

Uraniumwinning

Voorzieningszekerheid, milieu- en
gezondheidseffecten en relevantie voor
Nederland

Clingendael International Energy Programme

Uraniumwinning

Voorzieningszekerheid, milieu- en
gezondheidseffecten en relevantie voor
Nederland

Clingendael International Energy Programme

Oktober 2006

Deze studie is onder verantwoordelijkheid van het Clingendael International Energy Programme geschreven voor het ministerie van VROM.

Projectleider: Stephan Slingerland (CIEP)

Research team:

Lucia van Geuns (CIEP)

Jacques de Jong (CIEP)

Harry Croezen (CE)

Benno Schepers (CE)

Jos Benner (CE)

Roland Jansma (NRG)

Emmy Meijne (NRG)

Cor Timmermans (NRG)

Jan van Hienen (NRG)

De auteurs van dit rapport willen graag de volgende personen en instanties bedanken die hebben bijgedragen aan het tot stand komen van dit rapport: De begeleidingscommissie, bestaande uit prof. K. Weber, dr A.B. Westerhof (Westcourt Geoconsult), drs. J. Thijssen en dr. R. Teule (Greenpeace) en dr. G. Delfini (Ministerie VROM); Verder prof. T.H.J.J. van der Hagen en staf van het Reactor Instituut Delft, dhr J. Wieman (EPZ) en dhr A. Keverling Buisman, die eerdere versies van het rapport van aanvullend commentaar hebben voorzien.

Clingendael International Energy Programme (CIEP)

CIEP is affiliated to the Netherlands Institute of International Relations 'Clingendael'. CIEP acts as an independent forum for governments, non-governmental organisations, the private sector, media, politicians and all others interested in changes and developments in the energy sector.

CIEP organises lectures, seminars, conferences and roundtable discussions. In addition CIEP members of staff lecture in a variety of courses and training programmes. CIEP's research, training and activities focus on three themes:

- regulation of energy markets (oil, gas, electricity) in the European Union;
- the international economic and geopolitical aspects of oil and gas markets, particularly with respect to the European Union security of supply;
- energy and sustainable development.

CIEP is endorsed by BP, the Dutch Ministry of Economic Affairs, Eneco, Energie Beheer Nederland, Essent, the Dutch Ministry of Foreign Affairs, Gasunie, ING, NAM, NUON, Oranje-Nassau Groep, Port of Rotterdam, Shell Nederland, the Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, Vopak Oil Europe Middle East and Wintershall.

CIEP-publications and research results are made available primarily through the CIEP website: www.clingendael.nl/ciep.

Title : Uraniumwinning
Subtitle : Voorzieningszekerheid, milieu- en gezondheidseffecten en relevantie voor Nederland
Copyright : 2006 Clingendael International Energy Programme
Published by : Clingendael International Energy Programme
Address: : Clingendael 7, 2597 VH The Hague, The Netherlands
P.O. Box 93080, 2509 AB The Hague, The Netherlands
Telephone: +31 70 374 66 16
Telefax: +31 70 374 66 88
E-mail : ciep@clingendael.nl

Inhoudsopgave

Samenvatting	5
1. Inleiding.....	9
1.1. Achtergrond.....	9
1.2. Leeswijzer	9
2. De kernenergieketen.....	11
2.1. De kernenergieketen in vogelvlucht.....	11
2.2. Winning van uranium.....	13
2.2.1. Dagbouw en ondergrondse mijnbouw	13
2.2.2. Oplossingsmijnbouw	14
2.3. Conversie.....	15
2.4. Verrijking	15
2.5. Productie brandstofstaven en elektriciteitsproductie.....	16
3. Uraniumvoorraden.....	17
3.1. Geologische voorkomens en verspreiding	17
3.2. Indelingen van uraniumvoorraden.....	18
3.2.1. Kwaliteit van het erts	18
3.2.2. Economische winbaarheid en zekerheid van voorkomen.....	19
3.3. Dynamiek van uraniumvoorraden	20
3.4. Niet-conventionele voorraden	21
3.5. Conclusies	21
4. De uraniummarkt.....	23
4.1. Vraag naar uranium	23
4.1.1. Uranium ten opzichte van andere primaire energiebronnen	23
4.1.2. Huidige en toekomstige kerncentrales	24
4.1.3. Alternatieve brandstoffen voor kerncentrales.....	26
4.1.4. Resulterende projecties voor uraniumvraag.....	27
4.2. Aanbod van uranium	27
4.2.1. Opwerking	28
4.2.2. Militaire voorraden	28
4.2.3. Civiele voorraden.....	28
4.2.4. Verarmd uranium.....	28
4.3. Werking van de uraniummarkt.....	29
4.3.1. Spelers.....	29
4.3.2. De prijs van uranium	29
4.4. Scenario's voor uraniumvraag en -aanbod.....	31
4.5. Conclusies	34
5. Milieu- en gezondheidseffecten	35
5.1. Effecten op het milieu	35
5.1.1. Mijnbouwvorm en milieuverontreiniging.....	35

5.1.1. Effecten van verontreinigingen.....	38
5.1.2. Kwantificering overige milieueffecten naar uraniumproductie en energieproductie	40
5.2. Effecten op de gezondheid	42
5.2.1. Effecten van blootstelling	42
5.3. Vergelijking met winning van steenkool en aardgas.....	46
5.4. Conclusie.....	47
6. Relevantie voor Nederland	49
6.1. Voorzieningszekerheid.....	49
6.2. Milieu- en gezondheidseffecten	49
6.3. Discussie en aanbevelingen.....	50
Literatuur.....	51
Annex A: Overzicht kernenergie wereldwijd	55
Annex B: Radiologische aspecten	57

Samenvatting

Uranium is een grondstof voor elektriciteitsopwekking door middel van kernenergie. Op verzoek van het ministerie van VROM evalueert dit rapport in meer detail voorzieningszekerheidsaspecten en milieu- en gezondheidseffecten van uraniumwinning. De focus ligt daarbij op de relevantie hiervan voor de Nederlandse situatie.

Dit rapport doet geen uitspraken over de wenselijkheid van kernenergie in Nederland, of over effecten van andere onderdelen van de kernenergieketen dan uraniumwinning.

Hoofdstuk 2 van dit rapport geeft een inleidend overzicht van de kernenergieketen en de rol van uraniumwinning hierin. Uranium kan op drie verschillende manieren gewonnen worden: via dagbouw, ondergrondse mijnbouw of oplossingsmijnbouw. Via de tussenstappen conversie en verrijking kunnen vervolgens brandstofstaven voor kerncentrales worden geproduceerd.

Hoofdstuk 3 gaat nader in op de wereldwijde uraniumvoorraden. Inschattingen over de grootte van de voorraden uranium wereldwijd hangen af van de kwaliteit en kwantiteit van het erts, de kosten van winning en de mate van zekerheid waarmee voorraden aangetoond zijn. Afhankelijk van de gekozen variabelen variëert de op dit moment bekende ‘conventionele’ wereldvoorraad uranium tussen 2 en 4,7 mln ton. De huidige wereldvraag naar uranium bedraagt 67.000 ton per jaar. Daarnaast bestaan nog zogenoemde ‘speculatieve’ en ‘hypothetische’ voorraden, waarvan het bestaan in onvoldoende mate bewezen is, of vermoed wordt op basis van geologische modellen maar vooralsnog niet als ‘bewezen reserve’ is aangetoond. Als ordegrootte hiervan wordt 10 mln ton genoemd.

Bovenop de ‘conventionele’ voorraden uranium in ertsen bestaan nog zogenoemde ‘onconventionele’ voorraden uranium in onder meer zeewater, ‘black shale’ gesteente en fosfaaterts. De grootte hiervan is niet precies bekend, maar overtreft vermoedelijk de bekende wereldvoorraden ruimschoots. Technische winbaarheid van de onconventionele voorraden is voor wat betreft fosfaaterts in de praktijk aangetoond, maar deze winning is vanwege marktomstandigheden opgegeven.

De bekende voorraden uranium zijn geografisch verspreid over de wereld. Meer dan de helft van de goedkoop te winnen voorraden komen voor in drie landen: Australië, Kazachstan en Canada. Maar ook zijn er substantiële voorraden aangetoond in o.a. de VS, Zuid-Afrika, Rusland, Namibië, Niger, Brazilië, Mongolië en Uzbekistan.

Hoofdstuk 4 gaat in op marktwerking in de mondiale uranium- en elektriciteitsmarkt. De wereldwijde vraag naar elektriciteit neemt naar verwachting in de komende jaren sterk toe. Als één van de opties om elektriciteit op te wekken staat kernenergie weer in toenemende mate in de belangstelling, onder ander door hoge olie- en gasprijzen, vragen rondom voorzieningszekerheid en het klimaatvraagstuk.

De vraag naar uranium is afhankelijk van een groot aantal factoren, waaronder de ontwikkelingen bij met name gas, kolen en hernieuwbare energie, het aantal draaiende kernreactoren wereldwijd, technologische ontwikkelingen en de beschikbaarheid van andere bronnen dan primair uranium. Er zijn meerdere reactoren in aanbouw, met name in China en India, en er zijn wereldwijd plannen voor een nog groter aantal reactoren. De vraag naar uranium zal hierdoor in ieder geval op korte termijn stijgen, maar of deze groei van de vraag ook op langere termijn doorzet is onduidelijk.

Het aanbod van uranium wordt in de huidige marktomstandigheden mede bepaald door de beschikbaarheid van zogenoemde secundaire voorraden, zoals uit opwerking, militaire voorraden, civiele voorraden en verarmd uranium. Deze spelen naar verwachting in ieder geval tot circa 2015 een belangrijke rol op de markt.

Hoe lang de huidige totale mondiale uraniumvoorraden meegaan is onder meer afhankelijk van de prijs die men voor uranium wil betalen. Bij grotere vraag stijgt de prijs en zullen meer uraniumvoorraden economisch winbaar zijn. Winning van voorraden met zeer lage concentraties is vooral afhankelijk van technologische ontwikkeling. De komende decennia zullen de geologisch beschikbare uraniumvoorraden naar verwachting geen beperkende factor zijn voor de wereldwijde toepassing van kernenergie. Of dat ook voor de langere termijn geldt is op dit moment moeilijk te overzien.

Bij stijgende vraag en continuering van de huidige productiecapaciteit zal mogelijk rond 2015 een gat ontstaan tussen productiecapaciteit en vraag, met hogere uraniumprijzen tot gevolg. Ook kan mogelijk marktfrictie ontstaan door de lange aanlooptijd van het in gebruik nemen van nieuwe uraniummijnen. Wanneer de gevolgen van de schaarste beperkt blijven tot een hogere uraniumprijs zullen deze geen belemmerende factor vormen voor de inzet van kernenergie, aangezien de uraniumprijs maar een klein deel uitmaakt van de totale kosten van kernenergie.

Wel kan de uraniumvoorziening bij toenemende schaarste mogelijk afhankelijk worden van een beperkt aantal exporterende landen. Landen met grote reserves zijn met name Australië, Canada en Kazachstan. Ook kunnen milieu- en gezondheidseffecten bij exploitatie van laagwaardiger uraniumertsen mogelijk toenemen.

Hoofdstuk 5 van dit rapport bespreekt milieu- en gezondheidseffecten van uraniumwinning. Mijnbouwafval bevat hoge concentraties zware metalen. Ook treden door het mijnbouwafval emissies op van de vervalproducten van uranium, waaronder radon. Afdekking beperkt deze emissies. Als de 'tailings' niet worden afgedekt, kunnen deze ook verstuiven en afspoelen waardoor dit materiaal in de omgeving wordt verspreid en daarmee ook de zware metalen en radioactieve stoffen die zich daarin bevinden. Dit kan zorgen voor een voortdurende belasting van de omgeving in de vorm van lokaal verhoogd stralingsniveau en verspreiding van (radioactief) stof en radon. Bij mijnen in het verleden heeft deze afdekking niet plaatsgevonden. Tegenwoordig worden bij zorgvuldige mijnbouw de 'tailings' wel afgedekt en wordt het landschap na beëindigen van de mijnbouwactiviteit hersteld. Onduidelijk is of dit ook bij alle mijnen en in alle landen even nauwkeurig gebeurt.

Blootstelling aan concentraties zware metalen, radioactieve stof en radon, die vrijkomen uit de bovengronds opgeslagen 'tailings' en ander mijnafval, heeft nadelige effecten op de gezondheid, evenals de blootstelling (op locatie) aan de ioniserende straling vanuit de opgeslagen afvalstoffen. In deze studie zijn zover het radioactieve stoffen en straling betreft, de nadelige gezondheidseffecten gekwantificeerd in termen van stralingsdoses die bij blootstelling worden ontvangen. Deze stralingsdoses zijn vergeleken met jaarlijkse dosislimieten zoals die in Nederland van toepassing zijn. Bij de blootgestelde werknemers en bij een fictieve buiten de winninglocatie permanent wonende persoon voldoen de gemeten, respectievelijk, geschatte jaardoses aan deze limieten, bij een groep niet-sedentaire jagers/verzamelaars, en in andere gerapporteerde praktijksituaties, worden de limietwaarden overschreden.

Afhankelijk van het type mijnbouw, dagbouw, ondergrondse mijnbouw of oplossingsmijnbouw bedraagt bij uraniumwinning de hoeveelheid geproduceerd afval per ton gewonnen uranium maximaal 5000 ton voor dagbouw. Bij oplossingsmijnbouw wordt de kleinste hoeveelheid afval

geproduceerd. Bij oplossingsmijnbouw met een goede nazorg, na beëindiging van de activiteit, zijn de milieueffecten en daarmee de gezondheidseffecten het geringst.

Bij toenemende schaarste van uranium in de toekomst kunnen milieueffecten toenemen, doordat de hoeveelheid om te zetten materiaal en het (fossiele) energieverbruik voor winning zal stijgen. Door dat laatste nemen ook CO₂-emissies in de kernenergieketen toe.

In Nederland betrok EPZ recentelijk (2004) EPZ zijn uranium uit Kazachstan, waar ISL een belangrijke manier van mijnbouw is. De installaties waarvan EPZ zijn grondstoffen betreft, zijn ISO 14001 gecertificeerd door bureau Veritas Quality International.

Hoofdstuk 6 van dit rapport bespreekt de relevantie van de bevindingen voor de Nederlandse situatie. Het lijkt onwaarschijnlijk dat de eerste decennia leveringsproblemen van uranium aan Nederland te verwachten zijn. Ook de eventuele gevolgen van prijsstijgingen lijken beperkt, aangezien kernenergie maar een klein deel van de totale kosten van kernenergie uitmaakt. Op de langere termijn is de leveringszekerheid minder duidelijk. Doordat uraniumwinning buiten Nederland plaatsvindt, treden ook de milieu- en gezondheidseffecten hiervan elders op. Het aspect van ketenverantwoordelijkheid in de energieketen roept echter de vraag op of Nederland al dan niet een medeverantwoordelijkheid moet nemen voor deze milieu- en gezondheidseffecten. Aanbeveling van dit rapport is om een bredere discussie hierover te voeren, waarbij ook milieu- en gezondheidseffecten buiten Nederland van andere primaire energiebronnen betrokken worden.

1

Inleiding

1.1. Achtergrond

In de geliberaliseerde elektriciteitsmarkt is het bouwen van een elektriciteitscentrale en de keuze van het type aan de markt overgelaten. De overheid is wel verantwoordelijk voor het stellen van de randvoorwaarden waaraan voldaan moet worden. De Staatssecretaris van VROM heeft zijn visie over de randvoorwaarden vanuit oogpunt van veiligheid, ruimte en milieu in september 2006 aan de Tweede Kamer gezonden. Eén van de aspecten die hierbij een rol spelen is de winning van uraniumerts.

Dit rapport bekijkt naar aanleiding hiervan, en op verzoek van het ministerie van VROM, uraniumwinning in meer detail. Het rapport gaat specifiek in op mogelijke milieu- en gezondheidsproblemen bij uraniumwinning en op het aspect voorzieningszekerheid, en de relevantie hiervan voor Nederland.

Dit rapport doet geen uitspraken over de wenselijkheid van kernenergie in Nederland, of over effecten van andere onderdelen van de kernenergieketen dan uraniumwinning.

1.2. Leeswijzer

Hoofdstuk 2 van dit rapport geeft een overzicht van de kernenergieketen en de plaats van uraniumwinning daarin. Hoofdstuk 3 gaat in op uraniumvoorraden en gebruikelijke indelingen daarvan. Hoofdstuk 4 bekijkt de uraniummarkt vanuit een vraag- en aanbodperspectief. De milieu- en gezondheidseffecten van uraniumwinning worden weergegeven in hoofdstuk 5. Het laatste hoofdstuk geeft enkele conclusies en aanbevelingen over de relevantie van milieu- en gezondheidseffecten en voorzieningszekerheidsaspecten voor Nederland.

2

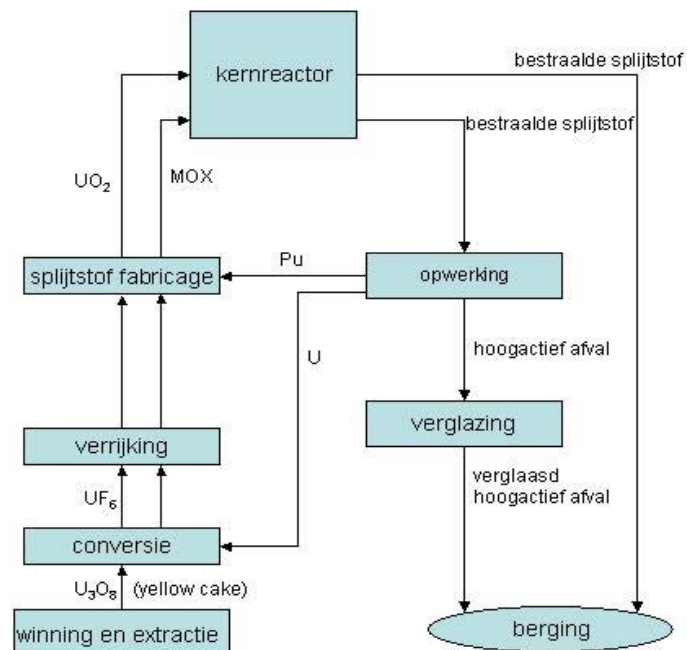
De kernenergieketen

Voor de opwekking van elektriciteit door kerncentrales is een keten van processen nodig, die begint met de winning van uranium en eindigt met de langdurige opberging of recyclage van afvalstoffen. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van deze zogenoemde ‘kernenergieketen’. In technische termen wordt hieraan ook gerefereerd als de ‘splijfstofcyclus’.

2.1. De kernenergieketen in vogelvlucht

Kernenergie is één van de manieren die op dit moment wereldwijd beschikbaar zijn om elektriciteit op te wekken. Om dat te kunnen doen zijn een aantal stappen nodig waarin natuurlijk voorkomend uranium omgezet wordt in brandstof (‘splijstof’) voor kerncentrales. De keten van uranium tot brandstof en verder gebruik of opslag als afval wordt hier verder aangeduid als de kernenergieketen. Figuur 2.1 geeft de verschillende stappen in deze kernenergieketen weer.

Figuur 2.1: De kernenergieketen



Uranium komt over de hele wereld voor in verschillende soorten gesteenten en in rivier- en zeewater. In veel gevallen gaat het om zeer lage concentraties die niet, of niet gemakkelijk gewonnen kunnen worden. Alleen op een aantal plaatsen komt uranium in voldoende hoge concentratie voor om door middel van mijnbouw gewonnen te kunnen worden.

Na mijnbouw wordt het uranium gewonnen uit het erts via extractieprocessen. Door opeenvolgende bewerkingsstappen (respectievelijk ‘blasting’, ‘breaking’, ‘milling’ en ‘beneficiation’, vaak samengevat tot ‘mining’ en ‘milling’) ontstaat een concentraat van uraniumoxide (U_3O_8) dat ook wel ‘yellowcake’ genoemd wordt. Dit concentraat wordt verder gebruikt in de keten. Het restproduct van het verwerkte erts (‘tailings’) en een deel van het nevangesteente (‘waste rock’) moet als mijnbouwafval worden opgeslagen. Het bevat lage concentraties radioactieve elementen en ook zware metalen en moet geïsoleerd worden van de omgeving.

Uranium bevat van nature 0,7% van het isotoop U-235 (ook wel geschreven als ^{235}U) en bestaat verder vooral uit U-238 (^{238}U) met kleine percentages aan andere isotopen (zie voor meer informatie de bijlagen). Alleen ^{235}U wordt gebruikt voor elektriciteitsopwekking in de meest gangbare typen kerncentrales. Voor een voldoende grote warmteontwikkeling per kilo uranium moet het percentage ^{235}U in het in de kerncentrale gebruikte uranium over het algemeen hoger zijn dan de natuurlijke concentratie – minstens 3%¹.

Om het gehalte ^{235}U te kunnen verhogen wordt yellowcake omgezet in het gasvormige UF_6 , waarna in een verrijkingsfabriek het uranium wordt gescheiden in een fractie met een verhoogde (verrijkt uranium) concentratie aan ^{235}U en een fractie met een verlaagde concentratie ^{235}U (verarmd uranium). Het verarmd uranium blijft over als afval. De verrijkte fractie wordt weer omgezet in UO_2 , dat wordt verwerkt tot brandstofstaven. Deze worden in een kernreactor gebruikt om elektriciteit op te wekken.

Een deel van de gebruikte brandstof kan na elektriciteitsproductie in de reactor weer worden opgewerkt tot nieuwe brandstof en komt opnieuw in de keten terecht. Een ander deel moet langdurig als hoogradioactief afval worden opgeborgen.

Figuur 2.2 illustreert deze cyclus nogmaals aan de hand van de massabalans voor een bepaald type 1.000 MW_e kerncentrale. Uit 20.000 ton uraniumerts met een concentratiegraad van 1% ontstaan 230 ton uraniumoxide-concentraat en 19.770 ton ertsafval. Dit wordt verrijkt tot 35 ton UF_6 , waarbij 253 ton UF_6 met een laag gehalte aan ^{235}U overblijft. De brandstofstaven produceren vervolgens 7.000 GWh aan elektriciteit. Er blijft 27 ton gebruikte brandstof over, die met name bestaat uit uranium met een laag ^{235}U -gehalte en voor een klein deel uit plutonium en splijtingsproducten.

Tabel 2.1: Voorbeeld van een massabalans van de splijstofcyclus voor een 1.000 MWe centrale en geen opwerking van gebruikte splijstof

Delven	20 000 ton erts met 1% uraniumgehalte
Bewerken en extractie	230 ton uraniumoxide concentraat met 195 t U
Conversie	288 ton UF_6 (met 195 t U)
Verrijking	35 ton UF_6 (met 24 t verrijkt U) - balans is verarmd uranium
Brandstoffabricage	27 ton UO_2 (met 24 t verrijkt U)
Reactorbedrijf	7000 miljoen kWh elektrisch vermogen
Gebruikte brandstof	27 ton, en bevat 240kg plutonium, 23 t uranium (0.8% ^{235}U), 720kg splijtingsproducten en ook actiniden.

Bron: WNA, 2005.

¹ Dit geldt niet voor zogenoemde ‘zwaar-water reactoren’, die onder meer in Canada, India en Roemenie in gebruik zijn.

In de volgende paragrafen bespreken we de verschillende stappen van de keten in meer detail. We beperken ons daarbij tot het eerste gedeelte van de keten, tot aan productie van elektriciteit in een kerncentrale door uranium bevattende brandstofstaven.

2.2. Winning van uranium

Voor ertswinning worden drie mijnbouwmethoden gebruikt:

- Dagbouw;
- Ondergrondse mijnbouw;
- Oplossingsmijnbouw (in het Engels: ‘In Situ Leaching (ISL)’ of ‘Solution Mining’).

Onderscheid maken tussen verschillende typen mijnbouw is om een aantal redenen interessant:

- de verschillende technieken worden toegepast op verschillende typen ertsvoorraden;
- de economische winbaarheid van uranium verschilt per toegepaste techniek.

Kort gezegd wordt ondergrondse mijnbouw voornamelijk toegepast voor dieperliggende, rijkere ertslagen (ertslagen met een hoog gehalte aan uranium van circa 1% of meer), dagbouw voor minder rijke en dichter bij het oppervlak liggende ertslagen en oplossingsmijnbouw bij armere of kleinere, dieper gelegen ertslagen in poreus gesteente.

De huidige mondiale productie (stand 2005) is ongeveer als volgt verdeeld over de drie typen mijnbouw:

- Dagbouw circa 30%;
- Ondergrondse mijnbouw circa 40%;
- Oplossingsmijnbouw circa 30%.

Uranium kan gewonnen worden als hoofdproduct van mijnbouw, maar ook als nevenproduct van andere metalen. Het laatste maakt zo’n 10% uit van de wereldproductie. De Olympic Dam mijn in Zuid-Australië is een voorbeeld van een mijn waar grote hoeveelheden uranium worden gewonnen, maar waarbij het hoofdmijnbouwproducten desalniettemin koper en goud zijn. Een andere mijnbouwactiviteit waar uranium als nevenproduct kan worden gewonnen is bijvoorbeeld winning van fosfaat.

2.2.1. Dagbouw en ondergrondse mijnbouw

Dagbouw en ondergrondse mijnbouw zijn gangbare vormen van mijnbouw voor elk mineraal of vaste brandstof (zoals bijvoorbeeld turf, bruinkool en steenkool). De winning van uranium via dagbouw of ondergrondse mijnbouw wijkt niet af van andere erts die op deze manier gewonnen worden. In beide gevallen wordt erts dat ‘rijk’ is aan uranium afgegraven en afgescheiden van het moedergesteente. Het niet gebruikte deel van het afgegraven moedergesteente wordt als ‘waste rock’ gestort op hopen.

Gewonnen erts wordt vervolgens fijn gemalen, waarna 90% - 95% van het uranium wordt opgelost in zwavelzuur of een oplossing van natriumcarbonaat en natriumbicarbonaat in water. De aard van het gesteente (met name de aanwezigheid van carbonaat) bepaalt welk oplosmiddel wordt toegepast.

Bij gebruik van zwavelzuur worden ook andere elementen opgelost zoals nikkel en arseen. Tevens komt het edelgas radon, een vervalproduct van uranium, vrij. Om die reden wordt uranium in deze route eerst uit de zwavelzuuroplossing geëxtraheerd door het op te lossen in een organisch

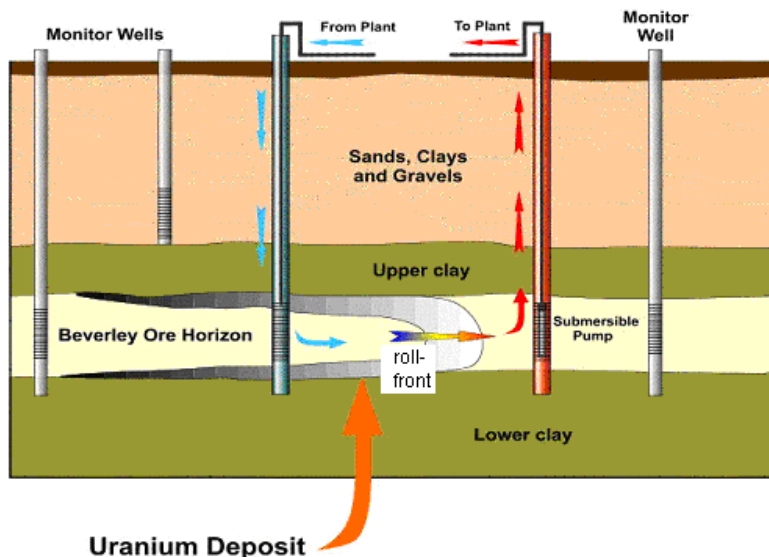
oplosmiddel waaruit het weer geïsoleerd kan worden via ionenwisseling of door het een derde maal op te lossen in weer een oplosmiddel - ditmaal een zoute oplossing. Uranium wordt vervolgens in vaste vorm gebracht door het te laten neerslaan met ammoniak of loog. De neerslag wordt afgefilterd, gecentrifugeerd en thermisch gedroogd. De zwavelzuuroplossing wordt geneutraliseerd met kalk en barium (om radon te binden) en gestort in het zogenoemde 'tailing reservoir'. Bij extractie met natriumcarbonaat (in carbonaatrijke ertsen) wordt uranium geëxtraheerd en kan het uranium direct vanuit de oplossing worden neergeslagen.

Het restproduct van de extractie - de 'tailings' - worden in het 'tailing' reservoir opgeslagen. De tailings bevatten nog zo'n 70% van de radioactiviteit van het oorspronkelijke erts in de vorm van radioactieve elementen - met name thorium, radium en radon. Om emissies van gasvormige radon en verwaaiing van radioactief stof naar de omgeving te voorkomen worden de tailings tijdens het vullen van het reservoir met een laag water afgedekt. Nadat het reservoir in de loop van jaren of decennia is gevuld wordt het, bij zorgvuldige verwerking, afgedekt met klei en aarde. Door middel van boringen rondom wordt de kwaliteit van het grondwater dan gemonitord om vroegtijdig lekkages op te sporen.

2.2.2. Oplossingsmijnbouw

Bij oplossingsmijnbouw wordt een aantal gaten geboord naar de aardlaag waarin zich het uranium bevindt. Door deze boorgaten wordt zwavelzuur of een oplossing van natriumcarbonaat en natriumbicarbonaat in water in de ondergrond gepompt. De rijke oplossing wordt opgepompt, waarna het uranium net als bij dagbouw en ondergrondse mijnbouw uit de oplossing wordt geïsoleerd.

Figuur 2.2 Schematisch overzicht van oplossingsmijnbouw



bron: <http://www.world-nuclear.org/info/inf27.html>

Anders dan bij dagbouw en ondergrondse mijnbouw ontstaan bij oplossingsmijnbouw geen tailings en waste rock. Er ontstaat wel slib en vervuilde oplossing. De oplossing wordt in de diepe ondergrond gepompt, vaak in diepliggende aquifers. Slib wordt bovengronds opgeslagen in bescheiden tailing reservoirs. Oplossingsmijnbouw is geen ongebruikelijke mijnbouwtechniek die

met name wordt toegepast voor de winning van goed oplosbare mineralen, bijvoorbeeld voor bepaalde oplosbare ertsen van koper, zink en lood.

Oplossingsmijnbouw is alleen mogelijk wanneer het uranium zich in waterdoorlatende (sub-) horizontale aardlagen tussen twee waterafsluitende lagen bevindt. Deze techniek maakt het mogelijk om ook armere ertslagen economisch rendabel te winnen.

2.3. Conversie

Nadat het erts gewonnen is moet het gehalte ^{235}U worden verhoogd. Daartoe wordt het uranium omgezet in een verbinding die al bij lage temperaturen gasvormig is, uraniumhexafluoride (UF_6). Verhoging van het gehalte aan ^{235}U - verrijking - is alleen mogelijk in de gasfase.

Bij conversie naar UF_6 wordt de uranium in de yellowcake in 8 stappen omgezet in het beoogde product UF_6 . Om een indruk te geven van de complexiteit van het proces en de veelheid aan benodigde chemicaliën hieronder een overzicht van deze stappen:

- de in yellowcake aanwezige uraniumverbindingen worden opgelost in een warme salpeterzuur oplossing;
- uranium wordt van andere opgeloste verbindingen uit de yellowcake gescheiden door het selectief op te lossen uit de salpeterzuur oplossing in tributylfosfaat;
- hieruit wordt het weer geïsoleerd door het weer op te lossen in verdund warm salpeterzuur;
- hieruit wordt het geïsoleerd door het te laten neerslaan (als uranyl nitraat);
- uranyl nitraat wordt omgezet in UO_3 ;
- UO_3 wordt gereduceerd tot UO_2 ;
- UO_2 wordt met waterstoffluoride omgezet in UF_4 ;
- UF_4 laat men met fluor gas (F_2) reageren tot UF_6 .

Het geproduceerde UF_6 wordt tot slot in stalen containers naar het verrijkingsbedrijf getransporteerd.

Bij conversie treden emissies naar lucht en water van toxische stoffen en radioactieve elementen op. Emissies worden beperkt door gasreiniging. Er ontstaat toxisch radioactief slib door afscheiding van de niet-uraniumverbindingen in de yellowcake.

2.4. Verrijking

Het bij conversie gevormde UF_6 wordt in deze stap gescheiden in een fractie rijk aan ^{235}U en een fractie verarmd aan ^{235}U . Dit wordt gedaan door gasdiffusie door een membraan of door centrifugeren. In beide gevallen wordt gebruik gemaakt van het gegeven dat ^{235}U lichter is en als gas sneller kan bewegen dan het zwaardere ^{238}U . Het verschil tussen beide isotopen is echter zo klein dat het scheidingsproces heel vaak moet worden herhaald voordat de concentratie ^{235}U in de verrijkte fractie 3% - 5% bedraagt. Gasdiffusie kost aanzienlijk meer energie dan gascentrifuge. Deze techniek wordt daarom wereldwijd steeds minder gebruikt.

Het overblijvende verarmde uranium bevat $0,25\% \pm 0,05\%$ ^{235}U en is dus nog steeds radioactief. Het moet als laag radioactief afval worden opgeslagen.

2.5. Productie brandstofstaven en elektriciteitsproductie

Verrijkt UF_6 wordt via een tweetal chemische reacties omgezet in UO_2 . Het gevormde UO_2 wordt in tabletten geperst welke vervolgens bij hoge temperatuur ($1.400^{\circ}C$) worden gesinterd. De gesinterde tabletten worden tenslotte in een metalen buis van standaard afmetingen - de brandstofstaaf – geperst, waarna de buis wordt dichtgelast. De brandstofstaven worden in een kerncentrale gebruikt voor elektriciteitsproductie.

3

Uraniumvoorraden

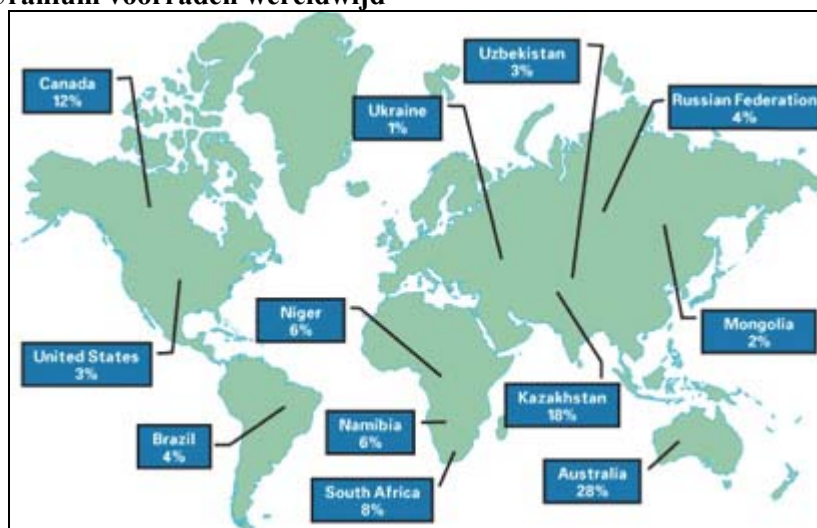
3.1. Geologische voorkomens en verspreiding

Uranium komt wereldwijd op een groot aantal plekken voor, maar de concentratie en winbaarheid hiervan variëren sterk. Figuur 3.1 geeft een indruk van het voorkomen van uranium wereldwijd. Belangrijke voorraden zijn voornamelijk aangetoond in (NEA & IAEA, 2006):

1. Australië;
2. Kazachstan;
3. Canada;
4. Verenigde Staten;
5. Zuid-Afrika;
6. Namibië;
7. Niger;
8. Brazilië;
9. Rusland;
10. Uzbekistan;
11. Oekraïne;
12. Mongolië.

Canada, Australië en Kazachstan herbergen gezamenlijk meer dan de helft van de wereldvoorraden uranium.

Figuur 3.1: Uranium voorraden wereldwijd



Bron: <http://japanfocus.org/products/details/1626>

3.2. Indelingen van uraniumvoorraden

De voorkomens van uranium worden door de Nuclear Energy Agency en de International Atomic Energy Agency (2006) in een aantal categorieën ingedeeld. Er bestaat een indeling gebaseerd op kwaliteit (gehalte of 'grade' + hoeveelheid of 'tonnage') van het erts, een indeling gebaseerd op kosten van winning van de voorraden en een indeling naar mate van zekerheid dat een geschatte voorraad ook werkelijk aanwezig is bij exploitatie.

I. Indeling naar kwaliteit van het erts

- Zeer hoge kwaliteit erts (> 10% U);
 - Hoge kwaliteit erts (> 2% U);
 - Lage kwaliteit erts (< 0,1% U);
- Ter vergelijking: de gemiddelde concentratie van uranium in de aardkorst (Clark Value) bedraagt 3 ppm of 3 gram/ton.

II. Indeling naar kosten voor winning van het erts

- Voorraden winbaar voor <40 US\$/kg;
- Voorraden winbaar voor <80 US\$/kg;
- Voorraden winbaar voor <130 US\$/kg.

III. Indeling naar zekerheid van bestaan van het erts

Hierbij wordt meestal een onderscheid gemaakt tussen 'Reasonably Assured Resources (RAR) en 'Inferred Resources (IR). De aangehouden terminologie wijkt af van de in andere mijnbouwsectoren gehanteerde categorieën (proven, probable en possible reserves). Door OECD en IAEA worden de volgende definities gegeven:

- **"Reasonably Assured Resources" (RAR)** have a high assurance of existence according to the tonnages, grades, recoverability of the uranium and cost assessment.
- **"Inferred Resources" (IR)** (previously Estimated Additional Resources) are basically geometrically less known extensions (larger drilling patterns) of the previous (RAR) but are likely to have similar geological, technical and economic characteristics.

Het betreft in beide gevallen **"Identified Resources"**: "Resources that are precisely positioned geographically (between the meter to the hectometer scale or at the shovel scale)".

3.2.1. Kwaliteit van het erts

Kwaliteit of 'grade' van het erts verschilt sterk per locatie. Voorraden in het Canadese Atabasca Basin hebben in vergelijking met andere regionale voorraden een extreem hoge concentratie. Een deel wordt gerekend tot voorraden met zeer hoge concentratie (> 10% U): McArthur River en Cigar Lake. De meeste andere winningsgebieden omvatten veel laagwaardiger erts.

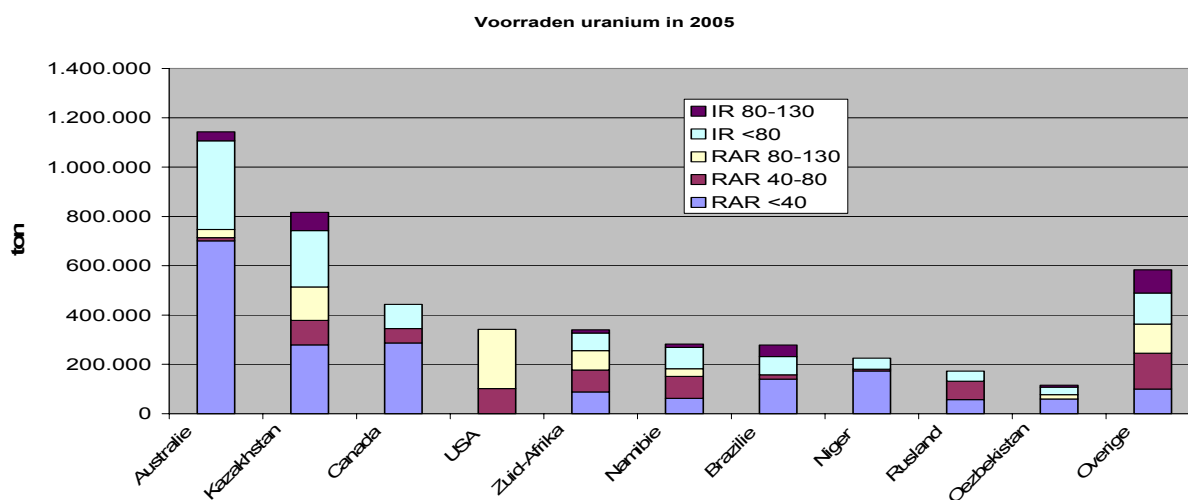
Ook zijn er verschillende locaties waarin uranium slechts een bijproduct is in het erts. Voorraden in Australië betreffen deels geassocieerd uranium in koperertsen (Olympic Dam). Voorraden in Zuid-Afrika zijn deels geassocieerd uranium in goudertsen (Witwatersrand).

3.2.2. Economische winbaarheid en zekerheid van voorkomen

Figuur 3.2 en Tabel 3.2 geven een gedetailleerd overzicht van winbare voorraden naar winningkosten en mate van zekerheid van voorkomen.

In Figuur 3.2 zijn de omvang van de voorraden per land gegeven. Daarbij is per land aangegeven welk deel van het totaal bestaat uit – qua hoeveelheid en uranium graad – precies(er) bekende (RAR) en minder precies bekende (IR) voorraden. Ook is aangegeven tegen welke prijs deze voorraden (waarschijnlijk) winbaar zijn.

Figuur 3.2: Voorraden uranium in 2005 (uranium in erts)



Bron: NEA & IAEA, 2006.

De in Figuur 3.2 gegeven informatie is in Tabel 3.2 geaggregeerd tot mondiale voorraden, onderverdeeld naar verwachte kostprijs voor winning en mate van zekerheid over omvang en uraniumgehalte in het erts. De tabel geeft aan dat de geschatte wereldwijde voorraden uranium tussen circa 2 miljoen ton (RAR, <40US\$/kg) en 4,7 miljoen ton (RAR + IR, < 130 US\$/kg) liggen. Het merendeel daarvan (ca. 2,7 mln ton) bevindt zich in drie landen: Australië, Kazachstan en Canada. Overigens vermelden NEA en IAEA dat de voorraden in de categorie <40 US\$/kg vermoedelijk groter zijn dan hier vermeld, omdat sommige landen hebben aangegeven geen nauwkeuriger schatting te kunnen geven, of omdat de gegevens uit strategische overwegingen geheim worden gehouden.

Tabel 3.2: Voorraden uranium in de wereld (uranium in erts)

	Uranium in 2005	Verandering t.o.v. 2003
RAR, <40 US\$/kg	1.947.383 t U	+ 217.000
RAR, <80 US\$/kg	2.643.343 t U	+ 185.000
RAR, <130 US\$/kg	3.296.689 t U	+ 128.000
IR, <40 US\$/kg	799.000 t U	+ 6.000
IR, <80 US\$/kg	1.161.038 t U	+ 82.000
IR, <130 US\$/kg	1.446.164 t U	+ 27.000
RAR+IR, <40 US\$/kg	2.746.000 t U	+ 223.000
RAR+IR, <80 US\$/kg	3.804.381 t U	+ 267.000
RAR+IR, <130 US\$/kg	4.742.853 t U	+ 155.000

Bron: NEA & IAEA, 2006

In hoofdstuk 4 wordt de omvang van deze voorraden afgezet tegen de huidige vraag en de verwachte ontwikkelingen in de vraag naar uranium.

3.3. Dynamiek van uraniumvoorraden

Uraniumvoorraden zijn geen statisch gegeven. Zo is in vergelijking met 2003 de wereldwijde voorraad uranium met 9% gestegen (zie tabel 3.2). Dit komt onder meer door een bijstelling van de bekende en afgeleide voorraden in Australië en een herevaluatie van de voorraden in Brazilië vanwege veranderde uraniumprijzen. Deze bijstelling illustreert de relatieve hardheid van voorraadcijfers.

De afgelopen twintig jaar is erg weinig exploratie verricht naar nieuwe voorraden van uranium, waardoor de bekende en afgeleide voorraden alleen beperkt zijn veranderd. Sinds 2001 zijn de uitgaven voor exploratie weer aan het stijgen (NEA, 2001). De verwachting is dat een hogere inspanning van exploratie de economische winbare voorraden aanzienlijk zal doen toenemen, vergelijkbaar met bijvoorbeeld goudwinning, waar aantrekkende prijzen geleid hebben tot het zoeken naar, en vinden van, nieuwe voorraden. Ook de technische ontwikkeling van exploratie-instrumenten kan de voorraad in conventionele ertsvoorraden in de toekomst laten toenemen. Volgens de NEA en IAEA (Figuur 3.3) is er naast de genoemde 4,7 mln ton uranium in bekende en afgeleide ertsvoorraden nog globaal 10 mln ton aan ‘hypothetische’ en ‘speculatieve’ conventionele voorraden (Gitzel, 2005).

Figuur 3.3: Totale bekende, geschatte en verwachte uraniumvoorraden, stand kennis 2003 (uranium in erts)

MtU	Conventional Resources				Unconventional Resources.
	US\$/kg U \$/lbU ₃ O ₈	RAR	Inferred or EAR-1	Hypothetical	
< 40 < 15	1,7	0,8	1,5	4,4	Around 15 to 25 Costs unknown
40 – 80 15 - 30	0,8	0,3			
80 – 130 30-50	0,7	0,3	0,8	3.1	
> 130 > 50	?	?			
	3,2	1.4	2.3	7.5	
TOTAL	4,6	14.4	9,8		15 – 25

Bron: Gitzel, 2005

3.4. Niet-conventionele voorraden

Door NEA en IAEA worden naast conventionele voorraden ook onconventionele voorraden beschouwd, waarmee men marginale bijproducten van andere ertsen of zeer arme uraniumertsen bedoelt. Onder andere zeewater en zogenoemde 'black shale' bevatten uranium in zeer lage concentraties (NEA & IAEA, 2006). Technisch zijn deze voorraden potentieel winbaar, maar praktisch en economisch op dit moment zeker niet. Het gaat hier om veelvoudenvan de bekende conventionele voorraden, maar de exacte grootte van deze onconventionele voorraden onbekend. Ter illustratie: NEA en IAEA schatten de voorraden uranium uit fosfaaterts in 2006 op 22 mln ton.

Winning van uranium uit fosfaat was in de periode van hogere uraniumprijzen in de jaren '70 en begin jaren 80 van de vorige eeuw gebruikelijk en dekte bijvoorbeeld 16% van de vraag naar uranium op de elektriciteitsmarkt in de V.S. Andere landen waar uranium uit fosfaaterts werd gewonnen waren Canada, Spanje, België, Israël, en Taiwan. Door de hoge productiekosten (ca \$50/kg - \$110/kg U₃O₈) en beperkte vraag is uraniumwinning uit fosfaaterts niet voortgezet.

3.5. Conclusies

Uit het voorgaande trekken wij de volgende conclusie over de geologische voorraden van uranium:

- Inschattingen over de grootte van de voorraden uranium wereldwijd hangen af van de kwaliteit van het erts waarnaar gekeken wordt, de kosten van winning en de mate van zekerheid waarmee voorraden aangetoond zijn. Afhankelijk van de gekozen variabelen varieert de op dit moment bekende 'conventionele' wereldvoorraad uranium tussen 2 en 4,7 mln ton (RAR <40 US\$/kg resp. RAR + IR < 130 US\$/kg). Daarnaast bestaan nog zogenoemde 'speculatieve voorraden', waarvan het bestaan vooralsnog niet is aangetoond. Als orde-grootte hiervan wordt 10 mln ton genoemd.

- Bovenop de 'conventionele' voorraden uranium in ertsen bestaan nog zogenoemde 'onconventionele' voorraden uranium in onder meer zeewater, 'black shale' gesteente en fosfaaterts. De grootte hiervan is niet precies bekend, maar overtreft de bekende wereldvoorraden ruimschoots. Zo worden de voorraden uranium in fosfaaterts op 22 mln ton geschat. Technische winbaarheid van de onconventionele voorraden is voor wat betreft fosfaaterts in de praktijk aangetoond, maar deze winning is vanwege marktomstandigheden opgegeven.
- De bekende voorraden uranium zijn geografisch verspreid over de wereld. Meer dan de helft van de goedkoop te winnen voorraden (RAR + IR, < 40\$/kgU) komen voor in drie landen: Australië, Kazachstan en Canada. Maar ook zijn er substantiële voorraden in o.a. de VS, Zuid-Afrika, Rusland, Namibië, Niger, Brazilië, Mongolië en Uzbekistan.

Afgezien van de geologische beschikbaarheid bepaalt vooral de markt in hoeverre theoretisch winbare voorraden uranium ook werkelijk economisch beschikbaar zijn. Hierop gaan we in het volgende hoofdstuk in.

4

De uraniummarkt

Hoe lang de voorraden uranium toereikend zijn voor toepassingen is afhankelijk van verschillende factoren. Daarbij speelt niet alleen de geologische beschikbaarheid van uraniumvoorraden zoals beschreven in het vorige hoofdstuk een rol, maar vooral ook vraag en aanbod van uranium en werking van de uraniummarkt. In dit hoofdstuk gaan we hier nader op in.

4.1. Vraag naar uranium

Uranium wordt vrijwel uitsluitend toegepast als brandstof in kerncentrales voor elektriciteitsopwekking. Andere toepassingen (met name voor kernwapens en medische toepassingen) dragen nauwelijks (meer) bij aan de totale vraag naar uranium. De vraag naar uranium is dan ook direct gerelateerd aan de productie van kernenergie en de rol van kernenergie in de elektriciteitsmarkt.

De voor elektriciteitsproductie door kernenergie gebruikte hoeveelheid uranium wordt weer bepaald door een aantal factoren:

- Het opgestelde vermogen aan kernenergie en de toekomstige ontwikkeling daarin;
- De in de kerncentrales toegepaste technologie en het rendement van de centrales;
- Eventueel gebruik van andere splijtstoffen in kerncentrales (bijvoorbeeld thorium, americium, plutonium);

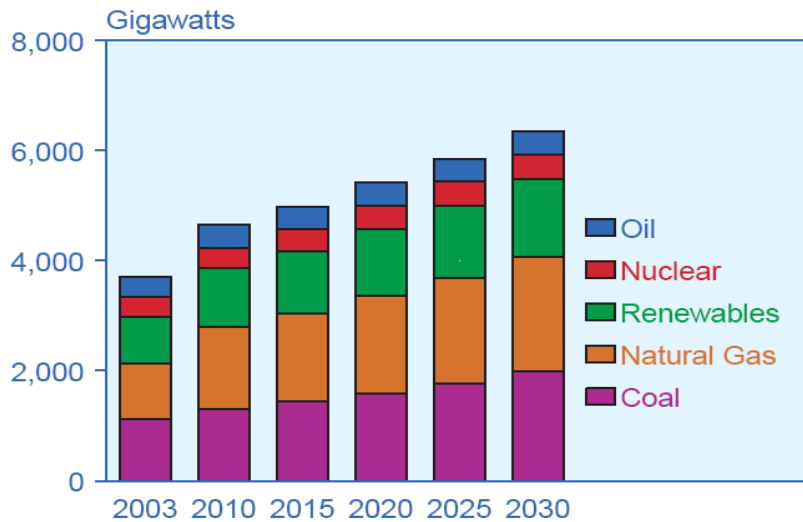
Deze factoren worden hieronder nader besproken.

4.1.1. Uranium ten opzichte van andere primaire energiebronnen

De huidige mondiale productie van elektriciteit is vooral gebaseerd op fossiele brandstoffen en voor een deel op hernieuwbare energiebronnen (zie Figuur 4.1). De vraag naar uranium is afhankelijk van zowel de verwachte totale elektriciteitsvraag, als van de bijdragen van andere primaire energiebronnen aan de elektriciteitsproductie. Algemeen is de verwachting dat de vraag naar elektriciteit in de toekomst sterk zal toenemen. Figuur 4.1 illustreert dit aan de hand van een recent scenario van de EIA (2006).

Momenteel zijn de olie- en gasprijzen hoog, wat betekent dat de vraag naar steenkool, hernieuwbaar en kernenergie als alternatieven hiervoor toeneemt. Ook de toenemende aandacht voor mondiale klimaatverandering en de wens van verschillende landen om minder afhankelijk te worden van de import van olie en gas dragen hieraan bij. Voor kernenergie geldt bovendien dat in verschillende Europese landen de publieke opinie veranderd is. Na een periode waarin het ongeluk met de kerncentrale in Tsjernobyl aanleiding was voor veel landen om kernenergie geleidelijk te willen uitfaseren, staat deze beslissing in verschillende landen nu weer ter discussie.

Figuur 4.1: Huidige en verwachte mondiale productie van elektriciteit, uitgesplitst naar toegepaste energiebron



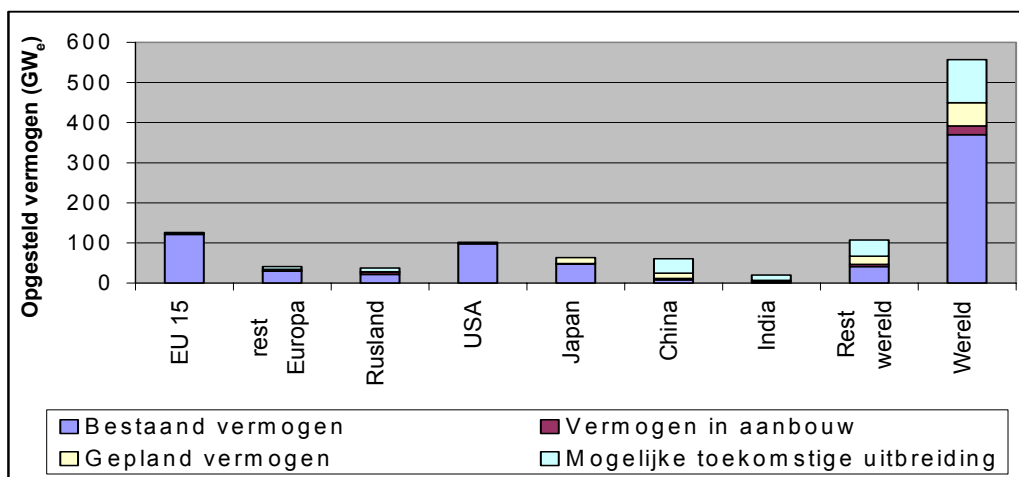
Bron: EIA, 2006

4.1.2. Huidige en toekomstige kerncentrales

Figuur 4.2 geeft een overzicht van het aantal bestaande en geplande kerncentrales wereldwijd². In totaal zijn op dit moment 441 centrales in gebruik met een totaal geïnstalleerd vermogen van 370 GWe. Er zijn daarnaast 27 kerncentrales in aanbouw (21 GWe), 38 in planning of besteld (41 GWe) en 115 in studie (84 GWe) (WNA, 2006).

De huidige vraag naar uranium voor gebruik in de bestaande kerncentrales bedraagt rond 67 duizend ton per jaar (NEA & IAEA, 2006).

Figuur 4.2: Opgesteld vermogen in kerncentrales wereldwijd in gebruik, in aanbouw, in planning en voorgesteld



Bron: WNA, 2006.

² Een uitgebreidere versie van deze figuur is terug te vinden in de bijlagen.

Opvallende punten bij beschouwing van Figuur 4.2 zijn onder meer:

- Het huidige bestaande vermogen van in totaal 370 GW_e is voor het grootste deel gelokaliseerd in een beperkt aantal landen: in Europa (±150 GW_e), Rusland (±20 GW_e), V.S. (±100 GW_e) en in Japan (±50 GW_e);
- De nog te realiseren vermogens of overwogen uitbreiding van in totaal bijna 190 GW_e zal grotendeels worden gerealiseerd in China en India plus overige landen buiten Europa en de Verenigde Staten.

De huidige plannen voor uitbreiding in India en China houden verband met de grote economische groei in die landen, de aan die groei gerelateerde toename van het elektriciteitsgebruik en de noodzaak om alle middelen in te zetten om die groei in elektriciteitsvraag te kunnen bijbenen. De uitbreidingen en uitbreidingsplannen in Japan en Oost-Europa (met uitzondering van Rusland) houden vooral verband met de wens onafhankelijker te worden van fossiele brandstoffenleveranties.

De prognoses gegeven in Figuur 4.2 zijn mogelijk nog een onderschatting van de ontwikkelingen in het opgestelde vermogen aan kerncentrales de komende 25 jaar. Hiervoor zijn twee redenen:

- Er is enkel rekening gehouden met nieuwbouwplannen, niet met retrofit (nieuwe, efficiëntere installaties in bestaande centrales);
- De publieke opinie en de opinie van energiebedrijven in de V.S. en de EU is ten dele veranderd ten gunste van kernenergie, waardoor er op korte termijn mogelijk alsnog initiatieven voor nieuwe centrales kunnen ontstaan.

Voor West-Europa en de V.S. staat nog weinig nieuw vermogen gepland. Dit heeft waarschijnlijk te maken met:

- Liberalisering van de elektriciteitsmarkten in deze regio's;
- De controverses rond kernenergie in deze regio's (veiligheid, non-proliferatie, afvalproblematiek).

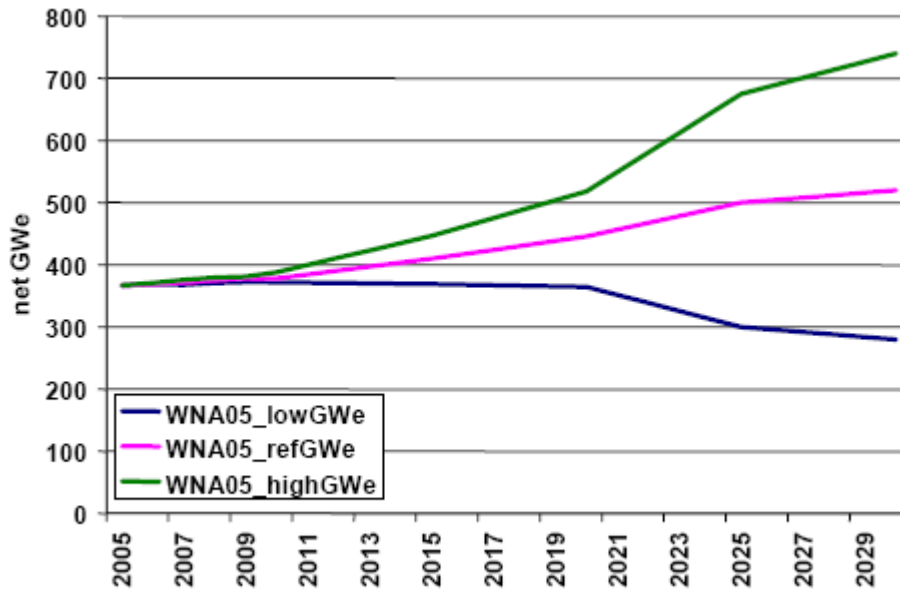
Kerncentrales vergen een investering van circa €2.500 per kWe geïnstalleerd vermogen (MIT, 2003). Dat is vier keer zoveel als een aardgascentrale met het zelfde vermogen, en twee keer zo veel als steenkool. Dit is binnen een geliberaliseerde energiemarkt, waarin kosteneffectiviteit een doorslaggevende factor is, een groot nadeel.

Vanwege de steeds belangrijkere rol van klimaatbeleid, de wens van de EU en de V.S. om minder afhankelijk te worden van fossiele energie importen en vanwege de huidige hoge olie- en gasprijzen is er in deze regio's echter een toenemende belangstelling voor kernenergie. Het is dan ook mogelijk dat er op korte termijn alsnog plannen voor nieuwe centrales worden ontwikkeld.

In beide regio's vindt in ieder geval retrofit van bestaande installaties plaats, waarbij het door de centrales leverbare vermogen wordt vergroot met 10% tot 20%. De verhoging van het netto geleverd vermogen wordt gerealiseerd door verhoging van het netto rendement van de centrale - bijvoorbeeld door een efficiëntere turbine te plaatsen - en door de brandstof vollediger te benutten. Dergelijke uitbreidingen zijn al gerealiseerd in bijvoorbeeld Zweden, Finland en Spanje. In Nederland wordt bij de kerncentrale Borssele een efficiëntere turbine geplaatst waarmee het rendement verbeterd wordt met ongeveer 7%.

De World Nuclear Association (WNA) heeft de nog te realiseren vermogens of overwogen uitbreiding van vermogens vertaald in een drietal scenario's voor de ontwikkeling van het mondiaal opgestelde nucleaire vermogen (zie Figuur 4.3). Het huidige geïnstalleerde vermogen van 370 GWe zal daarin in 2030 uitkomen op een waarde tussen circa 300 en 750 GWe, waarbij de verwachting wordt uitgesproken dat een waarde tussen het referentie- en het hoge scenario (500 – 750 GWe) het meest waarschijnlijk is.

Figuur 4.3: Scenario's voor ontwikkeling van het mondiaal opgestelde vermogen aan kernenergie



Bron: Gitzel, 2005.

4.1.3. Alternatieve brandstoffen voor kerncentrales

De vraag naar uranium voor elektriciteitsopwekking door kernenergie wordt ook beïnvloed door de technische ontwikkelingen in reactor ontwerpen waardoor reactoren efficiënter en dus zuiniger met uranium worden. Daarnaast bestaat de mogelijkheid dat kernenergietechnologie wordt ontwikkeld gebaseerd op andere splijtbare elementen, bijvoorbeeld thorium.

Technische ontwikkelingen in ontwerpen gebaseerd op uranium

Op dit moment is een zogenoemde 'vierde generatie' kerncentrales in onderzoek. Planning is dat deze reactoren vanaf 2030 beschikbaar komen op de markt. Van de verschillende types van deze centrales die kansrijk worden geacht om op de markt te komen zijn een aantal gebaseerd op het principe van de snelle kweekreactor. In dit proces wordt nieuwe brandstof "gekweekt", die vervolgens weer kan worden ingezet. Overigens gaan vrijwel alle 'vierde generatie' concepten uit van enige vorm van opwerking van gebruikte splijtstof.

Mochten deze reactoren inderdaad vanaf 2030 in gebruik komen, dan kan het uraniumverbruik hierdoor in principe aanzienlijk dalen. Tot dusver zijn wereldwijd echter nog geen commerciële kernreactoren van dit type gebouwd en het is nog onduidelijk of dit ook binnen de genoemde termijn zal gebeuren. Ook binnen het 'Generation 4 consortium', waarin Frankrijk en de Verenigde Staten een grote rol spelen, ziet men echter wel een beweging ten gunste van snelle reactoren. Vanuit Nederlands historisch perspectief is de kerncentrale in Kalkar de bekendste kweekreactor. Deze werd wel afgebouwd, maar is uiteindelijk nooit in gebruik genomen.

Een andere, misschien op kortere termijn te realiseren concept - die ook wel als "drie-plus" reactor wordt aangeduid - is de zogenaamde 'Pebble Bed Modular Reactor' (PBMR), vrij vertaald modulaire kiezelbed reactor. Ook vanuit Nederland is meegewerkt aan de ontwikkeling van dit concept. Volgens planning zal in 2007 in Zuid-Afrika worden begonnen met de bouw van een demonstratiereactor. Deze moet in 2010 operationeel zijn. In dit 'PBMR' ontwerp wordt uranium met koolstof gemengd tot balletjes. Het ontwerp wordt ontwikkeld om te worden toegepast in modules van 160 MW_e elk en gebruikt uranium verrijkt tot 4% - 5% ²³⁵U. Het ontwerp heeft een rendement van naar verwachting 42%. Hierdoor zal het ontwerp duidelijk minder brandstof c.q. uranium gebruiken dan de momenteel op de markt beschikbare nieuwste ontwerpen, zoals de EPR.

Het PBMR concept lijkt qua investeringen aantrekkelijker dan de huidige technologie. De Investeringskosten bedragen circa € 1.000/kWe vermogen, ruim de helft van de investeringen voor de huidige ontwerpen zoals de EPR. Daarmee is het ontwerp vergelijkbaar met de investeringskosten voor een kolencentrale.

Alternatieve elementen als brandstof

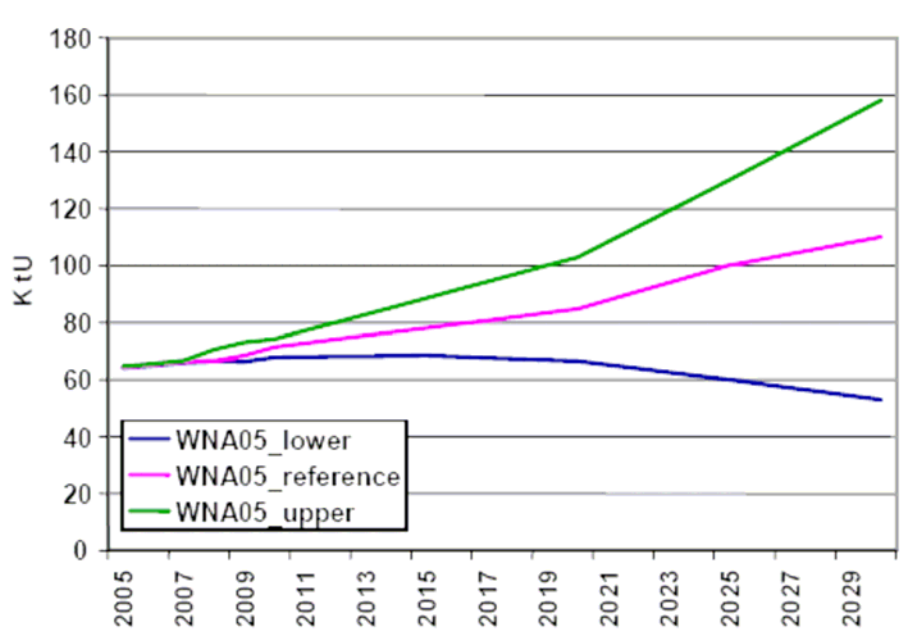
Een andere technologische ontwikkeling die op dit moment plaatsvindt is het onderzoek naar de mogelijkheden voor het gebruik van thorium in plaats van uranium als brandstof voor kerncentrales. Sommige kerncentrales kunnen thorium als brandstof gebruiken. Het onderzoek hiernaar vindt momenteel op beperkte schaal plaats. Achterliggende reden daarvoor is dat bij de beschikbaarheid van Uranium tegen redelijke prijzen het zoeken naar alternatieven nog geen prioriteit lijkt te hebben. Ook moeten door de hoge radioactiviteit van het thorium nog belangrijke problemen overwonnen worden. Maar aangezien de wereldwijde voorraden thorium circa drie keer zo groot zijn dan die van uranium, kan dit op termijn wellicht een alternatief bieden voor de inzet van Uranium. Ook milieutechnisch claimt de thoriumcyclus voordelen ten opzichte van de uraniumcyclus door de lagere productie van plutonium en andere transuranen.

Met name in India is de belangstelling voor dit reactortype groot, vanwege de relatief grote thoriumvoorkomens daar. Er is echter nog veel ontwikkelingswerk nodig zodat niet te verwachten valt dat thorium binnen enkele decennia een reëel alternatief kan zijn voor uranium.

4.1.4. Resulterende projecties voor uraniumvraag

Duidelijk is dat wanneer alle kernreactoren in aanbouw zijn afgebouwd en de reactoren in planning worden gerealiseerd, de vraag naar uranium sterk zal toenemen. Op basis van de projecties van de vraag naar kernenergie gemaakt door de WNA (figuur 4.3), komt deze organisatie tot een uraniumvraag tussen 50 en 160 kton uranium per jaar in 2030 (figuur 4.4.).

Figuur 4.4: Prognoses van de vraag naar uranium in de komende 25 jaar (uranium als in erts)



Bron: Gitzel, 2005.

4.2. Aanbod van uranium

Het totale aanbod van uranium bestaat uit winning uit primaire ertsen zoals besproken in hoofdstuk 3, plus zogenoemde 'secundaire hulpbronnen'. In de huidige marktsituatie dragen de secundaire

hulpbronnen voor een aanzienlijk deel (> 20%, zie o.a. figuur 4.10) bij aan het totale aanbod van uranium. Secundaire bronnen van uranium bestaan met name uit:

- Opwerking van gebruikt uranium uit kerncentrales;
- Militaire voorraden;
- Civiele voorraden;
- Gebruik van verarmd uranium als alternatief erts;

4.2.1. Opwerking

Commerciële opwerking van gebruikt uranium uit kerncentrales vindt op dit moment plaats in Japan, Frankrijk en Engeland. Daarbij wordt het nog bruikbare uranium en het gevormde plutonium in de bestraalde splijtstof voor hergebruik afgescheiden. Het plutonium wordt samen met het uranium omgezet in het zogenoemde mixed-oxide ('MOX'). De totale opwerkingscapaciteit bedraagt zo'n 4.000 ton mixed-oxide (MOX) per jaar. Circa 200 ton MOX wordt jaarlijks hergebruikt, equivalent met 2.000 ton U_3O_8 uit de mijnbouw (WNA, 2006). Vanwege milieu- en proliferatieaspecten staat deze route in veel landen ter discussie. Er zijn echter plannen in met name de V.S. om opnieuw een opwerkingsfabriek te bouwen en in Japan wordt een nieuwe opwerkingsinstallatie met een productiecapaciteit van 800 ton MOX per jaar op dit moment in bedrijf genomen.

MOX is maar beperkt mengbaar in bestaande reactoren en levert geen volledig alternatief voor uraniummijnbouw. De nieuwste ontwerpen kernreactoren, zoals de EPR kunnen procentueel meer MOX verwerken. Met opwerking kan volgens MIT (2003) een reductie van het gebruik aan uranium uit erts van ongeveer 15% worden gerealiseerd. Ter indicatie: in het hypothetische geval dat alle huidige kernreactoren zouden overschakelen op het gebruik van MOX, dan zou de wereldvraag naar uranium dalen van 67 duizend ton tot 57 duizend ton per jaar.

4.2.2. Militaire voorraden

In het kader van de ontwapeningsverdragen tussen de Verenigde Staten en de voormalige Sovjet-Unie ('Megatons to Megawatts' overeenkomst uit 1994) is de laatste jaren veel hoogverrijkt uranium, dat geschikt is voor het maken van kernwapens, uit de militaire voorraden uit Rusland beschikbaar gekomen. De verrijkingsgraad hiervan bedraagt circa 90% ^{235}U , veel hoger dan wat bruikbaar is voor kerncentrales (3 tot 5% ^{235}U). Gemengd met laagwaardig uranium vervangt het kernwapenmateriaal momenteel ongeveer 10.000 ton U_3O_8 uit mijnbouw per jaar, ofwel 15% van de jaarlijkse uraniumbehoefte van kernreactoren wereldwijd op dit moment.

In totaal zal uit de bestaande overeenkomst zo'n 152.000 ton uranium beschikbaar komen in twintig jaar tijd. Een gedeelte hiervan is al gebruikt in de periode vanaf 1994, een ander deel zal nog op de markt komen tot 2013 (WNA, 2005). Er was in 2006 nog een hoeveelheid van 225 ton hoogverrijkt uranium op voorraad, waarmee nog circa 69.000 ton U_3O_8 in erts zou kunnen worden uitgespaard, ofwel één jaarvoorraad uranium voor de huidige kerncentrales.

4.2.3. Civiele voorraden

Gebruik van civiele voorraden van kerncentrales is een andere manier om de uraniumvoorraden te vergroten. Kerncentrales hebben vaak in de loop van de tijd eigen brandstofvoorraden opgebouwd, die zij afhankelijk van de eigen behoefte en de prijzen op de wereldmarkt inzetten. In tijden van hoge prijzen zullen zij de opgebouwde voorraden eerder inzetten, in tijden van lage prijzen zullen zij deze voorraden eerder achter de hand willen houden. De omvang van deze voorraden is een strategisch marktgegeven en daarom niet goed bekend.

4.2.4. Verarmd uranium

Technisch is het mogelijk om uit verarmd uranium dat overblijft bij verrijking meer uranium te winnen dan wat er in de praktijk om economische redenen uitgehaald wordt. Bij hoge prijzen

verandert deze balans en wordt het economisch aantrekkelijk om verarmd uranium dat eerder niet gebruikt werd nog eens te recyclen om er nog meer uranium uit te halen.

Op dit moment wordt natuurlijk uranium bij verrijking verarmd tot een restgehalte aan ^{235}U van circa 0,25%. Technisch is het mogelijk om natuurlijk uranium verder te verarmen tot een restgehalte aan ^{235}U van circa 0,15%. Hierdoor zou voor bijvoorbeeld de productie van brandstof met een verrijkingsgraad van 5% ^{235}U ongeveer 15% minder erts nodig zijn. Verder verarmen van uraniumconcentraat kost wel meer energie.

4.3. Werking van de uraniummarkt

4.3.1. Spelers

Spelers op de uraniummarkt zijn met name mijnbouwconcerns als aanbieders en kerncentrales als vragers. Acht grote mijnbouwconcerns zijn verantwoordelijk voor 82% van de uraniumproductie wereldwijd (WNA, 2006).

Tabel 4.2: Organisaties met een jaarproductie van meer dan 1.000 ton uranium

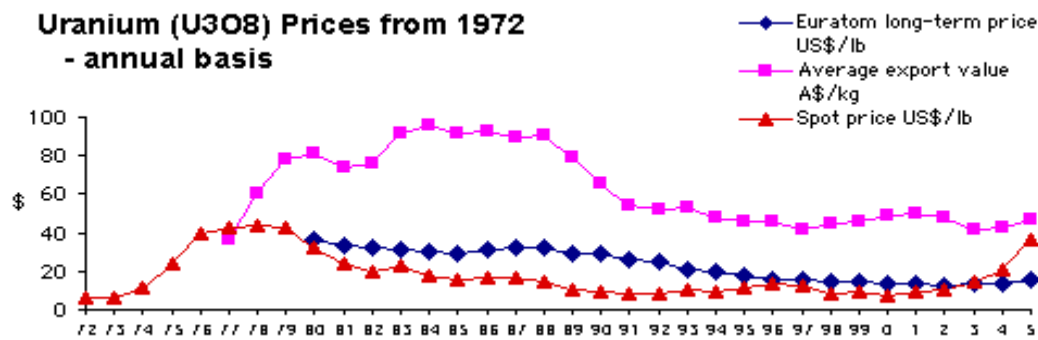
Organisatie	Land	Onafhankelijk of overheidsbedrijf?	Tonnen U (in erts)
Cameco	Canada	Onafhankelijk	8.038
Cogema(nu AREVA NC)	Frankrijk	Overheidsbedrijf	5.317
ERA	Australië	Onafhankelijk (dochter van Rio Tinto)	4.356
KazAtomProm	Kazachstan	Overheidsbedrijf	3.718
BHP Billiton	Groot-Brittannië	Onafhankelijk	3.706
Rossing	Namibië	Onafhankelijk (dochter van Rio Tinto)	3.038
Priargunsky	Rusland	Overheidsbedrijf	3.000
Navoi	Oezbekistan	Overheidsbedrijf	2.050

Transacties tussen de aanbieders en vragers van uranium lopen over het algemeen (> 85%) via langetermijncontracten. Deze kunnen een looptijd tot tien jaar hebben, maar lopen meestal van 3 tot 5 jaar. Vaak hebben deze contracten een zekere mate van flexibiliteit, om aanpassingen aan de marktontwikkelingen mogelijk te maken. Ook bestaan spotmarktcontracten, die bestaan uit één levering tegen een prijs rond de prijs die op dat moment op de spotmarkt geldt.

4.3.2. De prijs van uranium

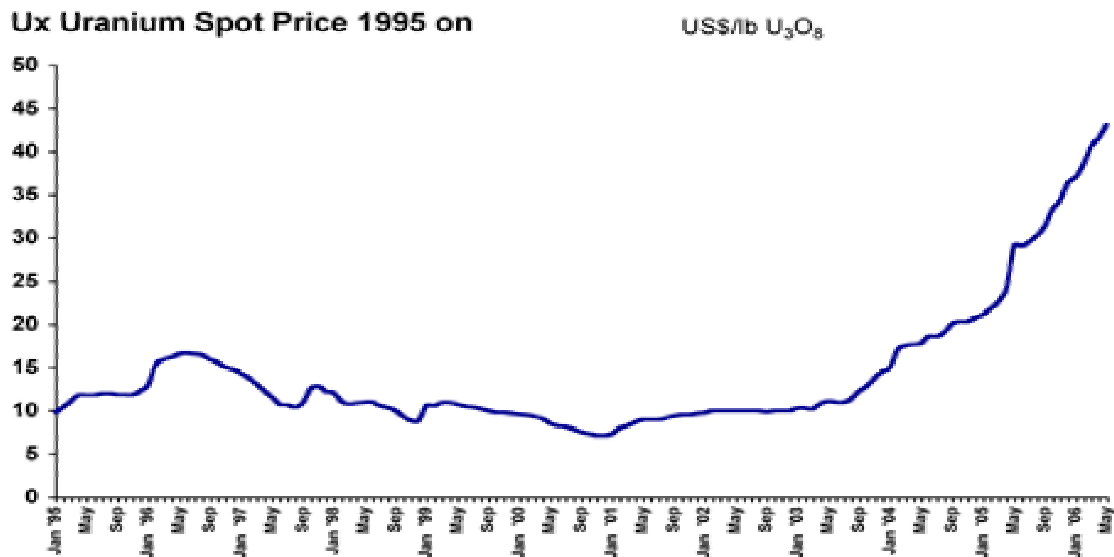
De prijs van uranium op de spotmarkt varieert sterk (figuur 4.7). In het verleden werden prijzen van minder dan 10\$/kg tot meer dan 40\$/kg betaald. Eind jaren zeventig was de prijs hoog door een verwachte sterke stijging van de vraag. In de jaren 80 en 90 daalde de prijs sterk omdat veel landen na het ongeluk in Tsjernobyl geen toekomst meer zagen voor kernenergie. De laatste jaren loopt de prijs van uranium weer op door een veranderende houding ten opzichte van kernenergie in Europa en de Verenigde Staten en door de aanbouw van nieuwe centrales in onder andere China en India. De uraniumprijzen in lange-termijncontracten liggen aanzienlijk boven die van de spotmarkt, zoals de waarde van de “average export value” in figuur 4.7 illustreert.

Figuur 4.7: Prijzen van uranium op de spotmarkt 1972 - 2005



Bron: WNA, 2006

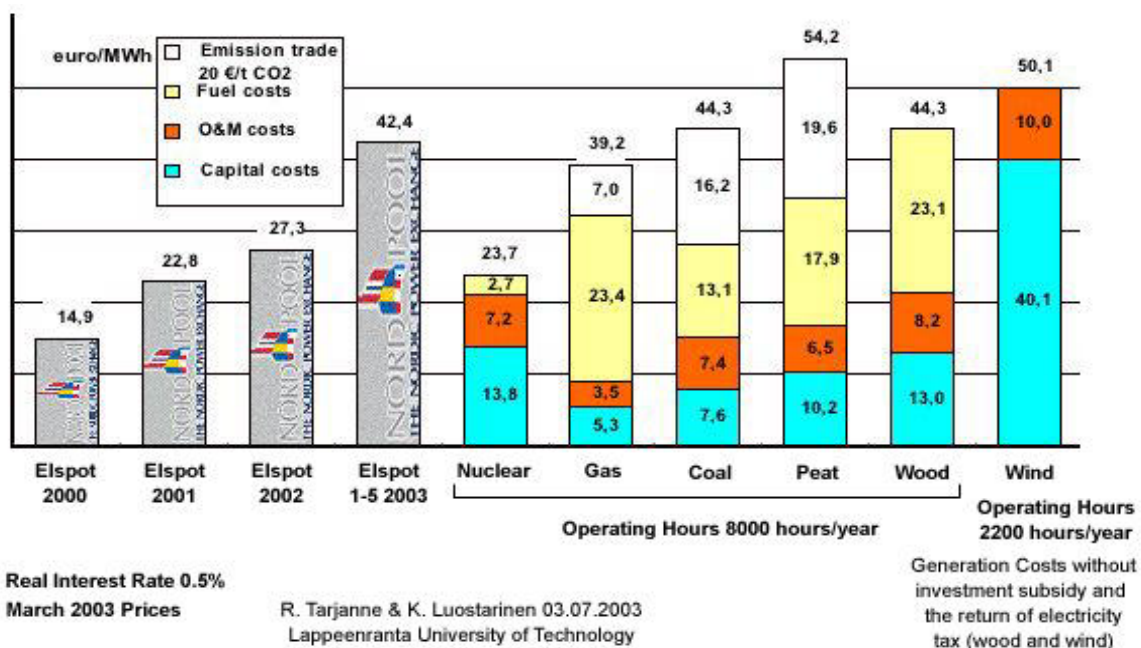
Figuur 4.8: Prijzen van uranium op de spotmarkt sinds 2005



Bron: WNA, 2006

Kostprijberekeningen voor de productie van kernenergie verschillen sterk. Wel laten alle studies zien dat de brandstofkosten bij kernenergie – de prijs van uranium - maar een beperkte rol spelen in vergelijking met fossiele bronnen voor elektriciteitsopwekking. Ter illustratie: Een Finse studie (figuur 4.9) naar de elektriciteitsprijs door verschillende primaire energiebronnen geeft aan dat kosten voor uranium rond 10% van de prijs van elektriciteit opgewekt door kernenergie bepalen, terwijl de brandstofkosten voor elektriciteit opgewekt door een gascentrale rond 60% en bij kolen rond 30% van de elektriciteitsprijs bepalen. Andere studies gaan uit van een aandeel van 'uranium' van 5% van de totale kosten (NEA, 2001).

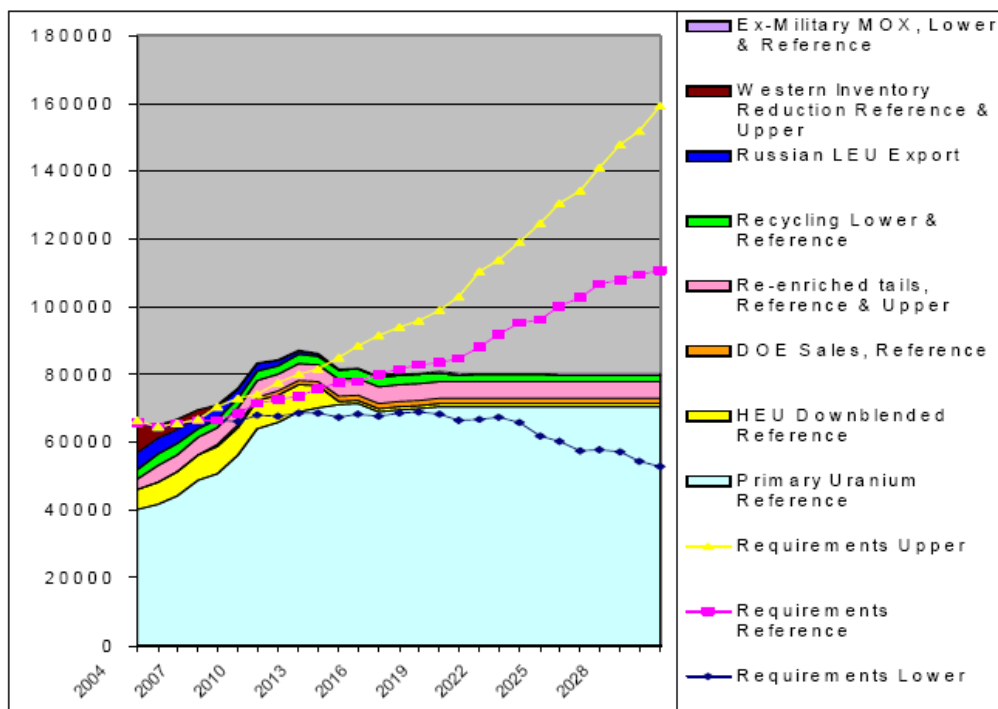
Figuur 4.9 Factoren die van invloed zijn op de prijs van elektriciteit geproduceerd door verschillende primaire energiebronnen.



Bron: WNA, 2006

4.4. Scenario's voor uraniumvraag en -aanbod

Onderstaand scenario van de World Nuclear Association zet het verwachte aanbod van uranium af tegen de verwachte vraag. Secundaire bronnen spelen naar verwachting van de WNA vooral tot 2015 een rol. Tot die tijd houdt de verwachte groei van het aanbod gelijke tred met de verwachte groei van de vraag. Daarna ontstaat in twee van de drie scenario's een toenemende kloof tussen vraag en aanbod van uranium. Als dit inderdaad gebeurt zal de prijs van uranium gaan stijgen, waardoor de inzet van laagwaardiger ertsen mogelijk wordt en in het uiterste geval een onoplosbaar gat tussen vraag en aanbod. Gelet op de mogelijke toename van de vraag naar uranium wereldwijd en de wetenschap dat het ontwikkelen van nieuwe mijnen (en zelfs het heropenen van gesloten mijnen) veel tijd kost, vanwege de daaraan gekoppelde procedures, is een dergelijk tekort rond het jaar 2015 niet ondenkbaar.

Figuur 4.10: Verwachte uraniumproductie in verhouding tot uraniumvraag

Bron: WNA, 2006

Figuur 4.10 geeft een gelijkblijvende productie aan na 2015. Dat lijkt bij toename van de vraag minder waarschijnlijk. Eerder valt te verwachten dat het aanbod de vraag zal volgen en eveneens zal toenemen als de vraag stijgt. De vraag is dan of de geologische voorraden voldoende zullen zijn om een stijgende vraag te volgen.

Om die vraag te beantwoorden geven we een aantal cijfers die eerder aan de orde zijn gekomen en maken aan de hand daarvan enkele indicatieve berekeningen:

Basiscijfers

- de huidige vraag naar uranium wereldwijd bedraagt 67 duizend ton per jaar
- de geschatte conventionele primaire voorraden uranium bedragen 2 tot 4,7 miljoen ton (zekere voorraden bij winningskosten tot 40 US\$/kg resp. zekere plus onzekere voorraden bij winningskosten tot 130US\$/kg)
- de 'hypothetische' en 'speculatieve' conventionele voorraden bedragen rond 10 miljoen ton.

Indicatieve berekeningen

- Wanneer alleen conventionele, primaire voorraden uranium ingezet zouden worden (los van de op dit moment ook gebruikte secundaire voorraden), dan gaan de geschatte voorraden bij het huidige verbruik tussen 30 en 70 jaar mee. Rekenen we de 'hypothetische' en 'speculatieve' voorraden mee, dan zou bij de huidige vraag de voorraden 179 tot 219 jaar meegaan.
- Wanneer de vraag naar uranium uit primaire voorraden zou stijgen tot 100.000 ton per jaar, dan gaan de op dit moment geschatte primaire voorraden 20 tot 47 jaar mee. Met de 'hypothetische' en 'speculatieve' voorraden erbij zijn dit 120 tot 147 jaar.

Een in opdracht van Greenpeace uitgevoerde studie naar uraniumwinning (Diehl, 2006) maakt gebruik van vergelijkbare gegevens als hierboven aangegeven, maar interpreteert deze anders. Deze studie gaat uit van de conventionele voorraden en rekent de hypothetische en speculatieve voorraden niet mee. De beschikbaarheid van uranium bedraagt volgens Diehl 4,58 miljoen ton, genoeg om voor 68 jaar aan

het huidige verbruik (volgens Diehl 68 duizend ton) te voldoen. De secundaire voorraden, die hierboven niet in de berekening zijn betrokken, bedragen volgens Diehl 0,25 miljoen ton uranium en voegen daarmee in zijn berekening 3,6 jaar gebruiksduur toe. In totaal komt Diehl daarmee, in overeenstemming met bovenstaande berekening, op circa 70 jaar gebruiksduur bij gelijkblijvende vraag.

Diehl geeft vervolgens, gebaseerd op NEA en IAEA scenario's vergelijkbaar met die in figuur 4.10 drie scenario's voor vraagstijging: een laag, midden en hoog scenario, waarbij de vraag respectievelijk zou stijgen tot 70.000, 170.000 en 210.000 ton uranium per jaar. In dat geval gaan de voorraden volgens Diehl respectievelijk mee tot 2075, 2050 en 2040. Diehl verbindt hieraan de conclusie dat de uraniumvoorraden wel voldoende zijn voor een geleidelijke afbouw van kernenergie, maar niet voor een sterke stijging.

Het rapport van Diehl geeft verder aan dat er veel verschillende factoren zijn die kunnen bepalen dat vraag en aanbod hoger of lager uitvallen, waardoor de berekeningen anders worden. Hieronder zijn een aantal van deze factoren weergegeven. Ook geeft het rapport aan dat bij exploitatie van laagwaardiger erts, wat zal gebeuren bij toenemende schaarste en hogere marktprijzen, de milieu- en gezondheidseffecten van winning over het algemeen zullen toenemen. Er moet dan meer materiaal gewonnen worden om eenzelfde hoeveelheid uranium te kunnen verkrijgen.

Factoren die van invloed kunnen zijn op de uraniumvoorraden (Diehl, 2006)

- De gebruikte technologie bepaalt het rendement van uraniumwinning (in-situ leaching heeft een rendement van 75%, conventionele winning 95%);
- Uraniumaanbod stijgt bij hogere prijs;
- De winning van uranium als nevenproduct is afhankelijk van ontwikkelingen bij het hoofd-product (bijvoorbeeld winning van uranium als nevenproduct van koperwinning);
- Nieuwe uraniumvondsten kunnen de bekende voorraden vergroten;
- Politieke oppositie tegen uraniumwinning (bijvoorbeeld in Australië wegens ligging in beschermde natuurgebieden);
- Politieke oppositie tegen opwerking van MOX-brandstof;
- Beschikbaarheid van brandstof uit kernwapens;
- Nieuwe technologieën kunnen reststoffen ('tailings') verminderen;
- Beschikbaarheid van verrijkingcapaciteit;
- Onzekerheid en geheimhouding bij vaststelling voorraden.

Gegeven de onzekerheden rondom vraag en aanbod, die ook door bovenstaande factoren worden geïllustreerd, is het lastig om uitspraken te doen over hoelang de uraniumvoorraden voldoende zullen zijn om in de vraag hiernaar te voldoen. Voor een kerncentrale geldt op dit moment een levensduur van 40 tot 60 jaar. Een nieuwe kerncentrale die in 2010 in bedrijf zou komen, zou dan ook tot maximaal 2070 in gebruik kunnen zijn. Gedurende de levensduur van een dergelijke centrale, zouden volgens de bovenstaande berekeningen (ook volgens Diehl) bij min of meer gelijkblijvende vraag de huidig bekende voorraden voldoende zijn, als de zekere en minder zekere voorraden worden meegenomen en als de marktprijs een winningsprijs voor uranium tot 130 US\$/kg mogelijk maakt. De hypothetische en speculatieve voorraden blijven hierbij buiten beschouwing.

Als daarentegen alleen de op dit moment zekere voorraden worden meegenomen en alleen een winningsprijs tot 40 US\$ wordt beschouwd, dan zouden gedurende de levensduur van deze centrale nieuwe conventionele voorraden gevonden moeten worden, of zouden de hypothetische en speculatieve voorraden daadwerkelijk winbaar moeten blijken. Dat geldt temeer als de vraag naar uranium sterk zou stijgen. Maar ook in dit geval treedt een schaarste pas op zijn vroegst na enkele decennia op.

4.5. Conclusies

De beschouwingen in dit hoofdstuk geven aanleiding tot een aantal hoofdconclusies:

- De mondiale vraag naar elektriciteit neemt naar verwachting in de komende jaren sterk toe. Als één van de opties om elektriciteit op te wekken staat kernenergie weer in toenemende mate in de belangstelling, onder ander door hoge olie- en gasprijzen, vragen rondom voorzieningszekerheid en het klimaatvraagstuk.
- De vraag naar uranium is afhankelijk van een groot aantal factoren, waaronder de ontwikkelingen bij met name gas, kolen en hernieuwbare energie, het aantal draaiende kernreactoren wereldwijd, technologische ontwikkelingen en de beschikbaarheid van andere bronnen dan primair uranium. Er zijn meerdere reactoren in aanbouw, met name in China en India, en er zijn wereldwijd plannen voor een nog groter aantal reactoren. De vraag naar uranium zal hierdoor in ieder geval op korte termijn stijgen, maar of deze groei van de vraag ook op langere termijn doorzet is onduidelijk.
- Het aanbod van uranium wordt in de huidige marktomstandigheden mede bepaald door de beschikbaarheid van zogenoemde secundaire voorraden, zoals uit opwerking, kernwapens, civiele voorraden en verarmd uranium. Deze gaan naar verwachting tot circa 2015 mee.
- Hoe lang de huidige totale mondiale uraniumvoorraden meegaan is onder meer afhankelijk van de prijs die men voor uranium wil betalen. Bij grotere vraag stijgt de prijs en zullen meer uraniumvoorraden economisch winbaar zijn. Winning van voorraden met zeer lage concentraties is vooral afhankelijk van technologische ontwikkeling. De komende decennia zullen de geologisch beschikbare uraniumvoorraden naar verwachting geen beperkende factor zijn voor de toepassing van kernenergie wereldwijd. Of dat ook voor de langere termijn geldt is op dit moment moeilijk te overzien. Bij sterk stijgende vraag en uitblijven van nieuwe uraniumvondsten zou dan mogelijk schaarste kunnen ontstaan.
- Bij stijgende vraag en continuering van de huidige productiecapaciteit zal mogelijk rond 2015 een gat ontstaan tussen productiecapaciteit en vraag, met hogere uraniumprijzen tot gevolg. Er kan ook marktfrictie ontstaan door de relatief lange aanlooptijd van in het in bedrijf nemen van nieuwe mijnen. Wanneer de gevolgen van de schaarste beperkt blijven tot een hogere uraniumprijs zullen deze geen belemmerende factor vormen voor de inzet van kernenergie, aangezien de uraniumprijs maar een klein deel uitmaakt van de totale kosten van kernenergie.
- Wel kan de uraniumvoorziening bij toenemende schaarste mogelijk afhankelijk worden van een beperkt aantal exporterende landen. Landen met grote reserves zijn met name Australië, Canada en Kazachstan. Ook kunnen milieu- en gezondheidseffecten bij exploitatie van laagwaardiger ertsen, die zal plaatsvinden bij grotere vraag naar uranium, mogelijk toenemen.

5

Milieu- en gezondheidseffecten

Uraniumwinning heeft vanwege de hiervoor noodzakelijke mijnbouw, ertsbewerking en het extractieproces waarmee de zogenoemde ‘yellow cake’ wordt geproduceerd (zie hoofdstuk 2.2), effect op het lokale milieu en in potentie op de gezondheid van de aldaar aanwezige mensen. Beide effecten worden in dit hoofdstuk behandeld en in perspectief geplaatst door een vergelijking met de wettelijke normen (inclusief de Nederlandse) voor deze effecten. Daarnaast worden de milieueffecten van uraniumwinning vergeleken met die van steenkoolwinning. Binnen de scope van deze studie ligt de nadruk op de bestudering van de radiologische effecten (zie Annex B).

5.1. Effecten op het milieu

Het voor deze studie meest relevante milieueffect³ van uraniumwinning (‘mining’) is de verontreinigingen van bodem, water en lucht in de omgeving van de uraniummijn en op de locatie van de ertsverwerking en uraniumextractie. Deze verontreinigingen zijn het gevolg van bovengrondse opslag van vast afvalmateriaal, lozingen van vloeibaar afvalmateriaal aan het oppervlak en emissies van het radioactieve gas radon dat vrijkomt uit het genoemde afvalmateriaal. De alfastraler radon (²²²Rn) is een inert edelgas met een halveringstijd van 3,8 dagen. Radon is een dochterproduct van het radiumisotoop ²²⁶Ra, dat voorkomt in de uraniumvervalreeks.

In deze sectie wordt eerst een kwalitatieve beschrijving gegeven van deze verontreinigingen in samenhang met de methode van winning (paragraaf 5.1.1). Vervolgens worden de effecten van deze verontreinigingen beschreven (paragraaf 5.1.2). Tenslotte wordt aan de hand van gegevens van belangrijke winninglocaties, de mate en ernst van deze verontreinigingen bij deze locaties en de dosisconsequenties daarvan gekwantificeerd en gerelateerd aan de geproduceerde hoeveelheden uranium en de hiermee te produceren elektrische energie. Ook wordt de voor winning benodigde energie besproken, in zover deze relevant is voor milieueffecten (paragraaf 5.1.3).

5.1.1 Mijnbouwvorm en milieuverontreiniging

Winning van uranium heeft primair tot gevolg dat op de locatie van de ertswinning en die van de volprocessen verhoogde concentraties van zware metalen en radioactieve stoffen aan het oppervlak aanwezig zullen zijn. Waar deze concentraties voorkomen, de hoogte van deze concentraties en chemische samenstelling, hangt af van het type mijnbouw, de samenstelling van het uraniumerts en moedergesteente en het toegepaste extractieproces. Dit proces bepaalt ook welke toxische stoffen naast de radioactieve stoffen bij de winning vrijkomen. De winning van uraniumerts verschilt in dit opzicht niet wezenlijk van die van andere metaalertsen.

In hoofdstuk 2 is aangegeven dat dagbouw (30%) en ondergrondse mijnbouw (38%) momenteel de dominante productiemethoden van uraanerts zijn, gevolgd door oplossingsmijnbouw (ISL, 21%) en uraniumwinning als bijproduct van bijvoorbeeld kopermijnbouw (11%). Deze cijfers zijn van de WNA (2006, cijfers voor 2005), die aangeeft dat het aandeel van ISL in de wereldproductie nog steeds toeneemt.

³ Andere hier niet beschouwde effecten zijn onder andere de aantasting van het landschap en de verstoring van lokale fauna en flora.

Tabel 5.1 Top-10 van mijnen qua productiecijfers in 2005, bron WNA, 2006

Mijn	Land	Hoofdeigenaar	Type mijn	Productie (tU)	% van wereld
McArthur River	Canada	Cameco	ondergrond	7200	17.3
Ranger	Australië	ERA (Rio Tinto 68%)	dagbouw	5006	12
Olympic Dam ^{*)}	Australië	BHP Billiton	bijproduct /ondergrond	3688	8.9
Rossing	Namibië	Rio Tinto (69%)	dagbouw	3147	7.6
krazbokamensk	Rusland	TVEL	ondergrond	3000	7.5
Rabbit Lake	Canada	Cameco	ondergrond	2316	5.5
McClellan Lake	Canada	Cogema	dagbouw	2112	5.1
Akouta	Niger	Areva/Onarem	ondergrond	1778	4.3
Arlit	Niger	Areva/Onarem	dagbouw	1315	3.2
Beverly	Australië	Heathgate	ISL	825	2
Top-tien totaal				30387	73.1

*) 'Olympic Dam' is een ondergrondse mijn, die in tonnage uitgedrukt ruim 50 maal zoveel koper produceert als uranium, maar toch prominent in deze top-tien staat. Andere belangrijke ertsen uit deze mijn zijn goud en zilver.

Conventionele mijnbouw

Dagbouw ('open pit mining') en ondergrondse ('underground') mijnbouw zijn momenteel nog de dominante vormen van uraniumwinning (zie paragraaf 2.2.1). Bij deze productiemethoden wordt het niet-gebruikte deel van het afgegraven of uitgegraven moedergesteente in eerste instantie bovengronds in de vorm van hopen 'waste rock' opgeslagen. In de waste rock zijn de zware metalen en de radioactieve stoffen (zoals uranium) nog in de originele matrix aanwezig. De waste rock wordt doorgaans als een relatief 'schone' vorm van mijnbouwafval beschouwd, waaraan ook eisen⁴ worden gesteld. Zo wordt in Australië geëist dat deze 'rock' niet meer dan 0,02% U₃O₈ bevat (=0,017% U). In de Verenigde Staten ligt deze grens bij 0,05% (= 0,042% U). De 'waste rock' kan later worden opgeslagen in reeds verlaten mijnen, of in de mijn waar het vandaan komt, na beëindiging van de exploitatie.

Naast 'waste rock' uit mijnbouw, komen radioactieve stoffen voor in het afval van stap twee in de keten: de uraniumextractie. Hierbij wordt uitgegaan van fijngemalen erts dat, afhankelijk van de chemische samenstelling van het gewonnen erts, in zwavelzuur of in een base (oplossing van soda of dubbelkoolzure soda) wordt opgelost. Bij oplossen van het erts in zuur zullen naast uranium ook andere (zware) metalen worden opgelost. Nadat het uranium (het product) aan deze zwavelzure oplossing is onttrokken, wordt het restant geneutraliseerd (met een basische stof) en als een slibachtig restproduct ('tailings') in reservoirs op locatie opgeslagen. De meeste 'mills' bevinden zich doorgaans op zeer beperkte afstand van de mijn zodat waste rock en tailings in elkaars nabijheid worden

⁴ Environmental remediation of uranium production facilities, NEA, 2002

opgeslagen. Echter in Canada bevindt zich een grote extractie-faciliteit, 'Key Lake', die ertsvoorraden en erts uit een mijn op 80 kilometer afstand verwerkt en dus niet 'naast' een mijn is gelegen. Key Lake bevindt zich wel naast andere uit bedrijf genomen mijnen. Bij deze reservoirs bestaat het risico op ongelukken door dambreuk, net als overigens bij andere vormen van mijnbouw. Diehl (2006) noemt als grote ongevallen door dambreuk bij uraniummijnen:

- 1977, Grants, New Mexico, Verenigde Staten: vrijkomen van 50.000 ton vervuilde modder en miljoenen liters vervuild water;
- 1979, Church Rock, New Mexico, Verenigde Staten: vrijkomen van meer dan 1.000 ton modder en 400 miljoen liter vervuild water;
- 1984, Key Lake, Saskatchewan, Canada: vrijkomen van meer dan 100 miljoen liter vervuild water.

Oplossingsmijnbouw of ISL

Bij oplossingsmijnbouw (zie paragraaf 2.2.2) wordt geen moedergesteente uitgegraven en is er daarom geen bovengrondse opslag van 'waste rock'. Ook wordt er geen erts fijngemalen. De eerste stap van het extractieproces, het oplossen in zwavelzuur of in een soda/dubbelkoolzure-soda oplossing, vindt ondergronds plaats, waarna de uraniumrijke oplossing wordt opgepompt. De volgende stappen vinden bovengronds plaats. Na extractie van het uranium wordt de rest van de oplossing in de diepe ondergrond gepompt, vaak in diepgelegen waterhoudende lagen. Hierbij wordt de oplossing eerst geneutraliseerd. Het zware metalen houdend slib wordt bovengronds in reservoirs opgeslagen. De hoeveelheden slib zijn kleiner dan die bij dagbouw en ondergrondse mijnbouw.

Samenvattend kan worden gesteld dat bij dagbouw en ondergrondse mijnbouw bovengronds relatief veel afvalmateriaal wordt opgeslagen waarbij zware metalen in de oorspronkelijke matrix (hopen waste rock) en in nieuwe chemische verbindingen (reservoirs met slib en ander vloeibaar afval) voorkomen. Bij oplossingsmijnbouw beperkt het afvalmateriaal zich tot relatief kleine hoeveelheid slib. De huidige trend is een toename van het aandeel van ISL in de wereldproductie.

Tabel 5.2 Trends in mijnbouwmethoden

Methode	Aandeel in 1999 [UIC]	Aandeel in 2005 (WNA)
Dagbouw	38%	30%
Ondergronds	33%	38%
In situ leach (ISL)	17%	21%
Mining als bijproduct (verschillende winningsmethoden)	12%	11%

5.1.1. Effecten van verontreinigingen

De zware metalen die vrijkomen bij uraniumwinning omvatten ook niet-radioactieve elementen, zoals koper, mangaan, arseen en cadmium (die afhankelijk van de concentraties ook uit het erts worden gewonnen) en soms barium (toegevoegd na extractie om zure oplossingen te neutraliseren). Veel van de niet-radioactieve componenten zijn vergelijkbaar met die welke aangetroffen worden bij de mijnbouw van andere metalen.

Tot de radioactieve elementen in het afvalmateriaal dat vrijkomt bij uraniumwinning behoren behalve uranium (voor zover niet gewonnen) ook de door het radioactief verval gevormde dochters van uranium. Bij de uraniumextractie blijven deze dochters, en daarmee ca. 85% van de activiteit, achter in de restproducten. Vanwege deze activiteit produceren deze restproducten ioniserende straling. Nadere informatie over de dochters van het uranium is gegeven in Annex B van het rapport. Hierin is het verval van de uraniumisotoop ^{238}U (en ook ^{234}U) beschreven. Een voor de milieueffecten belangrijke dochternuclide van ^{238}U is het chemisch aan barium verwante element radium, meer specifiek, het radionuclide ^{226}Ra , dat een zogenoemde ‘kleindochter’ is van de moeder ^{234}U . Het ^{226}Ra is de dochter van het langlevende ^{230}Th (halveringstijd 80.000 jaar) dat bij het extractieproces in de tailings achterblijft. De dochter van ^{226}Ra is het radionuclide ^{222}Rn (radon), dat een kort-levend (halveringstijd 3,8 dag) edelgas is⁵.

Omdat uranium overal in de aardkroon aanwezig is, wordt overal ter wereld het gasvormige ^{222}Rn gevormd. Vanwege zijn gasvormigheid en halveringstijd van ongeveer 4 dagen, is het in staat vanuit gesteente door de oppervlaktelaag te diffunderen en de buitenlucht te bereiken. Ook in grondwater komen van nature verhoogde concentraties van ^{222}Rn voor. Met name als het grondwater langs uraniumrijke gesteenten zoals graniet stroomt, kunnen verhoogde concentraties radon worden gemeten. De radonconcentraties variëren over het aardoppervlak en zijn onder meer afhankelijk van de bodemgesteldheid.

De stralingsbelasting van de omgeving van het mijnbouwgebied wordt voornamelijk bepaald door het radongas. Bij opslag van tailings en waste rock zal men er daarom voor zorgen dat het vrijkomen van het gas zodanig wordt voorkomen, dat dit zoveel mogelijk overeenkomt met de situatie zonder mijnbouw. Waste rock kan daartoe worden teruggestort in lege mijnen of worden afgedekt. Tailings van uraniumextractie kan men afdekken met bijvoorbeeld een kleilaag van enkele meters dik. Ook komt de praktijk van afdekken middels een waterlaag voor, waarbij de bodem van het bassin soms voorzien moet worden van een waterkerende kleilaag om uitloging naar grondwater te voorkomen. Overigens wordt niet in alle landen waar uraniumwinning plaatsvindt zorgvuldig omgegaan met nazorg en beperking van milieueffecten van winning (zie tekstbox in paragraaf 5.2).

⁵ Ook het radionuclide ^{235}U (dat voor 0,7% deel uitmaakt van het gewonnen uranium) en het radionuclide ^{232}Th hebben als nakomeling radionucliden van de elementen radium en radon.

Radonemissies

In nabijheid van enkele uraniumwinninglocaties in Canada zijn in het verleden metingen uitgevoerd aan radonemissies. Deze metingen zijn door de NEA⁶ gebruikt om de radonemissie per eenheid van door het gewonnen uranium geleverde elektrische energie te bepalen. Het uitgangspunt hierbij is dat bij de winning van een hoeveelheid uranium equivalent aan 1 GWe.jaar elektriciteit, 1 ha aan tailing op locatie wordt opgeslagen. Op basis van actuele radonmetingen werd een gemiddelde emissie van 3 Bq/s per 1 m² oppervlakte aan tailings berekend. Dit leidt bij een oppervlak van 1 ha opgeslagen tailings, zonder beschermende maatregelen, tot een jaarlijks emissie van 0,95 TBq radon.

Tabel 5.3 Radonemissies bij uraniumwinning

Omschrijving winning	Emissie (Bq/s per m ²)	Totale jaaremissie TBq	Jaaremissie TBq per ha
Mijnwinning Canada (NEA ⁴)	3		0,95
Olympic Dam (voor aanvang winning)	0,025		0,008
Olympic Dam (in bedrijf) 400 ha	-	95 – 105	0,24 – 0,26
Olympic Dam (tailings) 75 ha	1,6	38	0,51
Ranger NT (voor aanvang winning) 245 ha	1,78	137	0,56
Ranger NT (1993, totaal)	-	222	0,94
Ranger NT (1993, tailings)	-	167	
wereldgemiddelde radonemissies	0,015 – 0,023		0,005 – 0,007

Externe straling

Erts en afvalproducten zijn bronnen van externe straling door de aanwezigheid van gamma-straling uitzendende radionucliden zoals ²¹⁴Bi (83%) en ²¹⁴Pb (12%), dochters van ²³⁸U⁷. Nabij een ertslaag met een uraniumgehalte van 0,1% is het dosistempo ongeveer 5 microSv/uur. Ook nabij opgeslagen mijnbouwafval en reservoirs met tailings is vanwege de aanwezigheid van deze uraniumdochters het lokale dosistempo hoog. Afhankelijk van deze concentraties van deze dochters kan het dosistempo op ca. 1 m afstand van het oppervlak van onafgedekt mijnbouwafval meer dan 1 microSv/uur bedragen.

⁶ NEA Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options, OECD/NEA 2000.

⁷ Uranium extraction technology, IAEA Technical Report Series No. 359, Wenen, 1993.

5.1.2. Kwantificering overige milieueffecten naar uraniumproductie en energieproductie

Bij de kwantificering van de milieueffecten kijkt men naast afvalproductie en stralingsbelasting ook naar energie en grondstoffengebruik. De data in deze sectie zijn voornamelijk afkomstig uit een NEA-studie⁸, gepubliceerd in 2001.

De behoefte aan uranium uit mijnbouw per opgewekte GWe.jaar is per kerncentrale afhankelijk van factoren zoals:

- Netto efficiency (verhouding elektrische output / thermische output);
- Opbrand van splijtstof, meestal uitgedrukt in GW.dag (thermisch) / ton U;
- Gebruikte verrijkingsgraad uranium in de brandstof;
- Het al of niet uitgaan van recycling van uranium.

Afhankelijk hiervan ligt de behoefte aan natuurlijk uraan (0.7% ²³⁵U) uit mijnbouw rond de 200 ton per GWe.jaar, uitgaande van de veronderstelling dat er geen recycling van gebruikt uranium plaatsvindt.

Ertsbehoefte

De hoeveelheid uraniumerts die gewonnen moet worden om een bepaalde hoeveelheid natuurlijk uraan te produceren, is afhankelijk van de 'grade' (kwaliteit) van het erts. De hoeveelheid erts om één ton natuurlijk uranium te krijgen ligt tussen de 4 tot 1000 ton erts/tU, d.w.z. grade 25% (Canada) tot 0.1% U. Bij winning van deze hoge grades uraniumerts moeten extra maatregelen genomen worden ter beperking van de stralingsbelasting van mijnwerkers en werknemers bij de ertsvermaling en het extractieproces. Over het algemeen worden bij ertsvermaling vaak stromen van hogere en lagere grade gemengd, zodat uiteindelijk een 'gemiddelde' grade wordt bewerkt.

Grondstofgebruik

Voor de bouw van de faciliteiten zoals mijnen en het bedrijf daarvan zijn grondstoffen nodig. De meeste grondstoffen worden niet gerecycled; anderen, zoals water, worden dat wel via bijvoorbeeld zuivering en terugwinning.

⁸ OECD/NEA Expert Group on Trends in the Nuclear Fuel Cycle, OECD/NEA Trends in the Nuclear Fuel Cycle: Economic Environmental and Social Considerations, 2001

Tabel 5.4 Gebruik van deels niet-recyclebare bronnen voor bedrijf mijnbouw (mining en milling fasen)

Materiaal	Open Pit (t/tU)	Ondergrond (t/tU)	Milling (t/tU)
Beton	9.10E-4	9.60E-1	2.1
Staal	2.00E-1	6.00E-1	2.20E-1
Edele metalen	4.10E-3	4.90E-3	6.40E-3
Overige	n.a.	n.a.	4.40E-3
Water	3.00E+3 - 9.30E+3	8.10E+0 - 3.50E+1	7.00E+2 - 1.80E+3

Energiegebruik

Het energiegebruik bij mijnbouw is sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden. De diepte van de te bereiken ertslagen en de grade van de erts bepaal de ratio tussen de gewonnen hoeveelheid natuurlijk uranium en de energie die noodzakelijk is voor de winning. Vandaar dat hier ranges worden gegeven.

Tabel 5.5 Energieverbruik

Energiedrager	Eenheid	Open pit	Ondergrond	Milling
Electriciteit	TJ/kgU	4.3E-6 - 1.3E-5	3.8E-6 - 1.5E-5	3.4E-5 - 7.9E-5
Fossiele brandstoffen	TJ/kgU	1E-5	1E-4	3.4E-4 - 5.7E-4

Rapport Storm van Leeuwen en Smith

In 2005 werd door Jan Willem Storm van Leeuwen en Ph.B. Smith een rapport gepubliceerd over de kernenergiecyclus waarin deze auteurs stellen dat door grotere uraniumvraag de extractie van steeds laagwaardiger erts noodzakelijk zal worden (zie www.stormsmith.nl). De auteurs stellen dat door grotere uraniumvraag de extractie van steeds laagwaardiger erts noodzakelijk zal worden. Bij laagwaardiger erts kost winning steeds meer energie, zodat op een gegeven moment, bij zeer laagwaardige erts, een omslagpunt zal ontstaan waarbij de kernenergiecyclus netto geen energie meer oplevert. Deze zogenoemde 'nulwaarde' ligt volgens Storm van Leeuwen en Smith bij een ertsgehalte van circa 0,01 tot 0,02 procent uranium. Om dezelfde reden zou ook de CO2 uitstoot van de kernenergieketen als geheel veel hoger zijn dan wanneer ertswinning niet in beschouwing wordt genomen, en toenemen bij laagwaardiger erts. De conclusies van Storm van Leeuwen en Smith zijn echter omstreden.

Afvalstromen

Bij 'mining' en 'milling' ontstaan de afvalstromen 'waste rock' en 'tailings'. Bij dagbouw worden relatief de grootste hoeveelheden gesteente aan de oppervlakte vrijgemaakt. Bij ondergrondse mijnbouw kan vaak een belangrijk deel van het geproduceerde afval weer ondergronds worden opgeborgen.

Tabel 5. 6 Belangrijkste afvalstromen

Afval type	Afvalproductie/ U productie
waste rock	5000 t/tU ¹⁾
tailing slurries	20 - 30 m ³ /tU

¹⁾ voor 'open-pit mining', oftewel dagbouw

5.2. Effecten op de gezondheid

In de vorige sectie zijn de milieueffecten van uraniumwinning besproken, met name de lokale aanwezigheid van hoge concentraties zware metalen, inclusief restanten uranium en de radioactieve dochters van het afgescheiden uranium, zoals radium waaruit het radioactieve edelgas radon wordt gevormd. Dit gas komt ook in versterkte mate vrij bij dagbouw en ondergrondse mijnbouw (via ventilatie) en de opslag van tailings. In deze sectie wordt ingegaan op de gezondheidseffecten, die hier worden gekwantificeerd in termen van de ontvangen doses door blootstelling aan radioactieve stoffen. De beschouwde blootstellingen zijn de blootstelling aan radon en aan externe straling afkomstig van de op de winninglocatie aanwezige radioactieve stoffen.

5.2.1. Effecten van blootstelling

Zoals in de vorige sectie is beschreven worden de actuele milieueffecten, naast winningmethode en ertssamenstelling, in belangrijke mate bepaald door de voorzorgsmaatregelen die het winningbedrijf heeft getroffen. Daarmee hangen de effecten op de gezondheid eveneens af van deze voorzorgsmaatregelen. Onder deze voorzorgsmaatregelen worden ook verstaan de maatregelen die de mate beperken waarin mensen op locatie en daarbuiten aan deze milieueffecten worden blootgesteld.

De bij de uraniumwinning ontvangen doses worden geschat voor de bij de winning betrokken personeel en voor de bevolking in de omgeving van de locatie. Hierbij wordt onder meer vergeleken met de lokale limieten voor blootstelling en met internationale en Nederlandse limieten. Ook wordt informatie over de ongevalrisico's bij de verschillende winninglocaties gegeven. Bij uraniumwinning evenals bij winning van andere zware metalen geldt dat zonder milieutechnische maatregelen de potentieel schadelijke effecten bij blootstelling aan de voormalige winningslocatie zeer lang (meer dan tienduizenden jaren) na afloop van de exploitatie blijven bestaan.

Stralingsbelasting bevolking

De dosis als gevolg van stralingsbelasting van de bevolking door een industriële activiteit zoals uraniumwinning, kan worden uitgedrukt in een zogenoemde effectieve individuele dosis die een 'gemiddeld' lid van de blootgestelde bevolking per jaar door deze uraniumwinning zal ontvangen.

In de regelgeving - van toepassing op stralingsbescherming - die is gebaseerd op de aanbevelingen van de ICRP, wordt met name gekeken naar de effectieve individuele dosis van leden van de meest blootgestelde groep van de bevolking. De maximale jaarlijkse dosis van leden van deze groep moet

onder vastgestelde limieten blijven⁹. Om deze dosis als gevolg van een industriële activiteit in perspectief te brengen wordt vaak een vergelijking gemaakt met andere blootstellingbronnen zoals radon in woningen, kosmische straling of medische diagnostiek. Met name in landen waar de bodem een relatief hoge concentratie uranium bevat, is de bijdrage van radon in woningen vaak hoog. In onderstaande tabel wordt duidelijk gemaakt dat radon een groot aandeel heeft tot de jaarlijkse dosisbelasting.

Tabel 5.7 Dosisbelasting van de wereldbevolking door natuurlijke bronnen (UNSCEAR 2000)

Natuurlijke stralingsbron	Mondiaal gemiddelde jaardosis [mSv/jaar]	Jaardosis traject [mSv]
Kosmische straling	0,4 (17%)	0,3 - 1,0
Gammastraling van de bodem	0,5 (21%)	0,3 - 0,6
Emissie gassen uit de bodem (m.n. radon)	1,2 (50%)	0,2 - 10
Ingestie natuurlijke radio-actieve stoffen	0,3 (12%)	0,2 - 0,8
Alle natuurlijke bronnen*	2,4	1 - 10

*) Jaardoses zijn 1 - 3 mSv voor 65% van de wereldbevolking. Slechts 10% ontvangt jaardoses hoger dan 3 mSv.

Om een vergelijking van verschillende industriële activiteiten wat betreft hun stralingsbelasting mogelijk te maken, wordt vaak de dosisbelasting van werkers en bevolking beschouwd. De meeste van deze studies hanteren naast de individuele dosis (per jaar) het begrip collectieve dosis, een maat die volgens de ICRP met de nodige voorzichtigheid dient te worden gehanteerd.

De collectieve dosis is altijd betrokken op een blootgestelde groep en is gelijk aan de over deze groep gesommeerde individuele doses. De eenheid van collectieve dosis is de mens-sievert (mensSv). Als in bijvoorbeeld een groep van 100 personen iedereen gemiddeld 1 microsievert ontvangt (1 miljoenste sievert), dan is de collectieve dosis van deze groep 100 maal de individueel ontvangen dosis, en dit is 100 micro mensSv.

Bij lage individuele jaardoses ten gevolge van een industriële activiteit, lager dan de jaardoses door blootstelling aan de van nature aanwezige stralingbronnen (achtergrondstraling), is de collectieve (achtergrond)dosis niet geschikt voor het inschatten van gevolgen van deze activiteit. De collectieve dosis is in dat geval wel geschikt voor het vergelijken van de prestaties op gebied van milieubeheer door de jaren heen of het vergelijken van de milieuprestaties van verschillende alternatieven. Hierbij wordt, bijvoorbeeld bij het beoordelen van de stralingsbescherming van het personeel, de collectieve dosis per jaar gebruikt of de collectieve dosis van de blootgestelde bevolking over een groot aantal jaren¹⁰.

⁹ In het Nederlandse Besluit stralingsbescherming dat mede gebaseerd is op aanbevelingen van de ICRP en richtlijnen van de Europese Commissie, wordt per industriële activiteit (bron) een limiet van 0,1 milliSv aan de maximale jaardosis gesteld. In de vergunningen voor zo'n industriële activiteit in het kader van de kernenergiewet wordt doorgaans een veel lagere (vergunning) limiet gesteld.

¹⁰ Het gaat hier dus niet om leden van de actuele bevolking maar om een fictieve groep die ongewijzigd op dezelfde locatie gedurende honderden jaren verblijft waarbij de situatie bij de mijn ongewijzigd blijft.

Wat betreft de collectieve dosis die over een periode van 10.000 jaar door een fictieve bevolking als gevolg van een uraniumwinning wordt ontvangen, heeft SENES consultants, zoals geciteerd door OECD/NEA¹¹ berekend dat deze collectieve dosis per eenheid van door het gewonnen uranium geleverde hoeveelheid energie 1 mensSv/GWe.jaar bedraagt. Hierbij is geen opwerking van het gebruikte uranium verondersteld.

Voorzorgmaatregelen

Tijdens de mijnbouw en verwerking van het erts komen fijn stof en radon in de atmosfeer vrij. Deeltjes en radon komen ook in het proceswater vrij. Mijnafval en vooral de tailings vormen vanwege de aanwezige radioactieve dochters van uranium een belangrijke blootstellingsbron tot zeer lange tijd na de exploitatiefase. Ventilatie wordt gebruikt om de concentraties fijn stof en radon in werkruimtes te reduceren. Zonodig wordt adembescherming toegepast ter beperken van het inademen van fijn stof. Mijnafval en de tailings worden zoveel mogelijk afgeschermd om de werknemers te beschermen.

Daarnaast worden maatregelen getroffen om het regenwater dat van het opgeslagen afval en installaties is afgespoeld, zoveel mogelijk op te vangen, op te slaan en/of te reinigen zodat verontreiniging van de bodem en het grondwater door infiltratie van verontreinigd water wordt voorkomen.

Mijnbouw in verschillende landen

Het is niet duidelijk of in alle landen waar uraniumwinning plaatsvindt even zorgvuldig wordt omgegaan met mijnbouw en voor- en nazorgmaatregelen. Het WISE uraniumproject (www.wise-uranium.org) vermeldt milieueffecten van winning en noemt sitespecifieke issues. Voorbeelden van issues zijn ex-werknemers van mijnen die de mijn verantwoordelijk stellen voor het optreden van kanker, milieueffectrapportages van mijnen waarvan de kwaliteit wordt betwist en oude mijnen die geen of beperkte maatregelen hebben genomen om de tailings af te schermen.

In Nederland betrok EPZ recentelijk (2004) EPZ zijn uranium uit Kazachstan, waar ISL een belangrijke manier van mijnbouw is. De installaties waarvan EPZ zijn grondstoffen betreft, zijn ISO 14001 gecertificeerd door bureau Veritas Quality International.

Doses door blootstelling aan radon.

Bij blootstelling aan radon is inhalatie het dominante blootstellingpad. Volgens de berekeningen in UNSCEAR 2000, Annex B is het effectieve dosistempo bij blootstelling aan radon ca 9 nSv/uur per Bq/m³ bij verondersteld evenwicht met de dochters. Op basis van een emissie van 0,95 TBq/jaar per ha en een evenwichtfactor 0,6 is op 200 m van de tailings de door blootstelling aan radon ontvangen dosis 16 microSv per jaar. Feitelijk zullen er echter geen mensen dicht bij de winningslocatie wonen; meestal is de afstand meerdere km's. Bij een verondersteld (cirkelvormig) totaal oppervlak van 100 ha en een emissie van 95 TBq/jaar zou op ca 2 km van het centrum van de winninglocatie een jaardosis van 70 microSv worden ontvangen. Deze waarde ligt onder de in Nederland gehanteerde bronlimiet van 100 microSv. UNSCEAR en SENES rapporteren echter ook andere praktijksituaties, waarbij waarden boven de bronlimiet optreden.

Bij een aantal winninglocaties zijn metingen uitgevoerd of schattingen gemaakt van de doses die de bevolking nabij deze locatie jaarlijks ontvangen. Deze gegevens, die ontleend zijn aan [Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options, NEA 2000], zijn in onderstaande tabel weergegeven

¹¹ “*Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options, a Comparative Study*” AEN/NEA, ISBN 92-64-17657-8 (2000)

Tabel 5.8 Individuele doses van de bevolking nabij winninglocaties

Winninglocatie	Blootgestelde groep	Individuele dosis (milliSv/jaar)
Key Lake	Jagers/verzamelaars	0,94 (27% achtergrond, de rest door radon)
Olympic dam	Bevolking Roxby Downs	0,02 (voornamelijk radon)
Ranger mine	Inwoners Mudginberri	0,03 (kinderen door drinken besmet water en eten van op het veld gevonden voedsel)

Uit deze individuele jaarlijkse doses van enkele groepen van omwonenden van een winninglocatie blijkt, indien geen lokaal water of voedsel wordt gegeten, de blootstelling aan radon de belangrijkste dosisbijdrage is. De individuele dosis van de vaste bevolking is steeds beneden 0,1 milliSv/jaar, de limiet voor blootstelling aan een industriële activiteit. Voor jagers en verzamelaars in deze tabel, en in andere gerapporteerde praktijkgevallen (zie SENES, 1998; UNSCEAR, 2000), worden de limietwaarden echter overschreden. Verder gelden de waarden in tabel 5.8 voor de genoemde mijnen in Canada en Australië. Deze landen staan bekend om een relatief goede aanpak van de tailingproblematiek. Elders zal de situatie slechter kunnen zijn.

Doses werknemers

Doses die de werknemers ontvangen hangen ook af van de wijze van winning. Bij ondergrondse mijnbouw geeft blootstelling aan radon de grootste dosisbijdrage (50 tot 70%). Als het uranium uit afzettinglagen wordt gewonnen waarbij ondergronds veel stofvorming optreedt zal inademing van stof voor 50% de dosis bepalen [IAEA Technical Report No. 359]. Bijvoorbeeld bij Australische Ranger mijn (dagbouw, no 2 in de wereld) is de jaarlijks ontvangen individuele dosis gemiddeld over de groep werknemers 3,8 mSv per jaar [Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options, NEA, 2000]. De maximum individuele doses was 10 mSv. Bij alleen vermalen van het erts(milling) is de gemiddelde blootstelling van de werknemers kleiner dan bij de mijnbouw. Uit de informatie van de doses van werknemers bij Key Lake in Canada (dagbouw) en erts met meer dan 2% uranium, blijkt dat de dosisbijdrage door blootstelling aan het vrijkomend radon relatief groot is.

Tabel 5. 9 Individuele doses van werknemers werkzaam bij uraniumwinning ¹¹⁾

Locatie	Individuele dosis per jaar (milliSv)		
	Gemiddelde waarde	Maximum waarde	Limiet*
Key Lake (milling, Canada)	1,1 (incl. 60% radon)	6.1 (incl, 34% radon)	20
Ranger (mining, Australie)	3,8	10	20
Olympic Dam (milling, Australie)	1,0	4,6	20
Olympic Dam (mining, Australie)	2,5	9,2	20

*) De gepresenteerde limiet is de waarde die in de EU maar ook in andere landen door het bevoegd gezag wordt gehanteerd. Deze waarde is gebaseerd op de aanbeveling van de ICRP voor blootgestelde werkers (dit zijn werknemers waarvan de ontvangen dosis nauwkeurig wordt geregistreerd en bewaakt).

Uit de gerapporteerde jaarlijkse doses die werknemers bij uraniumwinning ontvangen blijkt dat deze werknemers jaarlijks een hoge individuele dosis ontvangen, die echter beneden de jaarlimiet voor blootgestelde werkers blijft.

5.3. Vergelijking met winning van steenkool en aardgas

In deze sectie wordt een vergelijking gemaakt met de milieu- en gezondheidseffecten van steenkool- en aardgaswinning, waarbij wordt uitgegaan van het gebruik van 1260 kton steenkool en 950 miljoen m³ aardgas voor de elektrische energieproductie van 1GWe/jaar ¹²

Steenkool wordt gewonnen met ondergrondse mijnbouw en dagbouw. Hierbij ontstaat afvalgesteente dat bovengronds wordt opgeslagen. Omdat dit afval in vergelijking met afval van ertswinning, zoals uraniumwinning, geringe concentraties zware metalen bevat, zal het potentieel voor het ontstaan van verontreinigingen van zware metalen (inclusief uranium en thorium) ook geringer zijn. Zo bevat één kilo steenkool 114 Bq aan uranium en bijbehorende dochters en 77 Bq aan thorium en bijbehorende dochters¹³. Door de aanwezigheid van uranium in de steenkool en omringende gesteente kunnen in steenkoolmijnen verhoogde radonconcentraties op treden van ca. 900 Bq/m³ [Bijdrage op pagina 512 van de proceedings van 'Naturally occurring radioactive materials (NORM IV)', organized in Poland, May 2004, IAEA-TECDOC-1472]. De concentraties in het steenkool kunnen sterk variëren met het wingebed. Dit geldt ook voor de radonconcentraties in de mijnen, waarbij daarnaast de mate van ventilatie een belangrijke rol speelt.

Omdat van het opgeslagen afvalgesteente de matrix niet is verstoord, zullen in het geval van steenkool bij afspoeling door regen relatief minder zware metalen met het regenwater worden afgevoerd. Door de geringe concentraties uranium in het afvalgesteente en de steenkool zijn de radonemissies evenredig kleiner. De conclusie is dat bij steenkoolwinning de gezondheidseffecten door blootstelling aan radioactieve stoffen en straling, in evenredigheid met de lage concentraties uranium en thorium, kleiner zijn dan die bij uraniumwinning

Belangrijkste milieueffect bij steenkoolwinning is de relatief grote hoeveelheid afvalgesteente in relatie tot de energie-inhoud van de gewonnen steenkool. De gevolgen van blootstelling aan stof is zowel voor de werkers als de bevolking in de omgeving, het belangrijke gezondheidseffect van winning van steenkool.

¹² Kerncentrale Borssele na 2013, ECN-C- -05-094/NRG 21264/05.69766/C, November 2005

¹³ Radioactivity of combustion residues from coal fired power stations (VGB Duitsland en Saar Universiteit): contribution to the proceedings of the International symposium on radiological problems with natural radioactivity in the Non-Nuclear Industry, Amsterdam, September 1997.

Bij de winning van olie en gas ontstaat er een kleine hoeveelheid afval met verhoogde concentraties zware metalen, waaronder de met het productiewater meegekomen dochters van uranium en thorium, zoals radium en lood. Het radon wordt met het gewonnen aardgas meegevoerd (ca. 300 Bq/ m³). Bij het productieproces komt per 72 miljard m³ gewonnen aardgas 500 GBq aan radonactiviteit in de omgeving vrij. Bij de productie van 1 GWe.j wordt 0,95 miljard m³ aardgas gebruikt en bij de winning van deze hoeveelheid komt 6,6 GBq radon vrij. Deze hoeveelheid is meer dan een factor 140 lager dan de 950 GBq radon, die vrijkomt bij de hoeveelheid uranium waarmee eveneens 1 GWe.j wordt geproduceerd. Evenredig hiermee zullen ook de gezondheidseffecten kleiner zijn.

Een essentieel verschil tussen de uraniumwinning en de winning van andere zware metalen is, dat tijdens en na uraniummijnbouw naast de lange-termijnbescherming tegen blootstelling aan de meegewonnen zware metalen (waartoe uranium en dochters behoren), ook maatregelen getroffen moeten worden om blootstelling aan straling en radioactieve stoffen op de zeer lange termijn (tienduizenden jaren) uit te sluiten.

5.4. Conclusie

De effecten op het milieu van uraniumwinning worden met name veroorzaakt door bij de ertswinning en uraniumextractie vrijgekomen afvalstoffen die deels bovengronds worden opgeslagen. Nadelige effecten bij blootstelling aan deze afvalstoffen zullen zonder beschermende maatregelen tot een zeer lange tijd (tienduizenden jaren) na afloop van exploitatie aanwezig blijven.

De afvalstoffen (waste rock en tailings) bevatten verhoogde concentraties zware metalen waaronder, met name in de tailings, restanten uranium en de radioactieve dochters hiervan, waaronder radium (²²⁶Ra) waaruit het radioactieve edelgas radon (²²²Rn) voortkomt. Zonder tegenmaatregelen kunnen de zware metalen in het afval zich in de omgeving verspreiden naar de bodem en in het grondwater. Het radon komt vrij in de directe omgeving van de mijn. De mate waarin het vrijkomt hangt af van de wijze waarop de tailings zijn afgedekt..

Op basis van metingen zijn de doses van blootgestelde werknemers bepaald, die in overzichten van de NEA zijn gepubliceerd. Blootstelling van de bevolking is op basis van literatuurgegevens, geschatte emissies en verspreidingsberekeningen bepaald.

Er is steeds meer belangstelling voor het verantwoord omgaan met mijnbouw. Veel grote mijnbouwbedrijven in Australië, Canada en Kazachstan (de drie grootste producenten) beschikken tegenwoordig over een ISO 14001 certificaat, dat aangeeft dat deze bedrijven een controleerbaar milieuzorgsysteem bezitten. Onduidelijk is echter of ook elders zorgvuldig met mijnbouw en afval wordt omgegaan. Er kan dan ook niet in algemene zin en voor alle mijnen worden geconcludeerd dat omwonenden van uraniummijnen een dosis radon ontvangen die blijft binnen de in Nederland gehanteerde bronlimiet van 100 microSv.

Recentelijk (2004) betrok EPZ zijn uranium uit Kazachstan, waar ISL een belangrijke manier van mijnbouw is. De installaties waarvan EPZ zijn grondstoffen betreft, zijn ISO 14001 gecertificeerd door bureau Veritas Quality International.

6

Relevantie voor Nederland

Bij voortzetting of uitbreiding van kernenergie in Nederland zal het ook in de toekomst nodig zijn uranium uit de wereldwijde geologische uraniumvoorraden te winnen om een kerncentrale of meerdere kerncentrales van uranium te kunnen voorzien. De mogelijke consequenties hiervan spitsen zich toe op twee vragen:

- Kan de levering van uranium als brandstof voor een eventuele nieuwe kerncentrale in Nederland in gevaar komen door de karakteristieken van uraniumwinning en de mondiale uraniummarkt?
- Wat zijn de milieu- en gezondheidsconsequenties van uraniumwinning voor een kerncentrale in Nederland, en zijn deze ernstiger dan die van mogelijke alternatieven?

Hierna bespreken wij onze conclusies ten aanzien van beide vragen, op basis van de feiten die in de hoofdstukken hiervoor zijn besproken.

6.1. Voorzieningszekerheid

De geologische voorraden uranium zijn groot en wereldwijd verspreid. Wanneer deze voorraden allemaal worden ingezet, dan zijn er in de komende decennia waarschijnlijk geen problemen te verwachten bij levering van uranium aan Nederland. Op de langere termijn is deze leveringszekerheid echter minder duidelijk. Welke geologische voorraden in de toekomst geëxploiteerd kunnen worden, hangt af van onder meer technologische ontwikkelingen, waardoor ook uraniumertsen met een lage tot zeer lage concentratie gewonnen kunnen worden, en van marktontwikkelingen, die bepalen welke ertsen economisch rendabel winbaar zijn. Exploitatie van laagwaardiger ertsen zou kunnen leiden tot een toename van milieu- en gezondheidseffecten.

Door een stijgende vraag en een dalend aanbod van uranium zal mogelijk rond 2015 een gat tussen vraag en aanbod kunnen ontstaan, met een stijging van de uraniumprijzen tot gevolg. Ook kan mogelijk marktfictie ontstaan door de lange aanlooptijd van het in gebruik nemen van nieuwe uraniummijnen. Wanneer de gevolgen van de schaarste beperkt blijven tot een hogere uraniumprijs zullen deze geen belemmerende factor vormen voor de inzet van kernenergie in Nederland, aangezien de uraniumprijs maar een klein deel uitmaakt van de totale kosten van kernenergie. Wel is het aantal landen met grote aangetoonde voorraden beperkt, zodat bij toenemende schaarste een afhankelijkheid zal kunnen ontstaan van de grote leveranciers. Dat zijn met name Canada, Kazachstan en Australië.

6.2. Milieu- en gezondheidseffecten

Door de mijnbouw komt materiaal uit de aardkorst dat van nature hoge concentraties zware metalen bevat aan het oppervlak te liggen. Hieronder bevindt zich ook de radioactieve stof uranium en zijn (deels langlevende) radioactieve dochters waaronder het edelgas radon (^{222}Rn). Omdat de tailings die na extractie van het uranium bovengronds worden opgeslagen de uraniumdochteren bevatten kan het radongas emitteren. Als de 'tailings' niet worden afgedekt, kunnen deze ook verstuiven en afspoelen waardoor dit materiaal in de omgeving wordt verspreid en daarmee ook de zware metalen en radioactieve stoffen die zich daarin bevinden. Afdekking beperkt ook efficiënt de emissies van radon. Als de 'tailings' niet worden afgedekt zorgt dat voor een voortdurende belasting van de omgeving in de vorm van lokaal verhoogd stralingsniveau en verspreiding van (radioactief) stof en radon. Bij mijnen

in het verleden heeft deze afdekking niet plaatsgevonden, wat nog steeds voor milieu- en gezondheidseffecten zorgt. Tegenwoordig worden bij zorgvuldige mijnbouw de ‘tailings’ wel afgedekt en wordt het landschap na beëindigen van de mijnbouwactiviteit hersteld. Onduidelijk is of dit ook bij alle mijnen en in alle landen even nauwkeurig gebeurt.

Blootstelling aan concentraties zware metalen, radioactieve stof en radon die vrijkomen uit de bovengronds opgeslagen ‘tailings’ en ander mijnafval’, heeft nadelige effecten op de gezondheid, evenals de blootstelling (op locatie) aan de ioniserende straling van uit de opgeslagen afvalstoffen. In deze studie zijn zover het radioactieve stoffen en straling betreft, de nadelig gezondheidseffecten gekwantificeerd in termen van bij de blootstelling ontvangen stralingsdoses. Deze stralingsdoses zijn vergeleken met jaarlijkse dosislimieten zoals die in Nederland van toepassing zijn. Zowel bij de blootgestelde werknemers als bij een fictieve buiten de winninglocatie permanent wonende persoon voldoen de gemeten, respectievelijk, geschatte jaardoses aan deze limieten, bij een beschouwde groep niet-sedentaire jagers/verzamelaars en in andere gerapporteerde praktijksituaties worden de limietwaarden overschreden.

Afhankelijk van het type mijnbouw, dagbouw, ondergrondse mijnbouw of oplossingsmijnbouw bedraagt bij uraniumwinning de hoeveelheid geproduceerd afval per ton gewonnen uranium maximaal 5000 ton voor dagbouw. Bij oplossingsmijnbouw wordt de kleinste hoeveelheid afval geproduceerd. Bij oplossingsmijnbouw met een goede nazorg, na beëindiging van de activiteit, zijn de milieueffecten en daarmee de gezondheidseffecten het geringst.

Bij toenemende schaarste van uranium in de toekomst kunnen milieueffecten toenemen, doordat de hoeveelheid om te zetten materiaal en het (fossiele) energieverbruik voor winning zal stijgen. Door dat laatste nemen ook CO₂-emissies in de kernenergieketen toe.

In Nederland betrof EPZ recentelijk (2004) EPZ zijn uranium uit Kazachstan, waar ISL een belangrijke manier van mijnbouw is. De installaties waarvan EPZ zijn grondstoffen betreft, zijn ISO 14001 gecertificeerd door bureau Veritas Quality International.

6.3. Discussie en aanbevelingen

Uraniumwinning vindt buiten Nederland plaats, waardoor de milieu- en gezondheidseffecten hiervan elders optreden. Het aspect van ketenverantwoordelijkheid in de energieketen roept echter de vraag op of Nederland al dan niet verantwoordelijkheid moet nemen voor deze milieu- en gezondheidseffecten. Een bredere discussie hierover zou wenselijk zijn. Analoog aan de certificering van hernieuwbare energiebronnen kunnen daarin ook de mogelijkheden tot certificering van herkomst betrokken worden. Deze discussie geldt echter niet alleen voor uranium en de kernenergieketen, maar ook voor olie, gas en steenkool, waarbij eveneens milieu- en gezondheidseffecten plaatsvinden bij winning en verwerking buiten Nederland.

Literatuur

Borssele, 2005

Kerncentrale Borssele na 2013, ECN-C- -05-094/NRG 21264/05.69766/C, November 2005.

Bs 2002

Besluit stralingbescherming. Staatsblad **81**, 2002

Diehl, 2006

Diehl, Peter

Reichweite der Uran-Vorräte der Welt

Rapport voor Greenpeace Duitsland

Berlijn, januari 2006

ECOINVENT, 2006

<http://www.ecoinvent.ch>

EIA, 2006

Energy Information Administration, 2006

International Energy Outlook 2006

<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/electricity.pdf#search=%22iea%20electricity%20outlook%22>

EXTERNE, 2000

<http://externe.jrc.es/>

Gitzel, 2005

Gitzel, Tim

Challenging or Easy? Natural Uranium Availability to fuel a Nuclear Renaissance

World Nuclear Association Nuclear Symposium

London, 7-9 September 2005

Haruo Maeda, 2006

World Nuclear Association 2006

The Global Nuclear Fuel Market - Supply and Demand 2005 to 2030

<http://www.world-nuclear.org/sym/2005/pdf/Maeda.pdf>

IAEA 1993

Uranium Extraction Technology, IAEA Technical Report Series No. 359, Wenen, 1993.

Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2003

The Future of Nuclear Power

Cambridge, Massachusetts

Mudd, 2003

Uranium Mining in Australia: Environmental impact, radiation releases and rehabilitation: page 179 of the proceedings of 'Protection of the Environment from Ionizing Radiation: the Development and Application of a System of Radiation Protection for the Environment', IAEA-CSP-17, IAEA, Wenen, May 2003.

NEA 2000

Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options,
OECD/NEA, OECD, ISBN 92-64-17657-8 (2000).

NEA 2001

OECD/NEA Expert Group on Trends in the Nuclear Fuel Cycle,
'Trends in the Nuclear Fuel Cycle: Economic Environmental and Social Considerations', OECD 2001.

NEA 2001

Trends in the nuclear fuel cycle : Economic, Environmental and Social Aspects
Parijs

NEA/IAEA 2002

Environmental Remediation of Uranium Production Facilities:
A joint report by the OECD/NEA and the IAEA, OECD 2002.

NORM 1997

Radioactivity of combustion residues from coal fired power stations (VGB Duitsland en Saar
Universiteit): Contribution to the proceedings of the International symposium on radiological
problems with natural radioactivity in the Non-Nuclear Industry, Amsterdam, September 1997.

NORM IV, 2004

Bijdrage op bladzijde 512 van de proceedings van de 'Naturally Occurring Radioactive Materials
(NORM IV)', Poland, May 2004, IAEA-TECDOC-1472.

Nuclear Energy Agency (NEA), 2006

Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective
Parijs, 2006

Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency, 2006

Uranium 2005: Resources, Production and Demand
Parijs, 2006

SENES, 1998

D.B. Chambers, L.M. Lowe, R.H. Stager
Long term population dose due to radon from uranium mill tailings
Paper presented at twenty-third annual symposium, 10-11 September 1998 in London
www.world-nuclear.org/sym/1998/chambe.htm

UNSCEAR, 2000

UNSCEAR 2000 report sources and effects of ionizing radiation
Report to the General Assembly, with scientific annexes
Volume I: SOURCES
Appendix C: Exposures to the public from man-made sources of radiation
United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Vienna,
<http://www.unscear.org/docs/reports/annexc.pdf>

WISE Uranium project, 2006

<http://www.wise-uranium.org>

World Nuclear Association, 2006

Information briefs
http://www.world-nuclear.org/info/printable_information_papers

UIC 1999

Uranium institute Information Centre, 1999.

UNSCEAR 2000

Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly, 2000.

WNA 2006

World Nuclear Association, 2006

Information briefs

http://www.world-nuclear.org/info/printable_information_papers.

Andere geraadpleegde websites zijn onder meer:

<http://www.world-nuclear.org/info/inf27.html>

<http://japanfocus.org/products/details/1626>

<http://www.wise-uranium.org/purec.html>

http://www.stormsmith.nl/report20050803/Chap_2.pdf

<http://www.deh.gov.au/ssd/uranium-mining/index.html>.

<http://www.kazakhembus.com/072402.html>.

<http://www.economist.com.na/2001/060401/story22.htm>.

http://www.ecnt.org/pdf/mining_2001_04_27_rio.pdf.

<http://www.kazakhembus.com/072402.html>

Annex A: Overzicht kernenergie wereldwijd

	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION 2005		REACTORS OPERABLE May 2006		REACTORS under CONSTRUCTION May 2006		REACTORS PLANNED May 2006		REACTORS PROPOSED May 2006		URANIUM REQUIRED 2006
	billion kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U
Argentina	6.4	6.9	2	935	1	692	0	0	0	0	134
Armenia	2.5	43	1	376	0	0	0	0	1	1000	51
Belgium	45.3	56	7	5728	0	0	0	0	0	0	1075
Brazil	9.9	2.5	2	1901	0	0	1	1245	0	0	336
Bulgaria	17.3	44	4	2722	0	0	2	1900	0	0	253
Canada*	86.8	15	18	12595	0	0	2	1540	0	0	1635
China	50.3	2.0	10	7587	5	4170	5	4600	19	15000	1294
Czech Republic	23.3	31	6	3472	0	0	0	0	2	1900	540
Egypt	0	0	0	0	0	0	0	0	1	600	0
Finland	22.3	33	4	2676	1	1600	0	0	0	0	473
France	430.9	79	59	63473	0	0	1	1630	1	1600	10146
Germany	154.6	31	17	20303	0	0	0	0	0	0	3458
Hungary	13.0	37	4	1755	0	0	0	0	0	0	251
India	15.7	2.8	15	2993	8	3638	0	0	24	13160	1334
Indonesia	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4000	0
Iran	0	0	0	0	1	915	2	1900	3	2850	0
Israel	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200	0
Japan	280.7	29	55	47700	1	866	12	14782	0	0	8169
Korea DPR (North)	0	0	0	0	1	950	1	950	0	0	0
Korea RO (South)	139.3	45	20	16840	0	0	8	9200	0	0	3037
Lithuania	10.3	70	1	1185	0	0	0	0	1	1000	134
Mexico	10.8	5.0	2	1310	0	0	0	0	2	2000	256
Netherlands	3.8	3.9	1	452	0	0	0	0	0	0	112
Pakistan	1.9	2.8	2	425	1	300	0	0	2	1200	64
Romania	5.1	8.6	1	655	1	655	0	0	3	1995	176
Russia	137.3	16	31	21743	4	3600	1	925	8	9375	3439
Slovakia	16.3	56	6	2472	0	0	0	0	2	840	356
Slovenia	5.6	42	1	676	0	0	0	0	0	0	144
South Africa	12.2	5.5	2	1842	0	0	1	165	24	4000	329
Spain	54.7	20	8	7442	0	0	0	0	0	0	1505
Sweden	69.5	45	10	8938	0	0	0	0	0	0	1435

Switzerland	22.1	32	5	3220	0	0	0	0	0	0	575
Turkey	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4500	0
Ukraine	83.3	49	15	13168	0	0	2	1900	0	0	1988
United Kingdom	75.2	20	23	11852	0	0	0	0	0	0	2158
USA	780.5	19	103	98054	1	1065	0	0	13	17000	19715
Vietnam	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
WORLD**	2626	16	441	369,374	27	21,051	38	40,737	115	83,620	65,478
	billion kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U
	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION 2005	REACTORS OPERATING		REACTORS BUILDING		ON ORDER or PLANNED		PROPOSED		URANIUM REQUIRED	

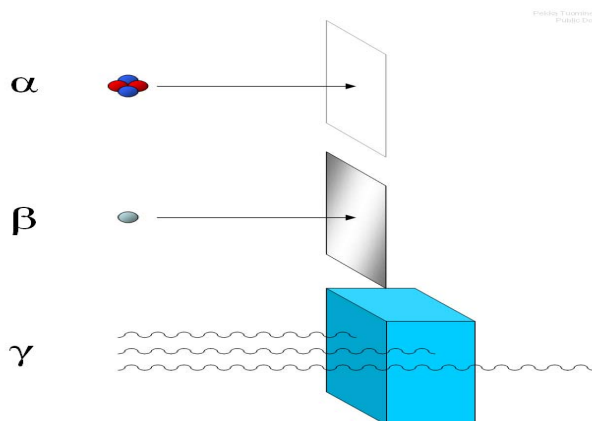
Bronnen: World Nuclear Association 31/5/2006 (reactor- en uraniumdata); IAEA 5/2006 (elektriciteitsproductie).

Annex B: Radiologische aspecten

Ioniserende straling

Bij verval van radioactieve stoffen komt hoogenergetische straling vrij die in staat is atomen in de materialen die worden bestraald, dus ook menselijk weefsel, te ioniseren. De meest voorkomende soorten ioniserende straling zijn alfastraling, bètastraling, gammastraling en röntgenstraling. Alfastraling en bètastraling bestaan uit deeltjes, terwijl gammastraling en röntgenstraling elektromagnetische straling is. Gammastraling is daarbij afkomstig uit atoomkernen, terwijl röntgenstraling geproduceerd wordt in de buitenste elektronenschillen van een atoom, bijvoorbeeld door beschieting met snelle elektronen zoals in een röntgentoestel. In de onderstaande figuur zijn de drie typen straling weergegeven.

Illustratie typen ioniserende straling



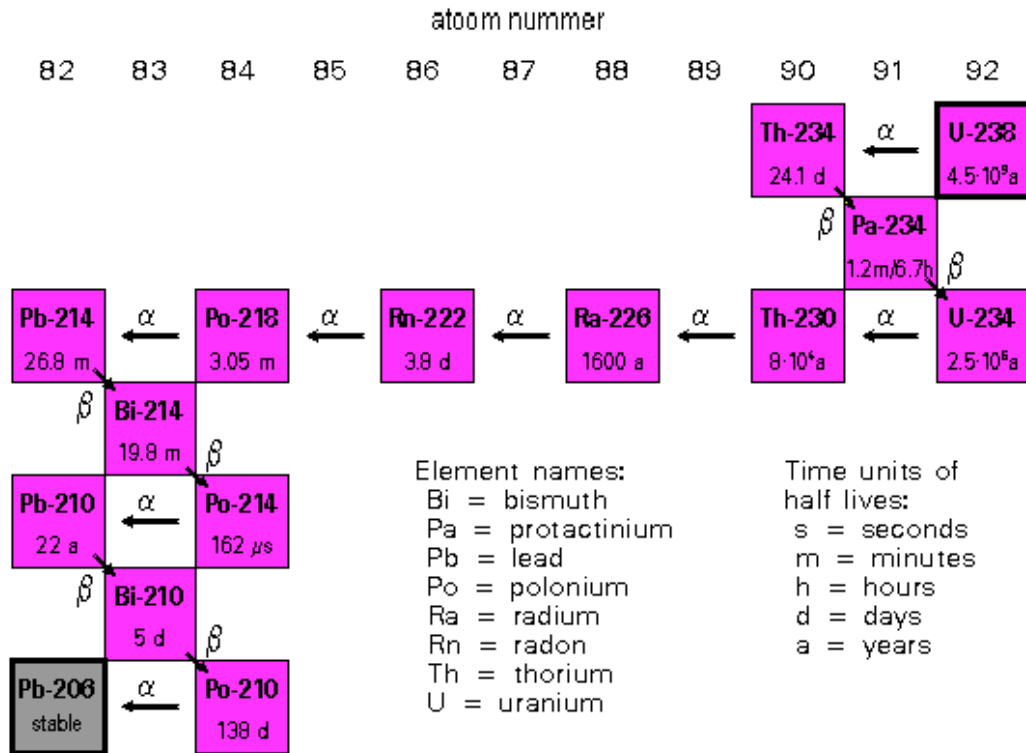
Alfastraling wordt in hoofdzaak uitgezonden door radioactieve isotopen met een atoomgetal groter dan 82. Hier vallen ook de uraniumisotopen en een aantal van hun vervalproducten onder. Alfastraling bestaat uit heliumkernen. Het betreft relatief zware en langzame deeltjes, die niet door de huid dringen, maar bijvoorbeeld bij inademing van een radioactieve stof gevolgd door incorporatie in weefsel inwendig schadelijke effecten op kunnen leveren. Door de korte dracht van alfadeeltjes wordt alle energie afgegeven in een klein gebiedje, waardoor het relatieve biologische effect groter is dan bij bèta- en gammastraling. Bètastraling bestaat uit hoogenergetische elektronen die wel enigszins door de huid kunnen dringen en daar oppervlakkig een dosis kunnen afgeven. Evenals bij alfadeeltjes wordt de grootste schade aangericht bij inwendige besmetting bijvoorbeeld wanneer een bron van bètastraling wordt ingeademd of ingeslikt. Gammastraling is hoogenergetische elektromagnetische straling met een hoog penetratievermogen, waardoor het bij zowel in- als uitwendige blootstelling een schadelijk effect heeft op weefsels door het gehele lichaam.

Iedereen wordt voortdurend blootgesteld aan straling van natuurlijke oorsprong, zowel door straling afkomstig uit de ruimte (kosmische straling) als straling afkomstig uit het aardoppervlak. Kosmische straling bestaat aan het aardoppervlak met name uit gammastraling. Verder komt straling uit de bodem, gesteenten en uit van natuurlijke materialen vervaardigde bouwmaterialen. De bron van deze straling vormt de aanwezigheid van de zogenaamde primordiale elementen uranium, thorium en kalium in de aardkorst. Tenslotte is er ook de stralingsbelasting als gevolg van bepaalde vormen van medisch onderzoek. Gemiddeld ontvangt een lid van de wereldbevolking een dosis van 2,5 mSv per jaar als gevolg van blootstelling aan natuurlijke stralingsbronnen en medische toepassingen.

In dit rapport beschouwen we met name de effecten van de extra stralingsblootstelling van omwonenden van de uraniummijnen en niet de gevolgen voor de mijnwerkers zelf. Voor deze werkers wordt de blootstelling voortdurend bewaakt en wordt hierop ingespeeld bij de planning van hun activiteiten.

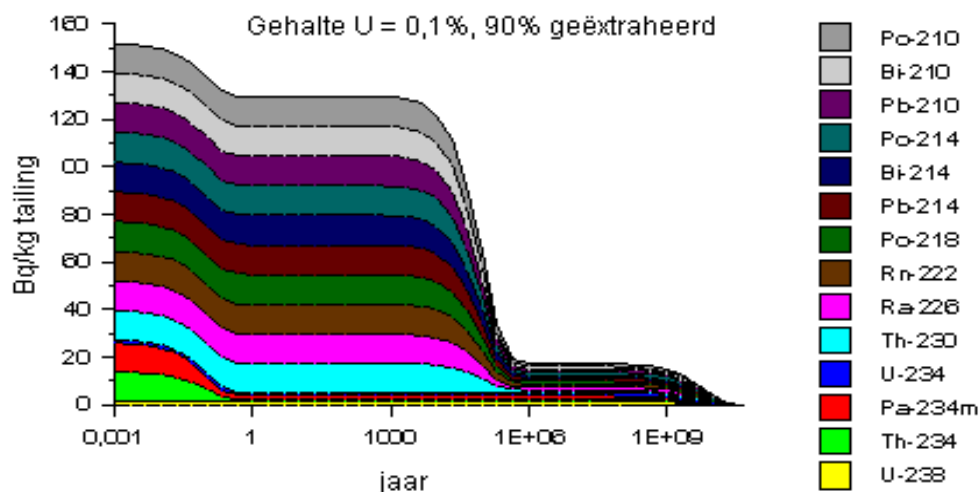
Uranium vervalreeksen

Natuurlijk uranium bestaat uit drie uraniumisotopen, te weten ^{238}U , ^{235}U en ^{234}U met een natuurlijk voorkomen van respectievelijk 99,275%, 0,72% en 0,005%. Het nuclide ^{238}U vervalt in veertien stappen tot een stabiel loodisotoop (^{206}Pb), terwijl ^{235}U in elf stappen tot stabiel ^{207}Pb vervalt. ^{234}U maakt onderdeel uit van de ^{238}U -vervalreeks en heeft bijgevolg in natuurlijk uranium dezelfde radioactiviteit als het moederisotoop. Hieronder is de vervalreeks van ^{238}U weergegeven.



De uraniumisotopen ^{238}U en ^{235}U hebben halfwaardetijden van respectievelijk 4,5 en 0,7 miljard jaar. In uraniumerts wordt 96,5% van de activiteit veroorzaakt door ^{238}U en de aan ^{238}U gerelateerde vervalproducten. De overige 3,5% is afkomstig van de ^{235}U vervalreeks. De totale activiteit van uranium inclusief al zijn vervalproducten, bedraagt ongeveer 0,7 MBq per kg erts (bij 0,5% gewichtseenheden U_3O_8 in het erts). Door de lange halfwaardetijden verandert deze activiteit nauwelijks op een tijdschaal van miljarden jaren.

Bij uraniumextractie wordt 90 - 95% van het uranium geïsoleerd en daarmee onmiddellijk circa 13% van de radioactiviteit van het oorspronkelijke erts. Door verwijdering van uranium neemt ook het gehalte aan de kortlevende isotopen van thorium (^{234}Th , ^{231}Th) en protactinium ($^{234\text{m}}\text{Pa}$, ^{234}Pa) snel af, waardoor enkele maanden na de winning nog maar 75% van de oorspronkelijke radioactiviteit in de tailings aanwezig is. Deze straling neemt vervolgens over een lange tijdsduur geleidelijk af, waarbij het verval gedomineerd wordt door de halfwaardetijd van ^{230}Th , zoals hiernaar is weergegeven.



In termen van alfa-activiteit neemt de straling eveneens met circa 25% af, terwijl de bèta-activiteit met ongeveer 30% wordt gereduceerd. De gammastraling neemt ten opzicht van het oorspronkelijke erts slechts met enkele procenten af.

In de uranium vervalreeks neemt het radionuclide ^{222}Rn een bijzondere plaats in. Radon is een edelgas is met een halfwaardetijd die lang genoeg is om het nuclide (deels) uit de tailing te laten ontwijken. Het vrijkomend radon vermengt zich met de buitenlucht en zal via windtransport omwonenden bereiken. Het inademen van radon zelf levert nauwelijks een dosisbijdrage op. Radon vervalt echter naar kortlevende vaste radioactieve stoffen van polonium, lood en bismuth (zie figuur met vervalreeks) die zich hechten aan stof aërosoldeeltjes. Bij inademing hiervan kunnen deze radioactieve stoffen in de long achterblijven en daar lokaal een hoge stralingsdosis afgeven. De radionucliden die uit het in de tailings vastgehouden radon worden geproduceerd blijven in de tailings achter en geven daar in hoofdzaak een dosis door externe bestraling.

Het risico van straling

In de geraadpleegde studies wordt alleen rekening gehouden met schade aan de menselijke gezondheid en niet met die voor andere levende organismen. Een daarvoor wel genoemde reden is dat het menselijk lichaam als relatief gevoelig wordt beschouwd en dat bescherming van de mens automatisch bescherming van andere organismen tot gevolg heeft.

Menselijk celweefsel kan ioniseren en daarbij beschadigd raken onder invloed van straling. De schade aan het weefsel is afhankelijk van de ontvangen dosis straling. Bij zeer hoge doses en dosistempereert treedt onherstelbare schade op waardoor de cel afsterft. Indien zeer veel cellen worden getroffen kan dit leiden tot uitval van orgaanfuncties met de dood tot gevolg. We spreken dan over acute of deterministische effecten.

Bij lage doses straling kunnen veranderingen in de DNA-structuur van de cel optreden, waardoor op termijn de cel kan muteren in een kankercel. Deze effecten, waarvan de kans van optreden afhankelijk is van de stralingsdosis, worden pas na zeer lange tijd zichtbaar en worden daarom ook wel late of stochastische effecten genoemd. De kans op optreden van late effecten wordt door de ICRP thans geschat op ca. 5% per sievert bij een homogene lichaamsbestraling. Hoewel deze risicoschatting gebaseerd is op epidemiologische gegevens van kankersterfte na blootstelling aan relatief hoge doses straling gaat men er voorzichtigheidshalve van uit dat dit risicogetal ook geldt voor lage tot zeer lage doses straling (lineaire dosis-effect relatie zonder drempel). Op basis van epidemiologische studies bij mijnwerkers gelden voor de blootstelling aan radon afwijkende risicogetallen.

In de stralingshygiëne worden verschillende grootheden en eenheden gebruikt, welke zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

	Notatie	Naam eenheid	SI-eenheid	Opm.
Activiteit	A of Q	becquerel (Bq)	s ⁻¹	1 Bq = 2,7 10 ⁻¹¹ Ci
Kerma	K _a	gray (Gy)	J.kg ⁻¹	geabsorbeerde dosis in lucht
Geabsorbeerde dosis	D	gray (Gy)	J.kg ⁻¹	geabsorbeerde dosis in weefsel
Equivalentente dosis	H	sievert (Sv)	J.kg ⁻¹	H = w _R * D
Effectieve dosis	E	sievert (Sv)	J.kg ⁻¹	E = Σ w _T * H _T

Eén becquerel (Bq) is de SI-eenheid voor radioactiviteit en staat voor het verval van één atoomkern per seconde. De oude eenheid curie (Ci) komt overeen met de activiteit van 1 gram radium en is gelijk aan 3,7 10¹⁰ Bq. Een gray komt overeen met een geabsorbeerde energie van één Joule per kilogram weefsel.

Om het risico van straling te bepalen wordt de geabsorbeerde dosis vermenigvuldigd met de relatieve biologische effectiviteit¹⁴ en uitgedrukt in sieverts. Om van grays naar sieverts te gaan moet het effect van elk type straling afzonderlijk worden beschouwd. Voor beta- en gammastraling bedraagt de stralingsweefactor 1; voor alfastraling bedraagt deze 20.

Niet elk orgaan is, bij een zelfde equivalentente dosis, even gevoelig voor het ontwikkelen van een al dan niet fatale kanker. Om dit verschil in gevoeligheid bij een niet homogene lichaamsbestraling in rekening te brengen is de orgaanweefactor w_T geïntroduceerd.

Relatie radioactieve stoffen en gezondheidsschade

Bij de afleiding en beoordeling van de mogelijke individuele gezondheidsschade tengevolge van de bij de uraniumwinning vrijkomende radioactieve stoffen zijn een aantal parameters van belang die van invloed zijn op de blootstelling van omwonenden. Deze zijn:

- De aard van de straling (α, β of γ);
- De intensiteit van de straling welke wordt bepaald door de activiteit en de afstand tot de bron;
- De tijdduur waarin blootstelling plaatsvindt;
- De mate van verspreiding van het radioactieve materiaal in de omgeving;
- De mate van inname of externe blootstelling van personen;
- De wijze van blootstelling (via ingestie of door inademing);
- De radiotoxiciteit van de ingeslikt of ingeademde stof.

De radionucliden in de tailings zenden gammastraling uit, waarbij aan het oppervlak van de depots stralingsniveaus van 20 - 100 maal de achtergrondniveaus worden gemeten. De gammastraling neemt echter snel met de afstand af, waardoor alleen mensen die vlakbij een dergelijk depot verblijven een blootstelling kunnen ontvangen.

Indien geen maatregelen worden genomen om het ontwijken van radon tegen te gaan kunnen door verspreiding personen, die op enige afstand van het depot woonachtig zijn, een blootstelling ontvangen. Door verdunning en verval van het radon zijn de toegevoegde concentraties in de woonomgeving niet meetbaar ten opzicht van de natuurlijke radonconcentraties. Een derde mechanisme waardoor omwonenden kunnen worden blootgesteld is resuspensie van gedroogd fijn stof en verspreiding via de lucht naar de woonomgeving. Dit wordt voorkomen door de tailings tijdens de

¹⁴ Het relatieve biologische effect wordt tegenwoordig aangeduid met de term stralingsweefactor (w_R).

exploitatie nat te houden en na de exploitatie af te dekken. Deze maatregel heeft ook een positief effect op de radonemissie.

De individuele stralingsbelasting wordt bepaald op basis van de totale blootstelling in een kalenderjaar en getoetst aan de dosislimieten voor leden van de bevolking, die eveneens in mSv per jaar zijn gesteld. Hierbij wordt in het algemeen die groep uit de bevolking beschouwd die de hoogste jaardosis ontvangt.

De collectieve dosis van een bepaalde groep is gelijk aan het aantal personen maal de gemiddelde dosis van de personen in de groep. De bepaling van de collectieve blootstellingdoses is bedoeld om in het kader van ALARA het effect van dosisreducerende maatregelen voor een gedefinieerde groep personen te beoordelen, maar wordt vaak onterecht gebruikt om de consequenties van een praktijk over een groot gebied (soms tot duizenden km van de bron verwijderd) en over lange tijd (vaak tot de radioactieve stof volledig is vervallen) te sommeren. De resultaten van deze berekeningen, die uitgaan van een ongewijzigde situatie over vaak vele duizenden tot miljoenen jaren, hebben een zeer hoge mate van onnauwkeurigheid en hebben in de praktijk weinig waarde omdat ze niets zeggen over het werkelijke risico van de blootstelling. De collectieve dosis wordt uitgedrukt in persoon-sievert of mens-sievert.

