

# Uranium Plenty

Dit is de printvriendelijke versie van het stuk op:  
[www.groenerekenkamer.nl/uraniumplenty](http://www.groenerekenkamer.nl/uraniumplenty)  
 Meer informatie: [theo@richel.org](mailto:theo@richel.org)  
 Datum 17 mei 2007

In 2001 gebruikten de kerncentrales in de wereld gezamenlijk 64.000 ton uranium. De geschatte winbare wereldvoorraad bedraagt nu 17 miljoen ton, hetgeen betekent dat die centrales in ieder geval 250 jaar door zouden kunnen draaien.

Maar we willen meer kerncentrales, en volgens sommigen ontstaan er dan snel tekorten aan uranium. Dat probleem kan opgelost worden door de oude brandstof nog eens te gebruiken (door deze 'op te werken' of door 'snelle kweekreactoren' in te zetten). Maar hoewel dit een vorm van recycling is, wijzen velen dit af wegens de mogelijke gevaren.

Maar is die 17 miljoen ton die er in ieder geval ligt nu echt de totale hoeveelheid uranium op aarde? Of is men na het vinden van deze hoeveelheid opgehouden met zoeken?

Het laatste: door de anti-kernenergiebeweging heeft de ontwikkeling van kernenergie lange tijd stil gestaan. Het had dan ook geen enkele zin om - gegeven een wereldvoorraad die in ieder geval 250 jaar zou meegaan - nog meer uranium te gaan zoeken. Exploratie is duur en bovendien: iedere hoeveelheid die je vindt zou de schaarste verminderen.... en dus de prijs doen dalen. Niet aantrekkelijk kortom.

Er zijn echter goede redenen om aan te nemen dat de werkelijk hoeveelheid winbaar uranium op aarde zo'n twee tot zes maal groter is dan de eerder genoemde 17 miljoen ton. Dat komt dan neer op 34-102 miljoen ton (mediaan 68 miljoen). Het heeft alles te maken met de prijs: als uranium schaarser wordt is men bereid er meer voor te betalen en wordt het dus aantrekkelijker om wat harder te zoeken en wat dieper te graven. Ook wordt de winningstechnologie voortdurend verbeterd.

Stel nu dat we in deze eeuw het aantal kerncentrales zouden vervijftienvoudigen. Uitgaande van tamelijk onzuinige centrales heeft men berekend dat we in deze eeuw dan 26 miljoen ton uranium nodig zouden hebben. Uitgaande van een mediaan schatting van 68 miljoen ton zouden we zo weer 250 jaar vooruit kunnen. Uit het kolommetje hiernaast kunt U opmaken dat dat veel langer is dan velen voor mogelijk hielden. Het is bovendien ook aanmerkelijk langer dan de periode dat we nu olie gebruiken.

Maar zouden de tegenstanders van kernenergie een periode van 250 jaar wel als duurzaam willen bestempelen? Het valt te betwijfelen.

Je zou dan kunnen zeggen: OK het is een overgangsendnergie, maar je kunt er dan ook op wijzen dat er in de oceanen nog 4500 miljoen ton uranium zit. Nu is die nog niet winbaar omdat er nog zoveel uranium tegen een veel lagere prijs te winnen is, maar naarmate die opdraakt verandert dat ongetwijfeld. Uraniumwinning uit zee zal in ieder geval eerder financieel aantrekkelijk worden dan opwerking en snelle kweek. Een berekening uit de losse pols - 4500 miljoen ton uranium in zee gedeeld door een behoefte van 26 miljoen ton - laat zien dat je dan 170 eeuwen vooruit zou moeten kunnen. Dat lijkt toch behoorlijk duurzaam.

Bovenstaande is de tamelijk ruwe samenvatting van Appendix B1 van de 'The economics of reprocessing vs. direct disposal of spent nuclear fuel.' (dec. 2003) door Matthew Bunn, Steve Fetter, John P. Holdren en Bob van der Zwaan van de Harvard Universiteit. Het origineel bevat veel meer details en is daarom met toestemming van de oorspronkelijke auteurs vertaald door de Groene Rekenkamer en hieronder gepubliceerd.

Om misverstanden te voorkomen: dit artikel gaat *niet* over het meest verstandige energiebeleid maar over de voorraden uranium op aarde. Het is geen pleidooi voor een energiebeleid zonder opwerking en snelle kweekreactoren maar een verkenning van de mogelijkheden daarvan en de conclusie is dat het kan - royaal. (Overigens mag hier niet onvermeld blijven dat de aarde ook nog een hoeveelheid **thorium** bevat die drie maal zo groot is als de hoeveelheid uranium en die ook als brandstof voor kerncentrales kan worden gebruikt).

De Groene Rekenkamer voegt hier nog graag aan toe dat een energiebeleid zonder opwerking en snelle kweekreactoren weliswaar mogelijk maar niet wenselijk is om reden dat zo een onnodige partij afval ontstaat die eigenlijk niet eens afval is omdat er nog zoveel electriciteit uit te winnen valt. Door opwerking en snelle kweekreactoren in te zetten wordt het afvalprobleem aanmerkelijk kleiner en neemt de energierijkdom die we hebben alleen nog maar toe. (T.R.)

## Wereld Voorraden Uranium

### B.1. Introductie

*Er zal altijd ruimschoots voldoende splijtstof zijn voor kerncentrales – er zal nooit een tekort komen. Het is alleen de vraag waar deze splijtstof vandaan komt en tegen welke prijs. —James Graham, Chairman, Board of Governors, World Nuclear Fuel Market. 211*

Al tientallen jaren wordt er gesproken over het opwerken en hergebruiken van uranium en het kweken van plutonium, vooral uit vrees dat de uraniumvoorraden niet lang toereikend zullen zijn voor een groeiende kernindustrie, als deze langdurig zou zijn aangewezen op eenmalig gebruik van uranium. 212. Voorstanders van opwerken en kweken beweren steeds dat de goedkoop winbare uraniumvoorraden zo beperkt zijn dat opwerken en kweken al in de relatief nabije toekomst nodig zal zijn 213. Dit werpt de voor de hand liggende vraag op: hoeveel economisch winbaar uranium mogen we in de toekomst verwachten?

Uranium komt ongeveer net zo veel voor als tin of arseen; tabel B.1 toont kenmerkende concentraties in verschillende media.<sup>214</sup> De totale hoeveelheid uranium in de aardkorst is enorm – iets in de orde van 100 biljoen ton. Hoeveel hiervan voor kernenergiegebruik winbaar is is afhankelijk van technologie en prijs. Door het voortschrijden van de technologie neemt de hoeveelheid winbaar uranium op twee manieren toe: er komen nieuwe manieren van exploratie, winning en verwerking van uranium tegen lagere kosten, waardoor voorraden die eerst te duur waren voor ontginning alsnog winbaar worden. Door stijgende uraniumprijzen neemt de winbare voorraad op twee wijzen toe: minder rijke ertsen worden economisch aantrekkelijk en het wordt interessanter om op zoek te gaan naar nieuwe voorraden. (Bovendien remmen stijgende prijzen de toename van de vraag door een efficiënter gebruik van de voorraden te stimuleren - bijvoorbeeld door de restfractie van het uranium verder te verarmen of door reactoren met hogere opbrand te gebruiken).

Schattingen van de hoeveelheid uranium die in de toekomst tegen een gegeven prijs gewonnen kan worden zijn uiteraard onzeker en er zijn de laatste decennia weinig serieuze pogingen geweest om de werelduranium-voorraad globaal te bepalen (boven de reeds bekende winbare voorraden). Al vele jaren is er weinig geïnvesteerd in uraniumexploratie omdat de lage prijs en de beschikbaarheid van grote bekende voorraden deden verwachten dat het vinden van nieuwe voorkomens weinig geld zou opleveren. Het

gevolg daarvan was, zoals een analyst opmerkte: "Voorspellingen omtrent toekomstige winbare voorraden van enig mineraal, zoals uranium, zullen ongetwijfeld extreem conservatief zijn als ze slechts gebaseerd zijn op huidige kosten, prijzen en geologische kennis".<sup>215</sup> De uraniumvoorraden die waarschijnlijk gevonden zullen worden als de prijs voldoende stijgt om substantiële investeringen in exploratie aantrekkelijk te maken, zijn ongetwijfeld veel groter dan de huidige schattingen aangeven.

Om de beschikbare schattingen over hoeveel uranium uiteindelijk tegen diverse prijzen gewonnen kan worden te kunnen begrijpen is het belangrijk het verschil te kennen tussen voorraden en reserves. De term 'voorraden' verwijst naar alle hoeveelheden van een bepaalde stof die ooit zouden kunnen worden ontdekt en economisch winbaar zouden kunnen worden, rekening houdend met toekomstige technologieverbeteringen (exploratie, winning), alsmede met toekomstige prijsstijgingen. De term reserves daarentegen verwijst naar die gedeelten van de (uranium)voorraden welke met grote zekerheid zijn aangetoond en met de huidige technologie economisch rendabel winbaar zijn. Reserves kunnen toenemen wanneer als gevolg van exploratie extra economisch winbare hoeveelheden worden gevonden, als-

Tabel B.1. Kenmerkende uraniumconcentraties	
Medium	Gemiddelde concentratie. (ppm U)
Rijk erts	20.000
Arm erts	1.000
Graniet	4
Afzettingsgesteenten	2
Continental korst	2,8
Zeewater	0,003

mede door verbeteringen in technologie en bedrijfsvoering, waardoor reeds eerder gevonden (maar voorheen niet economisch winbare) voorraden alsnog economisch winbaar worden.

Exploratie is duur; daarom is er voor bedrijven weinig aanleiding op zoek te gaan naar meer winbaar erts dan men in de eerstkomende tientallen jaren nodig denkt te hebben. Kenmerkend voor investeringen in exploratie is dat ze juist voldoende zijn om de reserves, gerekend als een veelvoud van het jaarlijkse verbruik, constant te houden of langzaam te laten toenemen; als gedurende een langere periode jaar-

lijks meer verbruikt wordt dan er aan de reserves wordt toegevoegd, zodat deze aanzienlijk afnemen, stijgt doorgaans de prijs van het product. Daardoor veranderen sommige bekende maar oneconomische voorraden in reserves en dit stimuleert ook de exploratie. De hoeveelheid product die uiteindelijk economisch winbaar zal blijken te zijn — genaamd 'ultimately recoverable resources' — hangt niet alleen af van de geologie maar ook van de ruimte voor verbetering van de technologieën voor exploratie, winning en toepassing, alsmede van de mate waarin de prijs van het product kan stijgen voordat alternatieven interessant worden en de vraag beperken.

Gegeven deze relaties en definities ligt het voor de hand dat de gepubliceerde schattingen van reserves tamelijk nauwkeurig zullen zijn (voornamelijk beperkt door onzekerheden over de karakterisering van bekende ertsen, door verschillen tussen de aannames van de analisten omtrent de mogelijkheden van bestaande winningstechnologieën en wellicht doordat bedrijven of landen belang hebben bij onvolledige openbaarmaking), terwijl schattingen van de 'ultimately recoverable resources' noodzakelijkerwijs veel onzekerder zullen zijn. Zo variëren de schattingen van de totale hoeveelheid olie die bij de huidige technologie 'ultimately recoverable' zal zijn met een factor twee en met meer dan een factor vier wanneer voor de komende 20 jaar wordt uitgegaan van belangrijke technologische verbeteringen.<sup>216</sup> Betreffende aardgas zijn de onzekerheden zelfs nog groter.<sup>217</sup> Bij uranium zijn de onzekerheden - gezien de in de laatste decennia zeer lage investeringen in exploratie, de zeer zwakke pogingen die zijn gedaan om de werelduraniumvoorraad te inventariseren en de grote factoren waarmee de uraniumprijzen zouden kunnen stijgen voordat ze de rentabiliteit van kernenergie voelbaar gaan schaden - nog veel groter.

## **B.2. De bedrieglijkheid van het Traditionele Economische Voorraden Model.**

Volgens de klassieke economische theorie zou de prijs van niet hernieuwbare grondstoffen moeten stijgen naarmate de bewezen voorraden afnemen en alsmaar duurder winbare voorraden moeten worden aangesproken.<sup>218</sup> Analisten die van dit model uitgaan hebben telkens als de bekende voorraden begonnen af te nemen gewoontegetrouw voorspeld dat de uraniumprijs op korte termijn zal gaan stijgen en even gewoontegetrouw werd telkens weer hun ongelijk bewezen.

Het klassieke model is niet in staat rekening te houden met de snelheid waarmee nieuwe voorraden worden ontdekt of het beschikbaar komen van technologieën die het goedkoper maken om minder aantrekkelijke voorraden te ontginnen. Vanwege deze

factoren ligt de bij gegeven winningskosten economisch winbare voorraad niet vast maar neemt toe zolang technologische vooruitgang en succesvolle exploratie sneller gaan dan de uitputting van bekende rijke ertsen. En het is een feit dat de samenleving gedurende de 20e eeuw voor de meeste belangrijke minerale voorraden nieuwe ertsen ontdekte, alsmede de winningstechnologie in een voldoende hoog tempo verbeterde om de uitputting van bekende voorraden meer dan te compenseren. De laatste tientallen jaren is de verhouding tussen de gangbare jaarlijkse consumptie en de bekende reserves - dus voor hoeveel jaren de voorraad nog strekt bij gelijkblijvend verbruik - voor de meeste mijnbouwproducten toegenomen, zelfs bij toenemend verbruik.<sup>219</sup> De afgelopen 25 jaar is deze verhouding voor olie toegenomen van 30 naar 40 jaar, voor gas van 50 naar 60 jaar, ondanks toenemende consumptie.<sup>220</sup> Prijsstijgingen hebben de grootste toename van de reserves gestimuleerd, maar de reserves zijn ook nog toegenomen in periodes met gelijkblijvende of dalende prijzen.<sup>221</sup>

De technologische verbeteringen bij de winning van grondstoffen waren spectaculair. De gemiddelde (kolen-)mijnwerker in de VS produceerde in 1990 8000 ton per jaar, tegen 2500 ton in 1960; in de koperwinning nam de productie per mijnwerker van 1976 tot 1987 jaarlijks met gemiddeld 8,6 % toe.<sup>222</sup> Voor een groot assortiment niet-hernieuwbare grondstoffen was het gevolg hiervan een reële prijsdaling - het tegenovergestelde van wat het klassieke model voorspelt. Zo is in de VS de reële prijs van een groot aantal metalen in de loop van de 20-e eeuw gezakt - alsook in de laatste 20 jaar de uraniumprijs.<sup>223</sup> Er is weinig reden om te geloven dat deze trend in het geval van uranium plotsklaps omkeert om, zoals vaak voorspeld, te leiden tot in de loop van de 21e eeuw alsmaar stijgende prijzen.

Zelfs al zouden de uraniumprijzen beginnen trendmatig te stijgen, lijkt het niet waarschijnlijk dat zulks in een hoog tempo zal gebeuren. Zo nam het Nuclear Energy Agency (NEA) van de Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) in zijn laatste raming van de toekomstige kosten van de nucleaire brandstofcyclus aan dat de uraniumprijzen met 1.2% per jaar zouden stijgen.<sup>224</sup> Als we uitgaan van een prijsstijging tot \$45/kgU in 2020 (de - nu bekende - commerciële en militaire voorraden zijn dan op en de prijzen zullen wel moeten stijgen naar een niveau dat voldoende winning uitlokt om aan de vraag te voldoen), gevolgd door een prijsstijging met 1,2% per jaar, dan duurt het tot ver in de 22e eeuw voor de uraniumprijzen op een niveau komen waarbij opwerking à \$1000/kgHM (HM = Heavy Metal, verzamelterm voor de metalen in splijtstof, in verse splijtstof dus verrijkt uranium en eventueel

gerecycleerd plutonium, in gebruikte een mengsel van uranium, plutonium, overige actiniden en splijtingsproducten) economisch aantrekkelijk wordt.<sup>225</sup> Het zal duidelijk zijn dat over zulke lange periodes te verwachten technologische veranderingen het soort simpele berekeningen, die uitgaan van de huidige LWR en opwerkingstechnologie, irrelevant maken, maar er blijkt wel uit dat het nog heel lang kan duren voor het economische nadeel van opwerking en hergebruik van gebruikte splijtstof verdamp.

### B.3. Schattingen van de uraniumvoorraden

De meest algemeen beschikbare schattingen van de uraniumvoorraden staan in het Rode Boek: een compendium van gegevens betreffende uraniumvoorraden over de hele wereld, gepubliceerd door het NEA en het International Atomic Energy Agency (IAEA).<sup>226</sup>

Editie 2001 van het Rode Boek schat dat de totale (conventionele) wereldvoorraad die voor minder dan \$130/kgU gewonnen zou kunnen worden, 16,2 miljoen ton uranium (MtU) bedraagt. Dit getal is de som van 'redelijkerwijs zekere voorraden' ('reasonably assured resources' - RAR; als de uraniumprijs reeds \$130/kg zou zijn zouden dit reserves worden genoemd), 'geschatte aanvullende voorraden' ('estimated additional resources' - EAR; voorraden waarvan men aanneemt dat ze in de omgeving van reeds bekende voorraden moeten liggen en gezien worden als economisch winbaar tegen de aangegeven prijs <sup>227</sup>), alsmede 'speculatieve voorraden' ('speculative resources' - 'SR'; voorraden waarvan men verwacht dat deze bestaan en met bestaande technologie vindbaar en winbaar zijn bij een genoemd prijsniveau, gebaseerd op geologische 'trends' in specifieke gebieden) <sup>228</sup>. Als in deze som de reeds gewonnen producten worden meegenomen - commerciële voorraden, overtollige militaire voorraden, alsmede voorraden uit herverrijking, toegepast op verarmd uranium, wat bij een prijs van \$130/kgU economisch interessant zou worden — dan zou de totale hoeveelheid toenemen tot 17,1 MtU.<sup>229</sup> Een internationale bijeenkomst van de IAEA concludeerde in 2000 dat de totale hoeveelheid uranium in deze categorie waarschijnlijk 20 miljoen ton bedraagt.<sup>230</sup> Over dit Rode-Boek-totaal valt het een en ander op te merken.

1. Omdat er de laatste jaren nauwelijks aanleiding was voor substantiële exploratie moeten er welhaast zeker grote hoeveelheden uranium buiten deze schattingen zijn gebleven. In veel landen is maar weinig naar uranium gezocht. Ondanks eerdere exploratie heeft een bescheiden extra investering in recente jaren geleid tot een spectaculaire toename van de schattingen van winbare voorraden: begin 2001, bijvoorbeeld, verhoogde de Canadese firma Cameco zijn schatting van de hoeveelheid winbaar uranium

uit de McArthur River mijn (de rijkste van de wereld, het erts bevat meer dan 20% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) met meer dan 50%, gebaseerd op booranalyses van de voorafgaande jaren.<sup>231</sup> Verwacht moet worden dat deze trend zich zal handhaven: hoe energieke uraniumfirma's zoeken (als de prijzen dat aantrekkelijk maken) hoe meer ze zullen vinden.

2. De uranium prijzen lagen in recente jaren tussen de \$20-40/kgU wat betekent dat er geen reden is om te zoeken naar uraniumvoorkomens met winningskosten die hoger zijn. Speciaal schattingen van de omvang van deze duurdere voorkomens zijn daarom onzeker en zeer waarschijnlijk onderschattingen (wellicht met een grote factor aangezien prijzen die in de buurt komen van \$130/kgU zowel de exploratie als de ontwikkeling van nieuwe technologie om uranium uit arme erts te winnen, fors zou stimuleren).

3. Het gerapporteerde totaalcijfer is in de loop van de tijd gestegen - ondanks het feit dat de investeringen in exploratie wereldwijd gedurende tientallen jaren minimaal waren en ondanks de inflatie die aan de reële waarde van het bedrag van \$130/kgU als standaard voor voorraadrapportages heeft geknaagd - en zal naar verwachting doorstijgen. De vorige uitgave van het Rode Boek (1999) rapporteerde bijvoorbeeld een totale hoeveelheid van 15,4 MtU, winbaar voor \$130/kgU, 800.000 ton minder dan twee jaar later werd gerapporteerd.

4. Omdat vele landen niet in alle categorieën voorraden rapporteren, worden die niet in het totaal opgenomen. Slechts 28 landen rapporteren speculatieve voorraden, vergeleken met 43 die redelijk verzekerde voorraden rapporteren. Zo vindt Australië, dat enkele van 's werelds grootste uraniumvoorraden bezit, het niet de moeite waard om speculatieve voorraden te ramen, omdat haar beter bekende voorraden al zo groot zijn — maar, zoals het Rode Boek het in 2001 subtiel uitdrukt: "landen zoals Australië worden geacht aanzienlijke potentiële voorraden te hebben in nauwelijks onderzochte gebieden".<sup>232</sup> De tabel in het Rode Boek over speculatieve voorraden noteert specifiek dat deze totalen slechts een overzicht vormen van wat landen hebben gerapporteerd en "geen compleet overzicht geven van de onontdekte voorraden wereldwijd".<sup>233</sup> Schattingen gebaseerd op extrapolaties van gegevens uit het Rode Boek (om voorraden in de duurdere en meer speculatieve categorieën te ramen, alsmede voorraden in landen waarvoor - in het Rode Boek - geen schattingen worden gepresenteerd) laten de totale hoeveelheid uranium die winbaar is tegen \$130/kgU of minder met 45 % toenemen tot 24 miljoen ton.

5. Deze schatting gaat alleen over de conventionele voorraden— geologische voorkomens waar het erts rijk genoeg is om bij de gegeven uraniumprijs mijnbouw te rechtvaardigen. In sommige gevallen kan het echter aantrekkelijk zijn om uranium als bijpro-

duct te winnen, zoals soms plaatsvindt bij de winning van goud en fosfaat. Volgens schattingen bevindt zich in de wereldfosfaatvoorkomens nog een extra hoeveelheid van 22 MtU (wel in zeer lage concentraties) 234 en een substantieel deel hiervan kan uiteindelijk economisch winbaar blijken te zijn als bijproduct van fosfaatmijnbouw voorzover de wereldwijde behoefte aan kunstmest door blijft groeien.

Kortom, ondanks het opnemen van speculatieve voorraden in het getal van 17,1 miljoen ton, is het zeer waarschijnlijk dat de hoeveelheid uranium die uiteindelijk winbaar zal blijken voor \$130/kgU of minder, belangrijk groter zal zijn. Realistisch gezien is 17 MtU een ondergrens, geen bovengrens van de hoeveelheid uranium die tegen een prijs van \$130/kgU gewonnen zal kunnen worden.

Een andere benadering van het voorraadvraagstuk bestaat erin de vorm te schatten van de kromme die de winbare hoeveelheid van een grondstof weergeeft als functie van de kostprijs.<sup>235</sup> De beperkt beschikbare gegevens maken deze schatting wel moeilijk. Uitgaande van geologische relaties, die aangeven dat er bij afnemend gehalte exponentieel grotere voorkomens van een grondstof zijn, lijkt het voor de hand liggend dat het verband tussen kostprijs en voorraad globaal exponentieel is. Volgens een analist "zou een verdubbeling van de prijzen ten opzichte van het huidige peil een vertienvoudiging van de bepaalde voorraden kunnen betekenen".<sup>236</sup> Het conservatieve karakter van de cijfers in het Rode Boek, vooral voor wat betreft de hogere kosten-niveaus, valt af te leiden uit het feit dat bij de schattingen van de bekende conventionele voorraden, een verdubbeling van de prijs van \$40/kgU tot \$80/kgU leidt tot een toename van de winbare voorraden met slechts 48%.

Als dat een correcte beschrijving van de werkelijke relatie tussen kostprijs en voorraden zou zijn en als we de curve heel conservatief calibreren door aan te nemen dat de 2,1 miljoen ton die volgens het Rode Boek (2001) tegen een prijs van \$40/kgU winbaar is, het totaal weergeeft van alle voorraden in de wereld die ooit voor die kostprijs zouden kunnen worden gewonnen,<sup>237</sup> dan zou de kromme die de winbare voorraden toont als functie van de bijbehorende kostprijs, er als volgt uitzien:

$$R = 2,1 [p/40]^{\epsilon} \text{ (betrekking B1)}$$

waarbij R de totale uranium voorraad is (in MtU), winbaar tegen prijs p (\$/kgU), en  $\epsilon$  de prijselasticiteit van de lange termijn aanbodprijs. Als een verdubbeling van de prijs tot een vertienvoudiging van de voorraden leidt dan is de prijselasticiteit;  $\epsilon = \log(10)/\log(2) = 3,32$ . Volgens deze ruwe schatting voert een

verdubbeling van de prijs tot \$80/kgU dan tot een winbare voorraad van 21 MtU, en bij een prijs van \$130/kgU zou dan meer dan 100 MtU winbaar zijn.

Een van de weinige serieuze pogingen om de wereldwijd winbare uraniumvoorraad te ramen concludeerde dat een tienvoudig lager U-gehalte van het erts correspondeert met een 300-voudige toename van de voorraden.<sup>238</sup> Hoewel de auteurs niet poogden verbanden te leggen tussen winningskosten en gehalten van het erts, houdt dit in dat, indien de door betrekking (B.1) weerspiegelde fenomenen overeenkomen met die, welke bij geologische analyse worden onderzocht, verdubbeling van de U-prijs het exploiteren van voorkomens met 2,5 keer lager gehalte rendabel zou maken. Dit lijkt plausibel omdat niet alle kosten van uraniumwinning recht evenredig toenemen met de hoeveelheid per ton gewonnen uranium te verwerken bodemmateriaal. Als we veronderstellen - het andere uiterste - dat de kosten omgekeerd evenredig zijn aan het U-gehalte (wat bij zeer lage gehalten, waarbij de totale kosten sterk zouden worden gedomineerd door de hoeveelheid te verwerken bodemmateriaal, zou kunnen kloppen), zou de exponent  $\epsilon$  in betrekking (B.1) 2,48 bedragen en zou

Tabel B.2. Schattingen van uraniumvoorraden, gebaseerd op betrekking B.1.			
Bron	Aanbodprijs-elasticiteit, $\epsilon$	R (MtU) $p \leq$ \$80/kgU	R (MtU) $p \leq$ \$130/kgU
Uranium Information Centre	3,32	21	105
Deffeyes & MacGregor	2,48	12	40
Generation IV Group	2,35	11	34

de verwachte, voor \$130/kgU of minder winbare voorraad ongeveer 40 MtU bedragen.

Korter geleden voorspelde ook de Generation IV fuel cycle crosscut group in een advies aan het Kernenergiebureau van het Ministerie van Energie een exponentieel verband tussen winbare voorraden en kostprijs, zich baserend op de onlangs in de VS als winbaar voor \$30/kgU, resp. \$50/kgU geraamde hoeveelheden uranium, en oordeelde dat de exponent  $\epsilon$  van betrekking B.1 wel zo laag zou kunnen zijn als 2,35.<sup>239</sup> Calibreren met de Rode Boek raming van 2,1 MtU winbaar voor \$40/kgU of minder geeft 34 MtU winbaar voor \$130/kgU of minder.<sup>240</sup> Tabel B.2 verschaft een overzicht van deze ramingen.

Dit zijn heel globale schattingen van het verband

tussen prijs en winbare voorraden, gemaakt op basis van een extreem beperkte hoeveelheid gegevens. Uiteindelijk zou kunnen blijken dat de kromme geen continu exponentiele vorm heeft maar juist meer steile en vlakke delen.<sup>241</sup> Meer onderzoek naar de werkelijk wereld-wijd in verschillende prijsklassen beschikbare hoeveelheid winbaar uranium is duidelijk nodig. Niettemin kan aangaande deze verbanden het volgende worden benadrukt:

- Alle suggereren dat de totale hoeveelheid uranium die winbaar is tegen prijzen van \$130/kgU of minder, waarschijnlijk twee tot zes keer zo groot is als de hoeveelheid, genoemd in het Rode Boek.
- Alle gaan uit van zeer conservatieve schattingen van de hoeveelheid uranium die winbaar is tegen een prijs op of onder de \$40/kgU. Als de wereldvoorraad van het voor die prijs winbare uranium tweemaal zo groot blijkt te zijn verdubbelt ook de hoeveelheid die winbaar is voor minder dan \$130/kgU.
- Verbanden tussen kostprijs en winbare voorraden die resulteren in lage schattingsniveaus zijn uitsluitend gebaseerd op geologische verbanden, zonder de waarschijnlijkheid mee te nemen dat verbeterde winningstechnologie in de toekomst voor lagere kosten zal zorgen. Aangezien technologische verbetering nagenoeg zeker is, zullen de totale voorraden die tegen een bepaalde prijs winbaar zijn in de toekomst hoogstwaarschijnlijk groter zijn dan deze schattingen suggereren - wellicht enorm veel groter. De geschiedenis van de koperwinning is illustratief: door verbeterde technologie halveerde de reële prijs tussen 1900 en 2000, ondanks toename van de vraag met een factor 25<sup>242</sup> en afname van het gemiddelde kopergehalte in het erts van 2 tot 0,85 percent.<sup>243</sup> Ondanks de spectaculaire toename van het jaarlijkse verbruik is het risico klein dat de wereld binnenkort zonder koper zit. In het geval van uranium: uit kopererts met een U-gehalte van slechts 4,5 ppm (parts per million, delen per miljoen) —minder dan twee keer wat gemiddeld in de aardkorst wordt aangetroffen— wordt het als bijproduct gewonnen tegen een kostprijs van minder dan \$52/kgU.<sup>244</sup>

Tenslotte is het van belang vast te stellen dat \$130/kgU nog steeds aanmerkelijk lager is dan de prijs waarbij het aantrekkelijk wordt om gebruikte splijfstof te gaan hergebruiken. Zoals reeds aangegeven in Hoofdstuk 2, moet de prijs van uranium meer dan \$360/kgU bedragen om hergebruik à \$1000/kgHM economisch interessant te maken. Bij die uraniumprijs zou de voorraad economisch winbaar uranium met een factor 10 toenemen.

#### **B.4. Uranium uit zeewater**

Zelfs indien in de verre toekomst de uraniumvoorko-

mens compleet uitgeput zouden raken is het nog maar de vraag of opwerking en hergebruik economisch interessant wordt. De concentraties zijn extreem laag (3 ppb, delen per miljard) maar in de oceanen is een enorme hoeveelheid van 4500 MtU opgelost. Onderzoek heeft aangetoond dat dat uranium met behulp van moderne adsorberende materialen uit zeewater kan worden gewonnen. Vooral in Japan is daar in recente jaren onderzoek naar gepleegd, in mindere mate in Frankrijk.

Tot op heden zijn met deze methoden slechts kleine hoeveelheden gewonnen. De voor dit onderzoek beschikbaar gestelde middelen waren uitzonderlijk gering, waarschijnlijk duizend maal minder dan wat de afgelopen jaren beschikbaar was voor onderzoek en ontwikkeling betreffende opwerking en kweken. Er zou nog veel onderzoek en ontwikkeling nodig zijn om vast te stellen of uranium op industriële schaal uit zeewater kan worden gewonnen en tegen welke prijs.

De nogal speculatieve schattingen van de kosten van uraniumwinning uit zeewater van de afgelopen jaren toonden aanzienlijke variatie. Een van de eerste experimenten betrof het pompen van zeewater door het adsorbent. In Japan draaide gedurende twee jaar een testfabriek maar het pompen bleek meer energie te kosten dan het gewonnen uranium zou kunnen opbrengen dus deze aanpak werd verlaten.<sup>245</sup> De aanvankelijk zeer hoge kostenschattingen (ruim boven \$1000/kgU) waren waarschijnlijk op deze methode gebaseerd.

Recentere methoden werken met vaste rekken met adsorbenten die in zeestromingen worden gehangen, waarbij een schip het gewonnen uranium verzamelt en aan boord verwerkt of naar een faciliteit aan de wal brengt. Japanse kostenschattingen betreffende deze aanpak uit het begin en het midden van de negentiger jaren liggen tussen \$200 en \$260/kgU (dollars uit die tijd).<sup>246</sup> Aan het einde van de jaren 90 kwamen zowel Japanse als Franse wetenschappers met lagere schattingen, zo rond \$100/kgU, alhoewel werd toegegeven dat deze zeer onzeker waren en niet onderbouwd door grondig technisch-wetenschappelijk onderzoek.<sup>247</sup> Zulke lage totale kosten lijken onwaarschijnlijk voor faciliteiten die de gebruikelijke financiële lasten van private ondernemingen moeten dragen en belasting moeten betalen. Sedertdien zijn de kostenschattingen, niet onverwacht, weer gestegen. Een Japanse publicatie uit 1999 verschaft een gedetailleerd overzicht van alle meegenomen kostenfactoren en komt op een schatting van ongeveer \$1200/kgU.<sup>248</sup> Deze publicatie blijkt uit te gaan van onrealistisch lage opbrengsten van geïnvesteerd kapitaal (in ieder geval voor Amerikaanse en Europese marktomstandigheden); invoering van financiële aannamen, vergelijkbaar met die

welke we hebben toegepast voor een regulier nutsbedrijf met een gegarandeerd rendement op geïnvesteerd kapitaal, zou de schatting tot boven \$1700/kgU brengen. In 2000, kwamen Franse onderzoekers met een schatting van ca. \$250/kgU, maar deze is gebaseerd op een simpele terugbetaling van het geïnvesteerde kapitaal zonder betaling van rente of belasting; uitgaan van onze eigen financiële aannames voor een regulier nutsbedrijf zou deze schatting verdubbelen.<sup>249</sup>

De volgens ons meest recente Japanse publicatie (uit 2001) beargumenteert een kostprijs voor de winning van uranium uit zeewater van 5-10 maal de huidige prijs van door mijnbouw gewonnen uranium; als we die kostprijs houden op de huidige contractprijzen van ongeveer \$35/kgU dan komt dat dus neer op 175-\$350/kgU, in wezen te vergelijken met de prijsschattingen van tien jaar geleden.<sup>250</sup> Gezien deze uiteenlopende schattingen koos het Rode Boek van 2001 \$300/kgU als representatief voor de huidige opvattingen over de prijs van uranium uit zeewater.<sup>251</sup>

De kosten van zo'n werkwijze zouden uiterst gevoelig zijn voor de eigenschappen van het gebruikte adsorbent. Hoe meer uranium er per kilo adsorbent wordt verzameld (en hoe sneller dit gebeurt), hoe goedkoper de werkwijze. De vooruitgang in de ontwikkeling van adsorptiematerialen was de afgelopen 10 jaar aanzienlijk en het is mogelijk dat deze vooruitgang doorgaat en de kosten verder omlaag brengt. Zowel Franse als Japanse onderzoekers hebben aangegeven dit waarschijnlijk te achten.

De prestaties van de huidige adsorptiematerialen zijn sterk afhankelijk van de temperatuur; bijgevolg is hun toepasbaarheid feitelijk beperkt tot warme oppervlaktewateren. Om de kosten tot een minimum te beperken gaan de huidige concepten bovendien uit van winning in stromingen dicht bij de kust. Toch zou de horizontale en verticale menging van de oceaan uranium in warme oppervlaktewateren eeuwenlang bereikbaar houden en dat met vrijwel constante concentratie, zo lang er niet meer gewonnen zou worden dan rond 2 MtU per jaar (30 maal het huidige verbruik).<sup>252</sup>

Deze kostenschattingen laten de waarde van metalen die samen met het uranium gewonnen worden buiten beschouwing. De huidige adsorptiematerialen die in Japan worden gebruikt vergaren bijna twee maal zo veel vanadium als uranium. Andere metalen, zoals cobalt, titanium en molybdeen worden ook meegewonnen.<sup>253</sup> Bij de huidige prijzen zouden zulke meegewonnen stoffen slechts voor een gering deel meebetalen aan de kosten van de winningsoperatie. Mochten die stoffen in de toekomst evenwel schaars en duur worden - wat rond dezelfde tijd zou kunnen zijn, dat uranium schaars en duur genoeg is geworden

om winning uit zeewater te overwegen - dan zou de waarde van deze meegewonnen stoffen de winningskosten per kgU substantieel omlaag kunnen brengen. Als uranium op een economische wijze uit zeewater zou kunnen worden gewonnen zou het een enorme energiebron voor de toekomst betekenen en zou de behoefte aan opwerken of kweken van plutonium eeuwenlang uitblijven. Maar zoals bovenstaande uiteenzetting duidelijk maakt is het nog lang niet zeker dat uranium op industriële schaal zal kunnen worden gewonnen tegen kosten beneden die voor opwerking. Gegeven het feit dat alle schattingen van de prijs van de winning van uranium uit zeewater ver boven de huidige uraniumprijs uitkomen, is er voor de industrie geen enkele stimulans om verdere ontwikkeling van deze concepten te ondersteunen. Wij adviseren een krachtig overheidsprogramma om zowel de totale, waarschijnlijk winbare aardse uraniumvoorraden met bijbehorende winningskosten, als de mogelijkheden van uraniumwinning uit zeewater verder te verkennen.

### B.5. Uraniumverbruik

Wie de bovenstaande schattingen van beschikbaar uranium naast schattingen van het toekomstig verbruik legt, ziet duidelijk dat de uraniumvoorraden gedurende zeer lange tijd niet uitgeput zullen raken. In 2001 gebruikte de wereld ruwweg 64.000 tU.<sup>254</sup> Bijgevolg representeert de Rode Boek raming van 17 MtU, winbaar voor \$130/kgU of minder, meer dan 250 jaar huidig verbruik.

Het is echter goed mogelijk dat er in de toekomst meer kernenergie zal komen en dat, als het wereldkernenergiepark voornamelijk steunt op de 'wegwerpcyclus' zonder opwerking, de jaarlijkse uraniumbehoefte aanzienlijk zal stijgen. Een recente studie door het NEA betreffende de mogelijke bijdrage van kernenergie aan de reductie van broeikasgassen beschouwde drie mogelijke scenario's van toekomstige groei van kernenergie. Het scenario met de hoogste groei zou tot 2030 slechts 5,6 MtU vereisen, een derde van het 17 MtU Rode Boek getal.<sup>255</sup> Nu is in sommige officiële documenten geopperd dat er al veel eerder een uraniumtekort kan ontstaan, maar daar wordt de mogelijkheid dat commerciële investeringen in operationeel maken van nieuwe mijnen te traag zullen inspelen op veronderstelde toekomstige groei van kernenergie - een kwestie van industriële structuur en het werken van prijssignalen in de markt - verward met werkelijk uitgeput raken van uraniumvoorraden die tegen lage kosten kunnen worden geëxploiteerd.<sup>256</sup>

Hogere schattingen van de groei van kernenergie zijn uiteraard ook mogelijk. In een uitvoerige studie van

energiescenario's uit 1998, demonstreerden de World Energy Council (WEC) en het International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) een groot aantal scenarios voor de toekomstige energievoorziening, met inbegrip van kernenergie.<sup>257</sup> 'Case B', door de onderzoekers als het meest plausibel beschouwd, hoorde bij de scenario's met de grootste uraniumvraag en werd door het 'Generation IV fuel cycle crosscut team' als basisvoorbeeld gebruikt om de invloed van grootschalige toekomstige groei van kernenergie te verkennen.<sup>258</sup> In 'Case B' zou het wereldwijd geïnstalleerde nucleaire vermogen groeien van 380 GWe in 1990 tot 800 GWe in 2020, rond 2000 GWe in 2050 en 5500 GWe in 2100. Gedurende de periode 2000-2100 zou kernenergie 1,4 miljoen terawatt-uur (TWh) - 1400 biljoen kWh - elektriciteit leveren.<sup>259</sup> Hoeveel uranium onder toepassing van de 'wegwerpcyclus' voor het produceren van zoveel elektriciteit zou worden verbruikt, is afhankelijk van de gebruikte reactortypen, de mate van opbrand van de splijtstof en het U-235-gehalte van het verarmde uranium. Voorzichtigheidshalve ervan uitgaande dat de reactoren LWR'n (LichtWaterReactoren) zijn met een gemiddelde opbrand over de gehele periode van 50 GWd/tHM (gigawattdag-thermisch per ton Heavy Metal), terwijl het verarmde uranium nog 0,2% U-235 bevat, zou er 19 tU/TWh (ton uranium per terawattuur) nodig zijn, wat t/m 2100 een totale consumptie van 26 MtU betekent.<sup>260</sup> Dit is niet wezenlijk meer dan de 17 MtU welke volgens de Rode Boek raming winbaar is voor hoogstens \$135/kg, doch minder dan de 33-100 MtU die betrekking (B.1) geeft met de eerder besproken waarden van  $\epsilon$ . Andere reactortypen, ontworpen voor efficiënter uraniumverbruik bij toepassing van de 'wegwerpcyclus', kunnen het uraniumverbruik bij zo'n hoge-groei scenario overigens nog aanzienlijk beperken. Kortom, het lijkt zeer waarschijnlijk dat nog gedurende de gehele 21e eeuw uranium winbaar zal blijven tegen zodanige kosten dat de kostprijs van verse splijtstof ruim onder de grens van \$1000/kgHM blijft, waarbij opwerking en hergebruik van gebruikte splijtstof lonend wordt.

-----

### Eindnoten

(de nummering van de oorspronkelijke publicatie is aangehouden).

211 Opmerkingen ter gelegenheid van de jaarvergadering van de WNFM op 9 juni 2003.

212 Voor een discussie van dertig jaar geleden (ter verdediging van het standpunt dat de uraniumvoorraden toen voldoende waren om de uitrol van kweekreactoren uit te stellen, wat later meer dan gerechtvaardigd bleek), zie John P. Holdren, Uranium Availabi-

lity and the Breeder Decision, Energy Systems and Policy, Vol. 1, No. 3, 1975.

213 Zie bijvoorbeeld U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science, and Technology, Report to Congress on Advanced Fuel Cycle Initiative: The Future Path for Advanced Spent Fuel Treatment and Transmutation Research (Washington, DC: January 2003, per 16 december 2003 beschikbaar op: [http://www.nuclear.gov/reports/AFCI\\_CongRpt2003.pdf](http://www.nuclear.gov/reports/AFCI_CongRpt2003.pdf)), pp. I-4: uranium "is geen onuitputtelijke hulpbron. Kennisorganisaties als de World Nuclear Association voorzien dat kerncentrales in de hele wereld tussen 2050 en 2080 te maken krijgen met ernstige uraniumtekorten voor de fabricage van de benodigde splijtstof." Het is de moeite waard deze verklaring te vergelijken met de officiële verklaring van de World Nuclear Association (voorheen het Uranium Institute) betreffende "Uraniumvoorziening", per 16 december 2003 beschikbaar op: <http://www.world-nuclear.org/info/inf75.htm>. Deze verklaring begint met de volgende zinnen, in het origineel benadrukt als kernpunten: "Uranium is een algemeen voorkomend metaal dat zowel in gesteenten als in zeewater wordt aangetroffen. Om te voorzien in de energiebehoefte van de wereld is het ruimschoots beschikbaar, zowel in geologische zin als door de aanwezige toepassingstechnologie. Alle grondstofvoorkomens zijn groter dan men gewoonlijk denkt." Verderop wordt gesteld: "Natuurlijk zijn de aardse hulpbronnen inderdaad eindig, maar ... de uitputtingsgrenzen zijn zo ver weg dat deze waarheid geen praktische betekenis heeft."

214 Ontleend aan Ian Hore-Lacy, Nuclear Electricity 7th ed. (Melbourne: Uranium Information Centre, Ltd en World Nuclear Association, 2003, per 16 december 2003 beschikbaar op <http://www.uic.com.au/ne.htm>), hoofdstuk 3. Terwijl deze referentie "hoogwaardig erts" definieert als een voorkomen met 2 gewichtsprocent uranium, winnen Canadese mijnen thans erts met meer dan 20% U3O8 (overeenkomend met ruim 17 gewichtsprocent U).

215 Hore-Lacy, Nuclear Electricity, eerder genoemd. Het is de moeite waard op te merken dat de verklaringen betreffende voorraden in deze tekst, die in deze Appendix worden geciteerd, alle woordelijk herhaald worden in de eerder genoemde verklaring van de World Nuclear Association betreffende "Uraniumvoorziening".

216 Hans-Holger Rogner, et al., Energy Resources, hoofdstuk 5 in Jose Goldemberg, ed., World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability (New York: United Nations Development Program, United Nations Department of Economic and



Social Affairs, and World Energy Council, 2000), pp.139-144; per 16 december 2003 beschikbaar op: <http://stone.undp.org/undpweb/seed/wea/pdfs/chapter5.pdf>.

217 id., pp. 144-147.

218 Voor een nuttige bespreking van de logische tekortkomingen van het klassieke model - nog steeds verbazingwekkend breed in gebruik, i.h.b. bij voorspellingen van toekomstige uraniumprijzen - zie M.A. Adelman, My Education in Mineral (Especially Oil) Economics, Annual Review of Energy and Environment, Vol. 22, 1997, pp. 13-46. Een andere uitstekende kritiek van het standaardmodel (steunend op voorbeelden betreffende uraniumvoorkomens) is Thomas L. Neff, Zijn Energiebronnen Onuitputtelijk? presentatie voor de Global Energy Prospects: Supply-Side Issues, London School of Economics and Political Science, November 11, 1985. Neff's antwoord komt in wezen dichtbij 'ja' en met betrekking tot uranium concludeert hij dat wij niet zozeer slachtoffer zijn van natuurlijke beperkingen als wel van onze eigen manier van denken over uraniumreserves en -voorkomens.

219 Zie bijvoorbeeld Adelman, My Education in Mineral (Especially Oil) Economics, eerder genoemd.

220 BP Statistical Review of World Energy 2003 (London: BP, June 2003); per 16 december 2003 beschikbaar op: [http://www.bp.com/files/16/statistical\\_review\\_1612.pdf](http://www.bp.com/files/16/statistical_review_1612.pdf).

221 id.

222 Craig B. Andrews, Mineral Sector Technologies: Policy Implications for Developing Countries (Washington, DC: The World Bank, 1992).

223 Daniel E. Sullivan, John L. Sznoppek, and Lorie A. Wagner, "20th Century U.S. Mineral Prices Decline in Constant Dollars" (Washington DC: U.S. Geological Survey, Open File Report 00-389, per 16 december 2003 beschikbaar op: <http://pubs.usgs.gov/openfile/of00-389/of00-389.pdf>).

224 OECD Nuclear Energy Agency, The Economics of the Nuclear Fuel Cycle (Paris, France: OECD/NEA, 1994), p. 36.

225 Bij een opwerkingsprijs van \$1000/kgHM vinden we in hoofdstuk 2 als middenwaarde van de bijbehorende evenwichtsprijs van uranium \$370/kgU, met een ondergrens (5 percent betrouwbaarheidsinterval) van \$220/kgU. Bij aanname van een uranium-

prijs van \$45/kgU in 2020 en daarna een jaarlijkse stijging met 1,2 percent, zou de uraniumprijs omstreeks 2150 \$220 bereiken en omstreeks 2200 \$370/kgU.

226 Op het moment dat dit wordt geschreven (midden 2003) is de meest recente editie Uranium 2001: Resources, Production, and Demand (Paris, France: OECD Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency, 2002).

227 'Estimated additional resources' (EAR) worden in twee categorieën gerapporteerd, EAR-I en EAR-II. EAR-I toont aanvullende voorraden waarvoor direct geologisch bewijs bestaat, terwijl EAR-II voorraden toont, waarvoor het bewijs meer indirect is. Voor meer specifieke definities - en hun samenhang met hoe belangrijke uraniumproducerende landen rapporteren - zie Uranium 2001, eerder genoemd, pp. 13-15.

228 Voor RAR, EAR-I, EAR-II, en SR is als winbaar voor minder dan \$130/kgU, respectievelijk opgegeven, 2.853, 1.080, 2.332 en 9.939 MtU. Zie Uranium 2001, eerder genoemd, pp. 21-27.

229 R. Price and J.R. Blaise, Nuclear Fuel Resources: Enough to Last? NEA News, No. 20.2, 2002, per 16 december 2003 beschikbaar op: [http://www.nea.fr/html/pub/newsletter/2002/20-2-Nuclear\\_fuel\\_resources.pdf](http://www.nea.fr/html/pub/newsletter/2002/20-2-Nuclear_fuel_resources.pdf).

230 International Symposium on the Uranium Production Cycle and the Environment, October 2000, Vienna, gerapporteerd in IAEA, International Symposium Concluded That Uranium Supply for Nuclear Power is Secure, PR 2000/26 (Vienna, Austria: IAEA, 6 oktober 2000, per 16 december 2003 beschikbaar op: [http://www.iaea.org/worldatom/Press/P\\_release/2000/prn2600.shtml](http://www.iaea.org/worldatom/Press/P_release/2000/prn2600.shtml)).

231 Zie Cameco, Cameco Increases McArthur River Uranium Reserves, persbericht, 25 januari 2001.

232 Uranium 2001, eerder genoemd, p. 26.

233 Uranium 2001, eerder genoemd, p. 27.

234 Uranium 2001, eerder genoemd, p. 28.

235 Nauwkeuriger gesteld: te verwachten valt dat afnemende kwaliteit en bereikbaarheid van ertsen (als technologische verbeteringen er geen gelijke tred mee houden) leidt tot toenemende winningskosten. Het verband tussen winningskosten en marktprijzen is ingewikkeld, dit in verband met monopolie- en kartelmacht, verwachtingen omtrent toekomstige

stige prijzen, kosten voor het uitrollen van aanvullende productiecapaciteit, kosten voor het opwaarderen van aanvullende voorraden tot reserves, vraagelasticiteit, enz. De uraniummarkt, die wordt gekenmerkt door aankopers van nutsbedrijven, voor wie uranium slechts een klein deel van de kosten van elektriciteitsproductie uitmaakt, maar voor wie het van groot belang is dat de brandstof beschikbaar is als ze haar nodig hebben, is in het bijzonder gevoelig voor 'percepties' van toekomstige tekorten of overschotten (daarom is de prijs de laatste 2 decennia behoorlijk wisselvallig geweest). Desalniettemin wordt in de uraniummarkt in het algemeen extra productiecapaciteit uitgerold zodra de prijzen voldoende stijgen om zulks voor producenten winstgevend te maken (rekening houdend met de risico's, waaronder het risico dat de prijs weer gaat zakken). Beperkte reserves plegen dus niet te worden gespaard voor latere productie, als de prijzen wellicht hoger zijn; m.a.w., producenten neigen ertoe te handelen "alsof hun eindige reserves onuitputtelijk zijn". (Adelman, *My Education in Mineral (Especially Oil) Economics*, eerder genoemd). Als dit gedrag wordt voortgezet en er geen duurzaam kartel wordt gevormd, kan het niet anders of de gemiddelde lange-termijn prijzen worden bepaald door de productiekosten plus een concurrerende winstopslag. In het volgende refereren we alleen aan prijzen, beseffend dat prijzen zich i.h.a. zodanig ontwikkelen dat producenten hun erts kunnen benutten en tegelijkertijd een concurrerende winst maken.

236 Hore-Lacy, *Nuclear Electricity*, eerder genoemd.

237 De voor deze lage kostprijs winbare voorraden zijn de het best geëxploreerde en gekarakteriseerde en vormen bijgevolg de beste beschikbare basis voor het calibreren van zo'n betrekking. Niettemin staat vast dat ze aan de behoudende kant zijn. De Rode Boek cijfers voor deze lage-kosten categorie omvatten uitsluitend de het best gekarakteriseerde erts (eerder gelijkwaardig aan reserves dan aan voorraden); het is zo goed als zeker dat extra investeringen in exploratie de hoeveelheid grondstof die als winbaar voor deze kostprijs is aangeduid, nog aanzienlijk zou doen toenemen. Bovendien geeft het Rode Boek zelf aan dat de totale hoeveelheid, aangeduid als winbaar voor hoogstens \$40/kgU, groter is dan in de tabellen vermeld, omdat bepaalde landen, merendeels uit een oogpunt van geheimhouding, geen voorraadramingen rapporteren. *Uranium 2001*, eerder genoemd, p. 22.

238 Kenneth S. Deffeyes and Ian D. MacGregor, *World Uranium Resources*, *Scientific American*, januari 1980. Dit artikel is gebaseerd op Kenneth S. Deffeyes and Ian D. MacGregor, *Uranium Distribu-*

*tion in Mined Deposits and in the Earth's Crust: Final Report GJBX-1(79)* (Princeton, NJ: Department of Geological and Geophysical Sciences, Princeton University, 1978). Er wordt op gewezen dat Deffeyes niet bepaald een loszinnige hulpbronnenoptimist is: zijn laatste boek is *Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage* (Princeton: Princeton University Press, 2001). Voor een heel andere poging uit dezelfde periode om de werelduraniumvoorraden te bepalen (die eveneens zelfs toen al concludeerde dat de voorraden zeer waarschijnlijk groter waren dan nu in het Rode Boek gerapporteerd), zie DeVerle P. Harris, *World Uranium Resources*, *Annual Review of Energy* 1979 4:403-32. Zie eveneens Neff, *Are Energy Resources Inexhaustible?* eerder genoemd. Voor recenter werk, zie Thomas C. Pool, *Uranium Resources for Long-Term, Large-Scale Nuclear Power Requirements*, *Nonrenewable Resources*, Vol. 3 No. 4, 1994, pp. 257-265. Evenals Neff is Pool er zo sterk van overtuigd dat het zeer onwaarschijnlijk is dat de hoeveelheid winbaar uranium een belangrijke beperking zal opleggen aan de toekomstige grootschalige ontwikkeling van kernenergie, dat hij niet poogt een getal te noemen bij de totale te verwachten hoeveelheid winbaar uranium.

239 U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, *Generation IV Roadmap: Report of the Fuel Cycle Crosscut Group* (Washington, DC: DOE, 18 maart 2001 beschikbaar op: <http://www.ne.doe.gov/reports/GenIVRoadmapFCCG.pdf>), pp. 1-30.

240 Op onverklaarbare wijze blijkt de Generation IV fuel cycle crosscut group zijn betrekking foutief te hebben gecalculeerd, leidend tot een constante van 77,4, wat tot gevolg zou hebben dat alle voorraden bij alle vermelde prijzen ver onder de in het Rode Boek gerapporteerde waarden zouden uitkomen. (Rapport van de Fuel Cycle Crosscut Group, eerder genoemd, pp. 1-30). Deze fout is voor het rapport van de groep echter niet van groot belang, daar het feitelijke model dat zij gebruikt voor het ramen van uraniumvoorraden als functie van de prijs, is gebaseerd op lineaire interpolatie van de cijfers in het Rode Boek van 1999 (zie de bespreking op pp. A2-12-A2-14), en houdt geen verband met de exponentiële vergelijking, gegeven op pp. 1-30.

241 Zo omvat een van de modellen, naast met afnemend gehalte van het erts toenemende kosten, kosten die bij elk gegeven gehalte globaal lineair toenemen met de hoeveelheid reeds eerder gedolven erts van dat gehalte, aangezien eerst het makkelijk te ontginnen erts werd gedolven en er moet worden voortgegaan met minder makkelijk te delven erts. Dit complexere model voorspelt een vlakke kromme (en bijgevolg lagere verwachtingen van omtrent de totale

wereldvoorraden die winbaar zijn bij hogere prijzen). Zie Clifford E. Singer, *An Analytical Uranium Sources Model*, in *Proceedings of the Technical Committee Meeting on Recent Developments in Uranium Resources, Production, and Demand* (Vienna, 10-13 June, 1997) (Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 1998), pp. 27-38. We hebben de bespreking in dit hoofdstuk gebaseerd op het eenvoudiger model, gebaseerd op exponentiële verdelingen van het gehalte van het erts, deels omdat de bestaande ervaring met een reeks minerale voorkomens tot dusverre doet verwachten dat de reële winningskosten bij een gegeven gehalte van het erts niet zijn gestegen (wellicht doordat kostenreducties door technologische vooruitgang het toenemen van de exploitatiekosten bij moeilijker bereikbare ertsen tegenwerkt). Raadpleging van de VS Geologische Overzichtsgegevens, die een breed assortiment van mijnbouwproducten betreffen en verscheidene decaden omvatten, laat zien dat de reële prijzen van die mijnbouwproducten waarvoor de vraag jaarlijks het sterkst steeg, als regel vlak of dalend zijn en dat prijzen eerder neigen tot een lichte daling dan tot stijging. (William Sailor, persoonlijke mededeling, 2003).

242 Kenneth E. Porter and Daniel L. Edelstein, *Copper Statistics*, (Washington, DC: U.S. Geological Survey, August 28, 2002, per 16 december 2003 beschikbaar op: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/of01-006/copper.html>). Deze raming van een daling over deze periode met een factor 2 is gebaseerd op het bepalen van een trendlijn op basis van de hier gerapporteerde statistische gegevens; de feitelijke verhouding van de reële prijs in 2000 tot die in 1900 bedraagt 3,8, omdat er rond 2000 een prijsdip was en rond 1900 juist een piek (De auteurs danken William Sailor van Los Alamos National Laboratory voor besprekingen over dit punt).

243 Oscar Groenveld, *The Technology Environment for the 21st Century—The Mining Industry*, presentation to the Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 1998, per 16 december 2003 beschikbaar op: <http://www.atse.org.au/publications/symposia/proc-1998p1.htm>.

244 Beschreven in Pool, *Uranium Resources for Long-Term, Large-Scale Nuclear Power Requirements*, eerder genoemd.

245 Dit is bijvoorbeeld kort besproken in T. Kato, K. Okugawa, Y. Sugihara, and T. Matsumura, *Conceptual Design of Uranium Recovery Plant From Seawater*, *Journal of the Thermal and Nuclear Power Engineering Society* (in het Japans), 50, 1999, pp. 71-77.

246 Zie Toru Hiraoka, *Nuclear Electricity Generation by Seawater Uranium*, *Journal of the Atomic Energy Society of Japan* (in het Japans), Vol. 36, No. 7 (1994), pp. 644-645 (ongeveer \$200/kgU), en H. Nobukawa et. al, *Development of a Floating Type System for Uranium Extraction from Seawater Using Sea Current and Wave Power*, *Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, April 10- 15, 1994, pp. 294-300 (ongeveer \$260/kgU).

247 Tadao Seguchi, directeur materiaalontwikkeling bij het Japan Atomic Energy Research Institute, schatte de kosten op ca. \$100/kgU (artikel gepresenteerd bij Tokyo University-Harvard University workshop, Tokyo, May 23, 1998); Seguchi stelde de kosten later op \$100-\$300/kgU, voor een fabriek die 200 tU/yr produceert, maar benadrukte dat zijn specialisme adsorbentontwikkeling was, geen kostenraming (persoonlijke mededeling aan Richard L. Garwin, 23 oktober 1998). Jacques Foos, President van de CNAM Laboratory of Nuclear Sciences, bracht een rapport uit, gebaseerd op een literatuuronderzoek, dat voor toepassing van toen bestaande technologie op een marge van \$300-\$370/kgU kwam, maar suggereerde tevens dat dit door toepassing van meer geavanceerde technologie, in onderzoek bij zijn laboratorium, zou kunnen dalen tot \$80/kgU, echter benadrukkend dat deze raming een zeer voorlopige was. (Foos, persoonlijke mededeling aan J. Syrota, doorgegeven aan Richard L. Garwin en Georges Charpak, 3 april 1997.)

248 Kato, et al., *Conceptual Design of Uranium Recovery Plant From Seawater*, eerder genoemd.

249 Jacques Foos, de raming is in detail beschreven in Richard L. Garwin, *Uranium From Seawater—A Green Fuel for the Future?* nog te publiceren.

250 T. Sugo et al., *Recovery System For Uranium From Seawater With Fibrous Adsorbent and its Preliminary Cost Estimation*, *Journal of the Atomic Energy Society of Japan* (in het Japans) 43 (10): 1010-1016, October 2001. Zie ook het eerdere T. Sugo en K. Saito, *Progress in Recovery Technology of Uranium From Seawater*, *Journal of the Atomic Energy Society of Japan* (in het Japans), 36, 619-623, 1999.

251 Zie *Uranium 2001*, eerder genoemd, p. 28. Het Generation IV crosscut team koos als waarde \$200/kgU, met de opmerking dat zulke ramingen in hoge mate speculatief zijn. Rapport van de Fuel Cycle Crosscut Group, eerder genoemd, pp. 1-20, pp. 1-30.

252 Dit is een globale schatting door de auteurs, gebaseerd op de sterkte van de uitwisseling tussen oppervlaktewater en diep oceaanwater, alsmede de verticale en horizontale menging binnen oppervlaktewateren, terwijl werd aangenomen dat het winnen van uranium is verdeeld over de vijf voornaamste oceaangebieden (noordelijke en zuidelijke Stille Oceaan, noordelijke en zuidelijke Atlantische Oceaan en Indische Oceaan).

253 Zie bijvoorbeeld Takanobu Sugo, Uranium Recovery From Seawater (Tokyo, Japan: Japan Atomic Energy Research Institute, 1999).

254 Uranium 2001, p. 49.

255 OECD Nuclear Energy Agency, Nuclear Power and Climate Change (Paris, France: OECD/NEA, 1998, per 16 december 2003 beschikbaar op: <http://www.nea.fr/html/ndd/climate/climate.pdf>). Het 5,6 MtU cijfer zal voor de hoeveelheid volgens het scenario geproduceerde kernenergie een overschatting zijn, daar er kennelijk geen rekening is gehouden met verlaging van het U-235 gehalte in het verarmde uranium als uranium duurder wordt.

256 Zie bijvoorbeeld DOE, Report to Congress on Advanced Fuel Cycle Initiative, eerder genoemd, pp. I-4-I-5, waar een studie wordt beschreven die aangaf dat de productie uit reeds geplande en geprojecteerde mijnen tegen 2030 slechts in de helft van de voor een hoge groei scenario voorspelde behoeften zou kunnen voorzien. De conclusie dat zulks aantoonde dat nucleaire brandstof uit gedolven uranium in de niet al te verre toekomst een ernstige beperking van het groeipotentieel van kernenergie zou kunnen worden, is eenvoudig onjuist, evenals de implicatie dat er ook maar een enkele van de door het Advanced Fuel Cycle Initiative nagestreefde technologieën tijdig zou kunnen worden ontwikkeld en uitgerold om veel effect te kunnen hebben op de bevoorrading rond 2030, mocht die dan een ernstig probleem zijn.

257 N. Nakicenovic, A. Grübler, and A. McDonald, eds., Global Energy Perspectives (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998).

258 Report of the Fuel Cycle Crosscut Group, eerder genoemd, pp. 1-33.

259 Berekend met gegevens, beschikbaar bij International Institute of Applied Systems Analysis, Global Energy Perspectives Database, per 16 december 2003 beschikbaar op: [http://www.iiasa.ac.at/cgibin/ecs/book\\_dyn/bookcnt.py](http://www.iiasa.ac.at/cgibin/ecs/book_dyn/bookcnt.py).

260 Steve Fetter, Commentaar op 'Report of the Fu-

el Cycle Crosscut Group,' nog ongepubliceerd memo, April 2002. Een U-235 gehalte van 0,2% in de verarmde fractie zou tot een minimum van de totale brandstofcycluskosten leiden als de uraniumprijs 1,3 keer de verrijkingsprijs bedraagt (bijvoorbeeld \$130/kgU bij 100/SWU) (SWU = Separation Work Unit). Deze tekst is een vertaling van Appendix B1 van The economics of reprocessing vs. direct disposal of spent nuclear fuel. van december 2003 door Matthew Bunn, Steve Fetter, John P. Holdren en Bob van der Zwaan van de Harvard Universiteit.

---

#### Enkele citaten over de uraniumvoorraden in de wereld:

**'(...)zijn de bewezen wereldvoorraden van uranium tegen de huidige kostprijs voldoende om bestaande kerncentrales, die in zes procent van de wereldenergieproductie voorzien, ongeveer twintig jaar te laten draaien. Volkskrant (6-2-07)**

**'Bovendien is kernenergie een tussenoplossing, over 50 tot 100 jaar bij groot-schalig gebruik zijn de voorraden uitgeput', Joep Engels in Trouw (18-2-06)**

**'En ook de wereldwijde voorraden uranium zijn beperkter dan die van gas olie of kolen'. Diederik Samsom in Trouw (5-1-06)**

**'Het is ook geen duurzame oplossing, want uranium is als grondstof over niet al te lange tijd uitgeput.' Femke Halsema Nu.Nl (7-11-06)**

**'"Terwijl de bekende voorraad 3,9 miljoen ton is, gaat het Rathenau instituut uit van een uiteindelijk winbare voorraad van 30-100 miljoen ton. (...) Daar komt nog bij dat er over een paar jaar al een uraniumtekort dreigt'. Anti-kernenergieactivist Herman Damveld, 2004**