

# **Fact Finding Kernenergie**

## **t.b.v. de SER-Commissie Toekomstige Energievoorziening**

ECN

M.J.J. Scheepers

A.J. Seebregts

P. Lako

NRG

F.J. Blom

F. van Gemert

## Verantwoording

Dit onderzoek naar feiten en gegevens over kernenergie is uitgevoerd in opdracht van de Sociaal Economische Raad (SER) ten behoeve van de Commissie Toekomstige Energievoorziening voor een advies over de rol van kernenergie in de toekomstige Nederlandse elektriciteitsproductie. Het onderzoeksproject staat bij ECN geregistreerd onder nummer 7.7866. Bij NRG is het geregistreerd onder projectnummer 911821. Contactpersoon voor dit onderzoek bij de SER is drs. C.A. van der Wijst

Door de SER is een reviewcommissie ingesteld, bestaande uit prof. dr. W.C. Turkenburg (voorzitter), prof. dr. ir. T.H.J.J. van der Hagen en prof. dr. L. Reijnders. De reviewers hebben conceptversies van het rapport van commentaar voorzien. Opmerkingen en suggesties van de reviewcommissie zijn in dit rapport verwerkt. Eveneens zijn in Hoofdstuk 4 (Energiemarkt) opmerkingen en suggesties meegenomen van drs. M. Vermeulen van de NMa Directie Toezicht Energie (DTe).

De NRG-bijdragen aan dit rapport zijn: Hoofdstuk 2 (nucleaire technologie en veiligheidsaspecten), paragraaf over straling en radioactieve stoffen in Hoofdstuk 3 (Milieueffecten) en Hoofdstuk 8 (Kennisinfrastructuur kernenergie). Naast de vermelde NRG-auteurs is hieraan ook bijgedragen door A.D. Poley, J.F.A. van Hienen, R. Jansma en A.I. van Heek.

Voor het uitvoeren van een Maatschappelijke Impact Analyse (Hoofdstuk 10) hebben de auteurs van dit rapport ondersteuning gekregen van mw. drs. A.S. Verrips (CPB) en dr. J.C. Bollen (MNP).

## Abstract

This report, prepared for the Social and Economic Council of the Netherlands (SER), presents facts and figures on nuclear energy to enable a discussion on the role nuclear power in the transition to a sustainable energy supply for the Netherlands. The report covers a number of issues relevant to the subject. Facts and figures on the following issues are presented:

- Nuclear technology, safety and security (including non-proliferation and protection against terrorism).
- Environmental aspects (including greenhouse gas emissions of the nuclear energy lifecycle).
- Nuclear power and the power market (including impact of nuclear power on electricity market prices).
- Economic aspects (including costs of nuclear power and external costs and benefits).
- Policy issues (including sustainable development).
- Social acceptance of nuclear energy.
- Knowledge infrastructure for nuclear energy in the Netherlands.
- Nuclear power in long term energy scenarios for the Netherlands and Europe.

Using two long-term energy scenarios the report also presents a social impact analysis of an increasing share of nuclear power in the Dutch electricity supply.

# Inhoud

Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	6
Samenvatting	8
1. Inleiding	20
2. Nucleaire technologie en veiligheidsaspecten	22
2.1 Introductie van de splijstofcyclus	22
2.2 Front-end	27
2.2.1 Uraniumvoorraden	27
2.2.2 Mijnbouw en extractie	29
2.2.3 Conversie, verrijking en splijstoffabricage	29
2.3 De kernreactor	30
2.3.1 Typen reactoren	30
2.3.2 Overzicht van de ontwikkeling van de kernenergietechnologie	30
2.3.3 Generatie III reactoren	33
2.3.4 Generatie III <sup>+</sup> reactoren	34
2.3.5 Vierde generatie reactoren	35
2.4 Back-end	36
2.4.1 Directie berging	36
2.4.2 Opwerking	37
2.5 Technische veiligheid	38
2.5.1 Veiligheidsprincipes bij de splijstofcyclus	38
2.5.2 Technische veiligheid en beoordeling	40
2.5.3 Certificering	42
2.6 Beveiliging tegen risico's van proliferatie en terrorisme	43
2.6.1 Proliferatie	43
2.6.2 Terrorismen	45
3. Milieueffecten	47
3.1 Straling en radioactieve stoffen	48
3.1.1 Mijnbouw en ertsverwerking (front-end)	49
3.1.2 Conversie, verrijking en fabricage (front-end)	50
3.1.3 Kerncentrale in productiebedrijf	50
3.1.4 Opwerking en verglazing (back-end)	51
3.1.5 Eindberging (back-end)	51
3.1.6 Ontmanteling	52
3.2 CO <sub>2</sub> -emissies	53
4. Elektriciteitsmarkt	57
4.1 Liberalisering van de elektriciteitsmarkt	57
4.2 Mededingingsaspecten	63
4.3 Concurrentie met andere elektriciteitsproductietechnologieën	64
4.4 Inpassing kernenergie in het Nederlandse elektriciteitsstelsel	67
4.5 Factoren van belang voor de initiatiefnemer voor een kerncentrale	68
5. Economische aspecten	71
5.1 Kostengegevens over kernenergie	71
5.2 Economische rentabiliteit	76
5.3 Externe kosten en baten	80
6. Bestuurlijke aspecten	82
6.1 Duurzame ontwikkeling	82
6.2 Duurzame ontwikkeling en voorwaarden voor kernenergie	83

6.3	Rol van de Europese Unie	85
6.4	Randvoorwaarden voor kernenergie door de Nederlandse overheid	86
6.5	Situatie in andere Europese landen	91
6.5.1	Uitfaseren van kernenergie	91
6.5.2	Nieuwe kerncentrales	92
6.5.3	Beleid verwerking en opslag gebruikte splijtstof	93
7.	Maatschappelijke acceptatie	96
7.1	Wetenschappelijk onderzoek naar acceptatie kernenergie	96
7.2	Nederland	97
7.3	Europa	100
7.4	Perceptie van risico's van kolen- en kerncentrales	102
8.	Kennisinfrastructuur kernenergie	104
8.1	De huidige Nederlandse infrastructuur voor kernenergie	104
8.2	Nucleaire kennis bij de overheid	106
8.3	Kennisinfrastructuur in de toekomst	108
9.	Lange termijn energiescenario's	110
9.1	Huidige rol kernenergie	110
9.2	Soorten energiescenario's en hun resultaten	111
9.3	Energiescenario's voor Nederland	112
9.3.1	Elektriciteitsvraag	113
9.3.2	Elektriciteitsaanbod	115
9.3.3	Broeikasgasemissies	117
9.4	Energiescenario's voor Europa	118
9.4.1	Elektriciteitsvraag	119
9.4.2	Elektriciteitsaanbod	121
9.4.3	Broeikasgasemissies	122
10.	Maatschappelijke impact analyse	124
10.1	Uitgangspunten en aanpak	124
10.2	Economische gevolgen	126
10.3	Milieugevolgen	128
10.4	Sociale gevolgen	129
10.5	Ernstige ongevallen	129
	Referenties	132
Bijlage A	Vragenlijst Maatschappelijke Impact Analyse	139
Bijlage B	Beoordeling reviewers	145
B.1	Commentaar van prof.dr. W.C. Turkenburg	145
B.2	Commentaar van prof.dr.ir. T.H.J.J. van der Hagen	149
B.3	Commentaar van prof.dr. L. Reijnders	150

## Lijst van tabellen

Tabel 3.1	<i>Beschouwde milieueffecten gedurende de verschillende fasen in de levenscyclus en splijtstofcyclus onder normale bedrijfsomstandigheden</i>	48
Tabel 4.1	<i>Jaarcontractprijzen voor 2007, genoteerd in 2006</i>	61
Tabel 4.2	<i>Overzicht aansluitcontracten van nieuwe centrales met TenneT</i>	67
Tabel 5.1	<i>Kosten van kernenergie volgens diverse literatuurbronnen</i>	72
Tabel 5.2	<i>Kosten van kernenergie volgens diverse literatuurbronnen in € (2006)</i>	74
Tabel 5.3	<i>Kostprijs kernenergie volgens literatuurbronnen (generatie III kerncentrale; voor gebruikte splijtstof wordt gebruik gemaakt van directe opslag route die is gebaseerd op huidige technologie)</i>	80
Tabel 6.1	<i>Randvoorwaarden nieuwe kerncentrales (VROM, 2006)</i>	88
Tabel 6.2	<i>Verwerking en opslag van gebruikte splijtstof in enkele Europese landen (WNA, 2007a)</i>	94
Tabel 8.1	<i>Aantal medewerkers bij organisaties in Nederland die zich bezig houden met kernenergie</i>	106
Tabel 9.1	<i>Uitgangspunten voor de Nederlandse energiescenario's</i>	114
Tabel 9.2	<i>Verandering CO<sub>2</sub>-emissies in 2030 gerapporteerd in verschillende scenariostudies voor Nederland</i>	118
Tabel 9.3	<i>Uitgangspunten bij de Europese energiescenario's</i>	120
Tabel 9.4	<i>Verandering van de CO<sub>2</sub>-emissies in 2030 gerapporteerd in verschillende scenariostudies voor EU, met tussen haakjes de verandering bij de elektriciteitsproductie</i>	123

## Lijst van figuren

Figuur 2.1	<i>De splijststofcyclus</i>	23
Figuur 2.2	<i>Processen in een kerncentrale met een drukwaterreactor</i>	25
Figuur 2.3	<i>Bewezen en vermoedelijke uraniumreserves in de wereld</i>	28
Figuur 2.4	<i>Ontwikkeling kernenergie</i>	31
Figuur 2.5	<i>Ontwikkeling van kernreactoren in generaties</i>	32
Figuur 2.6	<i>De EPR in aanbouw in Finland</i>	34
Figuur 3.1	<i>Levensduur kerncentrale en splijststofcyclus</i>	47
Figuur 3.2	<i>Stralingsbelasting van Nederlandse bevolking vanuit diverse bronnen (totaal gemiddeld jaarlijks per persoon 2500 microsievert)</i>	49
Figuur 3.3	<i>Emissies van CO<sub>2</sub> voor de levenscyclus van kerncentrales gerapporteerd in verschillende LCA-studies. De Öko-Institut studie geeft voor 5 verschillende landen waarden. Voor de drie EU-landen worden de waarden apart getoond.</i>	54
Figuur 3.4	<i>Levenscyclus emissies van CO<sub>2</sub> van kerncentrales verdeeld over de verschillende fasen van de levensduur</i>	55
Figuur 3.5	<i>Levenscyclus emissies van CO<sub>2</sub> van kerncentrales vergeleken met huidige technieken om windenergie en zonne-energie (PV) te benutten. De bandbreedte voor kernenergie is gebaseerd op alle bronnen zoals in Figuur 4.3 aangegeven. De bronnen voor de bandbreedte voor windenergie en zon-PV zijn: EU, 2003; Vattenfall, 2005; Alsema &amp; de Wild-Scholten, 2006; Öko-Institut, 2007, waarbij de laatste bron de hoogste waarden aangeeft (24 en 101 g CO<sub>2</sub>/kWh voor resp. windenergie en zon-PV).</i>	56
Figuur 4.1	<i>Opbouw van de elektriciteitsprijs (indicatief) voor België, Duitsland, Frankrijk en Nederland (eindgebruikerprijzen voor 2007 zijn ontleend aan Eurostat; commodityprijzen op basis van gemiddelde prijzen voor jaarcontracten 2007, genoteerd in 2006; voor België zijn de commodityprijzen geschat)</i>	58
Figuur 4.2	<i>Vraag- en aanbodcurve bepalen de elektriciteitsprijs</i>	59
Figuur 4.3	<i>Elektriciteitsprijzen op de spotmarkt (indicatief, APX 15-5-2007) en elektriciteitscontracten</i>	60
Figuur 5.1	<i>Vergelijking van de kostprijs van kernenergie met enkele andere elektriciteitsproductietechnologieën, uitgaande van de huidige status van die technologieën. De bandbreedte voor aardgas en kolen is gebaseerd op (MIT, 2003; Royal Academy of Engineering, 2004; NEA 2005 en IEA, 2006), waarbij de bovengrens voor kolen wordt bepaald door kolenvergassing. De bandbreedte voor wind op land is gebaseerd op (Royal Academy of Engineering, 2004 en IEA, 2006) en wind op zee op (Royal Academy of Engineering, 2004)</i>	77
Figuur 7.1	<i>Verhouding tussen voor- en tegenstanders van uitbreiding van kernenergie</i>	100
Figuur 7.2	<i>Mate van bezorgdheid over het klimaatprobleem in EU-landen</i>	101
Figuur 7.3	<i>Mate waarin burgers de stelling onderschrijven dat kernenergie helpt bij het beperken van klimaatverandering</i>	102
Figuur 8.1	<i>Nederlandse organisaties die beschikken over nucleaire kennis in de splijststofcyclus</i>	104
Figuur 9.1	<i>Aandeel kernenergie in de elektriciteitsmix van Nederland (CBS, 2005) en de EU (Eurostat, 2004)</i>	110
Figuur 9.2	<i>Aandeel kernenergie in EU elektriciteitsproductie wanneer, behalve de nu geplande en in aanbouw zijnde kerncentrales, geen nieuwe kerncentrales worden gerealiseerd (op basis van verdeling bouwjaren (WNA, 2007), historische en geprojecteerde elektriciteitsvraag (EU, 2006 en Eurostat) en een capaciteitsfactor van 90%)</i>	111
Figuur 9.3	<i>Elektriciteitsvraag voor Nederland in 2005 en 2030 voor de verschillende scenario's</i>	113

Figuur 9.4	<i>Aandeel kernenergie en andere bronnen in het finale elektriciteitsverbruik voor Nederland in 2005 en in 2030 in verschillende energiescenario's (SEM voor 2025). In geval van netto-export is een negatief importsaldo weergegeven.</i>	116
Figuur 9.5	<i>Geprojecteerde elektriciteitsvraag voor de Europese Unie in 2030 in de beschouwde scenario's in vergelijking met 2005</i>	119
Figuur 9.6	<i>Aandeel elektriciteitsproductie uit kernenergie, fossiele brandstoffen en hernieuwbare energiebronnen voor Europa in 2005 en in 2030 volgens de beschouwde scenarioprojecties.</i>	122

## Samenvatting

Voor de beantwoording van de vraag of er bij het streven naar een duurzame energievoorziening in Nederland (meer) kernenergie kan en moet worden opgewekt, en zo ja onder welke voorwaarden, heeft de commissie Toekomstige Energievoorziening van de Sociaal Economische Raad (SER) een studie laten uitvoeren waarin feiten en gegevens over kernenergie zijn verzameld (fact finding). Hieronder wordt aan de hand van een aantal veelgestelde vragen een samenvatting gegeven van de informatie die in deze fact finding studie is te vinden.

### *Wat zijn de technische kenmerken van kernenergie?*

De energieproductie in een kerncentrale is gebaseerd op de splijting van atoomkernen van zware elementen, de zogenoemde splijtstoffen, waarbij materie wordt omgezet in energie. Door het instandhouden van een kettingreactie (het proces van opeenvolgende kernsplijtingen) wordt continu energie geproduceerd die via een aantal tussenstappen wordt gebruikt om een generator aan te drijven waarmee elektriciteit wordt geproduceerd. In de loop van de tijd zijn verschillende typen reactoren ontwikkeld. De typen reactoren die op dit moment het meest worden toegepast zijn de drukwaterreactor (*Pressurized Water Reactor*, PWR), zoals de kerncentrale Borssele, en de kokendwaterreactor (*Boiling Water Reactor*, BWR). In beide typen reactoren is een afgesloten stalen vat (reactorvat) geplaatst dat is gevuld met water. In het vat zit een constructie waarin een groot aantal splijstofelementen is geplaatst (de reactorkern). Het water in het reactorvat wordt verhit met de energie die vrijkomt in de splijstofelementen. Bij een drukwaterreactor wordt de warmte van het water uit het reactorvat gebruikt om in een zogenoemde stoomgenerator stoom te produceren. Deze stoom drijft een turbinegenerator aan waarmee elektriciteit wordt geproduceerd. Bij een kokendwaterreactor wordt de stoom direct in het reactorvat zelf geproduceerd.

Een kerncentrale gebruikt als brandstof splijstof, die eerst moet worden geproduceerd uit natuurlijke grondstoffen. De meeste kerncentrales gebruiken verrijkt uranium als splijstof. Het uraniumerts bestaat vrijwel geheel uit het isotoop uranium-238 (99,3%) en een kleine fractie uranium-235 (0,7%). Het gehalte uranium-235 wordt door verrijking verhoogd tot ongeveer 3 à 5%. In Nederland gebeurt dat met behulp van ultracentrifuges in Almelo. De stappen die moeten worden doorlopen om de splijstof voor de kerncentrale te maken - de zogenoemde 'front-end' van de splijstofcyclus - zijn: winning van het uraniumerts, onttrekken van uranium aan het erts, omzetting in gasvormig uranium hexafluoride, verrijking (waarbij het gehalte uranium-235 wordt verhoogd) en splijstoffabricage. Na het gebruik van de splijstof in de kerncentrale wordt de splijstof opgeborgen ('directe berging') of hergebruikt ('opgewerkt'). Deze 'back-end' van de splijstofcyclus kent dus twee mogelijke routes. Bij directe berging wordt de gebruikte splijstof eerst tijdelijk opgeslagen, daarna geconditioneerd om in een voor de eindberging geschikte vorm te worden gebracht. De huidige plannen voorzien in opslag in diep gelegen stabiele geologische formaties, zoals zout- en kleilagen of graniet. Bij het hergebruik wordt splijstof teruggewonnen (uranium en het bij de kernsplijting gevormde plutonium) om weer te worden gebruikt als brandstof voor kerncentrales. De resterende fractie wordt verglaasd en, na een tijdelijke opslag, volgens de huidige plannen eveneens opgeslagen in diepgelegen stabiele geologische formaties.

### *Hoe heeft de kernenergietechnologie zich ontwikkeld en welke ontwikkeling is nog te verwachten?*

Wereldwijd waren in 2006 437 kerncentrales in bedrijf met een totaal vermogen van 370 gigawatt waarmee in 17% van de wereldelektriciteitsvraag en 6% van de wereldenergievraag werd voorzien. Hiervan stonden er 144 in de 27 lidstaten van de Europese Unie met een totaal vermogen van 131 gigawatt, goed voor 31% van de Europese elektriciteitsvraag. Deze kerncentrales zijn bijna allemaal gebouwd in de jaren zeventig, tachtig en negentig van de vorige eeuw en



worden gerekend tot de tweede generatie. Kerncentrales van de eerste generatie waren bedoeld om de technologie te demonstreren. De kerncentrale Borssele heeft een vermogen van 480 megawatt en behoort ook tot de tweede generatie. In de jaren negentig heeft deze kerncentrale een omvangrijke revisie ondergaan waardoor de technische veiligheid is verbeterd. Onlangs is besloten dat de kerncentrale tot 2033 in bedrijf kan blijven. Twee ongevallen met kerncentrales van de tweede generatie, in 1979 in Harrisburg en in 1986 in Tsjernobyl, hebben de ontwikkelingen in belangrijke mate beïnvloed. Na de ongevallen is de nieuwbouw van kerncentrales sterk vertraagd. De ongevallen hebben echter ook geleid tot een verbetering van de veiligheid van kerncentrales (ook bij de bestaande centrales) en meer internationale samenwerking. Gebruikmakend van ervaringen met de bestaande reactoren is een nieuwe generatie reactoren ontwikkeld, waarvan de technische veiligheid verder is verbeterd. Deze reactoren worden aangeduid met generatie III. De nu commercieel verkrijgbare kerncentrales, met vermogens tussen 1000 en 1600 megawatt, passen reactoren toe van deze generatie. Daarnaast zijn nieuwe typen ontwikkeld die gebaseerd zijn op een andere splijstoftechnologie en veiligheidsfilosofie. Deze Hoge Temperatuur Reactoren (HTR), met een relatief klein vermogen, worden gerekend tot de generatie III+. Prototypen van deze kerncentrales worden nu ontwikkeld voor commerciële toepassing rond 2016. Deze hebben een elektrisch vermogen van circa 160 MW. Meer geavanceerde reactoren van de generatie IV, met verdere verbeteringen op het gebied van duurzaamheid, veiligheid, betrouwbaarheid en economie, bevinden zich nog in de ontwikkelingsfase en worden omstreeks 2030 op de markt verwacht.

#### *Hoe wordt de veiligheid van de technologie gewaarborgd?*

Bij elk van de processen van de splijstofcyclus is er een kans op een ongeval waarbij een hoeveelheid radioactieve stoffen ongecontroleerd in de omgeving terecht komt. Om zowel de kans op een dergelijk ongeval als de hoeveelheid radioactieve stoffen die hierbij zou vrijkomen te beperken, worden er bij de processen van de splijstofcyclus een groot aantal technische en organisatorische maatregelen toegepast. De eisen hiervoor zijn in de loop van de jaren steeds verder aangescherpt. Hierbij speelt het Internationaal Atoom Energie Agentschap van de Verenigde Naties in Wenen (IAEA) een grote rol. De IAEA, die toezicht houdt op het gebruik van nucleaire technologie en materialen, stelt onder meer veiligheidsstandaarden op. Deze standaarden zijn gebaseerd op het *defense in depth* principe. Hierbij wordt een strategie van veiligheidsmaatregelen en veiligheidsvoorzieningen gehanteerd met als uiteindelijke doel te voorkomen dat enig menselijke handeling, mechanisch falen of combinaties daarvan tot gezondheidsschade van omwonenden zal kunnen leiden. Aan het *defense-in-depth* principe wordt uitvoering gegeven door het aanbrengen van meerdere beveiligingslagen. Deze bestaan uit fysieke barrières (als ook de beveiliging daarvan), veiligheidssystemen en organisatorische maatregelen.

Bij de verschillende reactortypen worden verschillende veiligheidsfilosofieën gevolgd. Reactortypen van de derde generatie gaan uit van dezelfde *defense-in-depth* veiligheidsfilosofie als bestaande kerncentrales waarbij aanvullende veiligheidssystemen zijn aangebracht. De veiligheidsfilosofie is gebaseerd op *actieve en passieve veiligheidssystemen*. Actieve systemen staan onder normaal bedrijf uit en worden pas aangezet (geactiveerd) als dit voor de veiligheid nodig is. Passieve systemen maken gebruik van altijd aanwezige krachten, zoals de zwaartekracht, die ervoor zorgen dat veiligheidssystemen ingrijpen als dat nodig is. Bij reactortypen van generatie III+ wordt een andere veiligheidsfilosofie gehanteerd die toepassing van aparte veiligheidssystemen overbodig maakt. Bij *inherente veiligheid* is de reactor en de toegepaste splijstof zodanig ontworpen dat een ongecontroleerde reactiviteitsexkursie (een toename van de reactiviteit), waarbij de reactorkern beschadigd wordt, niet mogelijk is, en de reactor zichzelf veilig uitschakelt bij het uitvallen van de koeling. Bij wegvallen van de koeling blijft de reactorkern intact en is het smelten van de kern fysiek onmogelijk gemaakt.

#### *Hoeveel brandstof is er beschikbaar voor kerncentrales?*

De omvang van winbare uraniumvoorraden wordt gerelateerd aan de kosten van de uraniumwinning. Naarmate het winnen van uranium moeilijker wordt (bijvoorbeeld doordat de ertslagen dieper liggen of doordat de ertsen minder uranium bevatten), zal de prijs hoger zijn. De bekende

uraniumvoorraad bij een prijs van minder dan \$40 per kg bedraagt ongeveer 2,7 miljoen ton uranium. Bij een prijs van \$130 per kg nemen de bekende voorraden toe tot 4,7 miljoen ton. Deze voorraden zijn wereldwijd verspreid. De grootste voorraden liggen in Australië, Kazakstan en Canada. Bij het huidige uraniumgebruik voor de circa 440 kerncentrales in de wereld (circa 67.000 ton per jaar) is er genoeg voor circa 70 jaar. Deze termijn is afhankelijk van het aantal kerncentrales dat in de toekomst wordt geëxploiteerd. Naast deze voorraden zijn er schattingen die wijzen op moeilijker te winnen uraniumvoorraden met een omvang van 10 miljoen ton. Onconventionele voorraden van uranium zijn voorts aanwezig in fosfaatafzettingen (22 miljoen ton) en in zeewater (4000 miljoen ton). Ontwikkelingen in de nucleaire technologie richten zich onder meer op het efficiënter gebruik van uranium. Met de op dit moment in ontwikkeling zijnde vierde generatie reactoren wordt er naar gestreefd het uranium circa 100 maal efficiënter te gebruiken. Daarnaast kan voor het maken van splijtstof ook thorium worden gebruikt. De natuurlijke voorraden van thorium zijn ten minste vergelijkbaar met die van uranium.

#### *Wat wordt er met nucleair afval gedaan?*

Onderscheid moet worden gemaakt tussen laag-, middel- en hoogradioactief afval. Veel van het laag- en middelactieve afval zal in een periode van 100 jaar vervallen tot niet-radioactief afval. De hoogradioactieve gebruikte splijtstof heeft echter meer dan 100.000 jaar nodig voordat de radioactiviteit van langlevende radioactieve elementen het niveau bereikt van natuurlijk uranium. Deze tijdsduur wordt vooral bepaald door het in de gebruikte splijtstof aanwezige plutonium. In veel landen worden gebruikte splijtstofelementen in een apart bassin op de locatie van de kerncentrale tijdelijk opgeslagen. Bij sommige kerncentrales worden hiervoor speciale containers gebruikt (droge opslag). De bedoeling is dat de gebruikte splijtstofelementen uiteindelijk - na geëigende conditionering en verpakking - definitief in een ondergrondse eindberging worden opgeslagen.

In Nederland wordt de gebruikte splijtstof uit de kerncentrale Borssele eerst opgewerkt. Het hoogradioactieve verglaasde afval afkomstig uit de opwerkingsinstallatie in Frankrijk, met een levensduur van circa 10.000 jaar, wordt in Nederland in een speciaal, bunkerachtig gebouw opgeslagen, het zogenoemde HABOG bij de COVRA in Vlissingen. Jaarlijks gaat het om circa 1,3 kubieke meter. Dit is een bovengrondse opslagvoorziening waarin radioactief afval tijdelijk (tot maximaal 100 jaar) wordt opgeslagen. In die periode neemt de activiteit van het afval met een factor 10 af. Hoogradioactief afval zal, volgens de huidige plannen, na deze periode van opslag in het HABOG, in de diepe ondergrond worden opgeborgen.

In Europa is op dit moment nog nergens een ondergrondse eindberging in bedrijf voor hoogradioactief afval. Wel vinden veel experimenten plaats in ondergrondse testlaboratoria om eindberging in geologisch stabiele lagen te onderzoeken (onder meer in België, Frankrijk, Duitsland, Zwitserland, Zweden en Finland). In Zweden en Finland zijn er concrete projecten voor de realisatie van eindbergingsfaciliteiten voor de opslag van gebruikte splijtstof. In Nederland is nog geen beslissing genomen over de wijze waarop het hoogradioactieve afval in de ondergrond zal worden opgeslagen. Wel is er al gekozen voor terughaalbare eindberging. Dit houdt in dat eenmaal opgeborgen radioactief afval altijd weer terug te halen moet zijn mochten er nieuwe (andere) oplossingen voor de verwerking of berging van dit afval worden gevonden.

Er wordt onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om de levensduur van hoogradioactief gebruikte splijtstof te verkorten van meer dan 100.000 jaar tot circa 2000 jaar of minder. Deze technologie wordt partitioning en transmutatie genoemd. Dit is een geavanceerdere vorm van opwerking en recycling dan nu wordt toegepast. De ontwikkeling van de partitioning en transmutatietechnologie zal nog geruime tijd vergen en mogelijk pas over enkele decennia op industriële schaal beschikbaar komen.

*Wat zijn de risico's van proliferatie en hoe kunnen die worden verkleind?*

Proliferatie is het verspreiden van nucleaire technologie en materiaal voor militaire en niet-vreedzame toepassingen. Regimes van sommige landen in de wereld wensen te beschikken over een nucleair wapen vanwege de macht die er mee kan worden uitgeoefend en het prestige dat hieraan kan worden ontleend. Ook zouden sommige landen een nucleair wapen kunnen ontwikkelen om hun belangen te beschermen als buurlanden ook over nucleaire wapens beschikken (afschrikking). De benodigde grondstoffen voor een kernwapen zijn hoogverrijkt uranium of plutonium. De verrijkingstechnologie kan worden gebruikt om hoogverrijkt uranium te produceren. Het opwerkingsproces zou - wanneer splijtstof wordt verwerkt die slechts kort in de reactor is gebruikt - kunnen worden gebruikt om voor kernwapens geschikt plutonium af te scheiden.

Er zijn internationale afspraken gemaakt om handel in nucleair materiaal en technologie, en de verspreiding van kennis om een nucleaire installatie te kunnen bouwen, te onderwerpen aan internationaal toezicht. Dit houdt controle in op het vreedzame gebruik van de kernenergie-technologie en bewaking van de splijtstof. De internationale afspraken zijn ondermeer vastgelegd in het Non-proliferatieverdrag (waarbij 190 landen zijn aangesloten) en het Additioneel protocol. Omdat men dit verdrag nog niet adequaat genoeg vond is in 2003 het Proliferation Security Initiative gelanceerd. Dit initiatief, waarbij 60 landen (waaronder Nederland) zijn aangesloten, is gericht op het onderscheppen en voorkomen van illegale transporten van Weapons of Mass Destruction en goederen waarmee deze kunnen worden gemaakt of gelanceerd. Daarnaast heeft het Internationaal Atoomagentschap van de Verenigde Naties (IAEA) in 2006 het initiatief genomen tot de invoering van een systeem, waarbij de lidstaten splijtstof voor opwekking van kernenergie in bruikleen krijgen uit een internationale reservebank voor nucleaire brandstof. Na gebruik wordt deze splijtstof teruggegeven. Op de lange termijn moet dit ertoe leiden dat alle verrijkings- en opwerkingsinstallaties onder internationaal toezicht komen te staan.

*Wat zijn de risico's van terrorisme en hoe kunnen die worden verkleind?*

Er kunnen drie soorten terroristische bedreigingen worden onderscheiden: (1) het gebruik van een explosief waarbij radioactief materiaal wordt verspreid, ook wel 'vuile bom' genoemd, (2) het verkrijgen van een kernwapen door een terroristische organisatie en (3) een aanslag op een nucleaire installatie, opslagplaats of transport van radioactief materiaal, met als doel radioactieve stoffen te laten ontsnappen en daarmee de omgeving te besmetten. Voor de constructie van een 'vuile bom' is geen materiaal uit de splijtstofcyclus nodig. Radioactief materiaal is ook buiten de kernenergiesector aanwezig. Beveiliging van de splijtstofcyclus moet ervoor zorgen dat dit materiaal niet in handen van terroristen terecht komt. Vanwege de grootte en complexiteit van de benodigde installaties is het voor terroristische organisaties niet eenvoudig een kernwapen te ontwikkelen en te bouwen. Beveiliging van nucleaire installaties moet zorgen voor het verkleinen van het risico van terroristische aanslagen. De veiligheidssystemen die er voor zorgen dat bij verkeerde acties van de operator de reactor automatisch afschakelt, beperken de potentiële dreiging die uitgaat van een eventuele terroristische overname van de centrale. Daarnaast wordt bij het ontwerp van nucleaire installaties en transportcontainers rekening gehouden met terroristische aanslagen. Dit geldt ook voor de dreiging van een neerstortend vliegtuig. Oorspronkelijk zijn kerncentrales niet expliciet ontworpen tegen een vliegtuigongeval. Voor nieuw te bouwen centrales worden wel expliciete ontwerpeisen gesteld aan de bestendigheid tegen een aanslag met een verkeersvliegtuig.

*Welke milieueffecten mogen worden verwacht van de toepassing van kernenergie?*

De milieueffecten van kernenergie worden vooral bepaald door de ioniserende straling, emissies van radioactieve stoffen en radioactief afval dat bij de verschillende processtappen van de splijtstofcyclus en tijdens de verschillende fasen van de installaties (d.w.z. productiebedrijf en ontmanteling) ontstaat. Hierbij wordt uitgegaan van normale bedrijfsvoering. Voor een vergelijking met andere elektriciteitsproductieopties zijn ook de emissies van ondermeer kooldioxide (CO<sub>2</sub>) relevant.

De milieubelasting bij winning en verwerking van uranium is afhankelijk van het type mijnbouw, het beheer van de mijn en van de *tailings* (restproduct van de ertsverwerking). De betrokken mijnwerkers worden blootgesteld aan natuurlijk radongas en vrijkomend stof, wat een risicofactor voor longkanker vormt. De belasting van het milieu houdt voornamelijk verband met de radonemissies naar de lucht en emissies van zware metalen naar water en bodem. In principe is het mogelijk door een goede afdichting van de tailingreservoirs deze milieubelasting te minimaliseren tot een niveau van natuurlijke emissies van radon uit de bodem. Maar zelfs bij goed afgedekte reservoirs blijft een zeker milieurisico bestaan omdat de tailings duizenden jaren radioactief blijven.

De gemiddelde hoeveelheid ioniserende straling waaraan elke Nederlander wordt blootgesteld bedraagt 2500 microsievvert per jaar. De stralingsbelasting waaraan de bevolking wordt blootgesteld in verband met emissies van radioactieve stoffen in de lucht door een kerncentrale is minder dan 0,04 microsievvert per jaar (kerncentrale Borssele). Van de hele splijtstofcyclus levert, onder normale bedrijfsomstandigheden, de opwerkingsinstallatie met 8 microsievvert per jaar relatief de grootste bijdrage aan de stralingsbelasting. Deze wordt vooral bepaald door emissies van de relatief langlevende splijttingsproducten koolstof-14 en krypton-85 die bij de opwerking van bestraalde splijtstof worden geloosd in de lucht.

Omdat hoograadioactief gebruikte splijtstof ruim honderdduizend jaar ioniserende straling produceert moet het in een eindberging goed van de leefomgeving worden afgesloten. Voor de eindberging zijn analyses gemaakt van de maximale stralingsdosis waar de bevolking aan wordt blootgesteld indien de eindberging om allerlei redenen minder goed zou isoleren dan verwacht. De berekende risico's zijn klein maar kennen nog onzekerheden. Deze worden vooral bepaald door lokale omstandigheden. Er is nader locatiespecifiek onderzoek nodig voordat een definitieve keuze kan worden gemaakt voor een eindberging voor hoograadioactief afval.

Bij ontmanteling van een kerncentrale worden emissies en straling op dezelfde wijze gecontroleerd als tijdens het bedrijf van de centrale. Bij ontmanteling ontstaat voornamelijk laag- en middelradioactief afval. Dit afval wordt op dezelfde wijze verwerkt als het laag- en middelradioactief afval dat bij het bedrijven van de kerncentrale ontstaat.

De CO<sub>2</sub>-emissies van kernenergie gedurende de levenscyclus van een kerncentrale zijn per kWh vergelijkbaar met die van elektriciteit uit hernieuwbare bronnen. Voor kerncentrales worden waarden gerapporteerd van 5 tot 65 gram CO<sub>2</sub> per kWh. Voor Europese kerncentrales zijn emissies berekend van 8 tot 32 gram CO<sub>2</sub> per kWh. De cijfers gelden voor de huidige winning van uranium, maar kunnen toenemen bij winning van armere uraniumertsen. Voor windenergie zijn CO<sub>2</sub>-emissies berekend van 6 tot 23 gram per kWh en voor elektriciteit afkomstig van huidig type zonnepanelen 30 tot 100 gram CO<sub>2</sub> per kWh. Voor CO<sub>2</sub>-emissies van de levenscyclus van kolencentrales zonder CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag worden waarden gerapporteerd die liggen tussen 815 en 1153 gram per kWh en voor gascentrales tussen 362 en 622 gram per kWh.

#### *Welke ongevalrisico's bestaan er bij de toepassing van kernenergie?*

Het risico van een ongeval in de splijtstofcyclus voor de bevolking verschilt van die voor het personeel. Van het personeel dat betrokken is bij de splijtstofcyclus is het individuele overlijdensrisico van mijnwerkers bij de uraniummijnen het hoogst. Het gaat daarbij in hoofdzaak om dezelfde soorten ongevallen als bij de mijnbouw van andere delfstoffen. Bij de andere onderdelen van de splijtstofcyclus zijn de risico's voor het personeel vergelijkbaar of kleiner dan die bij de lichte industrie. Ook de risico's door verhoogde blootstelling aan straling en radioactieve stoffen tijdens ongevallen zijn, afgezien de hiervoor genoemde risico's bij de mijnbouw, vergelijkbaar met die van de lichte industrie.

De risico's voor de bevolking door ongevallen bij de verschillende processen van de splijtstofcyclus zijn klein in vergelijking tot andere gevaren waaraan de bevolking blootstaat. Blootstelling aan straling leidt bij een hoge dosis tot overlijden door stralingsziekten op korte termijn.

Een lagere dosis leidt tot verhoging van de kans op het ontwikkelen van gezondheidsschade, met mogelijk overlijden op lange termijn tot gevolg. De risico's van een kerncentrale worden periodiek getoetst aan wettelijk vastgelegde risiconormen. Naast slachtoffers en gezondheidsschade, kan een kernongeval tot gevolg hebben dat ernstige milieu-, economische en sociaal-psychologische schade ontstaat, die zich bij ongelukken met andere elektriciteitsproductietechnologieën meestal niet in dergelijke omvang voordoen. Wordt de hele energieketen beschouwd, dan komen ernstige ongevallen (meer dan vijf slachtoffers) ook voor bij kolen (bijv. mijnongelukken), aardgas en olie. Een dambreuk van een waterkrachtcentrale kan eveneens een groot aantal slachtoffers tot gevolg hebben.

#### *Wat kost kernenergie?*

Kerncentrales die nu commercieel verkrijgbaar zijn, zijn van de derde generatie. De bouwkosten van een dergelijk kerncentrale liggen, exclusief bouwrente, tussen € 1590 en € 2297 per kilowatt elektrisch vermogen. Voor een kerncentrale met een vermogen van 1600 megawatt is dat € 2,5 tot € 3,7 miljard. De spreiding hangt ondermeer samen met de vraag of rekening is gehouden met het risico op kostenoverschrijdingen. Er zijn namelijk nog maar weinig kerncentrales van de derde generatie gebouwd. Door bouwrente nemen de investeringskosten verder toe (tot € 4,2 à € 4,7 miljard voor een kerncentrale van 1600 megawatt). De bouwtijd bedraagt 4,5 tot 6 jaar. In deze periode moet er al wel geld beschikbaar worden gesteld, zonder dat er inkomsten zijn uit de elektriciteitsproductie. De rentes van leningen tijdens de bouw zijn relatief hoog. Wordt de bouwtijd langer, dan nemen de investeringskosten door bouwrente toe.

De kosten die worden gemaakt om de kerncentrale te exploiteren liggen tussen 1,1 en 1,8 cent per kilowattuur. Naast de kosten voor onderhoud en bediening zitten hierbij inbegrepen de kosten van de splijtstofcyclus (splijtstofkosten: 0,3 à 0,6 cent per kilowattuur; kosten voor verwerking en opberging van het nucleaire afval: circa 0,1 cent per kilowattuur) en de kosten voor ontmanteling van de kerncentrale (circa 0,1 cent per kilowattuur). Er is uitgegaan van de huidige praktijk ten aanzien van verwerking en berging van nucleair afval en ontmanteling.

De kostprijs van kernenergie ligt tussen 3,1 en 8 cent per kilowattuur. Deze bandbreedte is gebaseerd op 6 kostenstudies. De hoogste waarde is afkomstig van een Amerikaanse studie, die wordt gevolgd door een Europese studie met een kostprijs van 5,4 cent per kilowattuur. De kostprijs wordt voor 70 tot 80% bepaald door de kapitaalskosten. Daardoor is de kostprijs van kernenergie relatief stabiel. Ramingen van de kapitaalskosten lopen uiteen doordat uitgegaan wordt van verschillende exploitatieperioden (25 of 40 jaar; technisch kunnen kerncentrales langer mee), verschillende veronderstellingen over de rente over geleend kapitaal (de looptijd van de lening is korter dan de exploitatieperiode) en verschillende rendementen op het geïnvesteerde eigen vermogen. De gebruikte rentevoet voor berekening van de kapitaalskosten varieert hierdoor tussen 5 en 11,5%.

De kostprijs kan worden vergeleken met de elektriciteitsprijs op de groothandelsmarkt, de markt waar de kernenergie-exploitant de geproduceerde elektriciteit verkoopt, en de kostprijs van andere elektriciteitsproductietechnologieën. De gemiddelde elektriciteitsprijs voor basislast op de Nederlandse elektriciteitsmarkt was in 2006 6,6 cent per kilowattuur en op de Duitse markt 5,5 cent per kilowattuur. Dit waren de hoogste gemiddelde prijzen voor basislast jaarcontracten sinds beide elektriciteitsmarkten zijn geliberaliseerd. De kostprijs voor elektriciteit uit kolencentrales ligt tussen 2 en 5,6 cent per kilowattuur, die voor gascentrales tussen 3,4 en 6,6 cent per kilowattuur. De elektriciteitsmarktprijzen en de kostprijzen voor kolen- en gascentrales worden beïnvloedt door de brandstofprijzen en de prijs van CO<sub>2</sub>-emissierechten. De kostprijs voor windenergie ligt thans tussen 4,1 en 8,4 cent per kilowattuur voor wind op land en voor wind op zee tussen 8,6 en 11,2 cent per kilowattuur. Deze kostenindicaties zijn ontleend aan dezelfde kostenstudies als waaruit de kosten van kernenergie zijn gerapporteerd. Bij deze kostenstudies is uitgegaan van de huidige technologie. Als gevolg van technologische ontwikkeling en ontwikkeling van de brandstofprijzen en de CO<sub>2</sub>-prijs kunnen de toekomstige kostprijzen anders zijn (bijv. voor kolen en aardgas hoger en voor wind lager).

Bij toepassing van kernenergie kunnen externe kosten en baten ontstaan. Hiervan is sprake als bij het exploiteren van de kerncentrale negatieve of positieve effecten ontstaan die ten laste komen van derden en niet in de prijs van kernenergie zijn verwerkt. De externe kosten van milieueffecten die voor kernenergie zijn berekend liggen beneden 1 cent per kilowattuur. Dit is qua orde van grootte vergelijkbaar met de externe kosten voor windenergie en die van elektriciteit geproduceerd met zonnepanelen. Voor elektriciteit geproduceerd uit kolen en gas (zonder CO<sub>2</sub>-opslag) liggen die een factor tien hoger. Andere externe kosten zijn bijvoorbeeld kosten die de overheid moet maken voor publieksvoorlichting over kernenergie, voor beveiliging van afvaltransporten en voor beveiliging tegen terroristische acties of hebben te maken met uitputting van uraniumvoorraden en gevolgen van proliferatie. Toepassing van kernenergie heeft een gunstig effect op energievoorzieningszekerheid en reductie van broeikasgasemissies. Baten die ontstaan door hoge elektriciteitsprijzen als gevolg van prijsstijging van fossiele brandstoffen of de prijs van CO<sub>2</sub>-emissierechten worden door de kernenergie-exploitant echter niet vanzelf doorgegeven aan de afnemers. Deze voordelen kunnen dan niet worden aangemerkt als *externe baten*.

#### *Heeft uitbreiding van kernenergie effect op de elektriciteitsprijs?*

Elektriciteitscentrales ontvangen voor de geproduceerde stroom de elektriciteitsmarktprijs. De elektriciteitsmarktprijs bepaalt voor ongeveer 30% de eindgebruikerprijs van kleinverbruikers. Voor industriële afnemers is dat voor ongeveer 75%. De rest van de eindgebruikerprijs is bestemd voor het netwerkbedrijf of gaat, in de vorm van belastingen en heffingen, naar de overheid. Uitbreiding van kernenergie in Nederland heeft nauwelijks effect op de elektriciteitsmarktprijs. Een kerncentrale is een 'price taker'. Een kerncentrale ontvangt de prijs die in de markt door andere typen elektriciteitsproductie wordt bepaald. Dit zijn in Nederland in de daluren voornamelijk kolencentrales en in de piekuren voornamelijk gascentrales. In Duitsland draaien in de piekuren minder vaak gascentrales, waardoor de gemiddelde Duitse elektriciteitsmarktprijs onder die van Nederland ligt. De elektriciteitsmarktprijs verandert door wijzigingen in de prijs van brandstoffen en CO<sub>2</sub>-emissierechten. Eventuele prijsvoordelen die door de exploitant van een kerncentrale worden genoten worden niet automatisch doorgegeven aan afnemers. Met lange termijn contracten, die (industriële) afnemers met een kernenergie-exploitant kunnen afsluiten, ontstaat in principe geen andere situatie. De contractprijs zal worden gebaseerd op de verwachte toekomstige marktprijs. Met lange termijn contracten wordt vooral het prijsrisico tussen de exploitant en afnemer verdeeld. Pas achteraf kan worden vastgesteld of contractpartijen voor- of nadeel hebben ondervonden van prijsverschillen tussen contractprijs en de gemiddelde gerealiseerde marktprijs. De elektriciteit die met lange termijn contracten is gecontracteerd, blijft gedurende de looptijd van het contract verhandelbaar op de elektriciteitsmarkt.

Elektriciteitsproducenten lopen in de huidige elektriciteitsmarkt een risico van afnemende opbrengsten op het moment dat sprake is van een sterke toename van het productievermogen. Dat zou bijvoorbeeld kunnen gebeuren als de thans voorgenomen nieuwbouwplannen voor elektriciteitscentrales worden gerealiseerd. Er is dan sprake van een *boom and bust cycle*, die ook in andere kapitaalsintensieve productmarkten niet ongebruikelijk is.

#### *Met welke andere elektriciteitsproductietechnologieën concurreert kernenergie?*

Kerncentrales zijn basislastcentrales die elektriciteit produceren in zowel de dal- als de piekuren. Kerncentrales concurreren met andere basislastcentrales. In de Nederlandse markt zijn dat vooral kolencentrales en gasgestookte warmtekrachtinstallaties. Nederlandse kerncentrales concurreren ook met buitenlands basislastvermogen die bestaat uit kolencentrales en kerncentrales. Door een verdere integratie van de Nederlandse elektriciteitsmarkt met die van onze buurlanden zal de markt voor basislastvermogen toenemen. Gelijktijdig zal een sterke groei van het windvermogen de vraag naar basislastvermogen doen afnemen. Windenergie produceert ook in de daluren elektriciteit. Wanneer dat niet het geval is zal de elektriciteit worden geproduceerd uit andere flexibele productie-eenheden (eventueel opslag), maar niet uit basislasteenheden. Blijft

de marktinzichting ongewijzigd, dan zal de elektriciteitsprijs voor basislastvermogen ook in de toekomst worden bepaald door de elektriciteitsproductietechnologie met de hoogste variabele productiekosten in de dal- en piekuren. Omdat de variabele productiekosten voor hernieuwbare bronnen (behalve biomassa) en kernenergie lager zijn dan die van centrales met fossiele brandstoffen (kolen, gas), zullen deze laatste ook op langere termijn bepalend blijven voor de elektriciteitsprijs.

#### *Is de Nederlandse elektriciteitsmarkt aantrekkelijk voor kernenergie?*

Electriciteitsproducenten zijn tegenwoordig internationale ondernemingen die in verschillende landen opereren. Deze bedrijven zullen bij hun investeringsbeslissingen een keuze kunnen maken uit verschillende nationale elektriciteitsmarkten. Voor het te verwachten rendement op de investering in een basislastcentrale lijkt Nederland aantrekkelijk. De elektriciteitsprijzen voor basislastvermogen zijn relatief hoog, doordat gasgestookte centrales voor een deel van de tijd de marginale prijs bepalen. Ondermeer door uitbreiding van het aantal netverbindingen met het buitenland raakt de Nederlandse elektriciteitsmarkt steeds beter geïntegreerd met elektriciteitsmarkten in ons omringende landen. Hierdoor neemt niet alleen de concurrentie toe, maar ook de omvang van de markt die vanuit Nederland met elektriciteit kan worden voorzien. Andere aspecten waarmee een elektriciteitsproducent rekening houdt zijn: de nationale wet- en regelgeving op het gebied van kernenergie, de aanwezigheid van locaties waar planologisch rekening is gehouden met de bouw van kerncentrales, de beschikbaarheid van koelwater en mogelijkheden om op het elektriciteitstransportnet aan te sluiten.

Aangezien investeren in nieuw productievermogen in Nederland op dit moment aantrekkelijk is, waren er begin 2007 van meerdere partijen initiatieven bekend voor nieuwbouw van (conventionele) centrales. In totaal gaat het om 12 nieuwbouwplannen met een gezamenlijk vermogen van circa 10.500 megawatt. Dit is bijna gelijk aan de helft van het in Nederland opgestelde productievermogen in 2005 (21.800 megawatt).

#### *Hoe staat het met de ontwikkeling van kernenergie in andere West-Europese landen?*

Over de rol van kernenergie wordt in andere Europese landen nogal verschillend gedacht. Landen als Duitsland, België en Zweden hebben enkele jaren geleden besloten de rol van kernenergie in de nationale energievoorziening op termijn te beëindigen (uit te faseren). In Zweden zijn twee kerncentrales gesloten, maar sluiting van de overige kerncentrales is nog niet zeker. Onder bepaalde omstandigheden (bijv. energievoorzieningszekerheid) kan in België op het besluit worden teruggekomen. Finland en Frankrijk hebben besloten kernenergie in hun nationale energievoorziening te handhaven of uit te breiden. In Finland is een nieuwe kerncentrale in aanbouw en bestaan er plannen voor nog een kerncentrale. Ook in Frankrijk wordt binnenkort met de bouw van een nieuwe kerncentrale begonnen. Het voorlopige standpunt van de overheid in het Verenigd Koninkrijk is dat kernenergie in de energievoorziening een rol zou moeten blijven spelen. De Engelse overheid overweegt het bouwen van nieuwe kerncentrales mogelijk te maken.

#### *Kunnen nieuwe kerncentrales in de Nederlandse elektriciteitsvoorziening worden ingepast?*

Er bestaat op dit moment een groot aantal plannen om in Nederland nieuwe elektriciteitscentrales te bouwen, ondermeer op plaatsen die gelden als mogelijke locatie voor een nieuwe kerncentrale (Eemshaven, Borssele, Maasvlakte). De beheerder van het landelijke hoogspanningsnet, TenneT, moet voor de huidige nieuwbouwplannen investeringen doen om de inpassing van de nieuwe centrales mogelijk te maken. Aansluiting van een nieuwe kerncentrale, mocht daar de komende jaren het initiatief toe worden genomen, is afhankelijk van het tempo waarin TenneT voor voldoende netcapaciteit kan zorgen. Kerncentrales hebben een aanzienlijk groter vermogen (1000 tot 1600 megawatt) dan de centrales die nu op het Nederlandse elektriciteitsnet zijn aangesloten (circa 600 megawatt). Om het plotseling uitvallen van een grote productie-eenheid te kunnen opvangen, zal er voldoende reservevermogen beschikbaar moeten zijn. De huidige om-

vang van regel- en reservevermogen bedraagt doorgaans 750 tot 1500 megawatt. Naar verwachting van TenneT gaat de markt zelf voorzien in uitbreiding van dit reservevermogen.

De verwachting is dat het windvermogen in Nederland in de komende jaren sterk zal toenemen. Het in Nederland opgestelde vermogen kan groeien van de huidige 1600 megawatt tot mogelijk 9000 megawatt (waarvan 6000 megawatt op zee). Door een relatief sterke groei van het windvermogen zal er meer vraag ontstaan naar flexibel productievermogen en minder naar basislastvermogen, zoals door een kerncentrale wordt geleverd. Hierdoor zou een overschot aan basislastvermogen kunnen ontstaan. Daartegenover staat dat door nieuwe verbindingen met Noorwegen, Duitsland en Engeland de capaciteit van landgrensoverschrijdende netverbindingen zal toenemen van 3500 tot 6000 à 7500 megawatt. Bij voldoende buitenlandse vraag kan een eventueel overschot aan elektriciteit worden geëxporteerd.

#### *In welke mate beïnvloedt de overheid de investeringsbeslissing?*

Het huidige beleid van de Nederlandse overheid is dat in een geliberaliseerde energiemarkt de bouw van kerncentrales niet moet worden gestimuleerd noch worden belemmerd. Dat wil zeggen dat er geen sprake kan zijn van overheidssubsidies of steunmaatregelen die de bouw van kerncentrales aantrekkelijk maken of heffingen of belastingen worden ingesteld die de bouw van kerncentrales zal bemoeilijken. Door het scheppen van adequate randvoorwaarden (bijv. ten aanzien van vergunningverlening, oplossing nucleair afval, etc.) kan de overheid ervoor zorgen dat reguleringsrisico's voor de investeerder worden beperkt.

De overheid in het Verenigd Koninkrijk is bezig deze randvoorwaarden te scheppen. In Frankrijk en Finland worden nieuwe kerncentrales gebouwd. De Finse en Franse overheid zijn daar niet direct bij betrokken. De kerncentrale in Finland wordt gebouwd door een consortium van een Finse elektriciteitsproducent en een aantal grote elektriciteitsafnemers. Volgens sommige berichten heeft het consortium leningen kunnen afsluiten tegen 'aantrekkelijke' voorwaarden. De leverancier Areva bouwt de centrale op basis van 'turn key' voorwaarden, waarbij de risico's van kostenoverschrijding en vertraging in de bouw grotendeels ten laste komen van de leverancier.

#### *Kan er sprake zijn van mededingingsverstoring?*

De mate van concurrentie op de groothandelsmarkt wordt beïnvloed door het aantal marktpartijen en de marktaandelen van deze marktpartijen. Dit wordt aangeduid met marktconcentratie. De marktconcentratie op de groothandelsmarkt voor elektriciteit verandert door nieuwbouw of sluiting van centrales, door veranderingen in de importcapaciteit en door fusies en bedrijfsovernames. Toename van importcapaciteit zal de mogelijkheid van een marktpartij om de elektriciteitsprijs te beïnvloeden verkleinen. Een kerncentrale is een relatief grote productie-eenheid. Het marktaandeel van een producent die zijn productiecapaciteit uitbreidt met een kerncentrale kan hierdoor vooral in de piekuren aanzienlijk toenemen, omdat in die periode de markt geografisch beperkter is. Of de concentratiegraad hierdoor verandert is echter niet zondermeer te zeggen. Dit hangt mede af van andere factoren, zoals veranderingen van de productiecapaciteit bij concurrenten, uitbreiding van importcapaciteit en wijzigingen van de brandstof- en CO<sub>2</sub>-prijzen.

#### *Aan welke voorwaarden zouden nieuwe kerncentrales moeten voldoen?*

De voorwaarden voor meer kernenergie kunnen worden gebaseerd op het principe van duurzame ontwikkeling waarbij in de behoeften van de huidige generatie wordt voorzien zonder daarbij de behoeften van de toekomstige generaties in gevaar te brengen. Daarnaast moet een balans worden gevonden tussen economische, sociale en milieuaspecten. Wanneer hiervan wordt uitgegaan ontstaan vragen zoals: Blijft de brandstof voor kernenergie beschikbaar? Kan met kernenergie het milieu worden ontzien? Is kernenergie op de lange termijn betaalbaar? Of nog specifiek: aan welke voorwaarden moet kernenergie voldoen om te kunnen worden gekwalificeerd als een geschikte optie om op duurzame wijze te voorzien in de huidige en toekomstige energievraag?



Uit discussies over deze laatste vraag kan worden geconcludeerd dat in ieder geval de volgende aspecten een rol spelen:

- Publieke acceptatie van kernenergie en de splijtstofcyclus.
- Veiligheidsrisico's van kerncentrales en andere onderdelen van de splijtstofcyclus.
- Levensduur en beheer van nucleair afval, vooral het hoogradioactieve afval.
- Verspreiding (proliferatie) van nucleair materiaal en kernwapens.
- Accumulatie van radioactieve stoffen in de biosfeer.
- Schaarste van natuurlijke voorraden voor het vervaardigen van splijtstof.
- Kosten van kernenergie.
- Industriële ontwikkeling (lokale kennisinfrastructuur, belangstelling afnemers, spin offs, werkgelegenheid).
- Lock-in effecten (effect op ontwikkeling niet-kernenergie opties).

Op grond van deze aspecten kan kernenergie in zijn huidige vorm niet als duurzame technologie worden aangemerkt. Hiervoor dient de technologie op een aantal aspecten te worden verbeterd (o.m. ten aanzien van veiligheid, levensduur nucleair afval en proliferatie). Of kernenergie in een overgangperiode naar een duurzame energievoorziening een rol kan spelen hangt af van de beoordeling van de economische, sociale en milieuaspecten van kernenergie ten opzichte van deze aspecten van andere energiebronnen, die in dezelfde overgangperiode een rol spelen.

In samenhang met aanpassingen van de Kernenergiewet zijn door de Nederlandse regering (onder kabinet-Balkenende III) voorwaarden geformuleerd. De randvoorwaarden zijn opgesteld voor een politieke discussie. De randvoorwaarden spelen een rol bij de behandeling van de wetswijziging in de Tweede Kamer. De randvoorwaarden hebben betrekking op toepassing van nieuwe kerncentrales, radioactief afval en opwerking, ontmanteling, locatiekeuze, uraniumwinning, non-proliferatie en beveiliging en anti-terreurmaatregelen.

#### *Wat zijn de procedures en regelgeving bij uitbreiding van kernenergie?*

Nadat politieke besluitvorming heeft plaatsgevonden over de randvoorwaarden, zullen in de gewijzigde Kernenergiewet de voorwaarden worden vastgelegd die de overheid aan kernenergie verbindt. Een wijzigingsvoorstel voor de Kernenergiewet is door de vorige regering ingediend bij de Tweede Kamer. Maar hierover heeft nog geen besluitvorming plaatsgevonden. De ministers van VROM, Economische Zaken en Sociale Zaken en Werkgelegenheid beslissen gezamenlijk over een vergunning voor een nieuwe kerncentrale. Meer gedetailleerde regelgeving is opgenomen in de Nucleaire Veiligheidsregels (NVR's) die zijn gebaseerd op de richtlijnen van het Internationaal Atoomenergieagentschap in Wenen (IAEA).

In het verleden heeft de overheid vijf plaatsen aangewezen als mogelijke locatie voor een nieuwe kerncentrale. De locaties bij Borssele en Eemshaven lijken op dit moment geschikter te zijn dan de andere drie locaties (Westelijke Noordoostpolderdijk, Moerdijk en Maasvlakte). Door de vergunningaanvrager voor een nieuwe kerncentrale zal een milieueffectrapport moeten worden opgesteld. In de milieueffectrapportage dienen de milieueffecten van de kerncentrale te worden beschreven en ook die van alternatieven. De Kernfysische dienst (KFD) van VROM is betrokken bij de beoordeling van het ontwerp van nieuwe kerncentrales. Voor besluitvorming door de overheid gelden inspraakmogelijkheden waarbij burgers bezwaar kunnen maken en beroep kunnen instellen tegen deze besluiten. Waarschijnlijk zal met de besluitvorming en het vergunningsproces een periode gemoeid zijn van 5 tot 7 jaar.

#### *Hoeveel technische kennis is in Nederland aanwezig voor uitbreiding van kernenergie?*

Uitbreiding van kernenergie in Nederland vereist voldoende capaciteit aan mensen met nucleaire kennis. Op het gebied van kernenergie zijn in Nederland zeven bedrijven en kennisinstellingen (NRG, EPZ, COVRA, RID/R<sup>3</sup>, Urenco, Enrichment Technology, Institute for Energy) actief op de gebieden van verrijking, elektriciteitsproductie met kernenergie en de verwerking en opberging van nucleair afval. Internationale samenwerking zorgt er voor dat het kennisniveau

op hoog niveau blijft. Voor beleid, vergunningverlening en toezicht op de nucleaire sector is ook bij de overheid nucleaire kennis nodig. Deze kennis is geconcentreerd bij de Directie Stof-fen, Afvalstoffen en Straling (SAS) van het Ministerie van VROM en de Kernfysische Dienst (KFD). Door een stagnerende ontwikkeling op het gebied van kernenergie in de afgelopen jaren, is de kennisinfrastructuur bij alle genoemde organisaties geleidelijk afgenomen. Daarnaast is het personeelsbestand vergrijsd wat inmiddels ook heeft geleid tot het vertrek van kennis en erva-ring. Mede door internationaal groeiende aandacht voor kernenergie wordt deze vergrijzing nu aangepakt door nieuw personeel aan te trekken en op te leiden. Ook zijn er plannen om de on-derzoeks- en opleidingsinfrastructuur te vernieuwen en te verbeteren, zodat in de toekomst de goede positie van het Nederlandse nucleaire onderzoek en opleiding zeker kan worden gesteld. Nederlandse bedrijven zijn betrokken bij de mondiale groei van de kernenergie-industrie.

#### *Wat zijn de opvattingen en meningen van de bevolking over kernenergie?*

De opvattingen en meningen van de bevolking over kernenergie worden op twee manieren on-derzocht. In wetenschappelijk onderzoek wordt nagegaan wat de verschillende factoren zijn die bij acceptatie van kernenergie een rol spelen. Dit soort onderzoek richt zich vooral op de per-ceptie van de risico's die samenhangen met het toepassen van de kernenergietechnologie en an-dere industriële activiteiten. Dit onderzoek geeft onder meer een verklaring voor het verschil van risicoperceptie tussen 'experts' en personen zonder specifieke kennis over bepaalde geva-ren. Voor het publiek is de kansoverweging veel minder relevant. Zij zijn meer geïnteresseerd in de vraag of nucleaire ongevallen als in Harrisburg en Tsjernobyl niet nog eens kunnen gebeu-ren. Wetenschappelijk onderzoek laat ook zien dat het Tsjernobyl-ongeluk invloed heeft gehad op de risicoperceptie.

Ander, meer toegepast onderzoek geeft inzicht in de acceptatie van kernenergie onder de bevol-king. Uit onderzoek dat in het voorjaar van 2006 in Nederland is uitgevoerd, komt de opvatting naar voren dat de overheid een grote rol zou moeten spelen bij een eventuele nieuwe kerncentra-le. De overheid moet voorschrijven welk type kerncentrale mag worden gebouwd. Eventueel moet de overheid zelf de kerncentrale bouwen. Burgers uiten hun twijfels over het besluitvor-mingsproces binnen de overheid en hun werkelijke betrokkenheid daarbij. Uit Europees onder-zoek, uitgevoerd in 2006, blijkt dat 35% van de Nederlandse bevolking vóór uitbreiding van kernenergie is omdat het niet bijdraagt aan klimaatverandering. 57% is tegen uitbreiding van kernenergie omdat het risico van ongelukken met zich meebrengt en radioactief afval veroor-zaakt. De resultaten van vergelijkbare onderzoeken uit het verleden laten zien dat deze resulta-ten sterk kunnen variëren afhankelijk van de precieze vraagstelling.

#### *Welke rol wordt in lange termijn energieweb-scenario's aan kernenergie toegekend?*

Energieweb-scenario's zijn verkenningen van toekomstige ontwikkelingen en geen 'voorspellingen'. Onderscheid kan worden gemaakt tussen twee soorten energieweb-scenario's: trendscenari'o's, waar-bij het bestaande overheidsbeleid wordt voortgezet, en scenari'o's die uitgaan van een beleidsin-tensivering. In de lange termijn scenari'o's verandert zowel de elektriciteitsvraag als het elektri-citeitsaanbod. In alle Nederlandse en Europese scenari'o's, zowel trendmatige als beleidsintensi-verende, is de elektriciteitsvraag in 2030 groter dan in 2005. Het aandeel kernenergie in de Ne-derlandse elektriciteitsproductie ligt nu op circa 4%. In vier van de vijf beschouwde Nederlan-dse trendscenari'o's neemt het aandeel kernenergie af, omdat geen uitbreiding van kernenergie plaatsvindt. In één trendmatig scenari'o neemt het aandeel kernenergie in Nederland toe tot 17% in 2030. In één van de drie beschouwde beleidsintensiverende scenari'o's wordt ook uitbreiding van kernenergie verondersteld tot 30% in 2030.

Het aandeel kernenergie in de Europese elektriciteitsproductie ligt nu op 31%. Veel van de hui-dige kerncentrales in Europa zijn al enkele decennia in bedrijf. Indien er geen nieuwe kerncen-trales meer in bedrijf worden genomen dan de centrales die nu in aanbouw zijn of zijn gepland (totaal 3 gigawatt) en de exploitatie van de bestaande centrales wordt na 40 jaar beëindigd, dan loopt het aandeel kernenergie in 2030 naar verwachting terug tot beneden de 5%. Dit is niet al-leen het gevolg van het sluiten van kerncentrales, maar komt ook door de veronderstelde stij-

gende elektriciteitsvraag. Wordt de exploitatie van alle bestaande kerncentrales verlengd tot 60 jaar (dit zal niet voor alle kerncentrales het geval zijn), dan daalt dit percentage in 2030 naar verwachting tot iets onder de 25%.

In vier Europese trendscenario's neemt het aandeel kernenergie af, maar in sommige trendscenario's wordt wel in de bouw van nieuwe kerncentrales voorzien. In verschillende beleidsintensiverende scenario's neemt het aandeel kernenergie in de Europese elektriciteitsproductie toe ten opzichte van het trendscenario uit dezelfde scenariostudie. Er zijn echter ook beleidsintensiverende scenario's waarbij het aandeel kernenergie afneemt (wordt uitgefaseerd).

*Indien Nederland meer kernenergie zou overwegen, wat zijn dan de effecten op sociaal-economisch terrein?*

In een scenario waarbij op lange termijn geen klimaatbeleid wordt gevoerd, is het macro-economische effect (d.w.z. effect op het BNP) van uitbreiding van kernenergie onzeker. Dit hangt af van de rentabiliteit van kernenergie ten opzichte van de andere elektriciteitsproductie-opties en van marktverhoudingen (bijv. of er sprake is van import of export). Is kernenergie rendabeler, dan kan er macro-economisch een positief effect ontstaan. Wanneer dit niet het geval is, kan het effect ook negatief zijn. Onder de condities van een scenario met streng klimaatbeleid en hoge CO<sub>2</sub>-prijzen kan een kerncentrale ten opzichte van het fossiele alternatief een macro-economisch voordeel opleveren wanneer de kosten voor de elektriciteitsproductie met een toegenomen aandeel kernenergie lager zijn dan wanneer dezelfde elektriciteit met kolen- of gascentrales wordt geproduceerd. Ook wanneer dezelfde elektriciteit uit hernieuwbare bronnen (zonder CO<sub>2</sub>-emissies) wordt geproduceerd, ontstaat met uitbreiding van kernenergie een voordeel, vanwege de aanvankelijk hogere kosten van duurzame energietechnologie. Daartegenover staat dat er bij uitbreiding van kernenergie mogelijk minder geïnvesteerd wordt in nieuwe energietechnologieën en minder geprofiteerd kan worden van eventuele positieve economische effecten die met de ontwikkeling en toepassing van innovatieve technologie samenhangen.

Van uitbreiding van kernenergie met één centrale wordt nauwelijks effect op de elektriciteitsprijzen verwacht. Dan zullen er ook geen concurrentievoordelen ontstaan voor industriële afnemers en is hiervan ook geen werkgelegenheidseffect te verwachten (m.u.v. de bouw van de kerncentrale). Een verdere uitbreiding van kernenergie zou wel kunnen leiden tot een relatief iets lagere elektriciteitsprijs. Over het mogelijke werkgelegenheidseffect op langere termijn is echter geen uitspraak te doen.

Uitbreiding van kernenergie in Nederland stimuleert naar verwachting het nucleaire onderzoek in Nederland, vooral bij onderzoeksinstituten en universiteiten. Onderzoek naar andere innovatieve elektriciteitsproductieopties (bijv. hernieuwbare energie, afvang en opslag van CO<sub>2</sub>, etc.) zal blijven plaatsvinden al zal de omvang van dit energieonderzoek mogelijk worden beïnvloed. Een nieuwe kerncentrale vergroot de nucleaire sector in Nederland. Bij het exploiteren van een kerncentrale zijn meer mensen betrokken dan bij gas- en kolencentrales. Hierdoor is er mogelijk een (gering) positief economisch effect op de regio waar een kerncentrale staat.

## 1. Inleiding

In vervolg op het advies 'Naar een kansrijk en duurzaam energiebeleid' (SER, 2006) zal de commissie Toekomstige Energievoorziening van de Sociaal Economische Raad (SER) een advies opstellen over de rol van kernenergie in de toekomstige Nederlandse elektriciteitsproductie. Het vervolgproject van de SER gaat om beantwoording van de vraag of er bij het streven naar een duurzame energievoorziening in Nederland (meer) kernenergie kan en moet worden opgewekt, en zo ja onder welke voorwaarden.

De SER heeft de unit Beleidsstudies van het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) gevraagd een inventariserend rapport op te stellen waarin feiten en gegevens zijn verzameld (fact finding) op basis waarvan de commissie Toekomstige Energievoorziening, en de verschillende geledingen die binnen de SER vertegenwoordigd zijn, een standpunt kunnen formuleren en dit standpunt kunnen onderbouwen. Voor de technologische expertise heeft ECN Beleidsstudies zich laten bijstaan door de Nuclear Research and consultancy Group (NRG).

### *Aanpak*

De SER-commissie heeft een aantal onderwerpen aangedragen en vragen gesteld die in deze inventariserende studie aan de orde moeten komen. Over die onderwerpen zijn feiten en gegevens verzameld uit literatuurbronnen en ander publiek beschikbare gegevensbronnen. Daarbij is het niet altijd eenvoudig om vast te stellen wat een 'feit' is. In de literatuurbronnen worden over bepaalde 'feiten' verschillende gegevens vermeld en inzichten gegeven. Voor een genuanceerd beeld worden over een aantal aspecten in deze studie gegevens en inzichten gegeven die afkomstig zijn uit meerdere bronnen. Het is echter onontkoombaar dat bij het verzamelen van feiten en gegevens een zekere selectie heeft plaatsgehad. Een reviewcommissie, bestaande uit prof.dr. W.C. Turkenburg (voorzitter), prof.dr.ir. T.H.J.J. van der Hagen en prof.dr. L. Reijnders, is door de SER gevraagd om na te gaan of de informatie die in deze studie wordt gepresenteerd volledig en juist is. Het commentaar van de reviewers is in vier bijeenkomsten met de auteurs besproken. De auteurs hebben het commentaar zo goed mogelijk in de studie verwerkt. De reviewers hebben vervolgens een beoordeling gegeven van het rapport Fact Finding Kernenergie. Deze beoordeling is in Bijlage B van dit rapport weergegeven met daarbij de reacties van de auteurs op enkele kanttekeningen van de reviewers bij het rapport.

Op 11 juli 2007 is het rapport besproken in de SER-commissie Toekomstige Energievoorziening. Door de leden van de commissie zijn vragen gesteld en opmerkingen gemaakt over het rapport. De auteurs hebben in een schriftelijke reactie de gestelde vragen beantwoord en gereageerd op de opmerkingen. Naar aanleiding van vragen en opmerkingen zijn enkele kleine wijzigingen in het rapport aangebracht. De schriftelijke reactie en de wijzigingen in het rapport zijn beoordeeld door de reviewers.

De verantwoordelijkheid voor hetgeen in dit rapport staat vermeld ligt bij de auteurs.

### *Leeswijzer*

Dit rapport bestaat, naast deze inleiding, uit een negental hoofdstukken. In de eerste acht hoofdstukken worden feiten en gegevens gepresenteerd over verschillende onderwerpen die bij kernenergie van belang zijn:

- In Hoofdstuk 2 wordt de kernenergietechnologie beschreven. In dit hoofdstuk wordt ook de veiligheid van kernenergie besproken, omdat die nauw met de technologie samenhangt. Hierbij gaat het om de technische veiligheid van de installaties, maar ook om beveiliging tegen misbruik van technologie en nucleair materiaal, waaronder beveiliging tegen terrorisme.

- De milieuaspecten die met het gebruik van kernenergie samenhangen worden in Hoofdstuk 3 besproken. In dit hoofdstuk wordt vooral ingegaan op milieueffecten door radioactiviteit en door emissies van kooldioxide.
- De elektriciteitsmarkt wordt besproken in Hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk wordt eerst uitgelegd hoe de elektriciteitsprijs in een geliberaliseerde elektriciteitsmarkt tot stand komt en wordt nagegaan of uitbreiding van het productievermogen met kernenergie daar invloed op zou kunnen hebben. Ook wordt de concurrentie met andere elektriciteitsproductietechnologieën besproken. Verder komen in dit hoofdstuk mededingingsaspecten aan de orde en inpassing in het Nederlandse elektriciteitssysteem.
- In Hoofdstuk 5 wordt een overzicht gegeven van kosteninformatie over kernenergie. Daarnaast wordt in dit hoofdstuk de economische rentabiliteit van kernenergie besproken, evenals externe kosten en baten.
- In Hoofdstuk 6 wordt eerst ingegaan op de vraag aan welke voorwaarden kernenergie moet voldoen om een rol te kunnen spelen in (een overgangsfase naar) een duurzame energievoorziening. Hierna wordt de rol van de overheid besproken bij het maken van keuzes over voorwaarden van kernenergie en het vertalen daarvan in wet- en regelgeving. In dit hoofdstuk wordt ook een overzicht gegeven van het kernenergiebeleid in een aantal andere Europese landen.
- Hoofdstuk 7 gaat over maatschappelijke acceptatie. Dit hoofdstuk bespreekt hoe risicoperceptie van kernenergie wordt onderzocht. Daarnaast worden resultaten gepresenteerd van onderzoek naar opvattingen en meningen van de bevolking over kernenergie.
- In Hoofdstuk 8 wordt de Nederlandse kennisinfrastructuur op het gebied van kernenergie beschreven. In dit hoofdstuk wordt ook de nucleaire kennis bij de overheid besproken, evenals de toekomstige kennisinfrastructuur.
- Hoofdstuk 9 geeft een overzicht van verschillende Nederlandse en Europese lange termijn toekomstscenario's voor de elektriciteitsvoorziening en de rol die kernenergie daarin kan spelen.

Om een beeld te kunnen geven van mogelijke maatschappelijke gevolgen van uitbreiding van kernenergie in Nederland, is een maatschappelijke impact analyse uitgevoerd. Een dergelijke analyse beschrijft op systematische wijze de mogelijke economische en sociale effecten van een nieuwe kerncentrale en de effecten op het milieu. De resultaten van deze analyse worden beschreven in Hoofdstuk 10. Bij de analyse is gebruik gemaakt van de informatie die is gepresenteerd in de voorgaande hoofdstukken.

## 2. Nucleaire technologie en veiligheidsaspecten

Productie van elektriciteit door middel van kernenergie maakt, naast het bedienen van een kerncentrale, het gebruik van een aantal andere installaties noodzakelijk. De kerncentrale gebruikt als brandstof zogenoemde splijtstof die eerst uit grondstoffen moet worden geproduceerd. Na het gebruik van de splijtstof in de centrale, waarbij energie wordt geproduceerd, wordt deze splijtstof hergebruikt ('opgewerkt') of als afval verwerkt en opgeborgen. Het geheel van deze processen noemt men de splijtstofcyclus. De techniek die toegepast wordt in de splijtstofcyclus, wordt wel aangeduid met 'nucleaire' technologie, hoewel nucleaire technologie ook zijn toepassingen in andere sectoren heeft, zoals in de medische sector.

Dit hoofdstuk beschrijft de nucleaire technologie en de veiligheidsaspecten bij de toepassing van deze technologie voor de elektriciteitsproductie. Paragraaf 2.1 introduceert het kernsplijtingsproces als energiebron waarmee in een kerncentrale elektriciteit wordt opgewekt en bespreekt vervolgens op hoofdlijnen de splijtstofcyclus waarvan de kerncentrale een onderdeel is. Daarna worden in de Paragrafen 2.2 tot en met 2.4 de verschillende processtappen van de splijtstofcyclus nader uitgelegd. Paragraaf 2.3 bespreekt de kernreactor. In die paragraaf komt ook de ontwikkeling van de kernenergie-technologie aan de orde. Paragraaf 2.5 licht toe hoe de technische veiligheid bij de verschillende processtappen is gewaarborgd. Naast de technische veiligheid bestaan er nog andere veiligheidsrisico's. Nucleaire technologie, kennis en materiaal kan in handen komen van landen, organisaties of personen die er geen vreedzame bedoelingen mee hebben. Paragraaf 2.6 gaat in op de beveiliging tegen risico's van proliferatie (de ongecontroleerde verspreiding van nucleair technologie, kennis en materiaal) en van terroristische aanslagen.

### 2.1 Introductie van de splijtstofcyclus

De energieproductie in een kerncentrale is gebaseerd op de splijting van kernen van zware elementen waarbij materie wordt omgezet in energie. Hiervoor bruikbare elementen, zoals bijvoorbeeld het in de natuur voorkomende uranium, worden vanwege deze eigenschap splijtstoffen genoemd. Door het in stand houden van een kettingreactie (het proces van opeenvolgende kernsplijtingen) wordt continu energie geproduceerd die via een aantal tussenstappen wordt gebruikt om een generator aan te drijven waarmee elektriciteit wordt geproduceerd.

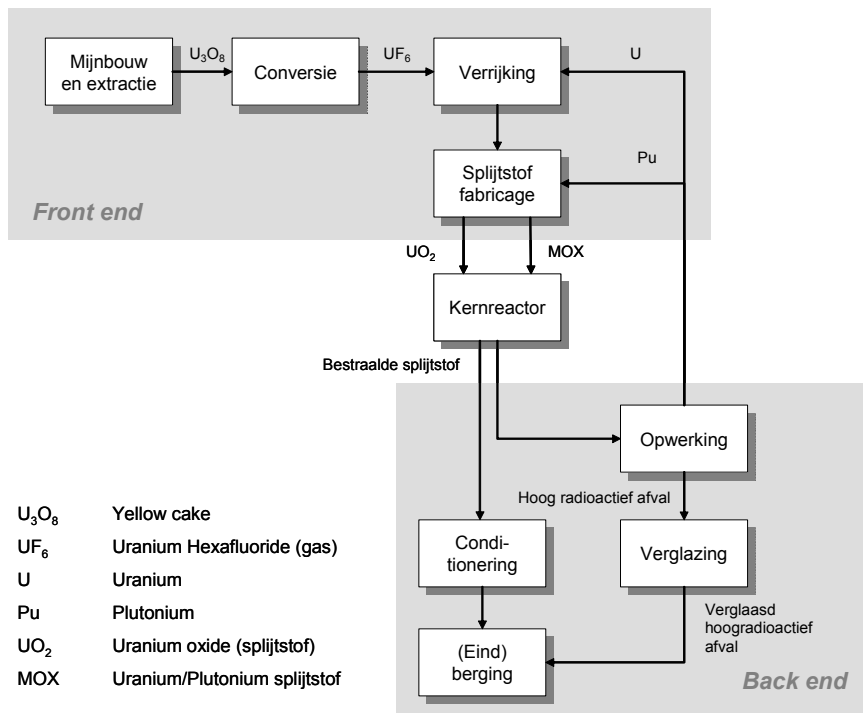
De meeste kerncentrales gebruiken uranium als splijtstof, al dan niet in combinatie met andere splijtstoffen. Uranium zoals dat in de natuur voorkomt, bestaat vrijwel geheel uit het isotoop uranium-238 (99,3%). De overige 'natuurlijke' isotopen zijn uranium-235 (0,7%) en uranium-234 (0,0055%). Bij de meeste typen kerncentrales wordt zogenoemd 'verrijkt uranium' gebruikt, waarbij het percentage uranium-235 kunstmatig is verhoogd tot ongeveer 3 à 5%. Ook thorium kan in de splijtstofcyclus worden gebruikt, maar dit gebeurt tot nog toe slechts op kleine schaal. Natuurlijk thorium bestaat geheel uit het isotoop thorium-232 dat zelf nauwelijks splijtbaar is. Toepassing ervan als splijtstof in een kernreactor verloopt dan ook via zijn wel goed splijtbaar activeringsproduct uranium-233.

#### *Front-end van de splijtstofcyclus*

De stappen van de splijtstofcyclus die moeten worden doorlopen om de brandstof ('splijtstof') voor een kerncentrale te maken, worden gerekend tot de zogenoemde 'front-end' van de splijtstofcyclus. Voor details wordt verwezen naar Paragraaf 2.2. Hieronder volgt een korte beschrijving.

De volledige splijtstofcyclus wordt in Figuur 2.1 weergegeven. In het bovenste deel van de figuur is de front-end van de cyclus afgebeeld. Uraniumerts wordt gewonnen in uraniummijnen.

Door middel van extractie wordt uranium aan het erts onttrokken en via een aantal processtap-  
pen geschikt gemaakt om in een kerncentrale te worden gebruikt.



Figuur 2.1 De splijstofcyclus

De volgende processtappen maken deel uit van de front-end van de splijstofcyclus:

- *Mijnbouw en extractie:* Uraniumerts wordt door mijnbouw gewonnen. Na extractie uit erts komt uranium in de vorm van de zogenoemde yellow cake ( $U_3O_8$ ) beschikbaar voor de volgende processtap: de conversie.
- *Conversie:* De yellow cake wordt omgezet in uranium hexafluoride ( $UF_6$ ). Deze vaste stof wordt door verwarming omgezet in  $UF_6$  gas dat geschikt is voor het verrijgingsproces.
- *Verrijking:* In de meeste kerncentrales, waaronder in de kerncentrale Borssele, wordt licht verrijkt uranium als splijstof gebruikt. Hiervoor moet het percentage uranium-235 ten opzichte van dat in natuurlijk uranium worden verhoogd. Dit gebeurt in Nederland met behulp van ultracentrifuges bij Urenco in Almelo. Hierbij wordt  $UF_6$  op basis van het massaverschil tussen uranium-235 en uranium-238 kernen gescheiden in  $UF_6$  met een verhoogd percentage uranium-235 (verrijkt uranium) en  $UF_6$  met een verlaagd percentage uranium-235 (verarmd uranium).
- *Splijststof fabricage:* Het verrijkte uranium, in de vorm van  $UF_6$ , wordt omgezet in uraniumoxide ( $UO_2$ ) waaruit splijstoftabletten worden gemaakt. Een aantal van deze tabletten worden op elkaar gestapeld en opgesloten in een metalen huls, de zogenoemde 'splijstofstaaft'. Splijstofstaven worden weer gebundeld tot 'splijstofelementen', ook wel brandstofelementen genoemd.

### Kerncentrale

De kerncentrale is de processtap in de splijstofcyclus waarbij elektriciteit wordt opgewekt. De werking van een kerncentrale wordt hier uitgelegd aan de hand van een drukwaterreactor (Pressurized Water Reactor, PWR), zoals toegepast bij de kerncentrale Borssele. In zo'n centrale bevindt zich een met water gevuld afgesloten stalen vat (reactorvat). Daarin zit een constructie waarin een groot aantal splijstofelementen zijn geplaatst (de reactor kern). Het reactorvat maakt deel uit van een circuit waarin (koel)water onder druk wordt rondgepompt, zie Figuur 2.2. In de reactor kern vindt een zelfregulerend kernsplijtingsproces plaats (zie kader).

De energie die vrijkomt bij het kernsplijtingsproces wordt in de vorm van warmte overgedragen aan het koelwater. In een zogenoemde stoomgenerator wordt de warmte van het hete koelwater uit het reactorvat gebruikt om stoom te produceren. Deze stoom drijft een turbinegenerator aan waarmee elektriciteit wordt geproduceerd.

### ***Kernsplijtingsproces in een kerncentrale***

Een kern van uranium-235 kan na invangen van een neutron spontaan splijten. De kans op splijting neemt sterk toe naarmate de energie van het neutron kleiner is, d.w.z. het neutron minder snel beweegt. Kernen van uranium-238 kunnen alleen door ‘snelle’ neutronen worden gespleten. De kans hierop is veel kleiner dan de kans op splijting van uranium-235 door een langzaam neutron.

Bij een kernsplijting komen naast twee splijtingsproducten (atoomkernen van elementen met ongeveer de helft van het gewicht van een uraniumkern) en gammastraling ook enkele hoogenergetische (snelle) neutronen vrij. Als deze snelle neutronen in voldoende mate zijn afgeremd door de zogenoemde moderator (zoals het koelwater) en intussen niet zijn ingevangen (o.a. door kernen van uranium-238), kunnen deze langzame neutronen door een uranium-235 kern worden ingevangen en een splijting veroorzaken, zodat het proces zich herhaalt (kettingreactie). Behalve productie van neutronen tijdens het splijtingsproces (prompte neutronen) komen ook na de splijting neutronen in de splijtstof vrij door het radioactieve verval van splijtingsproducten (nakomende neutronen). Deze nakomende neutronen maken het regelen van de kettingreactie mogelijk. Bij een gecontroleerd kernsplijtingsproces wordt het aantal kernsplijtingen per tijdseenheid constant gehouden. De zogenoemde reactiviteit is dan nul.

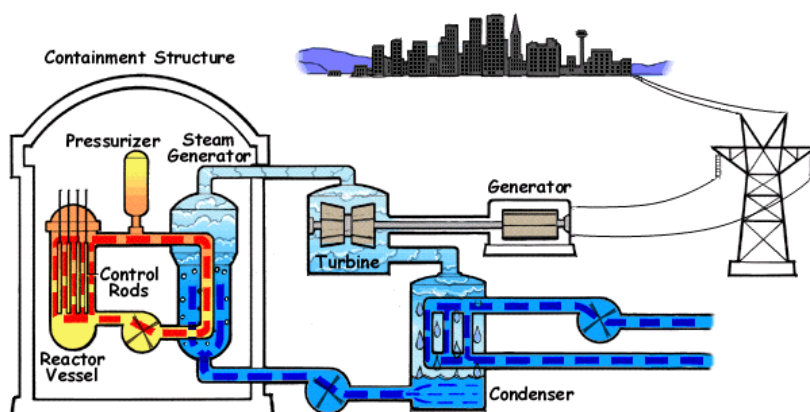
Naarmate de temperatuur van de splijtstof stijgt worden door uranium-238 steeds meer neutronen ingevangen die niet meer meedoen in de kettingreactie, waardoor de reactiviteit afneemt. Als de dichtheid van de moderator afneemt (bijvoorbeeld bij vorming van dampbellen in het koelwater) worden de snelle neutronen onvoldoende afgeremd waardoor de kans op een volgende splijting geringer wordt (de reactiviteit neemt af). Dit zorgt voor zelfregulering van het kernsplijtingsproces.

Nadat een uranium-238 kern een neutron heeft ingevangen, kan via dubbel radioactief verval een plutonium-239 kern worden gevormd. Deze plutoniumkern kan splijten na het invangen van een langzaam neutron. Splijting van het gevormde plutonium-239 geeft een belangrijke bijdrage aan de energieproductie in de reactorkern. Behalve de splijtstof en moderator vangen ook de gevormde splijtingsproducten neutronen in. Na verloop van tijd is de concentratie splijtingsproducten zodanig toegenomen en daarmee de kans op neutronvangst door uranium-235 kernen afgenomen, dat de kettingreactie niet meer mogelijk is. Omdat de verdeling van de neutronen over de reactorkern en daarmee ook de verdeling van de reactiviteit en van de concentratie van splijtingsproducten niet uniform is, zullen sommige splijtstofstaven eerder zijn ‘uitgewerkt’ dan andere. Periodiek wordt een aantal van de ‘gebruikte’ (bestraalde) splijtstofelementen uit de reactorkern verwijderd en vervangen door ‘verse’ splijtstofelementen.

De energieproductie in de reactorkern van een drukwaterreactor wordt geregeld door de van buitenaf bedienbare regelstaven in de reactorkern en het regelbare percentage boorzuur in het koelwater. Regelstaven en boorzuur vangen neutronen in. Doormiddel van de regelstaven kan het reactieproces ook stil worden gelegd. De hete reactorkern moet dan nog steeds worden gekoeld, zodat de restwarmte kan worden afgevoerd die door het radioactieve verval van splijtingsproducten en activeringsproducten wordt geproduceerd. Deze koeling voorkomt dat de temperatuur van de reactorkern zodanig hoog wordt dat beschadigingen zouden kunnen optreden.



In Paragraaf 2.3 wordt nader op de techniek van de kerncentrale ingegaan. In die paragraaf komt ook de ontwikkeling van de kernenergietechnologie aan de orde.



Figuur 2.2 Processen in een kerncentrale met een drukwaterreactor

### *Back-end van de splijfstofcyclus*

De processtappen van de splijfstofcyclus waarbij gebruikte splijfstof wordt verwerkt en die leiden naar de eindbestemming van dit materiaal, worden gerekend tot de back-end van de splijfstofcyclus. Voor details wordt verwezen naar Paragraaf 2.4.

De gebruikte splijstofelementen bevatten nog steeds uranium-235 maar wel een lager percentage (circa 2%). Daarnaast bevatten de gebruikte splijstofelementen een percentage plutonium en andere activeringsproducten - zoals de ‘minor actinides’<sup>1</sup> - en splijtingsproducten. Vooral vanwege de splijtingsproducten produceren de gebruikte splijstofelementen intense ioniserende straling<sup>2</sup>. Voordat de gebruikte splijstofelementen mogen worden getransporteerd, zullen deze eerst enige tijd (onder water) moeten worden opgeslagen, zodat door radioactief verval het stralingsniveau voldoende kan afnemen. Deze tijdelijke opslag vindt plaats in een bassin in het reactorgebouw, zoals in Borssele, of in een aangrenzend gebouw.

Na de tijdelijke opslag van de gebruikte splijstofelementen bij de centrale zijn er twee mogelijke bestemmingen (routes): (1) directe berging van de gebruikte splijstof als hoogradioactief afval in een (eind)berging of (2) opwerking van de splijstof met terugwinning van nog bruikbare splijstof (recycling).

1. *Directe berging*: Deze route wordt onder andere in Finland en Zweden gevolgd. Het omvat de volgende stappen:
  - *Tijdelijke opslag*: Momenteel is nog nergens een eindberging in bedrijf. In afwachting van de definitieve eindberging kunnen splijstofelementen opnieuw worden opgeslagen in een waterbassin of in opslagcontainers waarin de elementen droog (en onder onderdruk) worden opgesloten. Deze onderdruk zorgt ervoor dat bij kleine schade aan de insluiting de (mogelijk) in de container aanwezige radioactieve stofdeeltjes niet buiten de container komen.
  - *Conditionering*: Om de splijstof(staven) definitief te kunnen opbergen, moet deze splijstof eerst in een voor de eindberging geschikte vorm worden gebracht. Dit gebeurt in een

<sup>1</sup> Tijdens de kettingreactie worden naast splijtingsproducten door neutronenvangst in uranium, gevolgd door radioactief verval, actiniden gevormd. Het merendeel van de actiniden bestaat uit isotopen van het element plutonium. Het overige deel wordt gevormd door de zogenoemde ‘minor actinides’, zoals Neptunium en Americium.

<sup>2</sup> In het spraakgebruik wordt dit ook wel ‘radioactieve straling’ genoemd, wat feitelijk een onjuiste term is omdat de straling zelf niet radioactief is, maar een gevolg van het verval van een radioactief deeltje.

conditioneringinstallatie. De bij conditionering gevolgde methode hangt af van de wijze van eindberging.

- *Eindberging*: Het is de bedoeling de geconditioneerde splijtstof op te slaan in diep gelegen stabiele geologische formaties, zoals zout- en kleilagen of in rotsformaties.
2. *Recycling*: Deze route wordt onder andere in Nederland en Frankrijk gevolgd. Het resultaat hiervan is dat het merendeel (96%) van de splijtstof (uranium en plutonium) wordt teruggewonnen uit de gebruikte splijtstofelementen en wordt hergebruikt in de splijtstofcyclus. Deze route omvat de volgende stappen:
- *Opwerking van gebruikte splijtstof*:  
De gebruikte splijtstofelementen worden in containers overgebracht naar een opwerkingsfabriek waar het grootste deel van de splijtstoffen uit de gebruikte splijtstofelementen wordt teruggewonnen. De gebruikte splijtstofelementen van de kerncentrale Borssele worden bijvoorbeeld naar de opwerkingsfabriek in La Hague (Normandië) getransporteerd. Daar wordt uranium (ongeveer 95%) en plutonium (ongeveer 1%) uit de gebruikte splijtstofelementen teruggewonnen. Het uranium gaat terug naar de verrijkingsstap van de front-end. Het plutonium wordt verwerkt in de splijtstof Mixed Oxide (MOX), waarin zowel plutonium als uranium wordt gebruikt.
  - *Verglazing van opwerkingsafval*:  
De splijtingsproducten en actiniden (de resterende 4% van de gebruikte splijtstof) worden verglaasd. Verglazing is nodig om de (radioactieve) stoffen sterk te binden. De hoeveelheid hoogradioactief verglaasd afval dat ontstaat bij opwerking van door de kerncentrale in Borssele gebruikte splijtstof bedraagt 1,3 m<sup>3</sup> per jaar. Het verglaasde (hoog radioactief) afval wordt verpakt in roestvrijstalen canisters. De geactiveerde metalen structuurdelen van de splijtstofelementen worden samengeperst en verpakt in vrijwel identieke roestvrijstalen canisters.
  - *Tijdelijke opslag van verglaasd afval*:  
Momenteel is nog nergens een eindberging voor de canisters met het verglaasde afval in bedrijf. In afwachting van de definitieve eindberging zullen deze canisters tijdelijk worden opgeslagen. Nederland heeft er voor gekozen om, in afwachting van een beslissing over de eindberging, het verglaasde afval tijdelijk bovengronds op te slaan. Dit gebeurt bij de COVRA in Vlissingen. Hier wordt dit afval opgeslagen in het HABOG, een betonnen bunkerachtig gebouw, ontworpen om het afval gedurende 100 jaar veilig op te slaan en de door radioactief verval nog vrijkomende warmte af te voeren. Na 100 jaar zal de activiteit door radioactief verval met circa 90% zijn afgenomen.
  - *Eindberging van verglaasd afval*:  
Het is de bedoeling de canisters met verglaasd afval op te slaan in diep gelegen stabiele geologische formaties, zoals zout en klei. De hoeveelheid hoog radioactief afval die per eenheid opgewekt elektrisch vermogen zal worden opgeslagen is ongeveer een factor 10 kleiner dan bij directe opslag.

### *Veiligheidsrisico's in de splijtstofcyclus*

Met betrekking tot de veiligheid in de splijtstofcyclus kan onderscheid gemaakt worden tussen de technische veiligheid van de kernenergietechnologie en veiligheidsrisico's met betrekking tot proliferatie (het ongecontroleerd verspreiden van nucleaire technologie of materialen voor militair gebruik) en terrorisme.

Bij de technische veiligheid moet onderscheid worden gemaakt tussen blootstelling aan ioniserende straling en radioactieve stoffen bij normale bedrijfsvoering en blootstelling bij ongevallen. Paragraaf 2.5 gaat in op de ongevalsrisico's in de splijtstofcyclus. Van de gehele splijtstofcyclus is onder normale bedrijfsomstandigheden het blootstellingsrisico bij de uraniummijnbouw het grootst. Blootstelling aan straling en radioactieve stoffen onder normale bedrijfsomstandigheden wordt in Hoofdstuk 3 besproken.

Van mogelijke ongevallen met installaties in de splijtstofcyclus kan een ongeval met een werkende kernreactor de grootste gevolgen hebben. Dit hangt samen met de grote energie-inhoud van een werkende reactorkern in combinatie met de zich daarin bevindende grote hoeveelheid radioactieve stoffen. Hoewel bij een reactiviteitsexkursie (tijdelijke verhoging van de reactiviteit) en bij oververhitting van de kern het kernsplijtingsproces vanzelf stopt, zou bij falen van de koeling de warmte die door de het radioactief verval van de splijtingsproducten wordt geproduceerd onvoldoende kunnen worden afgevoerd. Dit zou drukopbouw in de reactorinsluiting en eventueel zelfs smelten van de reactorkern tot gevolg hebben. Wanneer vervolgens alle veiligheidsbarrières van de kernreactor zouden falen, leidt dit tot een emissie van radioactieve stoffen en verspreiding daarvan in de omgeving.

Voor de processtappen verrijking (front-end) en opwerking (back-end) zijn proliferatiegevoelig. Voor het maken van een kernwapen is hoogverrijkt uranium of plutonium nodig. De verrijkingstechnologie kan worden gebruikt om hoogverrijkt uranium te produceren. Het bij het opwerkingsproces afgescheiden plutonium zou misbruikt kunnen worden. Gebruikte splijtstof van een kerncentrale bevat een daarvoor minder geschikte mix aan plutoniumisotopen.

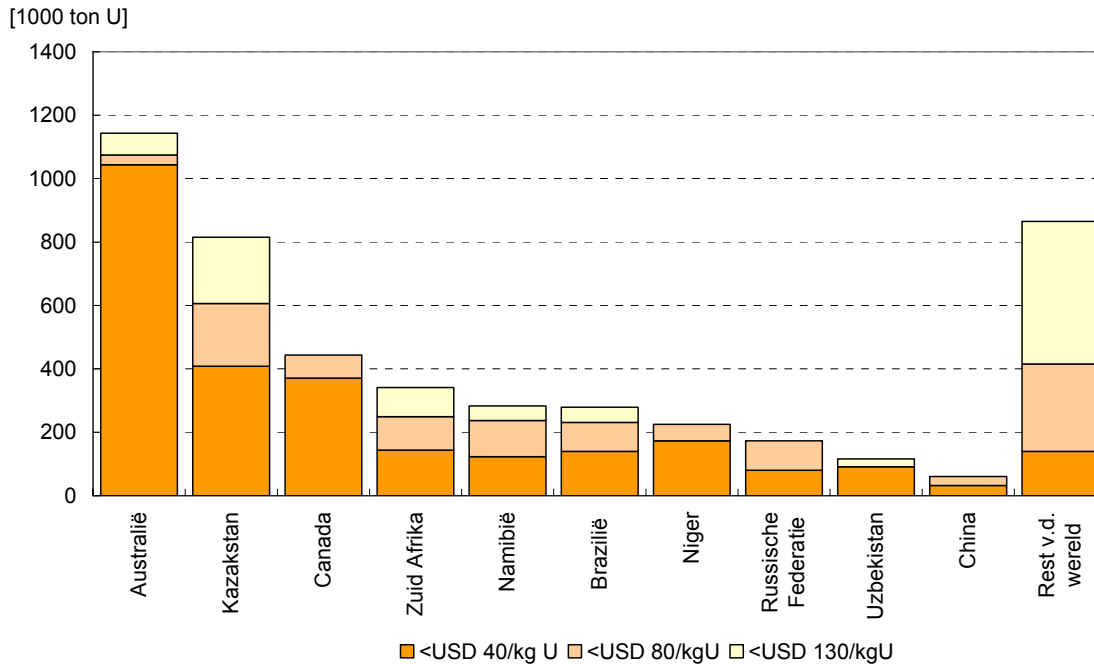
Terroristische organisaties kunnen proberen aan radioactief materiaal te komen voor het vervaardigen van een 'dirty bomb'. Het daarvoor benodigde radioactief materiaal is zowel in de hele splijtstofcyclus als ook daarbuiten te vinden. Ook kunnen terroristen het hebben voorzien op de kernreactor of andere installaties in de splijtstofcyclus om ongecontroleerde verspreiding van radioactief materiaal te veroorzaken. Veiligheidsrisico's met betrekking tot proliferatie en terrorisme worden uitgebreider besproken in Paragraaf 2.6.

## 2.2 Front-end

### 2.2.1 Uraniumvoorraden

De omvang van winbare uraniumvoorraden wordt gerelateerd aan de kosten van de uraniumwinning. Naarmate het winnen van uranium moeilijker wordt (bijvoorbeeld doordat de ertslagen dieper liggen of doordat de ertsen minder uranium bevatten), zal de kostprijs hoger zijn (NEA/IAEA, 2006). De uraniumvoorraden zijn wereldwijd gespreid. 95% van de bij een prijs van minder dan \$40 per kg winbare voorraad is winbaar in tien landen (zie Figuur 2.3): Australië, Kazachstan, Canada, Niger, Zuid-Afrika, Namibië, Oezbekistan, Russische Federatie, China en Brazilië. Zeven grote mijnbouwconcerns zijn verantwoordelijk voor ruim driekwart van de uraniumproductie (WNA, 2007).

De bewezen (reasonable assured resources) en vermoedelijke (inferred resources) uraniumvoorraad bij een prijs van minder dan \$40 per kg bedraagt ongeveer 2,7 miljoen ton uranium (NEA/IAEA, 2006). Bij een prijs van \$130 per kg neemt de voorraad toe tot 4,7 miljoen ton (zie Figuur 2.3). Bij het huidige uraniumgebruik voor de circa 440 kerncentrales in de wereld (circa 67.000 ton per jaar) is dit genoeg voor circa 70 jaar. Deze termijn is afhankelijk van het aantal kerncentrales dat in de toekomst wordt geëxploiteerd. Naast de bewezen en vermoedelijke voorraden zijn er waarschijnlijk nog uraniumvoorraden (prognosticated and speculative reserves) met een omvang van 10 miljoen ton (NEA/IAEA, 2006). Dat wil zeggen dat met nieuwe exploratieactiviteiten en nieuwe of verbeterde technieken de aantoonbare voorraden verder kunnen toenemen. Onconventionele voorraden van uranium zijn voorts aanwezig in fosfaatafzettingen (22 miljoen ton) en in zeewater (4000 miljoen ton). Er is op laboratoriumschaal aangetoond dat uranium uit zeewater winbaar is. De kosten hiervan zijn geschat tussen \$200 en \$400 per kg (Sugo et al., 2001).



Figuur 2.3 *Bewezen en vermoedelijke uraniumreserves in de wereld*  
Bron: NEA/IAEA, 2006.

Van de jaarlijkse vraag naar uranium wordt momenteel 20.000 ton geleverd door uranium uit ontmantelde kernwapens (secundaire voorraden). Hierdoor was er de laatste jaren minder vraag naar uranium uit mijnbouw en was de uraniumprijs relatief laag. Door deze relatief lage prijs waren er de laatste twintig jaar nauwelijks exploratieactiviteiten.

Doordat het aanbod uit de secundaire voorraden naar verwachting na 2015-2020 zal afnemen, zal er in die periode een groeiende vraag ontstaan naar uranium uit mijnbouw. Het uitbreiden van de productiecapaciteit en het ontwikkelen van nieuwe uraniummijnen vergt een periode van omstreeks tien jaar, waardoor er in de komende jaren een tijdelijke krapte op de uraniummarkt zou kunnen ontstaan. Hierdoor zal de prijs van uranium een stijgende tendens vertonen. De groeiende markt voor splijtstof door geplande nieuwbouwprojecten, achterblijvende productie van enkele mijnprojecten door overstromingen (zoals Cigar Lake, Canada) en speculatie op de uraniummarkt, heeft de prijs de afgelopen tijd fors doen stijgen. De prijs van uranium op de spotmarkt was in maart 2007 \$222 per kg uranium (TradeTech, 2007), terwijl de prijs jarenlang niet boven de \$40 per kg uit kwam. De invloed van de uraniumprijs op de uiteindelijke elektriciteitsprijs is echter klein. Zo zorgt een prijsstijging van \$50 per kg ruwe uranium voor een kostprijsstijging van enkele tienden eurocenten per kWh (zie ook Hoofdstuk 5).

Ontwikkelingen in de nucleaire technologie richten zich onder meer op het efficiënter gebruik van uranium. Met de op dit moment in ontwikkeling zijnde 4<sup>e</sup> generatie reactoren (zie Paragraaf 2.3.5) wordt er naar gestreefd het uranium circa 100 maal efficiënter te gebruiken. Daarnaast kan in een aantal van deze reactoren ook uit thorium vervaardigde splijtstof worden gebruikt. De natuurlijke voorraden van thorium zijn tenminste vergelijkbaar met die van uranium. Conservatieve schattingen geven aan dat er zeker 4,5 miljoen ton thorium beschikbaar is (NEA/IAEA, 2006).

## 2.2.2 Mijnbouw en extractie

Uraniumerts kan op drie verschillende manieren worden gewonnen:

- *Dagbouw uit 'open-pit' mines*: Het uraniumerts bevindt zich aan de oppervlakte. Dagbouw draagt voor 30% bij aan de wereldwijde productie van uraniumerts.
- *Ondergrondse mijnbouw*: Ongeveer 40% van de uraniummijnbouw vindt op deze wijze plaats.
- *Oplossingsmijnbouw*: Bij ongeveer 30% van uraniummijnbouw wordt het zogenoemde 'in situ leaching' toegepast, waarbij het uranium in de erts laag wordt opgelost en in oplossing daarna naar de oppervlakte wordt gepompt.

Na winning als uraniumerts vindt de extractie van het uranium uit het erts plaats. Hiertoe wordt het erts verbrokeld/vermalen. Daarna wordt het met zwavelzuur behandeld om het uranium op te lossen. Het uranium wordt uit de oplossing teruggewonnen in de vorm van 'yellow cake' ( $U_3O_8$ ). Bij de oplossingsmijnbouw wordt het uranium onder de grond al in oplossing gebracht. Deze manier van mijnbouw is alleen mogelijk als het uraniumerts zich in een oplosbare laag tussen twee waterafsluitende lagen bevindt.

Bij dagbouw en ondergrondse mijnbouw ontstaat na de extractie een restproduct, de zogenaamde *tailing*. Deze tailing wordt opgeslagen in een reservoir en bevat vanwege de dochterproducten van uranium, zoals radium, nog ongeveer 70% van de oorspronkelijke radioactiviteit van het erts. Om radioactieve emissies en verwaaiing van radioactief stof naar de omgeving te voorkomen wordt de tailing tijdens het vullen van het reservoir met een laag water afgedekt. Uiteindelijk wordt het tailingreservoir afgedekt met klei en aarde. Door de kleilaag wordt uitspoelen van radioactieve stoffen en andere zware metalen uit de tailing tegengegaan en daarmee ook de verspreiding in de bodem. De milieueffecten van mijnbouw worden besproken in Paragraaf 3.1.1.

## 2.2.3 Conversie, verrijking en splijtstoffabricage

Zoals in Paragraaf 2.1 is beschreven zijn er drie processtappen nodig om uit de 'yellow cake' splijtstofelementen met verrijkt uranium te produceren die in de kerncentrale gebruikt worden. Dit zijn conversie, verrijking en splijtstoffabricage. Bij het verrijkingsproces worden momenteel twee methoden gebruikt: gasdiffusie en gascentrifuge. Bij deze processen wordt gebruik gemaakt van het feit dat de massa van uranium-235 kernen kleiner is dan die van uranium-238. In beide gevallen wordt in het conversieproces de yellow cake ( $U_3O_8$ ) eerst omgezet in uraniumhexafluoride ( $UF_6$ ), waarna deze stof door verwarming in dampvorm (gas) wordt gebracht.

Bij gascentrifuge wordt het  $UF_6$  gas vervolgens in een centrifuge geleid waarin de zwaardere gasfractie - met uranium-238 atomen - meer naar de buitenkant wordt geslingerd dan de lichtere fractie en daar wordt afgetapt. De lichtere fractie, met een verhoogd aandeel uranium-235, blijft in de centrifuge achter en wordt naar een volgende centrifuge geleid, waar het proces wordt herhaald. In een centrifugestap neemt de relatieve verrijking met circa 10 tot 15% toe. Nadat het  $UF_6$  gas zo'n 10 tot 20 centrifuges is gepasseerd (cascade), is het uranium in voldoende mate verrijkt met uranium-235 (USNRC, 2006).

Bij gasdiffusie wordt het  $UF_6$  gas door een membraan geperst, waarbij de lichtere gasfractie - met uranium-235 kernen - gemakkelijker het membraan passeert dan de zwaardere fractie. Ook hierbij wordt het proces vele malen herhaald. Het verrijken door centrifugeren kost aanmerkelijk minder energie dan verrijken met gasdiffusie. De centrifugetechniek wordt wereldwijd dan ook steeds meer gebruikt. Naar verwachting zal binnen ongeveer tien jaar de centrifugetechniek de gasdiffusietechniek volledig hebben verdrongen. In Frankrijk, wordt de gasdiffusie ingeruild voor de centrifugetechniek van Urenco. Daarvoor is door Areva en Urenco een joint-venture opgericht. Ook in de Verenigde Staten wordt een centrifugefabriek gebouwd door Urenco.

Bij de splijststoffabricage wordt het verrijkte  $UF_6$  via een chemisch proces omgezet in uraniumoxide ( $UO_2$ ). Dit uraniumoxide wordt verwerkt tot splijstoftabletten. De tabletten worden gestapeld en opgesloten in een metalen huls en vormen een splijstofstaaf. De gebundelde splijstofstaven vormen de splijstofelementen die in een kerncentrale worden gebruikt. In de kerncentrale Borssele bevinden zich 121 splijstofelementen, waarbij elk element bestaat uit 205 splijstofstaven.

## 2.3 De kernreactor

### 2.3.1 Typen reactoren

Kerncentrales zijn elektriciteitscentrales waarbij warmte wordt opgewekt met een kernreactor waarin een regelbaar kernsplijtingsproces (kettingreactie) in stand wordt gehouden. De energie die vrijkomt bij de kettingreactie wordt in de vorm van warmte overgedragen aan een koelmiddel. Dit koelmiddel kan een vloeistof (water, vloeibaar metaal) of gas (helium of  $CO_2$ ) zijn. In Paragraaf 2.1 is het kernsplijtingsproces en de regeling hiervan toegelicht aan de hand van het voorbeeld van een drukwaterreactor (*Pressurized Water Reactor*, PWR). Bij een kerncentrale met een kokendwaterreactor (*Boiling Water Reactor*, BWR) wordt de stoom in het reactorvat geproduceerd. De inmiddels gesloten kerncentrale Dodewaard had een kokendwaterreactor.

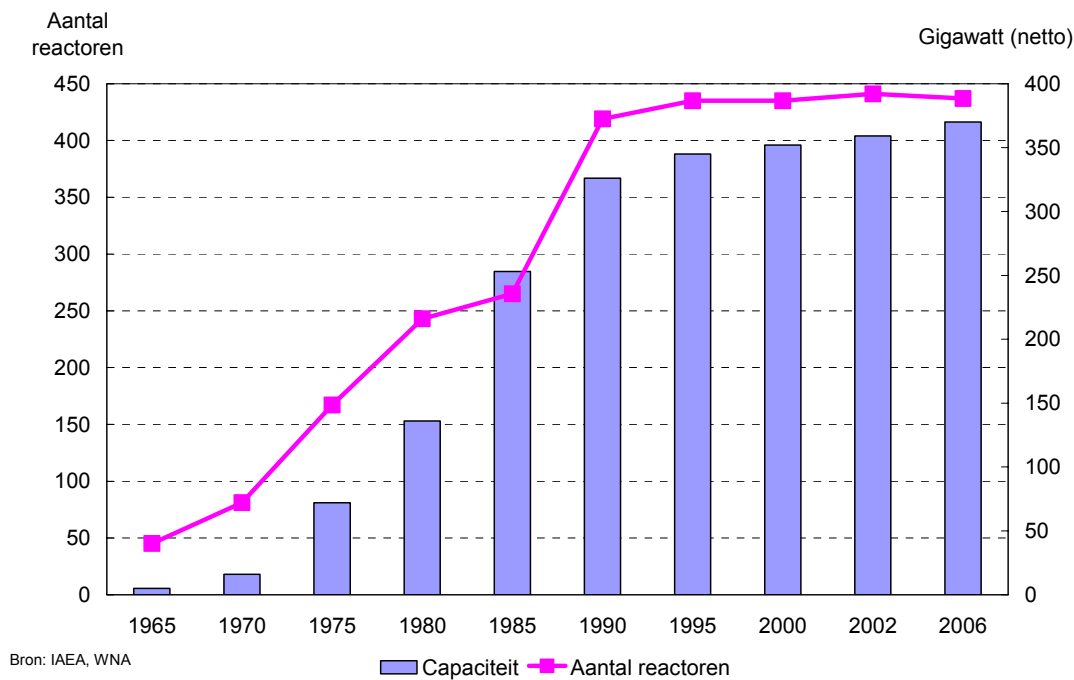
Drukwaterreactoren en kokendwaterreactoren worden ook wel licht water reactoren (LWR) genoemd. In plaats van koeling en moderatie met (licht) water wordt bij sommige typen kerncentrales namelijk zwaar water toegepast, dat een overmaat van het waterstofisotoop deuterium (D) bevat. Met een dergelijke moderator kan splijstof van natuurlijk niet-verrijkt uranium worden gebruikt. Net als bij een PWR wordt het hete water uit de reactor gebruikt om in een stoomgenerator met gewoon water stoom te produceren voor de aandrijving van de turbinegenerator.

Een voorbeeld van een kernreactor waarin gas als koelmiddel wordt toegepast is de *Gas Cooled Reactor* (GCR), waarvan er een aantal in het Verenigd Koninkrijk staan opgesteld. Het hete gas ( $CO_2$ ) wordt gebruikt om - via een stoomgenerator - hete stoom te produceren waarmee een stoomturbine wordt aangedreven, die vervolgens een generator voor elektriciteitsproductie aandrijft. In de reactor wordt grafiet toegepast als moderator.

In de loop van de jaren is er een groot aantal typen kernreactoren ontwikkeld. Slechts enkele daarvan zijn uiteindelijk voor commerciële elektriciteitsproductie gebruikt. Hierna wordt een overzicht gegeven van de diverse typen kerncentrales zoals die nu in bedrijf zijn, worden gebouwd of nog in het ontwikkelstadium zijn.

### 2.3.2 Overzicht van de ontwikkeling van de kernenergietechnologie

De eerste kerncentrales zijn in de jaren vijftig en zestig van de vorige eeuw gebouwd. Deze kerncentrales waren vooral bedoeld om ervaring met de technologie op te doen en deze technologie te demonstreren. In Nederland is met de nu gesloten kerncentrale in Dodewaard kennis en ervaring met kernenergie opgedaan. Ervaringen met de eerste generatie reactoren zijn gebruikt voor het ontwikkelen van commerciële centrales. Deze zijn vooral gebouwd in de jaren zeventig, tachtig en negentig van de vorige eeuw. Deze kerncentrales worden gerekend tot de tweede generatie. In 2006 waren wereldwijd 437 kerncentrales in bedrijf met een totaal vermogen van 370 GWe. Hiervan waren er in de huidige EU-landen (EU-27) 144 in bedrijf met een totaal vermogen van 131 GWe (WNA, 2007). In 2006 waren er 27 kerncentrales in aanbouw (WNA, 2007). Figuur 2.4 toont de ontwikkeling van kernenergie over de afgelopen veertig jaar (IAEA, 2003). Het aandeel kernenergie in de elektriciteitsproductie bedraagt wereldwijd 17% en binnen Europa 31%. Het overgrote deel van de kerncentrales beschikt over generatie II reactoren. Deze worden periodiek getoetst op veiligheid en zonodig aangepast aan de nieuwste veiligheidseisen.



Figuur 2.4 *Ontwikkeling kernenergie*

Twee nucleaire ongevallen hebben de technologische ontwikkelingen in belangrijke mate beïnvloed. Bij unit-2 van de kerncentrale Three Mile Island (TMI) bij Harrisburg (VS), een PWR, vond in 1979 een ernstig reactorongeval plaats. Het betrof het uitvallen van de koeling van de reactor, waarna de geproduceerde vervalwarmte die na afschakeling ontstond een groot gedeelte van de splijtstofelementen beschadigde en gedeeltelijk deed smelten. Het insluitsysteem van deze kerncentrale functioneerde echter goed. Daardoor zijn er geen radioactieve stoffen ongecontroleerd buiten de centrale gekomen, ondanks de kernbeschadiging en een lekkage van radioactieve stoffen naar een ruimte buiten het reactorvat. De gecontroleerde emissie die vooral uit edelgassen en jodium-131 bestond, leidde niet tot relevante stralingsbelasting van werknemers en bevolking. Uit voorzorg zijn zwangere vrouwen en kleine kinderen geëvacueerd (Bomberger en Leshner, 1979). Dit bleek achteraf niet nodig geweest te zijn (IAEA, 2006).

In Tsjernobyl vond op 26 april 1986 een zeer ernstig ongeval plaats bij een kerncentrale met een grafiet gemoderende kokend water reactor (RBMK), een reactor van Russisch ontwerp. Het ongeval vond plaats tijdens het uitvoeren van experimenten met de reactor, wat toentertijd in de voormalige Sovjet Unie was toegestaan. Dit ongeval is deels toe te schrijven aan tekortkomingen in het reactorontwerp (d.w.z. een positieve reactiviteitscoëfficiënt, geen volwaardig insluitsysteem, een verkeerd regelstaafontwerp, geen snel afschakelsysteem). Anderzijds was het ongeval het gevolg van het bewust negeren van veiligheidsvoorschriften. Dit is gebleken uit onderzoek van de IAEA en andere organisaties (IAEA, 1986, 1992).

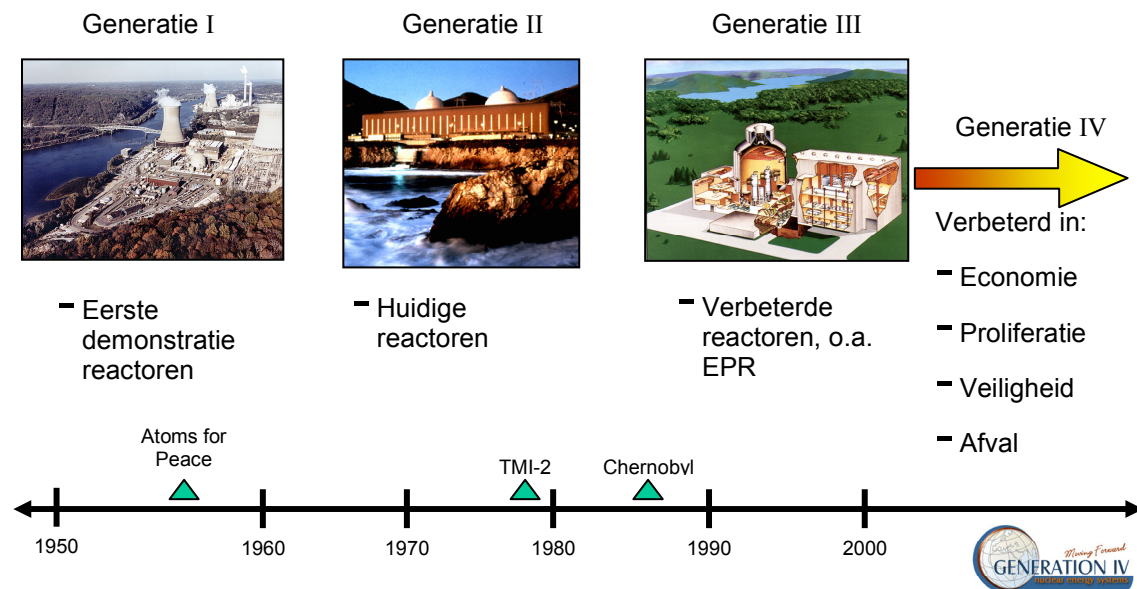
Het ongeval bij Harrisburg heeft ervoor gezorgd dat er een beter inzicht is ontstaan in het verloop van een ernstig ongeval. Dit heeft geleid tot verdere verbeteringen van de veiligheidssystemen voor bestaande generatie II reactoren, zoals meer diversiteit en scheiding van veiligheidssystemen, het aanbrengen van technische maatregelen ter beheersing van ernstige ongevallen en het ontwerpen van en oefenen met procedures waarmee ernstige ongevallen kunnen worden beheerst. Ook bij de kerncentrale Borssele, met een reactor van de tweede generatie, is in de jaren negentig een modificatieprogramma uitgevoerd, waardoor de technische veiligheid van deze kerncentrale is verbeterd. Tevens zijn technische maatregelen en procedures ter beheersing van ernstige ongevallen geïmplementeerd. Naar aanleiding van het ongeval bij Tsjernobyl zijn ook bij alle centrales met reactoren van dit type fysieke aanpassingen aan de reactorbesturing, een

hogere verrijking van de splijtstof en operationele aanpassingen in de bedrijfsvoering doorgevoerd, waardoor een dergelijk ongeval bij deze centrales nu niet meer kan voorkomen.

Het ongeval bij Tsjernobyl heeft een nieuwe impuls gegeven aan de internationale samenwerking op het gebied van kernenergie. Ondermeer is de informatie-uitwisseling tussen bedrijfsvoerders en overheidsinstanties verbeterd. Naar aanleiding van dit ongeval is de World Association of Nuclear Operators (WANO) opgericht, die de internationale samenwerking bevordert tussen bedrijfsvoerders van kerncentrales. De IAEA heeft naar aanleiding van het ongeval een Operational Safety Review Team (OSART) opgericht dat desgevraagd de nationale toezichthouders bijstaat bij het beoordelen van de veiligheid van kerncentrales.

Het Harrisburg-ongeval heeft de nieuwbouw van kerncentrales sterk vertraagd. Mede naar aanleiding van dit ongeval en op basis van ervaringen met generatie II reactoren, zijn nieuwe reactortypen ontwikkeld. Reactoren die het resultaat zijn van deze evolutionaire ontwikkeling worden aangeduid met generatie III, zie Figuur 2.5. De nu commercieel verkrijgbare typen kerncentrales zijn generatie III reactoren. Daarnaast zijn nieuwe typen ontwikkeld gebaseerd op andere splijtstoftechnologie waardoor een geheel andere veiligheidsfilosofie kan worden toe past. Die reactoren worden gerekend tot de categorie generatie III+. Prototypen van zulke reactoren zullen naar verwachting na 2012 worden opgeleverd. Generatie III en III+ reactoren worden beschreven in de Paragrafen 2.3.3 en 2.3.4.

Naast verbetering van de technische veiligheid en de beveiliging van de splijtstofcyclus (inclusief het voorkomen van proliferatie) richt de technologieontwikkeling zich op het verbeteren van de brandstofefficiency (waardoor minder uraniumerts nodig is en minder hoogradioactief afval ontstaat), en het verbeteren van de economische prestatie (verlagen van kosten en vergroten van de betrouwbaarheid). Geavanceerde reactortypen die vanuit dit oogpunt in ontwikkeling zijn behoren tot de generatie IV. Commerciële reactoren van deze generatie worden omstreeks 2030 op de markt verwacht. In Paragraaf 2.3.5 zal kort worden ingegaan op deze ontwikkeling.



Figuur 2.5 Ontwikkeling van kernreactoren in generaties

In de jaren tachtig en negentig van de vorige eeuw zijn zogenoemde kweekreactoren ontwikkeld om de grondstof uranium efficiënter te kunnen gebruiken. Natuurlijk uranium bevat honderdveertigmaal meer uranium-238 dan uranium-235. In kweekreactoren wordt uranium-238 omgezet in plutonium-239, dat als splijtstof wordt gebruikt, waarbij de productie van plutonium-239 groter is dan het verbruik. Daardoor is een kweekreactor ruim honderd keer efficiënter in uraniumverbruik dan een LWR.



Er zijn kweekreactoren gebouwd in India, Frankrijk, Rusland, het Verenigd Koninkrijk en Japan. In Duitsland is ook een kweekreactor gebouwd (Kalkar), maar die is nooit in gebruik genomen, vanwege aanhoudende protesten van de anti-kernenergiebeweging en zorgen over veiligheid van de centrale. De beschikbare hoeveelheden uranium zijn groter gebleken dan oorspronkelijk geschat. Bovendien zorgde de stagnerende vraag voor lage uraniumprijzen. Daardoor bleek de splijtstofvoorziening met een kweekreactor niet concurrerend te zijn. De belangstelling voor kweekreactoren nam hierdoor sterk af. De noodzaak van een omvangrijke plutoniumeconomie heeft ook politieke bezwaren opgeroepen wegens het hiermee samenhangende strikte beveiligingssysteem in verband met non-proliferatie. De VS heeft tijdens de regeringsperiode van president Carter opgeroepen om die reden van kweekreactoren af te zien. In 1977 is in de VS een wettelijk verbod op de opwerking van civiele splijtstof ingevoerd. Dit verbod werd overigens in 1981 al weer opgeheven. Meer over non-proliferatie is te vinden in Paragraaf 2.6.1.

Een aantal vierde generatie kernreactoren gaat uit van het kweken van splijtstof uit uranium-238 met als doel een efficiënt grondstofgebruik en minimalisatie van de hoeveelheid radioactief afval. Hierbij gaat het om drie van de zes geselecteerde concepten (zie Paragraaf 2.3.5).

### 2.3.3 Generatie III reactoren

Hierna wordt een overzicht gegeven van vier typen kernreactoren van de derde generatie die momenteel commercieel leverbaar zijn en waarvoor tenminste concrete bouwplannen bestaan. De besproken reactoren zijn alle lichtwatergekoelde reactoren (LWR) en gebruiken verschillende filosofieën ten aanzien van de reactorveiligheid. Deze worden in Paragraaf 2.5 toegelicht, evenals de certificatieprocedures. De grootte van de te bespreken kerncentrales is aangegeven in elektrisch vermogen in megawatt (MW).

#### *EPR*

De eerste EPR is momenteel in aanbouw in Olkiluoto in Finland (zie Figuur 2.6) en de bouw van een tweede in Flamanville in Frankrijk is in voorbereiding. EPR staat voor *European Pressurized water Reactor*, een drukwaterreactor. De fabrikant is AREVA, een fusie van de Franse reactorbouwer Framatome en de kernenergie divisie van het Duitse Siemens. De EPR heeft van de hier besproken reactoren het grootste eenheidsvermogen: ruim 1600 MW. Het is een volledig evolutionair reactorontwerp, uitgaand van dezelfde veiligheidsfilosofie als de meest recente series Franse en Duitse reactoren. Een extra veiligheidssysteem om ernstige reactorongevallen te beheersen is de zogenaamde *core catcher* (kernvanger) onder het reactorvat. In het geval van volledig smelten van de reactorkern zorgt de core catcher voor het opvangen en afkoelen van de radioactieve smelt zodat de insluiting van radioactieve stoffen bij de kerncentrale in stand blijft en zich geen radioactieve stoffen buiten de kerncentrale kunnen verspreiden. Toepassing van een core catcher kan met name voor grote vermogensreactoren tot een gradueel relevante verbetering van de veiligheid van de centrale leiden. De absolute veiligheidswinst is echter klein, zodat toepassing daarvan alleen bij nieuwbouw zinvol is.

#### *AP1000*

De AP1000 is een reactorontwerp van de Amerikaanse fabrikant Westinghouse, momenteel eigendom van het Japanse Toshiba. AP staat voor *Advanced Pressurized water reactor*. Evenals de EPR is ook de AP1000 een drukwaterreactor, echter met een vermogen van 1100 MW. De eerste order voor deze reactor is geplaatst door het Chinese bedrijf CNNC. In de Verenigde Staten treffen vier elektriciteitsbedrijven voorbereidingen om elk een gecombineerde bouw- en bedrijfsvergunning aan te vragen voor een centrale met twee AP1000 reactoren bij de Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission (NRC). Een ontwerpcertificering voor de AP1000 is door de NRC eind 2005 toegekend. In Paragraaf 2.5.3 wordt nader ingegaan op het systeem van vergunningverlening en certificering in de VS.



Figuur 2.6 *De EPR in aanbouw in Finland*  
Bron: TVO, juli 2007.

Bij de AP1000 ligt de nadruk op het vereenvoudigen van het ontwerp ten opzichte van de meest recente Amerikaanse drukwaterreactoren. Volgens Westinghouse heeft dit ontwerp dan ook 50% minder kleppen, 35% minder pompen, 80% minder buizen, 45% minder seismisch gebouwwolume en 70% minder kabel. De AP1000 maakt beduidend meer dan zijn voorgangers gebruik van passieve veiligheidssystemen, zoals voor toevoer van noodkoelwater, restwarmteafvoer en koeling van het reactorgebouw.

#### *ABWR*

De ABWR is een kerncentrale met een kokendwaterreactor met een elektrisch vermogen van 1350 tot 1600 MW. Het ontwerp is van de Amerikaanse fabrikant General Electric. ABWR staat voor *Advanced Boiling Water Reactor*. Een kerncentrale van dit ontwerp is in bedrijf in Japan en in aanbouw in Taiwan. Het ontwerp is gecertificeerd door de Amerikaanse NRC. Het Amerikaanse elektriciteitsbedrijf TVA leidt een consortium dat de bouw voorbereidt van een ABWR bij de bestaande kerncentrale Bellefonte in de staat Alabama. Net als de EPR is de ABWR een evolutionair reactorontwerp met dezelfde veiligheidsfilosofie als de voorgaande generatie kokendwaterreactoren.

#### *ESBWR*

De ESBWR is eveneens een reactorontwerp met een kokendwaterreactor van General Electric en heeft een vermogen van ruim 1500 MW. ESBWR staat voor *Economic and Simplified Boiling Water Reactor*. De ESBWR maakt substantieel meer gebruik van passieve veiligheidssystemen dan de eerdere typen kokendwaterreactoren. In deze reactor circuleert het koelwater door de reactorkern niet door middel van pompen, maar door middel van natuurlijke circulatie. De Nederlandse kerncentrale Dodewaard stond model voor de ESBWR. Daarnaast heeft ook de ESBWR een *core catcher*. Twee Amerikaanse consortia van elektriciteitsbedrijven zijn bezig met het verkrijgen van een vergunning van de NRC voor een gecombineerde bouw- en bedrijfsvergunning voor dit reactortype. Voor de ESBWR wordt in 2008 ontwerpcertificering door de NRC verwacht.

### 2.3.4 Generatie III<sup>+</sup> reactoren

De Zuid-Afrikaanse PBMR en de Chinese HTR-PM worden gerekend tot de generatie III<sup>+</sup> reactoren. Beide zijn gasgekoelde hoge temperatuur reactoren (HTR). Momenteel wordt de bouw van prototypen met commerciële vermogens voorbereid. Deze twee typen hoge temperatuur reactoren (HTR) zijn ontworpen om een eenvoudiger veiligheidsconcept en een hoger energetisch rendement in vergelijking met bestaande lichtwaterreactoren te realiseren.

In zowel de PBMR als de HTR-PM wordt helium als koelmiddel en grafiet als moderator toegepast. De uittreedtemperatuur van het koelmiddel is zeer hoog, 700 tot 1000°C in vergelijking met 325°C bij licht water reactoren. Daardoor is niet alleen een hoger energetisch rendement bij elektriciteitsproductie mogelijk, maar tevens kan de warmte van het hete gas ook worden toegepast in industriële processen, bijvoorbeeld waterstofproductie. Bij de PBMR wordt het opgewarmde helium direct naar een gasturbinegenerator geleid voor de productie van elektriciteit. Bij de HTR-PM wordt de warmte van het helium gebruikt om stoom op te wekken die vervolgens een stoomturbinegenerator aandrijft voor de productie van elektriciteit. De splijtstof is van een geheel ander ontwerp dan die van lichtwaterreactoren. De splijtstof is gebaseerd op zogenoemde Triso-deeltjes. Een deeltje bestaat uit een kern van uranium, omgeven door vier keramische lagen. De Triso-deeltjes zijn gasdicht en bestand tegen zeer hoge temperaturen (tot 1600°C). De splijtstof bestaat uit ballen grafiet ter grootte van een tennisbal. Een splijtstofbal bevat ongeveer 15.000 Triso-deeltjes. De reactorkern bestaat uit een losse stapeling van de splijtstofballen.

De veiligheidsfilosofie van HTR's steunt in grote mate op zijn inherente veiligheidseigenschappen (zie ook Paragraaf 2.5.2). Dit wordt bereikt door onder meer de eigenschappen van de splijtstof, een lage vermogensdichtheid van de kern, een kleine reactorkern en het gebruik van temperatuurbestendige materialen.

In Duitsland is bij Hamm-Uentrop een HTR gebouwd en in 1983 in bedrijf genomen. Met dit prototype zijn een aantal tests uitgevoerd. De reactor is in 1989 uit bedrijf genomen, wegens terugkerende technische problemen en hoge terugkerende reparatiekosten.

#### *HTR-PM*

HTR-PM staat voor *High Temperature Reactor Pebble-bed Module*. De HTR-PM heeft eenheidvermogen van ruim 190 MW. Deze reactor wordt momenteel ontwikkeld door de Chinese fabrikant Chinese Nuclear Engineering and Construction Corporation (CNECC) in samenwerking met het Institute of Nuclear Energy Technology dat een kleine testreactor van hetzelfde type bedrijft. Het Chinese elektriciteitsbedrijf China Huaneng Group zal de eerste HTR-PM gaan afnemen. De eerste HTR-PM demonstratiecentrale moet in 2012 voltooid zijn. Als vestigingsplaats is gekozen voor Rongcheng in de provincie Shandong.

#### *PBMR*

PBMR staat voor *Pebble Bed Modular Reactor*. De PBMR is een modulair reactorontwerp voor een kerncentrale van ruim 160 MW per eenheid. De ontwikkeling van dit ontwerp door de Zuid-Afrikaanse fabrikant PBMR (Pty) Ltd is in een vergevorderd stadium. Het is de bedoeling dat een centrale gaat bestaan uit een aantal van deze reactoren op één vestigingsplaats, bestuurd vanuit één centrale regelzaal. Het Zuid-Afrikaanse elektriciteitsbedrijf ESKOM heeft een demonstratiereactor gepland naast de bestaande kerncentrale Koeberg bij Kaapstad, met een optie op een serie van 10 op dezelfde vestigingsplaats. De start van de bouw is momenteel gepland in 2009. Het zal volgens de fabrikant dan nog vier jaar duren voordat de eerste splijtstof geladen kan worden. Vervolgens zal drie jaar daarna (2016) de eerste commerciële reactor gebouwd kunnen worden.

### 2.3.5 Vierde generatie reactoren

Voor het ontwikkelen van nieuwe geavanceerde reactoren die nog beter presteren ten aanzien van zowel veiligheids-, milieu als economische aspecten, is in 2001 door de belangrijkste landen op nucleair gebied het Generatie IV Forum (GIF) opgericht. Het GIF heeft tot doel om gezamenlijk de toekomstige reactoren te ontwikkelen. Het GIF bestaat uit de volgende 13 landen en landencombinaties: Argentinië, Brazilië, Canada, China, Euratom, Frankrijk, Japan, Korea, Russische Federatie, Zuid-Afrika, Verenigd Koninkrijk, Verenigde Staten en Zwitserland. Het

forum heeft een ‘roadmap’ gemaakt voor de ontwikkeling van zes veelbelovende reactorconcepten.

Het doel is een verbetering te bereiken op de volgende aspecten:

- Duurzaamheid
  - gebruik van minder grondstoffen
  - minimalisatie van de hoeveelheid en levensduur van geproduceerd radioactief afval
- Veiligheid en betrouwbaarheid
  - veilig en betrouwbaar in bedrijf
  - lage kans op schade aan reactorkern
  - eliminatie van noodzaak tot evacueren van omwonenden
- Economie
  - lage kosten van de splijtstofcyclus en gedurende de hele levensduur van de reactor (bouw, bedrijf, ontmanteling)
  - laag financieel risico (bijvoorbeeld door een korte bouwtijd)
- Proliferatie: onaantrekkelijk als basis voor wapenproductie
- Terrorisme: verbeterde bestendigheid.

Doel van het Generatie IV Forum is om voor een aantal reactorconcepten de stadia van conceptontwikkeling tot en met demonstratie te doorlopen zodat vanaf 2030 op basis van deze reactorconcepten nieuwe commerciële reactoren op de markt kunnen worden gebracht.

Twee van de concepten, respectievelijk de zeer hoge temperatuur en de superkritisch water reactor, zijn open splijtstofcyclus reactoren, die efficiënt elektriciteit en waterstof kunnen produceren. Vier concepten, respectievelijk met natrium, lood, heliumgas of gesmolten zout als koelmiddel, zijn gesloten splijtstofcyclus reactoren. Deze reactoren zijn gericht op het zo optimaal mogelijk gebruik maken van splijtstof en recyclen van radioactief afval.

In de optiek van het Generatie IV Forum zullen de vierde generatie reactoren niet alleen voor grootschalige elektriciteitsvoorziening worden toegepast, maar ook voor andere toepassingen (Generation IV International Forum, 2002):

- productie van waterstof en synthetische brandstoffen,
- industriële proceswarmte,
- warmtekrachtkoppeling (WKK),
- tertiaire oliewinning.

## 2.4 Back-end

Na gebruik in de kernreactor zijn er twee mogelijke eindbestemmingen voor de gebruikte splijtstofelementen. Dit is reeds kort in Paragraaf 2.1 beschreven. De twee routes zijn: (1) directe berging (na conditionering) als hoogradioactief afval en (2) opwerking (recycling). Bij deze laatste route wordt splijtstof teruggewonnen uit de splijtstofelementen en hergebruikt in de splijtstofcyclus. De stappen voor beide routes worden hierna beschreven.

### 2.4.1 Directie berging

#### *Interim berging*

In veel landen worden gebruikte splijtstofelementen, na een periode van afkoeling in een (intern of extern) splijtstofbassin, overgebracht naar een aparte faciliteit. Deze faciliteit bevindt zich al of niet op de locatie van de kerncentrale. De bedoeling is dat deze splijtstofelementen uiteindelijk - na geëigende conditionering en verpakking - in een eindberging worden opgeslagen.

### *Eindberging*

In Europa vinden al decennialang een groot aantal experimenten plaats in ondergrondse testlaboratoria om eindberging in geologisch stabiele lagen te onderzoeken. Voorbeelden daarvan zijn onder meer te vinden in België, Frankrijk, Duitsland, Zwitserland, Zweden en Finland. Er zijn momenteel geen eindbergingsfaciliteiten voor gebruikte splijtstof operationeel. In Zweden en Finland zijn er concrete projecten voor de realisatie van eindbergingsfaciliteiten voor de opslag van gebruikte splijtstof. In Zweden moet zo'n faciliteit in 2015 in gebruik worden genomen. Op die plaats zal een zogenoemde conditioneringinstallatie worden gerealiseerd waar de splijtstof voor de berging in een geschikte vorm kan worden gebracht en verpakt. Zweden beschikt al over ondergrondse faciliteiten voor laag- en middelradioactief afval (eindberging Forsmark, sinds 1988) en voor gebruikte splijtstof (interim opslag Oskarshamn, sinds 1985). In Finland werd, na consultatie van de lokale bevolking, in 2001 besloten een eindberging voor gebruikte splijtstof bij de plaats Olkiluoto te realiseren. Deze eindberging is op dit moment in aanbouw. Op die plek is ook al sinds 1992 een eindberging voor laag- en middelradioactief afval in bedrijf. Finland beschikt sinds 1998 bij de plaats Loviisa over een tweede eindberging voor dit type afval.

### 2.4.2 Opwerking

Opwerking is het proces waarbij de resterende splijtstof in de gebruikte splijtstofelementen (zoals plutonium) wordt gescheiden van de splijtings- en activeringsproducten. Na opwerking resulteert: uranium (95%), plutonium (1%), en een restfractie (splijtingsproducten en minor actiniden) die als hoogradioactief afval moet worden opgeborgen (4%). Het afgescheiden plutonium kan hergebruikt worden in MOX (mixed oxide splijtstof), een mengsel van plutoniumoxide en uraniumoxide. Er zijn ook landen (bijvoorbeeld het Verenigd Koninkrijk) waar het plutonium niet wordt hergebruikt, maar wordt opgeslagen. Het teruggewonnen uranium wordt REPU genoemd, een afkorting voor 'reprocessed uranium'. REPU kan weer verwerkt worden zodat het in splijtstofelementen kan worden gebruikt. Sommige landen (zoals Frankrijk) slaan het REPU op als strategische reserve, die ingezet kan worden bij logistieke of economische marktverstoringen. In andere landen, waaronder Nederland, wordt REPU na verrijking gebruikt als splijtstof. Na het opwerken wordt het restafval, splijtingsproducten plus zogenoemde minor actiniden, verglaasd en in roestvrijstalen canisters verpakt.

### *Tijdelijke opslag na de opwerking*

Het hoogradioactieve verglaasde afval afkomstig van de opwerking van de gebruikte splijtstofelementen (bijv. van de kerncentrale Borssele) wordt in Nederland in een speciaal, groot bunkerachtig gebouw opgeslagen, het zogenoemde HABOG, bij COVRA in Vlissingen. Dit is een bovengrondse opslagvoorziening waarin hoogactief radioactief afval tijdelijk, maar wel langdurig (40 tot 100 jaar), wordt opgeslagen. Van dit radioactieve afval is in een periode van 100 jaar 90% vervallen tot niet-radioactief afval. Na een periode van opslag in het HABOG zal het hoogradioactieve afval in de diepe ondergrond worden opgeborgen. Het duurt circa 10.000 jaar voordat de radiotoxiciteit van dit afval het niveau bereikt dat gelijk is aan de radiotoxiciteit van de hoeveelheid natuurlijk uranium, inclusief zijn vervalproducten, dat voor het maken van de splijtstof nodig was. Ook het niet-warmteproducerend hoogactieve afval, afkomstig van de opwerking, waarin zich kleine concentraties actiniden bevinden, zal op dezelfde wijze als het warmteproducerend hoogactieve afval worden opgeborgen. Het huidige HABOG is ontworpen voor opslag van het verglaasde hoogradioactieve afval, maar beschikt niet over voorzieningen om afgekoelde gebruikte splijtstofelementen (t.b.v. directe opslag) tijdelijk in containers op te slaan.

### *Eindberging*

Er is in Nederland nog geen beslissing genomen over de wijze waarop het radioactieve afval in de ondergrond zal worden opgeslagen. Wel is er al gekozen voor terughaalbare eindberging. Dit houdt in dat eenmaal opgeborgen radioactief afval altijd weer moet zijn terug te halen, bijvoor-

beeld als er nieuwe (betere) oplossingen voor de verwerking of berging van dit afval zijn gevonden. Door de Commissie Opberging Radioactief Afval (CORA) is in 2001 onderzocht wat de mogelijkheden zijn voor eindberging in Nederland (CORA-rapport, 2001). In dit onderzoek zijn twee typen ondergrondse berging onderzocht: opslag in zout of klei. Het CORA-rapport concludeert dat zoutformaties en kleilagen in de diepe ondergrond mogelijkheden bieden om aan de eis van terugneembaarheid te voldoen. Op basis van nader onderzoek moet een definitieve keuze voor eindberging in Nederland worden gemaakt.

### *Partitioning and Transmutation*

Het duurt meer dan 100.000 jaar voordat de radioactiviteit van langlevende radioactieve elementen in gebruikte splijtstof het niveau bereikt van natuurlijk uranium (zogenoemde levensduur). Er wordt daarom uitgebreid onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om de levensduur van hoogradioactief afval te verkorten. Bij *partitioning* worden, voorafgaand aan de *transmutation*, eerst de actiniden en splijtingsproducten chemisch van het uranium gescheiden. Bij de transmutatie worden deze afgescheiden langlevende isotopen opnieuw in een reactor als splijtstof gebruikt of bestraald en grotendeels omgezet (getransmuteerd) in stabiele isotopen en korter levende splijtingsproducten, met een levensduur in de orde van 250 jaar. Deze transmutatie kan plaatsvinden in een bestaande of in speciaal daarvoor ontworpen kerncentrales. Met deze kerncentrales wordt ook elektriciteit opgewekt. In feite is het gebruik van MOX-splijtstof in sommige Europese landen een eerste stap om de levensduur van kernsplijtingsafval te verkleinen. Partitioning and Transmutation (P&T) is dan ook een geavanceerde vorm van de huidige vorm van opwerking en recycling. Voor een substantiële verlaging van de levensduur moet een route van meerdere recyclestappen worden gevolgd. Bij 95% transmutatie van kernafval daalt de levensduur tot iets meer dan 10.000 jaar en bij 98% transmutatie tot iets meer dan 2000 jaar (Magill, 2003). Met een nog hogere transmutatiegraad is het mogelijk de levensduur nog verder te verkorten, maar in het algemeen blijft er nog een restfractie onverwerkbaar langlevend radioactief afval over waarvoor geologische berging de enige oplossing is. Succesvolle partitioning en transmutatie tests hebben laten zien dat het inderdaad mogelijk is om de levensduur van het afval aanzienlijk te verkorten. Het doel van de huidige studies is om de technische en economische efficiency zodanig te verhogen, dat deze technologie op industriële schaal gebruikt kan gaan worden. De ontwikkeling van de vierde generatie reactoren beoogt een verbeterde transmuteerbaarheid van het daarbij overblijvende radioactieve afval in vergelijking met dat van de huidige generaties reactoren.

## 2.5 Technische veiligheid

Deze paragraaf gaat nader in op technische veiligheid van de splijtstofcyclus. Eerst worden veiligheidsprincipes toegelicht die bij de splijtstofcyclus worden toegepast. Daarna wordt de technische veiligheid van de installaties besproken en de beoordeling daarvan. Tenslotte wordt ingegaan op de certificering van de in Paragrafen 2.3.3 en 2.3.4 besproken kernreactoren.

### 2.5.1 Veiligheidsprincipes bij de splijtstofcyclus

Bij elk van de processen in de splijtstofcyclus is er een kans dat er een hoeveelheid radioactieve stoffen ongecontroleerd in de omgeving terecht komt. Om zowel de kans van een dergelijk ongeval als de hoeveelheid radioactieve stoffen die hierbij zou vrijkomen te beperken, worden er bij de processen in de splijtstofcyclus een groot aantal technische en organisatorische maatregelen toegepast. Hierbij geldt het principe dat zowel de kans op een ongeval als de gevolgen daarvan zo klein mogelijk moeten zijn. De omvang van de technische en organisatorische maatregelen die bij de beveiliging van een proces worden getroffen houdt direct verband met de ernst van de gevolgen van een ongeval waarbij radioactieve stoffen zouden vrijkomen.

In de loop van de jaren zijn de eisen voor technische en organisatorische maatregelen steeds verder aangescherpt. Hierin speelt het Internationaal Atoom Energie Agentschap van de Vere-

nigde Naties in Wenen (IAEA) een grote rol. De IAEA, die toezicht houdt op het gebruik van nucleaire technologie en materialen, stelt onder meer veiligheidsstandaarden op.

### *Defense-in-depth*

Het ontwerp en de uitvoering van technische systemen in een nucleaire installatie en de bedrijfsvoering van deze installatie zijn gebaseerd op het *defense-in-depth* principe, dat onder meer wordt uitgelegd in het IAEA-document 'Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants' (IAEA, 1988). Het *defense-in-depth* principe bestaat uit het toepassen van een algemene strategie van veiligheidsmaatregelen en veiligheidsvoorzieningen bij een nucleaire installatie met als uiteindelijke doel te voorkomen dat enig menselijke handeling, mechanisch falen of combinaties daarvan tot gezondheidsschade van omwonenden zal kunnen leiden. Aan het *defense-in-depth* principe wordt uitvoering gegeven door het aanbrengen van meerdere beveiligingslagen bij het beheersen van een potentieel gevaarlijke proces, zoals het splijtingsproces of een hoeveelheid opgeslagen hoogradioactief materiaal. Deze beveiligingslagen bestaan enerzijds uit fysieke barrières, zoals ventilatiesystemen met filters die het vrijkomen van radioactief materiaal naar de omgeving moeten verhinderen. Anderzijds kan een beveiligingslaag ook bestaan uit een aantal organisatorische maatregelen, zoals noodprocedures en andere maatregelen die de omwonenden en het leefmilieu tegen schade moeten beschermen in geval de fysieke barrières zouden falen. Tenslotte is het beschermen van de fysieke barrières onderdeel van het *defense-in-depth* principe.

Het in een kerncentrale consequent doorgevoerde 'defense-in-depth' principe dient er voor te zorgen dat de drie basisveiligheidsfuncties (beheersen van het vermogen, afvoer van de warmte en insluiting van het radioactief materiaal) onder voorziene omstandigheden worden gehandhaafd, waardoor emissies van radioactief materiaal en daarmee blootstelling van de bevolking aan dit materiaal voorkomen wordt.

Naast het aanwezig zijn en functioneren van een groot aantal algemene structurele en organisatorische beveiligingslagen in een installatie, omvat het *defense-in-depth* principe ook het handhaven van twee specifieke veiligheidsprincipes:

- *Preventie van ongevallen*: Het optreden van ongevallen met interne oorzaak wordt voorkomen door er voor te zorgen dat het ontwerp, de constructie en de bedrijfsvoering van de installatie van een hoge kwaliteit zijn en dat afwijkingen van de normale bedrijfsvoering slechts bij uitzondering kunnen optreden.
- *Bestrijden van de mogelijke gevolgen van ongevallen*: Om dit mogelijk te maken worden er in de installatie en daar buiten voorzieningen getroffen. Hierbij wordt onderscheiden:
  - *Ongevalmanagement*: het terugbrengen van de installatie in een veilige toestand. Voor bijvoorbeeld een kernreactor betekent een veilige toestand: een afgeschakelde reactor, het langdurig in stand houden van de kernkoeling, en behouden van de insluitfunctie.
  - *Veiligheidsvoorzieningen in de installatie*: de aanwezige veiligheidsvoorzieningen van een nucleaire installatie moeten in staat zijn de gevolgen van een ongeval binnen de voorgeschreven veiligheidsgrenzen te houden en de installatie in een veilige toestand te brengen.
  - *Rampenbestrijdingsplan*: een plan waarin de organisatie van tegenmaatregelen ter bescherming van werknemers en bevolking is vastgelegd.

### *Veiligheidscultuur*

Naast de aandacht voor de technische voorzieningen en procedures is ook een goede veiligheidscultuur van groot belang. Dit heeft vooral te maken met de houding van de organisatie en de individuele medewerkers ten aanzien van veiligheid. Bij constatering van zaken waar mogelijk de veiligheid in geding zou kunnen zijn, dient actief te worden gehandeld. Veiligheid betreft niet alleen het 'lijdzaam' volgen van de procedures maar vooral ook het actief meedenken aan de verhoging van de effectiviteit van technische en organisatorische veiligheidsmaatregelen. Voor de waarborging van de veiligheid is het van belang dat het toezicht van nationale en inter-

ationale organisaties zich niet alleen richt op de technische staat van een kerncentrale, maar ook op de veiligheidscultuur bij de exploitant van de kerncentrale. In Nederland ziet de Kernfysische Dienst (KFD) van het ministerie van VROM toe op de technische staat van de installatie (door middel van periodieke evaluaties), op het naleven van de voorschriften en de veiligheidscultuur. Voor de veiligheidsbeoordelingen kan de KFD een beroep doen op het Operational Safety Review Team (OSART) van de IAEA. Ook bij deze zogenoemde OSART-missies wordt naar het aspect 'veiligheidscultuur' van de nucleaire veiligheid gekeken.

## 2.5.2 Technische veiligheid en beoordeling

Zoals hiervoor is besproken, zijn er, in het bijzonder bij kerncentrales, diverse maatregelen getroffen om de technische veiligheid (ook bij ongevallen) te waarborgen. Bij normale bedrijfsvoering gebeurt dit door het monitoren van de stralingsbelasting van personeelsleden en het stralingsniveau in de omgeving van de kerncentrale - en de controle hierop door de overheid.

De eventuele blootstelling aan straling en radioactieve stoffen onder normale bedrijfsomstandigheden wordt in Paragraaf 3.1 besproken. Van de verschillende processen in de splijtstofcyclus, is de blootstelling aan straling en radioactieve stoffen bij normaal bedrijf relatief het grootst bij de uraniummijnbouw.

Bij de veiligheidsrisico's door ongevallen bij de splijtstofcyclus moet onderscheid worden gemaakt tussen risico's voor de bevolking en die voor het personeel. Wat betreft het individuele overlijdensrisico voor het personeel betrokken bij de splijtstofcyclus is het risico van mijnwerkers bij de uraniummijnen het hoogst. Het gaat om hoofdzakelijk dezelfde soorten ongevallen als bij de mijnbouw van andere delfstoffen. Het risico is eveneens vergelijkbaar en bedraagt, afhankelijk van de mijnbouwmethode, enkele keren in de tienduizend jaar ( $1-4 \cdot 10^{-4}$  per jaar) (Paul Scherrer Institut, 2005). Bij de andere onderdelen van de splijtstofcyclus zijn de risico's voor het personeel vergelijkbaar of kleiner dan die bij de lichte industrie (iets meer dan eens in de honderdduizend jaar ( $1,2 \cdot 10^{-5}$  per jaar bij een gemiddeld bedrijf, (CBS 2003)). Ook de risico's door verhoogde blootstelling aan straling en radioactieve stoffen tijdens ongevallen zijn, afgezien de risico's bij de mijnbouw, vergelijkbaar met die van de lichte industrie. De overlijdensrisico's voor de bevolking door ongevallen bij de verschillende processen van de splijtstofcyclus zijn minder dan eens in de miljoen jaar ( $10^{-6}$  per jaar).

Het risico van ongevallen kan worden bepaald door het uitvoeren van veiligheidsanalyses. Hierin worden kansen van optreden van inleidende gebeurtenissen en kansen op falen van veiligheidssystemen beschouwd (zie kader).

### *Ontwikkelingen reactorveiligheid bij generaties III en III+ en de beoordeling hiervan*

Bij de in Paragraaf 2.3.3 en 2.3.4 beschreven reactortypen worden verschillende veiligheidsfilosofieën gevolgd. De EPR en ABWR zijn evolutionair ontwikkelde reactortypen en gaan uit van dezelfde defense-in-depth veiligheidsfilosofie als bij bestaande kerncentrales met aanvullende, meervoudig uitgevoerde *actieve veiligheidssystemen*. De systemen staan onder normaal bedrijf uit en moeten bij daarvan afwijkende condities - vaak automatisch - worden geactiveerd.

In de loop van de jaren zijn de betrouwbaarheidseisen voor actieve veiligheidssystemen steeds verder aangescherpt. De IAEA stelt steeds stringenter eisen aan de betrouwbaarheid van veiligheidssystemen. Omdat het toepassen van de aangescherpte voorschriften consequenties heeft voor de investeringskosten van nieuwe kerncentrales, zijn sommige fabrikanten op zoek gegaan naar nieuwe mogelijkheden om de reactorveiligheid te waarborgen. Hieruit is de filosofie van de *passieve veiligheid* voortgekomen: gebruik maken van altijd aanwezige krachten en natuurlijke processen zonder interventie van mensen of systemen, zoals bijvoorbeeld de zwaartekracht. In de AP1000 en de ESBWR ontwerpen is deze passieve veiligheidsfilosofie toegepast.



### ***Kans op reactorongevallen en veiligheidscriteria***

Om na te gaan wat de betrouwbaarheid van de verschillende bedrijfssystemen en effectiviteit van de individuele veiligheidssystemen betekenen voor de totale veiligheid van de centrale, wordt een zogenoemde Probabilistic Safety Assessment (PSA) uitgevoerd. Dit is een methode waarmee de kansen op en de gevolgen van ongevallen voor de omgeving op een kwantitatieve wijze kunnen worden weergegeven. Hierbij worden drie niveaus onderscheiden, met elk één of meer specifieke veiligheidscriteria waaraan moet worden voldaan. Op het eerste niveau (PSA-1) wordt de kans op falen van reactorkern bepaald. Op het tweede niveau (PSA-2) wordt berekend in welke mate en met welke kans bij het falen van de kernreactor vrijgekomen stoffen uit de splijtstofelementen blijven ingesloten (binnen het primaire systeem en de insluitconstructie blijven). Op het derde niveau (PSA-3) wordt bepaald in welke mate en met welke kans de omgeving schade leidt bij een ongeval.

De probabilistische veiligheidscriteria bij de drie niveaus zijn als volgt: de kernsmeltfrequentie is het criterium waaraan het resultaat van PSA-1 wordt getoetst. De kans op falen van de insluiting - of de kans op een grote lozing - is het criterium waaraan de uitkomst van de PSA-2 wordt getoetst. De toetsingscriteria voor de PSA-3 is het individuele risico en (voor Nederland) het groepsrisico.

Hoe kleiner de waarde van de kernsmeltfrequentie, hoe kleiner de kans dat een grote lozing zou kunnen optreden als gevolg van het falen van de kern. Een kernsmeltfrequentie van  $10^{-6}$  per jaar, komt overeen met een kans van eens per miljoen jaar. De kernsmeltfrequentie voor de kerncentrale Borssele ligt op dit niveau (Seebregts et al., 2005).

Kernsmeltfrequenties, zoals in onderstaande tabel worden getoond, worden berekend om ontwerpbeslissingen te kunnen nemen, bijvoorbeeld om de extra veiligheid van bepaalde verbeteringen te kunnen beoordelen. Zondermeer vergelijken van kernsmeltfrequenties geeft slechts een indruk van de veiligheidsvoorzieningen maar doet geen uitspraak over de totale veiligheid van de installatie. In sommige gevallen, zoals bij de twee besproken generatie III+ reactoren (PBMR en HTR-PM) heeft toetsing aan kernsmeltfrequentie geen zin omdat deze reactoren zodanig zijn ontworpen dat het smelten van de reactorkern niet mogelijk is.

Met een kernsmeltfrequentie (PSA-1) worden niet alle mogelijke ongevallen gedekt. Er kunnen ook ongevallen plaatsvinden door bijvoorbeeld brand of overstroming waarbij insluitingen en andere beveiligingen kunnen worden beschadigd. Ook daarbij zouden radioactieve stoffen in de omgeving kunnen vrijkomen. Dergelijke ongevallen worden standaard beschouwd bij veiligheidsanalyses (PSA-2).

#### *Kernsmeltfrequenties van verschillende generatie III kerncentrales op basis van opgaven door reactorleveranciers*

	EPR	AP1000	ESBWR	ABWR
Type	PWR	PWR	BWR	BWR
Kernsmeltfrequentie (1/jaar)	$1.3 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-7}$

Bron: Kloosterman, 2006.

Een derde categorie reactorontwerpers zoekt naar mogelijkheden om de veiligheidssystemen geheel overbodig te maken, terwijl toch de technische veiligheid gewaarborgd blijft. Zij baseren zich bij het reactorontwerp op fysische principes waardoor een ongecontroleerde reactiviteitsexkursie (een toename van de reactiviteit), waarbij de reactorkern beschadigd wordt, niet mogelijk is, en de reactor zichzelf veilig uitschakelt bij het uitvallen van de koeling. Het uitgangspunt is dat bij wegvallen van de koeling de reactorkern intact blijft en het smelten van de kern fysiek

onmogelijk is gemaakt. Dit is de filosofie van *inherente veiligheid*. Dit legt een sterke beperking op aan het maximale vermogen van de reactor en stelt tevens hoge eisen aan de hittebestendigheid van de gebruikte materialen. In de jaren zestig van de vorige eeuw is begonnen aan het ontwerpen van de Hoge Temperatuur Reactor (HTR) waarbij het idee van de modulaire reactor werd ingevoerd: het vermogen per reactoreenheid wordt beperkt tot ongeveer 1/10 van het vermogen van een traditionele waterreactor. Een centrale bestaat dan uit meerdere eenheden ('modules'). Mocht bij een dergelijk reactor bijvoorbeeld de koeling geheel uitvallen, dan zorgt de speciaal ontworpen splijtstof (Triso splijtstof) ervoor dat de kettingreactie snel uitdooft. Hierdoor schakelt de reactor zichzelf uit. De splijtstof blijft intact door de temperatuurbestendigheid van de materialen, ondanks de warmteproductie in de splijtstof door radioactief verval. De door radioactief verval geproduceerde warmte wordt opgenomen in de reactorconstructie, die hierdoor een paar honderd graden opwarmt. De filosofie van de inherente veiligheid heeft geresulteerd in het ontwikkelen en toepassen van de zogenoemde Triso splijtstof (kleine splijtstofkorrels met een aantal beschermende lagen ingebed in grafiet) die bij hoge temperaturen intact blijft, een klein reactorvermogen, een lage vermogensdichtheid en een specifieke kern- en reactorgeometrie. De PBMR en de HTR-PM maken gebruik van deze inherente veiligheidsfilosofie. Het grafiet, dat als moderator wordt gebruikt, zou weliswaar bij hoge temperaturen kunnen reageren met lucht na een ongeval met het koelsysteem, maar de temperaturen die bij deze reactie optreden zijn lager dan de temperatuur waarbij de insluiting van de Triso splijtstof zou falen (>1600°C). De splijtingsproducten en activeringsproducten in de splijtstof blijven zo opgesloten. Alleen geactiveerde verontreinigingen in het grafiet zullen bij de reactie met lucht kunnen vrijkomen.

### 2.5.3 Certificering

Bij nieuwe ontwerpen voor generatie III en III+ reactoren wordt uitgegaan van dezelfde basis veiligheidsfilosofie van vorige generaties van reactorontwerpen. Er wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van bedrijfservaring met deze reactoren waardoor de kans van optreden van 'onbekende' ongevalseenario's sterk wordt beperkt. Daarnaast worden aanvullende veiligheidssystemen gedurende een groot aantal jaren in testopstellingen onderzocht en de effectiviteit ervan beoordeeld voordat deze in een ontwerp mogen worden toegepast. Voor generatie III+ kerncentrales geldt in principe dezelfde IAEA-regelgeving als die van generatie III.

Doorgaans wordt een nieuw type kerncentrale het eerste gebouwd in het land van de fabrikant. Aan de overheid van het betreffende land zal als eerste een vergunning worden gevraagd. De vergunningsautoriteiten van andere landen steunen bij vergunningsprocedures voor kerncentrales van buitenlandse herkomst sterk op de vergunningverlener van het land waar de kerncentrale het eerst is gebouwd. Daarnaast zullen alle regels en procedures getoetst worden aan die van het Internationaal Atoom Energie Agentschap (IAEA) te Wenen.

De EPR heeft een ontwerpcertificaat van de Franse vergunningsautoriteit DGSNR (Direction générale de la sûreté nucléaire). In de Verenigde Staten geeft de Nuclear Regulatory Commission (NRC), de Amerikaanse vergunningsautoriteit, ontwerpcertificaten uit. Een ontwerp doorloopt hierbij het volgende traject: Pre-certification, Stand Safety Analysis Report, Final Design Approval, Design Certification. De ESBWR bevindt zich momenteel in het stadium van pre-certification. De AP1000 heeft kortgeleden zijn design certification bereikt. De ABWR beschikt al enige jaren over een design certification.

De PBMR en HTR-PM verkeren nog in een vroeg stadium van ontwikkeling. Verwacht wordt dat de Zuid-Afrikaanse respectievelijk de Chinese vergunningsautoriteiten op korte termijn een ontwerpvergunning zullen verlenen. De Chinese vergunningsautoriteit heeft al een vergunning voor een kleine testreactor van dit type verleend. Voor de Zuid-Afrikaanse vergunningsautoriteit is de PBMR de eerste in zijn soort.

## 2.6 Beveiliging tegen risico's van proliferatie en terrorisme

Naast de in de vorige paragraaf besproken technische veiligheidsrisico's, moet bij de toepassing van kernenergie ook rekening worden gehouden met veiligheidsrisico's die betrekking hebben op het misbruiken van installaties en nucleair materiaal. Er wordt onderscheid gemaakt tussen proliferatie en terrorisme. Proliferatie is het ongecontroleerd verspreiden van nucleaire technologie en materiaal voor militaire toepassing. Met terrorisme worden aanslagen op de nucleaire installaties of aanslagen met nucleair materiaal bedoeld. De beveiliging tegen proliferatie en terrorisme wordt in deze paragraaf besproken.

### 2.6.1 Proliferatie

Het tegengaan van verspreiding van nucleaire technologie en nucleair materiaal voor militaire toepassing (non-proliferatie) kent een geopolitieke dimensie die in belangrijke mate wordt bepaald door internationale veiligheid (CIEP, 2005). Regimes van sommige landen in de wereld wensen te beschikken over een nucleair wapen vanwege het prestige dat hieraan kan worden ontleend en de macht die er mee kan worden uitgeoefend. Ook kunnen landen een nucleair wapen willen ontwikkelen om hun belangen te beschermen als buurlanden ook over nucleaire wapens beschikken (afschrikking). Voor het ontwikkelen van een nucleair wapen moet men beschikken over nucleaire technologie en nucleair materiaal.

#### *Verspreiding nucleaire technologie en kennis*

De technologieën van verrijking en opwerking kunnen worden gebruikt om nucleair materiaal te vervaardigen dat geschikt is voor een kernwapen. Handel in nucleaire technologie wordt traditioneel fel bekritiseerd in internationale relaties en diplomatie. Hierbij wordt druk uitgeoefend op landen die hieraan meewerken. Het bezit van nucleaire technologie en ruwe materialen door landen met kwade bedoelingen wordt door veel landen in de wereld gezien als een grote bedreiging voor de internationale veiligheid. Op dit moment zijn er problemen op het gebied van proliferatie met Noord-Korea en Iran: Noord-Korea heeft een kernwapen ontwikkeld en Iran wordt ervan verdacht een kernwapen te ontwikkelen.

Uiteindelijk gaat het om het ter beschikking hebben van een installatie waarmee nucleair materiaal kan worden vervaardigd dat geschikt is voor een kernwapen. Het verspreiden van kennis om een dergelijk installatie te kunnen bouwen is ook proliferatie. Het Pakistaanse kernwapenprogramma is mede gebaseerd op kennis over de verrijkingstechnologie die in de jaren zeventig van de vorige eeuw is ontvreemd door Abdul Qadeer Khan bij Urenco in Almelo. Nucleaire technologie en kennis zijn daarna verkocht aan Iran, Libië en Noord-Korea.

#### *Verspreiding nucleair materiaal*

De proliferatie gevoelige processtappen zijn verrijking (front-end) en opwerking (back-end). In de gefabriceerde splijtstofelementen is geen plutonium of hoogverrijkt uranium aanwezig. Ook in de kerncentrale en bij opslag van bestraalde splijtstofelementen is de kans op proliferatie gering vanwege de ongeschiktheid van het materiaal (concentraties splijtingproducten) en de toegankelijkheid (hoog stralingsniveau vanwege de splijtingsproducten).

De benodigde grondstoffen voor een kernwapen zijn hoogverrijkt uranium of plutonium. De verrijkingstechnologie kan wordt gebruikt om hoogverrijkt uranium te produceren, dat zou kunnen worden ingezet voor het maken van kernwapens. Het opwerkingsproces zou kunnen worden misbruikt om voor kernwapens geschikt plutonium af te scheiden (zie ook het kader).

Het plutonium dat bij het opwerkingsproces uit de gebruikte splijtstof wordt gehaald kan in principe gebruikt worden voor het vervaardigen van een primitief wapen (US-DOE, 1997). Het is technisch echter moeilijk om een werkend (primitief) nucleair explosief te maken, waarvan bovendien de betrouwbaarheid niet duidelijk is. Hoe slechter de kwaliteit van het plutonium, vooral uit lang gebruikte splijtstof, hoe geavanceerder het ontwerp van een nucleair explosief

moet zijn. Van een kernwapenprogramma kan echter al een dreiging uitgaan, zonder dat daaraan nucleaire testen te pas hoeven komen.

### ***Plutonium voor kernwapens***

Het element plutonium kent meerdere langlevende isotopen. De onderlinge verhouding daarvan bepaald de 'kwaliteit' ervan. Zo wordt onderscheid gemaakt tussen wapenkwaliteit (weapon grade) en reactorkwaliteit (reactor grade) plutonium. Globaal kan men stellen dat plutonium geschikt is voor kernwapens als het veel van het goed splijtbare plutonium-239 bevat. Plutonium van wapenkwaliteit bevat circa 93% plutonium-239. Reactorkwaliteit plutonium bevat ongeveer 50% plutonium-239 en meer dan 20% plutonium-240, dat door zijn slechte splijtbaarheid een versturende werking heeft bij gebruik in kernwapens.

### ***Non-proliferatie verdrag***

De belangrijkste politieke instrumenten voor non-proliferatie zijn:

- Het IAEA Statuut, dat de basis vormt voor een wereldwijde samenwerking bij alle toepassingen van nucleaire technieken.
- Het Euratom Verdrag, dat alle vreedzame nucleaire activiteiten in de Europese Unie aan regels bindt. Euratom werkt op dit punt samen met het IAEA.
- Het non-proliferatieverdrag (NPT), waarbij naast de vijf bestaande kernwapenstaten, alle andere toegetroten staten beloven geen kernwapens te verwerven en inspecties op de splijfstofcyclus te accepteren (van kracht sinds 1970). Ongeveer 190 staten hebben het NPT ondertekend.
- Het Additional Protocol over uitgebreidere controle mogelijkheden ook buiten de splijfstofcyclus. Dit protocol is nog niet door alle NPT-staten geratificeerd.

Deze verdragen leidden tot het toepassen van internationale inspecties op vreedzame nucleaire activiteiten, de splijfstofbewaking of *safeguards* door Euratom en de IAEA. Wat betreft de splijfstofcontrole hebben de landen van de Europese Unie daarom de bijna gelijktijdige ontwikkeling van twee parallelle controlesystemen meegemaakt. Dit betekent, dat op het gebied van safeguards de landen van de Europese Unie op dit moment onderworpen zijn aan twee waarborgsystemen, het Euratomsysteem (gecreëerd door het Verdrag van Rome van 1957) en de IAEA-controle door de toetreding tot het NPT.

Volgens experts is het huidige non-proliferatie verdrag niet adequaat genoeg. Er zijn in de afgelopen jaren diverse initiatieven ontplooid, die het non-proliferatie-regime in onze regio verstevigen en de kans op proliferatie zullen verkleinen. In 2003 is het Proliferation Security Initiative (PSI) gelanceerd, een initiatief van momenteel circa 60 landen (waaronder Nederland), dat met name gericht is op het onderscheppen en voorkomen van illegale transporten van 'Weapons of Mass Destruction' (WMD) en goederen waarmee deze kunnen worden gemaakt of gelanceerd. In 2004 is in dezelfde geest een motie van de Veiligheidsraad (UNSCR 1540) aangenomen die ook de verspreiding van WMD moet tegengaan.

El Baradei, de huidige directeur generaal van het IAEA, heeft gepleit het juridisch eigendom van de installaties voor verrijking en opwerking en van het splijtbaar materiaal onder te brengen in een supranationaal orgaan, bijv. door het upgraden van het IAEA tot een supranationale entiteit zou het Non-proliferatieverdrag meer inhoud krijgen (El Baradei, 2004). Daarmee zou ook de tweedeling tussen 'haves' en 'have nots' worden beëindigd. De IAEA heeft naar aanleiding hiervan in 2006 al het initiatief genomen tot de invoering van een systeem, waarbij de lidstaten splijfstof voor opwekking van kernenergie in bruikleen krijgen uit een internationale reservebank voor nucleaire brandstof. Na gebruik wordt deze splijfstof teruggegeven. Op de lange termijn moet dit ertoe leiden dat alle verrijkings- en opwerkingsinstallaties onder internationaal toezicht komen te staan (El Baradei, 2007).

### *Beveiliging van transporten*

Om diefstal van nucleair materiaal tijdens transport te voorkomen, is naast de controle vooraf (zowel van het vervoermiddel, de lading als de route) ook politiebegeleiding aanwezig. Het verloop van nucleaire transporten wordt continu gevolgd. Zo heeft men in Frankrijk een 'Tracking Center' waar alle transporten real time gevolgd worden en staat een interventieteam paraat om, in geval dit nodig is, in te grijpen. Ook andere Europese landen beschikken over een vergelijkbaar systeem. Euratom en het IAEA zien toe op het transporteren en verhandelen van nucleair materiaal. Nederland is een contracting party in de 'Convention on the Physical Protection of Nuclear Material' waarin het wordt verplicht nucleair materiaal te beschermen tijdens het transport (IAEA, 1980).

### *Invloed nieuwe kerncentrales op non-proliferatie*

Met het realiseren van een nieuwe kerncentrale van het type generatie III zal de situatie rond non-proliferatie niet wezenlijk veranderen. De technologische ontwikkeling van de generatie IV reactoren zullen mogelijk wel leiden tot verbeteringen ten aanzien van non-proliferatie (zie Paragraaf 2.3.5).

## 2.6.2 Terrorisme

Na 11 september 2001 is zowel bij de beveiliging van nucleaire installaties als bij opslagplaatsen en transporten van radioactief materiaal de aandacht voor terrorisme toegenomen. Er kunnen in dit verband twee soorten terroristische bedreigingen worden onderscheiden: (1) het gebruik van een explosief waarbij radioactief materiaal wordt verspreid en (2) een aanslag op een nucleaire installatie met het doel radioactieve stoffen uit de installatie te laten ontsnappen en daarmee de omgeving te besmetten.

### *Explosief met radioactief materiaal*

Vanwege de grootte en complexiteit van de benodigde installaties is het voor terroristische organisaties niet eenvoudig een kernwapen te ontwikkelen en te bouwen. Het gebruik van de zogenoemde 'vuile bom' (dirty bomb) vormt waarschijnlijk een grotere bedreiging. Met een 'vuile bom' wordt een combinatie bedoeld van een conventioneel explosief met een hoeveelheid radioactief materiaal. Deze combinatie wordt in het jargon ook wel een 'radio-active dispersion device' (RDD) genoemd. Voor de constructie van een RDD is geen materiaal uit de splijtstofcyclus nodig. Radioactief materiaal is ook ruim aanwezig buiten de nucleaire energie cyclus (bijvoorbeeld in de medische sector).

### *Aanslag op een nucleaire installatie*

Bij het ontwerp van nucleaire installaties wordt bij het analyseren van ongevallen rekening gehouden met terroristische aanslagen. Op basis van ongevalanalyses worden gerichte maatregelen genomen om de gevolgen te beperken. Voor specifieke zaken wordt meestal in internationaal verband samengewerkt. Dit soort analyses heeft bijvoorbeeld geleid tot het voorschrijven van een tweede, 'gescheiden' controlekamer, een locatie van waaruit de reactor kan worden afgeschakeld. De gevolgen van een eventuele terroristische overname van een kerncentrale worden effectief beperkt door de bestaande veiligheidssystemen die bij verkeerde acties van de operator de reactor automatisch afschakelen.

Met betrekking tot de dreiging van terrorisme is de beveiliging tegen een neerstortend vliegtuig van belang. Hierbij is er een verschil tussen bestaande en nieuw te bouwen centrales. Oorspronkelijk zijn kerncentrales niet expliciet ontworpen tegen een vliegtuigongeval. Wel is aangetoond (HSK, 2003) dat voor de Zwitserse centrales het reactorgebouw, in combinatie met de hierin aanwezige zware betonnen structuren, het primaire systeem, waaronder het reactorvat en het bassin met de gebruikte splijtstof, beschermt tegen een neerstortend vliegtuig (Boeing 707). Voor nieuw te bouwen centrales worden expliciete ontwerpvoorschriften gesteld aan de bestendigheid

tegen een aanslag met een verkeersvliegtuig. De Amerikaanse regelgever NRC heeft hiervoor onlangs voorstellen gedaan (NRC, 2007).

In opwerkingsfabrieken is een grote hoeveelheid radioactieve stoffen aanwezig. Deze bevinden zich deels in een vaste en deels in een vloeibare toestand en zijn verdeeld over diverse systemen. Daardoor zal bij een brand of explosie, die het resultaat is van een aanslag, in eerste instantie slechts een deel van het materiaal betrokken zijn. Analyses van de gevolgen van dergelijke gebeurtenissen maken onderdeel uit van de veiligheidsanalyses. De noodzakelijke afscherming van de diverse installatiedelen die nodig is in verband met stralingsbescherming en de gebouwconstructies, die in zwaar beton zijn uitgevoerd, bieden bescherming tegen aanslagen van buiten.

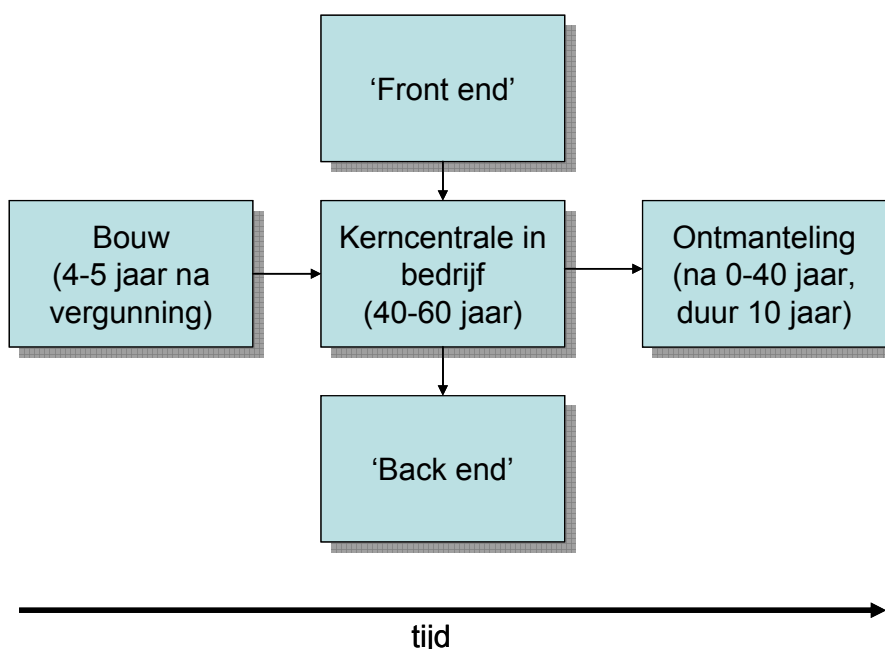
#### *Aanslagen op transporten*

Terroristische aanslagen kunnen zich ook richten op transporten van nucleair materiaal met het doel radioactieve stoffen te laten ontsnappen en daarmee de omgeving te besmetten. Om transporten van nucleair materiaal tegen dergelijke aanslagen te beschermen zijn twee soorten maatregelen getroffen: (1) de beveiliging van het transport om diefstal van nucleair materiaal te voorkomen, zoals in de vorige paragraaf is beschreven, dient ook ter beveiliging tegen aanslagen en (2) voor de transportcontainers gelden dezelfde technische en organisatorische veiligheidsmaatregelen die ook voor andere onderdelen van de splijtstofcyclus worden toegepast (zie Paragraaf 2.5). De transportcontainers zijn massieve, tonnen wegende objecten, die zodanig ontworpen zijn, dat zij ook onder een groot aantal extreme omstandigheden niet zullen falen.

### 3. Milieueffecten

Het toepassen van kernenergie gaat gepaard met belasting van het milieu. Dit geldt ook voor andere elektriciteitsproductietechnieken en, meer in het algemeen, voor industriële processen. Kernenergie onderscheidt zich van elektriciteitscentrales die fossiele brandstoffen gebruiken, doordat tijdens de elektriciteitsproductie nagenoeg geen emissies naar de lucht plaatsvinden, zoals die van broeikasgassen en verzurende stoffen. Daar staat tegenover dat toepassing van kernenergie gepaard gaat met de vorming van radioactieve stoffen, waaronder een deel niet recyclebaar hoogradioactief afval.

Voor een goede beoordeling van de milieueffecten moet de hele levensduur van een kerncentrale worden beschouwd (d.w.z. de bouw van de kerncentrale, het productiebedrijf en de ontmanteling) in combinatie met de splijtstofcyclus (front-end, kerncentrale, back-end; zie ook Figuur 2.1). Dit is in Figuur 3.1 schematisch weergegeven.



Figuur 3.1 *Levensduur kerncentrale en splijtstofcyclus*

Tabel 3.1 toont een overzicht van milieueffecten die onder normale bedrijfsomstandigheden gedurende de levensduur van de kerncentrale en bij de splijtstofcyclus optreden. Met een arcering is aangeven waar en wanneer milieueffecten optreden. Het gaat daarbij alleen om een milieubelasting die ‘niet verwaarloosbaar’ is of ‘boven een drempelwaarde uitkomt’.

De milieueffecten worden nader besproken in de navolgende paragrafen. Paragraaf 3.1 gaat in op ioniserende straling, emissies van radioactieve stoffen en radioactief afval. In Paragraaf 3.2 worden op basis van levensduuranalyses (*Life-Cycle Assessments*, LCA's) de emissies van kooldioxide besproken. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt met andere elektriciteitsproductietechnieken. In dit hoofdstuk wordt niet nader ingegaan op emissies van verzurende stoffen en fijn stof. Dit soort emissies vinden vooral plaats bij gebruik van fossiele brandstoffen en spelen geen significante rol bij de toepassing van kernenergie. Het gebruik van de uraniumgrondstof is in Paragrafen 2.2.1 besproken. Andere grondstoffen worden niet nader beschouwd. Ook wordt niet verder ingegaan op lozing van koelwater van kerncentrales op het oppervlaktewater. In vergelijking met andere thermische centrales, zoals kolen- en gascentrales, gebruiken huidige kerncentrales meer koelwater (circa 30 tot 40% meer).

Tabel 3.1 *Beschouwde milieueffecten gedurende de verschillende fasen in de levenscyclus en splijtstofcyclus onder normale bedrijfsomstandigheden*

Milieueffect	Bouw	Front-end	Bedrijven	Back-end	Ontmanteling
<i>1. Straling en radioactieve stoffen</i>					
Naar lucht					
Naar water					
Radioactief afval					
<i>2. Broeikasgassen en overige emissies naar de lucht</i>					
Kooldioxide (CO <sub>2</sub> )					
Stikstofoxiden (NO <sub>x</sub> )					
Zwavel dioxide (SO <sub>2</sub> )					
Fijn stof					
Krypton					
<i>3. Overige milieuaspecten</i>					
Warmtelozingen					
Overig afval					
Gebruik grondstoffen					

### 3.1 Straling en radioactieve stoffen

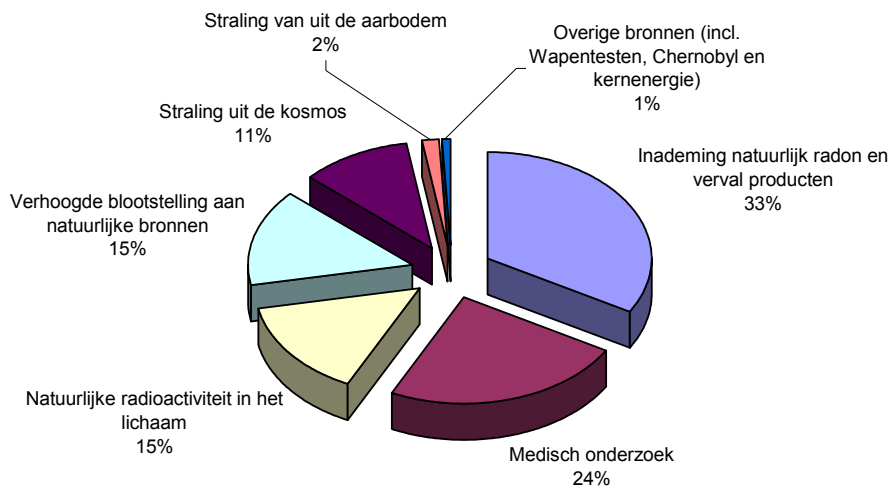
Bij kernenergie wordt zoveel mogelijk voorkomen dat het leefmilieu wordt blootgesteld aan straling en radioactieve stoffen. Desondanks zal bij het toepassen van kernenergie sprake zijn van enige blootstelling. De straling en emissies van radioactieve stoffen van de splijtstofcyclus kunnen worden vergeleken met de hoeveelheid straling waaraan de bevolking wordt blootgesteld uit andere kunstmatige en natuurlijke processen. De totale blootstelling aan straling varieert van 1000 tot 10.000 microsievvert per jaar, ondermeer afhankelijk van de woonplaats. Uit nationale en internationale studies (RIVM, 2002; UNSCEAR, 2000) blijkt dat de bijdrage van de straling als gevolg van kernenergie aan de totale stralingsbelasting van de bevolking momenteel minder dan 1% bedraagt.

De hoeveelheid ioniserende straling waaraan een Nederlander gemiddeld wordt blootgesteld bedraagt 2500 microsievvert per jaar. De verdeling van de stralingsbelasting voor de Nederlandse bevolking, verdeeld naar oorsprong van de straling en emissies, is weergegeven in Figuur 3.2. Uit de figuur blijkt dat emissie van het radioactieve gas radon uit de bodem (33%) en blootstelling aan straling bij medisch onderzoek (24%) de belangrijkste bronnen van ioniserende straling zijn. Kernenergie zit in de post 'overige bronnen'. Andere bronnen in deze categorie zijn onder meer fall out van militaire activiteit (wapentesten), radioactieve stoffen die verspreid zijn bij het ongeval in Tjernobyl en diverse industriële bijdragen. De 'overige bronnen' leveren samen een bijdrage van 1% van de jaarlijkse blootstelling. Onder 'verhoogde blootstelling aan natuurlijke bronnen' wordt verstaan: door menselijk handelen verhoogde blootstelling aan natuurlijke bronnen, zoals gebruik van bepaalde bouwmaterialen of het maken van een vliegtuig.

Gezondheidseffecten van straling zijn in twee categorieën te onderscheiden: directe effecten en kansgebonden effecten. Directe effecten treden niet op onder 200.000 microsievvert. Kansgebonden effecten, zoals leukemie en kanker, hebben geen aantoonbare drempelwaarde. De kans op het optreden hiervan neemt toe met de hoogte van de ontvangen stralingsdosis. De overlijdenskans wordt geschat op circa 5% per 1.000.000 microsievvert. Voor de totale Nederlandse bevolking zou dit rekenkundig jaarlijks neerkomen op circa 2000 sterfgevallen door kanker als gevolg van natuurlijke achtergrondstraling (het totaal aantal sterfgevallen door kanker bedraagt in Nederland jaarlijks ruim 37.000). Ter beperking van onnodige stralingsbelasting heeft de overheid strikte normen opgesteld ten aanzien van de maximaal toelaatbare stralingsdosis als gevolg



van nucleaire activiteiten (VROM, 2001). Deze bedragen voor radiologische medewerkers maximaal 20.000 microsievvert per jaar en voor anderen maximaal 1000 microsievvert per jaar.



Figuur 3.2 *Stralingsbelasting van Nederlandse bevolking vanuit diverse bronnen (totaal gemiddeld jaarlijks per persoon 2500 microsievvert)*

De belasting van het milieu door straling en radioactieve stoffen wordt hierna verder besproken aan de hand van de splijtstofcyclus en de levensduur van de kerncentrale. Omdat tijdens de bouw van de kerncentrale nog geen radioactief materiaal aanwezig is, wordt begonnen met de front-end.

### 3.1.1 Mijnbouw en ertsverwerking (front-end)

De milieuaspecten van open uraniumwinning - dagbouw of ondergronds - zijn in grote lijnen vergelijkbaar met die van andere open ertswinning. De betrokken mijnwerkers worden blootgesteld aan radongas en vrijkomend stof, wat een risicofactor voor longkanker vormt. Het grondwater, dat uit de mijn moet worden gepompt om de mijnbouw mogelijk te maken, is van nature verontreinigd met zware metalen, zodat directe lozing daarvan op het oppervlaktewater het milieu zou belasten. Bij de open mijnbouw worden, om bij het uraniumerts te komen, grote hoeveelheden gesteenten verplaatst. Dit restmateriaal kan als vulstof in gravel en cement worden gebruikt voor wegen en spoorlijnen. Het restmateriaal bevat van nature echter relatief hoge concentraties zware metalen, wat tot milieuvervuiling zou kunnen leiden (Kreusch et al., 2006)

De milieubelasting bij winning en verwerking van uranium is afhankelijk van het beheer van de mijn, zowel tijdens exploitatie als na sluiting ervan, en van de *tailings* (restproduct van de ertsverwerking). De belasting van het milieu houdt voornamelijk verband met de radonemissies naar de lucht en emissies van zware metalen naar water en bodem. In principe is het mogelijk door een goede afdichting van de tailingreservoirs deze milieubelasting te minimaliseren tot een niveau van natuurlijke emissies van radon uit de bodem.

De milieubelasting door zware metalen en radon is bij oplossingsmijnbouw lager dan bij open mijnbouw, omdat er geen erts naar het oppervlak wordt gebracht. Het op grote schaal in de bodem brengen van oplosmiddelen (zuur of basisch, afhankelijk van het gesteente) beïnvloedt echter de kwaliteit van de bodem en het grondwater. Na sluiting van zulke mijnen zijn dan ook saneringsprojecten noodzakelijk om de grondwaterkwaliteit weer zoveel mogelijk te herstellen.

Er is steeds meer aandacht voor het verantwoord omgaan met mijnbouw. Dit geldt ook voor de winning van uranium. In het verleden is op verschillende plaatsen in de wereld minder verant-

woord met het mijnafval omgegaan. Zo is het kader van een Europees TACIS-project de situatie rond een oude uraniummijn in Kyrgyzstan onderzocht en vastgesteld dat de opslag van het mijnafval dringend effectief gesaneerd moet worden. (Vanderhove et al., 2006). Veel grote bedrijven die uraniummijnen exploiteren in Australië, Canada en Kazakstan (de drie grootste producenten) beschikken tegenwoordig over een ISO 14001 certificaat, dat aangeeft dat deze bedrijven een controleerbaar milieuzorgsysteem bezitten. In het kader van dit milieuzorgsysteem is er een monitorprogramma waarmee frequent concentraties zware metalen en chemische verbindingen in grondwater worden bepaald, zodat indien nodig tijdig aanvullende maatregelen kunnen worden getroffen. Toepassing van het milieuzorgsysteem wordt regelmatig gecontroleerd. Nederland betreft het voor de kerncentrale Borssele gebruikte uranium uit Kazakstan.

### 3.1.2 Conversie, verrijking en fabricage (front-end)

De stralingsbelasting ten gevolge van conversie, verrijking en fabricage is zeer klein ten opzichte van andere stappen in de splijtstofcyclus (OECD/NEA, 2000), omdat deze processen alleen uranium behandelen, een radioactieve stof die geen sterke stralingsbron vormt. Doordat deze processen in afgesloten installaties plaatsvinden en de ventilatielucht gefilterd wordt zijn de emissies van uranium in de omgeving minimaal.

### 3.1.3 Kerncentrale in productiebedrijf

Tijdens het productiebedrijf van een kerncentrale vormen het kernsplijtingsproces in de reactor en de hierbij gevormde radioactieve stoffen een sterke bron van ioniserende straling binnen de centrale. Deze bron is afgeschermd. Een andere belangrijke bron is het verpakt radioactief afval, dat tijdelijk in of bij de centrale staat opgeslagen in afwachting op vervoer.

De radioactieve stoffen die bij het productiebedrijf van een kerncentrale via de ventilatielucht worden geëmitteerd bestaan vooral uit radioactieve edelgassen. Daarnaast komt er wat tritium en koolstof-14, radioactieve halogenen (jodium-131) en enkele radioactieve activeringsproducten in de atmosfeer.

Voor straling en emissies van radioactieve stoffen wordt het ALARA-principe toegepast (As Low As Reasonably Achievable, zo laag als redelijkerwijs mogelijk). Met de toezichthouder wordt afgesproken welke maatregelen redelijkerwijs nodig zijn om de emissies en stralingsniveaus te beperken. Om een indruk te geven van de stralingsbelasting waaraan de omgeving wordt blootgesteld, worden hieronder de hoeveelheden voor de kerncentrale in Borssele gegeven.

De stralingsbelasting waaraan de bevolking wordt blootgesteld in verband met emissies van radioactieve stoffen in de lucht wordt voor de kerncentrale Borssele geschat op minder dan 0,04 microsievert per jaar (minder dan 5% van de maximale hoeveelheid straling die volgens de vergunning toegestaan is). Iemand die permanent aan het hek van deze kerncentrale zou verblijven ontvangt minder dan 10 microsievert per jaar.

Behalve lozing van koelwater wordt tijdens productiebedrijf, na controle op activiteit, geringe hoeveelheden licht besmet water geloosd. Het radioactieve waterstofisotoop tritium geeft de belangrijkste bijdrage aan deze besmetting. Deze jaarlijks geloosde hoeveelheid leidt tot een zeer geringe verhoging van de stralingsbelasting van maximaal 0,002 microsievert per jaar voor iemand die visserijproducten consumeert afkomstig uit dit water en de daarmee verbonden water compartimenten.

### 3.1.4 Opwerking en verglazing (back-end)

De gebruikte splijtstof kan worden gerecycled (opgewerkt), waarbij bruikbare grondstoffen uit de gebruikte splijtstof wordt gehaald en worden teruggevoerd in de splijtstofcyclus. Door de recycling is minder uraniumerts nodig, waardoor de milieueffecten van mijnbouw en ertsverwerking gereduceerd worden.

Van de hele splijtstofcyclus levert opwerking van gebruikte splijtstof de grootste bijdrage aan de mondiale stralingsbelasting (UNSCEAR, 2000). Deze wordt vooral bepaald door emissies van de relatief langlevende splijtingsproducten koolstof-14 en krypton-85 die bij de opwerking van bestraald splijtstof worden geloosd in de lucht. Het relatief langlevend krypton-85 accumuleert en mengt zich snel in de atmosfeer. In (De Jager, 1992) wordt aannemelijk gemaakt dat bij grootschalige inzet van kernenergie en onmiddellijke volledige opwerking van alle dan gebruikte splijtstof, de kryptonconcentratie in de atmosfeer zo zou kunnen toenemen, dat daardoor de gemiddelde atmosferische elektrische weerstand met ongeveer 10% zou kunnen afnemen. Dit maximale effect is in grootte vergelijkbaar met, maar tegengesteld aan de in de eerste helft van de vorige eeuw waargenomen verandering in de gemiddelde atmosferische elektrische weerstand als gevolg van de toegenomen luchtvervuiling. Mocht er dus via dit mechanisme enig effect op het klimaat zijn door toegenomen gemiddelde kryptonconcentraties in de atmosfeer, dan is dat tegengesteld aan het effect van de toegenomen luchtvervuiling via dit mechanisme. Bij een eventueel verdere uitbouw van opwerkingscapaciteit moet er wel rekening mee worden gehouden dat beperkingen aan de emissie van krypton-85 gesteld zouden kunnen worden. Hiervoor zouden dan processen en technieken moeten worden ontwikkeld die de emissie van krypton-85 effectief beperken (Turkenburg, 1996).

Om een indruk te krijgen van de vrijkomende straling en emissies aan radioactieve stoffen bij het opwerkingsproces wordt opnieuw de kerncentrale Borssele als voorbeeld genomen. De gebruikte splijtstof uit de kerncentrale Borssele wordt opgewerkt en het overblijvende afval verglaasd in La Hague in Frankrijk. De ASN (l'Autorité de Sûreté Nucléaire) is de instantie die namens de Franse overheid toeziet op de nucleaire veiligheid en de stralingshygiëne in het land.

De ASN brengt jaarlijks verslag uit van haar bevindingen. In het jaarrapport van de ASN van 2003 wordt melding gemaakt van een limiet uitgedrukt in een effectieve individuele dosis voor de lokale bevolking van 20 microsievert per jaar, die opgenomen is in de vergunning van Cogema - La Hague. In werkelijkheid is de individuele dosis die zogenoemde referentiegroepen aldaar van de fabrieken ontvangen, niet hoger dan 8 microsievert per jaar (ASN, 2003). Dit is circa 0,3% van de totale jaardosis (uit natuurlijke en medische bronnen), die ter plekke circa 2500 microsievert bedraagt. Een referentiegroep is gedefinieerd als een groep die representatief is voor de mensen die de hoogste stralingsdosis zullen ontvangen van een bepaalde bron, in dit geval de installatie van Cogema - La Hague.

Ook het Verenigd Koninkrijk beschikt over opwerkingscapaciteit. De opwerkingsinstallatie in Sellafield is sinds 2005 buiten gebruik na een lekkage binnen een cel (zonder emissie naar het milieu).

De bijdrage van opwerking van gebruikte splijtstof aan de stralingsbelasting waaraan de bevolking in het OSPAR-gebied (Noord-Oostelijke Atlantische Oceaan) is blootgesteld, is gering in vergelijking met de totale bijdrage van industriële activiteiten in dit gebied en de bijdrage uit natuurlijke bronnen (MARINA II, 2002).

### 3.1.5 Eindberging (back-end)

Omdat hoogradioactief gebruikte splijtstof een paar honderdduizend jaar ioniserende straling produceert moet het in een eindberging volledig van de leefomgeving worden afgesloten. De opslag moet bestand zijn tegen natuurrampen, zoals overstromingen en aardbevingen, maar ook

beveiligd worden tegen misbruik van het nucleaire materiaal (zie ook Paragraaf 2.6). In Nederland is ervoor gekozen (zie Paragraaf 6.4) om het radioactief afval zo op te bergen dat dit ook weer uit de berging kan worden teruggehaald, bijvoorbeeld om de mogelijkheid tot nieuwe (betere) oplossingen voor de verwerking en opslag van dit afval open te houden.

In het CORA-programma (CORA, 2001) is onderzoek gedaan naar de eindberging van alle soorten radioactief afval. In die studie is er van uitgegaan dat alle gebruikte splijtstof wordt opwerkt, en het verglaasde afval van dit proces moet worden opgeborgen. In dit programma is gerapporteerd over de veiligheidsanalyse van diverse opbergconcepten in diep gelegen zout- of kleilagen. Al deze concepten gaan uit van meerdere barrières tussen afval en de leefomgeving van de mens. Deze barrières zorgen ervoor dat radioactieve stoffen, mochten zij vrij komen uit hun verpakking, op weg naar de biosfeer tegengehouden, vertraagd en verdund worden. Hierdoor zal het zeer lang duren (honderdduizenden tot miljoenen jaren) voordat deze stoffen in de biosfeer terecht komen. Dan zullen deze stoffen zijn vervallen en geen bijdrage aan de stralingsbelasting geven.

In de CORA-analyses zijn scenario's verondersteld waarbij de natuurlijke processen verstoord worden, bijvoorbeeld door onderlopen van een opbergmijn met grondwater. De maximale stralingsdosis voor de bevolking wordt in een dergelijk scenario volgens de analyses honderdduizend jaar of later na de veronderstelde verstoringen bereikt. De hoeveelheid straling is op dat moment minder dan 1% van de bijdrage van de natuurlijke achtergrondstraling, d.w.z. minder dan 1% van 2500 microsievert per jaar. De variatie in de stralingsbelasting wordt daarbij vooral bepaald door lokale omstandigheden. De CORA-studie is gebaseerd op beperkte gegevens omdat geen locatiespecifiek onderzoek kon worden uitgevoerd. Daardoor zijn onzekerheden blijven bestaan en is nader onderzoek nodig voordat een definitieve keuze voor eindberging in Nederland kan worden gemaakt. Het alternatief voor de opwerkingsroute, het direct opslaan van de gebruikte splijtstof, is voor de Nederlandse situatie niet onderzocht.

In Paragraaf 2.4.2 is de *partitioning and transmutation* (P&T) methode besproken, waarnaar sinds een aantal jaren onderzoek wordt gedaan. Deze technologie beoogt de levensduur van het radioactieve afval terug te brengen van honderdduizenden jaren tot duizend of zelfs enkele honderden jaren, d.w.z. het verkleinen van de periode die radioactieve elementen nodig hebben om te vervallen tot een niveau waarbij de radiotoxiciteit vergelijkbaar is met die van natuurlijk uranium. Het proces is nog in de onderzoeksfase en het zal nog geruime tijd duren voordat de technologie op industriële schaal kan worden toegepast. Tengevolge van transmutatie neemt de radiotoxiciteit en de externe stralingsbelasting van het afval aanvankelijk toe. Na enkele honderden jaren wordt die weer kleiner in vergelijking met radioactief afval dat deze behandeling niet ondergaat. Bij geologische berging van het afval is deze vermindering in radiotoxiciteit vooral van belang bij de zogenoemde *human intrusion* scenario's, waarbij mensen zich - bijvoorbeeld bij exploratieonderzoek - onvermoed toegang tot het afval verschaffen en daarbij direct daarmee in contact komen.

### 3.1.6 Ontmanteling

Tijdens productiebedrijf van de kernreactor zullen materialen, zoals reactorvat, biologisch schild etc. geactiveerd raken. Deze radioactiviteit is gefixeerd in het materiaal. Andere stoffen zoals het koelmiddel en de daarin aanwezige verontreinigen worden ook radioactief. De hierbij gevormde radioactieve stoffen zullen zich gedeeltelijk verspreiden in systemen zoals ventilatiekanalen en koelwaterleidingen. Door verval zal de activiteit van de gevormde radioactieve stoffen geleidelijk weer afnemen.

Voor het ontmantelen van de kerncentrale na gebruik zijn er twee opties mogelijk:

1. *Directe ontmanteling*: Bij directe ontmanteling (ook wel snelle volledige ontmanteling genoemd) wordt het ontmantelingproces zo snel mogelijk doorlopen. Na het definitief beëindigen

gen van de elektriciteitsproductie, worden de splijtstofelementen uit het reactorvat verwijderd en, na een afkoelperiode, gereedgemaakt voor afvoer. Het bedrijfsafval wordt verwijderd en uit bedrijf genomen systemen worden grotendeels gedecontamineerd (ontdaan van radioactieve stoffen). Daarna worden systemen grondiger gereinigd en gedemonteerd. Het afval wordt geclassificeerd, geconditioneerd en verpakt en afgevoerd. Dit concept is gevolgd bij onder andere de Duitse Greifswald centrale.

2. *Uitgestelde ontmanteling*: Bij de optie uitgestelde ontmanteling worden na verwijdering van het bedrijfsafval de gebouwen en resterende installaties waar nodig gedecontamineerd en geschikt gemaakt voor een wachtperiode van enkele tientallen jaren. Na de wachtperiode worden de resterende systemen verder ontmanteld. Dit concept wordt toegepast bij onder andere de Nederlandse centrale in Dodewaard om financieel economische redenen.

Door een periode van enkele jaren te nemen tussen het einde van de bedrijfsvoering en het begin van de feitelijke ontmanteling zal de stralingsbelasting van de medewerkers gereduceerd worden omdat een deel van de radioactiviteit vervallen is. Bij ontmanteling na een wachtperiode van 40 jaar is de stralingsbelasting van de medewerkers nog circa 2/3 van de stralingsbelasting bij directe ontmanteling. Het is dan nog steeds niet mogelijk om alle werkzaamheden zonder op afstand bestuurd gereedschap uit te voeren, zie (NEA/RWM, 2005).

Uit andere studies blijkt dat bij directe ontmanteling zowel de hoeveelheid afval als de dosisbelasting voor de medewerkers lager zijn dan bij uitgestelde ontmanteling (IAEA, 2005). Eén van de redenen hiervoor is dat er bij directe ontmanteling mensen ingezet worden die de installatie goed kennen. Deze medewerkers kunnen daardoor efficiënter werken waardoor de tijd die moet worden doorgebracht in een stralingsveld kleiner wordt. Ook zijn ze goed op de hoogte op welke plekken ze een hoge stralingsintensiteit kunnen verwachten.

Het uitstellen van de ontmanteling met enkele tientallen jaren heeft slechts een beperkte invloed op de hoeveelheid radioactief afval. Hoewel een deel van de radioactiviteit door verval verdwenen is, blijven de concentraties langer levende radioactieve stoffen op een dusdanig niveau, dat slechts een beperkte hoeveelheid radioactief afval onder de vrijgave normen komt.

Tijdens ontmanteling worden emissies en straling op dezelfde wijze gecontroleerd als tijdens het bedrijf van de reactor. Bij de ontmanteling ontstaat voornamelijk laag- en middelradioactief afval. Dit afval wordt op dezelfde wijze verwerkt als het laag- en middel radioactief afval dat bij het bedrijven van de kerncentrale ontstaat.

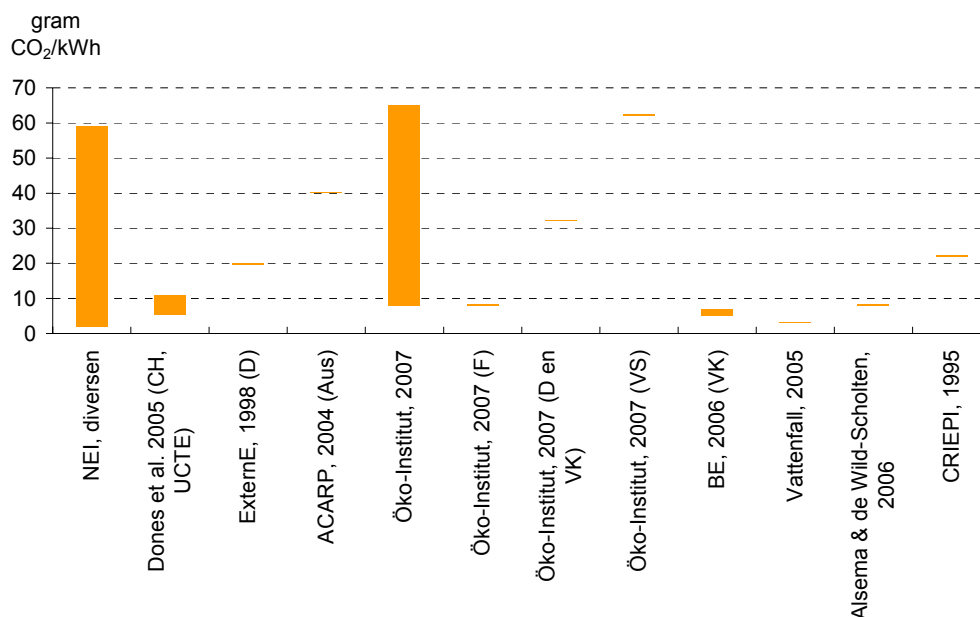
## 3.2 CO<sub>2</sub>-emissies

Het belangrijkste broeikasgas is kooldioxide dat bij de energievoorziening voornamelijk vrijkomt bij verbranding van fossiele brandstoffen. Met de elektriciteitsproductie door een kerncentrale zijn geen of te verwaarlozen CO<sub>2</sub>-emissies gemoeid, d.w.z. dat zij in een milieujarverslag 'onder drempelwaarde' blijven (EPZ, 2005). In de levenscyclus van een kerncentrale komen CO<sub>2</sub>-emissies vrij als gevolg van het energiegebruik in verschillende processen van de splijtstofcyclus en bij de bouw en ontmanteling van de kerncentrale. Inzicht in de CO<sub>2</sub>-emissies voor de gehele levenscyclus van een kerncentrale kan worden verkregen met behulp van Life-Cycle Assessments (LCA's). Er zijn meerdere recente LCA-studies en gegevensbestanden beschikbaar die informatie geven over CO<sub>2</sub>-emissies van de levenscyclus van kernenergie, zoals de EU Externe studie (EU, 2003, 2005), de Ecoinvent database (Dones et al., 2005; Alsema & de Wild-Scholten, 2006), (Öko-Institut, 2006; 2007).

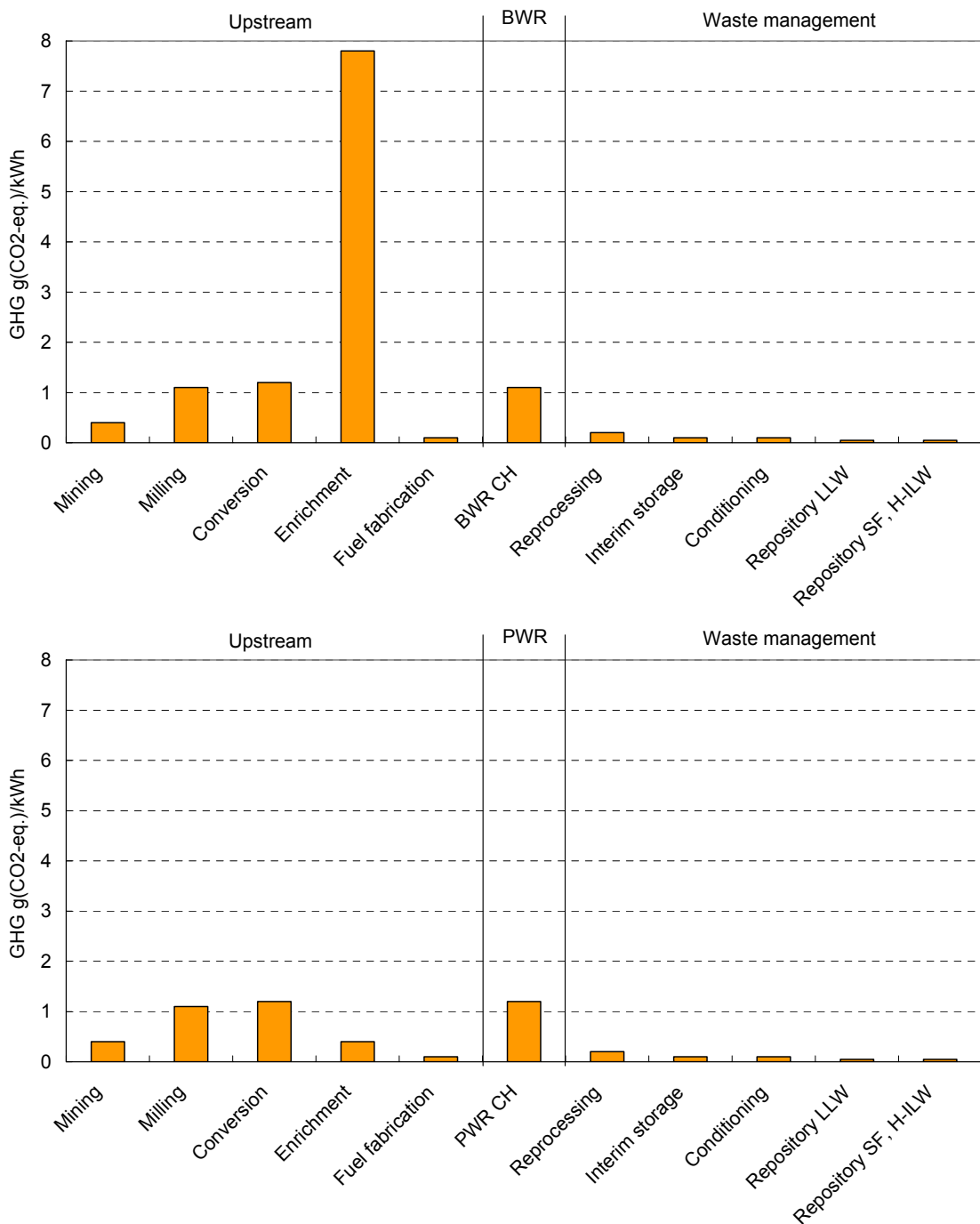
De CO<sub>2</sub>-emissies die in LCA-studies worden gerapporteerd zijn sterk afhankelijk van de gemaakte veronderstellingen. Verschillen kunnen ontstaan door andere uitgangspunten bij de analyses, soms methodologisch van aard, soms door specifieke en lokale verschillen. Figuur 3.3 toont de resultaten van de beschouwde LCA-studies. Studies die betrekking hebben op kerncen-

trales in Europa rapporteren in bijna alle gevallen waarden van 10 g CO<sub>2</sub>/kWh of lager. Hogere waarden worden gerapporteerd voor kerncentrales die in landen staan waar kolen een substantieel deel uitmaken van de energiemix. Zo geeft de LCA-studie van het Öko-Institut (Öko-Institut, 2007) aan dat de CO<sub>2</sub>-emissies voor een levenscyclus van een Franse kerncentrale 8 gram per kWh is, terwijl die voor een Russische of Amerikaanse kerncentrale meer dan 60 gram per kWh bedraagt. Vanwege deze verschillen worden de resultaten van LCA-studies die zijn gebaseerd op verschillende kerncentrales en verschillende landen in de vorm van een bandbreedte weergegeven.

De meeste LCA-studies geven een waarde voor de CO<sub>2</sub>-emissies van de hele levenscyclus en geen onderverdeling over de verschillende fasen van de levenscyclus of de splijtstofcyclus. Eén van de uitzonderingen is de studie van Dones (Dones et al., 2005), zie Figuur 3.4. Verschillen tussen CO<sub>2</sub>-emissies over de levenscyclus van verschillende kerncentrales kunnen ondermeer worden verklaard uit verschillende technieken die worden gebruikt voor het verrijgingsproces. Diffusieverrijking kost meer elektrische energie dan verrijking met centrifugetechnologie. Worden voor de elektriciteitsopwekking dan ook nog veel kolen ingezet, zoals in de VS het geval is, dan leidt dat tot aanzienlijke hogere CO<sub>2</sub>-emissies. Deze emissies zullen in de toekomst naar beneden gaan als gevolg van vervanging van de diffusieprocessen door centrifugetechnologie. Als uranium op termijn gewonnen gaat worden uit armere ertslagen, zal dit waarschijnlijk een hoger energiegebruik tot gevolg hebben, waardoor de CO<sub>2</sub>-emissies voor mijnbouw en extractie mogelijk kunnen toenemen. Dit is echter mede afhankelijk van de ontwikkelingen in de energievoorziening.



Figuur 3.3 *Emissies van CO<sub>2</sub> voor de levenscyclus van kerncentrales gerapporteerd in verschillende LCA-studies. De Öko-Institut studie geeft voor 5 verschillende landen waarden. Voor de drie EU-landen worden de waarden apart getoond.*

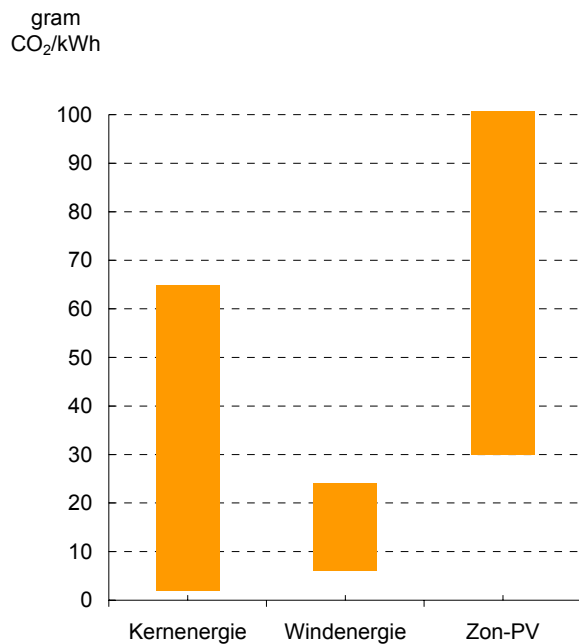


Figuur 3.4 *Levenscyclus emissies van CO<sub>2</sub> van kerncentrales verdeeld over de verschillende fasen van de levensduur*

Bron: Dones et al., 2005

De CO<sub>2</sub>-emissies van een kerncentrale gedurende de levenscyclus zijn per kWh meestal lager of vergelijkbaar met die van elektriciteit uit hernieuwbare bronnen. Ter vergelijking zijn in Figuur 3.5 de CO<sub>2</sub>-emissies over de levenscyclus van kernenergie en die van huidige technieken om windenergie en zonne-energie (PV) te benutten naast elkaar gezet. De relatief grote bandbreedte voor zon-PV hangt vooral samen met de hoeveelheid elektriciteit die, afhankelijk van geografische factoren, geproduceerd wordt gedurende de levensduur van de zonnepanelen. Het is de verwachting dat door verdere technologieontwikkeling deze emissies nog substantieel zullen dalen. In de beschouwde LCA-studies variëren de CO<sub>2</sub>-emissies over de levenscyclus van ko-

lencentrales zonder CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag tussen 815 en 1153 gram per kWh en voor gascentrales tussen 362 en 622 gram per kWh.



Figuur 3.5 *Levenscyclus emissies van CO<sub>2</sub> van kerncentrales vergeleken met huidige technieken om windenergie en zonne-energie (PV) te benutten. De bandbreedte voor kernenergie is gebaseerd op alle bronnen zoals in Figuur 4.3 aangegeven. De bronnen voor de bandbreedte voor windenergie en zon-PV zijn: EU, 2003; Vattenfall, 2005; Alsema & de Wild-Scholten, 2006; Öko-Institut, 2007, waarbij de laatste bron de hoogste waarden aangeeft (24 en 101 g CO<sub>2</sub>/kWh voor resp. windenergie en zon-PV).*



## 4. Elektriciteitsmarkt

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de markt waarin de elektriciteitsproductie plaatsvindt. Sinds het einde van de jaren negentig van de vorige eeuw zijn de nationale elektriciteitsmarkten in Europa geliberaliseerd. Dat geldt ook voor de Nederlandse elektriciteitsmarkt. Hoe de geliberaliseerde elektriciteitsmarkt functioneert en hoe elektriciteitsprijzen daarin tot stand komen wordt in Paragraaf 4.1 uitgelegd. Daarna wordt in Paragraaf 4.2 ingegaan op mededingingsaspecten. De concurrentie van kernenergie met andere technologieën waarmee elektriciteit wordt geproduceerd komt in Paragraaf 4.3 aan de orde. In deze paragraaf wordt ook ingegaan op technologieontwikkelingen en marktontwikkelingen op de langere termijn, waaronder de integratie van de Nederlandse elektriciteitsmarkt met die van de ons omringende landen. Daarna wordt in dit hoofdstuk ingegaan op een aantal toetredingsaspecten in de elektriciteitsmarkt. Paragraaf 4.4 bespreekt de inpassing van kernenergie in de Nederlandse elektriciteitsvoorziening en in Paragraaf 4.5 wordt een overzicht gegeven van verschillende factoren die van belang zijn voor een elektriciteitsproducent die een kerncentrale wil bouwen.

### 4.1 Liberalisering van de elektriciteitsmarkt

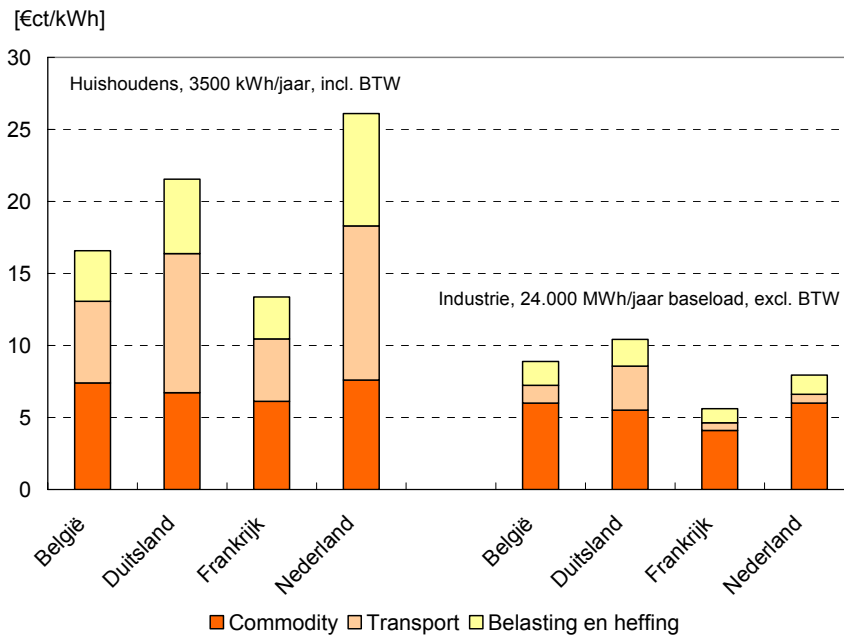
Met liberalisering van de elektriciteitsmarkt is eind jaren negentig concurrentie geïntroduceerd tussen de al bestaande elektriciteitsproducenten onderling en tussen de bestaande producenten en nieuwkomers in de markt. Deze concurrentie geldt voor producenten in Nederland, maar ook voor Nederlandse producenten met die uit het buitenland. Daarnaast is sprake van concurrentie tussen traditionele grootschalige productie en decentrale productie (warmtekrachtinstallaties) en elektriciteitsproductie uit hernieuwbare bronnen (bijvoorbeeld windenergie). Warmtekrachtinstallaties en hernieuwbare elektriciteitsproductie worden door de Nederlandse overheid ondersteund met een productiesubsidie (MEP) omdat deze technologieën milieuvriendeliker hebben in vergelijking met conventionele elektriciteitsproductie.

Verschillen in samenstelling van de elektriciteitsproductieparken in Nederland met die in de ons omringende landen (Duitsland, België, Frankrijk) leiden tot prijsverschillen tussen de nationale markten en, in zoverre de capaciteit van de transportnetten tussen de landen dit toelaat, tot import- en export van elektriciteit. De liberalisering van de elektriciteitsmarkten is in de Europese landen niet overal op dezelfde manier ingevuld. Dit bevoordeelt sommige producenten ten opzichte van hun concurrenten (AER, 2003). De Europese Commissie streeft naar een verdere integratie van de nationale elektriciteitsmarkten waardoor concurrentieverschillen tussen landen worden verkleind en de uitwisseling van elektriciteit tussen nationale elektriciteitsmarkten economisch efficiënter kan plaatsvinden (EU, 2007).

#### *Elektriciteitsprijs*

De concurrentie op de elektriciteitsmarkt vindt plaats bij productie, handel en levering van elektriciteit en heeft alleen betrekking op de elektrische energie, ook wel de commodity genoemd. Naast de prijs voor deze commodity betalen afnemers een tarief voor het transport van de energie (dit tarief is gereguleerd) en belastingen en heffingen. Figuur 4.1 toont ter illustratie de opbouw van de eindgebruikerprijzen voor huishoudens en industriële afnemers in België, Duitsland, Frankrijk en Nederland. In de praktijk is sprake van een aanzienlijke spreiding in eindgebruikerprijzen en soms worden kortingen bedongen of belastingvrijstelling (bijv. Duitsland) gegeven (SER, 2006). Uit de figuur blijkt dat de eindgebruikerprijzen slechts voor een deel door de commodityprijs wordt bepaald en dat prijsverschillen tussen de landen niet alleen het gevolg zijn van verschillen in de commodityprijzen, maar ook door verschillen tussen transporttarieven en verschillen tussen belastingen en heffingen. De eindgebruikerprijzen voor huishoudens zijn hoger dan voor industriële afnemers, ondermeer door hogere kosten voor het transport over de

distributienetten. Als hierna gesproken wordt over elektriciteitsprijs dan wordt daarmee steeds de prijs bedoeld voor de commodity, d.w.z. de prijs voor elektrische energie.



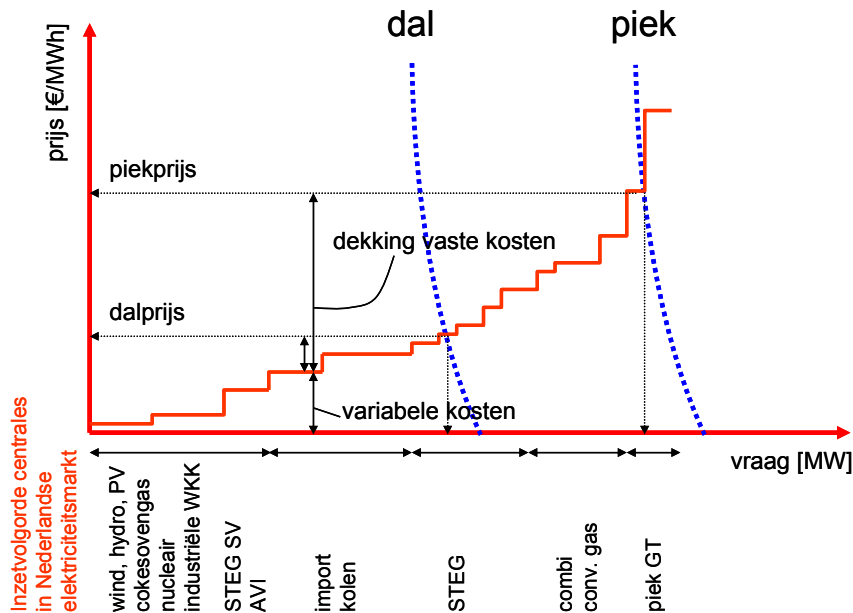
Figuur 4.1 *Opbouw van de elektriciteitsprijs (indicatief) voor België, Duitsland, Frankrijk en Nederland (eindebruikerprijzen voor 2007 zijn ontleend aan Eurostat; commodityprijzen op basis van gemiddelde prijzen voor jaarcontracten 2007, genoteerd in 2006; voor België zijn de commodityprijzen geschat)*

In de geliberaliseerde elektriciteitsmarkt wordt de elektriciteitsprijs bepaald door de vraag naar en het aanbod van elektriciteit en niet op basis van de gemiddelde productiekosten (cost-plus), zoals dat vóór de liberalisering het geval was. Het principe waarop de elektriciteitsmarktprijs tot stand komt wordt in Figuur 4.2 getoond. Hierin wordt op de horizontale as de elektriciteitsvraag weergegeven en op de verticale as de elektriciteitsprijs. Het elektriciteitsproductieaanbod is gerangschikt in volgorde van de variabele kosten van de installaties (de zogenoemde *merit-order*). De variabele kosten bestaan voornamelijk uit de brandstofkosten en bij fossiele centrales ook uit de kosten voor CO<sub>2</sub>-emissierechten. Hierdoor ontstaat een aanbodcurve voor elektriciteit. De figuur toont twee vraagcurven: één voor de piekperiode en één voor de dalperiode. De elektriciteitsprijs wordt bepaald door het snijpunt van de aanbod- met de vraagcurve. De figuur laat zien dat de marginale centrale in de aanbodcurve de elektriciteitsprijs bepaalt. Al het elektriciteitsproductieaanbod links van deze centrale ontvangt dezelfde elektriciteitsprijs. Deze centrales dekken hun vaste kosten (investeringen e.d.) uit het verschil tussen de elektriciteitsmarktprijs en de eigen variabele kosten (Stoft, 2002).

Een kerncentrale is een basislastcentrale die elektriciteit levert in zowel de dal- als de piekperiode. De opbrengsten voor een basislastcentrale worden bepaald door de gemiddelde elektriciteitsprijs over de tijd (basislastprijs) en het aantal draaiuren van de centrale. Andere basislastcentrales zijn kolencentrales, afvalverbrandingsinstallaties (AVI's), industriële warmtekrachtinstallaties en gascentrales die warmte leveren voor stadsverwarming (STEG SV). Piekcentrales zijn overwegend gascentrales (STEG's, gasturbines). In de dal- en de piekperiode concurreren de basislast- en piekcentrales met centrales uit het buitenland. In Duitsland, Frankrijk en België zijn de variabele kosten van de marginale centrale in dal- en in de piekperiode doorgaans lager dan die in Nederland. In Nederland is de marginale centrale in de dal- en piekperiode een gascentrale. Elektriciteitsproductie uit windenergie heeft nauwelijks variabele kosten en staat geheel links in de aanbodcurve. Het aanbod van windenergie varieert echter sterk. In de dalperiode concurreert windenergie met basislastcentrales en in piekperiode met piekcentrales.

### Elektriciteitsprijs in de praktijk

De elektriciteitsprijs wordt in de praktijk bepaald door de variabele kosten van de marginale centrale die is verhoogd met een mark-up. De mark-up wordt enerzijds bepaald door de mate van mededinging en anderzijds door de schaarste in de markt. Het mededingingsaspect zal in de volgende paragraaf worden besproken. Uitgaande van een markt met voldoende concurrentie zal hier eerst nader worden ingegaan op de totstandkoming van elektriciteitsprijzen in de praktijk.



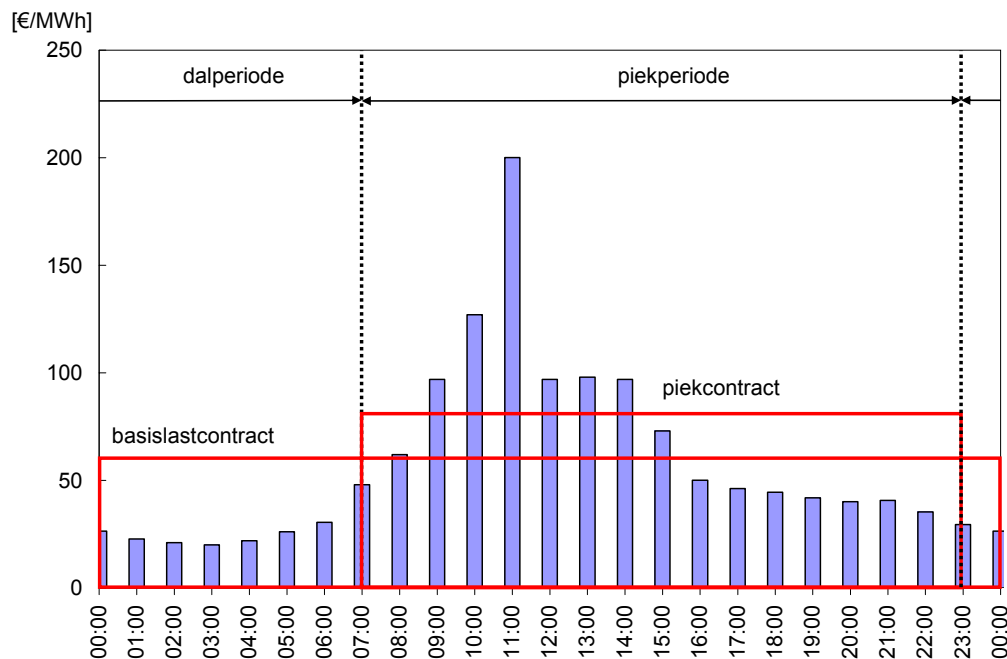
Figuur 4.2 Vraag- en aanbodcurve bepalen de elektriciteitsprijzen

Bij een ruim aanbod van elektriciteitsproductiecapaciteit en bij voldoende mededinging zal deze mark-up relatief gering zijn. De elektriciteitsprijs ligt dan onder de integrale kostprijs (variabele + vaste kosten) van nieuwe centrales en het is niet aantrekkelijk om in een nieuwe centrale te investeren. Bij een toenemende elektriciteitsvraag ontstaat krapte in het stroomaanbod. De elektriciteitsprijs neemt niet alleen toe doordat de marginale elektriciteitsvraag wordt gedekt door een centrale met hogere variabele kosten, maar ook de mark-up zal toenemen. In zo'n situatie wordt deze extra opbrengst ook wel *scarcity rent* genoemd. De hogere elektriciteitsprijs geeft producenten een economische prikkel om de productiecapaciteit uit te breiden. Op dit moment is dat in de Nederlandse elektriciteitsmarkt het geval. Investeren in nieuw productievermogen is aantrekkelijk omdat de prijs boven de integrale kostprijs van nieuwe centrales ligt. Begin 2007 waren er van meerdere partijen initiatieven bekend voor nieuwbouw van centrales in Nederland. In totaal gaat het om 12 nieuwbouwplannen met een gezamenlijk vermogen van circa 10.500 MW (Seebregts, 2007). Dit is bijna gelijk aan de helft van het in Nederland opgestelde productievermogen in 2005 (21.800 MW).

### Prijzen van elektriciteitscontracten

Op een spotmarkt, zoals voor Nederland de day-ahead markt van de APX, wordt elektriciteit per uur verhandeld. Op de APX is dat ongeveer 5% van het elektriciteitsvolume. De meeste elektriciteit wordt direct tussen marktpartijen verhandeld (bilateraal) of via standaard contracten (over the counter; OTC). Deze elektriciteitscontracten worden gebaseerd op de gemiddelde prijs over een aantal uren per dag. Figuur 4.3 laat schematisch de relatie zien tussen de prijzen in de dal- en piekuren en de prijzen van basislastcontracten (de gemiddelde prijs over alle uren) en piekcontracten (de gemiddelde prijs tussen 7 uur en 23 uur op weekdays, exclusief feestdagen). De meeste elektriciteit wordt verhandeld in termijncontracten (maand-, kwartaal- en jaarcontracten). Het meest gangbare termijncontract is een jaarcontract voor het komende kalenderjaar. De prijzen voor basislast- en piekcontracten voor 2007 zoals die gemiddeld in 2006 voor de Neder-

landse en Duitse elektriciteitsmarkt werden genoteerd, staan weergegeven in Tabel 4.1. Dit waren de hoogste gemiddelde prijzen voor jaarcontracten sinds de elektriciteitsmarkten zijn geliberaliseerd.



Figuur 4.3 *Electriciteitsprijzen op de spotmarkt (indicatief, APX 15-5-2007) en electriciteitscontracten*

Hoewel de contractprijzen in Duitsland lager zijn dan in Nederland, is dit niet altijd het geval voor de uurprijzen. Dit geldt vooral voor de prijzen in de daluren. Om die reden is het soms aantrekkelijk stroom vanuit Nederland naar Duitsland te exporteren. Sinds eind vorig jaar is de Nederlandse elektriciteitsmarkt gekoppeld met de Belgische en Franse elektriciteitsmarkt. Dit houdt in dat op de spotmarkt de marktprijzen van de verschillende landen aan elkaar gelijk zijn, zolang er voldoende capaciteit beschikbaar is op de landgrensoverschrijdende verbindingen. De marktkoppeling bevordert de economische efficiënte prijsvorming tussen de markten. Er bestaan plannen om een vergelijkbare marktkoppeling tussen de Nederlandse en Duitse markt tot stand te brengen. Wanneer de prijzen op de spotmarkt voor een deel van de tijd aan elkaar gelijk zijn, zal dit ook doorwerken in de prijzen van de termijncontracten. Hierdoor kunnen de prijsverschillen voor basislastcontracten in Nederland en Duitsland kleiner worden.

Producenten kunnen in het algemeen tot drie jaar vooruit jaarcontracten afsluiten. De meeste nieuwbouwcentrales zullen pas in 2009 of later in exploitatie worden genomen. Hierdoor hebben producenten weinig zekerheid over de elektriciteitsprijs voor de gehele exploitatieperiode van de centrale. Op de Duitse elektriciteitsmarkt worden voor basislastvermogen overigens contracten voor langere periode afgesloten (tot tien jaar vooruit).

Tabel 4.1 *Jaarcontractprijzen voor 2007, genoteerd in 2006*

	Minimumprijs [€/MWh]	Gemiddelde prijs [€/MWh]	Maximumprijs [€/MWh]
Nederland			
– Piekcontract	83,70	94,10	108,71
– Basislastcontract	56,50	65,90	74,05
Duitsland			
– Piekcontract	69,50	81,02	87,54
– Basislastcontract	47,51	55,11	60,35

Bron: EEX, 2007; ENDEX, 2007.

### *Prijrisico's*

Het *prijrisico* is een belangrijk risico dat elektriciteitsproducenten in de huidige elektriciteitsmarkt lopen en dat zij niet zonder meer kunnen afwentelen op de afnemers, zoals dat vóór de liberalisering wel gebeurde. Het is heel goed mogelijk dat de elektriciteitsprijzen over enkele jaren gaan dalen als gevolg van een sterke toename van het productievermogen. Er is dan sprake van een *boom and bust cycle*, die ook in andere kapitaalsintensieve productmarkten niet ongebruikelijk is (AER, 2003; Boston Consulting Group, 2003). Hierdoor loopt de elektriciteitsproducenten het risico van afnemende opbrengsten.

Een ander prijrisico wordt gevormd door de brandstofprijs, bijvoorbeeld de prijs van aardgas. Omdat de brandstofkosten tot de variabele kosten behoren, beïnvloedt de brandstofprijs de aanbodcurve. Veranderingen in de brandstofprijs voor de marginale centrale vertalen zich direct in de elektriciteitsmarktprijs. Voor producenten is dan ook vooral het verschil tussen de brandstofprijs en de marktprijs van belang, omdat daaruit de kapitaalslasten moeten worden gedekt. Voor gascentrales spreekt men over de *spark spread* en bij kolencentrales over de *dark spread*.

De prijs van CO<sub>2</sub>-emissierechten behoort eveneens tot de variabele kosten, ongeacht of de rechten gratis of via een veiling zijn verkregen. De rechten zijn immers verhandelbaar op de emissiehandelmarkt. De kosten voor CO<sub>2</sub>-emissierechten kunnen worden beschouwd als opportuniteitskosten. De elektriciteitsprijs wordt door de CO<sub>2</sub>-prijs beïnvloed in de mate waarin er voor de marginale centrale CO<sub>2</sub>-emissierechten nodig zijn (Sijm et al., 2005, 2006). Sterk volatiele CO<sub>2</sub>-prijzen dragen bij aan het prijrisico.

### *Prijrisico's en kernenergie*

De brandstofkosten voor een kerncentrale zijn veel lager dan die van fossiele centrales en kerncentrales hebben geen CO<sub>2</sub>-emissierechten nodig. Zolang het aandeel kernenergie relatief klein is in verhouding tot de benodigde basislastcapaciteit, en de marktprijs wordt bepaald door centrales met hogere variabele kosten, zal kernenergie geen invloed op de elektriciteitsprijs hebben. Een kerncentrale is dan een *price taker* (Oxera, 2005). Wel zal een kerncentrale de effecten van veranderingen van fossiele brandstoffen en CO<sub>2</sub>-prijs merken via de doorwerking in de elektriciteitsprijs. Het voordeel dat een kerncentrale geniet bij hogere elektriciteitsprijzen als gevolg van toename van de prijs van fossiele brandstoffen en/of CO<sub>2</sub>-prijs blijft dan bij de exploitant van de kerncentrale en komt niet bij de afnemers terecht.

Onder invloed van overheidsbeleid en technologische ontwikkeling kan de samenstelling van het elektriciteitsproductiepark op de langere termijn veranderen (zie ook Hoofdstuk 9). Ten opzichte van de huidige samenstelling van het Nederlandse elektriciteitspark gaat het daarbij vooral om toename van wind- en zonne-energie, introductie van fossiele centrales met CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag (met eventuele bijstook van biomassa), en uitbreiding van (kleinschalige) warmtekrachtinstallaties. Wijziging van het productiepark heeft invloed op de marktprijs, omdat de centrale die de marginale elektriciteit opwekt, zich kan wijzigen. De variabele kosten van fossiele centrales met CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag en warmtekrachtinstallaties zullen naar verwachting hoger blijven dan die van kerncentrales, waardoor een kerncentrale *price taker* blijft. Wind- en

zonne-energie hebben geen variabele kosten van betekenis en zullen daardoor altijd worden ingezet, mits de energiebron (wind, zon) beschikbaar is. Vooral windenergie kan hierdoor in de daluren in concurrentie komen met kernenergie. Hierop zal in Paragraaf 4.3 verder worden ingegaan.

### *Termijncontracten*

Prijrisico's kunnen worden afgedekt met (lange) termijncontracten. Met lange termijncontracten (looptijd 10 à 15 jaar) beperkt de producent het investeringsrisico dat ontstaat bij toekomstige lage elektriciteitsprijzen. Industriële afnemers kunnen zich ermee indekken tegen het risico van toekomstige hoge elektriciteitsprijzen die niet kunnen worden doorberekend in de productprijs. Bij het afsluiten van een termijncontract is niet precies bekend wat de toekomstige elektriciteitsprijs zal zijn. Hoewel een termijncontract zekerheid biedt voor beide contractpartijen nemen zij ook beide een prijsrisico. De werkelijke marktprijs kan immers in de toekomst hoger of lager zijn dan de prijs van het termijncontract. Met termijncontracten wordt het prijsrisico in feite verdeeld tussen producent en de afnemer. Het belang voor de producent is daarbij duidelijk. Hij moet een investeringsbeslissing nemen - en die is bij kernenergie aanzienlijk - op het moment dat hij geen zekerheid heeft over de toekomstige inkomsten. Voor de (industriële) afnemer is dit voordeel onduidelijker. De afnemer is niet gedwongen om de elektriciteit lang van te voren in te kopen, maar kan dat ook doen op het moment dat hij die nodig heeft. Sluit hij wel een termijncontract af dan loopt hij een risico dat de werkelijke marktprijs, tegen de tijd dat de elektriciteit wordt geleverd, onder die contractprijs ligt. Met andere woorden de afnemer kan zich met een termijncontract indekken tegen hogere prijzen, maar tegelijkertijd neemt hij een risico ten aanzien van lagere prijzen. Of een termijncontract voor een afnemer aantrekkelijk is hangt helemaal af van de verwachting die er bestaat over de toekomstige elektriciteitsprijs en de onderhandeling met de producent (die juist belang heeft bij een hoge contractprijs). De voor- en nadelen van lange termijn contracten gelden niet alleen voor kernenergie maar ook voor andere vormen van elektriciteitsopwekking. In de huidige elektriciteitsmarkt komen lange termijn contracten in beperkte mate voor en alleen daar waar producenten relatief hoge investeringen doen en zekerheid nodig hebben over toekomstige inkomsten, zoals bij windenergieprojecten.

Een andere manier waarmee producenten prijsrisico's beheersen is portfoliomanagement. Elektriciteitsproducenten die beschikken over verschillende soorten productiecapaciteit (bijv. basis- en pieklastcentrales of centrales met verschillende energiebronnen) zijn minder kwetsbaar voor fluctuaties van marktprijzen (of beter gezegd fluctuaties van de *spark/dark spread*) dan producenten met slechts één type centrale. Marktrisico's kunnen ook worden verkleind als producenten actief zijn in verschillende regionale markten. Energiebedrijven als EON en Vattenfal exploiteren bijvoorbeeld elektriciteitscentrales in verschillende nationale elektriciteitsmarkten.

### *Andere marktrisico's*

Naast het prijsrisico lopen elektriciteitsproducenten een *volumerisico*. Zij hebben niet zondermeer zekerheid over de afzet van de geproduceerde elektriciteit. Bij een groot aanbod van productievermogen, zoals bij de eerder genoemde *boom and bust cycle*, zal niet al het productievermogen kunnen worden ingezet. Met (lange) termijncontracten kunnen producenten ook het volumerisico afdekken. Een andere mogelijkheid is het integreren van elektriciteitsproductie met energielevering. Vertikaal geïntegreerde energiebedrijven, zoals Nuon en Essent, beperken zo tevens het prijsrisico dat zij lopen bij de inkoop van elektriciteit voor de eindverbruikers.

Als een centrale plotseling uitvalt, dan veroorzaakt een producent onbalans op het elektriciteitsnetwerk. De kosten die de systeembeheerder - in Nederland is dat TenneT - moet maken om de onbalans te compenseren, worden bij de producent in rekening gebracht. Deze kosten kunnen aanzienlijk zijn. Producenten zullen daarom de voorkeur geven aan een betrouwbare technologie. Investeren zij in een nieuwe technologie, dan lopen zij een (extra) *technologisch risico*.

De invloed van de overheid op de elektriciteitsproductie is niet geheel verdwenen. De overheid stelt randvoorwaarden op het vlak van mededinging, bij milieuregeling (waaronder regelge-

ving voor kernenergie) en bij de netinfrastructuur. Verandering in de randvoorwaarden kunnen gevolgen hebben voor de bedrijfseconomische exploitatie van de centrales en vormt daarmee een *reguleringsrisico* voor elektriciteitsproducenten. Beperking of afschaffing van de marktwerking in de elektriciteitsmarkt behoort ook tot het reguleringsrisico dat producenten lopen.

## 4.2 Mededingingsaspecten

Elektriciteitsproducenten zetten hun elektriciteit af op de groothandelsmarkt. De mate van concurrentie op de groothandelsmarkt wordt beïnvloed door het aantal marktpartijen en de marktaandelen van deze marktpartijen. Dit wordt aangeduid met marktconcentratie (zie kader). Op de Nederlandse groothandelsmarkt waren in 2005 zeven grote elektriciteitsproducenten actief (productiepark van minimaal 400 MW) en ongeveer 18 kleinere producenten. Driekwart van het Nederlandse productiepark behoort toe aan vier elektriciteitsproducenten (Nuon, Essent, EON, Electrabel) (DTe, 2006). De marktconcentratie op de groothandelsmarkt verandert door nieuwbouw of sluiting van centrales, door veranderingen in de importcapaciteit en door fusies en bedrijfsovernames. Toename van importcapaciteit (nieuwe verbindingen met Noorwegen, Duitsland en Engeland verhogen de importcapaciteit van 3500 tot 6000 à 7500 MW) zal de mogelijkheid van een marktpartij om de elektriciteitsprijs te beïnvloeden verder verkleinen. In het Visiedocument Concentratie Energiemarkten (NMa, 2006) geeft NMa aan dat de markt voor de productie en groothandel van elektriciteit tijdens piekuren nu nog een nationale markt is. De beschikbare importcapaciteit zal volgens de NMa met tenminste 3000 MW moeten toenemen, wil er sprake zijn van een Noordwest-Europese markt, waarvan ook Duitsland en België deel uitmaken. Ook blijkt uit het document dat tijdens de daluren er een ruimere geografische markt lijkt te zijn, die ten minste Nederland en Duitsland omvat. Hieruit kan worden opgemaakt dat nieuw basislastvermogen concurreert met bestaand basislastvermogen in Nederland en Duitsland.

De bouw van nieuwe centrales, waaronder kerncentrales, heeft invloed op de concurrentieverhouding in de elektriciteitsmarkt, omdat hierdoor het marktaandeel verandert van de producent die de nieuwe centrale exploiteert. De omvang van de geografische markt is hierbij van belang. Een kerncentrale is een relatief grote productie-eenheid. Het marktaandeel van een producent die zijn productiecapaciteit uitbreidt met een kerncentrale kan hierdoor vooral in de piekuren aanzienlijk toenemen, omdat in die periode de markt geografisch beperkter is. Of de concentratiegraad hierdoor verandert, hangt mede af van andere factoren, zoals veranderingen van de productiecapaciteit bij concurrenten, uitbreiding van importcapaciteit en wijzigingen van de brandstof- en CO<sub>2</sub>-prijzen.

Bij fusies en overnames neemt de concentratiegraad toe. Nuon en Essent zijn bijvoorbeeld van plan te fuseren en hebben hiervoor vergunning aangevraagd bij de NMa (situatie juni 2007). Op grond van de Mededingingswetgeving kan de NMa voorwaarden stellen aan partijen die tot een fusie of overname willen overgaan. Deze voorwaarden kunnen betrekking hebben op het afstoten van productiecapaciteit of (tijdelijk) overdragen van de economische eigendom van centrales aan andere marktpartijen (NMa, 2006). Marktpartijen hoeven geen toestemming te krijgen van de NMa wanneer zij een nieuwe centrale bouwen. De NMa zal bij de beoordeling van een fusie of overname wel rekening houden met nieuwbouwplannen die in uitvoering zijn. De Dienst Toezicht Energie (DTe) ziet toe op het functioneren van de elektriciteitsmarkt en kan ingrijpen wanneer marktpartijen misbruik maken van hun marktpositie.

#### ***Indicator voor marktconcentratie***

De mate van mededinging op de groothandelsmarkt voor elektriciteit kan worden gemeten met de Herfindahl-Hirschman Index (HHI). De HHI meet de concentratiegraad. De HHI geeft de som van de gekwadrateerde marktaandelen in procenten weer van elektriciteitsproducenten op de groothandelsmarkt voor elektriciteit. Bij een HHI van 0 is sprake van volledige mededinging en bij 10000 van een monopolie. Bij toename van de HHI is de markt meer geconcentreerd en kan de mogelijkheid ontstaan dat een marktspeler de elektriciteitsprijs significant kan verhogen. De toezichthouder op de elektriciteitsmarkt (DTe) heeft voor 2005 de concentratie op de groothandelsmarkt van elektriciteit op twee manieren gemeten: een (statische) HHI op basis van het maximaal opgesteld vermogen gesommeerd met 400 MW importcapaciteit voor elk van de vijf grootste spelers en een (dynamische) HHI voor ieder uur op basis van de geleverde elektriciteit aan de groothandelsmarkt. DTe berekende een HHI op basis van het opgestelde vermogen in 2005 van 2020, wanneer importcapaciteit niet wordt meegerekend en 1725, wanneer dit wel het geval is. Bij de HHI op basis van elektriciteitslevering (dynamisch) was de HHI 2232, wanneer importen niet worden meegerekend en 1648 wanneer dat wel het geval is. Een HHI-waarde van boven de 1800 wijst op een geconcentreerde markt (DTe, 2006).

### **4.3 Concurrentie met andere elektriciteitsproductietechnologieën**

Uit economisch oogpunt is het voor elk elektriciteitsproductietechnologie aantrekkelijk om zoveel mogelijk draaiuren te realiseren. Elke technologie wordt daarom bij voorkeur in de basislast ingezet. Alleen voor technologieën waarvan de energiebron niet voortdurend beschikbaar is (wind, zon, getijde energie, etc.), is dat niet mogelijk. Omdat de elektriciteitsvraag voortdurend fluctueert, zal echter een deel van de productiecapaciteit maar beperkt ingezet kunnen worden. In principe is het technisch mogelijk een kerncentrale in deellast te bedienen en in de piekuren op te regelen, maar een kerncentrale wordt daarvoor niet gebouwd vanwege de relatief hoge kapitaalskosten (zie Hoofdstuk 5). Met de komst van nieuwe typen kernreactoren (bijv. HTR, zie Paragraaf 2.3.4) kan dit mogelijk anders worden.

Een kerncentrale wordt in de elektriciteitsmarkt ingezet als basislastcentrale, omdat de variabele kosten van kolen- en gascentrales (circa 3,6 €/kWh, bij een CO<sub>2</sub>-prijs van 20 €/ton, indicatief en afhankelijk van brandstofprijzen (Sijm, 2005)) hoger zijn dan die van een kerncentrale (1,12-1,84 €/kWh, zie Paragraaf 5.1). Vanwege de hogere variabele kosten zijn kolen- en gascentrales de marginale centrales waarvan de productie wordt geregeld om in de fluctuerende vraag te voorzien (door aan/uitschakelen of in deellast te draaien). Gascentrales die zijn uitgerust met gasturbines, zijn beter regelbaar dan kolencentrales en hebben lagere opstartkosten. In landen die daarover beschikken worden ook waterkrachtcentrales gebruikt als regelbaar vermogen.

Kerncentrales concurreren vooral met andere basislastcentrales. Zoals in de Paragraaf 4.1 en met Figuur 4.2 is aangegeven, gaat het daarbij in de huidige Nederlandse markt om kolencentrales, afvalverbrandinginstallaties (AVI's), industriële warmtekrachtinstallaties en gascentrales die warmte leveren voor stadsverwarming (STEG SV). Een kerncentrale in Nederland concurreert ook met buitenlandse basislastcentrales. Dit zijn op dit moment kolencentrales en buitenlandse kerncentrales.

#### ***Kolencentrales***

Voor het leveren van basislastvermogen zijn kolencentrales de belangrijkste concurrenten van kerncentrales. De investeringskosten voor een kolencentrale liggen lager dan die van een kerncentrale, maar ook een kolencentrale zal uit economisch oogpunt veel draaiuren moeten maken. Kolencentrales kunnen in deellast worden bedreven, of tijdelijk worden afgeschakeld. Kolencentrales zijn daardoor enigszins regelbaar. Bij toepassing van CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag (carbon capture & storage; CCS) nemen de investeringskosten toe en de regelbaarheid af. Er worden dan



(vrijwel) geen kosten meer gemaakt voor CO<sub>2</sub>-emissierechten. In plaats daarvan komen de kosten voor transport en opslag van de CO<sub>2</sub>, die mogelijk tot de variabele kosten behoren (afhankelijk van projectopzet of contract). Door de CO<sub>2</sub>-afvang daalt het rendement, waardoor de brandstofkosten relatief hoger zullen uitvallen in vergelijking met een kolencentrale zonder CO<sub>2</sub>-afvang. Alleen bij een voldoende hoge CO<sub>2</sub>-prijs zullen de variabele kosten van een kolencentrale met CO<sub>2</sub>-afvang lager zijn dan die zonder afvang. Nuon probeert met de ontwikkeling van de Magnumcentrale - een combinatie van kolen- en biomassavergassing en STEG (gecombineerde gas- en stoomturbines) - in te spelen op de behoefte aan flexibele productie en tevens gebruik te maken van verschillende brandstoffen (kolen, biomassa en gas).

### *Warmtekracht*

Warmtekrachtinstallaties en centrales die warmte leveren aan stadsverwarming blijven vaak in bedrijf wanneer de elektriciteitsprijs onder de variabele kosten van deze centrales komt te liggen. De productiecapaciteit kan niet worden afgeschakeld omdat de installatie in de warmtevraag moet blijven voorzien. Deze centrales worden om die reden aangeduid met *must-run* capaciteit. Grootschalige warmtekrachtinstallaties voorzien veelal in industriële warmtebehoefte, waardoor het aantal draaiuren groter is dan kleinschalige warmtekracht die meestal wordt gebruikt om in klimaatafhankelijke warmtevraag (gebouwen, tuinbouw ed.) te voorzien. Omdat een warmtekrachtinstallatie zowel elektriciteit als warmte produceert, ligt het totale energetisch rendement hoger dan bij andere elektriciteitscentrales en ontstaan er minder CO<sub>2</sub>-emissies dan wanneer de warmte en elektriciteit gescheiden worden geproduceerd. Deze betere milieuprestatie is niet (geheel) in de opbrengsten van de elektriciteit- en warmtelevering verdisconteerd (vormt een externe bate). Om die reden ontvangen warmtekrachtinstallaties ondersteuning van de overheid door middel van de MEP-subsidie. Naar verwachting zal ook in de toekomst overheidsondersteuning voor warmtekrachtkoppeling worden gegeven, maar mogelijk in een gewijzigde vorm.

### *Windenergie*

In de daluren concurreert elektriciteitsproductie uit windenergie ook met basislastvermogen. Deze elektriciteitsproductie is sterk veranderlijk en afhankelijk van het windaanbod. Wanneer er weinig of geen windaanbod is, moet de elektriciteitsvraag gedekt worden met ander productievermogen. Dit productievermogen zal snel op- en afgeregeld moeten kunnen worden, omdat het windaanbod snel kan veranderen. In de Nederlandse elektriciteitsmarkt zijn het centrales met gasturbines (o.m. gecombineerde gas- en stoomturbine installaties; STEG's) die snel regelbaar zijn. In het buitenland (bijv. Denemarken/Noorwegen, Ierland) wordt hier ook vaak waterkracht voor ingezet. Door toename van windvermogen ontstaat in de elektriciteitsmarkt minder ruimte voor basislastvermogen, en neemt de vraag naar flexibele elektriciteitsproductie toe.

### *Flexibiliteit*

De verwachting is dat het windvermogen in de komende jaren sterk zal stijgen. Het in Nederland opgestelde vermogen bedraagt op dit moment ruim 1600 MW, waarvan 100 MW op zee is opgesteld. Om de overheidsdoelstelling van 20% hernieuwbare energie in 2020 te realiseren (zie Paragraaf 6.4), zal het windvermogen sterk moeten groeien, mogelijk zelfs tot 9000 MW (3000 MW op land en 6000 MW op zee). Door een relatief sterke groei van het windvermogen zal er meer vraag ontstaan naar flexibel productievermogen en minder basislastvermogen. Marktprikkels stimuleren de flexibiliteit van het productievermogen. Door toename van het windvermogen zal de volatiliteit van de elektriciteitsprijzen toenemen. De elektriciteitsprijzen in de piekperiode liggen in vergelijking met die in de dalperiode tegenwoordig al aanzienlijk hoger in vergelijking met enkele jaren geleden. Nieuwe warmtekrachtinstallaties in de tuinbouw spelen hierop in door alleen in de piekperiode te draaien en warmte te bufferen. Deze ontwikkeling kan zich doorzetten naar industriële warmtekrachtinstallaties die in de toekomst flexibeler (bijv. met een grotere variatie in de warmte/krachtverhouding) kunnen worden bedreven. Andere vormen van flexibiliteit zijn vraagresponse (afnemers verminderen hun vraag bij hoge energieprijzen; dit kan automatisch plaatsvinden) en elektriciteitsopslag. Elektriciteitsopslag bevindt zich nog in de ontwikkelingsfase, maar vraagresponse wordt al toegepast bij industriële afnemers. Elektrici-

teitsopslag kan een vergelijkbare rol krijgen als die van waterkracht (pump storage) in huidige elektriciteitsmarkten van bijvoorbeeld Noorwegen en Oostenrijk.

#### *Ontwikkeling conventioneel vermogen*

Mocht een groot deel van de plannen voor nieuwe kolen- en gascentrales doorgang vinden (in totaal gaat het om 10.500 MW), dan kunnen er, afhankelijk van de concurrentieverhouding met buitenlands productievermogen, in de periode tot circa 2020 ruwweg twee situaties ontstaan. De eerste mogelijkheid is dat de Nederlandse elektriciteitsprijzen hoger blijven dan die in het buitenland. In dat geval zal een deel van het productievermogen - vooral de oudere minder efficiënte installaties - niet meer in bedrijf komen en uiteindelijk worden gesloten. Feitelijk worden de oude centrales dan vervangen door nieuwe. Een tweede mogelijkheid is dat de prijzen in Nederland door het grote productieaanbod dalen en de elektriciteitsprijs in Nederland onder die van het buitenland zakt. De prijs in de daluren zou bijvoorbeeld door een kolencentrale kunnen worden bepaald wanneer die in de marginale vraag voorziet. De nieuwe capaciteit zal dan eerst de elektriciteitsvraag gaan voorzien die tot dan toe door de importen werd gedekt. De productie door basislastcentrales kan verder toenemen waardoor export van elektriciteit naar het buitenland ontstaat. Het totale basislastvermogen dat in Nederland kan worden ingezet zal hierdoor toenemen. Welk van de twee situaties het meest waarschijnlijk is, is niet te zeggen. Daarvoor zijn er te veel onzekerheden, zoals hoeveel nieuwe centrales er in Nederland echt zullen worden gebouwd, nieuwbouw van centrales in het buitenland, ontwikkeling van de brandstofprijzen en de CO<sub>2</sub>-prijs, groei van windenergievermogen en warmtekrachtvermogen, etc.

#### *Lange termijn ontwikkeling*

Voor uitbreiding van kernenergie in Nederland, is het belangrijk om ook de concurrentie op de langere termijn te beschouwen, omdat de exploitatieperiode van een eventuele nieuwe kerncentrale vooral na 2020 ligt. Op langere termijn nemen de onzekerheden over mogelijke ontwikkelingen op de elektriciteitsmarkt verder toe. Dit geldt voor de al genoemde factoren als brandstofprijzen en CO<sub>2</sub>-prijs en nieuw te realiseren productievermogen (welk type, waar). Hier komen nog twee andere ontwikkelingen bij die een toenemende invloed zullen krijgen.

De eerste ontwikkeling is de integratie van de Europese elektriciteitsmarkt. In vergelijking met andere Europese landen is Nederland al sterk verbonden met de elektriciteitssystemen van onze buurlanden. Door uitbreiding van het aantal elektriciteitsverbindingen met buurlanden (waaronder Noorwegen en Engeland), en marktkoppeling met Duitsland, zal de Nederlandse elektriciteitsmarkt sterker geïntegreerd raken met die van andere landen in de Noordwest Europa. Verwacht mag worden dat deze marktintegratie zich op langere termijn zal doorzetten, maar ook dat de integratie gaat gelden voor aanpassingen in de elektriciteituitwisseling op de korte (uren) en zeer korte termijn (kwartieren). Niet alleen zal de markt voor basislastvermogen zich uiteindelijk ontwikkelen tot een (Noordwest) Europese markt, maar ook de markt voor piek of flexibel vermogen zal sterker geïntegreerd raken.

De andere ontwikkeling is die van de technologie. Technologieën die nu nog in de kinderschoenen staan of nog maar op beperkte schaal worden toegepast, zoals elektriciteit uit zonne-energie, microwarmtekracht (dit is warmtekracht bij huishoudens), elektriciteitsopslag en vraagresponse, kunnen een rol gaan spelen in de toekomstige elektriciteitsvoorziening. Elektriciteitsopslag en vraagresponse zullen, samen met flexibele productie (bijv. gasturbines of schakelbare warmtekracht), kunnen bijdragen aan de afstemming van elektriciteitsvraag en -aanbod. Deze technologieën kunnen zorgen voor beperking van de volatiliteit van marktprijzen, indien zij concurrerend zijn met flexibele productie. Microwarmtekracht kan zowel worden ingezet voor basislast (met teruglevering aan het net) als voor dekking van piekvraag. Elektriciteit uit zonne-energie zal bijdragen aan de elektriciteitsvraag in de piekuren, vanwege de beschikbaarheid van deze energiebron gedurende de daguren. Grootschalige opwekking van zonne-energie in Noord Afrika of Zuid Europa zal de marktprijs van elektriciteit in de Noordwest Europese markt niet wezenlijk beïnvloeden, zolang de marginale elektriciteitsvraag gedekt wordt door centrales die fossiele brandstoffen gebruiken. Een sterke groei van decentrale elektriciteitsproductie en elektrici-

teitproductie uit hernieuwbare bronnen zal mogelijk gevolgen hebben voor management en planning van de elektriciteitsnetwerken.

### *Samenvatting*

Samenvattend ontstaat het volgende beeld: Kerncentrales zijn basislastcentrales die concurreren met andere basislastcentrales. In de Nederlandse markt zijn dat vooral kolencentrales en warmtekrachtinstallaties. Nederlandse kerncentrales concurreren ook met buitenlands basislastvermogen, dat bestaat uit kolencentrales en kerncentrales. Door een verdere integratie van de Nederlandse elektriciteitsmarkt met die van de ons omringende landen, zal de markt voor basislastvermogen toenemen. Gelijktijdig zal een sterke groei van het windvermogen de vraag naar basislastvermogen doen afnemen. Blijft de marktinzichting ongewijzigd, dan zal de elektriciteitsprijs voor basislastvermogen worden bepaald door de elektriciteitsproductietechnologie met de hoogste variabele productiekosten in de dal- en piekuren. Omdat de variabele productiekosten voor hernieuwbare bronnen (behalve biomassa) en kernenergie lager zijn dan die van centrales met fossiele brandstoffen (kolen, gas), zullen deze laatste bepalend blijven voor de elektriciteitsprijs.

## 4.4 Inpassing kernenergie in het Nederlandse elektriciteitsstelsel

Bij de meeste elektriciteitsproductietechnologieën dalen de kosten per kW en per kWh naarmate de schaalgrootte toeneemt. Elk type centrale kent daarbij een min of meer maximale eenheids-grootte, die overigens door technologische ontwikkeling wordt beïnvloed. Voor een gascentrale van het type STEG (gecombineerde gas- en stoomturbine) ligt die bij circa 450 MW. Voor een kolencentrale is de schaalgrootte circa 1000 MW. Een kolen- en gascentrale kan uit meerdere eenheden bestaan. De Eemscentrale bestaat bijvoorbeeld uit 7 STEG-eenheden met een totaal vermogen van 2400 MW. Kerncentrales met een generatie III reactor hebben een elektrisch vermogen dat ligt tussen 1100 en 1600 MW (zie Figuur 2.1). Hoewel de HTR-reactoren aanmerkelijk kleiner zijn (160 MW) gaan deze concepten ervan uit dat een centrale zo'n 10 eenheden omvat (zie Paragraaf 2.3.4). Een kerncentrale met HTR-reactoren heeft daarmee een vergelijkbare grootte als de EPR van 1600 MW. Het kleinere eenheidsvermogen maakt het echter in principe mogelijk een enkele HTR-reactor als decentrale productie-eenheid in te zetten.

### *Netaansluitingen*

In april 2007 melde TenneT met vijf nieuwbouwcentrales aansluitcontracten te hebben gesloten (zie het overzicht in Tabel 4.2) met een totaal productievermogen van 4710 MW (TenneT, 2007, 2007a). De nieuwe centrales worden op drie locaties op het hoogspanningsnet aangesloten. Om dit mogelijk te maken zijn enerzijds investeringen in het net nodig, maar worden bij een aantal aansluitingen ook voorwaarden gesteld. Producenten dienen er dan mee rekening te houden dat op bepaalde momenten, vanwege transportbeperkingen, geen (volledige) productie mogelijk is.

Tabel 4.2 *Overzicht aansluitcontracten van nieuwe centrales met TenneT*

Locatie	Initiatiefnemer	Type centrale	Vermogen [MW]	Geplande netaansluiting
Borsele	Delta	Gas	920	2008
Maasvlakte	Intergen	Gas	450	2009
Eemshaven	Nuon	Gas/kolenvergasser	1400	2009
Maasvlakte	Eneco	Gas	870	2010
Maasvlakte	EON	Kolen	1070	2012

Naast de vijf nieuwbouwcentrales waarmee een aansluitcontract is getekend, bestaan er nog zeven andere initiatieven met een gezamenlijk vermogen van bijna 6000 MW. De meeste initiatieven richten zich op dezelfde locaties (Eemshaven, Maasvlakte, Borssele), hoewel het niet zeker

is of al deze initiatieven doorgang zullen vinden. Gelijktijdig moet TenneT rekening houden met uitbreiding van windvermogen op de Noordzee. In haar meest recente capaciteitsplan (TenneT, 2005) is de inpassing van 6000 MW wind op zee geanalyseerd. Hierbij is ervan uitgegaan dat de aansluitingen op het transportnet zullen plaatsvinden bij IJmuiden en de Maasvlakte.

Voorals de combinatie van de vele nieuwe elektriciteitscentrales en offshore wind zal tot aanzienlijke knelpunten kunnen gaan leiden in het landelijke transportnet die alleen op termijn door netverzwaring en nieuwe netverbindingen kunnen worden opgelost (TenneT, 2007b). TenneT dient non-discriminatoire aansluitprocedures te hanteren. Feitelijk is toch sprake van een min of meer *'first come first served'* principe. Dit betekent dat de aansluiting van een nieuwe kerncentrale, mocht daar de komende jaren het initiatief toe worden genomen, afhankelijk is van het tempo waarin TenneT voor voldoende netcapaciteit kan zorgen.

### *Balanshandhaving*

De productie van elektriciteit moet voortdurend in balans zijn met de consumptie. TenneT is als systeembeheerder in Nederland verantwoordelijk voor de handhaving van de balans in het elektriciteitssysteem. Op basis van de verwachte vraag naar elektriciteit dienen producenten hun productieplannen de dag voorafgaand aan de dag van levering bij TenneT in te dienen. Wanneer de productie afwijkt van deze plannen, bijvoorbeeld omdat een centrale uitvalt, zorgt TenneT er voor dat het tekort wordt aangevuld uit het reservevermogen (dit geldt ook wanneer de elektriciteitsvraag afwijkt van de prognose). TenneT betreft dit reservevermogen uit de markt voor regel- en reservevermogen waar producenten hun productiereserves kunnen aanbieden. De omvang van de markt voor regel- en reservevermogen ligt doorgaans tussen de 750 en 1500 MW.

De grootste eenheden zijn op dit moment ongeveer 600 MW. Het plotseling uitvallen van een dergelijke eenheid zorgt voor een onbalans op het elektriciteitsstelsel van een gelijke omvang. De omvang van het reservevermogen is thans voldoende om het stroomtekort op te vangen. Wanneer er eenheden op de Nederlandse markt verschijnen die aanzienlijk groter zijn (1000 MW of groter), dan zal ook de omvang van de markt voor regel- en reservevermogen moeten toenemen. Waarschijnlijk zullen marktpartijen daarin gaan voorzien (TenneT, 2007b). Daarvoor zijn twee redenen. Ten eerste brengt TenneT de kosten van de onbalans in rekening bij de veroorzaker. De producent van wie de centrale is uitgevallen, dient dus de kosten te betalen voor het inzetten van reservevermogen. Deze kosten kunnen vele miljoenen euro's bedragen. Dit risico zullen producenten proberen te beperken door te zorgen voor voldoende reservecapaciteit, eventueel met bilaterale contracten, waardoor de prijzen voor regel- en reservevermogen op een redelijk niveau blijven. Ten tweede is er bij de verwachte sterke uitbreiding van het productievermogen, voldoende vermogen beschikbaar dat als reservevermogen dienst kan doen. Naast elektriciteitsproductie draagt ook vraagresponse bij aan het reservevermogen. In de toekomst zou ook elektriciteitsopslag hieraan kunnen bijdragen.

## 4.5 Factoren van belang voor de initiatiefnemer voor een kerncentrale

Voor de locatiekeuze van een elektriciteitscentrale is een groot aantal factoren van belang. In deze paragraaf worden de belangrijkste factoren besproken die relevant zijn voor een elektriciteitsproducent die een kerncentrale wil bouwen.

### *Elektriciteitsmarkt*

Elektriciteitsproducenten zijn tegenwoordig internationale ondernemingen die in verschillende landen (d.w.z. nationale elektriciteitsmarkten) opereren. Dit geldt ook voor twee elektriciteitsproducenten die in Nederland actief zijn: Electrabel en EON. Deze bedrijven en andere internationaal opererende elektriciteitsbedrijven, zoals EDF, RWE en Vattenfall, zullen bij hun investeringsbeslissingen een keuze kunnen maken uit verschillende elektriciteitsmarkten. Voor het te verwachten rendement op de investering in een basislastcentrale lijkt Nederland aantrekkelijk.

De elektriciteitsprijzen voor basislastvermogen zijn relatief hoog, omdat gasgestookte centrales veelal de marginale prijs bepalen.

#### *Wet- en regelgeving*

Hoewel met Europese regelgeving er naar wordt gestreefd de verschillen tussen nationale wet- en regelgeving zoveel mogelijk weg te nemen, zodat dit geen invloed heeft op de internationale concurrentie tussen elektriciteitsproducenten, bestaan er toch nog wel verschillen die van invloed zijn op de locatiekeuze. Het gaat hierbij ondermeer om de milieuregelgeving en de vergunningverlening. Bij dit laatste zijn de regionale overheden betrokken. Zij kunnen, op grond van locatiespecifieke kenmerken aparte voorwaarden stellen (bijv. in verband met fijn stof). Voor kerncentrales geldt specifieke wet- en regelgeving die per land verschillend is (zie Paragrafen 6.4 en 6.5).

#### *Planologische aspecten*

Op basis van de Wet op Ruimtelijke ordening stelt de rijks- en provinciale overheid ruimtelijke plannen op waarin ruimte wordt gereserveerd voor elektriciteitscentrales. In de jaren tachtig van de vorige eeuw heeft de Nederlandse overheid vijf locaties aangewezen als vestigingsplaats voor een kerncentrale: Westelijke Noordoostpolderdijk, Moerdijk, Eemshaven, Maasvlakte en Borssele (Tweede Structuurschema Elektriciteitsvoorziening, 1994). De Minister van Economische Zaken is bezig met de voorbereiding van het Derde Structuurschema Elektriciteitsvoorziening, waaruit zal blijken in hoeverre deze mogelijke vestigingsplaatsen gehandhaafd kunnen blijven (zie ook Paragraaf 6.4).

#### *Koelwater*

Het stoomcircuit van een kerncentrale moet, evenals dat van andere thermische elektriciteitscentrales, worden gekoeld. Een kerncentrale heeft bovendien voldoende koelwater nodig om in alle omstandigheden koeling van de reactor te garanderen. De elektriciteitscentrales in Nederland gebruiken oppervlaktewater als koelwater. Wanneer hiervoor rivierwater wordt gebruikt kan de elektriciteitsproductie beperkingen ondervinden (koelwaterbeperking) wanneer in de zomermaanden de temperatuur van rivierwater stijgt en de hoeveelheid koelwater afneemt. Uit milieuoverwegingen mag het koelwater dat geloosd wordt namelijk niet warmer zijn dan 30°C. Gelet op de benodigde koelwatercapaciteit voor een kerncentrale en het vermijden van koelwaterbeperkingen, zijn locaties aan zee of riviermondingen (Eemshaven, Maasvlakte, Borssele) het meest geschikt.

De resterende thermische energie van een kerncentrale kan overigens voor een deel nog nuttig gebruikt worden. De afvalwarmte wordt dan via pijpleidingen getransporteerd naar bijvoorbeeld nabijgelegen industrieën of tuinbouwkassen. Hierdoor zal de lozing van koelwater kunnen worden verminderd (VROM, 2006).

#### *Logistieke aspecten*

De aanvoer van brandstoffen en afvoer van afvalstoffen - kolen worden meestal per schip aangevoerd, aardgas per pijpleiding - is ook een belangrijke randvoorwaarde, doch dit aspect heeft bij een kerncentrale vanwege de relatief kleine volumes geen grote invloed op de locatiekeuze. Wel bestaat er de voorkeur om de aan- en afvoer van nucleaire brandstof en radioactief afval per spoor of per schip te laten plaatsvinden (VROM, 2006).

#### *Netinpassing*

De problematiek van de netinpassing is in de vorige paragraaf aan de orde geweest. Voor een aantal van de door de overheid aangewezen locaties voor een kerncentrale worden nu plannen ontwikkeld voor kolen- en gascentrales (Borssele, Maasvlakte, Eemshaven). TenneT breidt de capaciteit van het transportnet uit om deze inpassing mogelijk te maken. Dit zal ook nodig zijn wanneer op één van deze locaties een kerncentrale wordt gebouwd. De kosten voor de capaciteitsuitbreiding van het transportnet zullen per locatie verschillen. Het kan voor bepaalde loca-

ties bijvoorbeeld nodig zijn om complete nieuwe hoogspanningslijnen te bouwen. Deze kosten komen echter niet ten laste van de exploitant van de kerncentrale (behalve de kosten voor de directe netaansluiting), maar worden via de tarieven doorberekend aan de eindgebruikers. Toch kunnen aanzienlijke verschillen in netuitbreidingskosten een rol spelen bij de keuze van de locatie voor een nieuwe kerncentrale. Overigens zal in het nog te verschijnen Derde Structuurschema Elektriciteitsvoorziening waarschijnlijk ook aandacht worden besteed aan mogelijke nieuwe hoogspanningsverbindingen.

#### *Maatschappelijke acceptatie*

De acceptatie van kernenergie door de bevolking in de regio waar een nieuwe kerncentrale wordt gebouwd kan een rol spelen bij de locatiekeuze. In Hoofdstuk 7 zal aandacht worden besteed aan maatschappelijke acceptatie.

## 5. Economische aspecten

Dit hoofdstuk bespreekt de economische aspecten van kernenergie. Paragraaf 5.1 geeft een overzicht van verschillende kosten zoals die in diverse literatuurbronnen worden gerapporteerd. Om een onderlinge vergelijking mogelijk te maken worden de kostengegevens omgerekend naar €<sub>2006</sub>. Paragraaf 5.2 gaat vervolgens in op de vraag of kernenergie voor een investeerder economisch rendabel is. Vanuit de optiek van de exploitant worden, bij het beoordelen van de economische rentabiliteit, niet alle kosten (en baten) die samenhangen met het gebruik van kernenergie meegenomen. Deze externe kosten en baten komen in Paragraaf 5.3 aan de orde.

### 5.1 Kostengegevens over kernenergie

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van een aantal kostenstudies over kernenergie. Deze studies hebben allemaal betrekking op kerncentrales die gebruik maken van generatie III reactoren. Het overzicht met kosteninformatie staat in Tabel 5.1 weergegeven. Het overzicht is gebaseerd op de volgende studies:

- *MIT, 2003*  
In 2003 publiceerde het Massachusetts Institute of Technology (V.S.) een studie (MIT, 2003) over de kosten van kernenergie. MIT schat de 'overnight construction cost' - bouwkosten zonder reserveringen voor kostenoverschrijding en bouwrente - op \$2000/kW. Wordt rekening gehouden met de bouwrente dan worden de investeringskosten geschat op \$2557/kW (zie Tabel 5.1). Een kostendaling van 25% wordt mogelijk geacht (niet in de tabel weergegeven). De splijtstofcycluskosten zijn \$0,45/GJ ( $GJ_{\text{thermisch}}$ ), overeenkomend met circa 0,5 ¢/kWh, en de kosten van onderhoud en bediening (O&B) zijn \$63/kW (vast) en 0,047 ¢/kWh (variabel). De kosten van ontmanteling zijn \$350 miljoen (1000 MW). De kosten van radioactief afvalbehandeling worden geschat op 0,1 ¢/kWh.
- *Royal Academy of Engineering, 2004*  
De 'Royal Academy of Engineering' (Verenigd Koninkrijk) heeft in 2004 een studie gepubliceerd naar de kosten van kernenergie (Royal Academy of Engineering, 2004). De academie schat de bouwkosten zonder bouwrente, maar inclusief reservering voor ontmanteling, van de reactor (EPR) die TVO in Finland bouwt op € 1875/kW (£ 1 ≈ € 1,5). De kosten zouden in de toekomst kunnen dalen tot € 1725/kW exclusief bouwrente, incl. reservering ontmanteling. De kosten van onderhoud en bediening (O&B) zijn naar schatting € 62/kW en van de splijtstofcyclus 0,6 ¢/kWh. De academie berekent de elektriciteitskosten met een disconteringsvoet van 7,5%.
- *NEA, 2005*  
De Nuclear Energy Agency (NEA/IEA) (NEA, 2005) geeft kosten van opties voor elektriciteitsopwekking, exclusief Japan, waar de kosten veel hoger zijn dan in andere landen. De 'overnight construction cost' loopt uiteen van \$1050 tot \$2100/kW (\$<sub>2005</sub>), O&B-kosten van \$46 tot \$82/kW en splijtstofcycluskosten van 0,3 tot 0,8 ¢/kWh. De opwekkingskosten geeft NEA voor een disconteringsvoet van 5% en van 10%. Bij een disconteringsvoet van 10% variëren de opwekkingskosten van \$30 tot \$53/MWh.

Tabel 5.1 *Kosten van kernenergie volgens diverse literatuurbronnen*

Bron		MIT, 2003 <sup>1</sup>	Royal Academy of Engineering, 2004 <sup>2</sup>	NEA, 2005 <sup>3</sup>	DTI, 2006 <sup>4</sup>	EDF, 2006 <sup>5</sup>	IEA, 2006 <sup>6</sup>
Land		V.S.	V.K.		V.K.	Frankrijk	
Type reactor		PWR of BWR	PWR, BWR of Candu	PWR, BWR of Candu	PWR of BWR	EPR	
Referentiejaar (valuta)		2002	2004	2005	2006	2006	2006
Vermogen	[MWe]	1000	1000		1100-1600	1590	
Capaciteitsfactor	[%]	85	90		80-85	>90	85
Thermisch rendement	[%]	36				36	33
Investeringskosten	[\$/kW] [€/kW]	2557		1050-2100			2000-2500
Onderhoud & Bediening (O&B)					2552	2075	
Vast	[\$/kW/jaar] [€/kW]	63		46-82			65
Variabel	[¢/kWh]	0,047	62		1,1		
Splijstofcycluskosten	[\$/GJ] [€/GJ]	0,45					0,48
	[¢/kWh]	0,5		0,3-0,8			
	[¢ct/kWh]		0,6		0,64		
Totaal O&B + splijstofcyclus	[¢/kWh]	1,5					
Bouwtijd	[jaar]	5	5	5	6	4,5	5
Exploitatieperiode	[jaar]	40 (25)	40 (25)		40	60	40
Ontmantelingskosten	[\$ mln] [€/mln]	350					350
	[¢ct/kWh]				920		
Kosten radioactief afval	[¢/kWh]	0,1			0,1		0,1
	[¢ct/kWh]				0,06		
Opwekkingskosten	[\$/MWh] [€/MWh]	67 (70)		23-35 (31-53)			48-57
			34 (37)		54	46	

Noten:

1. Investeringskosten met bouwrente \$2557/kW, zonder bouwrente \$2000/kW. Opwekkingskosten 67 \$/MWh bij 40 jaar exploitatie en 70 \$/MWh bij 25 jaar. BWR = Boiling Water Reactor.
2. Investeringskosten, exclusief bouwrente, incl. ontmanteling (o.b.v. Finse EPR reactor Olkiluoto 3). Valuta 2004: 1 £ = 1,5 €. Kapitaalskosten 7,5%. Candu = Canadees reactortype.
3. Investeringskosten exclusief kosten van financiering (Japan buiten beschouwing gelaten). Opwekkingskosten op basis van disconteringsvoet 5%: 23-35 \$/MWh en 10%: 31-53 \$/MWh.
4. Investeringskosten 1000 MW reactor inclusief bouwrente (circa 25% meer dan Franse EPR reactor Flamanville 3). Valuta 2006 (1 £ = 1,45 €). Kapitaalskosten 10%.
5. €<sub>2006</sub>. EPR reactor Flamanville 3.
6. US\$<sub>2005</sub>. Investeringskosten exclusief kosten van financiering. Ontmantelingskosten: opbouw van fonds gedurende eerste 20 jaar bedrijf.



- *DTI, 2006*  
DTI (Department of Trade and Industry) in Engeland geeft in 2006 een overzicht van kosten en baten van kernenergie (DTI, 2006), gebaseerd op diverse publicaties op dit gebied. De bouwkosten exclusief bouwrente, inclusief reservering ontmanteling, zijn € 1812/kW. Echter, inclusief bouwrente, bedragen ze € 2552/kW (£1760/kW, 1 £ ≈ 1,45 €). DTI schat de kosten van onderhoud en bediening (O&B) op 1,1 €ct/kWh (overeenkomend met € 83/kW), splijststofcycluskosten op 0,64 €ct/kWh en radioactief afval behandelingskosten op 0,06 €ct/kWh. De ontmantelingskosten zijn € 920 miljoen voor een 1590 MW reactor (EPR). Door het effect van rentebijdrage op een ontmantelingsfonds komt dit neer op 0,1 €ct/kWh. De opwekkingskosten worden berekend met een kapitaalsfactor van 10%.
- *EDF, 2006*  
In 2006 gaf EDF een overzicht van de kosten van de eerste EPR die in Frankrijk wordt gebouwd bij Flamanville en volgens planning in 2012 in bedrijf zal komen (EDF, 2006). De bouwkosten, inclusief bouwrente, worden geschat op € 3,3 miljard, overeenkomend met € 2075/kW. De kosten van elektriciteitsopwekking schat EDF op € 46/MWh.
- *IEA, 2006*  
De 'World Energy Outlook 2006' van de IEA (IEA, 2006) geeft een summier overzicht van de kosten van kernenergie. De (integrale) bouwkosten worden geschat op \$2000-2500/kW, O&B op \$65/kW, de splijststofcycluskosten op \$0,45/GJ ( $GJ_{\text{thermisch}}$ ), overeenkomend met circa 0,5 ¢/kWh. Verder schat de IEA de ontmantelingskosten op \$350 miljoen, uitgaande van opbouw van een fonds in de eerste 20 jaar van de exploitatie. Tenslotte worden de kosten van behandeling van radioactief afval geschat op 0,1 ¢/kWh.

In Tabel 5.1 is de kosteninformatie weergegeven in de valuta waarin ze in de literatuurbronnen staan vermeld. Om een vergelijking mogelijk te maken zijn de valuta omgerekend naar €<sub>2006</sub> (zie Tabel 5.2). Uit vergelijking van de cijfers in deze tabel blijkt dat de studie van MIT (MIT, 2003) op vrijwel alle onderdelen de hoogste kosten geeft. De laagste kostenschatting staat in Tabel 5.2 in de kolom 'NEA, 2005 Laag' en komt uit de NEA-studie uit 2005 (NEA, 2005). Bij deze twee kostenschattingen kunnen de volgende opmerkingen worden geplaatst:

- De integrale bouwkosten in (MIT, 2003) worden gegeven in US\$<sub>2002</sub> (\$2557/kW). Bij omrekening naar €<sub>2006</sub> komt, mede door verandering in de \$/€-wisselkoers tussen 2002 en 2006, deze kostenraming uit op € 2937/kW. De integrale bouwkosten in (DTI, 2006) bedragen € 2552/kW. Omdat er bij de andere kostenramingen geen bouwrente is meegenomen, is het in de vergelijking beter uit te gaan van de bouwkosten exclusief bouwrente. Voor DTI is dit € 1812/kW en, bij omrekening naar €<sub>2006</sub>, voor MIT € 2297/kW.
- De 'lage' kosten van (NEA, 2005) zijn in de afgelopen jaren achterhaald, omdat in sommige landen de bouwkosten en andere kostenfactoren te laag zijn geschat. Dit blijkt onder andere uit de bouwkosten die voor 'laag' buiten de range vallen van (IEA, 2006).

Blijft de laagste waarde (NEA, 2005) buiten beschouwing, dan liggen de bouwkosten, exclusief bouwrente, volgens de literatuurbronnen, omgerekend naar euro's van 2006 tussen de € 1590-2297/kW. De variabele kosten (variabele onderhouds- en bedieningskosten en de kosten van de splijststofcyclus) variëren tussen 1,12 en 1,84 €ct/kWh - bij de laagste waarde is een bedrag van 0,09 €ct/kWh voor kosten van radioactief afvalbehandeling opgeteld bij de splijststofkosten. De ontmantelingskosten zijn circa 0,1 €ct/kWh.

Tabel 5.2 *Kosten van kernenergie volgens diverse literatuurbronnen in €<sub>2006</sub>*

Bron		MIT, 2003	Royal Academy of Engineering, 2004	NEA, 2005 Laag	NEA, 2005 Hoog	DTI, 2006	EDF, 2006	IEA, 2006
Land		V.S.	V.K.			V.K.	Frankrijk	
Type reactor		PWR of BWR	PWR, BWR of Candu	PWR, BWR of Candu	PWR, BWR of Candu	PWR of BWR	EPR	
Referentiejaar (valuta)		2002	2004	2005	2005	2006	2006	2006
Vermogen	[MWe]	1000	1000			1100-1600	1590	
Investeringskosten	[€/kW]	2937 <sup>1</sup>	1801	938	1876	2552 <sup>2</sup>	2075	1590-1990
Onderhoud & Bediening (O&B)								
Vast	[€/kW/jaar]	68	68					52
Variabel	[€/kWh]	0,54				1,12		
Splijststofcycluskosten	[€/kWh]	0,32	0,67			0,64		0,42
Totaal O&B + splijststofcyclus	[€/kWh]	1,84	1,54	1,27	1,23	1,76		1,12
Ontmantelingskosten	[€/kWh]					0,10		
Kosten radioactief afval	[€/kWh]	0,11						0,09

<sup>1</sup> bedrag inclusief bouwrente; exclusief bouwrente is dit € 2297

<sup>2</sup> bedrag inclusief bouwrente; exclusief bouwrente is dit € 1812

De geraadpleegde studies zijn niet duidelijk over welke kosten begrepen zijn in de vaste onderhouds- en bedieningskosten (O&B). De MIT-studie gaat het meest uitgebreid in op de bepaling van de O&B-kosten (MIT, 2003). In de studie wordt gemeld dat in O&B-overzichten verzekeringspremies en kosten die samenhangen met ongelukken buiten beschouwing worden gelaten. Dit kan leiden tot een 30% onderschatting van de O&B-kosten.

Bij een nieuwe kerncentrale zullen de O&B-kosten aanvankelijk lager zijn dan gemiddeld, maar toenemen in de loop van de tijd. Op een zeker moment zullen ook vervangingsinvesteringen moeten worden gedaan. Of hiermee in de beschouwde studies rekening is gehouden, is onduidelijk.

De kosten voor interim en eindberging van nucleair afval kunnen in Nederland relatief hoger zijn dan die van andere landen met kernenergie (bijv. Verenigde Staten of Frankrijk). Ook bij uitbreiding van kernenergie zal Nederland, in vergelijking met het buitenland, maar over een beperkt aantal nucleaire installaties beschikken waarvoor voorzieningen voor nucleair afval gebouwd en in stand gehouden moeten worden. Hierdoor kunnen de kosten van de splijtstofcyclus voor Nederlandse kerncentrales hoger zijn dan die van buitenlandse kerncentrales.

In de Nederlandse elektriciteitsmarkt worden door de systeembeheerder TenneT een deel van de kosten om onbalans tussen elektriciteitsvraag en -aanbod te herstellen in rekening gebracht bij elektriciteitsproducenten. In sommige buitenlandse elektriciteitsmarkten betalen alleen afnemers deze onbalanskosten. In geen van de beschouwde studies is vermeld dat rekening is gehouden met onbalanskosten die kunnen ontstaan bij het plotseling uitvallen van de kerncentrale (zie ook Paragraaf 4.4).

#### *Keuze verwerking nucleair afval*

De studie van MIT (MIT, 2003) gaat uitgebreid in op de kostenverschillen van de twee routes voor de verwerking van het nucleaire afval. Op basis van de analyses wordt geconcludeerd dat de route voor opwerking vier maal duurder is dan die van directe opslag. Dit is echter afhankelijk van de veronderstelde prijs voor uranium en de kosten van opwerking. Een studie van de Harvard University (Bunn et al., 2003) laat zien dat bij een prijs voor opwerking van \$1000 per kilogram zware metalen de uraniumprijs tot boven de \$360 per kilogram uranium moet stijgen om opwerking economisch aantrekkelijker te maken dan directe opslag van gebruikte splijtstof. Volgens deze studie zijn bij een uranium prijs van \$40 per kilogram de back-end kosten 80% hoger dan bij directe opslag.

In een studie naar geavanceerde splijtstofcycli (NEA, 2002) wordt een schatting gegeven voor de meerkosten van de partitioning en transmutatie (P&T) technologie. In vergelijking met een kerncentrale met een licht water reactor (LWR) waarbij directe opslag plaatsvindt, zullen de kosten van de splijtstofcyclus toenemen, waardoor de kostprijs van kernenergie met 10 tot 20% stijgt. Hierbij is de levensduur van het overgebleven kernafval kleiner dan 1000 jaar. Als alleen plutonium uit de opgebrande splijtstof wordt hergebruikt, stijgt de kostprijs met 7%. Hierbij wordt wel een reductie (met een factor 5) bereikt van de radiotoxiciteit van het kernafval, maar geen significante levensduurverkorting.

#### *Kosten van de vierde generatie kerncentrales*

Het ontwikkelingsprogramma voor kerncentrales van de vierde generatie neemt nog tenminste twintig jaar in beslag. Landen en bedrijven die deelnemen aan onderzoek en ontwikkeling op het gebied van vierde generatie reactoren verwachten dat zulke reactoren pas rond 2030 concurrerend kunnen worden met de huidige typen. Voor een enkele vierde generatie reactortype wordt geclaimd dat de bouwkosten circa de helft zouden kunnen bedragen in vergelijking met die van de huidige reactoren, dat wil zeggen \$900/kW in plaats van \$1800/kW (DoE, 2002). In hoeverre reactoren van de vierde generatie daadwerkelijk concurrerend zullen worden met bestaande reactortypen hangt af van de technologische ontwikkeling. Kerncentrales van de vierde

generatie zijn minder gevoelig voor de kosten van uranium, omdat deze reactorconcepten efficiënter met de splijtstof omgaan.

## 5.2 Economische rentabiliteit

De economische aantrekkelijkheid van kernenergie moet in een geliberaliseerde elektriciteitsmarkt beschouwd worden vanuit het perspectief van een investeerder. Voor een investeerder spelen hierbij drie vragen een rol:

### 1. *Wat is het te verwachten rendement op de investering?*

Het gaat hierbij om het rendement op het deel van de investering dat uit eigen vermogen wordt gefinancierd. Investerings worden ook met vreemd vermogen gefinancierd omdat dit een gunstig effect heeft op het rendement op eigen vermogen (het zogenoemde ‘hefboom effect’). Het rendement op eigen vermogen ligt in de elektriciteitssector in het Verenigd Koninkrijk sinds de liberalisering tussen de 7% en 12% per jaar (Oxera, 2005). Voor Nederlandse elektriciteitsproducenten kan van een vergelijkbaar niveau worden uitgegaan. Vanwege het risico van kostenoverschrijding en onzekere elektriciteitsprijzen zullen investeerders een rendement van 14 tot 16% noodzakelijk vinden (Oxera, 2005). Door Oxera is de economische rentabiliteit berekend van het rendement op eigen vermogen bij investering in een (eerste) nieuwe kerncentrale in het Verenigd Koninkrijk, waarbij de elektriciteitsprijs wordt gevarieerd van 37 tot 48 €/MWh. De elektriciteitsprijs is de parameter die het economische rendement van een kerncentrale het sterkst beïnvloedt. Het rendement op eigen vermogen (na belasting) ligt tussen 8 en 11%. Er is uitgegaan van investeringskosten van € 2356/kW, O&M en splijtstofkosten van 0,94 ct/kWh en een capaciteitsfactor van 95%.

### 2. *Is het te verwachten rendement beter dan bij een andere investering?*

De belangrijkste alternatieve optie voor een basislastcentrale is een kolencentrale (zie Paragraaf 4.3). De kostprijs (*levelized costs*) van verschillende andere typen wordt berekend door MIT (kolen, gas), Royal Academy of Engineering (kolen, gas, wind), NEA (kolen, gas) en IEA (kolen, gas, wind). Figuur 5.1 toont een vergelijking met de kostprijs voor kernenergie (voor meer details over de kostprijs van kernenergie, zie Tabel 5.3). Bij deze kostenindicaties is uitgegaan van de huidige technologie. Als gevolg van technologische ontwikkeling en ontwikkeling van de brandstofprijzen en de CO<sub>2</sub>-prijs kunnen de toekomstige kostprijzen anders zijn (bijv. voor kolen en aardgas hoger en voor wind lager). Wordt bij een kolencentrale CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag toegepast, dan zorgt dit voor een toename van de kostprijs. Deze toename varieert van -10% (d.w.z. lagere kosten) tot +46% in geval van kolenvergassing en toepassing van CO<sub>2</sub> voor *enhanced oil recovery* tot een kostprijstoename van +43% tot +91% in geval van poederkoolcentrale en geologische opslag uitgaande van omstandigheden zoals die in 2002 golden. In de toekomst zullen de kosten voor CCS (*Carbon Capture & Storage*) door research, technologische ontwikkeling en *economies of scale* naar verwachting afnemen (IPCC, 2005).

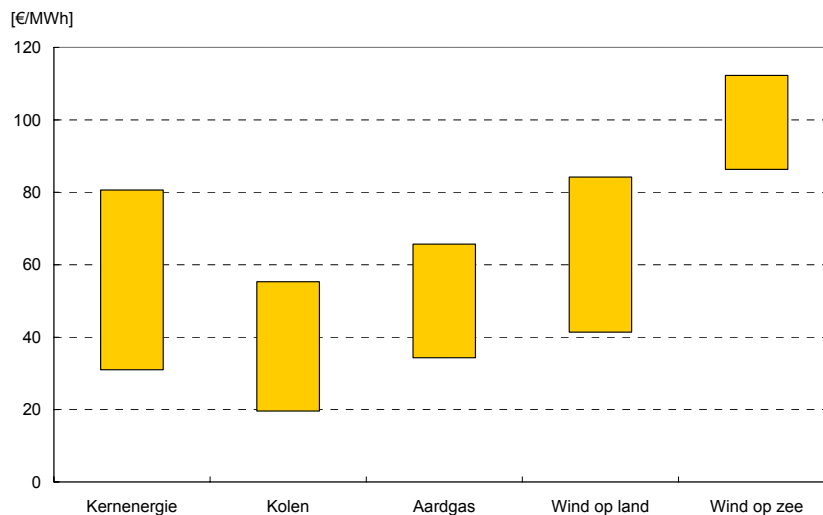
### 3. *Wat is het investeringsrisico?*

De grootste economische risico's voor een kerncentrale houden verband met de hoogte van de uiteindelijke investering (d.w.z. inclusief kostenoverschrijding en financieringslasten gedurende de bouwtijd), de hoogte van de elektriciteitsprijs gedurende de exploitatieperiode, langdurige storingsen en stillegging op last van de vergunningverlener (bijv. vanwege veiligheid). Op een aantal van deze risico's wordt hierna verder ingegaan.

### *Onzekerheid over de kosten*

Kernenergie wordt gekenmerkt door een hoge investering die moeten worden gedaan voordat een kerncentrale in bedrijf kan worden gesteld. Deze investering is bovendien onzeker waardoor reserveringen moeten worden gemaakt voor mogelijke kostenoverschrijdingen. Voor *contingency provisions* worden in de literatuur percentage genoemd die variëren 10 tot 30% (MIT, 2003 en Oxera, 2005), waarbij de laatste waarde wordt gebruikt voor een kerncentrale met een nieuw reactortype. Omdat gedurende de bouwfase al wel investeringen moeten worden gedaan, maar nog geen zekerheid bestaat over de opbrengsten zijn de financieringslasten in deze periode veel

hoger dan in de exploitatiefase (bijv. 10% tijdens bouw, tegen 7,5% tijdens exploitatie (Oxera, 2005)). In (MIT, 2003) wordt uitgegaan van een toeslag van 27,8% en in (DTI, 2006) van een toeslag van 45% boven op de nominale investering voor financieringslasten gedurende de bouwtijd. Ook de oorspronkelijke bouwtijd (de verschillende studies gaan uit van 4,5 tot 6 jaar) kan met enkele jaren worden overschreden. Hierdoor zullen opbrengsten pas later ontstaan, terwijl de financieringslasten (bouwrente) toenemen.



Figuur 5.1 *Vergelijking van de kostprijs van kernenergie met enkele andere elektriciteitsproductietechnologieën, uitgaande van de huidige status van die technologieën. De bandbreedte voor aardgas en kolen is gebaseerd op (MIT, 2003; Royal Academy of Engineering, 2004; NEA 2005 en IEA, 2006), waarbij de bovengrens voor kolen wordt bepaald door kolenvergassing. De bandbreedte voor wind op land is gebaseerd op (Royal Academy of Engineering, 2004 en IEA, 2006) en wind op zee op (Royal Academy of Engineering, 2004)*

De kosten die moeten worden gemaakt om aan het einde van de exploitatieperiode de kerncentrale te ontmantelen, moeten worden gedekt uit de exploitatieopbrengsten. De ontmantelingskosten liggen in de orde van 10 tot 15% van de investeringskosten (VROM, 2006) - op basis van cijfers uit Tabel 5.2 is dat € 160 tot € 380 miljoen - maar er wordt ook uitgegaan van hogere bedragen (€ 920 miljoen (DTI, 2006)). Hiervoor kan gedurende de exploitatie jaarlijks een dotatie worden gedaan in een ontmantelingfonds. Dit fonds kan vervolgens aangroeien op basis van rente dat op het kapitaal kan worden verkregen. Omdat de kapitaalaangroei over een lange periode plaatsvindt (20 tot 40 jaar), wordt de uiteindelijke omvang van het ontmantelingsfonds sterk beïnvloed door het veronderstelde rentepercentage. De vergunningverlener kan daarnaast bij in bedrijfname van de kerncentrale een waarborg verlangen, bijvoorbeeld in de vorm van een borgtocht of bankgarantie waardoor een derde partij financiële zekerheidsstelling geeft voor de ontmantelingskosten. De kosten voor de exploitant in de vorm van een premie aan de garantsteller zijn waarschijnlijk 0,5% tot 1% van de verwachte ontmantelingskosten per jaar (KPMG/NRG, 2006).

Andere operationele kosten, zoals onderhoud- en bedieningskosten, kosten voor splijtstofcyclus, inclusief kosten berging hoog radioactief afval, zijn bij kernenergie relatief gering, waardoor onzekerheden in deze kosten slechts een beperkte doorwerking hebben op de economische rentabiliteit.

#### *Onzekerheid in de opbrengsten*

De opbrengsten van een kerncentrale hangen van drie factoren af: (1) de elektriciteitsprijs, (2) de bedrijfstijd en (3) de exploitatieperiode. Kerncentrales hebben geen directe invloed op de

elektriciteitsprijs (zie Paragraaf 4.1). In de elektriciteitsmarkt is de elektriciteitsprijs afhankelijk van de variabele productiekosten van de marginale centrale. Dit is meestal een kolen- of gascentrale. Daardoor zijn de opbrengsten van de kerncentrale afhankelijk van de ontwikkeling van de fossiele brandstofprijzen en de CO<sub>2</sub>-prijs.

### ***Kosten Finse EPR***

In meerdere literatuurbronnen worden de investeringskosten van de EPR, die nu in Finland in aanbouw is (Olkiluoto-3), geschat op 1875 €/kW. Ook bestaan er verschillende kostprijsberekeningen van de elektriciteit die door deze kerncentrale zal worden geleverd. Die schattingen lijken alle te kunnen worden herleid tot één bron (Tarjanne & Rissanen, 2000), waarvan later een update is verschenen (Tarjanne & Luostarinen, 2004). Deze bron geeft een kostprijs van circa 24 €/MWh. De relatief lage kostprijs is mede het resultaat van een gehanteerde rente van 5% voor berekening van de kapitaalskosten. In latere berichten over een eerste te bouwen EPR in Frankrijk of Duitsland worden kostprijzen genoemd van 40 tot 45 €/MWh.

De nieuwe Finse kerncentrale is een first-of-a-kind van het EPR ontwerp. Het komt vaak voor dat een dergelijke eersteling gunstiger wordt geprijsd om marktaandeel te verwerven. Voor de tweede EPR die in Frankrijk (Flamanville) zal worden gebouwd worden inmiddels hogere investeringskosten genoemd (+10%). Er is geen gedetailleerde onderbouwing van de kosten voor de Finse EPR beschikbaar. Areva bouwt de centrale in Olkiluoto op basis van 'turnkey' voorwaarden, waarbij de risico's van kostenoverschrijding en vertraging in de bouw grotendeels ten laste komen van de leverancier. In het bedrag van € 3 miljard zijn de kosten van bouwrente, en splijtstof voor splijtstofwisselingen voorzien (Greenpeace, 2007).

### ***Bouwtijd en vertraging***

De bouwtijd was oorspronkelijk gepland voor 48 maanden. De bouw is in augustus 2005 begonnen met het storten van het eerste beton. In 2009 zou de bouw gereed moeten zijn. Inmiddels is de geplande opleverdatum met ruim anderhalf jaar vertraagd. De exploitant van de kerncentrale, TVO, denkt nu dat de centrale aan het einde van 2010 of het begin van 2011 gereed zal zijn (TVO, 2006).

### ***Financieringsconstructie***

De Finse EPR kent een bijzondere financieringsconstructie. Er zijn lange termijn afnamecontracten (circa 15 jaar) met een groep eindverbruikers afgesloten. Onder deze afnemers zijn industriële grootverbruikers van elektriciteit. De financiering is gebaseerd op 20% eigen vermogen en 80% lening (5% bij de aandeelhouders van TVO en 75% van banken) (Alting von Geusau, 2006). In (Greenpeace, 2007) wordt gemeld dat de banken leningen hebben verstrekt tegen een rente van 2,6%. De belangrijkste aandeelhouders van TVO zijn Fortum en PVO (60%). PVO is een non-profit organisatie van grote industriële stroomafnemers. Deze aandeelhouders hebben een afnamecontract ter grootte van het aandeel dat zij bijdragen in het eigen vermogen. De aandeelhouders dragen bij aan de investering en nemen een deel van het financieringsrisico voor hun rekening.

### ***Wijze van verwerking van radioactief afval en kosten ontmanteling***

Het Finse parlement heeft gelijktijdig met het besluit voor de bouw van Olkiluoto-3 het principe besluit genomen om op de Olkiluoto locatie de eindberging voor het radioactief afval te realiseren. Het Finse beleid is dat het splijtstofafval direct wordt opgeslagen dus niet opgewerkt. De vergunninghouder (TVO) dient de overheid financiële garanties te verstrekken voordat er wordt begonnen met het produceren van nucleair afval. Tevens is bij de vergunningaanvraag voor de bouw een gedetailleerde tijdplanning vereist voor het ontmantelen van de centrale en de eindberging. Hierbij dient ook een schatting van de kosten te worden gemaakt.

Een kerncentrale zal voor splijtstofwisseling en onderhoud periodiek moeten worden stilgelegd. Ook storingsen kunnen een reden zijn voor het uit bedrijf nemen (en langere tijd houden) van een kerncentrale. Bij kostenstudies wordt uitgegaan van een capaciteitsfactor. Omdat een kerncentrale op vollast capaciteit wordt bedreven, heeft deze factor betrekking op het veronderstelde aantal uren per jaar dat de centrale gemiddeld genomen in bedrijf is. In de gerefereerde studies (zie Tabel 5.1) varieert deze capaciteitsfactor tussen 80 en 90% (overeenkomend met 7008 en 7884 uur per jaar).

Een kerncentrale kan 40 tot 60 jaar in bedrijf blijven. Bij het in bedrijf stellen van een kerncentrale is zo'n lange exploitatieperiode niet gegarandeerd. Door gewijzigde inzichten met betrekking tot de veiligheid van kernenergie of vanwege andere (markt)omstandigheden kan de exploitant gedwongen zijn de kerncentrale eerder uit bedrijf te nemen. Om die reden wordt in economische analyses soms uitgegaan van een kortere periode, bijvoorbeeld 25 jaar (MIT, 2003 en Royal Academy of Engineers, 2004). Voor bankleningen is de termijn vaak nog korter, bijvoorbeeld 10 jaar (MIT, 2003).

### *Kostprijs kernenergie*

Een veel gebruikte manier om de economische rentabiliteit van een elektriciteitscentrale te beoordelen is het uitrekenen van de gemiddelde kostprijs (*levelized costs*) over de exploitatieperiode van de centrale. Met de kostprijs wordt in feite aangegeven hoe hoog de gemiddelde elektriciteitsprijs tenminste moet zijn om over de beoogde exploitatieperiode (economische levensduur) de operationele kosten, de rente over het geleende kapitaal en de belastingen te betalen, en het geïnvesteerde eigen vermogen terug te verdienen en daarop een bepaald rendement te realiseren. Voor het berekenen van de kostprijs van kernenergie wordt meestal uitgegaan van een exploitatieperiode van 40 jaar (zie Tabel 5.1). De EDF-studie (EDF, 2006) gaat uit van een periode van 60 jaar, maar het is niet duidelijk of de door EDF gerapporteerde kostprijs op deze exploitatieperiode is gebaseerd. In de MIT-studie (MIT, 2003), de studie van de Royal Academy of Engineering (Royal Academy of Engineering, 2004) en de IEA (IEA, 2006) worden ook kostprijsberekeningen gemaakt over een exploitatieperiode van 25 jaar. De termijn waarover het geïnvesteerd kapitaal wordt afgeschreven (i.v.m. belasting) en banklening wordt terugbetaald kan overigens korter zijn dan de exploitatieperiode waarover de kostprijs wordt uitgerekend. In de MIT-studie wordt uitgegaan van een afschrijvingstermijn van 15 jaar en een looptijd van de lening van 10 jaar (MIT, 2003).

Niet voor alle kostenstudies is duidelijk hoe de gehanteerde rente voor het berekenen van de kapitaalslasten is gedefinieerd. In (MIT, 2003) wordt uitgegaan van een gemiddelde rente (*weighted average cost of capital, WACC*) van nominaal 11,5% (rente op lening 8%, aandeel lening 50%, rendement op eigen vermogen 15%, inflatie 3%, belasting 38%), de IEA hanteert een WACC van 6,7 tot 9,6% (rente op lening 8 tot 10%, aandeel lening 40 tot 50%, rendement op eigen vermogen, 12 tot 15%, inflatie 2%, belasting 30%) en de DTI-studie veronderstelt een WACC van 10%. Tabel 5.3 toont een overzicht van de kostprijs die in de verschillende studies worden gerapporteerd (in €<sub>2006</sub>), met enkele van de daarbij gehanteerde parameters. Wordt ook hier de laagste waarde uit de NEA-studie buiten beschouwing gelaten, dan ligt de kostprijs van kernenergie volgens de kostenstudies tussen 31 en 80 €<sub>(2006)</sub>/MWh. Ter vergelijking: de gemiddelde prijs voor een jaarcontract voor basislast geleverd in 2007 die op de Nederlandse elektriciteitsmarkt in 2006 kon worden gecontracteerd was 65,91 €/MWh en op de Duitse markt 55,11 €/MWh (zie Paragraaf 4.1). Dit waren de hoogste gemiddelde prijzen voor basislast jaarcontracten sinds beide elektriciteitsmarkten zijn geliberaliseerd.

Tabel 5.3 *Kostprijs kernenergie volgens literatuurbronnen (generatie III kerncentrale; voor gebruikte splijfstof wordt gebruik gemaakt van directe opslag route die is gebaseerd op huidige technologie)*

Bron	Exploitatieperiode [jaar]	Capaciteitsfactor [%]	Rente [%]	Kostprijs [€ <sub>2006</sub> /MWh]
MIT, 2003	40	85	11,5	77*
	25	85	11,5	80*
Royal Academy of Engineering, 2004	40	90	7,5	35
	25	90	7,5	38
NEA, 2005			5	21-31
			10	28-47
DTI, 2006	40	80-85	10	54
EDF, 2006	60	>90		46
IEA, 2006	25-40	85	6,7-9,6	38-46

\* deze waarde wordt beïnvloedt door verandering van de \$/€-wisselkoers tussen 2002 en 2006

### 5.3 Externe kosten en baten

Bij toepassing van kernenergie kunnen externe kosten en baten ontstaan. Er is sprake van een 'externaliteit' als bij het exploiteren van de kerncentrale negatieve of positieve effecten ontstaan die ten laste komen van derden en niet in de prijs van kernenergie zijn verwerkt. Op basis van het principe 'de vervuiler betaalt' kan de overheid door middel van regelgeving ervoor zorgen dat externe kosten (gedeeltelijk) worden 'geïnternaliseerd' in de kostprijs (OECD-NEA, 2003). Voorbeelden hiervan zijn: kosten voor eindberging van het radioactieve afval, garanties voor dekking van de ontmantelingskosten bij start van de exploitatie van de kerncentrale (zie Paragraaf 6.4) en aansprakelijkheid voor schade bij derden door een kernongeval. Dat wil niet zeggen dat al deze kosten worden geïnternaliseerd. Zijn de feitelijke kosten voor eindberging hoger dan waarmee is rekening gehouden, dan komen ze ten laste van de overheid (zie Paragraaf 6.4) Op grond van de Wet aansprakelijkheid kernongevallen is de aansprakelijkheid van een exploitant van een kerninstallatie voor een kernongeval beperkt tot € 340 miljoen (dit zal worden verhoogd naar € 700 miljoen).

#### *Externe kosten van milieueffecten*

Hoewel regelgeving de milieueffecten kan beperken, blijven er resterende milieueffecten bestaan. Hiervan kunnen de externe kosten worden geschat. De externe kosten van milieueffecten over de levensduur van kernenergie kunnen worden bepaald met een methode die is ontwikkeld in het ExternE project (EU, 2003). De externe kosten zijn gebaseerd op veronderstelde schadekosten (bijv. gezondheidsschade) of vermijdingskosten (bijv. kosten van emissiereductie maatregelen). Een deel van de schadekosten heeft betrekking op de gezondheidsschade die ontstaat bij ongevallen, rekening houdend met de kans op ongevallen. De onzekerheden met betrekking tot de veronderstelde schade- of vermijdingskosten zijn relatief groot. De berekende externe kosten moeten vooral als indicatie worden gezien. In een rapport van de Europese Commissie (EU, 2003), dat is gebaseerd op ExternE, worden voor de levenscyclus van kernenergie externe kosten als gevolg van milieueffecten berekend van € 2,5 tot € 7 per MWh. Dit is qua orde van grootte vergelijkbaar met de externe kosten voor windenergie (€ 0,5 tot € 2,5 per MWh) en die van elektriciteit geproduceerd met zonnepanelen (€ 6 per MWh). Voor elektriciteit geproduceerd uit kolen (zonder CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag) zijn externe kosten berekend van € 20 tot € 150 per MWh en voor gas € 10 tot € 40 per MWh. De spreiding in de cijfers wordt onder meer veroorzaakt door verschillen in locatie, technologie en brandstofcyclus. Door veranderingen in de tijd kunnen de externe kosten van de milieueffecten zich wijzigen. In een studie die CE in opdracht van Greenpeace heeft uitgevoerd (CE, 2007b) zijn voor kernenergie externe kosten berekend van € 0,1 tot € 10 per MWh. Dit is exclusief de externe kosten van milieueffecten die het gevolg zijn van nucleaire ongevallen (kleine kans, maar groot effect). Deze zijn in de studie geschat op minimaal € 5 per MWh. Dit is een aanzienlijk hogere waarde dan de waarde van € 0,0046 per MWh, gerapporteerd wordt door de OECD (OECD-NEA, 2003)



### *Andere externe kosten*

Kosten die door de overheid moeten worden gemaakt met betrekking tot publieksvoorlichting over kernenergie, voor beveiliging van afvaltransporten, voor beveiliging tegen terroristische acties, etc. behoren tot de externe kosten. Ook tot de externe kosten kunnen worden gerekend de uitputting van uraniumvoorraden en gevolgen van proliferatie.

### *Externe baten*

In het rapport van de OECD (OECD-NEA, 2003) worden externe baten genoemd die kunnen ontstaan door toepassing van kernenergie. Externe baten kunnen bijvoorbeeld ontstaan door een gunstig effect op de energievoorzieningszekerheid. Toepassing van kernenergie zou ertoe kunnen bijdragen dat de elektriciteitsprijzen minder gevoelig worden voor prijsfluctuaties van fossiele brandstoffen (met name die van aardgas). Dit hangt echter af van de verhoudingen in de elektriciteitsmarkt en of voordelen die ontstaan bij hoge prijzen van fossiele brandstoffen worden doorgegeven aan de afnemers (zie Paragraaf 4.1).

Toepassing van kernenergie kan ertoe leiden dat de totale emissies van broeikasgassen en verzurende stoffen bij de elektriciteitsproductie lager worden (OECD-NEA, 2003). Feitelijk wordt het verkleinen van het negatieve externe effect van kolen- en gascentrales dan als een positief extern effect toegerekend aan kerncentrales. Met de introductie van een emissiehandelssysteem voor CO<sub>2</sub> worden de kosten voor CO<sub>2</sub>-emissies (gedeeltelijk) geïnternaliseerd in de elektriciteitsprijs. Er ontstaat een bate doordat de elektriciteitsprijs toeneemt als gevolg van de CO<sub>2</sub>-prijs (zie ook Paragraaf 4.1). De CO<sub>2</sub>-prijs is gebaseerd op de vermijdingskosten. Omdat de bate in de prijs is opgenomen, is geen sprake van een positief *extern* effect. De bate komt in principe terecht bij de exploitant van de kerncentrale.

## 6. Bestuurlijke aspecten

De overheid is verantwoordelijk voor de continuïteit van de energievoorziening op lange termijn en daarbij de zorg voor het milieu. De overheid formuleert doelstellingen en stelt randvoorwaarden aan bedrijven die de energielevering verzorgen en aan bedrijven en burgers die de energie gebruiken. Hierbij maakt de overheid afwegingen tussen economie, milieu en welzijn, zowel op korte als op lange termijn. Dit afwegingsproces heeft een sterk politiek karakter. Niettemin kunnen verschillende studies bijdragen aan dit afwegingsproces door inzicht te bieden in (1) de wijze waarop een afweging kan worden gemaakt en (2) welke argumenten hierbij een rol kunnen spelen.

In dit hoofdstuk wordt eerst ingegaan op het afwegingsproces in relatie tot de ontwikkeling van een duurzame energievoorziening en de eventuele rol van kernenergie hierbij (Paragraaf 6.1). Vervolgens komen in Paragraaf 6.2 voorwaarden aan de orde die, vanuit de optiek van duurzame ontwikkeling, aan kernenergie zouden kunnen worden gesteld.

In Europa bepalen de nationale overheden uiteindelijk zelf of, en zo ja, onder welke voorwaarden kernenergie een bijdrage kan leveren aan de nationale energievoorziening. Indirect speelt de Europese Unie echter wel een rol bij kernenergie. In Paragraaf 6.3 wordt deze rol kort geschetst. In Paragraaf 6.4 wordt ingegaan op de huidige stand van zaken bij het formuleren van eventuele randvoorwaarden voor Nederland en wordt een overzicht gegeven van procedures en regelgeving. Ter vergelijking wordt in Paragraaf 6.5 de situatie in enkele andere Europese landen besproken.

### 6.1 Duurzame ontwikkeling

De door de Verenigde Naties ingestelde World Commission on Environment and Development (Brundtland Commissie) omschrijft in haar rapport 'Our Common Future' (Brundtland, 1987) duurzame ontwikkeling als een ontwikkeling die voorziet in de behoeften van de huidige generatie zonder daarbij de behoeften van de toekomstige generaties in gevaar te brengen. Het concept van duurzame ontwikkeling gaat er bovendien van uit dat economische doelstellingen (economische groei), gecombineerd kunnen worden met sociale doelstellingen (welzijnsverbetering) en doelstellingen voor het milieu (verbetering milieukwaliteit). Dit concept wordt door overheden tegenwoordig ook als uitgangspunt gebruikt bij het energie- en milieubeleid. Met de Elektriciteitswet uit 1998 is bijvoorbeeld regelgeving tot stand gebracht waarmee het *betrouwbaar, duurzaam, doelmatig en milieuhygiënisch* verantwoord functioneren van de elektriciteitsvoorziening wordt beoogd.

Om van een conventionele naar een duurzame energievoorziening te komen, gebruiken Bruggink en Van der Zwaan (Bruggink en Van der Zwaan, 2002) het concept van 'duurzame energiepaden'. Voordat sprake kan zijn van een duurzame energievoorziening is er namelijk eerst een transitieproces nodig waarbij verschillende energietechnologieën op verschillende momenten in de tijd een rol vervullen. Naast technologische veranderingen ligt bij dit transitieproces de nadruk op maatschappelijke en institutionele aanpassingen. Volgens Bruggink en Van der Zwaan is duurzaamheid een normatief concept. Het is niet mogelijk met een bepaalde maat duurzaamheid objectief vast te stellen. Zij geven daarvoor twee argumenten. Het eerste argument heeft te maken met het feit dat duurzaamheid drie dimensies heeft: economie, sociaal, milieu. Er is een afweging nodig tussen de economische, sociale en milieudimensie. Daarnaast is het niet eenvoudig om voor elk van deze dimensies één enkele indicator te selecteren. Een uitgebreide analyse van economische, sociale en milieu-indicatoren voor het energiesysteem is uitgevoerd door de IEA/IAEA (IEA/IAEA, 2001). In dit document worden 41 verschillende indicatoren onderscheiden. De onderlinge afhankelijkheden van indicatoren zijn onderzocht en

maatregelen die in het energiesysteem kunnen worden genomen om de indicatoren te beïnvloeden worden aangegeven. Het IEA/IAEA-document geeft voor de verschillende indicatoren echter geen duurzaamheidcriteria.

Het tweede argument dat Bruggink en Van der Zwaan gebruiken bij hun stelling dat duurzaamheid een subjectief begrip is, heeft te maken met de grote onzekerheden bij de drie dimensies wanneer het gaat om lange termijn ontwikkelingen. Dit betekent dat bij duurzame ontwikkeling eigenlijk een keuze gemaakt moet worden tussen de aard en het niveau van de economische, sociale en milieurisico's die men op weg naar de duurzame energievoorziening aanvaardbaar acht. Die keuze wordt nog complexer. Duurzaamheid houdt ook in dat er een afweging gemaakt moet worden tussen de risico's die huidige generaties lopen ten opzichte van de risico's die toekomstige generaties krijgen toebedeeld. In beginsel kan men deze afwegingsproblematiek vereenvoudigen door de definitie van duurzaamheid te beperken tot één enkele dimensie, bijvoorbeeld een economische (Hueting, 1998, Hueting en Reynders, 2004) of een ecologische. Duurzaamheid wordt dan een meer objectieve maat. Maar dat betekent nog niet, dat daarmee de andere twee dimensies in de maatschappelijke besluitvorming minder gewicht zullen krijgen. Een manier om met de weging tussen economische, sociale en milieucriteria om te gaan wordt door Goodland en Daly (Goodland and Daly, 1996) gegeven. Zij onderscheiden vier niveaus van duurzaamheid (zwak, matig, sterk, zeer sterk), waarbij voor economie en milieu bepaalde algemene criteria worden gehanteerd.

Bij de besluitvorming over kernenergie speelt de afweging over te lopen risico's van huidige versus toekomstige generaties een belangrijke rol (denk bijvoorbeeld aan afvalproblematiek en proliferatie). Daarbij mag echter niet worden vergeten, dat dit eveneens het geval is voor elektriciteitsproductieopties die de kans op klimaatverandering vergroten of de belasting van het mondiale ecosysteem op lange termijn verzwaren (zoals bij kolencentrales). Rekening zal moeten worden gehouden met de implicaties die besluitvorming door de huidige generatie heeft voor komende generaties.

Er mag van worden uitgegaan dat bij duurzame energie paden de energie-efficiency en het aandeel hernieuwbare energie toenemen. In de komende decennia zal er echter een gat blijven bestaan tussen de energievraag en het duurzame energieaanbod. De hoofdvraag is dan hoe dit gat in te vullen (Bruggink en Van der Zwaan, 2002). Of kernenergie in deze overgangsfase een rol zal moeten en kunnen spelen hangt dan vooral af van welke afweging tussen de drie dimensies van duurzaamheid wordt gemaakt. Bruggink en Van der Zwaan merken op dat veel argumenten pro en contra kernenergie zijn gebaseerd op impliciete waardering van de economische, sociale en milieudimensie. Een afweging of kernenergie onder bepaalde omstandigheden en in een bepaalde periode een rol kan spelen in een duurzame energie pad, is volgens Bruggink en Van der Zwaan alleen mogelijk wanneer dit wordt gebaseerd op een beoordeling van de economische, sociale en milieurisico's van kernenergie *ten opzichte* van dergelijke risico's van andere energiebronnen die in het transitiepad een rol spelen. In dit rapport worden de milieurisico's besproken in Hoofdstuk 3, de sociale risico's in Hoofdstuk 2 (veiligheid, non-proliferatie, terrorisme) en in Hoofdstuk 6 (maatschappelijke acceptatie) en de economische risico's in Hoofdstuk 4 (elektriciteitsmarkt) en Hoofdstuk 5 (economische aspecten).

## 6.2 Duurzame ontwikkeling en voorwaarden voor kernenergie

Tegenover voordelen van kernenergie in de elektriciteitsvoorziening (o.a. emissiereductie van broeikasgassen, vermindering afhankelijkheid van fossiele brandstoffen) staan een aantal nadelen (o.a. risico kernreactorongevallen, radioactief afval, proliferatie). Indien kernenergie een rol zou kunnen spelen in een overgangsfase naar een duurzame energievoorziening, aan welke voorwaarden zou dan voldaan moeten worden? Op basis van twee literatuurbronnen wordt hieronder op deze vraag ingegaan.

In een studie van het Internationaal Energie Agentschap (IEA 1998) wordt geprobeerd een antwoord te geven op de vraag of kernenergie duurzaam is. Deze vraag wordt opgedeeld in drie subvragen:

1. Blijft de brandstof voor kernenergie beschikbaar?
2. Kan met kernenergie het milieu worden ontzien?
3. Is kernenergie op de lange termijn betaalbaar?

Volgens het IEA-rapport gaat het niet zozeer om de vraag of er voldoende uraniumreserves zijn, maar veel meer om de vraag hoe dit uranium optimaal te benutten. Hergebruik van splijtstof (opwerking) leidt tot een betere benutting. Geconcludeerd wordt dat kweekreactoren (zie Paragraaf 2.3.2) uiteindelijk de beste oplossing bieden voor de lange termijn beschikbaarheid van de splijtstof, omdat dan 75% van het natuurlijke uranium kan worden gebruikt in plaats van de huidige 2% (na verrijking). Er is beperkte ervaring met de kweekreactortechnologie en er zijn onduidelijkheden over de kosten op lange termijn. Over de veiligheid van de kweekreactortechnologie (incl. proliferatierisico's) wordt in het rapport niet gerept. Het rapport beschouwt het langlevende radioactief afval als het belangrijkste milieuprobleem van kernenergie. Er lijkt technologisch consensus te bestaan over de oplossing van ondergrondse berging, maar geconstateerd wordt dat de oplossing zeker nog niet sociaal is geaccepteerd. Een gefaseerde implementatie van ondergrondse berging verdient de voorkeur, omdat dan gebruik kan worden gemaakt van nieuwe wetenschappelijke inzichten. Geconstateerd wordt dat technologische ontwikkeling de veiligheid van de kernenergie heeft helpen verbeteren. De kosteneffectiviteit mag echter niet uit het oog worden verloren, omdat kernenergie anders niet meer concurrerend is met andere elektriciteitsproductieopties. Geconcludeerd wordt dat bij de voorwaarden voor kernenergie een balans moet worden gezocht tussen betaalbaarheid (van de veiligheid) en maatschappelijke acceptatie (ervan).

Turkenburg (Turkenburg, 1996, 2003) gaat in op de vraag aan welke voorwaarden kernenergie moet voldoen om te kunnen worden gekwalificeerd als een geschikte optie om op duurzame wijze te voorzien in de huidige en toekomstige energievraag. Hij onderscheidt negen verschillende aspecten en gaat in op voorwaarden voor zeven aspecten. Buiten beschouwing blijven: industriële ontwikkeling (lokale kennisinfrastructuur, belangstelling afnemers, spin offs, werkgelegenheid) en lock-in effecten (effect op ontwikkeling niet-kernenergie opties). Hieronder worden de voorwaarden samengevat van zeven aspecten:

1. *Publieke acceptatie van de kernenergie en de splijtstofcyclus*

Kernenergie is alleen maatschappelijk acceptabel wanneer eerst andere opties volledig zijn benut, zoals energiebesparing, duurzame energie en geavanceerd gebruik van fossiele brandstoffen. Kernenergie zou deze opties niet moeten blokkeren. Daarnaast moet kernenergie inherent veilig zijn, schoon, non-proliferatie beter waarborgen, betaalbaar en efficiënt omgaan met schaarse natuurlijke voorraden.

2. *Veiligheidsrisico's van kerncentrales en andere onderdelen van de splijtstofcyclus*

Een technologie die inherent veilig is (d.w.z. dat op basis van het ontwerp grote ongelukken als gevolg van technisch of organisatorisch falen zijn uitgesloten, zie Paragraaf 2.5.2) garandeert de technische veiligheid beter dan technologieën waarbij door technische en organisatorische maatregelen de kans op ongevallen sterk is gereduceerd, maar nog wel aanwezig is. Reactoren van de generatie III+, die zich nu nog in de demonstratiefase bevinden (zie Paragraaf 2.3.4), passen inherente veiligheid toe. Het concept van inherente veiligheid zou moeten gelden voor alle onderdelen van de splijtstofcyclus.

3. *Levensduur en beheer van nucleair afval, vooral het hoogradioactieve afval*

De lange levensduur van hoogradioactief afval lijkt meer een moreel probleem dan een technologisch probleem. Met partitioning en transmutatie kan de levensduur van hoogradioactief afval worden teruggebracht (zie Paragraaf 2.4.2). De vooruitzichten op succes van deze technologie zijn onzeker. Het gebruik van thorium in plaats van uranium kan ook bijdragen aan de oplossing van het afvalprobleem.

#### 4. *Verspreiding (proliferatie) van nucleair materiaal en kernwapens*

Er dient technologie voor reactoren en de splijtstofcyclus te worden ontwikkeld, waarbij minder of geen splijtstof ontstaat die geschikt is voor het maken van kernwapens. Deze technologie moet door elk land kunnen worden toegepast. Nucleair materiaal dat ontstaat in kernreactoren en geschikt is voor het maken van kernwapens, moet opgesloten zitten in de gebruikte splijtstof. Kernwapen geschikt materiaal dat niet zit opgesloten in gebruikte splijtstof of zich in verrijkings- en opwerkingsinstallaties bevindt, dient te worden opgeslagen in internationale centra die fysiek worden beveiligd door de IAEA.

#### 5. *Accumulatie van radioactieve stoffen in de biosfeer*

Emissies van radioactieve stoffen die in de biosfeer kunnen accumuleren (zoals krypton-85, zie Paragraaf 3.1.4) en negatieve milieueffecten veroorzaken moeten tot een minimum worden beperkt.

#### 6. *Schaarste van natuurlijke voorraden voor het vervaardigen van splijtstof*

De natuurlijke voorraden uranium en thorium zijn voldoende groot om in de splijtstofbehoefte te voorzien. Schaarste van natuurlijke voorraden kan niet als argument worden gebruikt om kernenergie te negeren bij duurzame ontwikkeling van de energievoorziening.

#### 7. *Kosten van kernenergie*

De kosten van kernenergie (met name de investeringskosten) zijn in de loop van de jaren toegenomen. Technologische innovatie moet ervoor zorgen dat kernenergie kan blijven concurreren met andere (toekomstige) bijna emissieloze energietechnologie, met inachtneming van maatregelen ten behoeve van nucleaire veiligheid, non-proliferatie en radioactief afval.

Hoewel over elk van de aangereikte argumenten discussie kan worden gevoerd (argumentatie m.b.t. natuurlijke voorraden verschillen nogal tussen beide studies), maken de IEA-studie en het overzicht van Turkenburg duidelijk dat kernenergie in zijn huidige vorm niet als duurzame technologie kan worden aangemerkt. In beide literatuurbronnen wordt gepleit, hoewel soms op verschillende onderdelen, voor een verdere ontwikkeling van de technologie. Onzekerheid blijft bestaan of de kernenergie op termijn aan alle genoemde duurzaamheidsvoorwaarden kan voldoen. Of kernenergie dan toch een rol kan spelen in een overgang naar een duurzame energievoorziening kernenergie, behoort tot het afwegingsproces dat in de vorige paragraaf is besproken.

### 6.3 Rol van de Europese Unie

Het Euratomverdrag is één van de grondverdragen van de Europese Unie. De oorspronkelijke doelstelling van het verdrag was het ontwikkelen van een Europese nucleaire industrie ten behoeve van de energievoorziening van de lidstaten. Tevens geeft het verdrag de Europese Commissie reguleringsbevoegdheden op het gebied van stralingsbescherming, splijtstofvoorziening en waarborging van niet-militair gebruik van kernenergie. Het verdrag maakt ook Europees nucleair onderzoek mogelijk en bevordert de uitwisseling van nucleaire kennis. Het verdrag is nog steeds van kracht.

De Europese Commissie heeft in 2003 geprobeerd met een integraal richtlijnenpakket over nucleaire veiligheid en radioactief afval de lidstaten te stimuleren tot het zoeken van een definitieve oplossing voor radioactief afval. Deze richtlijn is niet aangenomen. Wel is een consultatieproces op gang gebracht dat tot consensus moeten leiden binnen de EU over deze onderwerpen. Er is een werkgroep ingesteld die in 2007 aanbevelingen moet doen op het gebied van nucleaire veiligheid, veiligheid bij het beheer van bestraalde splijtstof en radioactief afval en financiële voorzieningen voor ontmanteling en radioactief afvalbeheer.

De Europese Commissie heeft geen bevoegdheden om de keuze te beïnvloeden van energiebronnen voor de energievoorziening, waaronder kernenergie. Deze keuze maken lidstaten zelf. De Europese Commissie pleit in het groenboek 'Een Europese strategie voor duurzame, concurrerende en continu geleverde energie' (EU, 2006) wel voor een transparant en objectief debat

over de toekomstige rol van kernenergie in de EU in verband met klimaatverandering en voorzieningszekerheid.

## 6.4 Randvoorwaarden voor kernenergie door de Nederlandse overheid

### *Energietransitie*

De Nederlandse overheid streeft naar een duurzame energievoorziening. Om te komen tot een duurzame energievoorziening is een transitie nodig. Door de overheid is een Interdepartementale Directie Energietransitie opgericht en een Task Force Energietransitie ingesteld. De Task Force heeft in 2006 een Transitie Actie Plan opgesteld (Task Force Energietransitie, 2006). Om op korte termijn CO<sub>2</sub>-reductiedoelstellingen te halen, wordt in dit transitieactieplan een ‘acceleratiepakket’ voorgesteld, omdat de bijdrage van nieuwe technologieën aanvankelijk nog beperkt zal zijn. Dit acceleratiepakket bestaat uit extra energiebesparing, extra windenergie op zee, en overgangstechnologieën zoals schoon fossiel (bijvoorbeeld kolenvergassing en CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag) en kernenergie. Met het acceleratiepakket wordt een ontkoppeling beoogd van economische groei en CO<sub>2</sub>-emissies van de energieproductie.

Het transitiebeleid wordt door de SER in hoofdlijnen ondersteund (SER, 2006). De SER doet in zijn advies over het toekomstige energiebeleid geen uitspraak over de inhoud van het acceleratiepakket. Wel komt hij met een aantal concrete adviezen om de rol van het bedrijfsleven en sociale partners bij het transitieproces te versterken.

### *Het recente overheidsbeleid*

Door het huidige kabinet (Balkenende IV) zijn de volgende doelstellingen geformuleerd: een energiebesparing van 2% per jaar, een verhoging van het aandeel duurzame energie tot 20% in 2020 en een reductie van de uitstoot van broeikasgassen van 30% in 2020 ten opzicht van 1990. In het project ‘Schoon en Zuinig’ wil het kabinet maatregelen nemen om deze doelstellingen te bereiken. Voor de elektriciteitsproductie wordt gedacht aan verdere ontwikkeling van windenergie (onder meer een verdubbeling van windenergie op land) en één of twee demonstratieprojecten voor CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag (Nederlandse regering, 2007).

In het coalitieakkoord van de huidige regering (CDA/PvdA/ChristenUnie, 2007) is afgesproken dat in deze kabinetsperiode er geen nieuwe kerncentrales worden gebouwd.

### *Randvoorwaarden nieuwe kerncentrales*

Op 20 januari 2006 is door de vorige regering (Balkenende III) een voorstel voor wijziging van de Kernenergiewet ingediend bij de Tweede Kamer. Het voorstel heeft ondermeer betrekking op het beperken van de vergunningstermijn tot ten hoogste veertig jaar, het verlenen van financiële zekerheid voor de kosten die zijn verbonden aan de buitengebruikstelling en ontmanteling van kerncentrales en de mogelijkheid om de keuze voor het al dan niet opwerken van bestraalde splijtstoffen te beïnvloeden. De Tweede Kamer heeft de wetswijziging op 23 februari 2006 besproken en de regering heeft op 19 september 2006 een schriftelijke reactie gestuurd (nota naar aanleiding van het verslag). De minister van VROM van het nieuwe kabinet (Balkenende IV) heeft op 20 april 2007 de Tweede Kamer meegedeeld er de voorkeur aan te geven om de behandeling van de wetswijziging voort te zetten nadat door de Algemene Energieraad advies is uitgebracht over de brandstofmix voor elektriciteitsopwekking en de SER over kernenergie (Tweede Kamer, 30 429, nr. 1 t/m 9). De Tweede Kamer kan hiervan echter afwijken.

Op 6 oktober 2006 heeft de staatsecretaris van VROM in een brief aan de Tweede Kamer (VROM, 2006), randvoorwaarden aangegeven waarmee rekening zou moeten worden gehouden bij initiatieven voor het bouwen van nieuwe kerncentrales in Nederland. De staatsecretaris gaat in de brief niet in op de vraag of uitbreiding van kernenergie in Nederland wenselijk of noodzakelijk is, maar geeft enkel de randvoorwaarden aan waaronder met deze uitbreiding zou kunnen worden ingestemd. De randvoorwaarden hebben betrekking op toepassing van nieuwe kerncen-

trales, radioactief afval en opwerking, ontmanteling, locatiekeuze, uraniumwinning, non-proliferatie en beveiliging en anti-terreurmaatregelen. De randvoorwaarden staan in Tabel 6.1 integraal weergegeven. De randvoorwaarden zijn opgesteld voor een politieke discussie. De overwegingen die bij de randvoorwaarden een rol spelen en in de brief worden genoemd, hebben een rol gespeeld bij de schriftelijke reactie van de staatsecretaris op de behandeling van de wijziging van de Kernenergiewet in de Tweede Kamer. Bij de voorzetting van de behandeling van de wetwijziging zal de nieuwe regering rekening houden met de schriftelijke reactie en indirect dus ook met de randvoorwaardenbrief.

### *Procedures en regelgeving*

Nadat politieke besluitvorming heeft plaatsgevonden over de randvoorwaarden, zullen in de gewijzigde Kernenergiewet de voorwaarden worden vastgelegd die de overheid aan kernenergie verbindt. Bij de Kernenergiewet zijn drie ministeries betrokken: Ministerie van VROM, Ministerie van Economische Zaken en het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid. De drie ministers beslissen gezamenlijk over de vergunningverlening. De Kernenergiewet is een raamwet waarin geen gedetailleerde veiligheidsregels zijn opgenomen. Meer gedetailleerde regelgeving is opgenomen in Algemene Maatregelen van Bestuur (AMvB's). De daarin opgenomen Nucleaire Veiligheidsregels (NVR's) zijn afgeleid van 'standards' (eisen en richtlijnen) van de IAEA. De IAEA heeft onder andere als taak het ontwikkelen van veiligheidsregels voor de bescherming tegen nadelige gevolgen van de toepassing van kernenergie voor vreedzame doeleinden. De IAEA beziet eenmaal in de vijf jaar recente ontwikkelingen en past de regelgeving dienovereenkomstig aan. De laatste modernisering heeft plaats gevonden in 2000.

Op basis van de Wet op Ruimtelijke ordening stelt de rijks- en provinciale overheid ruimtelijke plannen op waarin ruimte wordt gereserveerd voor elektriciteitscentrales. De ruimtelijke plannen van de rijksoverheid worden planologische kernbeslissing genoemd en die van de provincies streekplannen. Het Tweede Structuurschema Elektriciteitsvoorziening uit 1994, dat deel uitmaakt van de planologische kernbeslissing, is nog steeds van kracht. Hierin staat dat het beleid ter waarborging van vestigingsplaatsen voor het gebruik van kernenergie, zoals neergelegd in de regeringsbeslissing voor vestigingsplaatsen van kerncentrales (Kamerstukken II, 1985-1986, 18 830, nrs 46-47), van kracht blijft. Het gaat om de volgende vijf locaties: Westelijke Noordoostpolderdijk, Moerdijk, Eemshaven, Maasvlakte en Borssele. Het beleid houdt in dat er geen ruimtelijke ontwikkelingen mogen plaatsvinden die de bouw van kerncentrales op die locaties onmogelijk maken of ernstig belemmeren. Het Ministerie van VROM heeft een globale beoordeling gemaakt van de mogelijke vestigingslocaties voor een kerncentrale op verschillende milieuaspecten: bodem, oppervlaktewater, geluid, straling, externe veiligheid, natuur, landschap, cultuurhistorie en archeologie en op de mogelijkheden tot restwarmtebenutting. Hieruit kwam naar voren dat voor locaties Borssele en Eemshaven minder bezwaren zouden kunnen gelden dan voor de andere locaties (VROM, 2006). Bij deze locaties hoeft een kerncentrale ook geen koelwater te lozen op oppervlaktewater dat gebruikt wordt als zoetwatervoorraad, hetgeen minder wenselijk is (VROM, 2006). De Minister van Economische Zaken zal binnenkort de Derde Structuurschema Elektriciteitsvoorziening publiceren. Hierin zal in principe de ruimtelijke reservering worden opgenomen van de huidige locaties en zal blijken in hoeverre deze mogelijke vestigingsplaatsen gehandhaafd kunnen blijven.

De exploitant van een nieuwe kerncentrale zal naast een vergunningaanvraag in het kader van de Kernenergiewet, ook vergunningen moeten aanvragen in kader van de Wet verontreiniging oppervlaktewateren, de Woningwet, de Natuurbeschermingswet en mogelijk nog andere wetten. Bovendien zal een milieueffectrapport moeten worden opgesteld. In de milieueffectrapportage dienen de milieueffecten van de kerncentrale te worden beschreven en ook die van alternatieven. De overheid zal moeten vaststellen of er sprake is van grensoverschrijdende effecten. In dat geval zal op grond van het ESPOO verdrag, overleg nodig zijn met omliggende landen.

Tabel 6.1 *Randvoorwaarden nieuwe kerncentrales (VROM, 2006)*

Onderwerp	Randvoorwaarden
<i>Toepassing van nieuwe kerncentrales</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. De kerncentrale moet van een beproefd type zijn en moet niet als 'prototype' zijn te beschouwen.</li> <li>2. De kerncentrale moet volgens de laatste stand der techniek zijn ontworpen en worden gebouwd en bedreven. Om beslissingen te kunnen bespoedigen, zou zoveel mogelijk gebruik gemaakt moeten worden van buitenlandse ervaringen met certificering van moderne centrales en bijbehorende regelgeving.</li> <li>3. De kerncentrale dient zoveel mogelijk gebruik te maken van passief en automatisch werkende veiligheidssystemen.</li> <li>4. De kerncentrale moet tenminste voldoen aan de technische eisen die gelden krachtens de Nederlandse regelgeving (waaronder de Nucleaire Veiligheidsregels en -richtlijnen).</li> <li>5. Vanuit veiligheidsoogpunt dient verder verzekerd te zijn dat: <ol style="list-style-type: none"> <li>a. de kans op een kernsmeltongeval kleiner is dan 1 keer in de miljoen jaar,</li> <li>b. er voorzieningen zijn die voorkomen dat bij kernsmeltongevallen de kern buiten het containment geraakt (zoals een 'core-catcher'),</li> <li>c. er voorzieningen zijn die voorkomen dat na het optreden van kernsmelt grote lozingen optreden die het treffen van preventieve maatregelen in de omgeving van de centrale noodzakelijk maken,</li> <li>d. de omhulling bestand is tegen hoge overdruk van binnenuit en tegen vliegtuigcrashes van buitenaf,</li> <li>e. de kerncentrale over een lange responstijd beschikt in geval van ongevallen.</li> </ol> </li> </ol>
<i>Radioactief afval en opwerking</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Het principe 'de vervuiler betaalt' blijft onverkort geldig; de beheerskosten voor het radioactief afval worden verdisconteerd in de elektriciteitsprijs.</li> <li>2. Voorafgaand aan het in bedrijf gaan van een nieuwe kerncentrale, maar uiterlijk in 2016, moet er door de overheid een besluit genomen zijn omtrent de eindbestemming voor het radioactief afval, tenzij eventuele Europese regelgeving tot een besluit op een eerdere datum verplicht.</li> <li>3. Voor onderzoek naar een duurzame eindbestemming van radioactief afval moet een fonds worden opgezet waarin zowel de overheid als de industrie deelnemen volgens een van te voren af te spreken verdeelsleutel. Exploitanten van nieuwe kerncentrales moeten hier vanaf het begin aan bijdragen.</li> <li>4. Toepassing van partitioning en transmutatie (P&amp;T) heeft de voorkeur als verwijderingsmethode, maar zolang dit geen praktisch alternatief vormt, wordt voor 2025 geen definitief besluit genomen over de verwijderingsmethode van gebruikte splijtstof.</li> <li>5. Als P&amp;T in 2025 geen praktisch alternatief vormt, dan zal alsnog een keuze gemaakt moeten worden tussen opwerken of directe opslag, al dan niet in interimverpakkingen. In geval de keuze opwerking is, dan zullen daarbij aanvullende eisen kunnen worden gesteld door de overheid in het kader van het verkrijgen van de benodigde vergunning voor het zich ontdoen met het oog op opwerking.</li> </ol>
<i>Ontmanteling</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Er dient een helder ontmantelingsbeleid te zijn waarin de keuze voor directe ontmanteling wordt vastgelegd.</li> <li>2. Vanaf het moment dat de kern voor het eerst beladen wordt met splijtstof, moeten de kosten voor de buitengebruikstelling en ontmanteling voor 100% gedekt zijn. Dit kan met behulp van een verzekering, bankgarantie, onderpand of andere voorziening die evenveel waarborgen biedt.</li> <li>3. Gedurende de operationale bedrijfsfase zal door middel van jaarlijkse dotaties een fonds gevuld moeten worden, waarvan de gelden op het moment dat de centrale buiten gebruik wordt gesteld beschikbaar moeten zijn. Tijdens de opbouwfase van het fonds zal het verschil tussen de hoeveelheid aanwezig in het fonds enerzijds en de geschatte kosten voor buitengebruikstelling en ontmanteling anderzijds met garanties gedekt moeten blijven.</li> <li>4. De fondsen voor decommissioning moeten voldoen aan vereisten met betrekking tot de geschiktheid, de beschikbaarheid en het gebruik ervan.</li> <li>5. Het beheer van de fondsen voor decommissioning en de controle daarop moet transparant en adequaat geregeld zijn.</li> </ol>



Tabel 6.1 (vervolg) *Randvoorwaarden nieuwe kerncentrales (VROM, 2006)*

Onderwerp	Randvoorwaarden
<i>Locatiekeuze</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Het heeft de voorkeur dat de locatie in de nabijheid van de zee ligt in verband met lozing van koelwater. Lozing van koelwater op oppervlaktewater dat gebruikt wordt als zoetwater voorraad is minder wenselijk.</li> <li>2. De locatie moet niet in een straal van 5 km van een dichtbevolkt gebied liggen zolang er geen sprake is van een inherent veilige kerncentrale en bij ongevallen preventiemaatregelen (evacuatie e.d.) mogelijk moeten blijven.</li> <li>3. Bij de koelwaterinlaatvoorzieningen dienen effectieve technieken te worden toegepast om mogelijke schade aan waterfauna te voorkomen.</li> <li>4. De visuele hinder moet zoveel mogelijk beperkt worden, b.v. door het ontbreken van de noodzaak van een (hoge) koeltoren, of omdat goede inpassing daarvan in het landschap mogelijk is.</li> <li>5. Aan- en afvoer van nucleaire brandstof en radioactief afval moet bij voorkeur ook per spoor en per schip mogelijk zijn.</li> <li>6. Bij de locatiekeuze moet rekening worden gehouden met de daaraan te stellen criteria als vermeld in de toepasselijke IAEA Safety Requirements (Site Evaluation for Nuclear Installations).</li> </ol>
<i>Uraniumwinning</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. De mijnbouw, extractie en vervolprocessen die benodigd zijn voor het verkrijgen van uranium voor splijtstof, moeten op een zo verantwoord mogelijke manier plaatsvinden.</li> <li>2. Dit houdt onder meer in dat de uranium bij voorkeur betrokken dient te worden uit landen die een milieuvriendelijke benadering bij de mijnbouw toepassen waarvan landschapsherstel na sluiting onderdeel uitmaakt. Voorzover overzien kan worden geldt dit nu voor landen als Canada en Australië en in de toekomst mogelijk ook voor Kazachstan.</li> <li>3. Het mijnbouwbedrijf dient tenminste ISO 14001 gecertificeerd te zijn en een goede reputatie te hebben op het gebied van verantwoord omgaan met natuur en milieu.</li> <li>4. De volgende voorkeursvolgorde geldt voor de herkomst van het uranium naar type mijnbouw: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. winning middels oplossingsmijnbouw (dus ondergronds),</li> <li>2. winning via dagbouw of ondergrondse mijnbouw met maximale inspanning om milieubelasting nu en in de toekomst te minimaliseren.</li> </ol> </li> </ol>
<i>Non-proliferatie</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Iedere kerninstallatie valt op grond van het Euratomverdrag en het Non-proliferatieverdrag, inclusief de Waarborgenovereenkomst en het Additioneel Protocol, onder internationaal toezicht van het IAEA en Euratom om de verspreiding van splijtbaar nucleair materiaal tegen te gaan, dus dit geldt ook voor een nieuwe kerncentrale.</li> <li>2. Alvorens een nieuwe kerncentrale in bedrijf genomen kan worden dient er een volledige rapportage plaats te vinden in het kader van de vigerende verdragen en overeenkomsten inzake non-proliferatie.</li> </ol>
<i>Beveiliging en anti-terreurmaatregelen</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bij het ontwerp van de kerncentrale dient rekening te worden gehouden met mogelijke voorzieningen en maatregelen om de beveiliging te optimaliseren.</li> <li>2. Voordat een kerncentrale in bedrijf genomen mag worden, dient zeker te zijn gesteld dat voldaan wordt aan de bepalingen van het (aangepaste) Verdrag inzake de Fysieke Beveiliging van Kernmateriaal en Kerninstallaties en aan de meest recente versie van INFCIRC/225. De dreigingsbeelden dienen duidelijk en actueel te zijn en de beveiligingsmaatregelen en -voorzieningen dienen daarop afgestemd te zijn.</li> </ol>
<i>Kennisinfrastructuur</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. De overheid moet voldoende middelen en bevoegdheden hebben om taken te kunnen uitoefenen.</li> <li>2. Het bevoegd gezag in het kader van de Kernenergiewet moet onafhankelijk kunnen opereren van 'promotors' van kernenergie en van het (nucleaire) bedrijfsleven.</li> <li>3. Er moeten voldoende opleidingsmogelijkheden voor deskundigen zijn. De financiering daarvan zou mede ondersteund moeten worden door de nucleaire industrie.</li> <li>4. Er moet voldoende onderzoek kunnen plaatsvinden met betrekking tot nucleaire veiligheid. Dat hoeft niet noodzakelijk in Nederland plaats te vinden, maar kennis en capaciteit moeten wel verzekerd blijven. Gemeenschappelijke financiering van onderzoek door de overheid en het nucleaire bedrijfsleven moet overwogen worden.</li> </ol>

Voor besluitvorming door de overheid gelden inspraakmogelijkheden waarbij burgers bezwaar en/of beroep kunnen instellen tegen deze besluiten. Gelet op het aantal te nemen besluiten en de inspraakmogelijkheden en mogelijkheden tot bezwaar en beroep die daarbij gelden, is het niet goed mogelijk te voorspellen hoeveel voorbereidingstijd er uiteindelijk nodig is, voordat met de daadwerkelijke bouw van een nieuwe kerncentrale kan worden begonnen. Waarschijnlijk zal rekening gehouden moeten worden met een periode van vijf tot zeven jaar (VROM, 2006).

In kader van de Wet op de Ruimtelijke Ordening kan de overheid gebruik maken van de Rijksprojectenprocedure, waarbij de rijksoverheid de regie voert over de publieke besluitvorming en de procedures beter op elkaar kan afstemmen en efficiënter kan laten verlopen. Het is echter niet duidelijk of de Rijksprojectenprocedure kan worden toegepast (VROM, 2006).

De Kernfysische dienst (KFD) van VROM is betrokken bij de beoordeling van het ontwerp van nieuwe kerncentrales en ziet toe op naleving van de kernenergievergunning. Bij het vervoer van radioactieve stoffen is de Vervoersinspectie van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat de toezichthoudende instantie.

De overheid zal niet iedereen een vergunning voor een kerncentrale verlenen. De exploitant van een kerncentrale moet over een bepaalde deskundigheid beschikken om een veilige bedrijfsvoering te garanderen. In een kerncentrale wordt omgegaan met materialen die proliferatiegevoelig zijn. Om deze reden zal de overheid de betrouwbaarheid beoordelen van de personen die het bestuur vormen van de onderneming die de vergunning aanvraagt. Daarnaast zal een beoordeling worden gemaakt of de onderneming over voldoende middelen beschikt (eigen vermogen, financiële middelen, zeggenschap, voldoende en deskundig personeel) om gedurende de gehele voorziene bedrijfstijd een veilige bedrijfsvoering te verzekeren en aan alle verplichtingen te voldoen. Ook moet de onderneming voldoen aan in de in Nederland geldende Nucleaire Veiligheidsregels en -richtlijnen die op basis van aanbevelingen van de IAEA zijn vastgesteld.

### *Overheidsondersteuning*

De Nederlandse overheid hanteert voornamelijk als uitgangspunt dat in een geliberaliseerde energiemarkt de bouw van kerncentrales niet moet worden gestimuleerd noch worden belemmerd. Dat wil zeggen dat geen sprake kan zijn van overheidssubsidies of steunmaatregelen die de bouw van kerncentrales aantrekkelijk maken of heffingen of belastingen worden ingesteld die de bouw van kerncentrales zal bemoeilijken (VROM, 2006).

Overheidskosten voor vergunningverlening en toezicht worden gedekt door de vergunninghouders. De vergunninghouders van nucleaire installaties zijn volgens het bijdragebesluit van de Kernenergiewet verplicht tot het betalen van wettelijk vastgestelde jaarlijkse bedragen aan de staat.

Op grond van Wet aansprakelijkheid kernongevallen is de exploitant van kerncentrales aansprakelijk voor de schade die is veroorzaakt door een kernongeval. Deze aansprakelijkheid is op grond van internationale verdragen beperkt tot € 340 miljoen (dit zal worden verhoogd naar € 700 miljoen). Als de schade groter is, dan stelt de overheid openbare middelen beschikbaar om de schade te vergoeden tot een bedrag van € 2.269 miljoen.

Een exploitant van een kerncentrale is verantwoordelijk en draagt de kosten van beveiligingsmaatregelen van de kerncentrale (b.v. beveiligingsdienst, extra hek, controleapparatuur e.d.). Dit neemt niet weg dat ook de overheid kosten kan maken voor ongevalbestrijding en beveiligingsmaatregelen in zoverre deze behoren tot de normale overheidstaken (optreden in het kader van de openbare orde en individuele veiligheid van personen) en -privileges (geweldgebruik).

### *Verwerking en opslag van nucleair afval*

In Nederland is de overheid verantwoordelijk voor de opslag van nucleair afval. Hiervoor is het Centrale Organisme Voor Radioactief Afval (COVRA) opgericht waarvan de Nederlandse

Staat de enige aandeelhouder is. Het huidige beleid gaat uit van langdurige bovengrondse opslag (100 jaar) in gebouwen bij COVRA. In deze periode zal een definitieve oplossing voor het radioactieve afval moeten worden gevonden (VROM, 2002). Een groot deel van het laag- en middelradioactieve afval zal in een periode van 100 jaar zijn vervallen tot niet-radioactief afval. Langdurige opslag van het hoogradioactieve afval bij COVRA, ook al gebeurt dat volgens de overheid onder gecontroleerde en veilige condities, wordt niet als een definitieve oplossing beschouwd. Uiteindelijk zal het radioactieve afval in een ondergrondse eindberging opgeborgen moeten worden. Een beslissing hierover zal vóór 2016 worden genomen (VROM, 2006). De kosten van opslag van nucleair afval worden gedragen door de partijen die radioactief afval bij de COVRA aanleveren. De tarieven die de COVRA rekent dekken ook de kosten voor de definitieve ondergrondse eindberging. Financiële risico's die samenhangen met het feit dat voor deze ondergrondse eindberging nog geen keuze is gemaakt, liggen bij COVRA, in casu de Nederlandse overheid.

Op grond van de huidige Kernenergiewet kan de overheid op dit moment geen invloed uitoefenen op de keuze tussen opwerking of directe opslag van gebruikte splijtstof. De Tweede Kamer heeft de regering verzocht de Kernenergiewet op dit punt aan te passen (Tweede Kamer, 2004). Dit heeft geleid tot een wetsvoorstel tot aanpassing van de Kernenergiewet, waardoor een vergunning nodig zal zijn voor opwerking van gebruikte splijtstof. De overheid zal eisen formuleren op grond waarvan een vergunning voor opwerking kan worden verleend, dan wel worden geweigerd. De eisen die kunnen worden gesteld zullen ondermeer betrekking hebben op de bestemming van het plutonium (bijvoorbeeld de bepaling dat plutonium uitsluitend voor civiele doeleinden mag worden ingezet), de opslag van plutonium in het land waar de opwerking plaatsvindt en overdracht of gebruiksrecht aan een ander land of internationale organisatie. Aan het gebruik van MOX, dat geproduceerd wordt met uit Nederland afkomstig plutonium, kunnen ook voorwaarden worden verbonden.

## 6.5 Situatie in andere Europese landen

Over de toekomstige rol van kernenergie nemen overheden in andere Europese landen een nogal wisselende positie in. Landen als Duitsland, België en Zweden hebben enkele jaren geleden besloten, al dan niet conditioneel, de rol van kernenergie in de nationale energievoorziening op termijn te beëindigen (uit te faseren). Finland en Frankrijk hebben besloten kernenergie in hun nationale energievoorziening te handhaven of, in geval van Finland, uit te breiden. In deze landen zullen nieuwe kerncentrales in gebruik worden genomen. Het voorlopige standpunt van de overheid in het Verenigd Koninkrijk is dat kernenergie in de energievoorziening een rol zou moeten blijven spelen. De Engelse overheid overweegt het bouwen van nieuwe kerncentrales mogelijk te maken.

Hierna wordt eerst ingegaan op het beleid rond kernenergie en nucleair afval in België, Duitsland en Zweden, landen die hebben besloten kernenergie op termijn 'uit te faseren'. Daarna komt het beleid aan de orde van landen die de rol van kernenergie willen continueren of uitbreiden - Finland, Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk. Hierbij wordt ingegaan op de argumenten voor continuering en de besluitvorming rond nieuwe kerncentrales. Tenslotte wordt een kort overzicht gegeven van het beleid dat in de besproken landen wordt gevoerd met betrekking tot verwerking en opslag van gebruikte splijtstof.

### 6.5.1 Uitfasering van kernenergie

#### *België*

In België is in 2003 een wet aangenomen die voorziet in het buiten bedrijf stellen van de kerncentrales in de periode 2015-2025 (IEA, 2006a). De wet bevat een artikel dat de bouw van nieuwe kernreactoren uitsluit en de bedrijfsperiode van bestaande reactoren begrenst op 40 jaar. Deze 'uitfasering' kan worden tegengehouden door omstandigheden van 'force majeure'. Naar het

zich laat aanzien, zullen factoren zoals energievoorzieningszekerheid, beoogde vermindering van broeikasgasemissies en de economie een rol spelen bij de vaststelling of sprake is van ‘force majeure’. In feite kan een aanbeveling wat betreft de voorzieningszekerheid van België van kant van de regulator voor elektriciteit en gas, CREG (Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas) voldoende zijn om ‘force majeure’ in te roepen (WNA, 2007a).

#### *Duitsland*

In juni 2001 heeft de regering van SPD en ‘Bündnis 90/Die Grünen’ een akkoord gesloten met de vier belangrijkste energiebedrijven in Duitsland die kerncentrales in exploitatie hebben. Het akkoord behelst een plafond aan de elektriciteitsproductie van de reactoren van 2623 TWh. Dit betekent dat de levensduur van de 19 kernreactoren is begrensd op gemiddeld 32 jaar. Het is mogelijk om productie van de ene naar de andere reactor ‘over te hevelen’. Afgezien van deze mogelijkheid, wordt volgens het akkoord de laatste kernreactor in Duitsland in 2022 gesloten (WNA, 2007a).

#### *Zweden*

Zweden heeft in 1980 een referendum gehouden over kernenergie. Een meerderheid van de bevolking was voor sluiting van de kerncentrales. Een parlementaire commissie concludeerde dat een volledige uitfasering in 2010 niet mogelijk was. In 1998 en 2001 zijn twee reactoren (Barsebäck) gesloten. De Zweedse overheid is in overleg met de eigenaren van de resterende tien reactoren over sluiting in de periode 2012-2025. Sommige politieke partijen stellen inmiddels het uitfaseringsbeleid in Zweden ter discussie (WNA, 2007a).

### 6.5.2 Nieuwe kerncentrales

#### *Finland*

In 2002 is door de Finse regering ingestemd met de vergunningaanvraag voor de bouw van een nieuwe kerncentrale. Ook het Finse parlement heeft met het besluit ingestemd. Voor Finland gaat het om de uitbreiding van kernenergie met een vijfde reactor (27% van de Finse elektriciteit wordt geproduceerd met de huidige vier kerncentrales). De belangrijkste argumenten voor deze uitbreiding waren de vermindering van de afhankelijkheid van gasimporten uit Rusland en een bijdrage aan de reductie van broeikasgassen. De argumenten van de vergunningaanvrager, het Finse elektriciteitsbedrijf TVO, waren lage productiekosten voor elektriciteit en geringe gevoeligheid voor prijsfluctuaties. In Finland is het Ministerie van Handel en Industrie verantwoordelijk voor de regelgeving en de ‘Radiation and Nuclear Safety Authority’ (STUK) is het toezichthoudende orgaan in Finland.

In Finland is een milieueffectrapportage de eerste stap bij nucleaire vergunningverlening. Voor vergunningverlening van grote nucleaire installaties, waaronder kernreactoren, kent de Finse wetgeving een procedure van drie fasen: (1) principebesluit: de regering besluit tot vergunningverlening, maar de desbetreffende gemeente en het parlement dienen het besluit goed te keuren, (2) bouwvergunning, (3) exploitatievergunning. STUK verricht de veiligheidsgerelateerde review in elke fase van het proces van vergunningverlening. Het Ministerie van handel en industrie is betrokken bij de voorbereiding van de besluiten in het kader van de vergunningverlening.

In maart 2007 zijn twee Finse elektriciteitsbedrijven (TVO en Fortum) met een milieueffectrapportage gestart om bij hun bestaande centrales in Olkiluoto en Loviisa nog een nieuwe kerncentrale te bouwen. In juni 2007 is een consortium geformeerd van elektriciteitsbedrijven en industriële bedrijven om de zesde Finse kerncentrale te realiseren. Het productievermogen van deze kerncentrale zal liggen tussen 1000 en 1800 MW en het is de bedoeling dat de centrale tussen 2016 en 2018 in bedrijf wordt gesteld (WNA, 2007a).

### *Frankrijk*

In Frankrijk is de ontwikkeling van kernenergie voor elektriciteitsopwekking verder voortschreden dan in de meeste andere landen in Europa. Er staan 59 kernreactoren met een totaal vermogen van 63.363 MW (IAEA, 2006a). Hiermee wordt 78% van de elektriciteit in Frankrijk geproduceerd. Frankrijk heeft in de jaren zeventig van de vorige eeuw bewust gekozen voor kernenergie omdat het zelf niet beschikt over fossiele brandstofreserves van enige betekenis en daarvoor ook niet afhankelijk wilde zijn van andere landen. Het huidige Franse regeringsbeleid is gericht op voortzetting van kernenergie als belangrijkste vorm van elektriciteitsproductie. Argumenten hiervoor zijn energievoorzieningszekerheid en klimaatverandering en ook het economische argument van betaalbare elektriciteitsprijzen. Dit betekent dat de huidige kerncentrales op termijn moeten worden vervangen. Plannen voor vernieuwing van kerncentrales zijn door de Franse regering in 2003 aangekondigd terwijl een maatschappelijke consultatie over kernenergie nog niet was afgerond (Rathenau Instituut, 2004).

De Autorité de Sureté Nucléaire (ASN) is de organisatie in Frankrijk die verantwoordelijk is voor nucleaire veiligheid en stralingsbescherming (voorheen DGSNR). ASN rapporteert aan de Ministers van Milieu, Industrie en Volksgezondheid. De voornaamste besluiten voor vergunningverlening vereisen echter nog steeds instemming van de regering. EDF, de Franse elektriciteitsproducent, heeft in mei 2006 een vergunning aangevraagd voor de bouw van een nieuwe kerncentrale in Flamanville, nadat het publieke debat over kernenergie in februari 2006 was beëindigd. Op 16 februari 2007 heeft de ASN een positieve beslissing genomen over een conceptbesluit dat de bouw van de kerncentrale mogelijk maakt. Met het tekenen van dit besluit heeft de Franse regering op 10 april 2007 hieraan zijn definitieve goedkeuring gegeven.

### *Verenigd Koninkrijk*

De bouw van kerncentrales in het Verenigd Koninkrijk is na de bouw van de reactor Sizewell B niet voortgezet. Sizewell B was de eerste drukwaterreactor in een land dat verder alleen gasgekoelde reactoren heeft. Het Verenigd Koninkrijk heeft in totaal 23 kernreactoren met een totaal vermogen van 12.852 MW (IAEA, 2006a). Hiermee wordt 18% van de elektriciteit in het Verenigd Koninkrijk geproduceerd.

Op 23 mei 2007 publiceerde de Engelse regering een beleidsdocument (DTI, 2007) waarin de regering het voorlopige standpunt inneemt dat investeringen in kernenergie door energiebedrijven mogelijk moeten worden gemaakt, omdat daarmee een maatschappelijk belang is gediend. Het beleidsdocument beschrijft een raamwerk voor het lange termijn beleid dat moet voorzien in een stabiele en betaalbare energievoorziening en dat bijdraagt aan het oplossen van het probleem van klimaatverandering. Het beleidsdocument gaat uit van een reductiedoelstelling voor broeikasgassen van 26 tot 32% in 2020 (t.o.v. 1990) en heeft ook betrekking op energiebesparing en duurzame energie. De opstelling van de Engelse regering ten aanzien van kernenergie is mede gebaseerd op de grote belangstelling van energiebedrijven om in kernenergie te investeren en de voortgang bij het oplossen van het probleem van nucleaire afval. Het beleidsdocument is bedoeld voor consultatie. Belanghebbende partijen kunnen tot 10 oktober 2007 hun visie op het document geven. Daarna zal de regering een definitief standpunt innemen.

### **6.5.3 Beleid verwerking en opslag gebruikte splijtstof**

Het gevoerde beleid ten aanzien van verwerking en opslag van gebruikte splijtstof heeft betrekking op de keuze van de 'back-end' route (opwerking of directe opslag) en de definitieve eindberging. Tabel 6.2 geeft hiervan een overzicht voor landen die in het voorgaande zijn besproken. Ter vergelijking is ook het vigerende Nederlandse beleid aangegeven. Duitsland en Finland hebben definitief besloten de gebruikte splijtstof niet langer op te werken. Voor België geldt hiervoor sinds 1998 een moratorium. In het verleden stuurden deze landen hun gebruikte splijtstof naar opwerkingsinstallaties in het buitenland, zoals dat nog steeds gebeurt voor de gebruikte splijtstof van de kerncentrale Borssele. De gebruikte splijtstof van kerncentrales in Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk gaat naar opwerkingsinstallaties in die landen.

Tabel 6.2 *Verwerking en opslag van gebruikte splijtstof in enkele Europese landen (WNA, 2007a)*

	Opwerking	Interim opslag	Onderzoek eindberging	Realisatie ondergrondse eindberging
België	Sinds 1998 moratorium op opwerking	Gebruikte splijtstof wordt opgeslagen bij kerncentrale	Ondergronds laboratorium voor opslag hoogradioactief afval in klei wordt gerealiseerd	Eindberging niet eerder dan in 2035
Duitsland	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tot 1994 werd alle splijtstof opgewerkt in Frankrijk of Verenigd Koninkrijk</li> <li>– Vanaf 2005 vindt geen opwerking van splijtstof meer plaats (directe opslag)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Interim opslag van gebruikte splijtstof bij de kerncentrale.</li> <li>– Bovengrondse interim-opslag op locaties waar ondergrondse berging zal plaatsvinden (Gorleben en Ahous)</li> <li>– Al het hoogradioactief afval van opwerkingsinstallaties vanaf 2022 in Duitsland opgeslagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Studies naar ondergrondse berging in zout (Gorleben)</li> <li>– Proefinstallatie voor conditionering (Gorleben)</li> </ul>	Eindberging in Gorleben vanaf 2025 in bedrijf
Finland	Directe berging sinds 1996	Gebruikte splijtstof wordt opgeslagen bij kerncentrale	Installatie voor karakterisering gesteenten in aanbouw	Eindberging vanaf 2020 in Eurajoki
Frankrijk	Opwerking in La Hague (Normandië)		Twee laboratoria om onderzoek te doen naar opslag in kleilagen in graniet	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Eindberging vanaf 2025 in bedrijf</li> <li>– Afval dient terughaalbaar te worden opgeslagen</li> </ul>
Nederland	Opwerking in Frankrijk	Interim opslag van hoogradioactief afval van opwerkingsinstallatie in bovengrondse voorziening (HABOG)	Onderzoek heeft uitgewezen dat zoutformaties en kleilagen in de diepe ondergrond mogelijkheden bieden om aan de eis van terugneembaarheid te voldoen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geen concrete plannen</li> <li>– Afval dient terughaalbaar te worden opgeslagen</li> </ul>
Verenigd Koninkrijk	Opwerking in Sellafield (sinds 2005 uit bedrijf)	Voornemen voor faciliteit voor hoog radioafval	Vergunning voor testlaboratorium in 1997 niet verleend	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geen concrete plannen</li> <li>– Afval wordt opgeslagen zonder terughaalbaar</li> </ul>
Zweden	Directe berging	Een interim opslag voor hoogradioactief afval in gebruik sinds 1985 in Oskarshamn	Onderzoek naar ondergrondse berging in graniet in Aspo Hard Rock Laboratory	Twee locaties voor ondergrondse berging geselecteerd (Oskarshamn en Osthrammar)

Geen van de landen hebben een ondergrondse eindberging voor hoogradioactief afval in bedrijf. Sommige landen (o.m. Finland en Duitsland) hebben zo'n eindberging wel in bedrijf voor laag- en middelradioactief afval. Plannen voor een ondergrondse eindberging bevinden zich in verschillende fasen van ontwikkeling. Duitsland, Finland en Zweden lijken daarmee het verst. Nederland heeft gekozen voor langdurige bovengrondse tijdelijke opslag van hoogradioactief afval in afwachting van een oplossing voor ondergrondse eindberging.

## 7. Maatschappelijke acceptatie

De opvattingen en meningen van burgers over kernenergie worden op verschillende manieren onderzocht. Wetenschappers doen onderzoek naar de verschillende factoren die bij acceptatie van kernenergie een rol spelen. Dit soort onderzoek richt zich vooral op de perceptie van de risico's die samenhangen met het toepassen van de kernenergietechnologie en andere industriële activiteiten. In Paragraaf 7.1 wordt een kort overzicht van dit onderzoek gegeven. Ander, meer toegepast onderzoek geeft inzicht in de acceptatie van kernenergie onder de bevolking, waarbij in meer of mindere mate gebruik gemaakt wordt van inzichten uit het wetenschappelijke onderzoek. Dergelijk onderzoek dat is uitgevoerd voor Nederland wordt in Paragraaf 7.2 samengevat en voor de Europese Unie in Paragraaf 7.3. In die onderzoeken zijn opvattingen en meningen gepeild over kernenergie zelf en over kernenergie in relatie tot andere vraagstukken van de energievoorziening, waaronder klimaatverandering. In een andere wetenschappelijke studie is een vergelijking gemaakt tussen de perceptie van risico's van kolencentrales en kerncentrales. Een samenvatting van dat onderzoek wordt gepresenteerd in Paragraaf 7.4.

### 7.1 Wetenschappelijk onderzoek naar acceptatie kernenergie

In de afgelopen decennia zijn veel wetenschappelijke studies uitgevoerd naar de acceptatie van kernenergie, sommige met een psychologische c.q. antropologische invalshoek, andere met een sociologische of politicologische, en weer andere met een 'holistische' invalshoek zoals de studie die in Paragraaf 7.4 wordt beschreven. Het voert te ver om hier een volledig overzicht te geven van deze studies. Volstaan wordt met het noemen van een aantal bevindingen van buitenlandse en Nederlandse onderzoekers ten aanzien van risicoperceptie en acceptatie van kernenergie.

Paul Slovic heeft veel gepubliceerd over risico's van industriële activiteiten (Slovic, 1987; Slovic, 1993). Volgens Slovic (Slovic and Weber, 2002) gaat het bij risico's, objectief gezien, om de waarschijnlijkheid en consequenties van een gebeurtenis. In risicobeoordelingen, zoals die voor kernenergie worden uitgevoerd door middel van Probabilistic Safety Assessment (zie ook Paragraaf 2.5), worden de risico's objectief gekwantificeerd. Slovic laat echter zien dat risico's door mensen niet zo worden ervaren. De perceptie van het risico is in grote mate subjectief. Een methode om de risicopercepties te onderzoeken is gebaseerd op het psychometrische paradigma. Personen maken daarbij voor diverse gevaren gekwantificeerde inschattingen van het huidige risico, de gewenste mate van risico en de mate waarin elk van deze risico's kunnen worden beheerst. Deze inschattingen worden gerelateerd aan diverse kenmerken van de risico's, waaronder het aantal dodelijke slachtoffers per jaar en de voordelen die elke risicovolle activiteit heeft voor de maatschappij. De risico's kunnen vervolgens worden ingedeeld langs twee assen die de variatie weergeven in mate waarin een gebeurtenis wordt gevreesd ('dread risk') en de mate van onbekendheid van de gebeurtenis ('unknown risk'). In een vergelijking met 85 'gevaren' is de mate van 'unknown risk' voor kernreactorongelukken en radioactief afval vergelijkbaar met die van pesticiden en het gebruik van cadmium. Het risico van kernreactorongevallen scoort op de schaal van 'dread risk' als een van de hoogste (na gebruik van nucleaire wapens). Met het onderzoek kan volgens Slovic het verschil worden verklaard tussen risicopercepties van 'experts' en personen zonder specifieke kennis van de gevaren. De risicopercepties van 'experts' vertonen een sterke correlatie met technische risicobeoordelingen. Slovic constateert verder dat naarmate personen een risico meer vrezen, zij dit risico meer beperkt willen zien en vragen om toepassing van striktere regels.



Volgens (Croxford, 2005) zijn er drie factoren die de perceptie van risico's lijken te verklaren:

- *Bekendheid van risico*: als een activiteit een 'bekend' risico heeft en het gevaar zintuiglijk waarneembaar is, is men geneigd dat risico lager te schatten dan van een minder bekende activiteit met een niet waarneembaar gevaar, ook al heeft die activiteit hetzelfde risico.
- *Beheersbaarheid (controllability) van risico*: als een risico vrijwillig wordt genomen en goed te beheersen valt wordt het risico lager geschat dan in geval van een niet vrijwillig risico dat (vanuit het individu zelf) moeilijk te beheersen valt.
- *Het aantal personen dat mogelijk blootstaat aan het risico*: als een risico een kleine kans impliceert op schade voor een groot aantal mensen (vooral bij toekomstige generaties), wordt dat risico als ernstiger beschouwd dan bij een gelijk gezondheidseffect waarbij de waarschijnlijke slachtoffers kunnen worden geïdentificeerd.

Rundmo (Rundmo, 2004) waarschuwt voor de grote mate van onzekerheid bij de uitkomsten van psychometrisch paradigma onderzoek, zoals gehanteerd door o.a. Fischhoff en Slovic. Rundmo geeft bijvoorbeeld aan dat het onduidelijk is waarom mensen een grote variatie tonen in perceptie van risico's. Lennart Sjöberg heeft de relatie onderzocht tussen heersende opinies in de Verenigde Staten over kernenergie als één van 51 onderzochte 'risk items'. De perceptie van het item wordt 'gescoord' op een schaal van zeven punten, variërend van 'Strongly disagree' tot 'Strongly agree' (Sjöberg, 1998). Het blijkt dat de correlatie tussen maatschappelijke verontrusting en culturele bevooroordeeldheid ('bias') voor dit type onderzoek hoog is: circa 58% van de variatie is statistisch significant. Hij doet suggesties om de betrouwbaarheid van psychometrische risicomodellen te verbeteren (Sjöberg, 2002).

Ook Nederlandse onderzoekers houden zich bezig met onderzoek naar de acceptatie van kernenergie. Gutteling (Gutteling, 2001) wijst evenals Slovic op het verschil tussen wat kernenergie-experts zeggen over de kans op een ongeluk in een kerncentrale en de redenering van het publiek. Voor het publiek zijn kansoverwegingen veel minder relevant. Zij zijn meer geïnteresseerd in de vraag of nucleaire ongevallen als in Harrisburg en Tsjernobyl niet nog eens kunnen gebeuren. Verplanken heeft het effect van het reactorongeval in Tsjernobyl op de waardering van kernenergie onderzocht (Verplanken, 1989). In dit onderzoek werd gevraagd naar de waarschijnlijkheid van een ongeval met een Nederlandse kernreactor. Hij constateert dat nucleaire experts vóór het reactorongeval in Tsjernobyl naar voren brachten dat zo'n ongeval niet kon plaatsvinden. Zijn onderzoek geeft aan dat na het Tsjernobyl-ongeluk de dimensie van (een kans op) een rampzalig ongeval in de risicoperceptie is toegenomen.

Veel van de hiervoor gerefereerde onderzoekers doen aan de beleidsmakers de suggestie om het publiek te betrekken bij besluiten met significante risico's (van industriële activiteiten), omdat participatie veel misverstanden en onterechte bezwaren kan verhelpen (maar niet alle bezwaren kan wegnemen). Dit wordt bevestigd door een onderzoek van de Nuclear Energy Agency (OECD), waarin een stapsgewijze benadering bij besluitvorming over de opberging van langlevend radioactief afval aan de orde wordt gesteld (Pescatore et al., 2004). Klinke en Renn (Klinke en Renn, 2002) onderscheiden op dit gebied drie benaderingen. Als de onzekerheid over risico's gering is en daarover geen onduidelijkheden bestaan, dan kan worden uitgegaan van de waarschijnlijkheid en de mogelijke schade van het risico. Deze benadering wordt contraproductief als de onzekerheid over het risico een grote rol gaat spelen of het risico niet kan worden bepaald vanwege ontbrekende kennis. Een benadering waarbij de nadruk ligt op voorzorgsmaatregelen is dan effectiever. Wanneer er over de risico's verschillend wordt geoordeeld kan een benadering worden gevolgd waarbij bewustwording en vertrouwen wordt opgebouwd bij betrokkenen. Dit vereist volgens Klinke en Renn publieke participatie.

## 7.2 Nederland

In 2006 heeft het Ministerie van VROM onderzoeksbureau 'Partners in Quality Research BV' (PQR, 2006) de maatschappelijke opvattingen en meningen laten onderzoeken van verschillen-

de groepen burgers over randvoorwaarden voor nieuwe kerncentrales (zie het kader voor de beschrijving van de onderzoeksmethode). Uit het onderzoek blijkt dat het beeld dat burgers hebben over kernenergie vooral wordt bepaald door de communicatie over het ernstige kernongeval te Tsjernobyl (1986). Hierdoor zijn de meeste associaties negatief. De meeste burgers kennen alleen Borssele als nucleaire installatie in Nederland.

### ***Methoden om de maatschappelijke acceptatie van kernenergie te onderzoeken***

#### ***PQR***

Het door PQR uitgevoerde onderzoek beoogt een representatief beeld te geven van de opvattingen en meningen van de Nederlandse bevolking over kernenergie. Bij het onderzoek is gekozen voor een combinatie van een kwalitatief en een kwantitatief onderzoek. Rekening is gehouden met verschillende doelgroepen qua leeftijd, opleiding, regio en attitude ten aanzien van kernenergie in het algemeen. Voor het kwalitatief onderzoek, uitgevoerd in mei 2006, is gebruik gemaakt van groepsdiscussies (ook wel aangeduid met de term focus groepen). Er werden gesprekstechnieken gebruikt om het 'hoe' en 'waarom' van de attitudes, percepties en emoties bloot te leggen en heersende ideeën en meningen te leren kennen. Na ongeveer een week is door middel van telefoongesprekken geverifieerd of de in groepsdiscussies geuite opvattingen en meningen waren veranderd of ongewijzigd waren. Er zijn in totaal zes groepsdiscussies gehouden van ongeveer 2½ uur elk, waarvan twee in Amsterdam, twee in Rotterdam en twee in Zwolle. De uitkomsten van het kwalitatieve onderzoek (focus groepen) zijn de basis geweest voor de ontwikkeling van de vragenlijst voor het kwantitatieve onderzoek. Hiervoor is gekozen voor telefonisch onderzoek, uitgevoerd in juni 2006. Vanuit een *at random* samengesteld telefoonbestand van 5.000 gezinnen is gevraagd om medewerking aan een onderzoek over kerncentrales. Na maximaal drie keer bellen hebben 2.700 personen positief gereageerd en hen is informatie toegestuurd. Daarna zijn deze personen teruggebeld en is een vragenlijst beantwoord in gemiddeld circa 18 minuten. Respondenten zijn tot maximaal drie keer teruggebeld om het vraaggesprek af te nemen. Uiteindelijk zijn 1006 geslaagde gesprekken gevoerd. Het onderzoek is niet begeleid door een commissie van externe experts.

#### ***Eurobarometer***

Een onderzoek in het kader van 'Eurobarometer' had als onderwerp 'Europeans and nuclear safety' (februari 2007). Het onderzoek richtte zich op inwoners van 15 jaar en ouder in alle EU landen. Deze personen kregen een vragenlijst voorgelegd. In elk land werd *at random* een aantal gezinnen gekozen, waarmee thuis face-to-face interviews werden afgenomen. Hierbij werd zorg gedragen voor representativiteit wat betreft de bevolkingsomvang en de bevolkingsdichtheid van regio's, verdeeld naar grote steden, kleinere plaatsen en het platteland. In een andere studie in het kader van 'Eurobarometer' - 'Attitudes on issues related to energy policy' (april 2007) - wordt gerefereerd aan een significantieniveau van 95%. De grootte van de *samples* was in de meeste landen van de EU 1000 personen, maar in Cyprus, Luxemburg en Malta 500 personen. Een significantieniveau van 95% betekent dat bij een gemeten waarde van 50% de feitelijke waarde varieert tussen 45,6 en 54,4%.

Het geven van feitelijke informatie, zoals tijdens groepsdiscussies heeft plaatsgevonden, leidt ertoe dat men genuanceerder en veelal positiever tegen kerncentrales aan gaat kijken. Het noemen van het aantal kerncentrales wereldwijd, en met name het aantal in België en Frankrijk, heeft volgens de PQR-onderzoekers grote invloed op de beleving en acceptatie van kerncentrales. Volgens de onderzoekers plaatst dit de discussie in een geheel ander licht en maakt het kerncentrales in Nederland ineens veel acceptabeler. Overigens is niet vermeld dat er landen zijn die besloten hebben toepassing van kernenergie op termijn te beëindigen (uit te faseren), zoals België, Duitsland en Zweden.

### *Exploitatie van kerncentrales*

Veiligheid is het sleutelwoord bij bouw en exploitatie van kerncentrales. Burgers accepteren het private eigendom van kolen- en gascentrales. Exploitatie van kerncentrales vinden burgers echter te risicovol om geheel aan marktpartijen over te laten. Ze vrezen voor mogelijke bezuinigingen op veiligheid als gevolg van commerciële belangen van marktpartijen. De overheid wordt gezien als een betrouwbare en capabele beschermer van de burgers en men ziet daarom bij kernenergie een belangrijke rol voor de overheid weggelegd. Zo vindt 50% van de burgers dat een eventuele nieuwe kerncentrale mede door de overheid moet worden gebouwd. Ongeveer 80% van de burgers vindt dat de overheid precies moet voorschrijven welk type kerncentrale mag worden gebouwd. Ook vindt men controle door de overheid erg belangrijk.

### *Veiligheid en radioactief afval*

Vragen over kernenergie hebben vooral betrekking op de veiligheid, met als afgeleid probleem hoe om te gaan met radioactief afval. De onderzoekers stellen vast dat burgers hierover voorlichting en transparantie eisen. 80% van de geïnterviewden vindt dat eerst meer onderzoek nodig is naar het afvalprobleem voordat een nieuwe kerncentrale wordt gebouwd. De belangrijkste randvoorwaarden zijn veiligheid en beveiliging (meer dan beheer en opslag van afval). Ten aanzien van de berging van radioactief afval bestaat de volgende voorkeursvolgorde:

1. ondergronds met terughaalbaarheid
2. ondergronds zonder terughaalbaarheid
3. bovengronds.

Er blijkt weinig kennis bij burgers aanwezig over mogelijke oorzaken van een ongeluk. Bij terroristische aanslagen denken burgers dat terroristen zich minder zullen richten op de kerncentrale zelf en meer op opslagplaatsen om materiaal voor een 'vuile bom' te verkrijgen. Men vindt dat de beveiliging van opslagplaatsen even sterk moet zijn als die van een kerncentrale.

### *Klimaatverandering en energievoorzieningszekerheid*

Het opraken van de fossiele brandstoffen (57%) en een dreigend energietekort (24%) worden door de ondervraagden gezien als belangrijkste reden om over nieuwe kerncentrales te praten. Dat kerncentrales geen CO<sub>2</sub> uitstoten (14%) en dat fossiele brandstoffen dat wel doen (9%) wordt hierbij minder vaak als argument genoemd. 17% van de ondervraagden noemt de reden dat kernenergie goedkoper is dan andere vormen van energie. Opvallend is dat men kernafval als een groot probleem schat, maar het opwarmen van de aarde en het stijgen van de zeespiegel als een minder urgent probleem ervaart. De onderzoekers stellen vast dat een minderheid van de ondervraagden de CO<sub>2</sub>-uitstoot als een primair probleem ervaart. Het onderzoek is echter uitgevoerd voordat in oktober 2006 Al Gore, met de film 'An Inconvenient Truth', in Nederland aandacht vroeg voor het klimaatprobleem. Verder blijkt uit het onderzoek dat burgers hun twijfels uiten over de noodzaak voor kerncentrales. Men vraagt zich af op duurzame bronnen op korte termijn echt niet meer kunnen bijdragen.

### *Besluitvorming*

Burgers uiten hun twijfels over het besluitvormingsproces binnen de overheid en hun werkelijke betrokkenheid daarbij. Wel heeft men veel vertrouwen in de overheid als uitvoerder en controleur. Voor het realiseren van uitbreiding van kernenergie in Nederland is het van groot belang dat er voldoende draagvlak bestaat in de maatschappij. PQR concludeert dat er draagvlak zal moeten worden gecreëerd door gerichte voorlichting en, waar mogelijk, betrokkenheid van burgers.

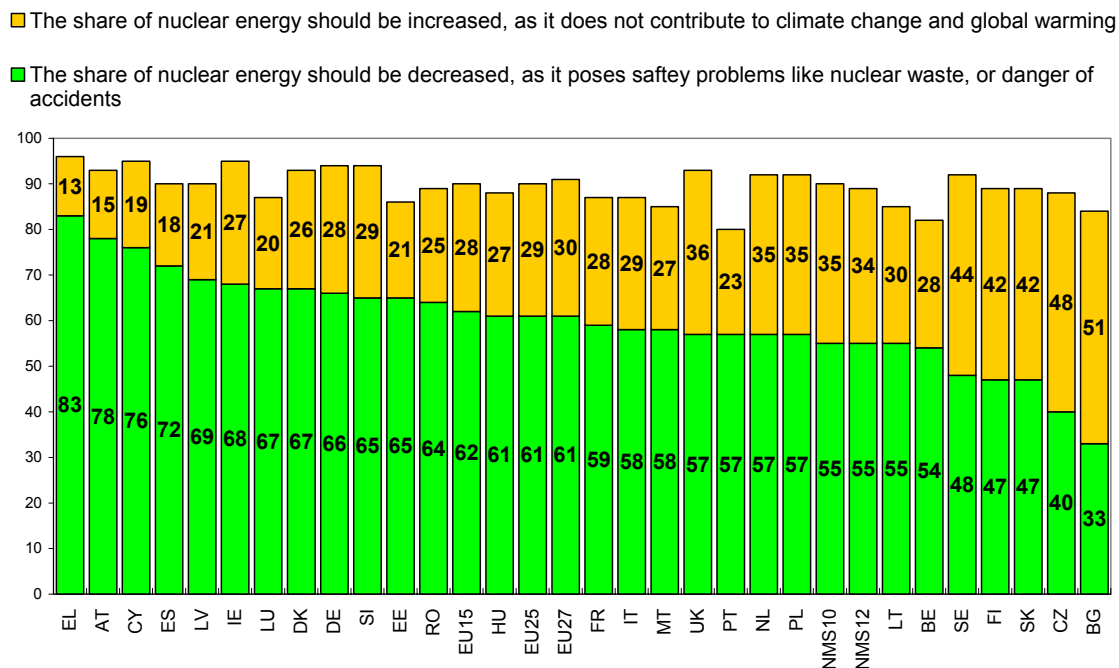
### *Opinies uit eerdere onderzoeken*

Door het Rathenau Instituut (Rathenau Instituut, 2004) zijn resultaten van opinieonderzoeken uit 2001, 2002 en 2003 gerapporteerd. Hieruit bleek dat in 2001 en 2002 een groot deel van de ondervraagden (82% in 2001 en 75% in 2002) tegen uitbreiding van kernenergie was. In 2003 was het aantal voorstanders van kernenergie 30%. Wanneer het afvalprobleem wordt 'opgelost'

dan bleek de meningen over kernenergie sterk te veranderen. Dan was 72% (2001) tot 79% (2002) voor kernenergie.

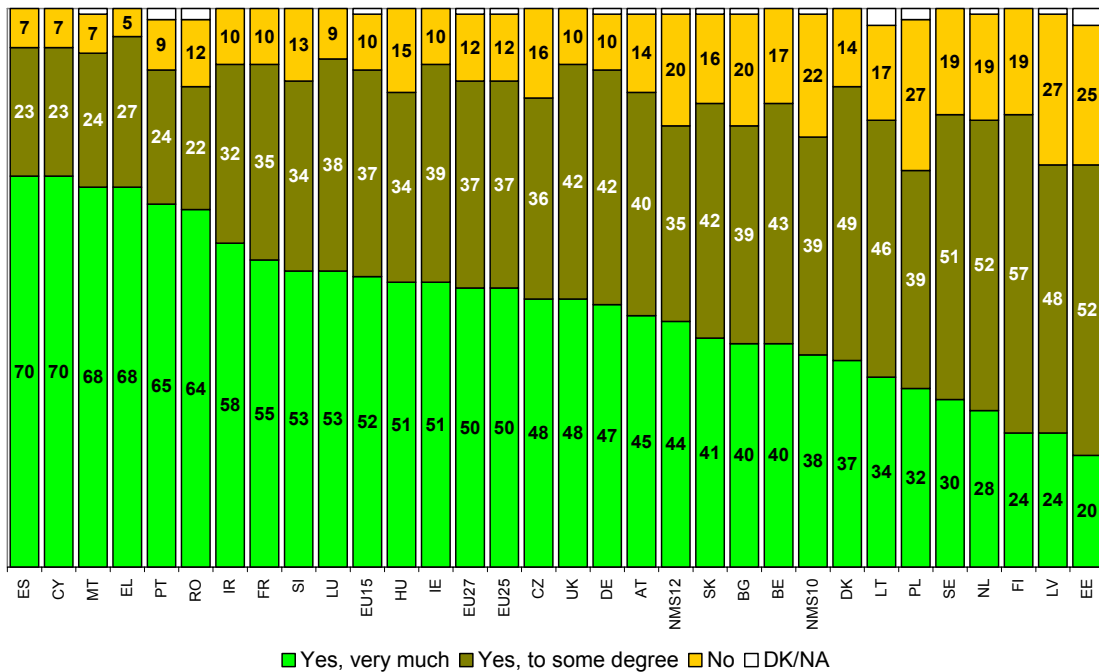
### 7.3 Europa

Opvattingen van burgers over diverse onderwerpen worden door de Europese Commissie periodiek onderzocht. Dit gebeurt met de zogenoemde Eurobarometer (zie kader voor beschrijving onderzoeksmethode). Burgers in alle lidstaten van de Unie worden op deze manier periodiek ondervraagd naar hun opvattingen over kernenergie. Figuur 7.1 toont de verhouding tussen voor- en tegenstanders van uitbreiding van kernenergie (Eurobarometer, 2007a). Aan de keuze vóór uitbreiding van kernenergie is het argument gekoppeld dat kernenergie niet bijdraagt aan klimaatverandering. De keuze tegen uitbreiding van kernenergie is gebaseerd op het argument dat hieraan veiligheidsproblemen zijn verbonden, zoals radioactief afval of het risico van ongelukken. In twee landen, Bulgarije en Tsjechië, is het aantal voorstanders van uitbreiding van kernenergie significant groter dan het aantal tegenstanders. In drie landen - Zweden, Finland en Slowakije - houden voor- en tegenstanders elkaar ongeveer in evenwicht. In de overige EU-lidstaten, waaronder Nederland, zijn de tegenstanders van uitbreiding van kernenergie in de meerderheid.



Figuur 7.1 *Verhouding tussen voor- en tegenstanders van uitbreiding van kernenergie*  
Bron: Eurobarometer, 2007a.

Zoals uit het PQR-onderzoek voor Nederland naar voren is gekomen (zie vorige paragraaf) zou een verklaring voor de geringe steun voor kernenergie kunnen liggen in het feit dat veel respondenten zich niet erg bezorgd tonen over het klimaatprobleem (Figuur 7.2). Het Eurobarometer-onderzoek signaleert dat inwoners van sommige landen met een koud klimaat minder bezorgd zijn dan die van zuidelijke landen: 20% van de bewoners van Estland is ‘erg bezorgd’, 24% van Letland en Finland, 28% van Nederland en 30% van Zweden (Eurobarometer, 2007a). In mediterrane landen is men veel bezorgder: in Spanje en Cyprus is 70% ‘erg bezorgd’ en in Griekenland en Malta 68%.



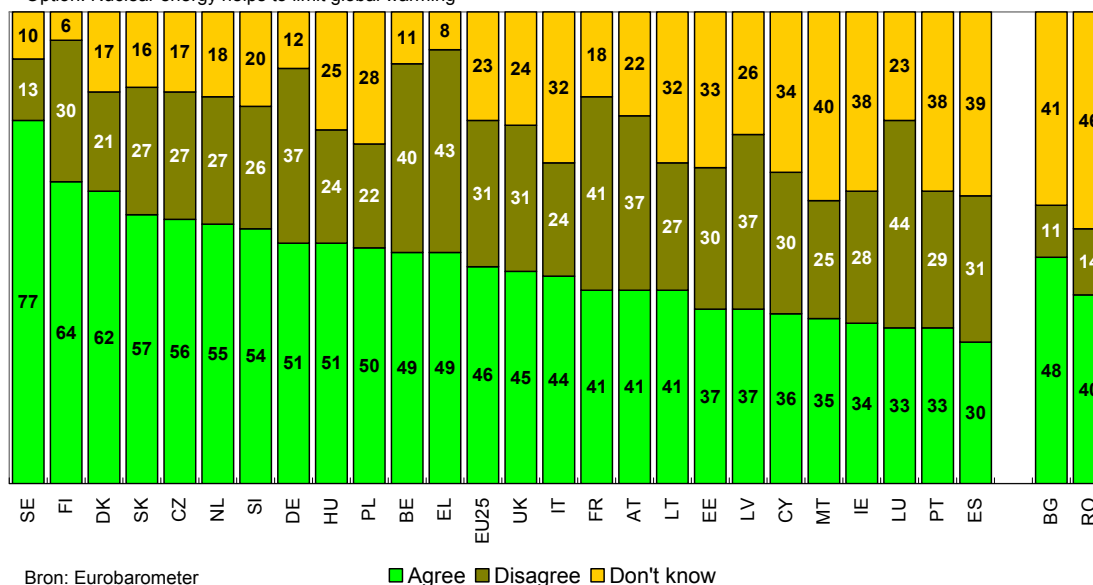
Figuur 7.2 *Mate van bezorgdheid over het klimaatprobleem in EU-landen*  
Bron: Eurobarometer, 2007a.

Van de vijf landen waar de voorstanders van kernenergie in de meerderheid zijn of tenminste de helft van de respondenten vormen (zie Figuur 7.1), zijn bewoners van Tsjechië, Slowakije en Bulgarije gemiddeld bezorgder over het klimaatprobleem dan in Nederland: in Tsjechië is 48% ‘erg bezorgd’, in Slowakije 41% en in Bulgarije 40%, tegenover 28% in Nederland. Dit zou het relatief hoge percentage voorstanders van uitbreiding van kernenergie in die landen gedeeltelijk kunnen verklaren. In Zweden en Finland is de bezorgdheid over het klimaatprobleem ongeveer even groot als in Nederland, terwijl voorstanders van uitbreiding van kernenergie daar licht in de meerderheid zijn ten opzichte van tegenstanders.

Een tweede Eurobarometer-onderzoek (Eurobarometer, 2007b) analyseert in meer detail hoe inwoners van de EU de rol van kernenergie in de klimaatproblematiek ervaren (Figuur 7.3). Uit dit onderzoek komt naar voren dat Nederlandse burgers de stelling dat kernenergie helpt bij het beperken van klimaatverandering onderschrijven, evenals in Zweden, Finland, Denemarken, Slowakije en Tsjechië. Blijkbaar hangt de steun voor kernenergie ook af van de vraag of men kernenergie als een gedeeltelijke oplossing voor het klimaatprobleem wordt beschouwd.

Question: To what extent do you agree or disagree with each of the following statements on the value of nuclear energy?

Option: Nuclear energy helps to limit global warming



Bron: Eurobarometer

■ Agree ■ Disagree ■ Don't know

Figuur 7.3 *Mate waarin burgers de stelling onderschrijven dat kernenergie helpt bij het beperken van klimaatverandering*

Bron: Eurobarometer, 2007b.

## 7.4 Perceptie van risico's van kolen- en kerncentrales

In het wetenschappelijk artikel 'Coal or nuclear in new power stations: the political economy of an undesirable but necessary choice' van M. Radetzki (Radetzki, 2000), wordt een analyse gemaakt van de houding van burgers en politici ten opzichte van kolen- en kerncentrales, met name wat betreft de klimaatgevolgen (kolen) en de veiligheidsrisico's (kernenergie). Het artikel maakt hierbij ook een financieel-economische analyse van kolen- en kerncentrales en een analyse van de externe kosten.

Met verwijzing naar Amerikaans onderzoek (RFF/ACS, 1998) vestigt Radetzki er de aandacht op dat burgers het doorgaans moeilijk vinden om risico's te accepteren die:

- Moeilijk zijn te bepalen omdat ze voortkomen uit nieuwe omstandigheden of technieken.
- Het potentieel in zich bergen van rampzalige ongelukken die een bedreiging kunnen vormen voor toekomstige generaties.
- Consequenties hebben die bijzonder worden gevreesd.
- Niet vrijwillig worden geaccepteerd door de betrokken individuen en niet door hun kunnen worden beheerst.

Op basis van deze percepties worden zowel kolen- als kerncentrales door het publiek als risicovol beschouwd. Met berekeningen laat Radetzki zien dat de externe kosten van kolencentrales inderdaad hoog zijn vanwege de emissie van broeikasgassen. Volgens de berekeningen van de externe kosten van kerncentrales is de perceptie van het publiek echter onjuist. De externe kosten zijn namelijk gebaseerd op de vermenigvuldiging van kans en gevolg, waarbij een zeer kleine kans op een catastrofaal ongeluk zich vertaalt in lage externe kosten. Voor het publiek is echter een kans van eens per honderdduizend jaar niet verschillend van een kans van eens per tien miljoen jaar, terwijl de laatstgenoemde kans toch tot een factor 100 lagere (externe) kosten leidt.

Burgers zijn goed in staat om ‘bekende’ risico’s en/of vrijwillig aanvaarde risico’s, zoals van verkeer en roken, te beoordelen. Radetzki signaleert dat de ‘vertekening’ van risico’s van kolen- en kerncentrales door het publiek niet kan worden genegeerd om de volgende redenen:

- Wellicht tonen experts bij beoordeling van risico’s eveneens gebrek aan objectiviteit.
- Men kan redeneren dat, ook al zou de perceptie van burgers een vertekening van de werkelijkheid betekenen, deze mening in een democratische samenleving evengoed zou moeten worden geaccepteerd als consumentenvoorkeuren in een markteconomie.
- Beoordelingen door het publiek moeten serieus worden behandeld, omdat deze de politieke opinies beïnvloeden en daarmee politieke keuzes op het gebied van energie.

Radetzki rekent het besluit in sommige landen tot bevriezen of verminderen van het aantal kerncentrales toe aan de perceptie van de risico’s van kernenergie. Radetzki geeft aan dat verandering in percepties kan leiden tot veranderingen op politiek niveau, maar dat percepties (over het risico van kernenergie) op een niet systematische wijze tot stand komen en niet stabiel in de tijd en persoonsgebonden zijn. De uitkomst blijft daardoor inherent onzeker.

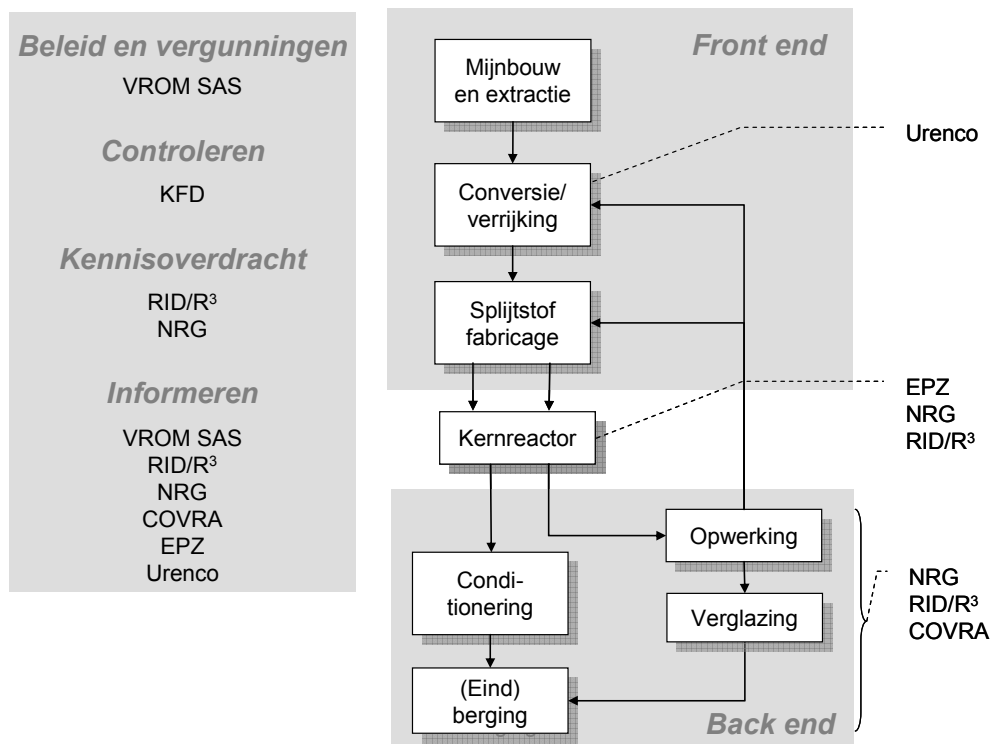
## 8. Kennisinfrastructuur kernenergie

Dit hoofdstuk beschrijft de Nederlandse kennisinfrastructuur in relatie tot kernenergie. De kennisinfrastructuur bestaat uit expertise van mensen die zich met kernenergietechnologie bezig houden en uit de faciliteiten waarmee onderzoeks- en ontwikkelingswerk kan worden uitgevoerd. Paragraaf 8.1 biedt hiervan een overzicht. Buiten het kader van dit hoofdstuk zijn er bedrijven en instellingen die wel van groot belang zijn voor de nucleaire technologie maar zich niet direct met kernenergie bezighouden, zoals instellingen voor fundamenteel onderzoek op het gebied van kernfysica en bedrijven die zich bezighouden met de stralingshygiënische en conventionele aspecten van een kerncentrale.

Uitbreiding van kernenergie in Nederland vereist een voldoende capaciteit aan mensen met nucleaire kennis. Paragraaf 8.1 laat zien op welke onderdelen van de splijtstofcyclus deze kennis thans aanwezig is en om hoeveel mensen het daarbij gaat (indicatief). Internationale samenwerking zorgt ervoor dat het kennisniveau op hoog niveau blijft. Voor beleid, vergunningverlening en toezicht op de nucleaire sector is ook bij de overheid nucleaire kennis nodig. De nucleaire kennis van de overheidsorganisaties wordt in Paragraaf 8.2 apart beschreven. De laatste paragraaf van dit hoofdstuk (Paragraaf 8.3) bespreekt hoe door verschillende organisaties wordt ingespeeld op toekomstige ontwikkelingen.

### 8.1 De huidige Nederlandse infrastructuur voor kernenergie

Nederland beschikt over een kennisinfrastructuur voor kernenergie die gerelateerd is aan verschillende onderdelen van de splijtstofcyclus. De splijtstofcyclus is in Hoofdstuk 2 geïntroduceerd en wordt in Figuur 8.1 vereenvoudigd weergegeven. In de figuur is aangegeven bij welke activiteiten de Nederlandse organisaties betrokken zijn die over kernenergiekennis beschikken.



Figuur 8.1 Nederlandse organisaties die beschikken over nucleaire kennis in de splijtstofcyclus



Naast activiteiten uit de splijtstofcyclus en daaraan gerelateerd onderzoek, zijn er nog belangrijke ondersteunende activiteiten waarbij nucleaire kennis nodig is. Hierbij gaat het om het toezicht op de nucleaire installaties in Nederland gedurende de volledige levenscyclus van nucleaire installaties (bouw, bedrijf, ontmanteling). Andere ondersteunende activiteiten, die door verschillende organisaties worden ondernomen, zijn kennisoverdracht (opleidingen) en informeren van de samenleving.

De nationale en internationale activiteiten van de verschillende organisaties worden hierna toegelicht:

- *Urenco*: Urenco en Enrichment Technology in Almelo maken deel uit van de internationale Urenco Group en houden zich bezig met het verrijken van uranium (Urenco) en het ontwikkelen van centrifugetechnologie voor het verrijgingsproces (Enrichment Technology). De Urenco group heeft op de mondiale markt voor het verrijken van kernbrandstoffen een aandeel van twintig procent. Dit marktaandeel vertoont een stijgende tendens omdat Urenco over de (in Nederland ontwikkelde) centrifugetechnologie beschikt waaraan in de wereldwijde markt voor verrijking steeds meer de voorkeur wordt gegeven.
- *EPZ*: EPZ beschikt in Borssele over een drukwaterreactor met een elektrisch vermogen van 485 MW. De kerncentrale heeft in de jaren negentig van de vorige eeuw een omvangrijke revisie ondergaan. In 2006 heeft de Nederlandse regering besloten dat de kerncentrale Borssele tot 2033 in bedrijf mag blijven, mits deze blijft voldoen aan state-of-the-art veiligheidseisen. EPZ is lid van de WANO, de World Association of Nuclear Operators en neemt in WANO-verband regelmatig deel aan reviews van nucleaire installaties van andere WANO-leden. EPZ wordt omgekeerd regelmatig beoordeeld door WANO review teams. EPZ neemt daarnaast actief (als beoordelende) en passief (als beoordeelde) deel aan door de IAEA georganiseerde peer reviews van nucleaire installaties. Voorts is EPZ (via NRG) betrokken bij het initiatief om in Europa te komen tot een programma van eisen voor nucleaire reactoren. Dit initiatief heeft als doel om de European Utility Requirements (EUR) op te stellen. Met de EUR wordt een standaard beoogd voor toekomstige Europese kerncentrales.
- *COVRA*: De Centrale Organisatie voor Radioactief Afval (COVRA) is in Nederland verantwoordelijk voor het inzamelen, verwerken en opslaan van in Nederland geproduceerd radioactief afval. Met betrekking tot radioactief afval is, in de huidige situatie, ieder Europees land verantwoordelijk voor de verwerking van het eigen radioactieve afval. Omdat het aanbod van radioactief afval in Nederland beperkt is, zoekt COVRA naar mogelijkheden voor internationale samenwerking. Zo wordt er afstemming gezocht met het Belgische collega-bedrijf ONDRAF/NIRAS met betrekking tot het onderzoek naar de geschiktheid van Boomse klei - een formatie die zowel onder grote delen van België als Nederland te vinden is - als gastgesteente voor een geologische eindberging van radioactief afval. COVRA is lid van de Association for Regional and International Underground Storage (ARIUS). In deze organisatie wordt door negen landen internationaal samengewerkt op het gebied van eindberging.
- *NRG*: NRG is het Nederlandse expertisecentrum voor nucleaire technologie en ontwikkelt kennis, producten en processen voor veilige toepassingen van nucleaire technologie voor energie, milieu en gezondheid. NRG heeft in Petten de beschikking over internationaal toonaangevende onderzoeks- en ontwikkelingsfaciliteiten. Dit betreft met name de Hoge Flux Reactor (HFR), als internationale installatie voor onderzoek aan materialen, constructies en splijtstoffen en de productie van radio-isotopen voor medische doeleinden. NRG werkt internationaal samen in Europese Kaderprogramma's op het vlak van de ontwikkeling van Generatie IV en Hoge Temperatuur Reactoren, materialenonderzoek ten behoeve van innovatieve reactorontwerpen en ontwikkeling van technieken voor de levensduurverkortung van radioactief afval (Partitioning and Transmutation, P&T). In dit kader worden ook veiligheidsstudies uitgevoerd ten behoeve van de ontwikkeling van concepten voor geologische eindberging met het oog op langdurige terugneembaarheid van opgeborgen radioactief afval. NRG is vertegenwoordigd in vele internationale commissies en heeft medewerkers gedetacheerd bij onder andere de Nuclear Energy Agency (NEA) in Parijs en bij AREVA in Duitsland.

- *Institute for Energy*: In Petten bevindt zich ook het Institute for Energy (iE) van de Europese Commissie. Het iE maakt deel uit van de Europese Joint Research Centres (JRC). Het iE richt zich op energievraagstukken in het algemeen en niet enkel op vraagstukken die gerelateerd zijn aan kernenergie. Voor aan kernenergie gerelateerd onderzoek (o.a. op het gebied van nucleaire veiligheid en innovatieve reactoren) wordt door iE gebruik gemaakt van de HFR.
- *RID/R<sup>3</sup>*: RID/R<sup>3</sup>, onderdeel van de TU Delft, is het universitaire centrum op het gebied van onderzoek en onderwijs met een primaire focus op ‘Reactor’, ‘Radiation’ en ‘Radionuclides’. RID/R<sup>3</sup> beschikt over unieke instrumenten gekoppeld aan de onderzoeksreactor Hoger Onderwijs Reactor (HOR). RID/R<sup>3</sup> is voornamelijk gericht op wetenschappelijk onderzoek, waarvan een beperkt deel gericht is op kernenergie. RID/R<sup>3</sup> verzorgt een twintigtal universitaire colleges m.b.t. nucleaire technologie, met daarbij onderwerpen als stralingshygiëne, afscherming van stralingsbronnen, stralingsdetectie, medische toepassingen van straling, reactorfysica en radiochemie. Per jaar studeren hier tussen vijf en tien studenten af. RID/R<sup>3</sup> werkt internationaal samen met academische centra en industriële partners waaraan tevens gepatenteerde technologie wordt geleverd. Evenals NRG is RID/R<sup>3</sup> ook sterk vertegenwoordigd in de Kaderprogramma’s van de Europese Commissie. Medewerkers van RID/R<sup>3</sup> nemen op verzoek van het IAEA deel aan expert missions. RID/R<sup>3</sup> verzorgt workshops en symposia voor het IAEA op gebieden die samenhangen met het bedrijven van een wetenschappelijke onderzoeksreactor.

Gezien het maatschappelijk belang aan een goed toezicht van de overheid, wordt in Paragraaf 8.2 apart ingegaan op de taken van de overheid met betrekking tot vergunningverlening (Directie Stoffen, Afvalstoffen en Straling (SAS) van het Ministerie van VROM) en toezicht (Kernfysische Dienst, KFD).

Tabel 8.1 geeft een overzicht van het aantal medewerkers dat werkzaam is bij organisaties die zich in Nederland bezig houden met kernenergie. Hierbij gaat het om het totale aantal medewerkers (d.w.z. inclusief ondersteunend personeel). Het aantal medewerkers met technologische en nucleaire kennis zal hierdoor lager zijn.

Tabel 8.1 *Aantal medewerkers bij organisaties in Nederland die zich bezig houden met kernenergie*

Organisatie		Aantal medewerkers
Enrichment Technology	Almelo	435
NRG	Petten/Arnhem	340
EPZ - kerncentrale	Borssele	325
Urenco	Almelo	235
Institute for Energy	Petten	216
RID/R <sup>3</sup>	Delft	160
COVRA	Vlissingen	50
VROM KFD	Den Haag	25
VROM SAS (nucleaire expertise)	Den Haag	13
Totaal		1799

## 8.2 Nucleaire kennis bij de overheid

Het bevoegd gezag voor nucleaire installaties in Nederland wordt gevormd door een aantal instanties. De belangrijkste daarvan zijn de Directie Stoffen, Afvalstoffen en Straling (SAS) van het Ministerie van VROM en de Kernfysische Dienst (KFD). Organisatorisch valt de KFD onder de VROM-Inspectie.

Door internationale verdragen en conventies heeft de Nederlandse overheid bepaalde verplichtingen op het gebied van kernenergie ten aanzien van beveiliging, toezicht op de veiligheid, afvalbeheer en financiële aansprakelijkheid. Een van deze conventies is de 'Convention on Nuclear Safety', die in 1994 is getekend. Hierin worden ondermeer aan het bevoegd gezag aangaande nucleaire veiligheid eisen gesteld m.b.t. voldoende autoriteit, competentie, financiële middelen en personeelsbezetting. Voor deze conventie wordt regelmatig een statusrapport opgesteld. In de laatste versie (VROM, 2004) zijn een aantal zorgpunten omschreven voor de KFD, die in Paragraaf 8.3 verder aan de orde komen.

De overheid heeft een belangrijke rol als toezichthouder op activiteiten waarbij met radioactieve stoffen wordt omgegaan en/of nucleair-technische installaties worden bedreven. De IAEA, het Internationale Atoomenergieagentschap van de VN te Wenen, heeft de eisen aan dat toezicht op hoofdlijnen in diverse 'Safety Standards' (GS-serie) beschreven. Nederlandse ambtenaren hebben zitting in internationale commissies bij de IAEA die betrokken zijn bij de samenstelling van dit soort documenten. Een belangrijke commissie is de Nuclear Safety Standards Committee (NUSSC) waar de overheid via de KFD in vertegenwoordigd is. Andere commissies zijn de Radiation Safety Standards Commission (RASSC), de Transport Safety Standards Committee (TRANSSC) en de Waste Safety Standards Committee (WASSC) waar de overheid via SAS in is vertegenwoordigd.

Het toezicht door de overheid op de bedrijfsvoering van nucleaire installaties en het opleidingsniveau is in wetgeving en besluiten vastgelegd. Op praktisch niveau zijn, binnen het kader van de wetten en besluiten, regels vastgelegd in de zogenoemde Nucleaire Veiligheids Regels (NVR). Hierin zijn onder andere voorschriften over personeelsbezetting, werving, opleiding en autorisatie vastgelegd voor zowel de overheid als de vergunninghouder. Deze regels en de hieraan ontleende richtlijnen liggen vast in de vergunning, waaraan de vergunninghouder, c.q. exploitant van een kerncentrale moet voldoen.

#### *Directie SAS*

De Directie Stoffen, Afvalstoffen en Straling (SAS) bestrijkt een breder gebied dan alleen nucleaire zaken. Ten aanzien van nucleaire activiteiten zijn de belangrijkste taken van Directie SAS de ontwikkeling van beleid en verzorgen van de implementatie van regelgeving op het gebied van de stralingshygiëne en de nucleaire veiligheid ter bescherming van mens en milieu. SAS is ook verantwoordelijk voor de vergunningverlening van nucleaire installaties en nucleaire transporten. Dit gebeurt bij de afdeling SNB (Straling, Nucleaire en Bioveiligheid). Deze afdeling houdt zich ook bezig met genetisch gemodificeerde organismen. Bij SNB zijn 13 personen werkzaam op het terrein van straling en nucleaire technologie.

#### *Kernfysische Dienst*

De taak van de Kernfysische Dienst (KFD) is het toezicht op de naleving van vergunningsvoorschriften van nucleaire installaties, toezicht op veiligheidsmanagement, veiligheidsbeoordelingen van storingsen en wijzigingen en het leveren van bijdragen aan vergunningen. Daarnaast houdt de KFD zich onder andere bezig met de implementatie van 'severe accident management' en ziet de dienst toe op het transport van nucleair materiaal en de non-proliferatie (teggengaan van verspreiding) van nucleair materiaal en technologie.

De KFD heeft alle belangrijke disciplines in huis zoals reactorveiligheid, stralingshygiëne, beveiliging, non-proliferatie, procestechiek, materiaalkunde en ongevalmanagement. Waar aanvullende gedetailleerde kennis nodig is, kan de KFD die middels externe specialisten inhuren. Dit is één van de beleidslijnen van de KFD: het behouden van de kerncompetenties en overblijvende zaken uitbesteden aan derden. Inspecties door buitenlandse diensten en IAEA-missies, zoals OSART (Operational Safety Review Team) en AMAT (Ageing Management Assessment Team) verstevigen het veiligheidsregime en zorgen voor een vruchtbare uitwisseling van kennis en ervaring tussen buitenlandse en binnenlandse deskundigen.

De KFD heeft ongeveer 25 formatieplaatsen. Er zijn nieuwe medewerkers aangetrokken met het oog op de toekomst. Per jaar gaan de medewerkers tussen de 10 à 15 dagen in training.

De formatie is een punt van aandacht voor het management van de KFD omdat gemiddelde leeftijd van de stafleden meer dan 55 jaar is. Het positieve effect van grote ervaring kan op termijn teniet worden gedaan door verlies van expertise door pensioneringen. De KFD heeft daarom momenteel een actief beleid van verjonging en kennisoverdracht.

### 8.3 Kennisinfrastructuur in de toekomst

De omvang van de Nederlandse kennisinfrastructuur met betrekking tot kernenergie heeft een bepaalde relatie met de grootte van de nationale nucleaire industrie. Naar internationale maatstaven is die bescheiden. Toch is de kennisinfrastructuur relatief groot, wegens de aanwezigheid van belangrijke onderzoeksfaciliteiten. Daarnaast ziet men ook in Nederland de internationale trend dat het personeelsbestand in alle nucleaire sectoren vergrijsd, wegens het uitblijven van nieuwbouw van kerncentrales. De laatste jaren is een begin gemaakt met de verjonging van het personeelsbestand, maar de vergrijzing heeft inmiddels wel geleid tot het vertrek van kennis en ervaring.

#### *Aanpak vergrijzing*

Het management van de KFD is zich van de vergrijzing bewust en vangt de nadelige effecten van genoemde ontwikkelingen op diverse manieren op:

- De KFD trekt nieuw jong personeel aan met relevante kennis, die door ‘training on the job’ wordt aangevuld. Er wordt een plan gemaakt voor de vervanging van ervaren medewerkers die op termijn met pensioen gaan.
- De KFD heeft intensief contact met collega diensten, zoals de GRS in Duitsland en de AVN en FANC in België. Aan de GRS en de AVN wordt door de KFD werkzaamheden uitbesteed. Verder zijn er contacten met de Zwitserse collega’s van HSK en worden contacten gezocht met buitenlandse diensten die in een vergelijkbare positie verkeren als de KFD. Daarnaast zijn de contacten uit WENRA (Western European Nuclear Regulators’ Association) en andere internationale organen nuttig voor ondersteuning van de taken van de KFD in Nederland. Voor de toezichhoudende taken kan de KFD ook in de toekomst ondersteuning vragen bij de IAEA.
- Bezuinigingen hebben invloed op de formatie. Hiervoor wordt gecompenseerd via samenwerking met andere inspectiediensten in Nederland die niet-nucleaire zaken voor hun rekening kunnen nemen.

Omdat bovengenoemde maatregelen misschien niet afdoende zijn om een pensioneringsgolf op tijd op te vangen, worden door de KFD de bestaande contacten met externe partijen, zoals GRS en AVN, verder uitgebreid.

NRG heeft in opdracht van de KFD een studie uitgevoerd (NRG, 2006) naar de behoeften en mogelijkheden van het opzetten van een Masters studie Nuclear Engineering. Uit de studie blijkt dat hiervoor bij een aanzienlijk aantal bedrijven en instellingen in Nederland interesse bestaat. Daarnaast heeft NRG de afgelopen jaren veel nieuwe mensen aangetrokken en intern opgeleid. Ondanks de krappe arbeidsmarkt blijkt er toenemende belangstelling voor het werken aan kernenergie.

EPZ werkt aan verjonging van het personeelsbestand door opleiding en training op verschillende niveaus. Zo is EPZ via de stichting KINT (Kennis Infrastructuur Nucleaire Technologie) bezig met het van de grond krijgen van de bovengenoemde Masters of Nuclear Engineering. Daarnaast wordt bij EPZ les gegeven in nucleaire systemen aan studenten van de hogeschool Zeeland en ROC Westerschelde.

### *Onderzoeks- en ontwikkelingsinfrastructuur*

Zowel NRG als RID/R<sup>3</sup> heeft plannen om de onderzoek- en ontwikkelingsinfrastructuur te verbeteren en/of te vernieuwen. NRG werkt samen met het Institute for Energy, TU Delft en Malmkrod Medical aan het Pallas project dat als doel heeft om de opvolger van de HFR te realiseren. RID/R<sup>3</sup> heeft recent bij NWO in het kader van 'NWO Groot' een voorstel ingediend voor een 'Upgrade+' ook wel de 'Dutch Cold Neutron Research Facility' genoemd. Realisatie van deze faciliteiten zou de goede positie van het Nederlandse nucleaire onderzoek en opleiding in de toekomst zeker stellen.

### *Groeimarkt voor kernenergie*

NRG is in toenemende mate actief in het buitenland. De toename is het resultaat van een aantrekkelijke nucleaire markt door hernieuwde aandacht voor kernenergie en de reactie van NRG hierop. NRG is in dit kader een contract aangegaan met de Frans/Duitse reactorbouwer Areva om actief bij te dragen aan de bouw van de EPR in Finland. NRG neemt daarbij deel aan de safety engineering. Het project neemt minimaal vijf jaar in beslag waarbij aanvankelijk enkele NRG-medewerkers bij Areva in Erlangen (D) zijn gedetacheerd en zijn geïntegreerd in de Areva projectorganisatie. Hierdoor nemen zij kennis van de 'work flow' binnen het concern en van de Areva werkprocedures. In 2008 zullen ze bij NRG fungeren als 'first point of contact' voor door Areva aan NRG uitbestede werkpakketten

Wereldwijd heeft er een consolidatie plaatsgevonden van grote nucleaire engineering en contracting firma's en van reactorbouwers. De overgebleven reactorbouwers maken gebruik van een groot aantal onderleveranciers. Zo is het aantal subcontractors bij de bouw van de Finse EPR meer dan 1500 uit 28 verschillende landen. Door toenemende internationale interesse in kernenergie en de nucleaire initiatieven in Nederland (uitbreiding Urenco, bedrijfsduurverlenging Borssele tot 2033 en het Pallas project in Petten) is ook de Nederlandse toeleverende industrie geïnteresseerd in nucleaire activiteiten. Hiervoor is in mei 2007 een industriedag georganiseerd in Borssele waar 30 bedrijven aanwezig waren. Voor het kernfusieproject ITER, waar ook hoogwaardige producten toegeleverd moeten worden, is het ITER-NL project opgericht. Hierin bereiden NRG, TNO en FOM het Nederlandse MKB voor op bijdragen aan de bouw van de ITER fusiereactor in Frankrijk.

Door de groei in de markt voor kernenergie is er een ontwikkeling op gang gekomen waarbij gasdiffusietechnologie voor de verrijking van splijtstof wordt vervangen door centrifuge technologie. In 2006 werd de ETC Group opgericht, een joint venture tussen Urenco en Areva. ETC levert momenteel ultracentrifuge cascades voor Areva's Georges Besse II-project (GBII) in Tricastin (Frankrijk), dat is opgezet voor de bouw van een installatie ter vervanging van de gasdiffusiefabriek van Areva. Daarnaast wordt in de Verenigde Staten, New Mexico een nieuwe verrijkinginstallatie gebouwd door de Amerikaanse vestiging van ETC. Centrifugecomponenten daarvoor worden geleverd door Enrichment Technology Nederland B.V. Voor deze projecten worden veel nieuwe mensen geworven en opgeleid in deze nucleaire technologie.

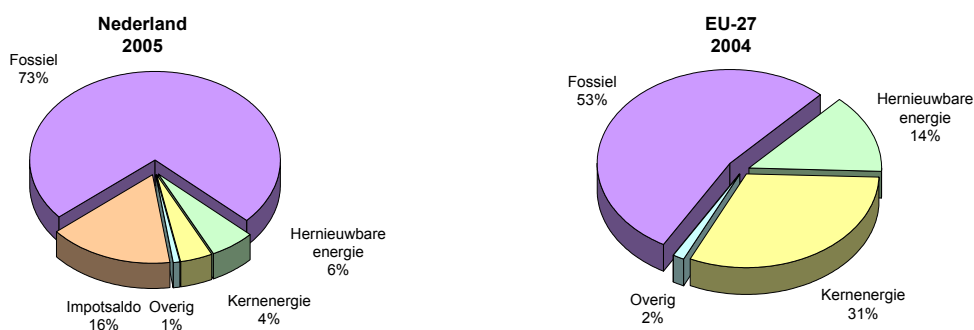
## 9. Lange termijn energietoekomstscenario's

Lange termijn energietoekomstscenario's schetsen een beeld van de toekomstige energievoorziening. Hierbinnen kunnen ontwikkelingen voor de toekomstige elektriciteitsvoorziening worden onderscheiden. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de rol van kernenergie in een aantal toekomstscenario's voor de elektriciteitsvoorziening in Nederland en in Europa. Dergelijke scenario's schetsen, aan de hand van een aantal veronderstellingen, mogelijke toekomstige ontwikkelingen, maar dienen niet beschouwd te worden als 'voorspellingen'. Vanwege het verkennende karakter komen de scenariostudies tot heel verschillende resultaten.

Voordat de resultaten van verschillende scenariostudies worden besproken, wordt in Paragraaf 9.1 eerst een beeld gegeven van de huidige rol van kernenergie in de elektriciteitsvoorziening, zowel voor Nederland als Europa. Paragraaf 9.2 geeft daarna een toelichting op de meest relevante aspecten van scenariostudies. Vervolgens worden in Paragraaf 9.3 de resultaten geschetst van vier scenariostudies voor Nederland en in Paragraaf 9.4 van vijf scenariostudies voor Europa.

### 9.1 Huidige rol kernenergie

De toekomstscenario's dienen te worden beschouwd in het perspectief van de huidige situatie. Het is daarom nuttig om eerst de huidige rol van kernenergie in de elektriciteitsvoorziening te schetsen. In 2005 werd in Nederland 3,8 TWh elektriciteit opgewekt met kernenergie (door de kerncentrale Borssele). Dit was ongeveer 4% van het binnenlandse elektriciteitsverbruik in dat jaar (zie Figuur 9.1). Nederland importeerde in dat jaar ongeveer 16% van het binnenlandse elektriciteitsverbruik. Een deel van deze geïmporteerde elektriciteit was afkomstig van buitenlandse kerncentrales. In 2005 werd bijna driekwart van de Nederlandse elektriciteitsvraag gedekt met fossiele energie en 4% was afkomstig uit hernieuwbare bronnen.



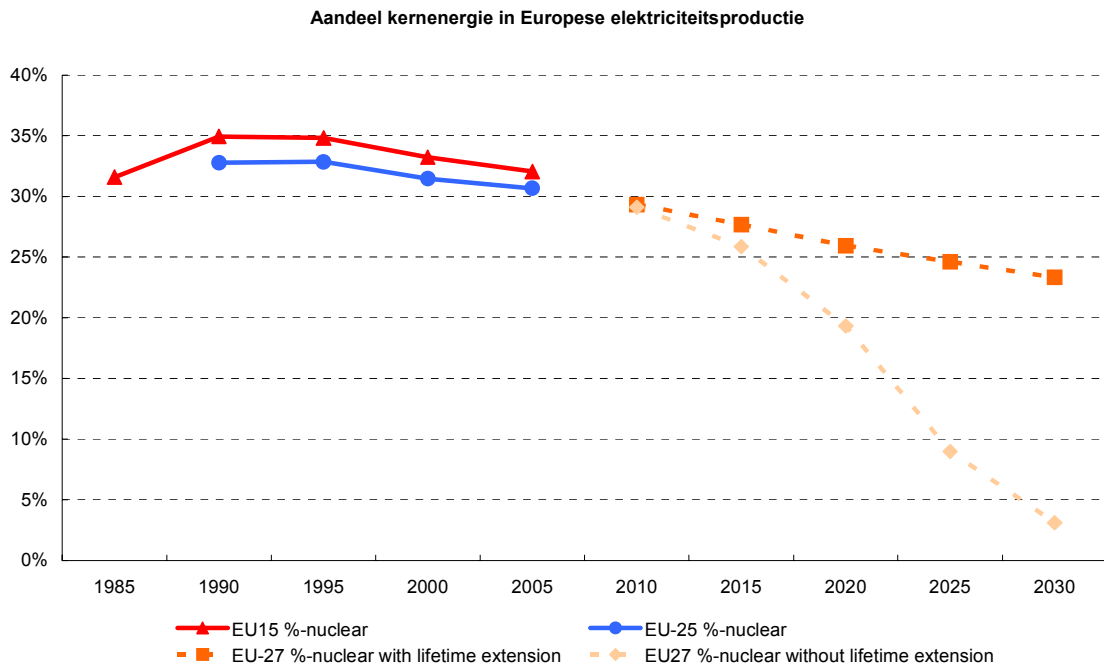
Figuur 9.1 *Aandeel kernenergie in de elektriciteitsmix van Nederland (CBS, 2005) en de EU (Eurostat, 2004)*

In de 27 lidstaten van de Europese Unie (EU-27) werd in 2004 974 TWh aan elektriciteit opgewekt met kerncentrales. Dit is 31% van het Europese elektriciteitsverbruik. Binnen de EU is Frankrijk zowel absoluut als procentueel koploper, met 429 TWh (78% van de totale Franse elektriciteitsproductie). In de EU werd in 2004 ruim de helft van de elektriciteitsvraag gedekt uit fossiele bronnen en 14% uit hernieuwbare bronnen.

Van de totale hoeveelheid primaire energie wordt ongeveer 25 tot 30% gebruikt voor de opwekking van elektriciteit. Uitgedrukt in een percentage 'fossiel equivalente' primaire energie, be-

draagt het aandeel kernenergie in de Nederlandse energievoorziening circa 1,2%. Voor de Europese energievoorziening bedraagt dit percentage circa 15%.

Veel van de huidige kerncentrales in Europa zijn al enkele decennia in bedrijf. Indien geen nieuwe kerncentrales meer in bedrijf worden genomen dan diegene die nu in aanbouw zijn of gepland (totaal 3 gigawatt) en de exploitatie van de bestaande centrales wordt na 40 jaar beëindigd, dan loopt het aandeel kernenergie in 2030 terug tot beneden de 5% (zie Figuur 9.2). Dit is niet alleen het gevolg van het sluiten van kerncentrales, maar komt ook door de stijgende elektriciteitsvraag. Wordt de exploitatie van alle bestaande kerncentrales verlengd tot 60 jaar (dit zal niet voor alle kerncentrales het geval zijn), dan daalt dit percentage tot iets onder de 25%.



Figuur 9.2 Aandeel kernenergie in EU elektriciteitsproductie wanneer, behalve de nu geplande en in aanbouw zijnde kerncentrales, geen nieuwe kerncentrales worden gerealiseerd (op basis van verdeling bouwjaren (WNA, 2007), historische en geprojecteerde elektriciteitsvraag (EU, 2006 en Eurostat) en een capaciteitsfactor van 90%)

## 9.2 Soorten energiescenario's en hun resultaten

### *Drijvende krachten en soorten scenario's*

De ontwikkelingen in de verschillende energiescenario's worden beïnvloed door veronderstellingen over de economie, demografie, technologie, milieu en maatschappelijke ontwikkelingen. Belangrijke parameters en aspecten in dergelijke scenario's zijn:

- Economische groei (groei in bruto binnenlands product, BBP).
- Economische structuur (bijv. minder energie-intensief door een grotere rol van de dienstensector).
- Demografische ontwikkelingen en gedrag van energiegebruikers.
- Brandstofprijzen.
- Energie- en emissiemarkten (bijv. de CO<sub>2</sub>-emissiehandel en impact op de marktprijs voor elektriciteit).
- Energie-, milieu- en klimaatbeleid.
- Maatschappelijke en politieke ontwikkelingen.
- Technologische ontwikkelingen.

Gezamenlijk zijn deze factoren van invloed op de ontwikkeling van de energievraag en de wijze waarop met het energieaanbod aan deze vraag tegemoet wordt gekomen.

In de beschouwde studies worden twee soorten scenario's gepresenteerd. De eerste groep van scenario's kan worden gekarakteriseerd als scenario's die vooral de *trendmatige* ontwikkelingen schetsen vanuit de huidige situatie en gebaseerd zijn op voorzetting van het bestaande overheidsbeleid. Dergelijke scenario's worden veelal aangeduid als baseline-, business as usual (BAU)- of referentiescenario's. Door andere veronderstellingen voor de hierboven genoemde parameters te kiezen, ontstaan verschillende trendscenario's.

Een tweede groep scenario's gaat uit van een *beleidsintensivering*. Bij deze scenario's wordt nieuw beleid verondersteld (bijv. extra energiebesparing, stimulering van duurzame energie, etc.) of veronderstelling gemaakt over het resultaat daarvan (bijv. reductiedoelstelling CO<sub>2</sub>-emissies, aandeel duurzame energie, etc.). In dit laatste geval kan ook gesproken worden over een *normatief* scenario. Er zijn ook scenario's waarbij bepaalde technologieën in de toekomst een specifieke rol wordt toegekend (bijv. duurzame energie of kernenergie) of juist worden uitgesloten (bijv. geen kernenergie of geen CO<sub>2</sub>-afvang bij elektriciteitscentrales).

### *Resultaten van de scenariostudies*

In de volgende twee paragrafen worden recente scenariostudies gepresenteerd voor Nederland en Europa. De studies rapporteren veelal twee tot vier verschillende scenario's. In een beperkt aantal gevallen wordt er slechts één scenario of toekomstbeeld gerapporteerd. Hoewel de meeste scenario's resultaten presenteren voor meerdere zichtjaren (soms tot 2050), is er hier voor gekozen alleen resultaten te laten zien voor 2030. Resultaten over dat zichtjaar worden voor vrijwel alle scenario's gegeven. Resultaten van de scenarioprojecties kunnen echter onderling alleen goed worden vergeleken indien ze afkomstig zijn van dezelfde studie. De gebruikte methoden, randvoorwaarden en uitgangspunten bij het maken van de scenarioprojecties kunnen namelijk sterk van elkaar verschillen. Een beleidsintensiverend scenario kan bijvoorbeeld alleen worden vergeleken met een trendscenario uit dezelfde studie, maar niet met andere trendscenario's.

Bij het bespreken van de resultaten wordt in Paragrafen 9.3 en 9.4 onderscheid gemaakt tussen de elektriciteitsvraag en het elektriciteitsaanbod. Veronderstellingen over de economische groei en energiebesparing (op finale energievraag) spelen een belangrijke rol bij de elektriciteitsvraag. Bij het elektriciteitsaanbod zijn veronderstellingen over brandstofprijzen en de CO<sub>2</sub>-prijs (indien van toepassing) van belang. Energie-efficiency, die bijdraagt aan energiebesparing, speelt eveneens een rol bij het elektriciteitsaanbod, vanwege het rendement van de energieomzetting en eventuele toepassing van warmtekrachtkoppeling. Er worden bij de scenario's ook veronderstellingen gemaakt over de energiebronnen en technologieën die worden ingezet voor de opwekking van elektriciteit, d.w.z. hernieuwbare energie, fossiele energie (met of zonder CO<sub>2</sub>-afvang) en kernenergie.

Nadat in Paragrafen 9.3 en 9.4 de vraag en het aanbod van elektriciteit zijn besproken, wordt een overzicht gegeven van de CO<sub>2</sub>-emissiereducties die bij de scenario's worden gerapporteerd.

## 9.3 Energiescenario's voor Nederland

In deze paragraaf worden een aantal lange termijn scenariostudies gepresenteerd die in 2006 en 2007 zijn gepubliceerd voor de Nederlandse energievoorziening. Het gaat om de volgende vier studies:

1. *Welvaart en Leefomgeving (WLO, 2006)*: in kader van deze studie, die door CPB, MNP, RPD en ECN is uitgevoerd, is een viertal trendmatige lange termijn scenario's ontwikkeld: Global Economy (GE), Transatlantic Markets (TM), Strong Europe (SE) en Regional Communities (RC). De scenario's hebben een tijdhorizon tot 2040 en gaan uit van 'huidig' beleid (stand van zaken 2004, maar ten aanzien van duurzaam energiebeleid geactualiseerd tot na-



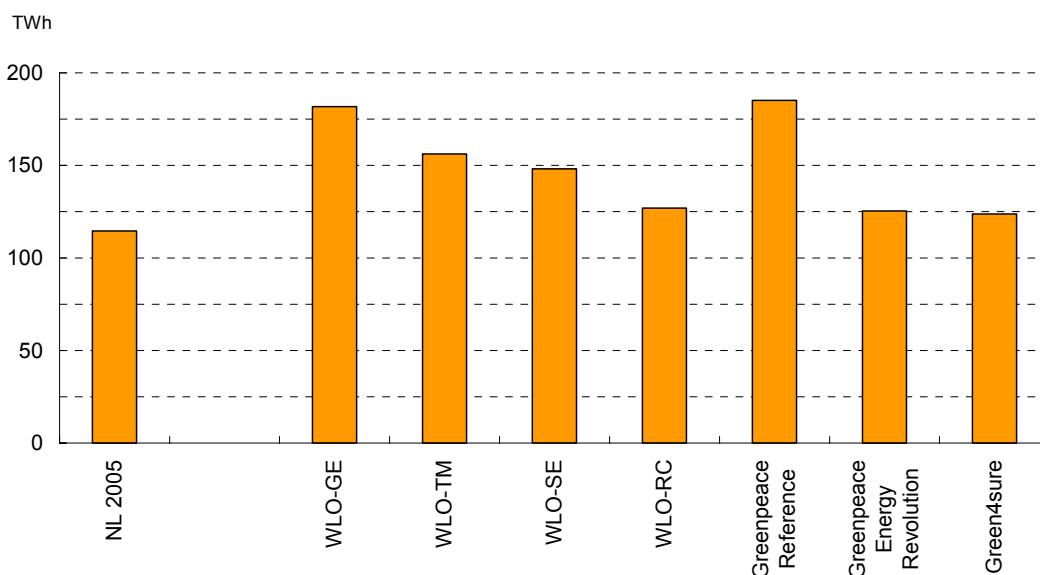
jaar 2005). Bij het GE- en TM-scenario wordt na 2020 uitgegaan van een toekomstbeeld waarbij geen klimaatbeleid en duurzame energiebeleid wordt gevoerd, dus in feite een breuk met het bestaande beleid.

2. *Het Groene Energieplan ofwel het Green4sure scenario (CE, 2007a)*: Het Green4sure scenario is in opdracht van ABVAKABO, FNV, Greenpeace, Milieudefensie, Stichting Natuur & Milieu en het Wereld Natuur Fonds opgesteld door CE. Het beleidsintensiverende scenario is geënt op WLO-SE en heeft als doel 50% CO<sub>2</sub>-reductie te realiseren ten opzichte van 1990. Het scenario heeft een horizon tot 2030.
3. *Energy Revolution scenario (Greenpeace, 2006a)*: Greenpeace heeft voor Nederland, naast een trendmatige scenario, een beleidsintensiverend ‘Energy Revolution’ scenario laten doorrekenen door het Duitse onderzoeksinstituut DLR. De twee scenario’s hebben een tijdhorizon tot 2050.
4. *Smart Energy Mix (KIVI/NIRIA, 2006)*: KIVI NIRIA heeft in 2006 een ‘visie’ voor Nederland geschetst onder de naam Smart Energy Mix. Voor de jaren 2025 en 2050 wordt een invulling gegeven van de primaire energiemix en de mix voor de elektriciteits- en warmteproductie. De cijfers worden als ‘verkenningstudie’ en als ‘voorlopige cijfers’ gepresenteerd.

Informatie over verschillende uitgangspunten die in de scenario’s worden gehanteerd, zoals economische groei, groei elektriciteitsvraag, energiebesparing, brandstofprijzen en CO<sub>2</sub>-prijs, worden in een Tabel 9.1 weergegeven. Niet van iedere scenariostudie zijn alle gegevens bekend.

### 9.3.1 Elektriciteitsvraag

De ontwikkeling van de elektriciteitsvraag wordt in de verschillende scenario’s getoond in Figuur 9.3. Het Smart Energy Mix scenario ontbreekt hierin omdat dit scenario geen informatie geeft over de elektriciteitsvraag. De figuur laat de totale elektriciteitsvraag zien in 2005 (CBS, 2006) en in 2030. Bij alle scenario’s is sprake van een autonome groei van de elektriciteitsvraag die samenhangt met de economische groei, maar ook afhankelijk is van de elektriciteitsprijzen (zie Tabel 9.1). Energiebesparing dat is verondersteld beïnvloedt de elektriciteitsvraag.



Figuur 9.3 *Elektriciteitsvraag voor Nederland in 2005 en 2030 voor de verschillende scenario’s*

Tabel 9.1 *Uitgangspunten voor de Nederlandse energiescenario's*

Uitgangspunt	Welvaart en Leefomgeving (WLO, 2006)	Groen Energieplan (Green4sure) (CE, 2007a)	Energy Revolution (Greenpeace, 2006a)	Smart Energy Mix (KIVI/NIRIA, 2006)
Economische groei	De gemiddelde economische groei (in termen van BBP) tot 2040 varieert van 0,7% per jaar in RC naar 1,6% per jaar in SE en 1,9% per jaar in TM tot 2,6% per jaar in GE.	De ontwikkeling van de economische groei is dezelfde als het WLO-SE scenario.	De gemiddelde economische groei van het BBP tot 2050 2,1% per jaar.	Stijgend welvaartspeil van 2 tot 3% per jaar.
Elektriciteitsvraag	De groei in de elektriciteitsvraag bedraagt ongeveer 2/3 van de groei in BBP.	De groei van de elektriciteitsvraag is 1,4% per jaar tot 2010 en 0,4% per jaar tot 2020. Na 2020 neemt de elektriciteitsvraag met 0,3% per jaar af.	De groei van de elektriciteitsvraag in het referentiescenario is tussen 2010 en 2050 1,1% per jaar. In het alternatieve scenario groeit de elektriciteitsvraag tot 2010, waarna deze groei vrijwel nihil is.	Groei elektriciteitsvraag 1,3% per jaar tussen 2005 en 2025, en 2,7% na 2025.
Energiebesparing	Tot 2020 is het energiebesparingtempo in de 0,8% (GE en SE) of 0,9% (TM en RC) per jaar, maar na 2020 daalt het besparingtempo in de scenario's naar een niveau van 0,4% tot 0,6% per jaar.	De energie-efficiency (energiebesparing en structureffecten) neemt toe tot gemiddeld 2,1%/jaar.	De energie-intensiteit (energievraag per eenheid BBP) neemt in het alternatieve scenario gemiddeld af met 3,4% per jaar tot 2050. In het referentiescenario is dat 1,6% per jaar.	Toename energievraag tot 2025 beperkt tot 0,5-0,75% per jaar. Na 2025 is de toename van de energievraag bijna nul.
Brandstofprijzen	De olieprijs varieert van \$21 tot \$28 per vat in 2040 <sup>3</sup> . Aardgasprijzen lopen op tot € 4,7 tot € 6,9 per GJ in 2040. De kolenprijs is circa € 2 per GJ.	De brandstofprijzen zijn gelijk aan die van het WLO-SE scenario	De olieprijs loopt van \$32 per vat in 2010 op tot \$59 dollar per vat in 2050. Aardgasprijzen lopen op van € 4,1 per GJ in 2010 tot € 8,6 per GJ in 2050. De kolenprijs loopt op van € 1,9 per GJ in 2020 tot € 2,8 per GJ in 2050.	De olieprijs loopt van \$40 per vat in 2010 op tot \$60 per vat in 2050. Er zijn geen gegevens over andere brandstofprijzen
CO <sub>2</sub> -prijs	In SE-scenario is verondersteld dat er effectief internationaal klimaatbeleid tot stand, met een CO <sub>2</sub> -prijs oplopend tot meer dan 80 €/ton CO <sub>2</sub> in 2040. In het RC-scenario blijft de stijging tot 20 €/ton beperkt. In het TM- en GE-scenario valt het klimaatbeleid en duurzame energiebeleid na 2020 weg en bestaat er geen emissiehandel meer.	De CO <sub>2</sub> -prijs loopt sneller op dan het WLO-SE scenario, van 11 €/ton CO <sub>2</sub> in 2010 (SE: 7), 35 €/ton CO <sub>2</sub> in 2020 (SE: 11) tot 58 €/ton CO <sub>2</sub> in 2030 voor zowel het SE als het Green4sure scenario.		
Investeringskosten kernenergie (zie ter vergelijking Tabel 5.2)	€ 2000/kW (disconteringsvoet 10%, exploitatieperiode 20 jaar)	€ 2000/kW (disconteringsvoet 10%, exploitatieperiode 20 jaar)	€ 1930/kW (disconteringsvoet 6%)	€ 2700/kW (disconteringsvoet 5%, exploitatieperiode 40 jaar).

<sup>3</sup> Voor het GE-scenario is ook een variant uitgewerkt waarbij de olieprijsen oplopen tot \$40 per vat (de dollarkoers is die van 2000). Omdat de elektriciteitsprijzen afhankelijk zijn van de aardgasprijs, en verondersteld is dat de gasprijs in 2030 boven de prijs ligt die vergelijkbaar is met die van olie, speelt de olieprijs in de elektriciteitsproductie niet langer een rol.

Alle scenario's tonen een elektriciteitsvraag in 2030 die hoger is dan die in 2005. De scenario's met de hoogste elektriciteitsvraag zijn het WLO-GE scenario (hoge gemiddelde economische groei en geen klimaat- en duurzame energiebeleid na 2020) en het referentiescenario uit de Energy Revolution studie. De andere WLO-scenario's laten zien dat groei van de elektriciteitsvraag lager kan zijn wanneer omstandigheden veranderen (o.m. lagere gemiddelde economische groei, voorzetting klimaat en duurzame energiebeleid). Het effect dat energiebesparingsbeleid kan hebben op de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag kan worden afgeleid uit vergelijking van de twee scenario's uit de Energy Revolution studie (-32%) en het Green4sure scenario met het WLO-SE scenario (-16%).

#### ***Verkenning van het nieuwe regeringsbeleid: Schoon en Zuinig***

Door ECN en MNP is een eerste verkenning uitgevoerd (Menkveld en Van den Wijngaart, 2007) naar de maatregelen en beleidsinstrumenten waarmee de doelstellingen van de huidige regering (Nederlandse regering, 2007) op het gebied van energie- en klimaatbeleid gerealiseerd kunnen worden. De onderzochte doelstellingen zijn:

- 30% vermindering van de uitstoot van broeikasgassen in 2020 ten opzichte van 1990,
- 20% aandeel voor duurzame energie in 2020,
- een energiebesparingtempo van 2% per jaar.

Tegen de achtergrond van het Global Economy (GE) scenario (WLO, 2006), hebben ECN en MNP onderzocht met welke maatregelen op de meest kosteneffectieve manier voldaan kan worden aan deze doelstellingen. Het realiseren van emissiereducties in het buitenland zijn hierbij buiten beschouwing gelaten. Er zijn twee routes onderzocht:

1. Een 'Vaste' route waarbij alle drie de doelen gehaald moeten worden.
2. Een 'Flexibele' route waarbij alleen het doel van 30% vermindering aan broeikasgassen gehaald moet worden.

In de vaste route is de elektriciteitsproductie sterk gebaseerd op de inzet van aardgas en hernieuwbare bronnen: bestaande kolencentrales schakelen over op aardgas, alleen nog nieuwe gascentrales, oude minder efficiënte gascentrales worden versneld vervangen, uitbreiding van windenergie op zee, biomassa-centrales en warmtekrachtkoppeling. In de flexibele route, waarbij alleen broeikasgasreductie wordt beoogd, komen er wel nieuwe kolencentrales, die worden uitgerust met CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag. Een ander belangrijk verschil met de vaste route is dat in de Flexibele route ook uitbreiding van windenergievermogen op land plaatsvindt.

Het coalitieakkoord sluit nieuwbouw van kerncentrales uit in de huidige regeerperiode. Nieuwbouw van kerncentrales is in de verkenning van de twee routes daarom niet meegenomen. In de vaste route is er geen of weinig ruimte voor kernenergie, omdat de doelen voor energiebesparing en duurzaam moeten worden gehaald. Kernenergie draagt immers alleen bij aan broeikasgasreductie en niet aan energiebesparing en hernieuwbare energie. In de flexibele route zou kernenergie wel een plaats kunnen vinden.

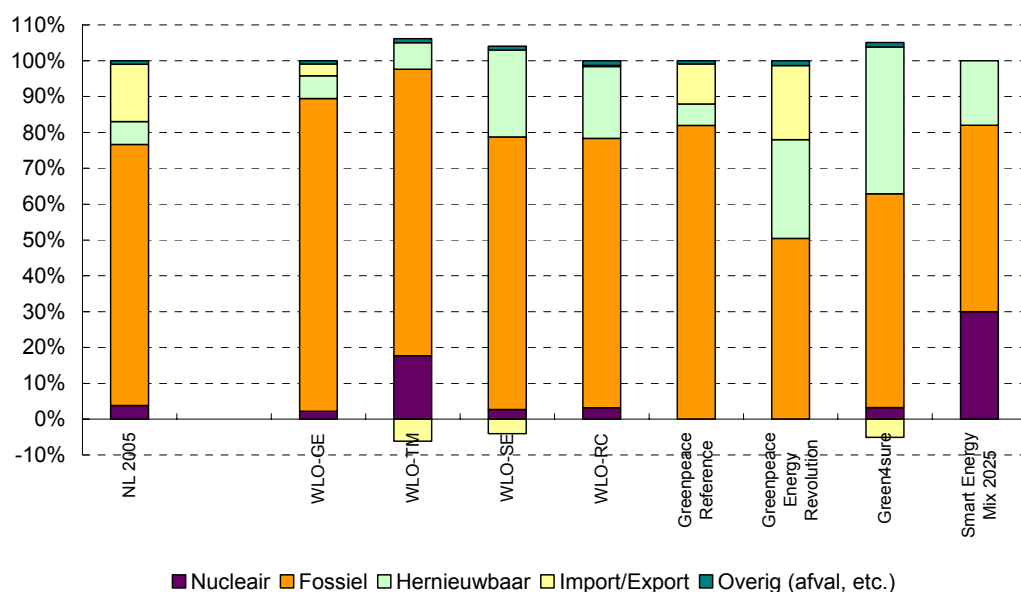
### **9.3.2 Elektriciteitsaanbod**

Figuur 9.4 toont voor de verschillende scenario's de herkomst van elektriciteit die wordt geleverd aan Nederlandse eindverbruikers in 2030. Ter vergelijking wordt ook de herkomst van elektriciteit in 2005 gegeven. Omdat voor het Smart Energy Mix scenario geen gegevens bekend zijn voor 2030, wordt voor dat scenario de herkomst aangegeven voor 2025. Figuur 9.4 laat zien dat de elektriciteit afkomstig is van elektriciteitscentrales (fossiele brandstoffen of nucleair) of installaties die elektriciteit produceren uit hernieuwbare bronnen in Nederland. Daarnaast kan elektriciteit uit het buitenland worden geïmporteerd. Het totaal is dan 100% en dekt de elektriciteitsvraag zoals in Figuur 9.3 is getoond. In sommige scenario's wordt in Nederland

meer elektriciteit geproduceerd dan voor de Nederlandse afnemers nodig is. Er wordt dan geëxporteerd. Dit verklaart waarom voor deze scenario's de totale productie hoger is dan 100%.

### Elektriciteitimport of -export

Het importaandeel was in 2005 16%. In het WLO-GE scenario is nog steeds sprake van elektriciteitimport, maar die is in 2030 gedaald naar 3%. In twee andere WLO-scenario's wordt verondersteld dat in 2030 elektriciteit wordt geëxporteerd (6% in TM en 4% in SE). In het Green4sure scenario, dat het WLO-SE scenario als referentie gebruikt, is sprake van 5% import. De Energy Revolution studie gaat ook uit van elektriciteitsimport in 2030. In het referentiescenario is dit 11% en in het alternatieve scenario is het importaandeel ruim 20%, waarvan 70% afkomstig is van hernieuwbare bronnen. In de overige scenario's wordt ervan uitgegaan dat Nederland per saldo geen elektriciteit importeert of exporteert.



Figuur 9.4 Aandeel kernenergie en andere bronnen in het finale elektriciteitsverbruik voor Nederland in 2005 en in 2030 in verschillende energiescenario's (SEM voor 2025). In geval van netto-export is een negatief importsaldo weergegeven.

### Hernieuwbare energie

In het WLO-GE scenario en het referentiescenario uit de Energy Revolution studie daalt het aandeel elektriciteit uit hernieuwbare bronnen. In alle andere scenario's neemt het aandeel hernieuwbaar toe. In de trendscenario's WLO-SE is dit 24% en WLO-RC 20%. Door extra duurzaam energiebeleid neemt het aandeel uit hernieuwbare bronnen toe bij Energy Revolution van 6% (referentie) naar 28% (alternatief) en bij Green4sure naar bijna 41% ten opzichte van de referentie 24% (WLO-SE). In het Smart Energy Mix scenario is het aandeel hernieuwbare elektriciteit 18%.

### Fossiele brandstoffen

De toepassing van fossiele brandstoffen bij de elektriciteitsproductie is bepalend voor de CO<sub>2</sub>-emissies van deze sector. Er zijn verschillende manieren om de CO<sub>2</sub>-emissies te beperken:

- Gebruik van aardgas in plaats van kolen. De CO<sub>2</sub>-emissies van kolen zijn bijna tweemaal hoger dan die van aardgas. De CO<sub>2</sub>-emissies van olie ligt hier tussen in, maar olie wordt in Nederland nauwelijks gebruikt bij elektriciteitsproductie.
- Verbetering van het energierendement. In de scenario's wordt er van uitgegaan dat nieuwe elektriciteitscentrales een beter rendement hebben dan de bestaande centrales. Deze rendementsverbetering draagt bij aan de energiebesparing en daling van de energie-intensiteit.
- Toepassing van warmtekrachtkoppeling (WKK).

- Toepassing van CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag van de CO<sub>2</sub> in de bodem (bijv. oud gasveld).

In de trendscenario's varieert het aandeel kolen in 2030 tussen 23% (WLO-SE en referentiescenario Energy Revolution), ongeveer het huidige niveau in de Nederlandse elektriciteitsproductie, en 52% (WLO-SE). Het aandeel gas in de trendscenario's varieert tussen 30% (WLO-TM) en 60% (referentiescenario Energy Revolution). Deze laatste waarde ligt iets onder het huidige niveau. In alle beleidsscenario's neemt het aandeel kolen af. In 2030 is het aandeel kolen in Smart Energy Mix naar 16%, in Green4sure naar 9% en in Energy Revolution naar 2%.

In de scenario's wordt warmtekracht voornamelijk toegepast bij elektriciteitsproductie uit aardgas. In de referentiescenario's van Green4sure (WL-SE) en Energy Revolution varieert het aandeel WKK in 2030 tussen de 21% en 26%, iets onder het huidige niveau. In de beleidsscenario's stijgt het aandeel WKK in 2030 naar 34% (Green4sure) en 51% (Energy Revolution). Ook in Smart Energy Mix is WKK opgenomen, maar daarover zijn geen concrete cijfers beschikbaar.

In de trendscenario's is alleen in het WLO-SE scenario verondersteld dat bij kolencentrales CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag wordt toegepast. Bij twee van de drie beleidsscenario's wordt ook uitgegaan van toepassing van deze technologie. Dat is bij het Green4sure scenario (ook bij nieuwe gasgestookte elektriciteitscentrales) en in het Smart Energy Mix scenario. In het Energy Revolution scenario wordt toepassing van deze technologie uitgesloten.

### *Kernenergie*

In drie van de WLO-scenario's is er elektriciteitsproductie door de kerncentrale Borssele (GE, SE en RC). Dit geldt ook voor het Green4sure scenario. In de twee scenario's uit de Energy Revolution studie is verondersteld dat de kerncentrale Borssele in 2030 is gesloten. In twee scenario's vindt uitbreiding van kernenergie plaats. Dit is in het trendmatige scenario WLO-TM (17%) en het beleidsintensiverende Smart Energy Mix scenario (30%). In het WLO-TM scenario vindt geen klimaatbeleid en duurzaam energiebeleid plaats. Hierdoor is het aandeel fossiel brandstoffen relatief groot en het aandeel hernieuwbare energie relatief klein. In het Smart Energy Mix scenario, waarmee wel een reductie van broeikasgassen wordt beoogd, wordt kernenergie ingezet in combinatie met een toename van hernieuwbare energie. In twee andere beleidsintensiverende energiescenario's (Energy Revolution en Green4sure) vindt geen uitbreiding van kernenergie plaats.

### 9.3.3 Broeikasgasemissies

De CO<sub>2</sub>-emissies die in de scenariostudies worden gerapporteerd hebben betrekking op de gehele energievoorziening en niet enkel op de elektriciteitsproductie. De broeikasgasemissies vertonen bij trendscenario's (WLO en referentiescenario van Energy Revolution) een spreiding tussen -9% en +57%. Door beleidsintensivering wordt bij het Green4sure scenario een emissiereductie gerealiseerd die 36% lager is dan het referentiescenario (WLO-SE). Bij Energy Revolution is het effect op de CO<sub>2</sub>-reductie groter van: +36% (referentie) naar -50% (alternatief).

Tabel 9.2 *Verandering CO<sub>2</sub>-emissies in 2030 gerapporteerd in verschillende scenariostudies voor Nederland*

Scenario	Toe- of afname van de CO <sub>2</sub> -emissies in 2030 t.o.v. 1990 [%]
WLO (WLO, 2006)	
– GE	+57
– TM	+34
– SE	0
– RC	-9
Green4sure** (CE, 2007a)	-36*
Energy Revolution (Greenpeace, 2006a)	
– Referentie	+36
– Alternatief***	-54
Smart Energy Mix (KIVI/NIRIA, 2006)	-10 tot -25 (2025)

\* met inbegrip van de reductie van overige broeikasgassen en aankoop van CO<sub>2</sub>-emissierechten via CDM/JI resulteert er een vermindering van 50% in 2030.

\*\* in 2020 -10% (excl. CDM/JI).

\*\*\* in 2020 -32%.

## 9.4 Energiescenario's voor Europa

Voor de EU zijn de afgelopen jaren door verschillende partijen lange termijn scenario's opgesteld voor de Europese energievoorziening. De tijdshorizon van deze scenario's is meestal 2030 of 2050. In deze paragraaf worden projecties voor de Europese elektriciteitsvoorziening besproken die afkomstig zijn van de volgende scenariostudies:

1. *Trends to 2030, update 2005 (EU, 2006)*: Het Directoraat Generaal voor Transport en Energie (DG-TREN) laat periodiek voor Europa energiescenario's opstellen. Voor deze scenario's wordt het PRIMES-model gebruikt van het Institute of Communication and Computer Systems of National Technical University of Athens (ICCS-NTUA). Het trendmatige baselijn scenario heeft een tijdshorizon tot 2030. Het scenario is een update van een eerdere scenariostudie uit 2003 waarin naast dit baseline scenario ook een aantal beleidsscenario's zijn gepresenteerd. De beleidsscenario's zijn niet verder beschouwd, omdat de uitgangspunten voor de 2003 studie gedateerd zijn.
2. *World Energy Outlook 2006 (IEA, 2006)*: De IEA stelt energiescenario's op voor alle regio's in de wereld. Voor de Europese Unie worden de resultaten apart beschreven. De World Energy Outlook bevat een referentiescenario en een alternatief beleidsscenario.
3. *Role of Electricity scenario (Eurelectric, 2007)*: Door de Europese organisatie van elektriciteitsbedrijven, Eurelectric, zijn een aantal Europese elektriciteitsscenario's opgesteld met een tijdshorizon tot 2030. Het betreft (1) een baseline scenario dat is gebaseerd op het baselijnscenario van Trends to 2030, (2) een beleidsscenario (Energy efficiency & RES) met energie-efficiency en duurzame energie, (3) een beleidsscenario (Supply scenario) met een toename van het aandeel kernenergie en fossiel gestookte centrales met CO<sub>2</sub>-afvang en (4) een scenario (Role of Electricity) waarbij het relatieve belang van elektriciteit in de energievoorziening toeneemt.
4. *CASCADE MINTS project (Uyterlinde et al., 2005)*: In het CASCADE MINTS project zijn met een aantal zogenoemde E3-modellen (energy, economy, environment) analyses uitgevoerd naar een drietal technologische oplossingsrichtingen (hernieuwbare energie, kernenergie, CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag) voor de toekomstige Europese elektriciteitsvoorziening. Het project is uitgevoerd door een consortium van Europese onderzoeksorganisaties en is ondersteund door de Europese Commissie vanuit het zesde kaderprogramma. De resultaten die hier worden gepresenteerd zijn afkomstig uit de studie over de rol van kernenergie (Uyterlinde et al., 2005). Het onderzoeksproject heeft een tweetal 'normatieve' scenario's ontwikkeld met een tijdshorizon tot 2030 die verschillen ten aanzien van het beleid voor kernenergie.

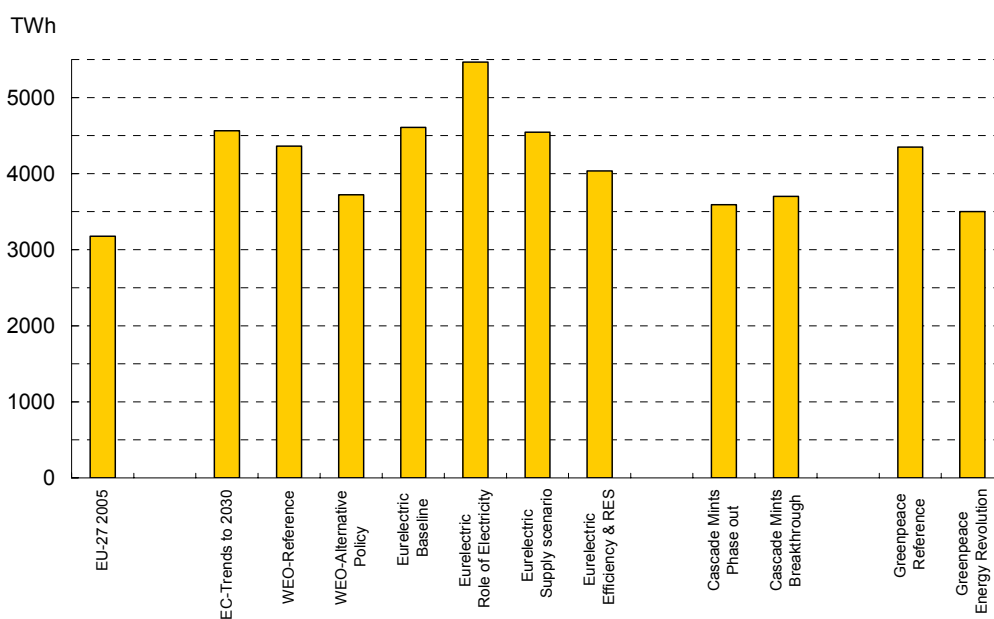
gie: (1) Nuclear phase-out en (2) Nuclear breakthrough (ook wel ‘Nuclear Renaissance & Carbon Value’ genoemd).

5. *Energy Revolution scenario voor Europa (Greenpeace, 2005)*: In opdracht van Greenpeace zijn door het Duitse instituut DLR twee Europese energiescenario’s ontwikkeld (1) een trendmatig referentie scenario, gebaseerd op het Europese scenario *Trends to 2030* uit 2003, en (2) een alternatief scenario (Energy Revolution). De scenario’s zijn vergelijkbaar met de twee scenario’s die voor Nederland zijn ontwikkeld (Greenpeace, 2006) en in de vorige paragraaf zijn besproken.

Vanwege de verschillende benaderingen bij de uitgevoerde scenariostudies, is onderlinge vergelijking eigenlijk niet goed mogelijk. Een extra moeilijkheid is dat de scenariostudies verschillen ten aanzien van het aantal lidstaten van de Europese Unie dat is meegenomen. Sommige studies gaan uit van EU-27 en andere van EU-25 (exclusief Roemenië en Bulgarije). Informatie over verschillende uitgangspunten die in de scenario’s worden gehanteerd, zoals economische groei, groei elektriciteitsvraag, energiebesparing, brandstofprijzen en CO<sub>2</sub>-prijs, worden in Tabel 9.3 weergegeven. Niet van iedere scenariostudie zijn alle gegevens bekend.

#### 9.4.1 Elektriciteitsvraag

De projecties van de toekomstige elektriciteitsvraag in de Europese scenario’s (zie Figuur 9.5) lopen voor 2030 uiteen van circa 3000 TWh (Greenpeace, Energy Revolution), iets lager dan de huidige elektriciteitsvraag, tot bijna 5500 TWh (Eurelectric, Role of Electricity). Wanneer deze laatste projectie buiten beschouwing wordt gelaten, ligt de spreiding bij de trendmatige scenario’s (d.w.z. zonder specifiek beleid) tussen 3450 TWh (Cascade Mints Phase Out) en 4600 TWh (Eurelectric baseline).



Figuur 9.5 *Geprojecteerde elektriciteitsvraag voor de Europese Unie in 2030 in de beschouwde scenario’s in vergelijking met 2005*

Het effect van energiebesparingsbeleid kan worden afgeleid uit vergelijking van trendmatige scenario’s met beleidsscenario’s uit dezelfde studie. Bij de World Energy Outlook (WEO) is de elektriciteitsvraag 15% lager dan bij het trendscenario. Bij Eurelectric is de elektriciteitsvraag in het Supply scenario 1% lager dan in het trendscenario en bij het Efficiency & RES scenario 12% lager. Bij het Energy Revolution scenario is de reductie van de elektriciteitsvraag 20%.

Tabel 9.3 *Uitgangspunten bij de Europese energiestenario's*

Uitgangspunt	Trends to 2030, update 2005 (EC, 2006)	World Energy Outlook 2006 (IEA, 2006)	Role of Electricity scenario (Eurelectric, 2007)	CASCADE MINTS project (Uyterlinde et al., 2005)	Energy Revolution scenario voor Europa (Greenpeace, 2005)
Economische groei	De groei van het bruto binnenlands product (BBP) is 2,1% per jaar tot 2010, 2,3% per jaar tot 2020 en 1,7% per jaar tot 2030	De groei van het BBP is 2,3% per jaar tot 2015 en 1,8% per jaar tot 2030 voor het referentie en het alternatieve beleidsscenario van OECD Europa; de groei van het BBP van de EU is niet bekend	Baseline scenario van Eurelectric is wat betreft economische groei vergelijkbaar met het 'Trends to 2030' scenario.		
Elektriciteitsvraag	Tot 2010 een groei met 1,9% per jaar, tot 2020 met 1,5% per jaar en tot 2030 met 0,9% per jaar	In het referentiescenario met 1,4% per jaar tot 2015 en met 1,2% per jaar tot 2030. Voor het alternatieve beleidsscenario een groei van 0,9% per jaar tot 2015 en 0,6% per jaar tot 2030	In het referentiescenario een groei van 1,5% defense per jaar. In het Role of Electricity scenario een groei van 2,2% per jaar en in 1,4% per jaar in het Supply scenario en 1,0% per jaar in het Efficiency & RES scenario	Een groei van 0,9% per jaar tot 2015 en 0,4% per jaar tot 2030	In alternatief scenario stabiliseert de groei van de elektriciteitsvraag omstreeks 2030 en daalt daarna, terwijl economische groei stijgt.
Energiebesparing	Geen beleidsintensivering wat betreft energiebesparing	In het referentiescenario neemt de primaire energie-intensiteit met circa 1,2% per jaar af in de OECD. In het alternatieve beleidsscenario is dat circa 1,5% per jaar; voor de EU ontbreken gegevens.	Energie-intensiteit per eenheid BBP neemt in het baseline scenario met 1,7% per jaar af.		
Brandstofprijzen	Olieprijs: \$45/vat in 2010, \$48 in 2020, \$58 in 2030. Aardgasprijs: \$5,9/GJ in 2010, \$6,5 in 2020, \$7,8/GJ in 2030 Kolenprijs: \$2,2-2,6/GJ.	Olieprijs: \$51,5/vat in 2010, \$47,8 in 2020, \$55 in 2030. Aardgasprijs: \$5,3-6,2/GJ Kolenprijs: \$2,0-2,2/GJ (\$55-60/ton); in het alternatieve beleidsscenario \$2,0/GJ (\$55/ton)	Olieprijs: € 46 per vat in 2030. Aardgasprijs oplopend van €4,8/GJ in 2010 tot €6,3/GJ in 2030. Kolenprijs: €1,7-2,1/GJ.	De olieprijs loopt van \$32 per vat in 2010 op tot \$59 per vat in 2050. Aardgasprijzen lopen op van € 4,1 per GJ in 2010 tot € 8,6 per GJ in 2050. De kolenprijs loopt op van € 1,9 per GJ in 2020 tot € 2,8 per GJ in 2050.	De olieprijs loopt van € 4,8 per GJ in 2010 op tot € 8,9 per vat in 2050 (≈ \$60 per vat). Aardgasprijzen lopen op van € 4,1 per GJ in 2010 tot € 8,6 per GJ in 2050. De kolenprijs loopt op van € 1,9 per GJ in 2020 tot € 2,8 per GJ in 2050.
CO <sub>2</sub> -prijs				CO <sub>2</sub> -emissieprijs loopt op van € 10 per ton in 2010 naar € 50 per ton in 2020 en € 100 per ton in 2030.	
Investeringskosten kernenergie (zie ter vergelijking Tabel 5.2)		WEO € 1590 tot 1990/kW (disconteringsvoet 6,7 tot 9,6%, exploitatieperiode 25 tot 40 jaar);	€ 2400 tot € 2500/kW		€ 1930/kW (disconteringsvoet 6%).



## 9.4.2 Elektriciteitsaanbod

Figuur 9.6 toont hoe, volgens de scenariostudies, in 2030 in Europa elektriciteit wordt geproduceerd.

### *Hernieuwbare energie*

In alle scenario's, zowel de trendscenario's als de beleidsintensiverende scenario's, neemt het aandeel elektriciteit uit hernieuwbare bronnen toe ten opzichte van 2005 (17%). In de trendscenario's ligt het aandeel elektriciteit uit hernieuwbare bronnen in 2030 tussen 24% (Eurelectric baseline scenario) en 28% (WEO Reference). In de beleidsintensiverende scenario's neemt dit aandeel verder toe tot 35% (WEO Alternative policy scenario), 42% (Energie-efficiency & renewables scenario), 46% (Energy Revolution) of 62% (Cascade Mints Nuclear Phase Out).

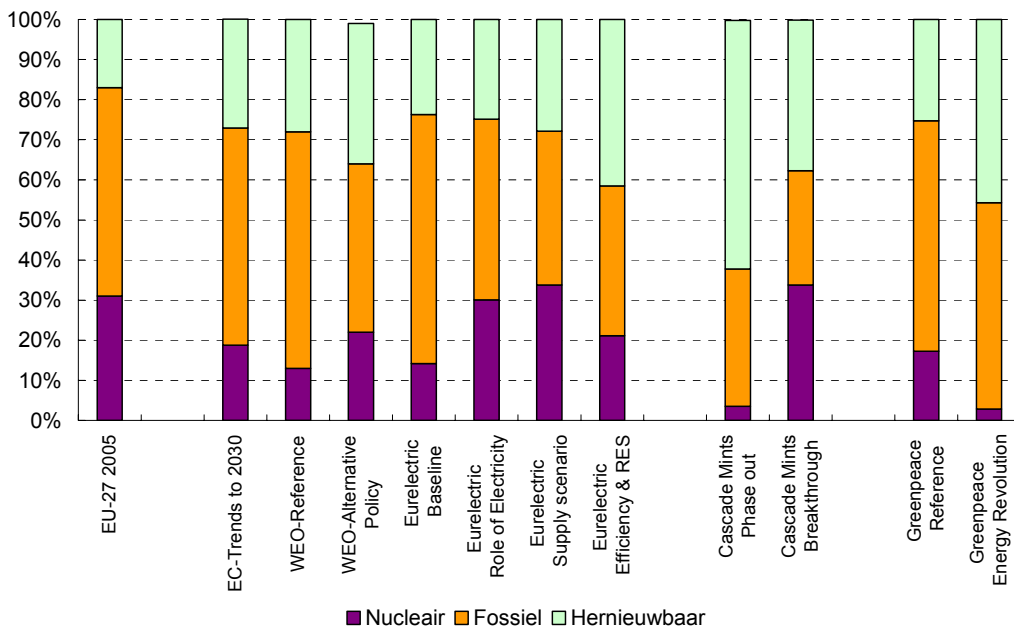
### *Fossiele brandstoffen*

In Paragraaf 9.3.2 is uitgelegd dat de CO<sub>2</sub>-emissies die ontstaan bij de elektriciteitsproductie uit fossiel brandstoffen kunnen worden beperkt door de brandstofkeuze (kolen, olie, aardgas), verbetering energierendement, toepassing van warmtekrachtkoppeling (WKK) en CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag.

Het huidige aandeel kolen in de Europese elektriciteitsvoorziening is ongeveer 30%, die van gas circa 20% en olie circa 5%. In de verschillende referentiescenario's blijft het aandeel kolen in 2030 ongeveer gelijk (WEO, Trends to 2030, Energy Revolution) of stijgt naar 45% (Role of Electricity). Het aandeel aardgas blijft in de referentiescenario's ook gelijk (WEO, Role of Electricity) of stijgt naar ongeveer 30% (WEO, Energy Revolution). In de beleidsintensiverende scenario's neemt het aandeel kolen in 2030 ten opzichte van het referentiescenario uit dezelfde studie af. Deze daling is het sterkst in het Efficiency & Renewables scenario (daling tot enkele procenten) en in het Energy Revolution scenario (daling tot circa 10%). Ook in de beide Cascade Mints scenario's is het aandeel kolen in 2030 nog maar enkele procenten. In de beleidsintensiverende scenario's stijgt het aandeel aardgas in 2030 (tot 59% in het Cascade Mints Fase Out scenario), daalt (tot 10% in het Supply scenario van Eurelectric), of blijft ongeveer gelijk (bijv. in WEO Alternative policy scenario en Energy Revolution).

In geen van de trendscenario's is toepassing van CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag verondersteld. Dat gebeurt wel in het beleidsintensiverende WEO Alternative policy scenario en in twee van de beleidsintensiverende scenario's van Eurelectric (Supply en Role of Electricity). In het Energy Revolution scenario is CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag uitgesloten en in de Cascade Mints scenario's behoort deze technologie niet tot een van de opties (hiervoor zijn in het project andere scenario's gemaakt).

In slechts een enkel scenario wordt de rol van WKK gekwantificeerd. In het trendscenario Trends to 2030 van de Europese Commissie stijgt het aandeel WKK in Europa van 18% in 2005 naar 26% in 2030. In het referentiescenario dat Greenpeace gebruikt is het aandeel WKK in 2030 7% en in het Energy revolution scenario is dit 14%.



Figuur 9.6 Aandeel elektriciteitsproductie uit kernenergie, fossiele brandstoffen en hernieuwbare energiebronnen voor Europa in 2005 en in 2030 volgens de beschouwde scenario-projecties.

### Kernenergie

In alle scenario's maakt kernenergie in 2030 deel uit van de Europese elektriciteitsproductie. In 2005 bedroeg dat aandeel 31%. In alle drie beleidsintensiverende scenario's uit de Eurelectric studie neemt het aandeel kernenergie toe ten opzichte van de referentie. Alleen in het Supply scenario ligt het aandeel kernenergie in 2030 (34%) hoger dan in 2005. Dat geldt ook voor het Breakthrough scenario van Cascade Mints (eveneens 34%). Ook in het alternatieve WEO-scenario vindt, ten opzichte van het referentiescenario, uitbreiding van kernenergie plaats, maar er is in dit scenario uiteindelijk toch sprake van een relatieve daling ten opzichte van 2005. Het aandeel kernenergie neemt het sterkst af in het Energy Revolution scenario (in 2030 is het aandeel gezakt naar 3%), omdat in dat scenario voor heel Europa wordt uitgegaan van een uitfasering van kernenergie. In absolute termen varieert de elektriciteitsproductie van kernenergie in 2030 van ruim onder 100 TWh (Energy Revolution) tot boven de 1400 TWh (Cascade-Mints, Nuclear Renaissance scenario), ruim 50% hoger dan de Europese elektriciteitsproductie door kernenergie in 2005.

### 9.4.3 Broeikasgasemissies

De in de Europese scenariostudies gerapporteerde CO<sub>2</sub>-emissies hebben betrekking op de gehele energievoorziening. Bij sommige scenariostudies is ook informatie voorhanden over de CO<sub>2</sub>-emissies van de elektriciteitsproductie. De broeikasgasemissies vertonen bij trendscenario's een spreiding tussen +4,3% (Trends to 2030) en +11% (WEO-Reference). Door beleidsintensivering wordt bij de WEO Alternative Policy scenario in Europa een emissiereductie gerealiseerd van 9% tegenover een toename van 11% in het referentiescenario. De emissiereductie in de elektriciteitssector is in deze scenariostudie groter: van +15% naar -22%. Bij het Energy Revolution scenario is de CO<sub>2</sub>-emissiereductie door beleidsintensivering in 2030 40% tot 45% lager.

Tabel 9.4 *Verandering van de CO<sub>2</sub>-emissies in 2030 gerapporteerd in verschillende scenariostudies voor EU, met tussen haakjes de verandering bij de elektriciteitsproductie*

Scenario	Toe- of afname van de CO <sub>2</sub> -emissies in 2030 t.o.v. 1990 [%]
Trends to 2030 (EC, 2006)	+4,3 (+2,1)
WEO (IEA, 2006)	
– Reference	+11 (+15)
– Alternative Policy	-9 (-22)
Eurelectric (Eurelectric, 2007)	
– Baseline	+10
– Role of Electricity	-30
– Supply	-30
– Efficiency & renewables	-30
CascadeMints (Uyterlinde et al., 2005)	
– Nuclear Phaseout	Circa -13
– Nuclear Breakthrough	Circa -21
Energy Revolution (Greenpeace, 2005)	*

\* Een reductie van 40 tot 45% ten opzichte van het referentiescenario

## 10. Maatschappelijke impact analyse

In dit hoofdstuk wordt inzicht gegeven in de mogelijke maatschappelijke gevolgen van uitbreiding van kernenergie. Zoals in Hoofdstuk 6 aan de orde is geweest, kunnen hierbij drie dimensies worden onderscheiden: een economische, een sociale en een milieudimensie. Om de gevolgen van uitbreiding van kernenergie in kaart te brengen is een zogenoemde maatschappelijke impact analyse uitgevoerd waarin de gevolgen voor de drie dimensies worden beschouwd. Een dergelijke analyse is van kwalitatieve aard en probeert op systematische wijze de mogelijke economische en sociale effecten van een nieuwe kerncentrale en de effecten op het milieu te inventariseren. De maatschappelijke impact analyse is uitgevoerd voor Nederland voor de situatie waarbij uitbreiding van kernenergie vóór 2020 plaatsvindt. De effecten die het gevolg kunnen zijn van uitbreiding van kernenergie is beschouwd tegen de achtergrond van de mogelijke ontwikkeling van de Nederlandse energievoorziening. Voor de analyse is gebruik gemaakt van de gegevens uit de eerdere hoofdstukken. Informatie over de economische dimensie staat in Hoofdstuk 4 (elektriciteitsmarkt) en Hoofdstuk 5 (economische aspecten), informatie over sociale dimensie in Hoofdstuk 2 (veiligheid, proliferatie, terrorisme) en in Hoofdstuk 6 (maatschappelijke acceptatie) en informatie over de milieudimensie in Hoofdstuk 3.

Een maatschappelijke impact analyse is geen maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA). Een MKBA maakt het in principe mogelijk om, door kwantificeren en het daaropvolgend monetariseren (d.w.z. uitdrukken in geld) van de effecten, de effecten van de drie dimensies te vergelijken en te sommeren, c.q. salderen. Overigens kunnen niet alle effecten in een MKBA worden gekwantificeerd, c.q. gemonetariseerd. Deze worden dan als PM post meegenomen. De MKBA en de maatschappelijke kosten-batenanalyse hebben met elkaar gemeen dat een systematische analyse van de effecten wordt gemaakt. Een maatschappelijke impact analyse kan worden gezien als een eerste stap naar een maatschappelijke kosten-batenanalyse. Een MKBA, waarvan de uitvoering aanmerkelijk meer tijd vergt dan een maatschappelijk impact analyse, kan in een vervolgstudie worden uitgewerkt.

In Paragraaf 10.1 worden eerst de aanpak en de uitgangspunten voor de maatschappelijke impact analyse besproken. De resultaten van de analyse worden gepresenteerd in de Paragrafen 10.2, 10.3, 10.4 voor respectievelijk de economische, milieu en sociale effecten. Die analyse gaat uit van 'normale' bedrijfsvoering van elektriciteitsproductie. Paragraaf 10.5 behandelt de maatschappelijke gevolgen van een mogelijk groot ongeval met een kerncentrale, rekening houdend met de waarschijnlijkheid van het optreden van zo'n ongeval.

### 10.1 Uitgangspunten en aanpak

#### *Uitgangspunten*

Uitgangspunt voor de maatschappelijke impact analyse is dat effecten worden geschat tegen de achtergrond van een verwachte ontwikkeling van de Nederlandse energievoorziening. Voor dit achtergrondbeeld zijn een tweetal scenario's gekozen: het Strong Europe (SE) scenario en het Global Economy (GE) scenario. Beide scenario's zijn gepresenteerd in Hoofdstuk 9. Deze twee scenario's zijn onder andere benut voor de maatschappelijke kosten-batenanalyse Windenergie op de Noordzee (CPB/ECN, 2005) en de studie 'Kerncentrale Borssele na 2013' (Seebregts et al., 2005). In beide scenario's is verondersteld dat geen uitbreiding van kernenergie in Nederland plaatsvindt. De keuze van twee scenario's maakt het mogelijk na te gaan in hoeverre ingeschatte effecten zullen verschillen bij verandering van het achtergrondbeeld. Hierbij moet worden opgemerkt dat de hier ingeschatte effecten alleen geldig zijn voor deze twee scenario's en dat de effecten anders kunnen zijn bij een ontwikkeling die van de gekozen scenario's sterk afwijkt. Het voorgenomen beleid van de huidige regering ('Schoon en Zuinig') zal tot een ont-

wikkeling van de energievoorziening leiden die afwijkt van de twee gehanteerde scenario's (zie kader).

***Verkenning van het nieuwe regeringsbeleid: Schoon en Zuinig***

De door ECN en MNP uitgevoerde verkenning (Menkveld en Van den Wijngaart, 2007) heeft betrekking op het realiseren van de beleidsdoelstellingen voor 2020 (30% vermindering van de uitstoot van broeikasgassen, 20% aandeel voor duurzame energie en een energiebesparingtempo van 2% per jaar). Deze verkenning is uitgevoerd tegen de achtergrond van het Global Economy (GE) scenario. Er heeft (nog) geen volledige doorrekening plaatsgevonden van een dergelijk beleidsintensiverend scenario, zodat over veel van de effecten nog onduidelijkheden bestaan (bijv. de invloed op elektriciteitsprijzen). Wel zijn berekeningen gemaakt van de nationale kosten (d.w.z. totale maatschappelijke kosten voor Nederland) die gemoeid zijn met het behalen van de doelstellingen. Hiervoor is gebruik gemaakt van informatie over kosten uit het Optiedocument (ECN/MNP, 2006). Voor de route waarbij alle drie doelstellingen worden gehaald, bedragen de nationale kosten € 8 tot 9 miljard per jaar in 2020. Bij de flexibele route, waarbij alleen de reductiedoelstelling van broeikasgassen wordt gerealiseerd, bedragen de nationale kosten € 3 tot 4 miljard per jaar in 2020.

Indien in de flexibele route een nieuwe kerncentrale van 2000 MW wordt gerealiseerd vóór 2020 - in de vaste route is dat niet mogelijk omdat kernenergie niet bijdraagt aan de twee andere doelstellingen - wordt de doelstelling voor broeikasgasreductie tegen lagere kosten bereikt. De nationale kosten zullen dan € 1,2 miljard per jaar lager zijn, bij de gegeven uitgangspunten van de verkenning: gasprijs € 5,8 per GJ, kolenprijs € 1,7 per GJ, investering kerncentrale vergelijkbaar met Finse EPR (€ 1875/kWh), operationele kosten vergelijkbaar met kerncentrale Borssele en een exploitatieperiode van 25 jaar. Bij de nationale kostenmethode wordt uitgegaan van een rentevoet van 4%. Het kostenverschil wordt gedomineerd door de hoge kosten van emissiereductiemaatregelen die met toepassing van kernenergie niet hoeven te worden toegepast. Hogere kosten voor kernenergie zal het kostenverschil in beperkte mate verkleinen.

In beide scenario's worden, naast duurzame elektriciteitsproductie, nieuwe fossiel gestookte elektriciteitscentrales gebouwd, zowel ter vervanging van bestaand productievermogen als uitbreiding om groeiende elektriciteitsvraag te dekken. In beide scenario's vindt geen uitbreiding van kernenergie plaats. De scenario's verschillen onderling ten aanzien van economische groei (SE: 1,8% en jaar en GE: 2,9% per jaar) en groei van de elektriciteitsvraag (SE: 0,9% per jaar en GE: 1,6% per jaar). De lagere groei van de elektriciteitsvraag in het SE-scenario is niet alleen het gevolg van een lagere economische groei, maar ook van meer energiebesparing dan in het GE-scenario. In beide scenario's neemt de gasprijs toe naar € 4,30 per GJ in 2020 en € 4,90 per GJ in 2030 (de gasprijs in 2020 ligt boven de olieprijspariteit van \$40 per barrel).

In het Strong Europe (SE) scenario wordt vóór 2020 vooral voor gascentrales gekozen (deels als WKK-installatie uitgevoerd), en na 2020 vooral voor kolenvergassingcentrales met CO<sub>2</sub>-afvang, inclusief meestook van biomassa (30% op energiebasis). Voor hernieuwbare elektriciteitsopwekking wordt in dit scenario gekozen voor windenergie op zee en meestoken van biomassa in kolencentrales. De CO<sub>2</sub>-prijs is in beide scenario's in 2020 € 11 per ton. Na 2020 stijgt de CO<sub>2</sub>-prijs in het SE-scenario naar € 84 per ton. In het Global Economy (GE) scenario is verondersteld dat er geen post-Kyoto klimaatbeleid van de grond komt. Daardoor is er na 2020 geen CO<sub>2</sub>-emissiehandel meer en de ondersteuning van hernieuwbare energie is door de overheid beëindigd. Het gevolg is dat vanaf 2015 vooral wordt geïnvesteerd in nieuwe poederkoolcentrales. Na 2020 wordt niet meer geïnvesteerd in hernieuwbare elektriciteitsproductie, omdat deze technologieën niet rendabel kunnen worden geëxploiteerd. In het GE-scenario is na 2020 tevens een toename van import van kernstroom uit Frankrijk verondersteld.

Bij de impact analyse wordt verondersteld dat in beide scenario's een uitbreiding van kernenergie plaatsvindt. In de praktijk betekent dit dat vóór 2020 de elektriciteitsproductie met één kerncentrale wordt uitgebreid en een verdere uitbreiding van de kernenergiecapaciteit plaatsvindt na 2020. Voor de uitbreiding van kernenergie is van de volgende veronderstellingen uitgegaan:

- De kerncentrale is van de derde generatie (bijv. EPR) met investerings- en operationele kosten zoals vermeld in Hoofdstuk 5.
- De kerncentrale wordt gebouwd onder de voorwaarden die door de Nederlandse overheid in 2006 zijn geformuleerd (zie Paragraaf 6.4).
- De gebruikte splijtstof wordt verwerkt via de directe route, zoals is beschreven in Paragraaf 2.4.1.
- Het huidige proliferatiebeleid blijft ongewijzigd (zie Paragraaf 2.6.1).

De uitgevoerde analyse beperkt zich tot 2040, omdat beide scenario's 2040 als zichttermijn hanteren. Effecten van kerncentrales die vóór 2040 zijn gerealiseerd, maar ook daarna worden geëxploiteerd, blijven hier dus buiten beschouwing. Uitbreiding van kernenergie betekent voor het SE-scenario dat vóór 2020 een kerncentrale nieuwe gascentrales verdringt (en mogelijk ook een deel van de import) en na 2020 kolenvergassing met CO<sub>2</sub>-afvang. In het GE-scenario worden, door uitbreiding van kernenergie, vooral poederkoolcentrales verdrongen, zowel vóór als na 2020, en na 2020 ook importstroom.

### *Gehanteerde analysemethode*

Voor het uitvoeren van de maatschappelijke impact analyse is gebruik gemaakt van een vragenlijst die is ontleend aan de 'Impact Assessment Guidelines' van de Europese Commissie (EU, 2006b). Deze methode is ontwikkeld om de impacts van beleidsopties te beoordelen. De vragenlijst omvat 123 vragen, verdeelt over 32 categorieën. De totale vragenlijst is opgenomen in Bijlage A bij dit rapport. De vragenlijst is vooral gebruikt als checklist bij het beoordelen van mogelijke impacts. Omdat de vragenlijst niet specifiek betrekking heeft op energie, is ook gebruik gemaakt van een overzicht van indicatoren uit (IAEA/IEA, 2001).

De maatschappelijke impact analyse is uitgevoerd door een onderzoekspanel bestaande uit onderzoekers van ECN en NRG, aangevuld met onderzoekers van het Milieu en Natuur Planbureau (MNP) en het Centraal Plan Bureau (CPB)<sup>4</sup>. Uitgangspunt bij de gezamenlijk uitgevoerde analyse was het streven om zo veel mogelijk tot consensus te komen.

## 10.2 Economische gevolgen

Uit de maatschappelijke impact analyse komt naar voren dat bij uitbreiding van kernenergie onder normale bedrijfsomstandigheden rekening moet worden gehouden met de volgende economische gevolgen:

- *Operationele kosten en brandstofkosten:* De kosten van de splijtstof voor een kerncentrale (front-end en back-end kosten) zijn lager dan die van fossiele brandstoffen. Dit geldt vooral in vergelijking met de kosten voor aardgas. In tegenstelling tot centrales die fossiele brandstoffen gebruiken, worden voor kerncentrales geen kosten gemaakt voor CO<sub>2</sub>-emissierechten. Dit kostenverschil ontstaat vooral in het scenario met streng klimaatbeleid (SE-scenario), waarbij de prijzen van CO<sub>2</sub>-emissierechten na 2020 sterk oplopen. In het GE-scenario, waarin op de lange termijn geen klimaatbeleid meer wordt gevoerd, spelen na 2020 CO<sub>2</sub>-kosten geen rol meer. In beide scenario's is verondersteld dat de aanvoer van aardgas van buiten Europa geen belemmeringen ondervindt. Wanneer dat wel het geval is, dan zullen de kosten voor aardgas sterk stijgen en de gasprijzen sterker gaan fluctueren. In die situatie heeft kernenergie een kostenvoordeel ten opzichte van gascentrales (SE-scenario). Daartegenover staat dat een kostennadeel voor kernenergie kan ontstaan bij dalende prijzen voor fossiele brandstoffen.

---

<sup>4</sup> CPB: Annemiek Verrrips; MNP: Johannes Bollen.

- *Concurrentie en prijzen:* Bij concurrentie moet onderscheid worden gemaakt tussen concurrentie op de elektriciteitsmarkt en eventuele concurrentie-effecten voor zakelijke eindgebruikers door invloed die uitbreiding van kernenergie mogelijk heeft op de elektriciteitsprijs. Het is onzeker of kernenergie rendabeler is dan andere typen elektriciteitsproductie, gelet op de integrale kosten van elektriciteitsproductie (zie Hoofdstuk 5). Vanwege relatief lage variabele kosten heeft een kerncentrale die eenmaal is gerealiseerd een concurrentievoordeel ten opzichte van elektriciteitscentrales die fossiele brandstoffen gebruiken. Uitbreiding van kernenergie met één kerncentrale heeft geen of een zeer gering effect op de elektriciteitsprijzen, omdat deze prijzen bepaald blijven worden door andere elektriciteitsproductietechnologieën. De eventuele kostenvoordelen worden door de exploitant van de kerncentrale niet automatisch aan afnemers doorgegeven. Worden na 2020 nog meer kerncentrales in Nederland gebouwd, dan kan dit de elektriciteitsprijs mogelijk relatief (enigszins) verlagen. Dit is echter onzeker en hangt af van de omvang en samenstelling van de markt voor basislastvermogen (deze markt kan sterk in omvang toenemen door integratie met het buitenland) en of er sprake is van marktconcentratie (bijv. wanneer alle kerncentrales door dezelfde producent worden geëxploiteerd). Met lange termijn contracten, die door (industriële) afnemers met een kernenergie-exploitant worden afgesloten, ontstaat in principe geen andere situatie. De contractprijs zal worden gebaseerd op de verwachte toekomstige marktprijs. Met lange termijn contracten wordt vooral het prijsrisico tussen de exploitant en afnemer verdeeld. Pas achteraf kan worden vastgesteld of contractpartijen voor- of nadeel hebben ondervonden van het prijsverschil tussen contractprijs en de gemiddelde gerealiseerde marktprijs. De elektriciteit die met lange termijn contracten is gecontracteerd, blijft overigens verhandelbaar op de elektriciteitsmarkt (zie ook Hoofdstuk 4).
- *Publieke diensten en instanties en administratieve kosten:* De regels waaraan een kerncentrale moet voldoen zijn verschillend van die voor elektriciteitscentrales die met fossiele brandstoffen worden gestookt. Er zijn ook relatief meer regels voor veiligheid en milieu waaraan een kerncentrale moet voldoen. Dit vraagt een grotere inspanning van de vergunningverlener en toezichthoudende instantie (Kernfysische Dienst). Ook zal de overheid meer aandacht moeten geven aan voorlichting. Een kerncentrale brengt daardoor meer administratieve lasten met zich mee voor de overheid in vergelijking met een kolen- of gascentrale.
- *Eigendomsrechten:* In de nabije omgeving van een kerncentrale is de bestemming van de grond aan meer beperkingen onderhevig (m.n. voor bewoning) dan bij kolen- of gascentrales. Hoewel met de keuze van de locatie van de kerncentrale daarmee rekening wordt gehouden, bestaat er door deze gebruiksbeperkingen van (land)eigendom een negatief economisch effect.
- *Innovatie en onderzoek:* Uitbreiding van kernenergie in Nederland stimuleert naar verwachting in beide scenario's het nucleaire onderzoek in Nederland, vooral bij onderzoeksinstituten en universiteiten. Onderzoek naar andere innovatieve elektriciteitsproductieopties (bijv. hernieuwbare energie, afvang en opslag van CO<sub>2</sub>, etc.) zal blijven plaatsvinden, al zullen er tussen beide scenario's verschillen bestaan in aard en omvang van het energieonderzoek.
- *Specifieke regio's en sectoren:* Een nieuwe kerncentrale vergroot de nucleaire sector in Nederland. Bij het exploiteren van een kerncentrale zijn meer mensen betrokken dan bij gas- en kolencentrales. Hierdoor is er mogelijk een (gering) positief economisch effect op de regio waar een kerncentrale staat.
- *Andere landen en internationale verplichtingen:* Een kerncentrale heeft meer internationale verplichtingen tot gevolg, bijvoorbeeld op het gebied van non-proliferatie. De grondstof uranium wordt uit andere landen betrokken (bijv. Canada, Kazachstan) dan waar vandaan steenkool of aardgas wordt geïmporteerd.
- *Macro-economische effecten:* Het macro-economische effect (d.w.z. effect op BNP) van uitbreiding van kernenergie in het scenario waarbij op langere termijn geen klimaatbeleid wordt gevoerd (GE-scenario) is onzeker. Dit hangt af van de rentabiliteit van kernenergie ten opzichte van de andere elektriciteitsproductieopties en marktverhoudingen (bijv. is er sprake van import of export). Is kernenergie rendabeler, dan kan er macro-economisch een positief effect ontstaan. Wanneer dit niet het geval is, kan het effect ook negatief zijn. Onder de con-

dities van het scenario met streng klimaatbeleid en hoge CO<sub>2</sub>-prijzen (SE-scenario) kan een kerncentrale ten opzichte van het fossiele alternatieven een macro-economisch voordeel opleveren als de kosten voor de elektriciteitsproductie met een toegenomen aandeel kernenergie lager zijn dan als dezelfde elektriciteit met kolen- of gascentrales wordt geproduceerd. Ook wanneer dezelfde elektriciteit uit hernieuwbare bronnen (zonder CO<sub>2</sub>-emissies) wordt geproduceerd, ontstaat met uitbreiding van kernenergie een voordeel, vanwege de aanvankelijk hogere kosten van duurzame energietechnologie. Daartegenover staat dat er bij uitbreiding van kernenergie mogelijk minder geïnvesteerd wordt in nieuwe energietechnologieën en niet geprofiteerd kan worden van eventuele positieve economische effecten die met de ontwikkeling en toepassing van innovatieve technologie samenhangen.

### 10.3 Milieugevolgen

Uit de maatschappelijke impact analyse komt naar voren dat bij uitbreiding van kernenergie onder normale bedrijfsomstandigheden rekening moet worden gehouden met de volgende milieugevolgen:

- *Luchtkwaliteit*: Uitbreiding van kernenergie heeft tot gevolg dat minder fossiele brandstoffen worden gestookt om dezelfde elektriciteit te produceren. De uitbreiding heeft geen effect op de hoeveelheid elektriciteit uit wind- en zonne-energie. Het gevolg is dat de emissies van verzurende stoffen (SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>) en fijn stof verminderen. In het SE-scenario is dit vooral door minder NO<sub>x</sub> vanwege verminderde inzet van aardgas voor elektriciteitsproductie en bij het GE-scenario minder SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en fijn stof vanwege verminderde inzet van kolen. Verdere uitbreiding van kernenergie kan in het SE-scenario tot gevolg hebben dat op termijn minder of geen kolencentrales met CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag worden gerealiseerd. Het effect op emissies van verzurende stoffen en fijn stof is dan afhankelijk van de omvang van deze emissies bij kolencentrales die zijn uitgerust met CO<sub>2</sub>-afvang. Hoe groot die zijn is nu nog niet goed bekend.
- *Waterkwaliteit*: Vermeden moet worden dat een kerncentrale koelwater loost op zoetwater dat als bron voor drinkwater wordt benut (zie ook Paragraaf 6.4). Kolen- en gascentrales kunnen wel gebruik maken van zoetwater als koelwater.
- *Bodemkwaliteit, bodemgebruik en landgebruik*: Kernenergie heeft, vanwege de eindberging van het radioactief afval, gevolgen voor het bodemgebruik op de locatie (en omgeving) van de eindberging. Daarnaast is het gebruik van het gebied in een straal van 5 km rond de kerncentrale beperkt voor bewoning (zie Paragraaf 6.4). Bij kolen- of gascentrales worden dergelijke voorwaarden niet gesteld. Door uitbreiding van kernenergie zal de emissies van verzurende stoffen kleiner kunnen zijn, wat een gunstig effect heeft op de bodemkwaliteit (minder verzuring).
- *Klimaatverandering*: Bij het GE-scenario zal, door het wegvallen van klimaatbeleid na 2020, uitbreiding van kernenergie tot minder CO<sub>2</sub>-emissies leiden. Dit is niet zondermeer het geval in het SE-scenario, waarbij sprake is van een emissiehandelssysteem voor CO<sub>2</sub>. De hoeveelheid CO<sub>2</sub>-emissies wordt in dit scenario namelijk bepaald door het emissieplafond dat door Europese Commissie in overleg met nationale overheden wordt vastgesteld.
- *Hernieuwbare bronnen*: Uitbreiding van kernenergie kan er toe leiden dat de omvang van het kolenvermogen afneemt (vooral in het GE-scenario) en daarmee de mogelijkheden beperkt van het meestoken van biomassa (één van de hernieuwbare bronnen) in kolencentrales.
- *Biodiversiteit, flora en fauna en landschap*: Voor Nederland worden per saldo geen effecten verwacht omdat er voor deze effecten tussen verschillende typen centrales geen grote verschillen zullen zijn. Wel kunnen er effecten optreden in het buitenland omdat mijnbouw van de grondstoffen uranium en steenkool andere landschappelijke gevolgen kunnen hebben, in ieder geval voor de verschillende locaties waar deze mijnbouw plaatsvindt.
- *Afvalproductie en recycling*: Door uitbreiding van kernenergie ontstaat meer radioactief afval. Wanneer de uitbreiding van kernenergie tot minder kolencentrales leidt (m.n. in het GE-scenario) zal er minder vliegias ontstaan, dat overigens wordt hergebruikt. Gebruikte splijtstof kan worden gerecycled in een opwerkingsinstallatie.



- *Kans en omvang milieurisico 's*: Ernstige ongevallen met kerncentrales hebben naar verwachting een zeer kleine kans (minder dan eens in de miljoen bedrijfsjaar), maar potentieel grote milieueffecten indien een dergelijk ongeval gepaard gaat met een lozing van radioactieve stoffen en verspreiding daarvan. Dit komt apart aan de orde in Paragraaf 10.5.

## 10.4 Sociale gevolgen

Uit de maatschappelijke impact analyse komt naar voren dat bij uitbreiding van kernenergie onder normale bedrijfsomstandigheden rekening moet worden gehouden met de volgende sociale gevolgen:

- *Werkgelegenheid en arbeidsmarkt*: Omdat van uitbreiding van kernenergie met één centrale nauwelijks effect op de elektriciteitsprijzen wordt verwacht, zullen er geen voordelen ontstaan voor industriële afnemers en is hiervan ook geen werkgelegenheidseffect te verwachten (m.u.v. de bouw van de kerncentrale). Over het mogelijke werkgelegenheidseffect op langere termijn is geen uitspraak te doen. Een verdere uitbreiding van kernenergie zou wel kunnen leiden tot een relatief iets lagere elektriciteitsprijs (zie ook Paragraaf 10.2).
- *Kwaliteit van arbeid en scholing*: Voor het bedrijven van een kerncentrale is relatief meer hoogwaardig geschoold personeel nodig dan bij gas- of kolencentrales. Uitbreiding van kernenergie heeft tot gevolg dat meer scholing nodig is op het gebied van nucleaire technologie (zie Hoofdstuk 8). Een kerncentrale heeft andere gevolgen voor de gezondheid en arbeidsveiligheid van de werknemers, in het bijzonder door de radiologische belasting.
- *Betrokkenheid en bescherming van bevolkingsgroepen*: Uitbreiding van kernenergie zal de bevolking meer informatie geven over het onderwerp 'kernenergie'. Voor de veiligheid van de bevolking ten aanzien van een mogelijk kernongeval is meer aandacht nodig.
- *Persoonlijke informatie en privacy*: Bij kerncentrales zal meer beveiliging nodig zijn. Een onderdeel hiervan is registratie en analyse van persoonsgegevens. Bij uitbreiding van kernenergie zal dit relatief toenemen.
- *Goed bestuur en inspraak*: Rond kernenergie is meer voorlichting nodig. Het publiek wenst goed te worden geïnformeerd (zie Paragraaf 7.2). Naar verwachting zal de maatschappelijke discussie groter zijn dan bij gas- en kolencentrales. Burgers zullen bij kernenergie naar verwachting in grotere mate gebruik maken van inspraak- en beroepsmogelijkheden. Het is onduidelijk hoe groot, ten aanzien van deze aspecten, de verschillen zullen zijn met CO<sub>2</sub>-opslag (SE-scenario).
- *Volksgezondheid en externe veiligheid*: Bij normale bedrijfsvoering kan uitbreiding van kernenergie leiden tot minder emissies van verzurende stoffen (SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>) en fijn stof. Dit heeft een gunstig effect op de volksgezondheid. Uitbreiding van kernenergie heeft tot gevolg dat burgers zich meer zorgen maken over veiligheid (zie Hoofdstuk 7). Veiligheid speelt ook een rol bij CO<sub>2</sub>-opslag. Uitbreiding van kernenergie leidt in het SE-scenario tot minder CO<sub>2</sub>-opslag, waardoor voor die technologie het veiligheidsrisico afneemt.
- *Misdaad en terrorisme*: Voor een kerncentrale worden relatief meer voorzieningen getroffen om de kans en gevolgen van terroristische aanslagen te beperken. Tevens zal er daardoor meer worden gevraagd van de publieke rechtshandhaving.
- *Samenwerking met andere landen*: Bij kernenergie wordt er op grotere schaal internationaal samengewerkt dan bij andere vormen van elektriciteitsproductie, in het bijzonder op het gebied van technische veiligheid en non-proliferatie. Verwacht mag worden dat bij uitbreiding de internationale samenwerking verder zal toenemen.

## 10.5 Ernstige ongevallen

In de vorige paragraaf zijn resultaten van een maatschappelijke impact analyse gepresenteerd die zijn gebaseerd op condities van normale bedrijfsvoering. Een essentieel verschil van kerncentrales in vergelijking met andere elektriciteitsproductietechnologieën zijn de grote gevolgen van ernstige ongevallen met mogelijkere direct dodelijke slachtoffers en een besmetting van

een omvangrijk gebied. Wordt de hele energieketen beschouwd, dan komen ernstige ongevallen (meer dan vijf slachtoffers) ook voor bij kolen (bijv. mijnongelukken), aardgas en olie (NEA, 2007). Een dambreuk van een waterkrachtcentrale kan eveneens een groot aantal slachtoffers tot gevolg hebben.

De ramp met de kerncentrale in Tsjernobyl in 1986 is het enige voorbeeld, waarbij door een grote lozing radioactieve stoffen over een groot gebied werd verspreid. Het Nuclear Energy Institute stelt dat er 56 slachtoffers direct zijn te wijten aan het ongeval (NEI, 2006). Schattingen van mogelijk dodelijke slachtoffers als gevolg van het carcinogene effect van ioniserende straling (vooral schildklierkanker) lopen uiteen van 4000 tot 16.000 (IARC, 2006). De Wereld Gezondheids Organisatie (WHO, 2005) schat het aantal huidige en toekomstige dodelijk slachtoffers die aan het Tsjernobyl-ongeval kunnen worden toegerekend op 4000, gebaseerd op een totaal aantal van 600.000 mensen dat is blootgesteld aan de gevolgen van het ongeluk. Volgens de WHO zullen niet alle gezondheidsklachten die samenhangen met blootstelling aan straling overlijden tot gevolg hebben. Dit verklaart waarom de WHO tot een lagere schatting komt dan andere bronnen (Hirschberg et al., 2004; Greenpeace, 2006). De lage schatting van de WHO wordt bekritiseerd omdat onder meer geen rekening zou worden gehouden met blootstelling van grote groepen Europeanen aan een lage dosisbelasting (Williams en Baverstock, 2006).

### *Kans op grote ongelukken*

Voor kerncentrales wordt het risico van ernstige reactorongevallen nader geanalyseerd in probabilistische risico- en veiligheidsanalyses (zie ook Paragraaf 2.5). Daarbij worden schattingen gegeven van de kans op het optreden van de gebeurtenissen. Die risicostudies geven een schatting van:

- De kans op een ernstig ongeval.
- De kans op een ernstige lozing van radioactieve stoffen naar de omgeving. Deze kans is kleiner dan die van een ernstig ongeval.
- De mogelijke gevolgen van dergelijke lozingen in termen van slachtoffers en dosisbelasting en gezondheidsschade.

Deze analyses resulteren in schattingen voor het zogenoemde groepsrisico en het individueel risico. Deze twee maten geven zicht op de direct dodelijke slachtoffers als gevolg van een groot ongeval (groepsrisico) en de gezondheidsschade die mogelijk leidt tot overlijden op lange termijn, door o.a. de carcinogene effecten van ioniserende straling. Deze overlijdenskans wordt deels tot uitdrukking gebracht in het individueel risico. Het groepsrisico is een maat voor de maatschappelijke ontwrichting die een ernstig ongeval kan veroorzaken. Ter beoordeling van potentieel risicovolle activiteiten heeft de Nederlandse overheid voor beide risicomaten wettelijke normen vastgelegd (VROM 2003, 2004a). Het plaatsgebonden (individueel) risico moet kleiner zijn dan eens in de miljoen jaar ( $<10^{-6}$  per jaar) en de kans dat ten gevolge van ongevallen meer dan tien direct dodelijke slachtoffers onder de bevolking vallen (groepsrisico) moet kleiner zijn dan eens in de honderdduizend jaar gedeeld door het kwadraat van het aantal slachtoffers ( $<10^{-5}/N^2$  per jaar, waarbij  $N > 10$ ). Een kerncentrale-exploitant moet periodiek aantonen dat de risico's verbonden aan het bedrijven van de centrale aan beide risiconormen voldoen.

### *Maatschappelijke gevolgen*

Naast slachtoffers en gezondheidsschade, kan een groot kernongeval tot gevolg hebben dat ernstige milieu-, economische en sociaalpsychologische schade ontstaat, die zich bij ongelukken met andere elektriciteitsproductietechnologieën niet in dergelijke omvang voordoen. Deze schade heeft betrekking op:

- *Milieuschade*: Door een ernstige lozing van radioactieve stoffen wordt niet alleen de directe omgeving van de reactor besmet, maar de radioactieve stoffen kunnen over een zeer groot gebied verspreid raken (zoals bij de Tsjernobyl-ramp), mede afhankelijk van de weersomstandigheden. Bodem, water, flora en fauna raken besmet. De besmetting bedreigt de voedselvoorziening (drinkwater, voedselgewassen, veeteelt).

- *Economische schade*: Deze varieert van het verlies van de centrale voor elektriciteitsproductie (voorbeeld: Harrisburg) tot het verlies van een groot gebied, evacuatie, herhuisvesting, onbruikbaarheid besmet gebied (bodem en water), ontsmetten van vervuilde grond, verbod op specifiek voedsel en verlies van investeringen in en export van agrarische producten uit het besmette gebied. Bij besmetting zal het gebied ook onaantrekkelijk zijn voor nieuwe investeringen.
- *Sociaal-psychologische schade*: Als voorbeelden kunnen worden genoemd mentale gevolgen door evacuatie en herhuisvesting in een ander gebied, onzekerheid over de mogelijke gezondheidseffecten van ontvangen dosis en post-traumatische stress.

### *Gevolgen voor kernenergie*

Een ernstig reactorongeval heeft gevolgen voor de ontwikkeling van de nucleaire sector. Kerncentrales van hetzelfde type als waarbij het ongeval heeft plaatsgevonden, worden mogelijk stilgelegd. Het ongeval kan aanleiding geven tot herziening van veiligheidsvoorzieningen en -procedures, waardoor kerncentrales van het zelfde type mogelijk langdurig buiten gebruik worden gesteld. Ook zal een ernstig reactorongeval invloed hebben op de opvattingen van burgers over kernenergie. Als gevolg hiervan kan het overheidsbeleid wijzigen. In het verleden hebben het ongeval bij Harrisburg en bij Tjernobyl tot gevolg gehad dat in een aantal landen, waaronder Nederland, is afgezien van nieuwbouwplannen voor kerncentrales. In Zweden zijn inmiddels bestaande kerncentrales gesloten.

#### ***Ongevalseenario***

Bij een maximaal ongeval - ongeacht de kans daarop - moet men denken aan een ongevalsscenario zoals dat is beschreven in de WASH-1400 studie (Rasmussen, 1975). Het daarin beschreven ongevalsscenario is in het Nationaal Plan voor de Kernongevallenbestrijding (VROM, 1989) aangewezen als het maatgevende scenario voor kerncentrales in de Leidraad Kernongevallenbestrijding (VROM, 2004b). In deze Leidraad zijn de te verwachten gevolgen van het ongevalsscenario bepaald voor de kerncentrale Borssele. Deze gevolgen zijn de evacuatie van de bevolking in het gebied binnen een sector van 45 graden benedenwinds tot aan 5 km afstand van de centrale. Eveneens in deze sector, maar dan tot een afstand van 10 km, zal jodiumprofylaxe worden toegediend. Daarnaast zal eveneens in de sector tot aan 20 km afstand worden geschild. Na afloop van de lozing zullen enkele duizenden (tot 10 duizend) personen uit het getroffen gebied uit voorzorg gecontroleerd moeten worden op besmetting. In het spoor van de radioactieve wolk zullen tot een afstand van 250 km maatregelen ter bescherming van de voedselketen getroffen worden. Door deze maatregelen wordt het optreden van stralingziekte onder de bevolking voorkomen en de gezondheidsrisico's van de getroffen bevolking door de blootstelling aan radioactieve stoffen en straling zoveel mogelijk beperkt.

## Referenties

- AER (2003): *Behoedzaam stroomopwaarts - beleidsopties voor de Nederlandse Elektriciteitsmarkt in Europees perspectief*. ISBN 90 74357 38 5.
- Alsema, E.A., M.J. de Wild-Scholten (2006): *Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production*. Presented at 13<sup>th</sup> Intern. Conf. on Life Cycle Engineering, Leuven, 31 May-2 June 2006.
- Alting von Geusau, Alexander (2006): *Pre-conditions for financing Nuclear Power*. Symposium 'Kernenergie, de principes voorbij - nieuwe Nederlandse kerncentrale in 2015, wat zijn hiervoor de voorwaarden?'. TU Delft, 14 november 2006.
- ASN (2003): *Jaarverslag*. Autorité de Sureté Nucléaire, France.
- Bomberger, A.S. en D.C. Leshner (1979): *Experience at Three Mile Island*. The American Journal of Nursing, Vol. 79, No. 8. (Aug., 1979), pp. 1402-1408.
- Boston Consulting Group (2003): *Keeping the Lights On - Navigating Choices in European Power Generation*.
- British Energy (2006): *Carbon Footprint of the nuclear fuel cycle*. British Energy, London, May 2006.
- Bruggink, J.J.C. en B.C.C. van der Zwaan (2002): *The role of nuclear energy in establishing sustainable energy paths*. Global Energy Issues, vol. 18, p. 151-180.
- Brundtland (1987): *Our Common Future*. Oxford University Press. ISBN 0-19-282080-X.
- Bunn, M., S. Fetter, J.P. Hodren, B.C.C. van der Zwaan (2003): *The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel*. Harvard University, DE-FG26-99FT4028.
- CBS (2003): *Externe veiligheid, Interdepartementale cursus 2003 (VROM)*. Tabel in hoofdstuk 'Uitgangspunten van het externe veiligheidsbeleid'.
- CDA, PvdA, ChristenUnie (2007): *Coalitieakkoord tussen de Tweede Kamerfracties van CDA, PvdA en ChristenUnie*. 7 Februari 2007.
- CE (2007a): *Green4sure - Het Groene Energieplan*. Hoofdrapport, CE, Delft, mei 2007.
- CE (2007b): *Nieuwe elektriciteitscentrale in Nederland - De 'vergeten' kosten in beeld*. M.N. (Maartje) Sevenster, H.J. (Harry) Croezen, M.J. (Martijn) Blom, F.J. (Frans) Rooijers, CE, Delft, Publicatienummer: 07.6016.10, april 2007.
- CIEP (2005): *Tomorrow's Mores: The International System. Geopolitical Changes and Energy*. Clingendael International Energy Programme, Energy Study, 2005.
- CORA (2001): *Terugneembare berging - een begaanbaar pad*. Commissie Opberging Radioactief Afval, februari 2001.
- Croxford, T. (2005): *Public Perceptions in a Changing World*. World Nuclear Transport Institute (WNTI). PIME 2005, Paris, 13-16 February 2005
- CPB/ECN (2005): *Windenergie op de Noordzee - Een maatschappelijke kosten-batenanalyse*. Annemiek Verrips, Hage de Vries, Ad Seebregts, Mark Lijesen, CPB-publicatie 57, ISBN 90-5833-232-2, CPB/ECN, 's-Gravenhage/Petten.
- DoE (2002): *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. Department of Energy (DoE) USA, Washington, December 2002.
- DTe (2006): *Marktmonitor, ontwikkeling van de groothandelsmarkt voor elektriciteit 2005*.

- DTI (2006): *Nuclear power generation cost benefit analysis*  
<http://www.dti.gov.uk/files/file31938.pdf>.
- DTI (2007): *Meeting the Energy Challenge - A White Paper on Energy*. May 2007.
- Dones, R., T. Heck, M. Faist Emmenegger, N. Jungbluth (2005): *Life Cycle Inventories for the Nuclear and Natural Gas Energy Systems, and Examples of Uncertainty Analysis*. In: *Int. J. LCA* 10 (1) 10-23.
- ECN/MNP (2006): *Optiedocument energie en emissies 2010/2020*. Daniëls, B.W., J.C.M. Farla, L.W.M. Beurskens, Y.H.A Boerakker, H.C. de Coninck, A.W.N. van Dril, R. Harmsen, H. Jeeninga, P. Kroon, P. Lako, H.M. Londo, M. Menkveld, A.J. Seebregts, G.J. Stienstra, C.H. Volkers, H.J. de Vries, H.P.J. de Wilde, J.R. Ybema. ECN-C--05-105/MNP 7730001038, Petten/Bilthoven, maart 2006.
- EDF (2006): *L'énergie nucléaire et le projet EPR (European Pressurized water Reactor) à Flamanville 3*. EDF, Paris, France, October 2006. <http://www.edf.com>.
- EEX (2007): [www.eex.com](http://www.eex.com).
- El Baradei, M. (2004): Interview in *Der Spiegel*, nr. 5, 2004, p.104.
- El Baradei, M. (2007): *Security today and tomorrow*. IAEA-Bulletin 48/2, March 2007.
- ENDEX (2007): [www.endex.nl](http://www.endex.nl).
- EPZ (2006): *Mens en Milieu 2005*. EPZ, Borssele/Vlissingen.
- EU (2003): *External Costs - Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport*. EUR20198, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- EU (2006): *European Energy and Transport - Trends to 2030, update 2005*. European Commission, Directorate-General for Energy and Transport, 2006, ISBN 92-79-02305-5.
- EU (2006a): *A European strategy for sustainable, competitive and secure energy*. Greenpaper, COM(2006) 105 final.
- EU (2006b): *Impact Assessment Guidelines and Annexes*. European Commission, SEC(2005)791, Brussels, 15 June 2005 with March 2006 update.
- EU (2007): *Prospects for the internal gas and electricity market*; COM(2006) 841 final.
- Eurelectric (2007): *The Role of Electricity - A New Path to Secure, Competitive Energy in a Carbon-Constrained World*. Union of the Electricity Industry - EURELECTRIC, Brussels, March 2007.
- Eurobarometer (2007a): *Attitudes on issues related to EU Energy Policy - Analytical report*. Flash Eurobarometer 206a, The Gallup Organization. European Commission, Brussels, Belgium, April 2007.
- Eurobarometer (2007b): *Europeans and Nuclear Safety*. Special Eurobarometer 271, European Commission, Brussels, Belgium, February 2007.
- Greenpeace (2005): *Energy Revolution: a Sustainable Pathway to a Clean Energy Future for Europe*.
- Greenpeace (2006): *Energy Revolution: a Sustainable Pathway to a Clean Energy Future for the Netherlands*.
- Greenpeace (2006a): *The Chernobyl Catastrophe - Consequences on Human Health*. ISBN 5-94442-013-89, Greenpeace, Amsterdam, The Netherlands, April 2006.

- Greenpeace (2007): *The economics of nuclear power*. Report prepared for Greenpeace International, authors: Steven Thomas, Peter Bradford, Antony Froggatt, David Milborrow, Greenpeace International, Amsterdam, the Netherlands, May 2007.
- Generation IV International Forum (2002): *Gen IV roadmap: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, December 2002.
- Goodland, R. en H.E. Daly (1996): *Environmental Sustainability: Universal and non-negotiable*. Ecological Applications, August 1996, p. 1002-1017.
- Gutteling, J. (2001): *De controversiële boodschap - De communicatie tussen de deskundige en de leek over risico-onderwerpen*. Van Marum Lezing 2001 nr. 4, 28 november 2001.
- Hirschberg, S., P. Burgherr, A. Hunt (2004): *Accident risks in the energy sector: comparison of damage indicators and external costs*. PSAM7 conference, 2004.
- Heuting, R. en L. Reijnders (1998): *Sustainability is an objective concept*. Ecological Economics 27, p. 139-147.
- Heuting, R. en L. Reijnders (2004): *Broad sustainability contra sustainability: the proper construction of sustainability indicators*. Ecological Economics 50, p. 249-260.
- HSK (2003): *Position of the Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate regarding the Safety of the Swiss Nuclear Power Plants in the Event of an Intentional Aircraft Crash*. HSK-AN-4626, 2003.
- IARC (2006): *The Cancer Burden from Chernobyl in Europe*. Briefing Document, International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, 2006.
- IAEA (1980): *Convention on the Physical Protection of Nuclear Material*. 3 March 1980
- IAEA (1986): *Analyse Chernobyl: Summary report on the post-accident review meeting on the Chernobyl accident*. IAEA-safety series No. 75-INSAG-1, september 1986
- IAEA (1988): *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants*. Safety Series no.75-INSAG-3, IAEA, Vienna (1988).
- IAEA (1992): *The Chernobyl accident: updating of INSAG-1*. IAEA Safety series No. 75-INSAG-7, November 1992.
- IAEA (1994): *Periodic Safety Review of Operational Nuclear Power Plants*. IAEA 50-SG-O12.
- IAEA (2005): *Selection of decommissioning strategies: Issues and factors*. TECDOC-1478.
- IAEA (2006): Bulletin 47/2.
- IAEA (2006a): *Nuclear Power Reactors in the World 2006*.
- IEA (1998): *Nuclear Power: Sustainability, Climate Change and Competition*. IEA, Paris, ISBN: 92-64-16954-7.
- IEA (2006): *World Energy Outlook 2006*. IEA, Paris, France, November 2006, p. 145 en 365.
- IEA (2006a): *Energy Policies of IEA Countries - Belgium 2005 Review*. IEA, Paris, France, 2006, pp. 173-282.
- IEA/IAEA (2001): *Indicators for Sustainable Energy Development*, <http://www.iea.org/textbase/papers/2001/csd-9.pdf>.
- IPCC (2005): *Special Report Carbon Dioxide Capture and Storage*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, ISBN-13 978-0-521 68551-1.

- Jager D. de (1992): *De effecten van radionucliden in de atmosfeer op het weer, klimaat en milieu*. Publikatiereeks Stoffen, Veiligheid, Straling nr. 1992/4, Ministerie van VROM, 1992.
- KIVI/NIRIA (2006): *Smart Energy Mix*. Publicatie jaarcongres KIVI NIRIA, Den Haag, 12 oktober 2006.
- Klinke, A. en O. Renn (2002): *A New Approach to Risk Evaluation and Management: Risk-Based, Precaution-Based, and Discourse-Based Strategies*. Risk Analysis, Vol. 22, No.6, p.1071-1093.
- Kloosterman, J.L. (2006): *Overzicht van nieuwe kerncentrales*. TU Delft, PNR-131-2006-003/Rev 1, 2006.
- KPMG/NRG (2006): *Financiële zekerheidstelling kernenergiewet*. KPMG en NRG, april 2006.
- Kreusch, J., W. Neumann, D. Appel and P. Diehl (2006): *Nuclear Fuel Cycle*. Nuclear Issues Paper No. 3, Heinrich Boll Foundation, co published by WISE.
- Magill, J., V. Berthou, D. Haas, J. Galy, R. Schenkel, H.W. Wiese, G. Heusener, J. Tommasi and G. Youinou (2003): *Impact limits of partitioning and transmutation scenarios on the radiotoxicity of actinides in radioactive waste*. Nuclear Energy 42 (2003), 263-277.
- MARINA II (2002): *MARINA II Update of the MARINA Project on the radiological exposure of the European Community from radioactivity in North European marine waters*. C6496/TR/004, August 2002.
- Menkveld, M. en R.A. van den Wijngaart (2007): *Verkenning potentieel en kosten van klimaat en energiemaatregelen voor Schoon en Zuinig*. ECN-E--07-032/MNP 500115004.
- MIT (2003): *The Future of Nuclear Power*. Massachusetts Institute of Technology, MIT. Massachusetts, V.S., 2003, ISBN 0-615-12420-8.
- NEA (2002): *Accelerator driven Systems (ADS) and fast reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles*. OECD-NEA, Paris, 2002
- NEA (2005): *Projected costs of generating electricity - 2005 update*. NEA/IEA, Paris, France, 2005.
- NEA (2007): *Risks and Benefits of Nuclear Energy*. Nuclear Energy Agency (NEA), Paris, 2007.
- NEA/IAEA (2006): *Uranium 2005: Resources, Production and Demand (Red Book)*. Nuclear Energy Agency (NEA), Paris, 2006
- NEA/RWM (2005): *NEA/RWM/WPDD, 3 Achieving the goals of the decommissioning safety case*. Status report of the NEA Working Party on Decommissioning and Dismantling, NEA, Paris.
- Nederlandse regering (2007): *Samen werken, samen leven*. 14 juni 2007.
- NEI (2006): *The Chernobyl Accident and Its Consequences*. Nuclear Energy Institute, April 2006, [www.nei.org/doc.asp?docid=456](http://www.nei.org/doc.asp?docid=456).
- NMa (2006): *Visiedocument Concentraties Energiemarkten*. Nederlandse Mededingingsautoriteit, Den Haag, november 2006.
- NRC (2007): COMGBJ-07-0001.
- NRG (2006): *Inventarisatie Opleiding Nuclear Engineering*. Heek, A.I. van, S. de Groot. NRG-rapport 21943/06.76967/C, 2006

- OECD/NEA (2000): *Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options, a Comparative Study*. OECD/NEA, ISBN 92-64-17657-8.
- OECD/NEA (2003): *Nuclear Electricity Generation: What Are the External Costs?* OECD-NEA 4372 ISBN 92-64-02153-1.
- Öko-Institut (2006): *Comparison of Greenhouse-Gas Emissions and Abatement Cost of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life-Cycle Perspective - updated version*. Darmstadt, January 2006.
- Öko-Institut (2007): *Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung*. Arbeitspaper, Darmstadt, März 2007.
- Oxera (2005): *Financing the nuclear option: modeling the costs of new build*. Oxera, June 2005.
- Paul Scherrer Institut (2005): *Severe Accidents in the Energy Sector*. Energie-Spiegel No. 13, May 2005.
- Pescatore, C., A. Vári (2004): *Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management*. Nuclear Energy Agency (NEA), Paris, 2004.
- PQR (2006): *Burgers en kerncentrales - Onderzoek naar randvoorwaarden*. Partners in Quality Research BV (PQR), in opdracht van Ministerie van VROM, Den Haag, Nederland, juni 2006.
- Radetzki, M. (2000): *Coal or nuclear in new power stations: the political economy of an undesirable but necessary choice*. The Energy Journal, Vol. 21 (2000), 1, pp. 135-147.
- Rasmussen, N.C. (1975): *WASH-1400 Reactor Safety Study*, NUREG-75/014, USA
- Rathenau Instituut (2004): *Het nucleaire landschap - Verkenning van feiten en meningen over kernenergie*. Rathenau Instituut, Den Haag, Werkdocument 94, ISBN 90 77364 06 4.
- RIVM (2002): *Gemiddelde stralingsbelasting in Nederland en bijdrage in de woonomgeving van Borssele*.
- Royal Academy of Engineering (2004): *The Costs of Generating Electricity*. The Royal Academy of Engineering, Londen, VK, maart 2004, ISBN 1-903496-11-X.
- Rundmo, T. (2004): *Explaining risk perception. An evaluation of the psychometric paradigm in risk perception research*. Norwegian University of Science and Technology, Department of Psychology, Trondheim, Norway, 2004, ISBN 82-7892-024-9.
- RFF/ACS (1998): *Understanding Risk Analysis - A Short Guide for Health, Safety and Environmental Policy Making*. The American Chemical Society in cooperation with Resources for the Future, Washington, USA.
- Seebregts, A.J., M.J.J. Scheepers, R. Jansma, J.F.A. van Hienen, K. Spijker, W.A.G. van der Mheen, F. van Gemert, A.I. van Heek (2005): *Kerncentrale Borssele na 2013. Gevolgen van beëindiging of voortzetting van de bedrijfsvoering*. ECN-C--05-094.
- Seebregts, A.J. (2007): *Beoordeling nieuwbouwplannen elektriciteitscentrales in relatie tot de WLO SE- en GE-scenario's: een quickscan*. ECN-E--07-014.
- SER (2006): *Naar een kansrijk duurzaam energiebeleid - Advies over het toekomst energiebeleid*. Publicatienummer 10, 15 december 2006.
- Sijm, J.P.M.; S.J.A. Bakker, H.W. Harmsen, W. Lise, Y. Chen, (2005): *CO<sub>2</sub> price dynamics. The implications of EU emissions trading for the price of electricity*. ECN-C--05-081.



- Sijm, J.P.M.; M. ten Donkelaar, J.S. Hers, M.J.J. Scheepers, Y. Chen (2006): *CO<sub>2</sub> price dynamics. A follow-up analysis of the implications of EU emissions trading for the price of electricity*. ECN-C--06-015.
- Sjöberg, L. (1998): *World Views, Political Attitudes and Risk Perception*. Risk: Health, Safety & Environment, Vol. 9, Spring 1998, pp. 137.
- Sjöberg, L. (2002): *Are Received Risk Perception Models Alive and Well?* Risk Analysis, Vol. 22, No. 4, pp. 665-669.
- Slovic, P. (1987): *Perception of Risk*. Science, Vol. 236, 17 April 1987, pp. 280-285.
- Slovic, P. (1993): *Perceived Risk, Trust and Democracy*. Risk Analysis, Vol. 13 (1993), No. 6, pp. 675-682.
- Slovik, P., E.U. Weber (2002): *Perception of Risk Posed by Extreme Events*. Conference 'Risk Management Strategies in an Uncertain World'. Palisades, New York, USA, April 12-13, 2002.
- Sugo T., M. Tamada, T. Seguchi, T. Shimizu, M. Uotani, R. Kashima (2001): *Recovery System for Uranium from Seawater with Fibrous Adsorbent and Its Preliminary Cost Estimation*. Nihon Genshiryoku Gakkaishi- Journal of the Atomic Energy Society of Japan, Vol. 43, No. 10, 2001.
- Stoft, S. (2002): *Power System Economics: Designing Markets for Electricity*. ISBN 0-471-15040-I.
- Task Force Energietransitie (2006): *Transitie Actieplan*. SenterNovem, 2006.
- Tarjanne, R., S. Rissanen (2000): *Nuclear Power: Least-Cost Option for Baseload Electricity in Finland*. Presented at the Uranium Institute 25<sup>th</sup> Annual Symposium 30 August-1 September 2000, London
- Tarjanne, R., K. Luostarinen (2004): Lappeenranta university of technology, Finland.
- TenneT (2005): *Kwaliteits- en capaciteitsplan 2006-2012*.
- TenneT (2007): *TenneT neemt initiatief nieuwe productie versneld aan te sluiten*. 12 februarri 2007.
- TenneT (2007a): *TenneT realiseert opnieuw aansluiting voor nieuwe productie*. 13 april 2007.
- TenneT (2007b): Persoonlijke communicatie.
- Thomas, Steve (2005): *The economics of Nuclear Power*. Nuclear Issues Papers, No. 5, Heinrich Böll Foundation, Berlin, 2005.
- Tradetech (2007): <http://www.uranium.info/>.
- TVO (2006): *Olkiluoto 3 construction works proceed*.
- Turkenburg, W.C. (1996): *Technology assessment HTR, Deelstudie 8, Kernenergie en duurzame ontwikkeling*. ECN-C--96-048
- Turkenburg, W.C. (2003): *Nuclear energy and sustainable development*. IAEA-CN-108/KN63, Conference proceedings, juni 2003.
- Tweede Kamer (2004): *Opwerking van radioactief materiaal - Motie over verlenging opwerkingscontracten nucleair afval*. 25422, nr. 38, 15 juli 2004.
- USNRC (2006): *Background uranium enrichment*. september 2006 [www.world-nuclear.org/info/inf28.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf28.html).
- UNSCEAR (2000): Annex B: *Exposures from natural radiation sources*.

- US Department of Energy (1997): *Nonproliferation and Arms Control Assessment of Weapons-Usable Fissile Material Storage and Excess Plutonium Disposition Alternatives*. DOE/NN-0007
- Uyterlinde, M.A. et al. (2005): *The contribution of nuclear energy to a sustainable energy system*. Volume 3 in the CASCADE MINTS project, ECN, IPTS, NTUA, IER, ZEW, Erasme, NRCAN, EIA, PSI, RITE. ECN-C--05-085, March 2006  
<http://www.ecn.nl/en/ps/onderzoeksprogramma/energiescenario-s/cascade-mints/>
- Vanderhove H. et al. (2006): *Assessment of radiation exposure in the uranium mining and milling area of Mailuu Suu*. Kyrgyzstan, Journal of environmental radioactivity, vol 88., p. 118-139.
- Vattenfall (2005): *Life-Cycle Assessment - Vattenfall's Electricity in Sweden*. Vattenfall, Stockholm, [www.vattenfall.com](http://www.vattenfall.com).
- Verplanken, B. (1989): *Beliefs, Attitudes, and Intentions toward Nuclear Energy before and after Chernobyl in a Longitudinal within-subjects Design*. Environment and Behavior, Vol. 21 (1989), No. 4, pp. 371-392.
- VROM (1989): *Nationaal Plan voor de Kernongevallenbestrijding*. Tweede Kamer, vergaderjaar 1988-1989, 21015, nr. 3.
- VROM (2001): *Besluit Stralingsbescherming*. 16 juli 2001, staatsblad 397.
- VROM (2002): *Radioactief afvalbeleid*. Ministerie van VROM, 11 november 2002.
- VROM (2003): *Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen*. Staatsblad 1995, No. 92, tekst zoals toegevoegd op 26 augustus 2003.
- VROM (2004): *Convention on nuclear safety, National Report of the Kingdom of the Netherlands*. VROM, Den Haag, september 2004.
- VROM (2004a): *Besluit externe veiligheid inrichtingen*. Staatsblad 2004, No. 250.
- VROM (2004b): *Leidraad Kernongevallenbestrijding*. Publicatie van de Ministeries van VROM en BZK. VROM 00/00 000 (2004). Rapport beschikbaar bij VROM/Milieu.
- VROM (2006): *Randvoorwaarden voor nieuwe kerncentrales*. Ministerie van VROM, 6 oktober 2006.
- Williams, D. and K. Baverstock (2006): *Commentary: Chernobyl and the Future*. Nature, Vol. 440, 20 April 2006.
- WLO (2006): Bijlage Energie (MNP/CPB/RPB/ECN) in: *Welvaart en Leefomgeving - een scenariostudie voor Nederland in 2040, Achtergronddocument*. CBP/MNP/RPB, Den Haag, ISBN 90-6960-150-8.
- WHO (2007): *Chernobyl: the true scale of the accident*. WHO/IAEA/UNDP,  
<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/en/index.html>
- WNA (2007): *Information papers*, World Nuclear Association, Londen, June 2007.
- WNA (2007a): *Information papers – Country Briefings*, World Nuclear Association (WNA), Londen, June 2007.

## Bijlage A Vragenlijst Maatschappelijke Impact Analyse

Ontleend aan: *Impact Assessment Guidelines and Annexes*, European Commission, SEC(2005)791, March 2006 update.

Category	Question
<b>Economic impacts</b>	
<i>Competitiveness, trade and investment flows</i>	Does the option have an impact on the competitive position of EU firms in comparison with their non-EU rivals? Does it provoke cross-border investment flows (including relocation of economic activity)? Are the proposed actions necessary to correct undesirable outcomes of market processes in European markets?
<i>Competition in the internal market</i>	Does the option affect EU competition policy and the functioning of the internal market? For example, will it lead to a reduction in consumer choice, higher prices due to less competition, the creation of barriers for new suppliers and service providers,
<i>Operating costs and conduct of business</i>	Will it impose additional adjustment, compliance or transaction costs on businesses? Does the option affect the cost or availability of essential inputs (raw materials, machinery, labour, energy, etc.)? Does it affect access to finance? Does it impact on the investment cycle? Will it entail the withdrawal of certain products from the market? Is the marketing of products limited or prohibited? Will it entail stricter regulation of the conduct of a particular business? Will it directly lead to the closing down of businesses? Are some products or businesses treated differently from others in a comparable situation?
<i>Administrative costs on businesses</i>	Does the option impose additional administrative requirements on businesses or increase administrative complexity? Do these costs weigh in relative terms heavily on SMEs (Small and Medium Enterprises)?
<i>Property rights</i>	Are property rights affected (land, movable property, tangible/intangible assets)? Is acquisition, sale or use of property rights limited? Or will there be a complete loss of property?
<i>Innovation and research</i>	Does the option stimulate or hinder research and development? Does it facilitate the introduction and dissemination of new production methods, technologies and products?

<b>Category</b>	<b>Question</b>
<i>Consumers and households</i>	<p>Does it affect intellectual property rights (patents, trademarks, copyright, other know-how rights)?</p> <p>Does it promote or limit academic or industrial research?</p> <p>Does it promote greater resource efficiency?</p> <p>Does the option affect the prices consumers pay?</p> <p>Does it impact on consumers' ability to benefit from the internal market?</p> <p>Does it have an impact on the quality and availability of the goods/services they buy, and on consumer choice? (cf. in particular non-existing and incomplete markets - see Annex 2)</p> <p>Does it affect consumer information and protection?</p> <p>Does it have significant consequences for the financial situation of individuals / households, both immediately and in the long run?</p> <p>Does it affect the economic protection of the family and of children?</p>
<i>Specific regions or sectors</i>	<p>Does the option have significant effects on certain sectors?</p> <p>Will it have a specific impact on certain regions, for instance in terms of jobs created or lost?</p> <p>Does it have specific consequences for SMEs?</p>
<i>Third countries and international relations</i>	<p>Does the option affect EU trade policy and its international obligations, including in the WTO?</p> <p>Does it affect EU foreign policy and EU/EC development policy?</p> <p>Does the option affect third countries with which the EU has preferential trade arrangements?</p> <p>Does the option affect developing, least developed and middle income countries?</p>
<i>Public authorities</i>	<p>Does the option have budgetary consequences for public authorities at different levels of government, both immediately and in the long run?</p> <p>Does the option require significant establishing new or restructuring existing public authorities?</p> <p>What are the overall consequences of the option for economic growth and employment?</p>
<i>The macroeconomic environment</i>	<p>Does it contribute to improving the conditions for investment and for the proper functioning of markets?</p> <p>Does the option have direct or indirect inflationary consequences?</p>
<b>Environmental impacts</b>	
<i>Air quality</i>	<p>Does the option have an effect on emissions of acidifying, eutrophying, photochemical or harmful air pollutants that might affect human health, damage crops or buildings or lead to deterioration in the environment (polluted soil or rivers etc)?</p>
<i>Water quality and resources</i>	<p>Does the option decrease or increase the quality or quantity of freshwater and groundwater?</p>

<b>Category</b>	<b>Question</b>
	Does it raise or lower the quality of waters in coastal and marine areas (e.g. through discharges of sewage, nutrients, oil, heavy metals, and other pollutants)? Does it affect drinking water resources?
<i>Soil quality or resources</i>	Does the option affect the acidification, contamination or salinity of soil, and soil erosion rates? Does it lead to loss of available soil (e.g. through building or construction works) or increase the amount of usable soil (e.g. through land decontamination)?
<i>The climate</i>	Does the option affect the emission of ozone-depleting substances (CFCs, HCFCs, etc.) and greenhouse gases (e.g. carbon dioxide, methane etc) into the atmosphere?
<i>Renewable or non-renewable resources</i>	Does the option affect the use of renewable resources (freshwater, fish) more quickly than they can regenerate? Does it reduce or increase use of non-renewable resources (groundwater, minerals etc)?
<i>Biodiversity, flora, fauna and landscapes</i>	Does the option reduce the number of species/varieties/races in any area (i.e. reduce biological diversity) or increase the range of species (e.g. by promoting conservation)? Does it affect protected or endangered species or their habitats or ecologically sensitive areas? Does it split the landscape into smaller areas or in other ways affect migration routes, ecological corridors or buffer zones? Does the option affect the scenic value of protected landscape?
<i>Land use</i>	Does the option have the effect of bringing new areas of land ('greenfields') into use for the first time? Does it affect land designated as sensitive for ecological reasons? Does it lead to a change in land use (for example, the divide between rural and urban, or change in type of agriculture)?
<i>Waste production / generation / recycling</i>	Does the option affect waste production (solid, urban, agricultural, industrial, mining, radioactive or toxic waste) or how waste is treated, disposed of or recycled?
<i>The likelihood of scale of environmental risks</i>	Does the option affect the likelihood or prevention of fire, explosions, breakdowns, accidents and accidental emissions? Does it affect the risk of unauthorised or unintentional dissemination of environmentally alien or genetically modified organisms? Does it increase or decrease the likelihood of natural disasters? Does the option increase or decrease consumption of energy and production of heat? Will it increase or decrease the demand for transport (passenger or freight), or influence its modal split? Does it increase or decrease vehicle emissions?

<b>Category</b>	<b>Question</b>
<i>The environmental consequences of firm's activities</i>	<p>Does the option lead to changes in natural resource inputs required per output? Will it lead to production becoming more or less energy intensive?</p> <p>Does the option make environmentally un/friendly goods and services cheaper or more expensive through changes in taxation, certification, product, design rules, procurement rules etc.?</p> <p>Does the option promote or restrict environmentally un/friendly goods and services through changes in the rules on capital investments, loans, insurance services etc?</p> <p>Will it lead to businesses becoming more or less polluting through changes in the way in which they operate?</p>
<i>Animal and plant health, food and feed safety</i>	<p>Does the option have an impact on health of animals and plants?</p> <p>Does the option affect animal welfare (i.e. humane treatment of animals)?</p> <p>Does the option affect the safety of food and feed?</p>
<b>Social impacts</b>	
<i>Employment and labour markets</i>	<p>Does the option facilitate new job creation?</p> <p>Does it lead directly to a loss of jobs?</p> <p>Does it have specific negative consequences for particular professions, groups of workers, or self-employed persons?</p> <p>Does it affect the demand for labour?</p> <p>Does it have an impact on the functioning of the labour market?</p>
<i>Standards and rights related to job quality</i>	<p>Does the option impact on job quality?</p> <p>Does the option affect the access of workers or job-seekers to vocational or continuous training?</p> <p>Will it affect workers' health, safety and dignity?</p> <p>Does the option directly or indirectly affect workers' existing rights and obligations, in particular as regards information and consultation within their undertaking and protection against dismissal?</p> <p>Does it affect the protection of young people at work?</p> <p>Does it directly or indirectly affect employers' existing rights and obligations?</p> <p>Does it bring about minimum employment standards across the EU?</p> <p>Does the option facilitate or restrict restructuring, adaptation to change and the use of technological innovations in the workplace?</p>
<i>Social inclusion and protection of particular groups</i>	<p>Does the option affect access to the labour market or transitions into/out of the labour market?</p> <p>Does it lead directly or indirectly to greater in/equality?</p> <p>Does it affect equal access to services and goods?</p>

Category	Question
	<p>Does it affect access to placement services or to services of general economic interest?</p> <p>Does the option make the public better informed about a particular issue?</p> <p>Does the option affect specific groups of individuals, firms, localities, the most vulnerable, the most at risk of poverty, more than others?</p> <p>Does the option significantly affect third country nationals, children, women, disabled people, the unemployed, the elderly, political parties or civic organisations, churches, religious and non-confessional organisations, or ethnic, linguistic and religi</p> <p>Does the option affect equal treatment and equal opportunities for all?</p> <p>Does the option affect gender equality?</p> <p>Does the option entail any different treatment of groups or individuals directly on grounds of e.g. gender, race, colour, ethnic or social origin, genetic features, language, religion or belief, political or any other opinion, membership of a national min</p>
<i>Private and family life, personal data</i>	<p>Does the option affect the privacy of individuals (including their home and communications) or their right to move freely within the EU?</p> <p>Does it affect family life or the legal, economic or social protection of the family?</p> <p>Does the option involve the processing of personal data or the concerned individual's right of access to personal data?</p>
<i>Governance, participation, good administration</i>	<p>Does the option affect the involvement of stakeholders in issues of governance as provided for in the Treaty and the new governance approach?</p> <p>Are all actors and stakeholders treated on an equal footing, with due respect for their diversity? Does the option impact on cultural and linguistic diversity?</p> <p>Does it affect the autonomy of the social partners in the areas for which they are competent? Does it, for example, affect the right of collective bargaining at any level or the right to take collective action?</p> <p>Does the implementation of the proposed measures affect public institutions and administrations, for example in regard to their responsibilities?</p> <p>Will the option affect the individual's rights and relations with the public administration?</p> <p>Does it affect the individual's access to justice?</p> <p>Does the option make the public better informed about a particular issue? Does it affect the public's access to information?</p> <p>Does the option affect the media, media pluralism and freedom of expression?</p>

Category	Question
<i>Public health and safety</i>	<p>Does the option raise (bio)ethical issues (cloning, use of human body or its parts for financial gain, genetic research/testing; use of genetic information)?</p> <p>Does the option affect the health and safety of individuals/populations, including life expectancy, mortality and morbidity, through impacts on the socio-economic environment (e.g. working environment, income, education, occupation, nutrition)?</p> <p>Does the option increase or decrease the likelihood of bioterrorism?</p> <p>Does the option increase or decrease the likelihood of health risks due to substances harmful to the natural environment?</p> <p>Does it affect health due to changes in the amount of noise or air, water or soil quality in populated areas?</p> <p>Will it affect health due to changes energy use and/or waste disposal?</p> <p>Does the option affect lifestyle-related determinants of health such as use of tobacco, alcohol, or physical activity?</p> <p>Are there specific effects on particular risk groups (determined by age, gender, disability, social group, mobility, region, etc.)?</p>
<i>Crime, Terrorism and Security</i>	<p>Does the option improve or hinder security, crime or terrorism?</p> <p>Does the option affect the criminal's chances of detection or his/her potential gain from the crime?</p> <p>Is the option likely to increase the number of criminal acts?</p> <p>Does it affect law enforcement capacity?</p> <p>Will it have an impact on the balance between security interests and the rights of suspects?</p> <p>Does it affect the rights of victims of crime and witnesses?</p>
<i>Access to and effect on social projection, health</i>	<p>Does the option have an impact on services in terms of their quality and access to them?</p> <p>Does it have an effect on the education and mobility of workers (health, education, etc.)?</p> <p>Does the option affect the access of individuals to public/private education or vocational and continuing training?</p> <p>Does it affect the cross-border provision of services, referrals across borders and co-operation in border regions?</p> <p>Does the option affect the financing / organisation / access to social, health and education systems (including vocational training)?</p> <p>Does it affect universities and academic freedom / self-governance?</p>



## Bijlage B Beoordeling reviewers

De reviewers hebben een beoordeling gegeven van het rapport Fact Finding Kernenergie. Hieronder worden de commentaren van de drie reviewers weergegeven met daarbij de reacties van de auteurs.

### B.1 Commentaar van prof.dr. W.C. Turkenburg

#### *Algemeen*

- Het document levert op adequate wijze feitelijke informatie over de punten die in het debat over het verder toepassen van kernenergie in de energievoorziening van Nederland ter discussie staan.
- Hoewel het niet altijd mogelijk is feiten en meningen volledig van elkaar te scheiden, zijn de auteurs er goed in geslaagd hier zoveel mogelijk aan tegemoet te komen; ik wil de auteurs daarmee complimenteren.
- Het rapport is langer geworden dan oorspronkelijk beoogd: circa 140 pagina's in plaats van 100. De leesbaarheid van het document voor hen die in beleidsvragen over de elektriciteitsvoorziening van Nederland in het algemeen en de verdere toepassing van kernenergie daarbij in het bijzonder zijn geïnteresseerd, is echter goed.
- Commentaren die door de drie referenten tijdens het schrijfproces zijn geleverd en gedurende vier bijeenkomsten met de auteurs zijn besproken zijn op de meeste punten op een goede en afdoende wijze door de auteurs opgepakt en in de finale versie verwerkt.
- Op enkele punten roept het rapport bij mij nog vragen of kanttekeningen op. Hieronder staan deze weergegeven.
- Ondanks mijn kanttekeningen acht ik het rapport goed bruikbaar voor het SER-debat over noodzaak en wenselijkheid van het bouwen van nieuwe kerncentrales in Nederland als wij willen streven naar een duurzame ontwikkeling van onze energiehuishouding.

#### *Vragen en kanttekeningen bij de finale versie*

1. In het debat over 'kernenergie en duurzaamheid' speelt het begrip *inherente veiligheid van kerncentrales* een belangrijke rol. Een essentieel kenmerk van inherent veilige centrales is, *dat de reactorkern altijd intact blijft*, wat er ook gebeurt. Dit betekent dat op natuurwetenschappelijke gronden het onmogelijk moet zijn dat de kern (deels) smelt (bijv. door het plotseling wegvallen van de koeling van de reactorkern), explodeert (bijv. door een vermogens-excursie als gevolg van een ongewenste toename van de reactiviteit) of door chemische reacties in het ongereede raakt (bijv. brand bij toetreding zuurstof).

Het begrip inherente veiligheid zou mijns inziens in de rapportage nog wat scherper gedefinieerd kunnen worden. Tevens zou kunnen worden aangegeven in hoeverre generatie III+ reactoren (zoals de Pebble Bed reactor) in theorie aan de eisen van inherente veiligheid kan voldoen; daarnaast in hoeverre dit in de praktijk al - bijvoorbeeld via tests - is bewezen.

*Reactie 1: In het IAEA-document "Considerations in the development of safety requirements for innovative reactors: Application to modular high temperature gas cooled reactors" (IAEA Tecdoc 1366, 2003) is het begrip inherente veiligheid nader uitgelegd. Het komt erop neer dat de hoge-temperatuur reactorontwerpen een aantal inherente veiligheidseigenschappen bezitten, die de primaire beveiliging vormen tegen ernstige ongevallen (pagina 9). Als inherente veiligheidseigenschappen worden genoemd:*

- *splijtstof in de vorm van een 'coated particle', dat in staat is om splijtingsproducten binnen te houden onder alle bedrijfs- en ongevalsomstandigheden,*
- *éénfasig koelmiddel (helium), waardoor geen warmte-overdrachtsproblemen geassocieerd met kookverschijnselen kunnen optreden,*

- afvoer van vervalwarmte na afschakeling is mogelijk door warmtegeleiding, natuurlijke convectie, en warmtestraling, waardoor de maximum splijstoftemperaturen beperkt blijven tot beneden de ontwerplimieten,
- combinatie van lage vermogensdichtheid, grote warmtecapaciteit, hoge warmtegeleiding en grote thermische marges,
- voldoende negatieve splijstoftemperatuurcoëfficiënten om te voorziene positieve reactiviteitstoevoegingen te kunnen compenseren zonder schade aan de splijstof.

*Deze primaire beveiliging geldt voor alle drie de ongevals categorieën, gebrek aan warmteafvoer, vermogensexcursie en chemische reacties.*

*Bij pebble-bed reactoren is de inherente veiligheid ook experimenteel getest: zowel bij de Duitse AVR in de jaren tachtig van de vorige eeuw als bij de Chinese HTR-10 in 2003 en 2004. Bij de AVR is een koelmiddelverliesongeval en een ongeval met tegelijk falende koelmiddelpomp en vastzittende regelstaven gesimuleerd. Dit laatste experiment is ook uitgevoerd bij de HTR-10, met daarna ook een ongeval waarbij de regelstaaf niet vastzat maar uitgedreven werd. De HTR-10 experimenten in 2004 werden bijgewoond door een 200-tal deskundigen uit de hele wereld, waaronder uit Nederland.*

*De bestendigheid tegen ongevallen met chemische reacties is getest in aparte experimenten, voornamelijk uitgevoerd in het onderzoekscentrum FZJ in Jülich, Duitsland.*

2. Bij de analyse van de risico's van kernenergie wordt gebruik gemaakt van probabilistische methoden (Probabilistic Risk Assessments). Dit levert uitspraken op als (zie pag. 40) "de overlijdensrisico's voor de bevolking door ongevallen bij de verschillende processen van de splijstofcyclus zijn minder dan eens in de miljoen jaar ( $10^{-6}$  per jaar)". Een ander voorbeeld zijn de getallen voor de kernsmeltfrequentie (variërend van  $1.3 \times 10^{-6}$  tot  $3 \times 10^{-8}$  per jaar), die op pag. 41 voor verschillende generatie III reactoren worden geciteerd. Echter, de onzekerheid in de absolute bepaling van dit soort getallen is zeer groot, zeker als de getallen waarom het gaat heel klein zijn. In het verleden is die onzekerheid wel op één of meerdere orden van grootte (factor 10 of meer) geschat.

Tijdens het schrijffproces is gevraagd in de rapportage aandacht te besteden aan de huidige kennis over deze onzekerheden en aan het debat hoe met deze onzekerheden om te gaan. Ook in de finale versie is het hier niet of nauwelijks van gekomen.

*Reactie 2: Onzekerheden bestaan in allerlei soorten en maten. Vooral wat betreft de reactortechnologie is het identificeren van onzekerheden in veiligheidstudies en de wijze hoe daarmee moet worden omgaan, in de loop van de tijd zeer sterk ontwikkeld. Hierbij kan verwezen worden naar een tweetal IAEA-documenten waarin de beoordeling door de overheid van een PSA wordt behandeld<sup>5</sup> en de bepaling van kwaliteit van een PSA aan de orde komt<sup>6</sup>. De in het fact finding rapport vermelde kansen en gevolgen vormen meestal een onderbouwde schatting van de bovengrens van resultaten van de analyses. De wijze en mate van afdekken van de onzekerheden in deze resultaten is afhankelijk van het PSA-niveau. Naar mening van de auteurs van het fact finding rapport vereist een gedetailleerde beschrijving en discussie ervan een dusdanige diepgang, dat deze niet opbouwend bijdraagt aan de standpuntbepaling. De beschrijving in onderstaande kader dient daarom alleen ter nuancering van de relevantie van de genoemde onzekerheid.*

<sup>5</sup> Review of Probabilistic Safety Assessment by Regulatory Bodies, IAEA Safety Report Series No. 25, November 2002.

<sup>6</sup> Determining the Quality of Probabilistic Safety Assessment (PSA) for applications in Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1511, July, 2006.

### ***Onzekerheden bij Probabilistic Risk Assessments***

De onzekerheid in de kans van optreden van individuele ongevalsverlopen op PSA-1\* niveau is, hoewel klein in absolute zin, relatief groot. Dit geldt vooral voor ongevalsverlopen veroorzaakt door externe gebeurtenissen, die aanleiding kunnen geven tot gemeenschappelijk falen van systemen. De kernsmeltfrequentie is de som van kansen van alle ongevalsverlopen die tot fysieke beschadiging van de splijtstofelementen voert. De onzekerheid in de kans van voordoen van elk van deze ongevalsverlopen en de mate van beschadiging van de kern leidt tot een kansverdeling van de kernsmeltfrequentie. Deze wordt vaak gepresenteerd als een spectrum van kansen binnen een 5%-95% betrouwbaarheidsinterval. De spreiding (variantie) van deze verdeling kan een factor 2 à 3 bedragen. Daarom wordt naast de verwachtingswaarde van de kernsmeltfrequentie vaak ook de 95-percentielwaarde gebruikt als maat voor de 'bovengrens'. De (verdeling van de) kernsmeltfrequentie wordt vooral gebruikt bij de beoordeling van ontwerpveranderingen.

De bijkomende onzekerheden op PSA-2\* niveau hangen vooral samen met de onzekerheid in de grootte van de emissie van radioactieve stoffen die bij een specifiek ongevalsverloop kan optreden. Deze onzekerheid komt voort uit het chemisch-fysisch gedrag van deze radioactieve stoffen bij het beschadigen/smelten van de splijtstof en verspreiding binnen het primaire systeem en de insluiting. Door benchmarking van PSA-2 codes en vergelijken met experimenten met gesmolten splijtstof, zijn deze onzekerheden beperkt tot enkele orden van grootte (factor 10 of meer). Die onzekerheid wordt afgedekt door bij de risicoanalyse op PSA-3\* niveau consequent afdekkend hoge emissies te veronderstellen.

Voor de bepaling van het overlidensrisico (PSA-3) worden de PSA-2 ongevalsverlopen waarbij radioactieve stoffen vrijkomen, gegroepeerd in ongevalsklassen, die met betrekking tot de externe gevolgen vergelijkbare ongevalsverlopen bevatten. Daarna wordt uit elke klasse het ongeval met de naar verwachting grootste gevolgen (i.e. grootste, vaak ook snelste emissie) geselecteerd, waaraan als kans van optreden – afdekkend – de som van alle (PSA-2) kansen van de ongevallen in de betreffende klasse wordt toegekend. Vervolgens wordt voor elk van deze ongevallen voor elke plaats het conditionele overlidensrisico bepaald. Het locale overlidensrisico is gelijk aan de som van het product van de ongevalkans en het conditionele overlidensrisico over al deze ongevallen. In de PSA-3 wordt uiteindelijk als maat het *maximum* van de locale overlidensrisico's bepaald, waardoor de variabiliteit van het weer relatief weinig op de onzekerheid daarin doorwerkt. Overige onzekerheden in de bepaling van het maximale overlidensrisico zijn beperkt door het gebruik van afdekkende (i.e. relatief pessimistische) waarden in de dosis- en dosis-effectmodellen, vastgelegd in de nationale regelgeving.

Door de bij PRA toegepaste rekenmethodiek is de kans heel klein dat het berekende maximale overlidensrisico in werkelijkheid groter is, en omgekeerd de kans heel groot dat het risico werkelijk veel kleiner is dan berekend.

De berekende maximale overlidensrisico's voor kerncentrales zijn veel kleiner dan  $10^{-6}$  per jaar, het wettelijke criterium. Zo is het berekende overlidensrisico voor de kerncentrale Borssele kleiner dan  $10^{-8}$  per jaar.

\* zie voor uitleg PSA-1, PSA-2 en PSA-3 het kader op pagina 41

3. De strekking van de laatste alinea op pag. 43 + eerste 2 regels op pagina 44 is strijdig met wat hierover bijvoorbeeld in de World Energy Assessment (2000) in box 8.5 op pag. 309 wordt gezegd:

- “Reactor-grade plutonium can be used to construct devastating nuclear weapons at all levels of technical sophistication (DOE, 1997)”
- “The difficulties of developing an effective design of most straight forward type are not appreciable greater with reactor-grade plutonium than those that have to be met for the use of weapon-grade plutonium (Mark, 1993)”.
- “Using reactor-grade rather than weapons-grade plutonium would present some complications. But even with relatively simple designs such as that used in the Nagasaki weapon – which are within the capabilities of many nations and possibly some subnational groups – nuclear explosives could be constructed that would be assured of having yields of at least 1 to 2 kilotons. With more sophisticated designs, reactor-grade plutonium could be used for weapons having considerably higher minimum yields (CISAC, 1994). At the other end of the spectrum, advanced nuclear weapon states such as the United States and Russia, using modern designs, could produce weapons from reactor-grade plutonium having reliable explosive yields, weight, and other characteristics generally comparable to those of weapons made from weapons-grade plutonium (DOE, 1997)”.

*Reactie 3: De aangehaalde passages uit het rapport World Energy Assessment, dat in 2000 onder aanbeveling van de United Nations Development Programme is uitgebracht, geven naar de mening van de auteurs geen aanleiding om de tekst in het hoofd rapport volledig aan te passen. Wel is bij de kwalificatie over het vervaardigen van een werkend nucleair explosief de kwalificatie ‘zeer moeilijk’ aangepast in ‘moeilijk’.*

*In de referentie waarnaar in het rapport wordt verwezen (DOE, 1997), wordt als officieel standpunt van DOE genoemd, dat reactor-grade plutonium gebruikt kan worden voor het vervaardigen van een wapen. De technische problemen hierbij worden in het DOE rapport toegelicht (Box 3-1 op pag 37). In deze Box-3-1 staat overigens ook de passage van (CISAC, 1994) vermeld. Volgens de toelichting in deze Box.3-1, maakt voornamelijk het hoge percentage Pu-240 in reactor-grade plutonium dit materiaal “less convenient” om een effectief nucleair wapen te construeren. De reden hiervan is dat de hoge spontane splijtingskans van Pu-240 een hoge neutronflux produceert waardoor de kans op een voortijdige ontsteking van het “wapen” hoog is. Volgens de tekst in Box 3-1 moeten de potentiële bommakers hiervoor in elk geval over de technische kennis beschikken die destijds in Los Alamos met de nodige problemen werd vergaard (er vielen enkele doden en gewonden en het programma kostte vele miljarden dollars). Hiermee zou dan een explosief met een explosiekracht van 1 á 2 kton TNT geconstrueerd kunnen worden. Het blijft twijfelachtig of deze explosie op het door de bommakers gewenste moment zal plaatsvinden. Op basis van bovenstaande handhaven wij onze conclusie, dat het produceren van een primitief wapen met reactor-grade plutonium mogelijk is maar technisch wel moeilijk.*

4. Op pag. 78 wordt gezegd dat in meerdere documenten de kosten van de kerncentrale (EPR) die nu in Finland wordt gebouwd op € 1875 per kW worden geschat. Later wordt gezegd dat inmiddels de geplande opleverdatum met ruim één jaar is vertraagd. Deze vertraging leidt ertoe dat de investeringskosten belangrijk hoger dan het genoemde bedrag zullen komen te liggen.

Afgelopen week was ik in Wenen alwaar ik een bijeenkomst had met medewerkers van onder meer IASA en IAEA. In de wandelgangen ging het verhaal dat de investeringskosten inmiddels een miljard dollar hoger zouden uitkomen dan oorspronkelijk gepland. Bovendien kan niet worden uitgesloten dat de bouwtijd verdere vertraging ondervindt. De investeringskosten zouden daardoor op kunnen lopen tot 3000 \$/kW.

Daarnaast ging het verhaal dat vanuit Finland aan Areva (de leverancier van de centrale) is aangeboden op turn key basis de tweede kerncentrale (EPR) in Finland te bouwen tegen een prijs die 20% boven die van de eerste centrale ligt; Areva zou dit hebben afgewezen.

Ik kan niet beoordelen in hoeverre deze verhalen juist zijn. Omdat in het debat over de bouw van een nieuwe kerncentrale in Nederland kosten een belangrijke rol spelen waarbij veelal naar de kosten van de bouw van de EPR in Finland wordt verwezen, lijkt het wenselijk hier meer inzicht in te krijgen.

*Reactie 4: De vertraging met ruim een jaar hebben we veranderd in anderhalfjaar. Er bestaan inderdaad (onbevestigde) berichten over hogere investeringskosten voor de Finse EPR. De investeringskosten zijn onzeker omdat er nog nauwelijks generatie III kerncentrales gebouwd zijn. In het fact finding rapport staat op pagina 76 dat bij investeringskosten van een eerste kerncentrale van een nieuw type rekening moet worden gehouden met 30% hoger investeringskosten in vergelijking met de investeringskosten van kerncentrales die al vaker zijn gebouwd. Bij de kostenschattning van (DTI, 2006), dat onder meer is gebaseerd op de Finse EPR, wordt ervan uitgegaan dat AREVA (een deel van) de meerkosten voor de eerste EPR voor haar rekening heeft genomen. Een tweede reden voor kostenoverschrijving hangt samen met een langere bouwtijd en oplopende bouwrente (zie pagina 76). Het fact finding rapport vermeldt twee kostenstudies waarvan bekend is dat bouwrente is meegenomen in de kostenraming. De investeringskosten incl. bouwrente ligt dan tussen €<sub>2006</sub> 2625 (DTI, 2006) en €<sub>2006</sub> 2937 per kW (MIT, 2003).*

5. Bij de beschouwing over de economische rentabiliteit van kernenergie in Hoofdstuk 5.2 (zie bijv. figuur 5.1) lijkt het mij nuttig expliciet te vermelden dat door levensduurverkorting van het hoogradioactieve afval van de kerncentrale via *partitioning and transmutation* de kWh-prijs van kernenergie nog met circa 0,5-1,5 cent kan toenemen, mede afhankelijk van de mate van transmutatie en levensduurverkorting.

Dit is relevant omdat naar verwachting op termijn de kosten van CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag bij kolen- en gasgestookte centrales 1 tot 1,5 cent per kWh zullen kunnen gaan bedragen; thans zijn deze kosten overigens nog beduidend hoger.

*Reactie 5: De tekst is op basis van dit commentaar enigszins aangepast. Op pagina 75 wordt gerefereerd naar een studie van OECD-NEA. Aan de hand van een aantal geavanceerde scenario's die in deze studie zijn uitgewerkt, wordt een toename van de kostprijs van kernenergie verwacht die ligt in de orde van 10 tot 20% ten opzichte van de kostprijs van een kerncentrale met een lichtwater reactor (LWR) en directe opslag. Uitgaande van de kostprijsbandbreedte zoals vermeld in Tabel 5.3, zou dit overeenkomen met een kostprijsstijging van 0,3 tot 1,6 ct/kWh. De partitioning and transmutation (P&T) technologie bevindt zich echter nog in de onderzoeksfase. Een kostenraming van de technologie op industriële schaal gaat gepaard met grote onzekerheden. De kostenraming moet dan meer als ontwerpdoelstelling worden gezien.*

## B.2 Commentaar van prof.dr.ir. T.H.J.J. van der Hagen

Het is op zijn plaats de auteurs te complimenteren met dit rapport, dat zeker als een belangrijke informatiebron gebruikt zal gaan worden bij de politieke en maatschappelijke discussie over de toekomstige rol van kernenergie in de energievoorziening. Zij zijn erin geslaagd in zeer korte tijd een goed leesbaar document op te stellen dat de uiterst complexe en veelal emotioneel beladen technische, bestuurlijke, economische en maatschappelijke aspecten van kernenergie belicht.

Het rapport maakt duidelijk dat het metaal uranium potentieel een geweldige energiebron is die bij gebruik geen CO<sub>2</sub>-uitstoot veroorzaakt, maar dat ioniserende straling ook risico's met zich meebrengt. De essentie van nucleaire technologie "het op kostenefficiënte wijze benutten van deze energiebron onder waarborging van veiligheid voor mens en milieu" komt goed uit de verf. De dubbele rol die de ongevallen in Harrisburg en Tsjernobyl hebben gespeeld, wordt belicht: enerzijds hebben die geleid tot een beter inzicht in het verloop van een ernstig ongeval, met als gevolg vele verbeteringen in bestaande en toekomstige reactoren, bovendien hebben die een

grote impuls gegeven aan de internationale samenwerking en informatie-uitwisseling tussen bedrijfsvoerders en overheidsinstanties, anderzijds is de ontwikkeling van de nucleaire industrie ernstig vertraagd door vele annuleringen van nieuwbouwprojecten.

Het onderscheid tussen gebruikte splijtstof en radioactief afval, het vanuit duurzaamheidsperspectief grote belang van opwerking en de potentie van snelle reactoren, met een veel beter grondstofgebruik en een sterke reductie van zowel de omvang als de levensduur van radioactief afval worden goed uiteengezet.

Toch zijn er ook negatieve kanttekeningen te melden, het rapport is waar het gaat om details uiteraard niet foutloos. Te verwachten is dat de lezer de benodigde feitelijke informatie zal kunnen verkrijgen via sommige van de vermelde referentiebronnen en vooral via de in het rapport genoemde kennisinstellingen.

De huidige samenleving wordt overstelpt met informatie die in kwaliteit sterk varieert. Voor elke bewering kan wel een zekere mate van argumentatie worden gevonden in de media. Voor de leek is het ondoenlijk onderscheid te maken tussen betrouwbare en onbetrouwbare bronnen. Het is daarom jammer dat de auteurs in een aantal gevallen geen keuze hebben gemaakt tussen feiten en fictie, maar hebben volstaan met het aangeven van een bandbreedte.

*Reactie 6: Er is geen onderscheid gemaakt omdat de 'feiten', zoals die in de geraadpleegde bronnen zijn gevonden, vaak niet goed van de opvattingen van de auteurs van deze bronnen zijn te scheiden (zie Inleiding). In het tijdsbestek waarin het feitenoverzicht is opgesteld was het niet mogelijk om diepgaande analyses uit te voeren naar de in de bronnen weergegeven informatie. Daarom is ervoor gekozen een overzicht te geven van deze informatie. Dat er over bepaalde aspecten verschillende informatie beschikbaar is, heeft overigens niet altijd met de kwaliteit van de bronnen te maken, maar komt ook voort uit bestaande onzekerheden over deze aspecten. Waar dat relevant is zijn deze onzekerheden toegelicht.*

Het opsommen van een aantal energiescenario's, waarvan sommige van een verwachting en andere van een ambitie uitgaan, is slechts van beperkte waarde. Het hanteren van een scenario waarbij geen nucleaire nieuwbouw in Europa plaatsvindt, is - gezien de waar te nemen ontwikkelingen en plannen - uiterst curieus.

*Reactie 7: Het rapport geeft een overzicht van verschillende scenariostudies en de daarbij gemaakte veronderstellingen. Een analyse c.q. beoordeling van de mate van plausibiliteit van de gepresenteerde scenario's valt buiten het kader van de fact finding.*

De nieuwbouwplannen in en vooral buiten Europa en de beperkte productiekraft van de nucleaire industrie nopen Nederland tot besluitvaardigheid, wil het niet bij een keuze voor een of meer nieuwe kerncentrales met een jarenlange wachttijd worden geconfronteerd. Ik hoop en verwacht dat dit rapport die besluitvaardigheid ten goede komt.

### B.3 Commentaar van prof.dr. L. Reijnders

Hieronder staan de belangrijkste punten, waarvoor mijns inziens geldt dat de Fact Finding tekort schiet. De artikelen waarnaar wordt verwezen betreffen publicaties die aan de opstellers van de Fact Finding voorafgaand aan het totstandkomen van de eindversie zijn overgelegd.

1. *Kostprijs van kernenergie.* De opstellers stellen dat de kostprijs van kernenergie tussen 3.1 en 8 eurocent per kWh zal uitkomen. Het is mijns inziens zeer wel mogelijk dat de feitelijke bandbreedte groter zal zijn. Hultman et al. laten in Environmental Science and Technology (41 (2007) 2088-2093) zien dat, per reactor genomen, de huidige kostprijzen in de USA van kernenergie per kWh (af reactor) een factor 5 uit elkaar liggen. De relatief hoge kostprijzen worden door hen herleid tot 'high cost surprises'. Naar hun mening moet daar in de planning rekening mee worden gehouden. Deze conclusie lijkt ook toepasbaar op de Nederlandse situatie.

*Reactie 8: Het artikel van Hultman et al. geeft een overzicht van de kostprijzen van 99 bestaande kerncentrales in de VS. Voor 84% van de kerncentrales zijn kostprijzen berekend die in de range liggen van 3 tot 8 \$<sub>2004</sub>ct/kWh, wat overeenkomt met 3,5 tot 6,6 €<sub>2006</sub>ct/kWh. Voor 5% van de Amerikaanse kerncentrales ligt de berekende kostprijs boven 12 \$<sub>2004</sub>ct/kWh, d.w.z. 10 €<sub>2006</sub>ct/kWh. Het betreffende artikel gaat over bestaande, generatie II kerncentrales, terwijl het fact finding rapport uitgaat van nieuwe generatie III kerncentrales. De kostprijzen kunnen daarom niet onderling vergeleken worden. Het fact finding rapport wijst op pagina 75 en 76 op de investeringsrisico's (onzekerheid in kosten en onzekerheid in opbrengsten). Dit probeert ook Hultman et al. in het artikel duidelijk te maken.*

2. *Prijs (en life cycle CO<sub>2</sub>-emissie) van kernenergie vergeleken met duurzame energie* In lijn met de Fact Finding mag worden aangenomen dat, ingeval van een positieve Nederlandse beslissing, een nieuwe kerncentrale rond 2020 in gebruik zou kunnen worden genomen. De Fact Finding vergelijkt in dit verband de huidige kosten voor stroom uit een derde generatie kerncentrale met de huidige kosten voor duurzame energie. Voor kerncentrales is deze benadering niet onredelijk. Er zijn geen goede redenen om aan te nemen dat de kostprijs van kernenergie uit een derde generatie centrale in 2020 structureel lager zou liggen dan thans het geval is. Dat ligt evenwel anders voor diverse vormen van duurzame elektriciteitsvoorziening, waarvan de productie in het basislast segment (d.w.z. tijdens daluren) concurreert. Deze zijn onderhevig aan een structurele prijsdaling onder invloed van leereffecten, nieuwe technologie en schaalvergroting. Het gaat daarbij om windenergie op land, windenergie op zee, zonnecel-elektriciteit uit West Europa en Concentrated Solar Power uit Noord Afrika of Zuid Europa. Voor al deze vormen van elektriciteitsproductie wordt een sterke daling van de kosten verwacht (P. Viebahn et al., Comparison of carbon capture and storage with renewable energy technologies regarding structural, economic and ecological aspects in Germany. International Journal of Greenhouse Gas Control (2007), in press; W.C. Sinke, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde 73 (2007) 210-214; G.A.M. van Kuik, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde 73 (2007) 228-233). Het ziet er naar uit dat rond 2020 elektriciteit uit nieuw geïnstalleerde windmolens op land structureel goedkoper zal kunnen zijn dan kernenergie, terwijl nieuwe installaties voor wind op zee, zonnecellen en wellicht ook Concentrated Solar Power installaties (inclusief transport naar West Europa) mogelijk elektriciteit zullen kunnen produceren tegen ongeveer dezelfde kosten als derde generatie kerncentrales. Ook op het punt van milieuprestaties zoals de life cycle CO<sub>2</sub>-emissies zal in de komende periode de vergelijking ten voordele van duurzame energie veranderen (zie: voornoemde referenties Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde; S. Pacca et al., Energy Policy 35 (2007) 3316-3326)

*Reactie 9: In het fact finding rapport wordt de kostprijs van kernenergie vergeleken met die van andere elektriciteitsproductietechnologieën, waaronder windenergie. De vergelijking beperkt zich tot de geraadpleegde studies waarin ook de kosten van kernenergie zijn vermeld. In deze studies gaat het om de huidige technologie. Het analyseren van kosteninformatie uit studies naar andere technologieën valt buiten de scope van het fact finding rapport. Het is juist dat de kosten van technologieën door technologische verbeteringen en toename van schaalvergroting kunnen dalen. Dit geldt voor duurzame energie technologieën, maar ook voor kernenergie. In het rapport staat op pagina 75 vermeld dat de kosten van kernenergie voor een eerste kerncentrale van een nieuw type 30% hoger kunnen liggen dan van kerncentrales waar er al een aantal van zijn gebouwd. Wordt uitgegaan van deze hogere waarde, dan zullen de investeringskosten voor kerncentrales van de 3<sup>e</sup> generatie na verloop van tijd dalen.*

3. *Terrorisme.* Systematische aandacht voor kerncentrales als object voor terrorisme is relatief nieuw. De beste beschikbare wetenschappelijke publicatie daarover is: voor zover mij bekend: R. Frost, Nuclear terrorism Post-9/11- Assessing the Risks. Global Society 18 (2004) 397-422. Deze publicatie geeft geen aanleiding om met zekerheid te stellen, zoals de opstellers van de Fact Finding doen, dat 'de gevolgen van een eventuele terroristische overname

van een centrale effectief worden beperkt door de bestaande veiligheidssystemen die bij verkeerde acties van de operator de reactor automatisch afschakelen’.

*Reactie 10: In het fact finding rapport wordt bedoeld dat als er terroristen ‘op de stoel van de operator gaan zitten’ met als doel de reactor in een onveilige situatie te brengen, zij dan vooral bewerkstelligen dat de centrale automatisch afschakelt, zoals ook zou gebeuren bij verkeerde acties van de operators zelf. Het artikel van Frost doelt er echter op dat kerncentrales door terroristen te beschadigen zijn (bijv. met explosieven). Inderdaad zijn kerncentrales, net als bijvoorbeeld dijken, chemische fabrieken en drinkwaterinstallaties, faciliteiten met een verhoogde kwetsbaarheid voor terroristische aanslagen. De kerncentrale zal adequaat beveiligd moeten worden tegen binnendringen van terroristen. Hoe dit moet gebeuren valt buiten het bestek van het fact finding rapport Zoals in het rapport wordt aangegeven wordt bij het ontwerp van nucleaire installaties aandacht geschonken aan het beperken van de gevolgen van terroristische aanslagen.*

4. *Schade ten gevolge van de blootstelling aan radioactieve stoffen.* In het algemeen zijn de onzekerheden daarover groter dan in de Fact Finding aangegeven. Voor een deel heeft dat te maken met resterende onzekerheden over dosis-effect relaties bij de blootstelling aan radioactieve stoffen, en voor een deel met grotere onzekerheden aangaande onderliggende oorzaken en processen (zoals betreffende het gedrag van radioactieve stoffen in een zoutkoepel en betreffende ongevalskansen in nieuwe typen kerncentrales). Uitgaande van een normale bedrijfsvoering is de milieubelasting en de schade aan de gezondheid van werknemers door uranium mijnbouw waarschijnlijk relatief het grootst. Van een feitelijk grotere betekenis dan in de Fact Finding gesuggereerd is evenwel de vergrote kans op bepaalde vormen van kanker bij mijnwerkers als gevolg van de blootstelling aan radioactieve stoffen in mijnen (o.m. V. Rericha et al Environmental health Perspectives 114 (2006) 818-822; B. Grosche et al. British Journal of Cancer 95 (2006) 1280-1267; O. Axelson, Environmental Health Perspectives Supplements 10780475 103 (1995) supplement 2) en de daadwerkelijke verspreiding van radioactieve stoffen vanuit mijnen (ook o.m. gedocumenteerd voor Canadese mijnen cf. B.A. Ahier et al. Environmental Health Perspectives Supplements 10780475 103(1995) supplement 5; P.A. Thomas & T.E. Gates, Environmental Health Perspectives 107 (1999) 527-537).

*Reactie 11: Voor onzekerheden “betreffende ongevalskansen in nieuwe typen kerncentrales” wordt verwezen naar reactie 2 van deze bijlage.*

*Met betrekking tot “het gedrag van radioactieve stoffen in een zoutkoepel” zijn locatie-specifieke testen nodig. Zoals op pagina 52 wordt gemeld is in Nederland in kader van de CORA-studie geen locatie-specifiek onderzoek uitgevoerd. Voor het selecteren van geologische zoutformaties die mogelijk geschikt zijn voor eindberging van radioactief afval moet locatie-specifiek onderzoek worden uitgevoerd waarbij onder meer de invloed van de temperatuur op de isolatie-eigenschappen van het omringende zoutgesteente wordt beoordeeld.*

*Wat in de vraag “resterende onzekerheden in dosis-effect relaties” wordt genoemd, duidt op de variabiliteit van de dosis-effectrelatie, die samenhangt met zaken als gedrag, leeftijd, gezondheidstoestand en aangeboren gevoeligheid.*

*Het longkankerrisico voor mijnwerkers dat samenhangt met blootstelling aan radon komt in Paragraaf 3.1.1 aan de orde. Ook het verhoogde risico voor mensen die in de omgeving van de mijn wonen (uitspoelen van tailings) komt daar aan de orde. De aangedragen literatuur geeft daarover aanvullende detailinformatie. Zo leidt de blootstelling van mijnwerkers aan stof en radon niet alleen tot een verhoogd risico op longkanker maar, hoewel in mindere mate, ook op sommige vormen van leukemie (Rericha et al., 2006). Door gerichte ventilatie is dit verhoogde risico terug te brengen.*

5. *Voorlichting over kernenergie.* De Fact Finding stelt dat het geven van feitelijke informatie ertoe leidt dat men genuanceerder en veelal positiever tegen kerncentrales aan gaat kijken. Deze conclusie is erop gebaseerd dat in groepsgesprekken het noemen van het aantal kerncentrales in België en Frankrijk een positieve invloed had op acceptatie van kernenergie in



Nederland. Dit komt overeen met een overgeneralisatie. Studies over risicocommunicatie wijzen bijvoorbeeld uit dat ‘feitelijke’ informatie over ‘wat er mis kan gaan in een kerncentrale’ mensen afwijzender pleegt te maken tegenover kernenergie.

*Reactie 12: In het fact finding rapport worden resultaten samengevat van een onderzoek dat in 2006 in opdracht van het ministerie van VROM door PQR is uitgevoerd. Het zijn niet de auteurs van het fact finding rapport die de conclusie trekken dat informatie over kerncentrales in België en Frankrijk een positieve invloed heeft op de acceptatie van kerncentrales, maar de PQR-onderzoekers. In het fact finding rapport wordt geconstateerd dat het PQR-onderzoek niets zegt over het omgekeerde: een afnemende acceptatie bij de ondervraagden op basis van informatie over landen die besloten hebben met kernenergie te stoppen.*