

Eindeloos of Eindig

Wanneer valt kernenergie van de energieklijf?



KERNENERGIE:
'ja, mits' of 'nee, tenzij'



Kernenergie: broeikasgassen en voorzieningszekerheid

Een fysische benadering

Ir. Jan Willem Storm van Leeuwen

Senior scientist Ceedata Consultancy
april 2007

Korte samenvatting

Dit artikel richt zich op de fysische aspecten van twee kwesties aangaande kernenergie:

- 1 De bijdrage van kernenergie aan de wereldenergievoorziening, nu en in de toekomst.
- 2 De emissie van broeikasgassen door kernenergie, nu en in de toekomst.

Deze twee punten worden onderzocht door een diepgaand ketenonderzoek (life cycle assessment, LCA) met daaraan gekoppeld een energie-analyse, van het complete systeem van industriële processen die nodig zijn om bruikbare energie uit uraniumerts op te wekken. Deze analyse wordt gecombineerd met een beoordeling van de fysische en chemische eigenschappen van de bekende uraniumreserves. Het nucleaire systeem is gebaseerd op de licht-water reactor (LWR) met een open splijtstofketen, dus zonder recycling van uranium en/of plutonium.

In twee scenario's wordt de potentiële bijdrage van kernenergie in de toekomst ingeschat, wat betreft de netto energie aan de samenleving geleverd en de vermindering van de lozing van broeikasgassen.

Dit artikel is gebaseerd op de studie:
Storm van Leeuwen J W & Smith Ph B,
Nuclear power - the energy balance
August 2005, www.stormsmith.nl

Inhoud

- 1 Inleiding
 - 2 Huidige bijdrage van kernenergie
 - Energievoorziening
 - Broeikasgassen
 - 3 Het nucleaire systeem
 - Welke technologie?
 - Systeemgrenzen
 - 4 Energie-analyse
 - Energiestromen
 - Effectiviteit over de levensduur
 - Methodologie
 - Energiekwaliteit van uranium
 - 5 Emissie van CO₂ en andere broeikasgassen
 - Koolstofdioxide
 - Andere broeikasgassen
 - 6 Bekende uraniumreserves van de wereld
 - 7 Winning van uranium uit erts
 - Mineralogical barrier
 - Belangrijke parameters
 - Verdunningsfactor
 - Extractierendement
 - Specifiek energieverbruik van de uraniumwinning
 - In situ leaching
 - Specifiek energieverbruik van het nucleaire systeem
 - 8 Energie uit uranium: de energieklijf
 - Netto energie en ertsgehalte
 - De energieklijf en uraniumreserves
 - Specifieke CO₂ emissie en uraniumreserves
 - 9 Scenario's
 - Uitputting van de uraniumreserves
 - Nucleaire CO₂ emissie
 - Energieklijf in de tijd
 - 10 Vooruitzichten
 - Economische benadering
 - Fysische benadering
 - Verwachting
 - 11 Conclusies
 - Voorzieningszekerheid
 - Broeikasgassen
- Referenties

Grootheden en eenheden

- 1 Mg = 1 megagram = 10^6 gram = 1 ton
1 Gg = 1 gigagram = 10^9 gram = 1000 ton
1 Tg = 1 teragram = 10^{12} gram = 1 miljoen ton
1 TJ = 1 terajoule = 10^{12} joule 1 TJ komt overeen met 277 777 kWh
1 kWh = 3,6 MJ

1 Inleiding

Kernenergie wordt door velen gezien als een essentiële bijdrage aan de zekerstelling van de toekomstige energievoorziening en als onmisbare technologie voor de klimaatbeheersing door vermindering van de lozing van broeikasgassen. Deze opvatting stoelt op het geloof dat de uraniumreserves vrijwel onuitputtelijk zijn en dat kernenergie een schone energievorm is, die geen of heel weinig schadelijke effecten voor de mens en de biosfeer heeft.

In hoeverre wordt deze opvatting gestaafd door verifieerbare feiten? Hoe duurzaam is kernenergie?

Het antwoord op deze vragen is minder eenvoudig dan soms wordt gesuggereerd, doordat de opwekking van kernenergie een extreem ingewikkelde aangelegenheid is. Dat verklaart misschien dat enkele persistente misconcepties de discussie over kernenergie bemoeilijken.

Dit artikel gaat in op de volgende vragen:

- Hoe groot is de huidige nucleaire bijdrage aan de wereldenergievoorziening?
- Hoe verhoudt de lozing van broeikasgassen door kernenergie zich met die van fossiele brandstoffen?
- Hoe zijn de vooruitzichten voor kernenergie in de toekomst, zowel wat betreft de energievoorzieningszekerheid, als wat betreft de lozing van broeikasgassen?

De opwekking van energie en de emissie van broeikasgassen zijn fysische en chemische processen. Klimaatveranderingen en de eventuele invloed van de mens daarop zijn fysische, chemische en biologische verschijnselen op wereldschaal. Om die reden wordt kernenergie in dit artikel getoetst op zijn fysische en chemische kenmerken en de mondiale implicaties daarvan. Voor de inschatting van de duurzaamheid van het nucleaire energiesysteem tellen alle mondiale en blijvende effecten die door het systeem in de biosfeer veroorzaakt worden, ongeacht de plaats en het tijdstip van het ontstaan van die effecten.

Een energie-analyse is de aangewezen methode, omdat energie is een vaste en constante grootheid is, die niet afhankelijk is van plaats en tijd, noch van politieke en culturele concepten.

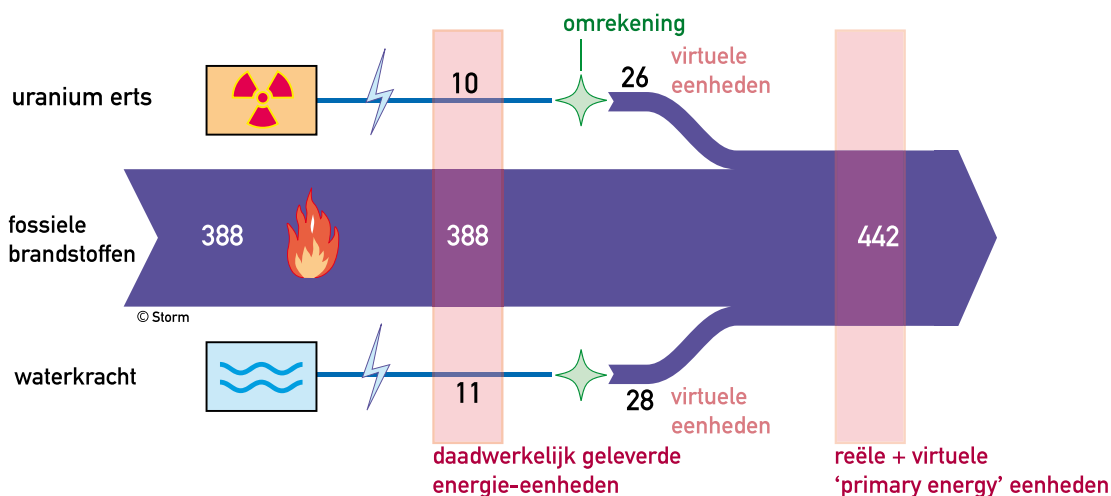
Buiten de fysische aspecten zijn er andere kwesties die verband houden met de duurzaamheid van kernenergie, zoals: proliferatie, veiligheid (ongelukken) en kwetsbaarheid, nucleair terrorisme, radioactieve besmetting door routine-activiteiten. Deze kwesties blijven hier buiten beschouwing, niet omdat de auteur deze kwesties minder belangrijk acht dan de voorzieningszekerheid en broeikasgassen, maar om de scope van dit artikel te beperken.

2 Huidige bijdrage van kernenergie

Energievoorziening

De bijdrage van kernenergie aan de wereldenergievoorziening is geen ondubbelzinnige grootte en wordt op verschillende manieren berekend. In economische statistieken van het wereldenergieverbruik, bijvoorbeeld *BP Statistical Review of World Energy* [Q91], worden gewoonlijk alleen de verhandelde energiestromen opgenomen. Daaronder vallen de fossiele brandstoffen (gas, olie en steenkool), kernenergie en waterkracht, maar niet de 'traditionele biomassa' (hout, mest, turf, stro) die in ontwikkelingslanden wordt gebruikt in de huishoudens. In de meest recente uitgave van BP in 2006 waren evenmin de bijdragen van moderne duurzame bronnen, zoals wind en fotovoltaïsche (PV) en zon-thermische opwekking meege-
nomen.

Kernenergie en waterkracht komen uitsluitend beschikbaar als electriciteit. In de toonaangevende statistieken worden de geleverde elektrische energie-eenheden omgerekend in zogenaamde 'primary energy units', meestal uitgedrukt in TOE: tonnes oil equivalents. BP vermenigvuldigt daartoe de geproduceerde eenheden electriciteit met een factor 2,6. Het resulterende getal zou overeenkomen met de virtuele hoeveelheid fossiele brandstof die nodig zou zijn geweest om dezelfde hoeveelheid electriciteit op te wekken met een mondiaal gemiddelde electriciteitscentrale. Deze virtuele energie-eenheden worden vervolgens opgeteld bij de daadwerkelijk geproduceerde (fossiele) energie-eenheden (zie Figuur 1).



Wereld energie 2005, statistisch gezien (eenheid EJ)

Figuur 1

Wereldenergieproductie in 2005 in een statistische benadering, volgens *BP Statistical Review of World Energy* [Q91]. De eenheid van energie is hier de exajoule E ($1 \text{ EJ} = 10^{18}$ joule). In dit diagram zijn alleen de verhandelde energiestromen opgenomen. Niet inbegrepen zijn moderne renewables (wind, fotovoltaïsch, geothermie, etc.) noch biomassa, zowel traditioneel (hout, turf, stro, mest), als moderne bio-brandstoffen. De electriciteit uit kerncentrales en uit waterkracht wordt omgerekend in virtuele energie-eenheden, die 'primary energy units' worden genoemd. Deze virtuele eenheden worden gewoon opgeteld bij de daadwerkelijk geproduceerde eenheden fossiele energie.

Bovenbeschreven manier van presenteren introduceert onnodige dubbelzinnigheden, omdat de omrekeningsfactor, die voor 2005 op 2,6 is gesteld, afhankelijk is van tijd, plaats en impliciete vooronderstellingen wat betreft toepassing van energie en opwekkingstechnologie. Het terugrekenen van elektriciteit uit kerncentrales en waterkracht – tot voor enkele jaren alleen van kernenergie – duidt op een fossiel paradigma.

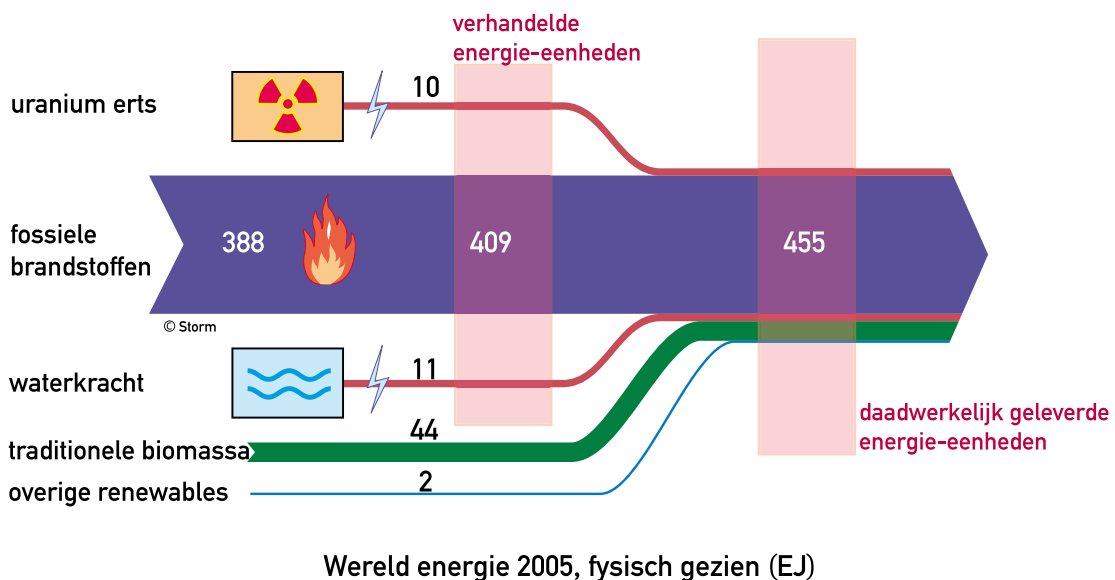
Misleidender echter is dat de presentatie van BP in strijd is met de Eerste Hoofdwet van de thermodynamica: de wet van behoud van energie. Deze natuurwet zegt dat energie niet uit het niets kan ontstaan en ook niet kan worden vernietigd; in feite zijn alleen energie-omzettingen mogelijk.

Een eenvoudig voorbeeld kan de strijdigheid verduidelijken. De 26 virtuele energie-eenheden afkomstig van kernenergie in het diagram van Figuur 1, kunnen niet weer in electriciteit worden omgezet met brandstofcellen (omzettingsrendement 60%), waarbij 16 eenheden electriciteit zouden ontstaan. Op deze manier zouden 6 eenheden electriciteit (16 – 10) uit het niets ontstaan zijn.

Een andere strijdigheid zou zijn dat 1 joule kernstroom (de joule is de eenheid van energie) omgezet zou kunnen worden in 2,6 joule warmte (in een waterkoker bijvoorbeeld) en 1 joule electriciteit uit andere bronnen in slechts 1 joule warmte. Volgens de Eerste Hoofdwet kan 1 joule electriciteit in slechts 1 joule warmte worden omgezet, ongeacht de bron.

Volgens de presentatie van de wereldenergiestromen in Figuur 1 zou de bijdrage van kernenergie aan de wereldenergievoorziening in 2005 bedragen: $26/442 = 0,059$ of 5,9%. Dit getal wordt steeds genoemd door de nucleaire industrie als de nucleaire bijdrage.

De fysische voorstelling van de energiestromen die daadwerkelijk ter beschikking kwamen van de mondiale samenleving in 2005 is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2

Daadwerkelijk afgeleverde bruikbare energie (in exajoules) aan de wereldeconomie in 2005. De getallen zijn afgerond. Bronnen: verhandelde energie uit *BP Statistical Review of World Energy* [Q91], overige door extrapolatie van gegevens uit *World Energy Assessment Update 2004* [Q79]. De waarden van traditionele biomassa (44 EJ) en de ‘moderne renewables’ (2 EJ) zijn niet nauwkeurig bekend.

Naast de energiestromen die via de handel zijn gegaan, zijn ook de traditionele biomassa en 'moderne' duurzame bronnen opgenomen in Figuur 2. De hoeveelheid verbruikte traditionele biomassa is niet nauwkeurig bekend. Geen van de energiestromen in Figuur 2 zijn omgerekend in virtuele energie-eenheden.

Berekening van de nucleaire bijdrage op basis van de fysische voorstelling in Figuur 2 geeft:

- aandeel in de verhandelde energie = $10/409 = 2,4\%$
- aandeel in de totale energieproductie = $10/455 = 2,2\%$.

Emissie van broeikasgassen

De huidige emissie van broeikasgassen door kernenergie is niet eenvoudig vast te stellen en vormt een onderwerp van discussie.

Aangenomen dat kernenergie geheel vrij is van broeikasgassen, hetgeen niet het geval is, kan de huidige bijdrage aan de vermindering van de emissie van broeikasgassen op twee manieren geschat worden.

- Alle energie-eenheden worden equivalent beschouwd, zoals hierboven is toegelicht bij Figuur 2. Van elke 100 eenheden zijn 2,2 eenheden opgewekt door kernenergie. Aangenomen dat 1 energie-eenheid fossiele brandstof overeenkomt met 1 eenheid broeikasgassen, dan zou de vermindering door kernenergie dus 2,2% bedragen. Deze manier is ondubbelzinnig, omdat er geen veronderstellingen aan ten grondslag liggen omtrent het gebruik van de energie, tijdstip en plaats.
- Een andere manier gaat uit van de gedachte dat 1 energie-eenheid kernenergie 2,6 eenheden fossiele brandstof vervangt. In dat geval zou de nucleaire bijdrage aan de vermindering $2,2 \times 2,6 = 5,75$ eenheden per honderd zijn, dus 5,75%. Zoals hiervoor is uitgelegd, is deze manier dubbelzinnig, omdat hij stoelt op impliciete vooronderstellingen en afhankelijk is van tijd en van plaats.

Het nucleaire systeem loost koolstofdioxide (CO_2) in de atmosfeer, over de hoeveelheden verschillen de meningen. We komen hier later op terug.

Daarnaast kunnen er andere broeikasgassen geloosd worden, zoals chloorfluorkoolstofverbindingen (CFK's). Een belangrijke bevinding voor de kernenergie discussie is dat hierover niets bekend is en dat de nucleaire industrie hierover nooit gegevens heeft gepubliceerd. Waarschijnlijk zijn de lozingen van andere broeikasgassen ook nooit onderzocht.

Echter, *de afwezigheid van openbare gegevens betekent niet afwezigheid van broeikasgaslozingen*. Voordat de nucleaire industrie met recht kan claimen dat kernenergie vrij is van broeikasgassen, zal die claim eerst door wetenschappelijk onderzoek gestaafd moeten worden.

Wat zijn nu zijn de uitzichten voor de toekomst, wat betreft de nucleaire bijdrage aan de wereldenergievoorziening en de vermindering van broeikasgassen?

Voordat deze vraag aan de orde komt, moeten eerst enkele hoofdkenmerken van het nucleaire systeem besproken worden.

3 Het nucleaire systeem

Welke technologie?

Uranium zoals dat in de natuur wordt gevonden bestaat voor 0,7% uit het splijtbare uranium-235 en voor 99,3% uit het niet-splijtbare uranium-238, daarnaast komen nog sporen van het eveneens niet-splijtbare uranium-234 voor.

Er zijn twee hoofdclassen kernreactors: *burners* (letterlijk: branders) en *breeders* (kweekreactoren). In een burner reactor kan niet meer dan 0,7% van de atomen in natuurlijk uranium worden verspleten. In een kweekreactor kunnen meer splijtbare atoomkernen (plutonium) uit het niet-splijtbare uranium-238 worden gevormd dan er worden verspleten. Theoretisch zouden op deze manier 30-60% van de uraniumatomen in natuurlijk uranium kunnen worden verspleten. Kweekreactoren werken met snelle neutronen, die niet eerst vertraagd worden door een moderator en worden daarom vaak snelle kweekreactoren (fast breeders) genoemd. Dit betekent niet dat het kweekproces snel gaat. Bovendien, niet iedere 'snelle' reactor is een kweekreactor.

Burners

De reactoren van alle werkende kerncentrales ter wereld zijn burner reactoren, waarin de splijting gebeurt met thermische (langzame) neutronen, vandaar de benaming 'thermal neutron reactor' of thermische reactor. Er is één centrale met een burner reactor die met snelle neutronen werkt. De drie hoofdclassen van de thermische burner reactoren zijn:

- licht-water reactoren (LWR, Light-Water Reactor): de drukwaterreactor (PWR, pressurized water reactor) en de kokend-water reactor (BWR: boiling water reactor),
- grafiet-gemodereerde gasgekoelde reactoren, zoals de Magnox en AGR,
- zwaar-water gemodereerde reactoren, waarvan de Canadese CANDU reactoren het belangrijkste voorbeeld zijn.

Wereldwijd hebben momenteel 88% van de werkende kerncentrales een LWR.

De modernste thans werkende kerncentrales kunnen ongeveer 0,6% van de atomen in natuurlijk uranium versplijten. Dat houdt in dat van elke kilogram uranium dat de mijn verlaat 6 gram daadwerkelijk verspleten wordt. De overige 994 gram verlaten het nucleaire systeem in de vorm van verarmd uranium, als procesverliezen in afvalstromen en als afgewerkte splijstof. Geavanceerde types reactoren, zoals de zogenoemde Generation III reactoren en de Zuid-Afrikaanse Pebble Bed Reactor, zijn alle burner reactoren en kunnen misschien 0,7% van het natuurlijk uranium versplijten. De eerste Generation III reactoren zijn thans in aanbouw genomen (onder andere Olkiluoto-3 in Finland), zodat er nog geen praktijkervaring met deze nieuwe types bestaat.

Breeders

Dat wat een 'breeder' of 'kweekreactor' wordt genoemd, is niet zomaar een reactor type of een stand-alone systeem. Om het beloofde energiepotentieel van uranium waar te maken, is een ingewikkelde kweekcyclus vereist. Deze kringloop bestaat uit drie componenten: een kweekreactor, een opwerkingsfabriek en een splijstoffabriek. Alle drie componenten van de kringloop moeten op zich feilloos functioneren en, wat meer is, moeten volledig gesynchroniseerd samenwerken. Dit is een voorwaarde om het systeem meer splijtbaar materiaal te laten kweken uit uranium-238 dan het systeem zelf verbruikt. Als één component faalt, faalt het hele systeem.

Vijftig jaar intensief onderzoek in zeven landen (USA, Groot Brittannië, Frankrijk, Duitsland,

de voormalige Sovjetunie, nu Rusland, Japan en India), met investeringen van meer dan 100 miljard dollars, heeft niet kunnen aantonen dat de kweekcyclus technisch uitvoerbaar is. Technisch onuitvoerbaar betekent uiteraard ook economisch onhaalbaar, maar de ontwikkeling van de kweekcyclus is niet gestopt op grond van economische overwegingen. Tot nu toe zijn er geen technische doorbraken gerapporteerd, die de uitvoerbaarheid aannemelijk zouden kunnen maken. Die doorbraken zijn ook niet te verwachten, gelet op de fundamentele fysische en chemische problemen die de kweekcyclus in de weg staan.

Open keten en MOX splijtstof

De MIT 2003 studie *The Future of Nuclear Power* [Q280] verwacht niet dat breedere, dat betekent in wezen de kweekcyclus, binnen 30 jaar in bedrijf zullen komen. Dit houdt in dat kernenergie gedurende de volgende decennia gebaseerd zal moeten worden op thermische burner reactors, voornamelijk de LWR, in de zogenaamde open splijtstofketen.

In de open splijtstofketen wordt de verbruikte splijtstof niet opgewerkt. Het niet-verspleten uranium en het gevormde plutonium worden dus niet gerecycleerd. De auteurs van de MIT studie achtten de risico's voor proliferatie en terrorisme te hoog, om opwerking en het gebruik van MOX splijtstof te rechtvaardigen.

Met de afkorting MOX wordt 'mixed-oxide' splijtstof aangeduid, een mengsel van uraniumoxide UO_2 en plutoniumoxide PuO_2 . MOX splijtstof kan met eenvoudige scheikundige middelen gescheiden worden in uranium en plutonium. Het gebruik van MOX roept onbeheersbare terroristische risico's op (Barnaby 2005a/b, 2006 [Q339], [Q340], [Q341]).

Volgens de MIT studie zijn er echter ook economische redenen om af te zien van recycling van uranium en plutonium.

Systeemgrenzen

Een kerncentrale is niet een op zichzelf staand systeem. Om de energie die opgesloten zit in uranium, zoals gevonden in de natuur, om te zetten in bruikbare energie, zijn een aanzienlijk aantal industriële processen nodig. Dit omvangrijke complex van industriële processen wordt het nucleaire energiesysteem genoemd. De kernreactor is daar één onderdeel van. In hoofdlijnen bestaat het nucleaire systeem uit twee procesketens: de reactorketen en de splijtstofketen (zie Figuur 3).

De reactorketen omvat drie groepen:

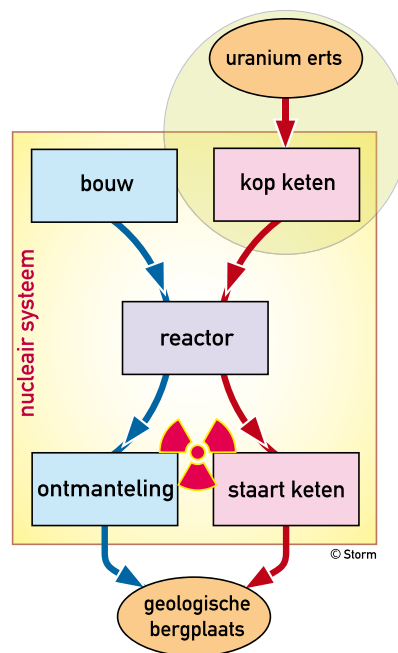
- Bouw van de kerncentrale
- Bedrijfsvoering en onderhoud plus de revisies tijdens de levensduur
- Afschakeling, schoonmaak en afbraak van de radioactieve delen van de kerncentrale aan het eind van zijn technische levensduur. Hierbij is inbegrepen de definitieve berging van het radioactieve sloopafval in een geologisch veilige opbergplaats.

De splijtstofketen omvat eveneens drie groepen:

- De kop van de keten (front end), bestaande uit de processen die nodig zijn om van uraniumerts in de bodem splijtstof te maken voor in de reactor.
- Versplijting van splijtstof in de reactor. Hierbij komt de warmte vrij, die via stoom, stoomturbine en generator voor een deel in electriciteit wordt omgezet. Door het kernsplijtingsproces en andere kernreacties neemt hierbij de radioactiviteit van de splijtstof met een factor miljard toe. Ook de reactor zelf wordt steeds radioactiever naarmate hij langer in bedrijf is.
- De staart van de splijtstofketen (back end), bestaande uit de processen die nodig zijn

om al het radioactieve afval dat ontstaat in de eerste en tweede deel van de nucleaire splijtstofketen te verpakken en voor altijd te isoleren van de biosfeer. Enkele van deze processen bevinden zich nog in het ontwerpstadium, een feit dat grote onzekerheden voor de toekomst introduceert. Temeer daar de problematiek van deze processen al een halve eeuw bekend is.

Elke groep van het nucleaire systeem op zich bestaat uit een of meer industriële processen. Elk proces verbruikt electriciteit, fossiele brandstoffen, materialen en chemicaliën. Elk van de processen produceert koolstofdioxide en mogelijk ook andere broeikasgassen. De reactor zelf is het enige onderdeel in het nucleaire systeem dat nauwelijks of geen broeikasgassen emitteert.



Figuur 3

Hoofdpijnen van het nucleaire energiesysteem met twee procesketens: de reactorketen (links, in blauw) en de splijtstofketen (rechts, in rood). Zie tekst voor nadere omschrijving. De splijtstofketen begint met de vondst van uraniumerts in de bodem en eindigt met de definitieve opberging van het laatste radioactieve afval in een geologisch veilige bergplaats. De reactorketen begint met normale en alledaagse industriële activiteiten en eindigt eveneens in een geologisch veilige bergplaats. Dit laatste wegens het feit dat de reactor tijdens het bedrijf sterk radioactief wordt, waardoor het radioactieve puin en schroot dat bij de sloop vrijkomt, definitief van de biosfeer geïsoleerd moet worden.

Dit rapport is voornamelijk gericht op het eerste deel van de splijtstofketen (front end) in combinatie met een evaluatie van de geologische uraniumreserves (groen omcirkelde gebied in figuur 3). De toekomst van kernenergie blijkt alleen al in dit deel van het nucleaire systeem zijn beperkingen te ontmoeten.

De modelcentrale van deze studie is een licht-water reactor (LWR) met een elektrisch vermogen van 1 GW en met een open splijtstofketen. Het volledige processchema van dit nucleaire systeem, weergegeven in Figuur 4, laat zien hoe uitgebreid en ingewikkeld het nucleaire systeem is. Het schema geeft ook een verschil met andere studies aan: de processtappen waarover grote onzekerheden bestaan en die meestal geheel of gedeeltelijk uit de analyses worden weggelaten.

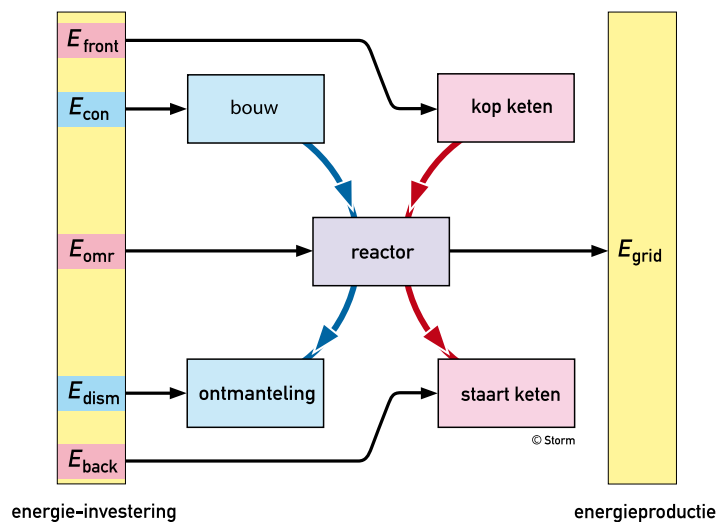
4 Energie-analyse

Energie kost energie. Voor opwekking van nuttig bruikbare energie uit de energiebronnen zoals de mens ze aantreft in de biosfeer zijn altijd bewerkte materialen en energie nodig. Sommige energiesystemen zijn eenvoudig en overzichtelijk, zoals een windmolen voor opwekking van mechanische energie en elektriciteit. Andere energiesystemen zijn complex en onoverzichtelijk, met name dat van kernenergie.

In de studie van Storm & Smith [Q6], waarop dit artikel berust, zijn de materiaalstromen en energiestromen geanalyseerd van alle processen die samen het nucleaire systeem vormen, zoals weergegeven in Figuur 4. De energiebalans van het kernenergiesysteem kan worden opgemaakt aan de hand van Figuur 5.

Op grond van deze analyse kunnen twee belangrijke parameters worden afgeleid:

- De hoeveelheid bruikbare energie die nodig is om het nucleaire systeem te bouwen, in bedrijf te houden en op te ruimen. Op grond hiervan kan dan de prestatie van kernenergie als energiesysteem gekwantificeerd worden. Hiervoor zijn verschillende definities in gebruik, die hierna besproken zullen worden.
- De CO_2 intensiteit, ook wel genoemd de *specifieke CO_2 emissie*, van het nucleaire systeem. Hieronder wordt verstaan de hoeveelheid CO_2 die geproduceerd wordt per kilowattuur elektriciteit die de centrale aan het net aflevert.



Figuur 5

De energiebalans van het nucleaire energiesysteem omvat enerzijds de energie-input en anderzijds de energie-output. De energie-input is nodig om de vijf procesgroepen van het nucleaire systeem in stand te houden, ongeacht plaats en tijd van het proces. De energie-output, hier aangegeven met E_{grid} , is de hoeveelheid elektriciteit die door de kerncentrale aan het net geleverd is.

Energiestromen

De energie-investeringen van het kernenergiesysteem kunnen onderscheiden worden in vaste en variabele energie-investeringen.

De *vaste energie-investeringen* zijn niet of weinig afhankelijk van de operationele levensduur van de kerncentrale. Hieronder vallen:

E_{con} de energie die nodig is voor de bouw van de kerncentrale,
 E_{dism} de energie die nodig is om de kerncentrale na definitieve afschakeling schoon te maken en af te breken (ontmanteling).

Het totale vaste energieverbruik is:

$$E_{fix} = E_{con} + E_{dism} \quad \text{vergelijking 1}$$

In feite zal de ontmantelingsenergie waarschijnlijk toenemen met de levensduur van de kerncentrale. Naarmate de reactor langer in bedrijf is zullen meer materialen radioactief worden door neutronenbestraling en besmetting met radioactieve corrosieproducten en stoffen uit de reactor kern. De vervuilende stoffen in de reactor en bijbehorende koelsystemen worden wel aangeduid met CRUD: Corrosion Residuals & Unidentified Deposits. Bovendien zal de hoeveelheid radioactiviteit toenemen en zal het aandeel lang-levende radionucliden kunnen toenemen (hierover zijn nauwelijks empirische cijfers gepubliceerd).

Een en ander heeft tot gevolg dat, naarmate de kerncentrale langer in bedrijf is geweest, meer radioactieve materialen verwijderd moeten worden, die door de hogere radioactiviteit moeilijker te hanteren zijn. Op grond hiervan mag verwacht worden dat de ontmantelingsenergie met de bedrijfstijd zal toenemen. In de studie van Storm & Smith is een vaste waarde aangehouden.

De *variabele energie-investeringen* zijn direct afhankelijk van de bedrijfsduur van de kerncentrale. Hierin worden drie hoofdgroepen onderscheiden (zie ook Figuur 5):

E_{front} de energie die nodig is voor de processen van de kop van de splijtstofketen,
 E_{omr} de energie die nodig is voor bedrijfvoering, onderhoud en tussentijdse revisies van de kerncentrale (operation, maintenance, refurbishments),
 E_{back} de energie die nodig is voor de processen van de staart van de splijtstofketen.

Het totale energieverbruik van dit deel van de splijtstofketen is:

$$E_{fuel} = E_{front} + E_{omr} + E_{back} \quad \text{vergelijking 2}$$

De output van het kernenergiesysteem, E_{grid} , is de hoeveelheid elektriciteit die door de kerncentrale aan het net geleverd is. Deze hoeveelheid is niet gelijk aan de hoeveelheid elektriciteit die vrij te besteden is door de samenleving, want een deel van de geproduceerde elektriciteit is nodig om het nucleaire systeem zelf in stand te houden.

Effectiviteit over de levensduur

Het doel van een energiesysteem is het beschikbaar maken van energie die vrij te gebruiken is voor alle gewenste energiediensten. De effectiviteit van een energiesysteem om dat doel te bereiken moet gemeten worden over de gehele levensduur van het systeem.

De effectiviteit van kernenergie als energiesysteem kan op verschillende manieren gekwantificeerd worden, de belangrijkste zijn hieronder gedefinieerd. Alle energiestromen worden berekend over de gehele levensduur van de kerncentrale, met voortraject en nasleep.

- De *netto energie* afgeleverd aan de samenleving: $E_{net} = \text{energie-output} - \text{energie-input}$. In feite is dit de energiebalans van het systeem, gerekend over de gehele levensduur van het energiesysteem. In formule:

$$E_{net} = E_{grid} - E_{fix} - E_{fuel} \quad \text{vergelijking 3}$$

- De *energy payback ratio* R_{pb} , of *energy return on (energy) investment* (EROI of EROEI): de verhouding van de geproduceerde energie en de verbruikte energie. In formule:

$$\text{energy payback ratio} = R_{pb} = \frac{\text{energy output}}{\text{energy input}} = \frac{E_{\text{grid}}}{E_{\text{fix}} + E_{\text{fuel}}} \quad \text{vergelijking 4}$$

- *Energie-terugverdientijd* (energy payback time): de tijd waarin het energiesysteem evenveel energie heeft opgewekt als het verbruikt heeft gedurende zijn gehele levensduur. In formule:

$$\text{energy payback time} = T_{pb} = \frac{T_L}{R_{pb}} = \frac{E_{\text{fix}} + E_{\text{fuel}}}{E_{\text{grid}}} \cdot T_L$$

$T_L = \text{lifetime (years)}$ vergelijking 5

Het belang van dit soort kengetallen is dat zij ook van andere energiesystemen berekend kunnen worden, waarmee een vergelijking tussen verschillende energiesystemen mogelijk wordt. Zo zijn van enkele energiesystemen de energie-terugverdientijden samengevat in Tabel 1.

Tabel 1

Energieterugverdientijden van enkele energiesystemen. In de literatuur worden verschillende definities van de energierterugverdientijd gehanteerd, die tot verschillende uitkomsten kunnen leiden. Belangrijk is dat de grootte voor alle systemen op dezelfde wijze berekend is. Deze tabel is alleen bedoeld om een indruk te geven van de orde van grootte bij verschillende energiesystemen. De waarde voor kernenergie is afhankelijk van het ertsgehalte.

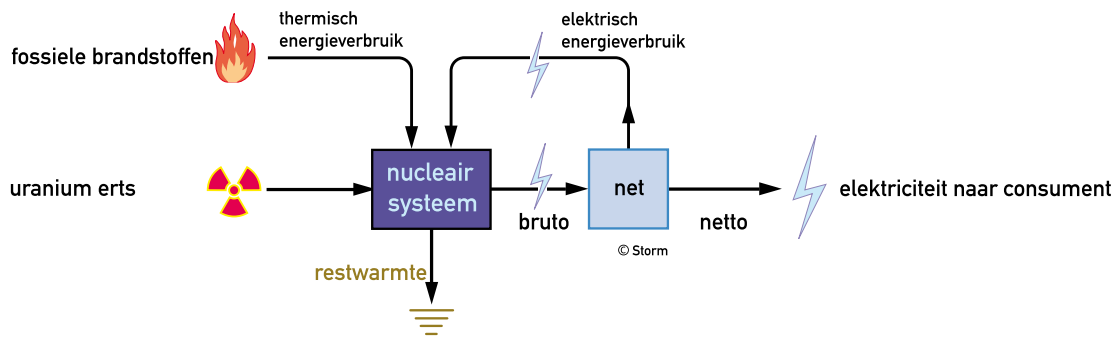
energiesysteem	operationele levensduur jaren	energie-terugverdientijd jaren	bron
kernenergie (LWR)	30-40	6-14	[Q6], [Q325]
PV (Midden Europa)	30-40	2,7-3,5	[Q335]
PV (Zuid Europa)	30-40	1,5-2	[Q335]
wind	20-30	< 0,5	[Q336]
fossiel: gas, olie	30-40	< 1	[Q6]
fossiel: kolen (conventioneel)	30-40	3,3	[Q337]

Methodologie

De methodologie van de energie-analyse van complexe systemen is ontwikkeld en wetenschappelijk gevalideerd in de periode 1970-1990. De toepassing van deze methodologie zoals toegepast in de Storm & Smith studie [Q6] is peer-reviewed in 1987 [Q2].

In een energie-analyse worden niet alleen de directe energiestromen betrokken, maar ook de indirecte. De indirecte energiestromen zijn nodig geweest om de materialen en machines te produceren die in een proces gebruikt worden.

De industriële processen die tezamen het nucleaire systeem vormen, verbruiken zowel elektriciteit als fossiele brandstoffen. Een methodologische vraag is: hoe om te gaan met de elektrische inputs. In verschillende onderzoeken worden verschillende afspraken gehanteerd. In de meeste analyses, zoals ISA 2006 [Q325] en Ecoinvent 2003 [Q333], wordt de elektrische input teruggerekend naar fossiele brandstoffen, op basis van de 'fuel mix' ter plaatse van de onderzochte kerncentrales. De 'fuel mix' is de samenstelling van het pakket fossiele brandstoffen waarmee op een bepaalde plaats op een bepaald moment de elektriciteit wordt opgewekt. Voor iedere regio is de fuel mix anders en bovendien veranderlijk in de tijd.



Figuur 6

In de analyse van Storm & Smith worden de elektrische energie-inputs van het nucleaire systeem beschouwd als te zijn geleverd door het nucleaire systeem zelf. Hiermee blijven regionale condities buiten spel en zijn de uitkomsten van de analyse van het systeem niet afhankelijk van tijd en plaats. Het beeld voor kernenergie wordt hierdoor iets gunstiger dan in de huidige situatie.

In de analyse van Storm & Smith is het nucleaire systeem zoveel mogelijk ontkoppeld van locale en tijdelijke omstandigheden. Het doel van de analyse is immers de bepaling van de nucleaire bijdrage op mondiaal niveau en over lange periodes. Het gaat erom hoeveel nuttig bruikbare energie een kerncentrale gedurende zijn operationele levensduur aan de samenleving kan leveren, ongeacht tijd en plaats. Om die reden zijn in onze studie elektrische en fossiele brandstof-inputs gescheiden gehouden. De elektrische input wordt in onze analyse afgetrokken van de bruto (elektrische) output van de kerncentrale, ongeacht tijd en plaats (Figuur 6). In werkelijkheid zou dit overeenkomen met een *stationaire toestand*, waarin een constant aantal werkende kerncentrales de energie leveren voor het opruimen van de oude en de bouw van de nieuwe.

Elektriciteit is hier niet omgerekend in 'primary energy units', zoals in veel andere studies.

Energiekwaliteit van uranium

Het potentieel van kernenergie ten aanzien van vermindering van broeikasgassen en energievoorzieningszekerheid blijkt op termijn bepaald te worden door de energiekwaliteit van het beschikbare uraniumerts. Onder de energiekwaliteit van uraniumerts wordt hier verstaan de hoeveelheid energie die nodig is om 1 kilogram zuiver uranium uit het erts te winnen.

De belangrijkste determinant van de energiekwaliteit is het uraniumgehalte in het erts, maar ook andere factoren kunnen een aanzienlijke invloed hebben. In de volgende paragrafen komt deze kwestie nader aan de orde.

5 Emissie van CO₂ en andere broeikasgassen

Koolstofdioxide

De emissie van koolstofdioxide door het nucleaire systeem wordt voornamelijk veroorzaakt door verbranding van fossiele brandstoffen in de industriële processen van het hele systeem. Een deel van het koolstofdioxide is afkomstig van chemische processen, zoals bij de productie van cement en staal.

Voor de specifieke CO₂ emissie (in gram CO₂ per geproduceerde kilowattuur) is de levensduur van de kerncentrale van belang, omdat het nucleaire systeem een grote vaste hoeveelheid CO₂ produceert bij de bouw en de ontmanteling van de kerncentrale. De operationele emissie is niet afhankelijk van de levensduur, maar wel van het ertsgehalte van het uraniumerts dat het nucleaire systeem van grondstof voorziet.

In Tabel 2 zijn de emissies van de componenten van het nucleaire systeem (zie Figuren 3 en 5) opgesomd, voor drie verschillende bedrijfstijden van de kerncentrale. Onder de bedrijfsduur wordt hier verstaan het aantal jaren dat de centrale in bedrijf is, vermenigvuldigd met de gemiddelde lastfactor over de gehele levensduur. In Storm & Smith is een bedrijfsduur van 30 x 0,82 (30 jaar maal gemiddelde lastfactor 82%) aangehouden. Een lastfactor van 82% betekent dat de centrale gedurende zijn gehele werkingsduur gemiddeld op 82% van zijn maximale vermogen heeft gewerkt.

Slechts weinig kerncentrales ter wereld hebben een bedrijfsduur 30 x 0,82 bereikt. De ISA studie 2006 [Q325] houdt een langere bedrijfsduur aan van 35 x 0,85 en ExternE-UK 1998 [Q308] een nog langere, van 40 x 0,85. In 2004 was de gemiddelde leeftijd van definitief afgeschakelde kerncentrales ongeveer 21 jaar (Schneider & Froggatt 2004 [Q342]).

Ter vergelijking is de specifieke emissie van de bouw van de Sizewell B kerncentrale in Groot-Brittannië opgenomen, berekend uit de gegevens van ExternE-UK 1998 [Q308].

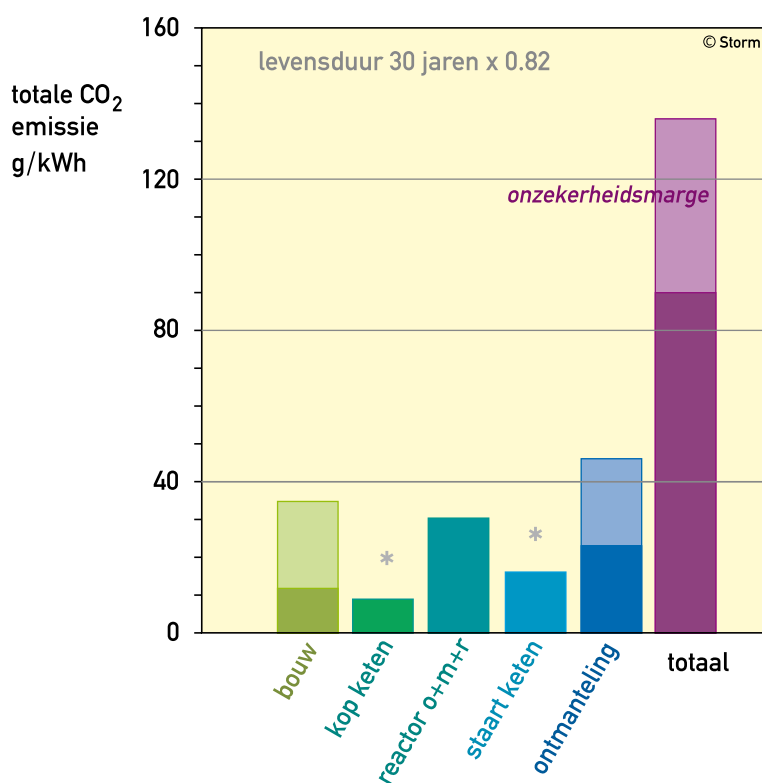
Tabel 2

Specifieke CO₂ emissie van het nucleaire systeem, zoals berekend in Storm & Smith [Q6], bij drie waarden voor de gemiddelde bedrijfsduur van de kerncentrale. De emissie van de splijtstofketen is afhankelijk van het ertsgehalte (*). Hier is een waarde van 0,15% U₃O₈ aangehouden, ongeveer het wereldgemiddelde in 2006. De getallen suggeren een hogere nauwkeurigheid dan verantwoord is op grond van de onzekerheden in de gegevens die voor de berekeningen beschikbaar zijn.

	g CO ₂ /kWh 30 x 0,82 jaar	g CO ₂ /kWh 35 x 0,85 jaar	g CO ₂ /kWh 40 x 0,85 jaar
bouw	11,5 - 34,5	9,5 - 28,5	8,3 - 24,9
ontmanteling	23 - 46	19 - 38	16,6 - 33,2
subtotaal, reactorketen	34,5 - 80,5	28,5 - 66,5	24,9 - 58,1
kop van de keten	8,9 *	8,9 *	8,9 *
bedrijf, onderhoud, vernieuwingen	30,5	30,5	30,5
staart van de keten	16,3 *	16,3 *	16,3 *
subtotaal, splijtstofketen	55,7 *	55,7 *	55,7 *
totaal nucleair systeem	90 - 136	84 - 122	81 - 114
bouw Sizewell B (ter vergelijking)	13,9	11,5	10

In Figuur 7 zijn de emissies van de hoofdonderdelen van het nucleaire systeem, uit de tweede kolom van Tabel 2, in een staafdiagram weergegeven. Hierbij is een bedrijfsduur van 30 jaar met een gemiddelde lastfactor van 82% aangehouden.

De CO₂ emissie van de splijtstofketen is afhankelijk van het gebruikte uraniumerts. Het verband tussen de emissie en het ertsgehalte komt later ter sprake.



Figuur 7

Specifieke emissies van het nucleaire systeem. De twee kolommen met een ster zijn afhankelijk van het ertsgehalte. Voor deze figuur is een ertsgehalte van 0,15% U₃O₈ aangehouden.

Andere broeikasgassen

Behalve koolstofdioxide CO₂ zijn er nog een aantal broeikasgassen. De geloosde hoeveelheden van deze gassen door menselijke activiteiten zijn weliswaar gering ten opzichte van CO₂, maar hun global warming potential (GWP), het broeikaseffect dat ze veroorzaken, is aanzienlijk groter, zie Tabel 3. Lachgas bijvoorbeeld heeft een GWP 296 maal sterker dan koolstofdioxide. Dat houdt in dat 1 kg lachgas in de atmosfeer een broeikaseffect heeft dat 296 maal zo sterk is als 1 kg koolstofdioxide.

In de openbare literatuur zijn alleen (schaarse) gegevens bekend over de emissie van CO₂ door het nucleaire systeem. In de studie van Storm & Smith is de CO₂ emissie nader onderzocht. Gegevens over de emissie van andere broeikasgassen ontbreken vrijwel geheel. Er zijn geen publicaties over bekend en hoogst waarschijnlijk zijn deze emissies ook nooit onderzocht. Het ontbreken van openbare gegevens betekent echter niet dat er in de praktijk geen emissies zijn.

In de kop van de splijtstofketen, de processen die nodig zijn om van uraniumerts splijtstof te maken, worden jaarlijks tienduizenden tonnen fluor, chloor en verbindingen van deze elementen gebruikt. Geen enkele chemische fabriek is lekvrij.

Tabel 3

De belangrijkste categorieën broeikasgassen met hun global warming potential. Er is alleen iets bekend over de emissie van CO₂ door het nucleaire systeem.

naam	formule	CO ₂ equivalent	emissie gegevens
koolstofdioxide	CO ₂	1	deze studie
methaan	CH ₄	23	?
lachgas	N ₂ O	296	?
chloorfluorkoolstofverbindingen	CFK's	150 - 12000	?
polyfluorkoolwaterstoffen	voorbeeld CF ₄	5700 - 11900	?
zwavelhexafluoride	SF ₆	22200	?

6 Bekende uraniumreserves van de wereld

De thans bekende ontginbare reserves van uraniumertsen van de wereld (world known recoverable uranium resources), zoals gegeven door het Red Book 2006 [Q90], zijn samengevat in Tabel 4.

Tabel 4

De economisch winbare uraniumreserves van de wereld (world known recoverable uranium resources) in 2006. Uraniumreserves worden ingedeeld in verschillende categoriën, naar gelang winningskosten en mate van zekerheid. Deze tabel geeft de totalen van de volgende categoriën: Reasonably Assured Resources (RAR) plus Estimated Additional Resources (EAR)-category 1, tot 80 US\$/kgU voor de jaren 2003-2005; Reasonably Assured Resources plus Inferred Resources (IR) tot 130 US\$/kgU voor het jaar 2006. Het mondiale uraniumverbruik bedroeg in 2006 ongeveer 68 Gg per jaar.

	2003		2005 *		2005 **		2006 ***	
	< 80 US\$/kg U		< 80 US\$/kg U		< 80 US\$/kg U		< 130 US\$/kg U	
	Gg U	%	Gg U	%	Gg U	%	Gg U	%
Australia	863	28	989	28	1074	30	1143	24
Kazakhstan	472	15	622	18	622	17	816	17
Canada	437	14	439	12	439	12	444	9
South Africa	298	10	298	8	298	8	341	7
Namibia	235	8	213	6	213	6	282	6
Brazil	197	6	143	4	143	4	279	6
Niger							225	5
Russian Federation	131	4	158	4	158	4	172	4
USA	104	3	102	3	102	3	342	7
Uzbekistan	103	3	94	3	93	3	116	2
Ukraine							90	2
Jordan							79	2
India							67	1
China							60	1
Other	267	9	480	14	480	13	287	6
Total world	3107	100	3537	100	3622	100	4743	100

1 Gg = 1 gigagram = 10⁹ gram = 1000 ton.

Bronnen:

* WNA-75 2003 en WNA-48 2003

** WNA-75 2005 [Q85] en WNA-48 2005 [Q210], update februari 2006.

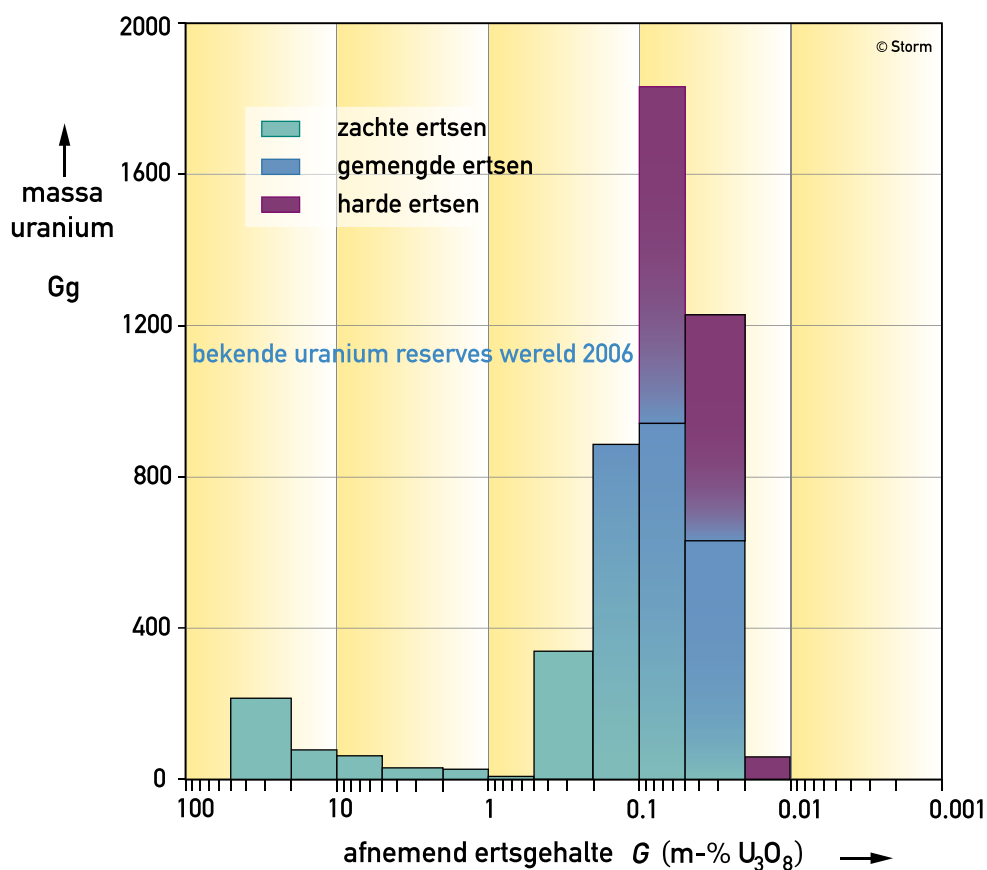
*** OECD/NEA, Red Book 2006 [Q90].

De totale hoeveelheid uranium in de wereldreserves is toegenomen van ongeveer 3,6 Tg in 2005 tot ongeveer 4,7 Tg in 2006 (1 Tg = 1 teragram = 1 miljoen ton). Deze toename is vrijwel geheel veroorzaakt doordat in de winbare hoeveelheden van 2006 de hogere prijs categorie van 80-130 US\$/kgU is opgenomen. De reserves van 2005 omvatten alleen die met winningskosten tot 80 US\$/kgU. De duurdere prijs categorie betreft ertsen met lagere gehalten of die moeilijker winbaar zijn dan die in de lagere prijsklasse. Er zijn sinds 2003 vrijwel geen nieuwe uraniumvoorkomens die niet eerder bekend waren toegevoegd aan de bekende reserves. De

wereldreserves van Tabel 4 zijn samengesteld op grond van economische criteria en niet in eerste instantie op grond van fysische criteria.

De wereldreserves van uranium, zoals gegeven in de laatste kolom van tabel 4, hebben sterk verschillende ertsgehaltenes. De verdeling van de uraniumreserves over de ertsgehaltenes is weergegeven in figuur 8. De uraniumertsen zijn ruwweg verdeeld in twee klassen: de zogenoemde ‘soft ores’ (zachte ertsen), die relatief gemakkelijk te verwerken zijn, en de ‘hard ores’ (harde ertsen), waaruit het uranium moeilijker te winnen is. Moeilijker winbaar betekent meer materiaal- en energieverbruik per kilogram uranium.

Armere ertsen zijn in het algemeen ook hardere ertsen. Figuur 8 laat zien dat de uraniumreserves groter zijn naarmate het erts armer is. Dit is een algemeen geologisch verschijnsel bij metaalertsen. Beneden een gehalte van 0,02% zijn er nagenoeg geen uraniumvoorkomens bekend die als ertsen te boek staan. De verdeling van de reserves als functie van het ertsgehalte alsmede de indeling in harde en zachte ertsen berust op gegevens uit talrijke bronnen, die genoemd worden in het onderschrift van Figuur 8. De NEA en IAEA noemen geen ertsgehaltenes in hun statistieken.



Figuur 8

De verdeling van de bekende uraniumreserves van de wereld als functie van het ertsgehalte. Op de horizontale as is het afnemend ertsgehalte in een logaritmische schaal uitgezet. Op de verticale schaal is de hoeveelheid uranium uitgezet, met een lineaire schaal. De hoeveelheid uranium in de ertsvoorkomens binnen een gegeven ertsgehalte interval wordt voorgesteld door de hoogte van staaf, niet door het oppervlak ervan. De breedte van iedere staaf geeft het ertsgehalte interval aan. Met de verschillende kleuren worden de harde en zachte ertsen onderscheiden.

Bronnen: [Q53], [Q85], [Q86], [Q87], [Q90], [Q210], [Q211], [Q212], [Q213], [Q314] and [Q324].

7 Wining van uranium uit erts

Mineralogical barrier

Uranium behoort met een gemiddeld voorkomen van 2,8 ppm (parts per million) in de aardkorst geologisch gezien tot de schaarse metalen. Een gehalte van 2,8 ppm komt overeen met 2,8 milligram uranium per kg gesteente.

Een typisch uraniumerts bestaat uit een grote massa onbruikbare silicaten, gemengd met een kleine hoeveelheid van een uraniummineraal, bijvoorbeeld pitchblende UO_2 . De extractie van uranium uit dit mengsel gebeurt door het oplossen van de korrels uraniummineraal, zonder de silicaat-mineralen aan te tasten, die het leeuwendeel van de ertsmassa vormen. Dat oplossen kan bijvoorbeeld door het tot poeder gemalen erts te mengen met verdund zwavelzuur en andere chemicaliën. Silicaten worden vrijwel niet door zwavelzuur aangetast.

Er is een uraniumgehalte in gesteenten waar beneden geen afzonderlijke uraniummineralen gevormd worden. Het uranium in een dergelijk gesteente is aanwezig in de vorm van een 'vaste oplossing'. Deze benedengrens wordt door Skinner 1979 [Q322] de *mineralogical barrier* genoemd. Alle schaarse metalen hebben hun mineralogical barrier, die bepaald wordt door hun geochemische eigenschappen. Voor koper bijvoorbeeld ligt deze barriere bij ongeveer 0,1% (1 g Cu per kg gesteente). Uranium heeft een lagere waarde, dankzij de speciale chemische eigenschappen van het element.

De mineralogical barrier heeft belangrijke consequenties voor de mijnbouw, omdat voorbij de barrière het materiaal- en energieverbruik omhoog springt met een factor 10 of meer. Om uranium uit een 'vaste oplossing' te kunnen extraheren moet de volledige massa van het gesteente in oplossing gebracht worden.

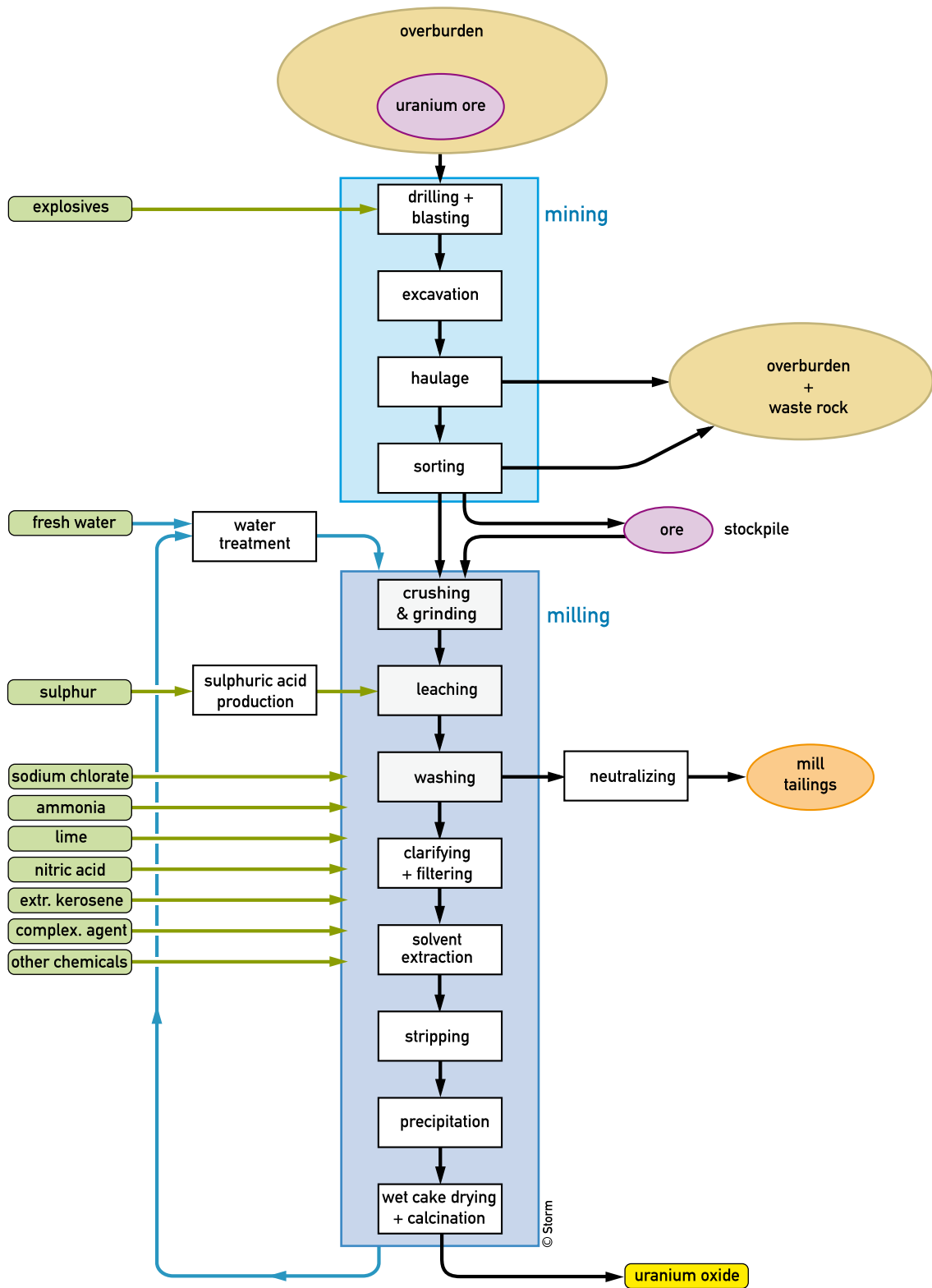
Belangrijke parameters

De winning van uranium uit een ertsvoorkomen in de aardkorst vergt een serie mechanische en chemische processen. In Figuur 9 is het processchema van de Ranger mijn in Australië weergegeven, dat model kan staan voor de meeste uraniummijnen.

Het eerste proces is de mijnbouw: met springstoffen worden de rotsen verbrokkeld en met grote graafmachines op kipautos geladen. Deze brengen de onbruikbare rotsmassa's naar een stortplaats en het erts naar ertsmolen. Het erts wordt tot poeder gemalen en gaat vervolgens naar de extractiefabriek.

Bij bovengrondse mijnbouw is de stripping ratio of overburden ratio van belang: het aantal tonnen onbruikbaar gesteente dat per ton erts verwijderd moet worden om bij het erts te komen. In een gunstig geval, zoals de Ranger mijn in Australië, is de verhouding afvalsteen/erts gelijk aan drie. Er zijn ook mijnen waarbij deze verhouding in de orde van 50 of zelfs hoger is.

Voor ondergrondse mijnen is de diepte van groot belang. Ondergrondse mijnbouw is gewoonlijk energie-intensiever dan bovengrondse, open mijnbouw. In de ondergrondse Canadese mijnen, die tot ruim 500 m diep gaan, moet het erts met op afstand bestuurd machines gedolven worden, omdat het stralingsniveau in de gangen te hoog is voor menselijke aanwezigheid. Dit verhoogt het energieverbruik aanzienlijk. Bovendien moeten in sommige ondergrondse



Flowsheet Ranger uranium mine

Figuur 9
 Stroomschema van de Ranger uraniummijn. Dit schema kan model staan voor de meeste uraniummijnen ter wereld, al zijn er per mijn kleine verschillen. Aan de hand van dit schema kan het energieverbruik van de uraniumwinning berekend worden.

mijnen de wanden van de gangen doorlopend bevroren gehouden worden om te voorkomen dat de gangen en schachten vollopen met water. Niettemin gaat dat toch wel eens mis (Cigar Lake in Canada).

Het specifieke energieverbruik van de winning van uranium uit de aardkorst wordt bepaald door een aantal factoren, zoals:

- ertsgehalte
- hardheid en chemische eigenschappen van het gesteente
- geochemische eigenschappen van uranium
- omvang van de ertsafzetting
- diepte van de afzetting
- toegankelijkheid van de mijn
(aan- en afvoerlijnen van water, energie, materieel, chemicaliën, producten, etc.)
- open mijnbouw (bovengronds) of ondergrondse mijnbouw
- verhouding van onbruikbare rots en erts (overburden ratio)
- transportafstanden: van afvalgesteente naar de stortplaats en van het erts naar de ertsmolen en extractiefabriek.

Het energieverbruik van de uraniumwinning omvat verschillende componenten:

- het directe energieverbruik: diesel voor de graafmachines en kipauto's, electriciteit voor de drilboren, de ertsmolen, extractiefabriek, waterzuivering en dergelijke,
- de indirecte energie, die nodig is geweest voor de productie van alle zaken die nodig zijn voor de mijnbouw en extractiefabriek, zoals: explosieven, chemicaliën, machines, onderhoudsmaterialen en gebouwen.

Daar deze studie is zich richt op de mondiale aspecten van kernenergie, zijn in de analyses de mondiaal-gemiddelde waarden van de laatste zes parameters gebruikt.

Ook indien voor deze zes parameters vaste waarden aangenomen worden, zijn de specifieke energiebehoeften van de uraniumwinning verre van constant. Twee variabelen blijken bepalend te zijn voor de vooruitzichten van uraniumerts als energiebron, namelijk de *verdunningsfactor* en het *extractierendement*. Beide worden hieronder nader toegelicht.

Verdunningfactor

Het *uraniumgehalte* G van uraniumerts wordt gewoonlijk aangegeven in massaprocenten uraniumoxide U_3O_8 en kan gelezen worden als het aantal kg uraniumoxide per 100 kg erts. Zo betekent een gehalte van 0,1% dat 100 kg erts 100 g uraniumoxide bevat.

Inzichtelijker voor de relatie met het specifiek energieverbruik is misschien de *verdunningsfactor* $D = 100/G$, de inverse van het ertsgehalte (hierin is G in massaprocenten gegeven). De verdunningsfactor D geeft aan hoeveel kg erts minimaal verwerkt moet worden voor de winning van 1 kg uraniumoxide.

Om bijvoorbeeld 1 kg uraniumoxide te winnen uit erts met een gehalte van 0,1% U_3O_8 , moet minimaal 1000 kg gesteente gemalen en chemisch behandeld worden, $D = 1000$. Dat is tien maal zoveel als uit erts met een gehalte van 1% ($D = 100$). Het specifieke energieverbruik zal dus ook minimaal tien maal zo groot zijn. Voor erts van 0,01% is de verdunningsfactor nog eens tien maal zo groot: $D = 10000$. De verwerking hiervan vergt minimaal 100 maal zoveel energie als bij een gehalte van 1%.

In bovenstaand voorbeeld wordt gesproken over 'minimale' hoeveelheden erts, omdat de te verwerken hoeveelheden erts ook afhangen van het extractierendement.

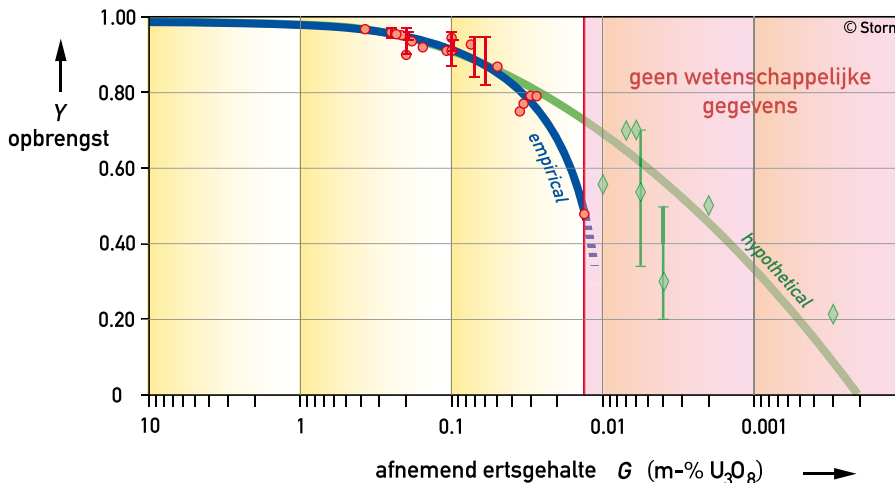
Extractierendement

De extractie van uranium verloopt via een aantal chemische extractieprocessen. In de extractiefabriek wordt het uranium eerst in oplossing gebracht. De extractie van het uranium uit de oplossing verloopt moeilijker naarmate het uraniumgehalte lager is en er meer andere elementen in de oplossing aanwezig zijn. Dat leidt er onder andere toe dat de procesverliezen groter worden, doordat de scheiding minder effectief verloopt en er een groter deel van het opgeloste uranium verdwijnt in de afvalstromen.

Het *extractierendement* ook genoemd *extractie-opbrengst* Y (Engels: extraction yield, recovery yield) is de verhouding van de hoeveelheid uranium die daadwerkelijk gewonnen is en de hoeveelheid die in de behandelde hoeveelheid erts zit. Als bijvoorbeeld een bepaalde massa gesteente 800 gram uraniumoxide bevat en na afloop van de chemische processen heeft men 760 gram uraniumoxide in handen, is de opbrengst $Y = 760/800 = 0,95$ of 95%.

Het extractierendement wordt niet alleen bepaald door technische factoren, maar ook door fysische en chemische eigenschappen van het erts, waarvan ertsgehalte, aard van het erts en de chemie van uranium het belangrijkste zijn. Met deze factoren komen basale fysische en chemische wetmatigheden in het spel, die niet omzeild kunnen worden met geavanceerde technieken of economische concepten.

Het praktische gevolg van de hierboven beschreven omstandigheden is dat het extractierendement van de conventionele uraniumwinning afneemt met afnemend ertsgehalte. De relatie tussen opbrengst en ertsgehalte is weergegeven in Figuur 10.



Figuur 10

Het extractierendement Y van de uraniumwinning als functie van het ertsgehalte. De rode stippen zijn empirische gegevens, de groene ruiten geven hypothetische waarden weer. De blauwe curve ('empirical') geeft de empirische relatie tussen opbrengst en ertsgehalte. De groene curve ('hypothetical') geeft de mathematische relatie weer tussen de empirische waarden (rode stippen) bij hoge en de hypothetische waarden (groene ruiten) bij lage ertsgehalten. In feite zijn er voor extractie van uranium uit erts armer dan 0,013% geen gegevens bekend die wetenschappelijk verifieerbaar zijn.

De rode stippen in Figuur 10 geven empirische gegevens weer van bestaande mijnen, zoals gerapporteerd in de literatuur, en de blauwe curve ('empirical') de empirische relatie tussen deze waarden.

De groene ruiten in Figuur 10 geven waarden weer uit een klein aantal studies van hypothetische uraniumwinning uit geologische voorkomens met zeer lage uraniumgehalten. Deze hypothetische waarden worden niet ondersteund door praktijkervaringen en zijn niet wetenschappelijk verifieerbaar. Bovendien lijken ze te zijn gebaseerd op onjuiste aannames ten aanzien van het voorkomen van uraniumertsen bij zeer lage gehalten. De geochemische eigenschappen van het element uranium en het bestaan van een mineralogical barrier zijn in de bronstudies buiten beschouwing gelaten. Voor de talrijke referenties waarop Figuur 10 berust: zie [Q6].

In de openbare nucleaire literatuur wordt geen gewag gemaakt van het mogelijke bestaan van een mineralogical barrier, laat staan van de consequenties ervan voor de toekomstige uraniumvoorziening. In de goudindustrie wordt daar wel rekening mee gehouden (DRDGold 2005 [Q334]).

De groene curve ('hypothetical') geeft de mathematische curve-fitting relatie weer (zie vergelijking 6) tussen de empirische waarden bij hoge ertsgehalten en de hypothetische waarden bij lage gehalten. Bij gehalten hoger dan ongeveer 0,05%, vallen de empirische curve (blauw) en de hypothetische (groen) samen. Bij lagere waarden lopen de curves steeds verder uiteen, zoals Figuur 9 laat zien.

$$Y = 0.980 - 0.0723 (\log G)^2$$

Y = yield

fraction extracted U

G = ore grade

mass-% U₃O₈

vergelijking 6

Vanuit wetenschappelijk oogpunt is het gebruik van de hypothetische curve voor berekening van het energieverbruik van de uraniumwinning uit ertsen armer dan ongeveer 0,05% moeilijk te verdedigen, om bovenstaande redenen. De berekeningen in dit artikel zijn gebaseerd op de empirische curve van de extractie-opbrengst, tot een ertsgehalte van ongeveer 0,013% U₃O₈. Voor lagere gehalten zijn geen wetenschappelijk betrouwbare gegevens beschikbaar.

In de oorspronkelijke studie van Storm&Smith 2005 [Q6] zijn de berekeningen over het gehele ertsgehalte spectrum gebaseerd op vergelijking 6, de hypothetische (groene) curve. Beneden een gehalte van 0,013% U₃O₈ hebben de uitkomsten echter weinig wetenschappelijke betekenis.

Overigens blijken de resultaten van deze studie ten aanzien van voorzieningszekerheid en CO₂ emissie, nauwelijks beïnvloed te worden door de keuze voor de empirische dan wel de hypothetische curve.

Specifiek energieverbruik van de uraniumwinning

In de studie Storm & Smith 2005 [Q6] is de verhouding ondergrondse/bovengrondse mijnbouw gesteld op 2/3, terwijl de huidige verhouding bijna 1/1 is. Hierbij is *in situ leaching* (ISL) gerekend als bovengrondse mijnbouw, zie paragraaf over ISL hierna. Op grond van de beschikbare gegevens is vergelijking 7 voor het specifieke energieverbruik voor de uraniumwinning afgeleid.

Vergelijking 7 voorziet niet in de discontinuïteit die door mineralogical barrier wordt veroorzaakt. De resultaten van deze studie lijken te suggereren dat de mineralogical barrier van uranium tussen de gehalten 0.02 en 0.01% U₃O₈ zou kunnen liggen.

$$J_{m+m}(U) = \frac{c}{Y \cdot G}$$

$J_{m+m}(U)$ = specific energy expenditure per mass unit uranium GJ/kg

c = specific energy constant = 0.275 GJ/kg(U) soft ores
 = 0.654 GJ/kg(U) hard ores

Y = yield = fraction extracted U

G = ore grade mass-% U_3O_8

vergelijking 7

Toetsing

De mathematische betrekking voor het energieverbruik van de wereld-gemiddelde uraniummijn, zoals toegepast in de studie van Storm & Smith [Q6], is getoetst aan een bestaande mijn: de Ranger mijn in Australië. De resultaten zijn samengevat in tabel 5. Het blijkt dat de uitkomsten van vergelijkingen 6 en 7 voor een referentiemijn met dezelfde condities als Ranger lager uitkomen dan de waarden berekend op grond van de actuele gegevens van de Ranger mijn.

Tabel 5

Specifiek energieverbruik en CO_2 -emissie van de uraniumwinning uit de Ranger mijn in Australië en de referentiemijn, berekend op grond van vergelijkingen 6 en 7. De gegevens van Ranger zijn afkomstig van het mijnbouwbedrijf Energy Resources of Australia, ERA 2006 [Q320] en ERA-AR 2005 [Q321].

	ertsgehalte massa-% U_3O_8	specifiek energieverbruik TJ/Mg uranium	specifieke CO_2 emissie g CO_2 /kWh
Ranger 2006	0,288	1,08	1,78
referentiemijn in [Q6]	0,288	0,97	1,46

In situ leaching

In situ leaching (ISL) is een methode om uranium in de bodem uit te logen. Via boorputten wordt een oplossing van chemicaliën gepompt in de poreuze uraniumhoudend afzetting onder de grond, gewoonlijk een zandsteen. Via andere putten wordt de vloeistof weer opgepompt. Uit deze vloeistof wordt dan het uranium geëxtraheerd, zoals in andere uraniummijnen.

Voor ISL zijn een groot aantal boorgaten nodig, die regelmatig vernieuwd moeten worden, omdat ze snel dichtslibben. Het proces verbruikt zeer grote hoeveelheden electriciteit (voor pompen) en zwavelzuur en andere chemicaliën. Alles in rekening brengend blijkt het specifieke energieverbruik van de ISL methode, per kg gewonnen uranium, ongeveer even hoog te zijn aan dat van conventionele mijnbouw van zachte ertsen, of zelfs hoger (zie bijvoorbeeld Mudd 2000 [Q291] en Mortimer 1977 [Q98]). Zo is het directe energieverbruik van de Beverley ISL mijn in Australië even hoog als van de conventionele bovengrondse Ranger mijn (Mudd & Diesendorf 2007 [Q338]).

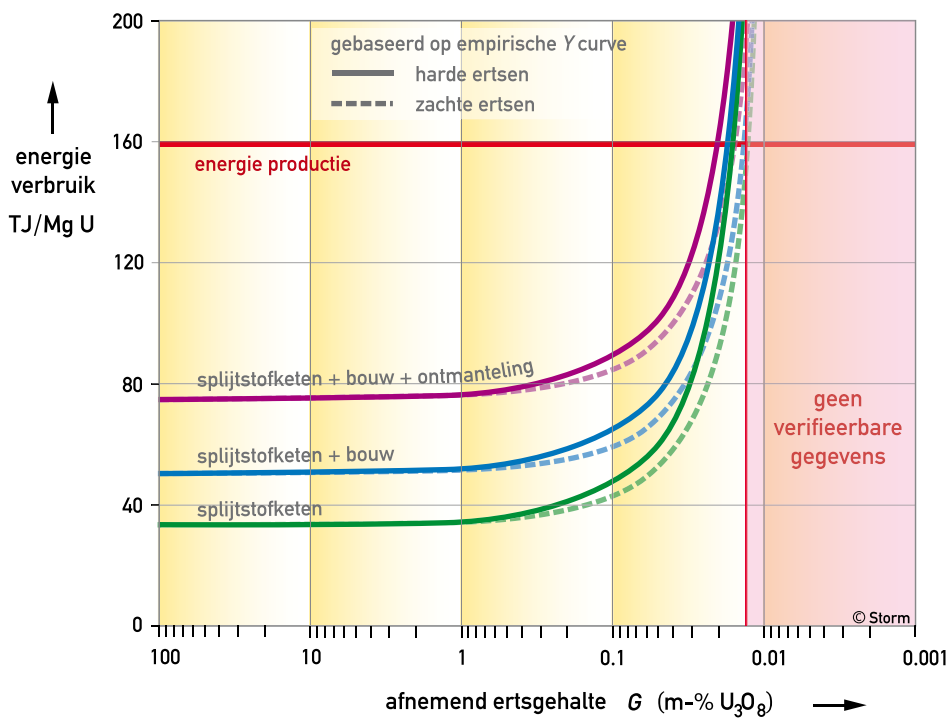
De ISL methode kan misschien goedkoper lijken dan andere mijnbouwmethodes, het energieverbruik is niet lager. Bovendien kan de mineralogische barrière door geen enkele techniek omzeild worden.

Een ernstig bezwaar van ISL is de grootschalige en onomkeerbare vervuiling van watervoerende lagen in de bodem over uitgestrekte oppervlakken. Het grondwater wordt niet alleen vervuild door de ingepompte chemicaliën, maar ook door tal van radioactieve en niet-radioactieve

toxische elementen, zoals uranium, radium, zware metalen en arseen. Deze elementen worden met de uraniumverbinding chemisch in oplossing gebracht vanuit de onoplosbare verbindingen in het moedergesteente. Er wordt immers slechts een deel van de ingepompte chemicaliën weer opgepompt.

Specifiek energieverbruik van het nucleaire systeem

De totale energie-input van het nucleaire systeem, berekend over zijn gehele levensloop is uitgezet tegen het ertsgehalte in Figuur 11. De curves zijn gebaseerd op de empirische extractiecurve. De energie-input is berekend per Mg natuurlijk uranium.



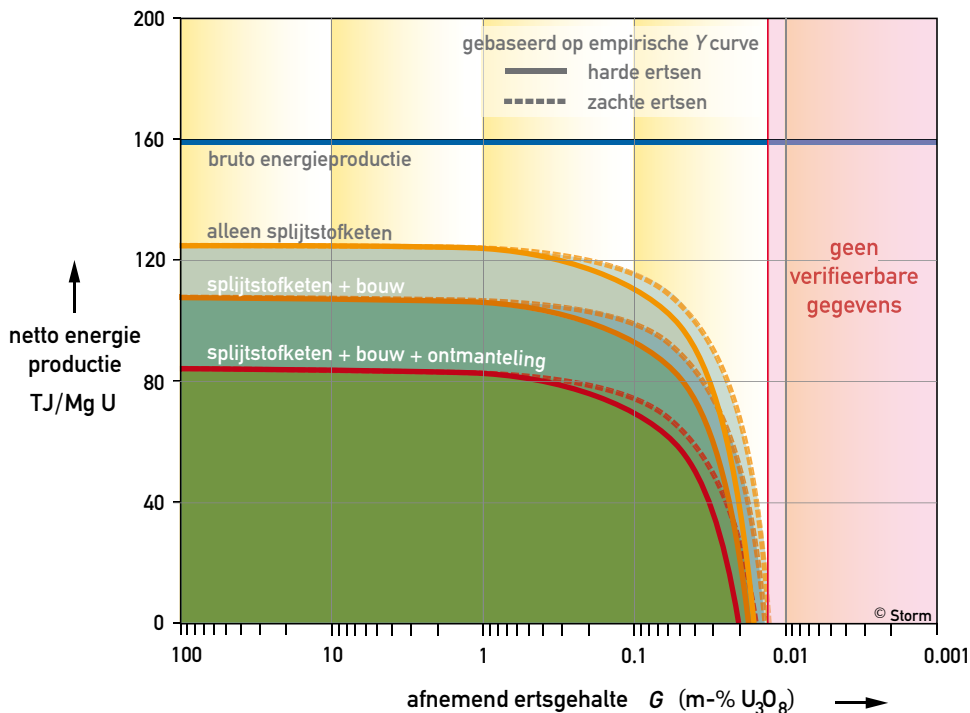
Figuur 11

De energie-input van het nucleaire systeem als functie van het ertsgehalte. De onderste curve betreft alleen de splitsstofketen. Bij de middelste curve is ook de bouw van de kerncentrale in rekening gebracht. De bovenste curve geldt voor het complete nucleaire systeem, inclusief ontmanteling, 1 TJ = 1 terajoule = 10^{12} joule. 1 Mg = 1 megagram = 1 ton.

8 Energie uit uranium: de energieklijf

Netto energie en ertsgehalte

Natuurlijk uranium is het element zoals het in de natuur wordt gevonden. De energie die nodig is om het uranium uit de aardkorst te winnen neemt toe naarmate het ertsgehalte lager is, zoals hiervoor is uitgelegd. De energie die uit 1 kg natuurlijk uranium kan worden opgewekt heeft, bij toepassing in de standaard LWR van deze studie, een vaste waarde. De netto energieproductie van het nucleaire energiesysteem neemt dus af naarmate armer erts gebruikt wordt. Onder netto energieproductie wordt hier verstaan dat deel van de geproduceerde energie dat vrij ter beschikking komt van de samenleving en niet nodig is geweest om het nucleaire systeem zelf in stand te houden.



Figuur 12

De energieklijf. Op de horizontale as staat het ertsgehalte uitgezet in afnemende volgorde, in een logaritmische schaal. Op de verticale as is de netto energie-opbrengst van het nucleaire systeem uitgezet, op een lineaire schaal. De drie gevallen van de netto energie zijn gedefinieerd in de tekst. Er wordt tevens onderscheid gemaakt tussen harde en zachte ertsen.

De vraag is: hoe significant is het effect van het ertsgehalte op de netto energieproductie van een kerncentrale? Om hier zicht op te krijgen, is in deze studie de netto energie-inhoud van natuurlijk uranium berekend (zie vergelijking 8), gemiddeld over de gehele levensduur van de kerncentrale en als functie van het uraniumgehalte van het erts dat het nucleaire systeem voedt.

$$\text{net energy content of natural uranium} = \frac{\text{net energy output}}{\text{uranium consumption}} = E_U = \frac{E_{\text{net}}}{m(U_{\text{nat}})} \text{ TJ/Mg}$$

vergelijking 8

Hierbij worden drie gevallen onderscheiden, waarin in de energie-input in rekening wordt gebracht van:

- alleen de splijtstofketen
- splijtstofketen plus de bouw van de kerncentrale
- splijtstofketen plus de bouw en ontmanteling van de kerncentrale.

De reden hiervoor is dat de geschatte waarden van de energie-input van bouw en ontmanteling een grote onzekerheidsmarge hebben, zodat het zinvol kan zijn de invloed van deze onzekerheden op het effect van het ertsgehalte zichtbaar te maken.

Bij het energieverbruik van de splijtstofketen zijn inbegrepen de inspanningen die nodig zijn om het gebied van de uraniumwinning na afloop zoveel mogelijk terug te brengen in de oude staat. Al het radioactieve mijnafval dient daarbij deugdelijk geïsoleerd te worden van de biosfeer. Deze fase van de nucleaire procesketen ontbreekt in andere energie-analyses. Het probleem van het mijnafval (mill tailings) lijkt ernstig onderschat te worden. Zie bijvoorbeeld: NRC 1996 [Q16], Lipschutz 1980 [Q54], Andriessse 1994 [Q77] en Blanchard et al. 1982 [Q252].

De resultaten van de berekeningen van de netto energieproductie per ton uranium als functie van het ertsgehalte zijn grafisch weergegeven in Figuur 12. Deze grafiek wordt de ‘energieklif’ genoemd, omdat bij lage ertsgehalten de netto energie van het nucleaire energiesysteem steil naar nul daalt: het nucleaire energiesysteem valt dan van de energieklijf.

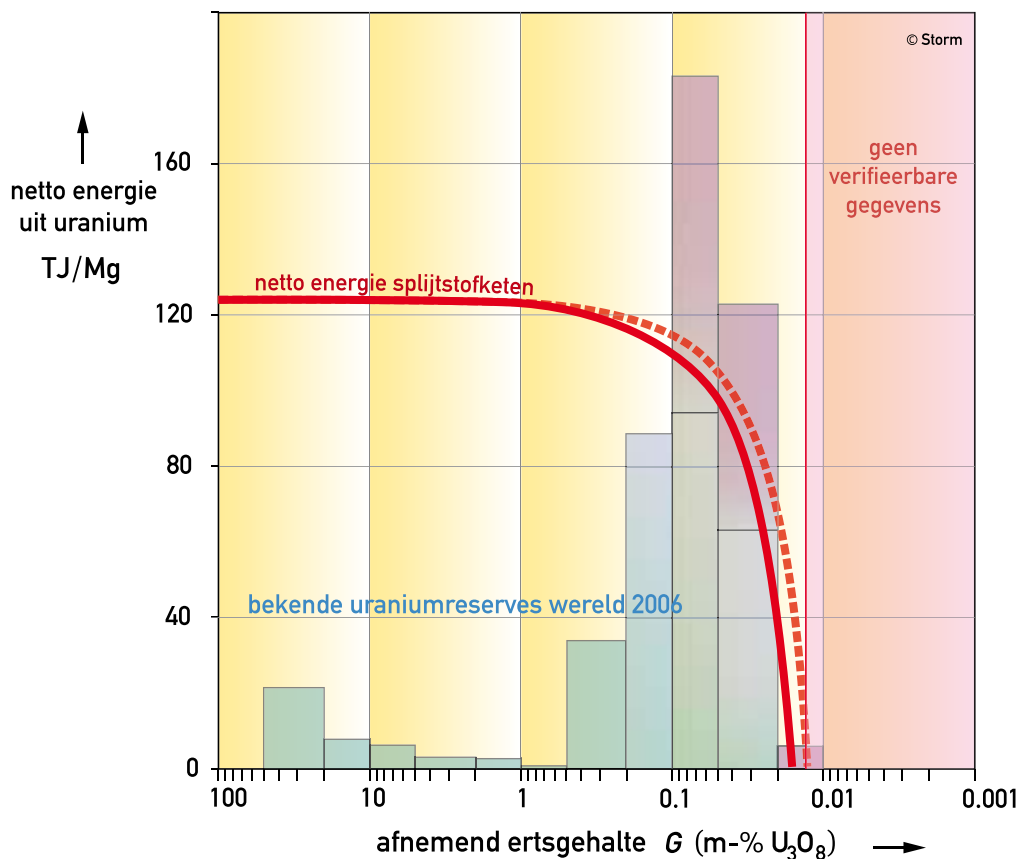
Ertsen met gehalten van 0,02% U_3O_8 (0,2 gram uraniumoxide per kg gesteente) of minder blijken geen netto energiebronnen te zijn. Een nucleair systeem dat op zulke arme ertsen gebaseerd is, verbruikt evenveel energie voor de instandhouding van dat systeem als er door de kerncentrale aan het net geleverd wordt. Deze limiet hangt nauwelijks af van de vaste energie-input van het nucleaire systeem (bouw en ontmanteling), zoals blijkt uit Figuur 12. In feite hangt de energieklijf ook niet af van de stand van techniek, omdat hij stoelt op fysische en chemische principes.

De energieklijf biedt de mogelijkheid om het energiepotentieel in te schatten dat door de mens gewonnen kan worden uit de werelduraniumreserves.

De energieklijf en uraniumreserves

De potentiële omvang en de effectieve levensduur van het mondiale nucleaire park worden in de toekomst begrensd door de beschikbaarheid van uraniumreserves waaruit netto energie te winnen is.

In Figuur 13 is de grafiek van de energieklijf geprojecteerd op het diagram van de uraniumreserves (Figuur 8). Het blijkt dat grootste bekende uraniumreserves het dichtst bij de rand van de energieklijf liggen. Dat houdt in dat de grootste reserves het laagst in energetische kwaliteit zijn. Het mondiale kernenergiepotentieel wordt niet zozeer bepaald door de *kwantiteit* van de uraniumreserves, maar door de *kwaliteit* ervan.



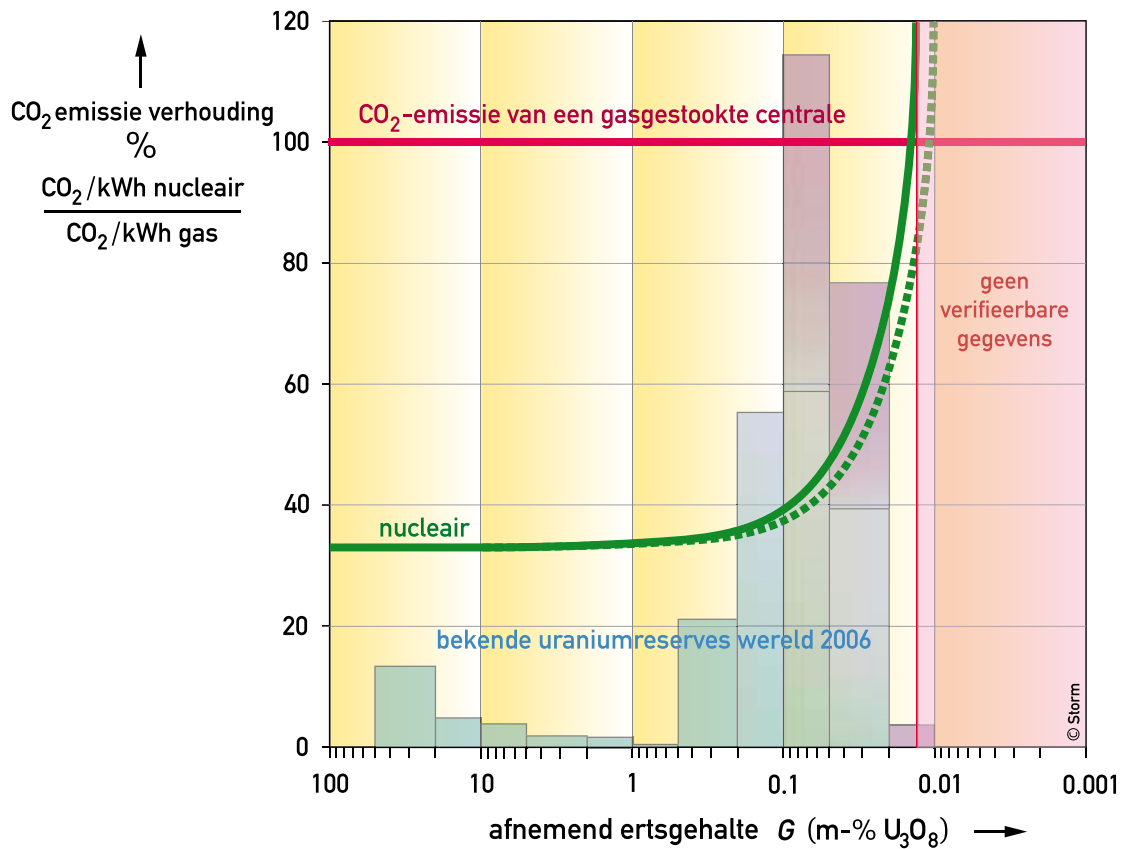
Figuur 13

De energieklijf en de uraniumreserves. Het staafdiagram geeft de verdeling van de wereldreserves van uranium weer als functie van het ertsgehalte. De rode curve geeft de energieklijf weer: de netto energieproductie per kg uranium als functie van het ertsgehalte. Het is de bovenste curve van Figuur 12, waarbij geen rekening is gehouden met de energie nodig voor de bouw en ontmanteling van de kerncentrale.

Specifieke CO₂ emissie en uraniumreserves

De toename van het specifieke energieverbruik van de uraniumwinning met afnemend ertsgehalte heeft ook gevolgen voor de specifieke CO₂ emissie per kg uranium die de mijn verlaat. Dientengevolge neemt ook de specifieke CO₂ emissie van het nucleaire systeem toe met afnemend ertsgehalte, gemeten in gram CO₂ per geleverde kilowattuur en gemiddeld over de gehele levensduur van de kerncentrale.

In Figuur 14 is de specifieke CO₂ emissie van kernstroom uitgezet als functie van afnemend ertsgehalte. Hierbij is het volledige nucleaire systeem in rekening gebracht, zie ook Tabel 2. Om de verhouding van de nucleaire CO₂ emissie met die van een moderne gasgestookte centrale (400 gCO₂/kWh) aan te geven is de nucleaire emissie als percentage van de gasgestookte centrale weergegeven.



Figuur 14

De CO₂ emissie van het nucleaire systeem, berekend als percentage van een gasgestookt energiesysteem, als functie van het ertsgehalte. De emissie van de gasgestookte centrale is hier op 400 gCO₂/kWh gesteld.

De consequenties van de afnemende energiekwaliteit van uraniumertsen met afnemend uraniumgehalte worden hierna toegelicht aan de hand van enkele eenvoudige scenario's betreffende de ontwikkeling van het mondiale kernenergievermogen.

9 Scenario's

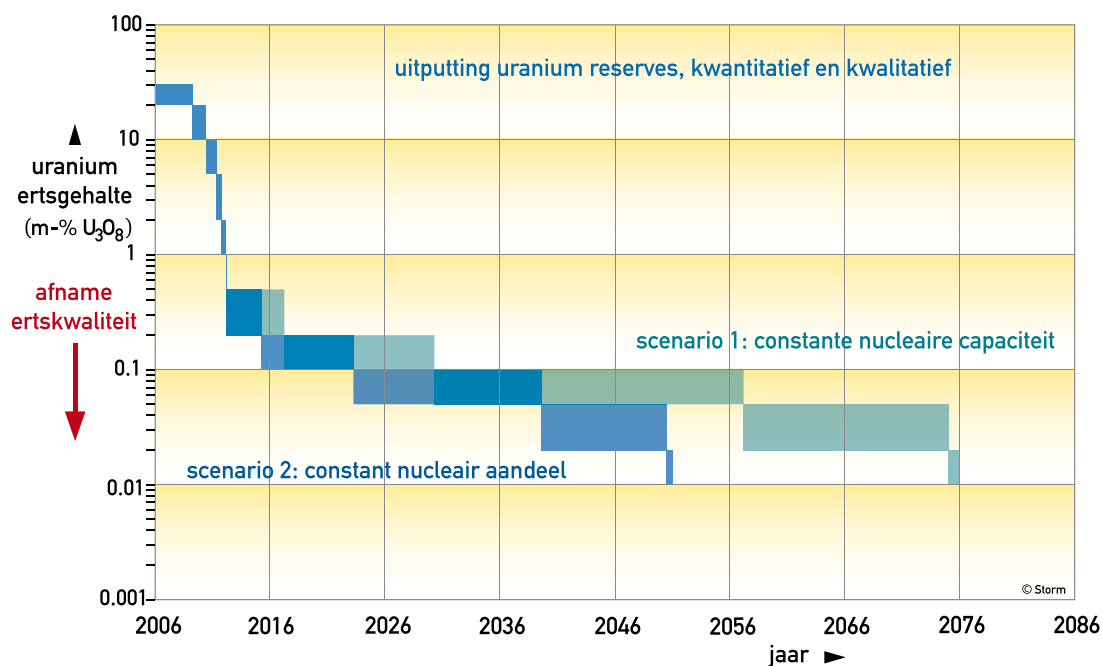
De consequenties voor de toekomst van de energieklimaat voor het toekomstig potentieel van kernenergie kan duidelijk worden gemaakt aan de hand van twee eenvoudige scenario's.

- *Scenario 1: constant nucleair vermogen*
Het mondiale nucleaire vermogen blijft constant, op het huidige peil van 370 GW(e). Het aandeel van kernenergie in de wereldenergievoorziening zal dan afnemen tot minder dan 1% in 2050, aangenomen dat het wereldenergieverbruik blijft stijgen met 2-3% per jaar.
- *Scenario 2: constant nucleair aandeel*
Het nucleaire aandeel in de wereldenergievoorziening blijft constant op het huidige peil van ongeveer 2,2%. In dit scenario stijgt het mondiale nucleair vermogen met 2-3% per jaar – 7,5 - 10 GW(e) per jaar – om gelijke tred te houden met de stijging van de mondiale energievraag. Scenario 2 komt overeen met het scenario 'High' van de IAEA in 2005. Aangenomen wordt dat scenario 2 start in 2012, wegens de vereiste aanloopperiode voor nieuw en extra nucleair vermogen.

In de nucleaire industrie circuleren verscheidene scenario's waarvan het MIT scenario [Q280], met 1500 GW(e) nucleair vermogen in 2050, wellicht het meest ambitieuze is.

Uitputting van de uraniumreserves

In beide scenario's is aangenomen dat de uraniumreserves met de hoogste ertsgehaltenes het eerst worden geëxploiteerd, omdat die de grootste winsten voor de mijnbouwmaatschappij genereren. Dit houdt in dat het gemiddelde ertsgehalte van de mondiale uraniumreserves afneemt met de tijd, zolang er geen nieuwe rijke ertsen gevonden worden.



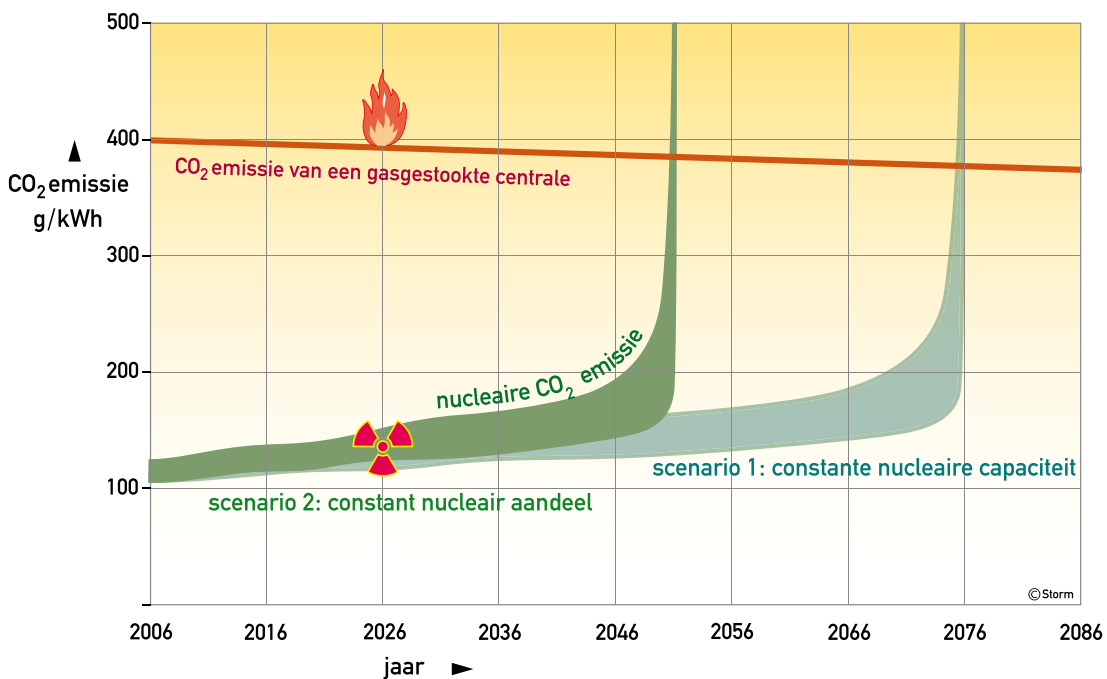
Figuur 15

Afname in de tijd van het ertsgehalte van de thans bekende uraniumreserves in twee scenario's. Op de verticale as staat het ertsgehalte in een logaritmische schaal.

In de praktijk zullen verschillende ertsen tegelijkertijd geëxploiteerd worden. Figuur 15 moet dan ook gezien worden als een modelmatige benadering. De tendens zal echter dalend zijn. Het diagram laat zien dat binnen 45-70 jaar het hoogst beschikbare ertsgehalte met een factor 1000 kan dalen, als er geen nieuwe grote rijke ertsafzettingen gevonden worden. Ook blijkt dat binnen de komende twee decennia, als de rijkste erts (in Canada) uitgeput raken, het gemiddelde ertsgehalte beneden een gehalte van 0,1% U_3O_8 (1 kg U_3O_8 per ton erts) duikt.

Nucleaire CO₂ emissie

Het te verwachten verloop van de specifieke CO₂ emissie van kernstroom met de tijd is globaal weergegeven in Figuur 16. Door de afname van het ertsgehalte neemt de emissie geleidelijk toe, om bij zeer arme erts steil te stijgen. Binnen ongeveer 45-70 jaar zal de nucleaire CO₂ emissie die van een gasgestookt systeem voorbijschieten. Gezien de steilte van de grafieken lijkt de nucleaire CO₂ emissie die van alle fossiel-gestookte systemen te passeren. In feite zijn de grafieken naar het eind toe, in het bijna verticale deel, slecht gedefinieerd. Duidelijk is in ieder geval dat de nucleaire emissie sterk zal stijgen.



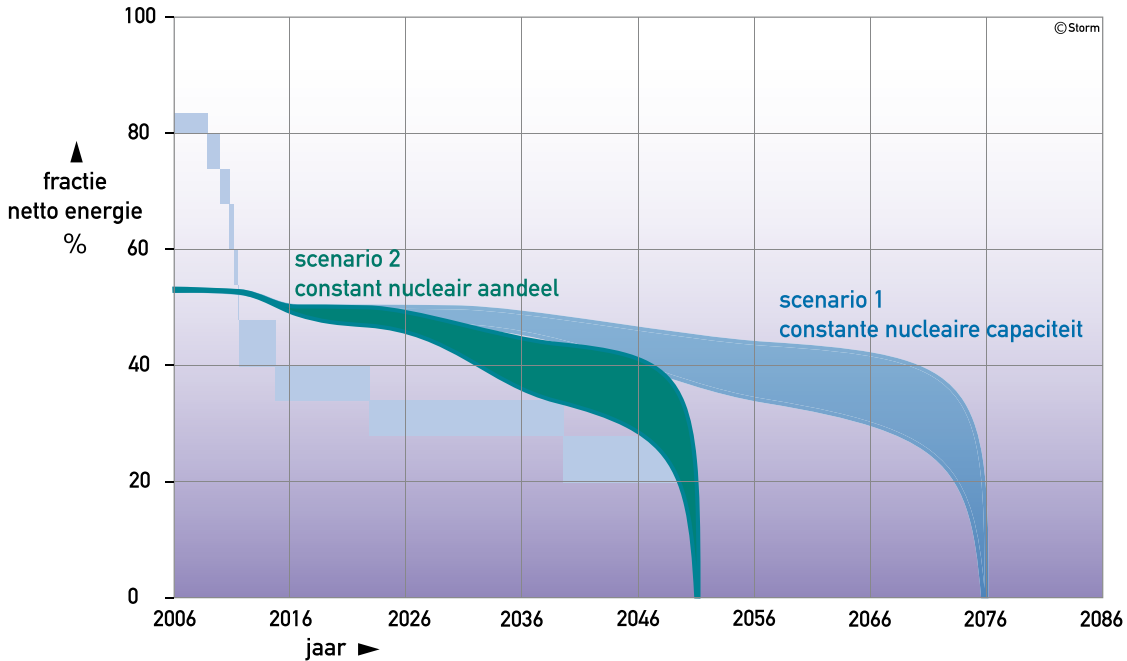
Figuur 16

De specifieke nucleaire CO₂ emissie als functie van de tijd in scenario's 1 en 2. De groene banden geven de onzekerheidsmarges aan. De specifieke emissie van een gasgestookt systeem (rode lijn) zal waarschijnlijk iets afnemen met de tijd, door toename van het omzettingsrendement. In de loop van de tijd neemt de onzekerheidsmarge toe.

Energieklif in de tijd

Wegens dezelfde redenen als hierboven zijn uiteengezet, zal de hoeveelheid netto energie per kg uranium, zoals geboekt in de wereldreserves, afnemen met de tijd. Zonder nieuwe rijke

vondsten zal het nucleaire systeem van de energieklimaat vallen over ongeveer 70 jaar in scenario 1 en over ongeveer 45 jaar in scenario 2 (Figuur 17). In ambitieuzere scenario's, zoals het MIT scenario, zal de energieklimaat nog veel eerder dan in scenario 2 bereikt worden. Belangrijk is dat in scenario 2, dat in de nucleaire industrie als goed haalbaar gezien wordt, de energieklimaat bereikt zal worden binnen de levensduur van kerncentrales waarvan de bouw op dit moment zou beginnen.



Figuur 17 De energieklimaat in de tijd. Op de verticale as staat de fractie netto energie geleverd door het nucleaire systeem, als functie van het ertsgehalte.

In Figuur 17 is fractie netto energie uitgezet tegen de tijd. De fractie netto energie is dat deel van de door de kerncentrale geleverde energie, dat niet nodig is geweest om het nucleaire systeem zelf in stand te houden, zie vergelijking 9.

$$\text{fraction of net energy} = \frac{\text{net energy output}}{\text{gross energy output}} = F_{\text{net}} = \frac{E_{\text{net}}}{E_{\text{grid}}} = \frac{E_{\text{grid}} - E_{\text{fix}} - E_{\text{fuel}}}{E_{\text{grid}}}$$

vergelijking 9

Behalve dat de netto fractie daalt in de tijd, door afnemend ertsgehalte, neemt ook de onzekerheid in de waarden toe. Evenals bij de grafieken van Figuur 16 zijn de grafieken van Figuur 17 in het deel dat bijna verticaal daalt slecht gedefinieerd. Het jaar waarin de nulwaarde bereikt zou worden, moet dan ook gezien worden als niet meer dan een indicatie.

10 Vooruitzichten

Beide scenario's van dit artikel zijn gebaseerd op de thans bekende uraniumreserves (in het jargon: world known recoverable resources). In de officiële statistieken worden hiertoe voor het jaar 2006 gerekend: de Reasonably Assured Resources plus Inferred Resources (IR) tot 130 US\$/kgU (OECD/NEA, Red Book 2006 [Q90]).

Er worden nog enkele andere categorieën van genoemd, maar daarover bestaat geen enkele zekerheid. Het is onduidelijk voor niet-ingewijden hoe de schattingen tot stand zijn gekomen. De NEA en IAEA noemen geen ertsgehaltenes in hun statistieken. Het is niet mogelijk om op grond van de informatie in OECD/NEA, Red Book 2006 [Q90] zelfs maar ruwe een inschatting te maken van de energiekwaliteit van de daarin genoemde uraniumreserves.

Hoe zijn de vooruitzichten voor de toekomst?

Economische benadering

De nucleaire industrie benadert deze vraag vanuit een economisch standpunt. Als de uraniumprijs stijgt zal dat nieuwe exploratie stimuleren. Nieuwe exploratie zal leiden tot ontdekking van nieuwe uraniumhoudende geologische afzettingen. Hoe meer er gezocht wordt en hoe hoger de uraniumprijs, des te grotere reserves gevonden zullen worden. Omdat de uraniumprijs slechts een kleine fractie uitmaakt van de prijs van kernstroom, kan de uraniumprijs nog sterk stijgen voordat die stijging merkbaar invloed gaat hebben op de nucleaire elektriciteitsprijs.

Op grond van deze redenering voorziet de nucleaire industrie geen problemen met de toekomstige uraniumvoorziening, ook niet in zeer ambitieuze groeiscenario's.

Echter, in dit artikel is aangetoond dat het hierbij niet zozeer gaat om de kwantiteit van de nog te ontdekken uraniumreserves, maar om de kwaliteit ervan vanuit het oogpunt van netto energieproductie van het nucleaire systeem.

Fysische benadering

Op dit moment is niets met zekerheid te zeggen omtrent de kans op nieuwe vondsten van uraniumvoorkomens wat betreft hun omvang en kwaliteit. We kunnen alleen gissen op grond van algemene geologische en statistische inzichten, uitgaande van wat wel bekend is.

Aanknopingspunten zijn:

- De omvang van de thans bekende uraniumreserves en hun verdeling over de ertsgehaltenes (zie Figuur 8).
- Er zijn tot op heden geen aanwijzingen gepubliceerd die zouden kunnen duiden op belangrijke nieuwe vondsten van uraniumvoorkomens.
- Er zijn zeer rijke (tot 20% U_3O_8) en grote uraniumvoorkomens in productie in Canada. 's Werelds grootst bekende uraniumvoorkomen, Olympic Dam in Australië, is zeer veel groter dan de volgende op de ranglijst en bevat alleen al een derde deel van de bekende wereldreserves. Het ertsgehalte van Olympic Dam is laag (0,06-0,03% U_3O_8).
- Uranium is, met een gemiddelde abundantie van 2,8 ppm in de continentale aardkorst, geologisch gezien een schaars metaal.
- De gemakkelijkst te ontdekken uraniumafzettingen zijn al ontdekt en daarvan zijn de gemakkelijkst te ontginnen voorkomens, op enkele uitzonderingen na, ook al in productie.

De schaarse elementen in de aardkorst, waaronder uranium, kunnen alleen aparte mineralen, en daarmee ertsen, vormen door uitzonderlijke en dus zeldzame geologische processen. Voor de vorming van een uraniumhoudende afzetting met bijvoorbeeld 0,28% uranium (2,8 g U per kg gesteente) zoals in de Ranger mijn, moet plaatselijk door natuurlijke processen een verrijking optreden met een factor 1000, gerekend vanuit de gemiddelde abundantie in de aardkorst, met 2,8 mg U per kg gesteente.

Hoe rijker een uraniumhoudend voorkomen is, hoe meer van die zeldzame geologische processen hebben moeten samengaan om de hoge verrijkingsgraad te bewerkstelligen en des te kleiner is de kans dat zo iets gebeurt. Dezelfde redenering geldt ook voor de omvang van een ertsafzetting.

Dat houdt in dat uraniumvoorkomens zeldzamer zijn naarmate hun uraniumgehalte hoger is, en/of hun omvang groter is. De ertsvorming van uranium heeft een stochastisch karakter, zoals van alle schaarse metalen.

Figuur 8 ondersteunt deze zienswijze en toont aan dat de hoeveelheden uranium groter zijn, naarmate de ertsen een lager gehalte hebben. Een dergelijke verdeling is te verwachten op puur statistische gronden.

De uraniumertsen in Canada en Olympic Dam hebben uitzonderlijke proporties binnen het spectrum van de bekende uraniumvoorkomens. Ze waren daardoor ook relatief gemakkelijk te ontdekken. Statistisch gezien lijkt de kans niet groot dat er meer uraniumvoorkomens met vergelijkbare kenmerken en toegankelijkheid bestaan.

Welke gebieden ter wereld zijn zo slecht onderzocht dat dergelijke voorkomens over het hoofd gezien kunnen zijn? Antartica misschien?

Hiemee komt, naast ertsgehalte en omvang van het ertslichaam, een derde parameter in beeld die van invloed is voor de energiekwaliteit van uraniumerts: de toegankelijkheid. Een groot uraniumvoorkomen met een hoog ertsgehalte onder de ijskap van Antartica bijvoorbeeld is moeilijk toegankelijk. Ontginning ervan zal zeer veel materialen en energie vergen, hetgeen de energiekwaliteit van het ertsvoorkomen ongunstig beïnvloedt. Ook de diepte van een ertslichaam onder het aardoppervlak kan een belemmerende factor zijn.

Verwachting

Op grond van geologisch/statistische overwegingen lijkt de kans op de vondst van nog een onontdekte uraniumafzetting groter naarmate het ertsgehalte lager, de diepte in de aardkorst groter en de omvang van de afzetting kleiner is. Dat zou inhouden dat de kans op nieuwe uraniumvondsten groter wordt, naarmate die vondsten van lagere energiekwaliteit zijn en daardoor dicht bij de rand van de energieklijf liggen. Hoe groot de kansen zijn is echter onbekend.

Zelfs al zouden nieuwe uraniumreserves van dezelfde omvang en kwaliteit als de Canadese gevonden worden, dan nog zouden die de wereld voor slechts 6-7 jaar van hoge-kwaliteit uranium kunnen voorzien bij het huidige uraniumverbruik.

11 Conclusies

Voorzieningszekerheid

De bewering dat kernenergie een onmisbare en significante bijdrage kan leveren aan de wereldenergievoorziening in de toekomst is wetenschappelijk gezien aanvechtbaar.

- Het potentieel van kernenergie in de toekomst wordt niet bepaald door de *kwantiteit* van uranium in de aardkorst, maar door de *kwaliteit* van de hulpbron waaruit het uranium gewonnen wordt.
- Zelfs in een bescheiden scenario, waarbij het nucleaire aandeel in de wereldenergievoorziening gelijk blijft op het huidige peil van 2,2% tot 2050, zullen de thans bekende uraniumreserves waaruit netto energie mogelijk is, uitgeput raken *binnen de levensduur* van nieuw te bouwen kerncentrales.
- Het is denkbaar dat de potentiële hoeveelheid netto kernenergie die beschikbaar is in uraniumertsen, in de toekomst niet significant zal toenemen, ondanks eventuele *nieuwe uraniumvondsten en voortschrijdende techniek*.

Broeikasgassen

De bewering dat kernenergie een onmisbare en significante bijdrage kan leveren aan de vermindering van de lozing van broeikasgassen in de toekomst is wetenschappelijk gezien aanvechtbaar.

- Gegevens ten aanzien van de emissie van broeikasgassen anders dan CO₂ door kernenergie zijn nooit gepubliceerd en mogelijk ook nooit onderzocht.

De afwezigheid van gegevens betekent geenszins de afwezigheid van emissies.

- De huidige bijdrage aan de vermindering van de CO₂ uitstoot is wereldwijd *ongeveer 2,2%*, als wordt aangenomen dat kernenergie vrij is van CO₂ (hetgeen niet zo is).
- De gemiddelde CO₂ *intensiteit* van het huidige mondiale nucleaire park is ongeveer 20-30% van die van een gasgestookte elektriciteitscentrale.
- De gemiddelde CO₂ *intensiteit van kernenergie* zal in de toekomst hoogst waarschijnlijk sterk toenemen, wegens uitputting van uraniumertsen met hoge energiekwaliteit. De nucleaire CO₂ intensiteit zou hoger kunnen worden dan die van fossiel opgewekte elektriciteit, binnen de levensduur van nieuw te bouwen kerncentrales.

Review

De studie Storm & Smith 2005 [Q6] is uitgebreid besproken door ISA van The University of Sydney in een rapport aan de Australische regering, ISA 2006 [Q325]. De ISA groep kwam tot iets verschillende uitkomsten dan Storm & Smith. De voornaamste redenen daarvoor zijn:

- andere methodologische benadering om de energie voor de bouw en ontmanteling te berekenen,
- weglaten van een energie-intensief proces uit de procesketen, namelijk het herstel van het gebied waar het uranium gewonnen wordt.

De ISA groep kwam tot vrijwel dezelfde energie-terugverdientijd

Het (Engelstalige) artikel waarop dit artikel is gebaseerd is kritisch beoordeeld door ter zake deskundige academici van:

- Imperial College, London
- The University of New South Wales (Australië)
- CERN, Genève.

Referenties

- Q2
Storm van Leeuwen JW,
'Nuclear Uncertainties. Energy Loans for fission power',
Energy Policy, pp. 253-266, June 1985.
- Q6
Storm & Smith 2005
Storm van Leeuwen J W & Smith Ph B,
Nuclear power - the energy balance
Chaan, Netherlands, August 2005
www.stormsmith.nl
- Q16
NRC 1996
Rasmussen N C (chair) et al.,
Nuclear Wastes. Technologies for separations and transmutation,
National Research Council, NRC
Washington DC: National Academy Press, 1996.
- Q27
Kuczera 1996
Kuczera B,
'CO₂-Reduktion bei der Elektrizitätserzeugung',
ATW 41.Jg.(1996) Heft 2, Februar, pp.110-113.
- Q53
NAC 1982
Data world uranium mines outside China and Sovietunion,
Nuclear Assurance Corporation, Zürich, 1982
personal communication via PJ vander Hulst,
KEMA, Arnhem.
- Q54
Lipschutz 1980
Lipschutz RD,
Radioactive waste: politics, technology and risk,
A report of the Union of Concerned Scientists,
Ballinge Publishing Company, Cambridge, Mass,
1980
ISBN 0 8 8410 621 7.
- Q58
UNIPEDE/CEC 1981
UNIPEDE/CEC Breeder Reactor Study Group,
Role of breeder reactor system in the European Community,
International Union of the Electric Power Producers and Distributors (UNIPEDE),
Fast Reactor Coordinating Committee (FRCC) and
Commission of the European Community (CEC),
Published by ENEL, Roma, September 1981.
- Q77
Andriess 1994
Andriess C D,
Comment on prospects for nuclear power, Energy technologies to reduce CO₂ emissions,
OECD/IEA, Paris, 1994.
- Q79
WEA 2000
World Energy Assessment, Energy and the challenge of sustainability,
UN Development Programme (UNDP),
UN Department of Economic and Social Affairs,
World Energy Council (WEC),
New York NY 10017, September 2000.
- Q79a
World Energy Assessment: Overview 2004 Update
UN Development Programme (UNDP), 2004
www.undp.org/energy/weaover2004.htm
- Q85
WNA-75 2004
Supply of Uranium,
Appendix: The sustainability of mineral resources
World Nuclear Association, August 2004
www.world-nuclear.org/info/inf75.htm
or
www.uic.com.au/nip75.htm
based on OECD, NEA & IAEA, Uranium 2003, per
0101003.
- Q86
UIC-34 2005
Geology of uranium deposits,
Uranium Information Centre, Nuclear Issues
Briefing Paper # 34, November 2001 (site visit
8sept2005)
www.uic.com.au/nip34.htm
= [WNA26 2005]
World Nuclear Association, Information Paper # 26
www.world-nuclear.org/info/inf26.htm
- Q87
WNA-mining 2005
Uranium mining in Australia and Canada,
World Nuclear Association, June 2001 (2005)
www.world-nuclear.org/education/mining.htm
- Q89
WNA-23 2005
World uranium mining,
World Nuclear Association, Information paper # 23,
July 2005
www.world-nuclear.org/info/inf23.htm
- Q90
Red Book 2006
Uranium 2005: Resources, Production and Demand,
"Red Book" 21st edition
OECD NEA, IAEA
OECD 2006.
- Q91
BP 2006
Statistical Review of World Energy, June 2006
www.bp.com/centres/energy/
- Q95
Rotty Perry Reister 1975

- Rotty R M, Perry A M & Reister D B,
Net energy from nuclear power,
ORAU-IEA-75-3,
Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated
Universities, November 1975.
- Q98
Mortimer 1977
Mortimer N D,
*The Energy Analysis of Burner Reactor Power
Systems*,
PhD dissertation, Milton-Keynes Open University,
UK, December 1977.
- Q152
Vattenfall 2005
Vattenfall AB Generation Nordic Countries,
*EPD: Certified Environmental Product Declaration
of Electricity from Forsmarks Kraftgrupp AB
(FKA)*,
S-P-00021
June 2004, updated 2005.
www.environdec.com
- Q155
WNA-11 2005
Energy analysis of power systems,
Info Paper #11,
World Nuclear Association, 2005
<http://www.world-nuclear.org/info/inf11.htm>
- Q210
WNA-48 2006
Australia's uranium and who buys it,
World Nuclear Association, February 2006
www.world-nuclear.org/info/inf48.htm.
identical with:
Uranium Information Centre, Nuclear Issues
Briefing Paper 1, February 2006,
www.uic.com.au/nip01.htm
- Q211
UIC-emine 2005
Australia's uranium mines,
Uranium Information Centre, December 2005
www.uic.com.au/emine.htm
- Q212
WNA-49 2006
Canada's Uranium production and nuclear power,
World Nuclear Association, February 2006,
www.world-nuclear.org/info/inf49.htm
- Q213
UIC-pmine 2005
*Australia's uranium deposits and prospective
mines*,
Uranium Information Centre, May 2005
www.uic.com.au/pmine.htm
- Q252
Blanchard et al. 1982
Blanchard RL, Fowler TW, Horton TR & Smith JM,
Potential health effects of radioactive emissions
from active surface and underground uranium
mines,
Nuclear Safety, Vol 23 no 4, July-August 1982.
- Q280
Deutch J, Moniz EJ, et al.
*The Future of Nuclear Power. An interdisciplinary
MIT study*,
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge
MA, USA, 2003
ISBN 0-615-12420-8
www.mit.edu/afs/athena/org/n/nuclearpower
- Q281
Deffeyes & MacGregor 1980
Deffeyes K S & MacGregor I D
'World Uranium Resources',
Scientific American, 242 (1), 1980, pp 50-60.
- Q283
DOE-NERAC 2001
*A roadmap to deploy new nuclear power plants in
the United States by 2010*,
Volume I, Summary Report
US Department of Energy (DOE), Office of Nuclear
Energy Science and Technology,
and; Nuclear Energy Research Advisory Committee
(NERAC). Subcommittee on Generation IV
technology planning,
October 31, 2001
[http://nuclear.gov/nerac/ntdroadmapvolume1.
pdf](http://nuclear.gov/nerac/ntdroadmapvolume1.pdf)
- Q291
Mudd 2000
Mudd G M,
*Acid in-situ leach uranium mining: 2 - Soviet Block
and Asia*,
paper for: Tailings and Mine Waste '00,
Fort Collins, CO, USA, January 23-26 2000,
proceedings AA Balkema, Rotterdam, pp.527-536.
- Q301
Lidsky LM & Miller MM,
*Nuclear power and energy security. A revised
strategy for Japan*,
PARESWorkshop: Energy Security in Japan, Tokyo,
Japan, 13 July 1998.
[www.nautilus.org/archives/papers/energy/
LidskyPARES.pdf](http://www.nautilus.org/archives/papers/energy/LidskyPARES.pdf)
- Q302
Thorium
Uranium Information Centre, November 2004
UIC Nuclear Issues Briefing Paper # 67
www.uic.com.au/nip67.htm
- Q308
ExternE-UK 1998
*Power Generation and the Environment - a UK
Perspective*,
Volume 1, June 1998
ExternE-UK AEAT 3776
<http://externe.jrc.es/uk.pdf>
- Q313
WNA-inf15 2005
Plutonium
World Nuclear Association, June 2005
www.world-nuclear.org/info/inf15.htm

- Q314
WNA-27 2003
In situ leach (ISL) mining of uranium
World Nuclear Association, June 2003
www.world-nuclear.org/info/inf27.htm
- Q316
EIA-DOE 2005
Checklick N, Lead Environmental Analyst, EIA-DOE
email dated 25 August 2005, from nancy.
checklick@eia.doe.gov via NPRI to <storm@
ceedata.nl>
File: CFC Uranium Enrichment.xls
US Department of Energy, Energy Information
Administration
Data from: www.eia.doe.gov
and: www.afeas.org
- Q320
ERA 2006
Energy Resources of Australia Ltd (ERA),
Ranger Operation,
2006,
<http://www.energyres.com.au>
- Q321
ERA-AR 2005
Energy Resources of Australia Ltd (ERA),
ERA 2005 Annual Report,
Chairman's and Chief Executive Report,
2006
<http://www.energyres.com.au>
- Q322
Skinner 1979
Skinner B J.
'Earth resources',
Proc.Natl.Acad.Sci.USA, vol 76, no 9, pp 4212-
4217, September 1979.
- Q324
WISE-U 2006
WISE Uranium Project,
www.wise-uranium.org
- Q325
ISA 2006
*Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas
Emissions of Nuclear Energy in Australia*
A study undertaken for the Department of
Prime Minister and Cabinet of the Australian
Government,
The University of Sydney
Integrated Sustainability Analysis (ISA)
3 November 2006,
[www.dpmc.gov.au/umpner/docs/commissioned/
ISA_report.pdf](http://www.dpmc.gov.au/umpner/docs/commissioned/ISA_report.pdf)
- Q326
Uranium Mining, Processing and Nuclear Energy
- Opportunities for Australia?
Draft Report, November 2006
Australian Government, Department of the Prime
Minister and Cabinet,
Report to the Prime Minister by the Uranium
Mining, Processing and Nuclear Energy Review
Taskforce, December 2006
- [http://www.dpmc.gov.au/umpner/docs/draft_
report/full_report.pdf](http://www.dpmc.gov.au/umpner/docs/draft_report/full_report.pdf)
- Q333
Ecoinvent 2003
Dones R,
Kernenergie,
ecoinvent-Bericht no.6 - Teil VII
In: Sachbilanzen von Energiesystemen:
Grundlagen für den ökologischen Vergleich
von Energiesystemen und den Einbezug von
Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz
(ed. Dones R.).
Final report ecoinvent 2000 No. 6-VII,
Paul Scherrer Institut Villigen,
Swiss Centre for Life Cycle Inventories,
Duebendorf, CH,
www.ecoinvent.ch
- Q334
DRDGold 2005
*Blyvooruitzicht Operation Analysts Visit 9
September 2005*,
www.drd.co.za/ir/presentations.asp
- Q335
Alsema et al. 2006
Alsema E A, DeWild-Scholten & M J, Fthenakis V M,
*Environmental impacts of PV electricity
generation - A critical comparison of energy
supply options*,
Presented at the 21st European Photovoltaic
Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8
September 2006.
www.clca.columbia.edu/publications/
- Q336
Krohn 1997
Krohn S (editor),
The energy balance of modern wind turbines,
Wind Power Note No.16, December 1997,
Danish Wind Industry Association,
www.windpower.org
- Q337
White & Kulcinski 1999
White SW & Kulcinski GL,
*'Birth to death' Analysis of the Energy Payback
Ratio and CO2 Gas Emission Rates from Coal,
Fission, Wind and D, T Fusion Electrical Power
Plants*,
UWFDM-1063,
Fusion Technology Institute, University of
Wisconsin, March 1998, revised February 1999.
- Q338
Mudd & Diesendorf 2007
Mudd GM & Diesendorf M,
*Sustainability Aspects of Uranium Mining: Towards
Accurate Accounting?*
2nd International Conference on Sustainability
Engineering and Science,
Auckland, New Zealand, 20-23 February 2007.
www.nzsses.auckland.ac.nz/
- Q339
Barnaby 2005a

Barnaby F,
Factsheet 1 - Security and Nuclear Power
Oxford Research Group,
[www.oxfordresearchgroup.org.uk/publications/
briefings](http://www.oxfordresearchgroup.org.uk/publications/briefings)

Q340
Barnaby 2005b
Barnaby F,
Factsheet 2 - Effective Safeguards?
Oxford Research Group,
[www.oxfordresearchgroup.org.uk/publications/
briefings](http://www.oxfordresearchgroup.org.uk/publications/briefings)

Q341
Barnaby 2006
Barnaby F,
The Nuclear Renaissance and the Spread of
Nuclear Weapons,
Seminar *Kernenergie in de 21ste eeuw. Realiteit
en beloften*,
Greenpeace, WWF, IEW, Bond Beter Leefmilieu &
Voor Moeder Aarde,
Brussels, Federaal Parlement, 19 Oktober 2006.
www.uitstapkernenergie.be/

Q342
Schneider & Froggatt 2004
Schneider M & Froggatt A,
The world nuclear industry status report 2004,
Commissioned by The Greens-European Free
Alliance in the European Parliament,
Brussels, December 2004
[www.greens-efa.org/pdf/documents/greensefa_
documents_106_en.pdf](http://www.greens-efa.org/pdf/documents/greensefa_documents_106_en.pdf)



Eindeloos of Eindig

wanneer valt kernenergie van de energieklim?

De wereld schreeuwt om energie die het klimaat niet verandert, voorraden niet uitput, biodiversiteit niet aantast, veilig, betrouwbaar en betaalbaar is. Regeringen, bedrijven, maatschappelijke organisaties, burgers, iedereen is naarstig op zoek naar oplossingen. Kernenergie wordt steeds vaker genoemd. Soms als definitieve oplossing voor de komende eeuwen, soms als tussentijdse oplossing voor de periode waarin we op weg gaan naar een werkelijk duurzame energievoorziening.

In het kader van het project **Kernenergie: 'ja, mits' of 'nee, tenzij'** kijken we naar alle argumenten, voor- en nadelen, ontwikkelingen en eventueel nieuwe kennis.

In dit rapport wordt niet alleen gekeken naar de vraag of er wel genoeg brandstof is voor veel meer kernenergie maar ook en vooral naar de vraag of kernenergie op termijn nog wel een netto energieleverancier is. Als het meer energie kost om een centrale te laten draaien dan die centrale kan opleveren ligt het niet erg voor de hand om een kerncentrale te bouwen, laat staan tientallen of honderden. En misschien levert kernenergie dan nog wel netto elektriciteit maar stoot het evenveel broeikasgassen uit als andere fossiele brandstoffen.

Dit rapport doet een poging hier wat meer duidelijkheid over te krijgen.



KERNENERGIE:

'ja, mits' of 'nee, tenzij'

