardig (iets te hoog)met de grafiek (fig. 9.30) van de bindingsenergie.

Nu wil ik wel eens wat meer van dat stabiele IJzer weten. Splijten of fuseren zou geen zin hebben. Dat is trouwens allebei praktisch onmogelijk.

26 protonen	26 x 1,0078252	=	26,203455 u
30 neutronen	30 x 1,0086654	=	<u>30,259962 u +</u>
			56,463417 u
Massa $^{56}\text{Fe}$ kern			<u>55,847 u -</u>
			0,616417 u

$$\begin{aligned} \text{Bindingsenergie:} & & 0,616417 \text{ u} &= 574,2522 \text{ MeV} = \\ & & &= 10,25 \text{ MeV/nucleon} \end{aligned}$$

Dit is meer dan de grafiek aangeeft. Hoe komt dit? Wat heb ik fout gedaan heb? (Nog) geen idee! Maar er blijkt wel uit, dat IJzer de hoogste bindingsenergie heeft.

Stel dat we toch 2 IJzeratomen konden fuseren. We zouden dan Tellurium krijgen, maar komen dan wel 18 neutronen te kort! Hoe krijgen we die erbij? Nou ja, eerst maar eens rekenen. De fusiereactie zou moeten zijn:

$$\begin{aligned} & \mathbf{{}^{56}\text{Fe } 26 + {}^{56}\text{Fe } 26 + 18\text{n} \rightarrow {}^{130}\text{Te } 52 + ? \text{ MeV}} \\ & 52 \text{ protonen} & = 52,40691 \text{ u} \\ & 60 \text{ neutronen} & = \underline{60,51992 \text{ u}} + \\ & \text{Massa losse nucleonen } 2 \times {}^{56}\text{Fe} & 112,92683 \text{ u} \\ & \text{massa } {}^{130}\text{Tellurium } 52 & 127,60 \text{ u} \end{aligned}$$

Hier blijkt dus wel uit dat fusie geen zin heeft, fuseren kost energie maar ik ben van het normale Telluur uitgegaan met 130 nucleïden. IJzer heeft 112 nucleïden. Er moeten dus ook nog 18 neutronen bij:

$$\begin{aligned} 18 \text{ neutronen} & = \underline{18,15598 \text{ u}} + \\ & 131,0828 \text{ u} \end{aligned}$$

Dan komt er dus wel wat massa vrij, maar wat kosten de neutronen wel niet aan energie!

Nu IJzer splitsen in twee brokken Aluminium! Splitsing geeft:

$$\begin{aligned} & \mathbf{{}^{56}\text{Fe } 26 \rightarrow {}^{27}\text{Al } 13 + {}^{27}\text{Al } 13 + 2\text{n} + ? \text{ MeV}} \\ & 26 \text{ protonen} & = 26,203455 \text{ u} \\ & 30 \text{ neutronen} & = \underline{30,26 \text{ u}} + \\ & \text{massa } {}^{56}\text{Fe } 26 & 56,463455 \text{ u} \\ & 2 \times \text{massa Al} = 2 \times 26,98154 & = 53,96 \text{ u} \end{aligned}$$

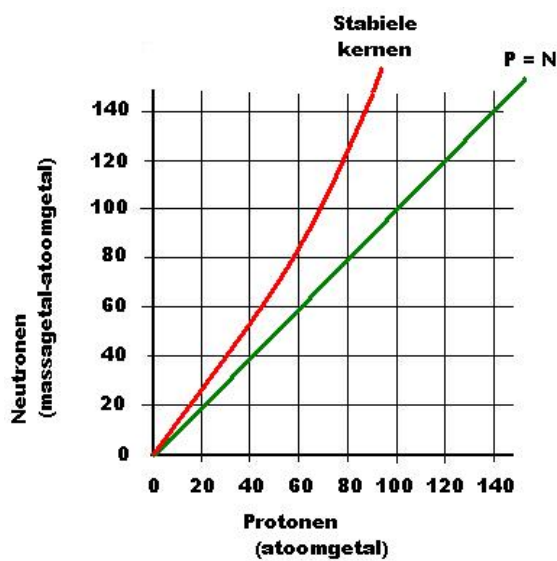
Ook dit heeft geen zin, het kost massa, wel komen er twee neutronen vrij. Er zouden ook twee Aluminiumkernen met ieder één neutron teveel kunnen ontstaan: onstabiel dus. Verder kost het splijten zelf dus energie in plaats van levering van energie!

De manier waarop ik hier van alles berekend heb zal wel niet erg wetenschappelijk zijn, maar ja, ik reken nu eenmaal graag. Zo heb ik bij de berekening van het “massadefect” de kinetische energie van de “razend snel om de kern rondtollende elektronen” buiten beschouwing gelaten. Zij hebben weliswaar weinig massa maar hun inwendige energie moet erg hoog zijn om niet op de atoomkern te pletter te slaan. Deze energie is evenredig met hun omloopsnelheid in het kwadraat, dus relatief hoog, ondanks hun lage massa.

Nu nog even de splitsing van Uranium 235! Eigenlijk moeten we deze materie niet op proton / neutronniveau bekijken, maar op “quark” niveau, want men weet intussen dat protonen en neutronen bestaan uit (3) “quarks”, die door middel van “gluonen”, dat zijn dus inderdaad “lijmdeeltjes”, aan elkaar zitten (“glue” is Engels voor lijm). Willen we dus de materie enigszins begrijpen dan zouden we dus ook wat meer over deze “quarks en gluonen” moeten weten!

Maar eerst het volgende: waarom zijn kernen soms stabiel, soms instabiel? Dat blijkt af te hangen van de verhouding: neutronen / protonen!

## Neutronen / Protonenverhouding



Bekijken we de elementenlijst (in hoofdstuk 10), dan begint deze bij nr.1, Waterstof en eindigt bij Uranium nr. 92 . Daarna beginnen de “transurane” elementen die allen instabiel (radioactief) zijn en door mensen gemaakt (trans is: door, over, voorbij). Of ze misschien toch ergens in het heelal voorkomen? Wie weet. De lijst loopt tegenwoordig door tot nr. 140!

Om een lichte atoomkern stabiel te houden blijken er iets meer neutronen als protonen nodig te zijn. Waterstof (nr. 1) heeft helemaal geen neutronen, maar alleen één proton in de kern.

Fig. 9.4 Protonen / Neutronengrafiek

Bekijken we het volgende: De

Waterstofisotoop Deuterium heeft 1 proton en 1 neutron in de kern. De Waterstofisotoop Tritium heeft 1 proton en 2 neutronen en is dan ook niet stabiel. Helium (nr. 2) heeft 2 protonen, 2 neutronen. Zuurstof (nr. 8) bezit 8 protonen en 8 neutronen. Worden de kernen zwaarder, dan neemt op een bepaald moment het aantal neutronen sterker toe dan het aantal protonen. Zo heeft element nr. 11: Natrium 11 protonen en 12 neutronen in de kern. Uiteindelijk komen we dan bij de laatste, nog redelijk stabiele atoomkern: Uranium 238, met 146 neutronen en 92 protonen in de kern. Hoe zwaarder de atoomkern, hoe meer neutronen er dus nodig blijken te zijn om de kern bijeen te houden. Ze moeten er voor zorgen dat de protonen, die door de sterke kernkracht bijgehouden worden, elkaar niet te dicht naderen, daar ze dan elkaar zullen afstoten, ze zijn immers positief geladen? De juiste verhouding neutronen / protonen en de bindingsenergie zorgt voor een stabiele kern. Dit lukt dus tot atoomnummer 92, daarboven is geen enkele atoomkern nog stabiel!

### Splijtbaarheid

Er zijn maar een paar elementen waarvan de kernen makkelijk splijtbaar zijn. Waarom is dat eigenlijk zo? Tja, ook dát blijkt te maken te hebben met de zwaarte (massa) van de atoomkern en de verhouding neutronen / protonen, die dus toeneemt naarmate de atomen zwaarder worden. Bij toenemend atoomgewicht zijn steeds meer neutronen nodig om de protonen bij elkaar te houden. Protonen zijn net mensen, gezellig bij elkaar, maar... niet in al te grote groepen: dan liever niet te dicht op elkaar, dan wordt het eng!

De verhouding neutronen / protonen loopt van atoomnummer 1 langzaam op van 1 op 1 naar maximaal ongeveer 1,6 op 1. Zo is de verhouding bij de meest stabiele vorm van het element Thorium (Th 232, atoomnummer 90 met  $232 - 90 = 142$  neutronen)  $142 : 90 = 1,578$ . Bij de minder stabiele isotopen: Thorium 230, 229 en 228, is deze verhouding kleiner: resp. 1,556, 1,554 en 1,533.

Thorium 232 is overigens niet splijtbaar, maar kan door neutronenbeschieting wel omgezet worden in Uranium 233 (verhouding 1,532) dat wél splijtbaar is.

Bij Uranium 238 (de stabielste uraniumisotoop) is de verhouding  $146 : 92 = 1,587$ .

Bij U 235 is deze  $143 : 92 = 1,554$ . Doordat er dus iets te weinig neutronen in de kern voorkomen, blijkt deze atoomkern wel splijtbaar te zijn.

't Lijkt nu duidelijk, maar... dat is het nog niet! Onstabiel wil niet automatisch zeggen: splijtbaar! Kijk maar naar het volgende: in een kernreactor wordt het niet splijtbare, instabiele Uranium 238 door de neutronenbeschieting omgezet in Plutonium 239 (atoomnummer 94). Dit Plutonium (Pu) blijkt onstabiel maar ook splijtbaar te zijn. De verhouding neutronen / protonen is: 1,543. De verder nog voorkomende isotopen Pu 240 (1,553), 242 (1,574) zijn ook splijtbaar maar... Pu 241 (1,563) weer niet! Waarom niet? Komt het zo nauw? De verhouding massagetal / atoomnummer kan dus niet het enige criterium zijn. Wat speelt er nog meer?

De manier waarop de protonen en de neutronen gerangschikt zijn? Even aantal neutronen? Een neutroontje eraf kan een kern niet alleen onstabiel maar ook zomaar splijtbaar maken! Hoe zit het precies? Iets anders dan de vaststelling dat het neutronenaantal bij plutonium even moet zijn heb ik op mijn zoektocht nog niet gevonden, helaas! Toch moet het hiermee te maken hebben! En... inderdaad, alleen kernen met even aantallen neutronen zijn splijtbaar! Maar waarom die met oneven aantallen niet? Ik ben geen atoomgeleerde en zal dus nog wel even verder moeten zoeken!

### **Kettingreactie**

Nu even het volgende. In natuurlijk Uranium bevindt zich slechts een klein percentage (0,7 %) van het splijtbare U 235, de rest is U 238, niet splijtbaar (wel radioactief). In dit natuurlijke Uranium komen wel af en toe neutronen vrij, maar deze zijn te sporadisch, te snel en er is zo weinig splijtbaar U 235 dat er zeker geen kettingreactie plaats zal vinden! De kunst is dus om het percentage U 235 te verhogen. Hoe hoger het gehalte U 235, hoe meer kans dat er een U 235 kern geraakt wordt door een vrij neutron. Worden er voldoende U 235 kernen gespleten, dan komen er genoeg nieuwe neutronen vrij die dan weer ándere kernen kunnen splijten, enzovoort.

Bij een percentage van 3 % tot 5 % U 235 spreekt men van “verrijkt” uranium en dat blijkt “rijk” genoeg om een kettingreactie in gang te zetten waarbij voldoende energie vrijkomt om stroom op te wekken. Bij 20 % spreekt men van hóóg verrijkt Uranium. Voor 't maken van een kernbom is echter een percentage van minimaal 90 % U 235 nodig!

We kunnen nu begrijpen dat bij een kettingreactie zeer veel energie (de bindingsenergie dus) vrijkomt, want na splijting van een Uraniumkern blijken de gesplitste kerndelen samen iets minder massa te hebben dan de oorspronkelijke kern en deze verdwenen massa komt als energie vrij.

Nog wat, er is niet alleen een minimum percentage U 235 noodzakelijk voor een kettingreactie, omdat van deze isotoop de kern makkelijk splijtbaar is, maar ook om voldoende nieuwe neutronen te produceren om het splijtproces op gang te houden. Niet alle vrijgekomen neutronen splijten een atoomkern. Ook moet het Uranium zo zuiver mogelijk zijn. Verontreinigingen door andere stoffen absorberen neutronen. Uranium zelf doet dat niet, dat heeft genoeg neutronen!

Zo'n vrij neutron mag trouwens ook niet te snel zijn. Snelle neutronen vliegen overal door heen. Alleen een neutron met de juiste snelheid kan een atoomkern splijten. Bij elke splitsing komen dan weer nieuwe neutronen vrij die op hun beurt weer andere kernen kunnen treffen. Maar...men moet dan wel de veel te snelle neutronen afremmen! Waarom eigenlijk? Het klinkt vreemd maar hoe sneller een deeltje beweegt, hoe kleiner de afmeting is. Dit blijkt uit formules uit de kwantumtheorie (die later aan bod komt)!

Te snelle neutronen zijn dus onbruikbaar, ze zijn te klein om effect te hebben en, doordat ze neutraal zijn, vliegen ze dus dwars door de kernen heen. Men moet deze te snelle neutronen daarom afremmen en dat doet men met een “moderator” (zoals zwaar water, grafiet en tegenwoordig ook met gewoon “licht” water). Een goede moderator remt de neutronen af



maar absorbeert ze niet. Het is ook hier van groot belang dat niet alleen het Uranium maar ook de moderatorstof zeer zuiver zijn: eventuele verontreinigingen zouden neutronen kunnen absorberen, waardoor de kettingreactie verstoord kan worden!

Niet alleen het percentage U 235, ook de juiste hoeveelheid is zeer belangrijk. Heeft men er te weinig van, dan gebeurt er nog niets. De minimum hoeveelheid van Uranium 235, benodigd om een kettingreactie in gang te zetten noemt men de “kritische massa”. Voor puur U 235 zou dit een hoeveelheid ter grootte van ongeveer een tennisbal zijn. Om een atoombom te maken heeft men dus twee tennisballen van zo puur mogelijk U 235 nodig, twee hoeveelheden nét onder de kritieke massa. Komen die twee massa's samen, dan zou er een kettingreactie plaats kunnen vinden. Maar wil men echt een enorme explosie hebben dan moeten deze kritische massa's in zeer korte tijd met kracht tegen elkaar gedrukt worden. Dit doet men in een atoombom met behulp van dynamiet, er ontstaat dan een zeer snelle kettingreactie, waarbij in korte tijd zo gigantisch veel energie vrij komt, dat men van een kernexplosie spreekt. Is het gehalte van U 235 lager, dan is de kritische massa groter en de kettingreactie minder fel. Zo kan men dus zware en lichte bommen maken! En is het percentage nog lager dan kan je er geen bom van maken, maar kan het wel dienst doen als “brandstof” in een kernreactor.

### **Kernenergie**

Hoe kunnen we nu met behulp van kernsplitsing energie opwekken, met andere woorden, hoe werkt een kerncentrale? Men begint met elementen (staven) “verrijkt” uranium met zo'n 3 à 5 % U 235, die in een reactorvat (met bijvoorbeeld water) worden gebracht. Hierbij is het zaak de neutronenuitstoot van deze elementen zo te regelen dat de energie gecontroleerd vrij komt. Dit is zeer belangrijk: door de neutronenuitstoot te beperken, kan men de kettingreactie in de hand houden en de enorme hoeveelheid vrijkomende energie beteugelen en regelen.

Maar... hoe kan men nu deze neutronenuitstoot regelen en onder controle houden? Met behulp van neutronenabsorberend materiaal! Men ontdekte dat de elementen Cadmium en Borium (en nog een paar minder belangrijke stoffen) vrijkomende neutronen goed kunnen absorberen en zo het meest geschikt zijn om een kettingreactie onder de knie te houden en te regelen. Men kan met deze materialen de neutronenuitstoot niet alleen regelen, maar zelfs geheel stoppen en zodoende er voor zorgen dat in noodgeval de kettingreactie niet uit de hand kan lopen en er geen kernramp (“melt down”) kan optreden. Één van de belangrijkste onderdelen van een kernreactor is dus het regelmechanisme, dat ervoor zorgt dat de Cadmium - Boriumstaven in en uit de Uraniumelementen kunnen bewegen. De beweging van deze “regelstaven” moet dus 100 % betrouwbaar zijn en in noodgevallen automatisch in gang komen om rampen te voorkomen!

Een ander veiligheidsaspect is de koeling bij noodgevallen. Mocht er wat fout gaan in de warmte-uitwisseling, dan moet er een onafhankelijk koelsysteem zijn dat eveneens 100 % betrouwbaar werkt. Dit kan men doen met bijvoorbeeld een grote watertank, hoog geplaatst, die in noodgeval automatisch leegloopt en zo de reactor koelt.

Hoe zet men nu deze vrijkomende energie in elektriciteit om? Eerst wordt deze energie (warmte) overgebracht op een warmtedrager (bijvoorbeeld water). Water onder hoge druk kan veel warmte opnemen. Daar het hete water uit de reactor radioactief kan zijn, wordt dit rondgepompt en geeft z'n warmte af aan een tweede waterkringloop, waarbij dan stoom opgewekt wordt. Met deze (schone) stoom kan men dan weer stoomturbines voeden die generatoren aandrijven en elektrische stroom opwekken.

Neemt men voldoende voorzorgen, dan kan een kerncentrale dus echt wel veilig zijn, maar er bestaan natuurlijk toch risico's. Vooral het vrijkomen van radioactieve stoffen, door foutieve bediening, ongelukken en zo, heeft 't imago van kerncentrales behoorlijk geschaad.

Dit soort risico's en de ongelukken (3 miles Island en Tsjernobyl) zijn dan ook de redenen waarom "men" een kerncentrale maar een link ding vindt. Bij beide ongelukken waren menselijke fouten de oorzaak van de problemen. Des te meer redenen om bij nieuwe centrales de menselijke factor nog verder uit te schakelen.

Verder was vooral Tsjernobyl een zeer onveilig gebouwde centrale: een grafietreactor (brandbaar), geen beschermende "hull", te licht geconstrueerd. Slechts één kringloop: de radioactieve stoom werd direct gebruikt om turbines aan te drijven, levensgevaarlijk! Die dingen hadden al lang verboden moeten zijn, maar helaas, we hebben nog steeds geen echt goede wereldpolitie! Nog erger: er waren vier van deze reactoren en de overgebleven drie gingen "vrolijk" verder! Uiteindelijk zijn ze, nog niet zo lang geleden stilgelegd! Intussen zijn zo'n 125.000 mensen aan stralingsziekten gestorven! En dan praat ik niet over de enorme toename van het aantal kankergevallen (in heel Europa) die, zo denken velen, door Tsjernobyl worden veroorzaakt.

### **Splijtingsproducten**

Bij kernsplijting ontstaan namelijk allerlei splijtingsproducten. Door de neutronen-beschieting worden de Uraniumkernen in stukken gespleten, meestal twee. Deze stukken zullen vaak niet gelijk zijn. (Zouden ze gelijk zijn, dan zou Palladium, atoomnr. 46, ontstaan.) Uranium heeft atoomnummer 92, dus er zullen veel elementen ontstaan met atoomnummers (protonenaantallen) tussen 40 tot 50, maar ook ontstaan er veel lichtere en veel zwaardere. Deze nieuwe elementen zijn meestal onstabiele isotopen van normaal bekende, stabiele elementen. Door het afwijkende aantal neutronen in de kern zijn die isotopen vaak zeer radioactief.

Bij ongelukken met kerncentrales (en vooral bij kernexplosies) kunnen deze radioactieve splijtingsproducten, die men "fall-out" pleegt te noemen, vrijkomen en door wind en regen verspreid worden. Deze producten kunnen dus via de atmosfeer snel ver weg verspreid worden, komen met de regen op aarde terecht, dringen in het grondwater, kortom een zeer ongewenste situatie, daar dit radioactieve spul uiteindelijk wel "vervalt" tot ongevaarlijk spul, maar dit kan geruime tijd duren, tot tientallen jaren! Deze radioactieve stoffen (berucht is het radioactieve Cesium 30) kunnen via lucht, water en voedsel uiteindelijk ook in ons lichaam terecht komen!

Normaal blijven deze producten in de staafelementen van de kernreactor. Zijn deze staven uitgewerkt dan vormen ze zo het beruchte radioactieve afval, waarmee zeer behoedzaam moet worden omgegaan. Deze uitgeputte staafelementen kunnen weer "opgewerkt" worden. De fabrieken die dit doen (Cap La Hague, Sellafield) hebben, helaas niet ten onrechte, een slechte naam. Ze lozen nog al eens radioactief afval in zee en lucht en halen rare capriolen uit om maar van het gevaarlijke afval af te komen, want ook bij het opwerken van het afval komt weer radioactief afval vrij! Ook het transport van de staven naar en van die opwerkingsfabrieken is zeer problematisch, al was het alleen al door de actiegroepen die deze transporten trachten te verstoren.

Zoals eerder beschreven is het radioactieve afval, dat nu eenmaal ontstaat bij kernenergie, een groot probleem en men weet er nog steeds niet goed raad mee. Men slaat het dus maar op in speciale containers in stevige gebouwen en zadelt toekomstige generaties er mee op, in de hoop dat er eens een echte oplossing voor komt!

Over de "fall-out" is nog veel meer te schrijven, maar dan moeten we eerst vertrouwd raken met een aantal begrippen, zoals "halfwaardetijd". Dat komt in een later hoofdstuk uitgebreid ter sprake. (In 't kort wil deze "halfwaardetijd" zeggen, dat dit de tijd is waarin de helft van het radioactieve materiaal "vervallen" is tot stabiele materie.)

Maar nu eerst: **Plutonium**

Het U238 dat naast de U235 in een kernreactor aanwezig is, wordt voor een deel omgezet in het zeer radioactieve Plutonium 239. Dit gaat als volgt;



Plutonium is een zeer radioactief materiaal dat in de natuur niet of nauwelijks voorkomt. Met dit Plutonium kan men wel weer energie opwekken (het is ook splijtbaar), maar eveneens atoom(plutonium)bommen maken! Hierdoor zijn kerncentrales, die plutonium produceren, automatisch verdacht. Vooral wanneer zogenaamde “schurkenstaten” daarmee bezig zijn, wordt men in de westerse wereld zenuwachtig. Maar zijn “wij” (het Westen) dan altijd zo keurig? Ieder land gedraagt zich wel eens “schurkerig”! Wie is eigenlijk de grootste schurk?

Aan het eind van de tweede wereldoorlog heeft de VS twee atoombommen op Japan gedropt: die op Hiroshima was een Uraniumbom met een kracht gelijk aan 15 kiloton (15 miljoen kilogram) TNT, op Nagasaki viel een Plutoniumbom met een kracht van 20 kiloton TNT, beide met verschrikkelijke gevolgen. De oorlog was wel meteen voorbij, maar de mensheid was enorm geschrokken! Wat is ook weer TNT? Het betekent “trinitrotolueen” en wordt ook wel “dynamiet” (ahá) of trotyl genoemd en is uitgevonden door Alfred Nobel (van de Nobelprijs). Thans maakt men kernbommen van weet ik hoeveel megaton TNT....je mag er niet aan denken wat er gebeurt als die op een stad vallen. (één megaton = 1 miljoen ton)

### **“Verrijkt” Uranium**

Voor kernsplijting heb je dus “verrijkt” Uranium nodig. Maar .... hoe “verrijkt” je nu eigenlijk Uranium? De Amerikanen hebben hiervoor tijdens de tweede wereldoorlog een proces ontwikkeld dat met “gasdiffusie” werkt. Uranium wordt chemisch gebonden met Fluor waardoor het gasvormig wordt. Dit gas wordt dan door poreuze membranen geperst, waarbij de wat lichtere U 235 atomen iets makkelijker door de membranen bewegen dan de zwaardere U 238 atomen. Door het Uraniumfluorgas steeds verder door dergelijke membranen te persen, wordt het dan langzamerhand steeds rijker aan U 235. Het is een methode die wel goed werkt, maar duur en omslachtig is.

In Nederland, of all places, was er in de zestiger jaren iemand, een zekere professor Kistemaker, die een beter idee had, namelijk centrifugeren! Dit bleek echter toch moeilijker dan gedacht. De snelheid van de trommels moest bijvoorbeeld zo enorm hoog zijn (meer dan duizend omwentelingen per seconde!) dat in 't begin geen enkele lagering het lang uithield en ook de trommels uit elkaar vlogen. De Amerikanen kregen lucht van dit experiment en begonnen hem behoorlijk te knijpen, stel je voor dat het die Hollanders tóch zou lukken! Ze probeerden Kistemaker op allerlei manieren te ontmoedigen en belachelijk te maken: logisch, zij zagen hun lucratieve monopolistische diffusieproces de mist in gaan als het centrifugeproject zou slagen.

Kistemaker hield stug vol, ontwikkelde met z'n team een revolutionaire (gas)lagering en loste het trommelprobleem op door een geschikte (aluminium) legering te kiezen en de trommels te laten draaien in vacuüm. Zo slaagde men er uiteindelijk in om Uranium verrijken voor een tiende van de normale prijs! De Amerikanen (General Electric) hebben toen nog geprobeerd om de hele VMF (Verenigde Machine Fabrieken Stork) waar Kistemaker werkte, dan maar over te nemen, maar de koop mislukte doordat de VMF snel een hoop nieuwe aandelen uitgaf en zo de meerderheid behield. Deze praktijk is nu verboden, maar toen nog niet! Uiteindelijk is uit dit centrifugeproject de UCN (Ultra Centrifuge Nederland) fabriek (“Urenco”) in Almelo ontstaan, die ook nu nog steeds verrijkt Uranium produceert.

Hoe gaat dit verrijgingsproces met “ultracentrifuges” nu eigenlijk? Moeilijk te weten te komen, maar het gaat ongeveer zo:

- Eerst moet het pure Uranium aan het Uraniumerts onttrokken worden. Dit kan gedaan worden door het erts met zwavelzuur te behandelen. Er ontstaat dan, na filtering en droging, een spul dat “yellow cake” genoemd wordt.
- Door dit bij 56 °C aan fluorgas bloot te stellen verkrijgt men “Uraniumhexafluoride”, dat gasvormig is. Dit gas wordt dan door een batterij ultracentrifuges geleid, waardoor het gas steeds rijker aan U 235 wordt. In zo’n centrifuge gaat het zwaardere U238 namelijk naar de buitenkant en U235 naar de binnenkant. Om 90 % U 235 te fabriceren heeft men een trein van zo’n 1500 centrifuges nodig en de doorloop duurt dan wel een jaar!
- Dit gasvormige Uraniumhexafluoride, “rijk” aan U 235, wordt dan (door het onttrekken van de fluor) omgezet in poedervormig Uraniumdioxide, waarvan men kogels kan persen. Voor een bom heeft men kogels nodig van minimaal 16 kg met een gehalte van minstens 90 % U 235. Voor kerncentrales is een veel lager percentage al bruikbaar. Behalve het gehalte is ook de zuiverheid van groot belang. Verontreinigingen in het product kunnen de kettingreactie verstoren of verzwakken door absorptie van neutronen door deze verontreinigingen.

### **Pakistaanse atoombom**

In die Almelse fabriek werkte indertijd ook een Pakistaanse geleerde, een zekere Abdul Qadeer Khan, die het volledige vertrouwen genoot en overal toegang toe had. Door de ongelofelijke naïviteit van de leiding van het bedrijf, had deze man toegang tot alle geheime knowhow en heeft kans gezien deze kennis naar Pakistan te smokkelen! Met hulp van zijn Nederlandse vriend Slebos, zag hij later zelfs ook kans om allerlei strategische onderdelen en materialen (bijvoorbeeld de speciale buizen van die speciale aluminiumlegering) te importeren in Pakistan! Regelmatig is Khan met deze man (Henk) gesignaleerd in o.a. Timboektoe, hoofdstad van Niger, waar veel Uraniumerts gevonden wordt! Waarom waren zij daar? Om Uranium te kopen? Niet alleen. Abdul Khan had investeringen in Timboektoe en Henk en Abdul bezochten ook leuke dames aldaar. Toen ik over hen las dacht ik meteen aan de volgende, bekende Limerick. Zou die op hen slaan?

*Er was eens een man in Timboektoe,  
Die ging naar de hoer op de hoek toe!  
Hij kwam er weer uit,  
Zonder een duit,  
Maar knoopte tevreden z’n broek toe!*

Door dit alles heeft Pakistan uiteindelijk kans gezien om atoombommen te produceren, waarmee ze India en de rest van de wereld al een paar maal de stuipen op ’t lijf hebben gejaagd. Onlangs (2003) bleek dat Khan deze knowhow ook nog stiekem verkanseld heeft aan Iran, Libië en Noord Korea. Daar hij in Pakistan een soort volksheld is geworden, kwam hij er, tot woede van de Amerikanen, met een publiek excuusje en wat huisarrest vanaf! In Almelo zit men zich waarschijnlijk nog te schamen. Onlangs (2005) kwamen Abdul en Henk weer in ’t nieuws. En wat bleek? Ook onze BVD heeft een rol gespeeld, zij waren ingelicht, ze wisten van de bedoelingen van Khan! Maar.... waarom hebben ze niet ingegrepen? Niemand die het wil vertellen. En ook, de USA steunt Pakistan zelfs nog steeds! Duistere spelletjes?

En nu (2006) is Leiden in last, ook Iran gaat zelf Uranium verrijken! Om kernenergie op te wekken? Laten we hopen dat het daarbij blijft! Maar... wat doen jullie daar in Iran toch moeilijk. 3% Verrijking is genoeg (voor kernenergie) jongens en dat wil jullie vriend Rusland toch voor jullie doen? Ideaal: Rusland verdient wat, jullie hebben kernenergie en ’t westen

importeert gewoon jullie olie voor ontzettend veel geld. Ruim één dollar voor 3 liter spul dat bij jullie zo uit de grond spuit is erg goed betaald! (Een barrel is 159 liter en kost al zo'n 60 à 70 dollar en zal op den duur nog wel meer stijgen!)

Zouden die Perzen toch sterker verrijkt Uranium willen produceren om..... ?

### **“Verarmd” Uranium**

Als we “verrijkt” Uranium, hebben, dan hebben we ook “verarmd” uranium. Normaal uranium is licht radioactief, verrijkt Uranium sterk en verarmd Uranium dus wat lichter radioactief. Wat is nu precies verarmd Uranium? Nou, dat is het Uranium 238 wat overblijft als het meeste Uranium 235 eruit gehaald is. Natuurlijk zit er nog wel iets U235 in, maar veel minder dan de “normale” 0,7 %. Veel deskundigen beschouwen verarmd Uranium als ongevaarlijk. In het Engels noemt men verarmd Uranium: “depleted” Uranium, bijna uitgeput dus. Iemand gebruikte zelfs een brok verarmd Uranium als presse-papier op zijn bureau!

De wapenindustrie vond een geweldige toepassing voor dit afvalproduct: Uranium is een stevig, goed bewerkbaar metaal, met een zeer hoog soortelijk gewicht, namelijk ongeveer 19 en dat is bijna twee maal zo zwaar als lood en dus een ideaal materiaal om kogels, punten van granaten en andere munitie van te maken. Een granaat of kogel met dit materiaal gaat bijna overal doorheen! Door het hoge gewicht bij klein volume is het ook zeer bruikbaar als ballast en werd (wordt?) toegepast als trimgewicht in vliegtuigen en wedstrijdzeilschepen. Men gaf het niet toe, maar intussen is het zeker dat de El Al Boeiing 747 die op de Bijlmerflats neerstortte verarmd Uranium als ballast aan boord had. Dit uranium is bij de enorme brand die na de ramp ontstond, waarschijnlijk grotendeels verbrand en verdampt. Uranium brandt prima, net als vele andere metalen trouwens. Het is dus zeer aannemelijk dat de flatbewoners en reddingwerkers, die in de buurt waren, Uranium in één of andere vorm binnen hebben gekregen. Uranium 238 is trouwens wel degelijk, zij het licht, radioactief en geef “alfa” en “gamma”straling af. Deze straling (waarover later meer) is buiten het lichaam misschien niet al te gevaarlijk, maar in je lichaam wel degelijk!

Ook tijdens de oorlog in voormalig Joegoslavië en Irak is, ondanks heftige ontkenning, met zekerheid munitie van “verarmd” Uranium toegepast en soldaten die daar hebben gevochten kunnen dus eveneens Uranium ingeademd hebben. Steeds weer wordt de toepassing van verarmd Uranium ontkend en, wanneer men eindelijk toe moet geven dat het misschien toch gebruikt is, wordt het gevaar ervan ten stelligste ontkend. Maar... ga eens praten met de overlevenden, reddingwerkers en soldaten die later allerlei rare klachten kregen. De officiële instanties ontkenden (en ontkennen) met klem dat er enig verband bestond tussen hun klachten en de ramp, maar een Amerikaanse arts heeft voor de Nederlandse radio uitvoerig verteld hoe gevaarlijk ook verarmd Uranium kan zijn. Uit eigen ervaring wist hij nauwkeurig welke ernstige gevolgen bijvoorbeeld het inademen van verarmd Uranium voor mensen kan hebben. Hoe stellig van overheidszijde, in augustus en december 2004 nog, ontkend werd dat er sprake is van enig gevaar door de toepassing van verarmd Uranium als munitie of ballast: ik zou het niet graag in m'n longen willen hebben! En als er verarmd Uranium in de Bijlmer Boeiing aanwezig was (en dat wordt intussen niet meer ontkend) dan is dat in de enorme vuurzee verbrand en verdampt. En dat zou niemand in z'n longen gekregen hebben? Wat men ook zegt: ook verarmd Uranium is radioactief, geeft straling af en is in je lichaam zeer ongewenst, met andere woorden: je wordt ziek of erger!