Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De catalogus van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde tijdschriften uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling video's.

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material.
Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

The catalogue of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized magazines from the Dutch anti-nuclear power movement and a video-section.

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small donation. Thank you.

www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

MEI 1997

ECN-C--97-031

OPWERKING VAN NEDERLANDSE SPLIJTSTOF

Een analyse

Collection Laka foundation
www.laka.org
Digitized 2018

D.H. DODD
R.J.S. HARRY
J.L. KLOOSTERMAN
R.J.M. KONINGS
A.M. VERSTEEGH

Verantwoording

Dit rapport is opgesteld door de Business Unit Nucleair Onderzoek van het Energieonderzoek Centrum Nederland in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken (Mefisnummer 61758).

INHOUD

1.	INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING	5
2.	DE SPLIJTSTOFKRINGLOOP	7
3.	DE MILIEU-ASPECTEN	17
4.	DE PROLIFERATIE-RISICO'S	27
5.	DE KOSTEN	31
6.	SAMENVATTING EN CONCLUSIES	43
	REFERENTIES	47
	ACRONIEMEN	49
	FIGUUR 1	

Collection Laka foundation
www.laka.org
Digitized 2018

1. INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING

In Nederland wordt een klein deel van de elektriciteit opgewekt door middel van kerncentrales. De kerncentrale in Borssele (KCB) heeft een vermogen van 450 MWe, de kerncentrale in Dodewaard (KCD) een vermogen van 58 MWe. De KCD is in het voorjaar 1997 uit bedrijf genomen. De eigenaars/bedrijvers van deze beide Nederlandse reactoren, respectievelijk EPZ en GKN, hebben al vele jaren geleden gekozen voor opwerking van de uitgewerkte splijtstofelementen uit hun reactoren, daarbij rekening houdend met bestaande regels en voorschriften. Deze opwerking, waarbij uranium en plutonium worden gescheiden van het kernsplijtingsafval, vindt plaats in het buitenland maar er is internationaal afgesproken dat elk land en dus ook Nederland zijn "eigen" nucleaire afval moet terugnemen. In Nederland is officieel besloten dat dit geretourneerde afval voorlopig (circa 100 jaar) bovengronds wordt opgeslagen en dat de definitieve (geologische) opberging zodanig zal geschieden dat het afval terughaalbaar is.

Door Greenpeace is de vraag opgeworpen of deze opwerkingsroute de voorkeur verdient boven de opslag van de gebruikte splijtstofelementen zonder voorafgaande opwerking. Dit heeft geleid tot vragen in de Tweede Kamer.
In opdracht van het Ministerie van Economische Zaken heeft ECN een vergelijking gemaakt tussen verschillende werkwijzen: opslag na opwerking en opslag zonder opwerking.

Het resultaat wordt in dit rapport beschreven.
In het tweede hoofdstuk wordt een korte beschrijving gegeven van de belangrijkste stappen in de splijtstofkringloop van beide opties, en van diverse deelprocessen daarvan. In hoofdstuk drie wordt ingegaan op de milieu-aspecten van elk van deze deelprocessen, in hoofdstuk vier op de proliferatie-aspecten en in hoofdstuk vijf op de kosten.
In hoofdstuk zes worden de beschouwingen kort samengevat en de voornaamste conclusies geformuleerd.

2. DE SPLIJTSTOFKRINGLOOP

De kerncentrale, waarin door splijting van uranium energie wordt opgewekt welke wordt omgezet in elektriciteit, vormt een centraal maar klein onderdeel van de splijtstofkringloop. Van zeker zo groot belang is wat er gebeurt tijdens de processtappen vóór het laden van de splijtstofelementen in de reactor (het "front-end"). Voor de analyse die in dit rapport wordt gepresenteerd is echter de allerbelangrijkste vraag wat er met de splijtstof gebeurt ná het ontladen uit de reactor (het "back-end"). Feitelijk is er geen sprake van een echte kringloop, zelfs wanneer rekening wordt gehouden met het feit dat aan de primaire grondstof, uranium, energie wordt onttrokken. De begintoestand, uraniumerts, verschilt namelijk zeer van de eindtoestand, het kernsplijtingsafval of de gebruikte splijtstofelementen, die beide sterk radioactief zijn.

Voor het "back-end" van de splijtstofkringloop, zoals deze hier toch voor het gemak maar zal worden genoemd, zijn er twee principiële mogelijkheden, namelijk:
1 opwerking van de splijtstof en terugvoeren van het splijtbare materiaal in een kerncentrale en opslag en later opberging van het afval;
2 opslag en opberging van de splijtstof zonder deze opwerking.

Opwerking maakt hergebruik van splijtstof mogelijk. In een kerncentrale wordt namelijk niet al het splijtbare uranium verspleten. Voorts wordt in de reactorkern uit niet splijtbaar materiaal nieuw splijtbaar materiaal gevormd: plutonium (zie 2.3). In het geval van opberging van splijtstof zonder opwerking ziet men af van het gebruik van het nog resterende splijtbare uranium en van het gevormde plutonium. Met andere woorden, men benut niet het gehele potentieel van de oorspronkelijke splijtstof en men laat een potentieel nuttige energiebron verloren gaan, terwijl men toch de grootste zorg en moeite, en daardoor ook kosten, moet besteden aan de opslag van dit kernafval.

Een splijtstofelement bevat na gebruik naast plutonium nog meer stoffen die er vóór gebruik niet in zaten, te weten de splijtingsproducten en de zogeheten actiniden. De splijtingsproducten zijn voor een groot deel niet stabiel (radioactief) en vervallen, waarbij straling vrijkomt, als gevolg waarvan de splijtstofelementen of het kernsplijtingsafval achter afscherming moeten worden bewaard. Ook de actiniden, waarvan plutonium er één is, blijven gedurende vele honderdduizenden jaren radioactief, alhoewel de (alfa-)straling die hierbij vrijkomt gemakkelijk is af te schermen. Als gevolg van deze straling wordt ook warmte opgewekt. Een gebruikt splijtstofelement zal nooit enig gevaar opleveren indien het zich gedurende zeer lange tijd intakt achter een zware afscherming bevindt, waar het bovendien gedurende de eerste jaren gekoeld wordt.

De Nederlandse situatie wordt gekenmerkt door het volgende:
a) De bedrijvers/eigenaren van de Nederlandse kerncentrales hebben om bedrijfseconomische redenen, met toestemming van de Nederlandse overheid, gekozen voor een route die opwerking van de splijtstof omvat.
b) Nederland heeft gekozen voor tussentijdse bovengrondse opslag van kernsplijtingsafval.
c) Voor de "definitieve" opberging is gekozen voor een variant waarin het afval terughaalbaar moet zijn, dus per definitie voor mensen bereikbaar.

In beginsel zijn al deze gemaakte keuzes niet onherroepelijk. Weliswaar is al een deel van de elementen op deze wijze verwerkt, maar men zou nu kunnen besluiten de nog niet verwerkte splijtstofelementen uit de Nederlandse kerncentrales alsnog zonder voorafgaande opwerking op te slaan. Om te kunnen beoordelen of deze alternatieve procedure de voorkeur verdient boven de huidige moet het duidelijk zijn wat de verschillen tussen deze beide routes zijn.

Wanneer men nu zou kiezen voor opslag zònder opwerking sluit men niet uit dat in de toekomst de elementen toch alsnog zullen worden opgewerkt, bijvoorbeeld als succesvolle ontwikkeling van nieuwe technieken om het plutonium en het

kernsplijtingsafval te behandelen tot andere inzichten terzake heeft geleid. Indien in Nederland in de toekomst inderdaad tot deze zogenaamde "uitgestelde opwerking" zou worden besloten, dan zal dit een negatief effect hebben op de milieu-aspecten en proliferatierisico's en vooral op de kosten van de route 2, opslag zonder opwerking, aangezien men de meeste kosten voor route 1 al heeft gemaakt. Deze mogelijkheid is in deze studie niet verder in een apart scenario uitgewerkt.

2.1. De onderdelen van de splijtstofkringloop

In het huidige spraakgebruik wordt energie-opwekking in een kernreactor als centraal punt genomen. Alles wat daaraan vooraf gaat noemt men het "front-end" van de splijtstofkringloop, alles wat daarna komt het "back-end".

Het "front-end" van de splijtstofkringloop bestaat globaal uit vijf stappen, te weten
F1 - mijnbouw, de winning van het uraniumerts;
F2 - de concentratie van het erts;
F3 - de conversie van uraniumerts tot zuivere uraniumverbinding;
F4 - de verrijking van het uranium;
F5 - de fabricage van splijtstofelementen.

In het geval van opwerking van splijtstofelementen, hierna route 1 genoemd, ondergaan de elementen na een verblijf in het opslagbassin bij de centrale de volgende behandelingen:
B1.1 - transport van de kerncentrale naar de opwerkingsfabriek;
B1.2 - opwerking van de splijtstofelementen in de opwerkingsfabriek waarbij uranium en plutonium worden afgescheiden;
B1.3 - verglazing van het afval, gevolgd door opslag van dit afval bij de opwerkingsfabriek zolang de Nederlandse tussenopslagfaciliteit van de COVRA nog niet gereed is;
B1.4 - transport van het verglaasde afval naar de faciliteit voor interim opslag van de COVRA;
B1.5 - opslag gedurende ca 100 jaar in deze interim-opslagfaciliteit;
B1.6 - transport naar de eindopbergingsfaciliteit en eindopberging (gedurende onbepaalde tijd).

Het teruggewonnen uranium (Reprocessed Uranium, REPU) kan worden teruggevoerd naar het "front-end" van de splijtstofkringloop en zal daar de stappen F4 en F5 (verrijking, en fabricage van uraniumoxide splijtstofelementen) ondergaan. REPU bevat namelijk nog maar circa 1% van de splijtbare isotoop ^{235}U, te weinig voor direct hergebruik in lichtwaterreactoren. Door REPU te verrijken kan dit percentage worden verhoogd naar 4% waardoor dit uranium weer bruikbaar is als splijtstof in reactoren. Dit wordt gedaan door onder andere het Nederlands-Duits-Britse URENCO op basis van het ultracentrifugeproces. Vanwege de lage uraniumprijs wordt dit overigens nog niet op grote schaal toegepast. Ook het opgewerkte plutonium kan weer in lichtwaterreactoren worden gebruikt. Het plutoniumoxide wordt daartoe gemengd met uraniumoxide (natuurlijk of verarmd uranium) en dit mengsel wordt op de gebruikelijke wijze verwerkt tot gesinterde splijtstoftabletten en splijtstofelementen. Deze 'Mixed Oxide' (MOX) elementen bevatten circa 6-8% plutonium.
Deze kringloop kan enige malen worden herhaald tot het uranium en het plutonium door verandering in hun isotopensamenstelling ongeschikt zijn geworden voor verder hergebruik in lichtwaterreactoren. Gebruik in snelle reactoren behoort echter wel nog tot de mogelijkheden.

In het geval van opberging zonder opwerking, hierna route 2 genoemd, ondergaan de elementen de volgende behandelingen:
B2.1 - tussenopslag in het bassin van de centrale;

B2.2 - transport van de splijtstofelementen naar een tijdelijke opslagfaciliteit[1] en opslag aldaar;
B2.3 - transport van de splijtstofelementen naar de conditioneringsfaciliteit;
B2.4 - conditionering, dat wil zeggen, verpakken van de elementen, mogelijk in combinatie met demonteren;
B2.5 - transport naar de tijdelijke opslagfaciliteit en opslag gedurende circa 100 jaar;
B2.6 - transport van de geconditioneerde elementen naar de eindopbergingsfaciliteit en eindopberging.

De splijtstofkringloop met zijn diverse processtappen wordt schematisch weergegeven in Figuur 1, achter in dit rapport.
Op de hierboven genoemde processtappen wordt hieronder nader ingegaan.

2.2 Het 'front-end' van de splijtstofkringloop

F1, Mijnbouw, F2, Ertsconcentratie, F3,Ertsconversie
Wereldwijd bedraagt de huidige uraniumproductie uit mijnbouw ruim 33000 ton per jaar. Deze activiteit vindt voornamelijk plaats in Australië, Canada, Niger, de Verenigde Staten en Rusland. Bij de mijn wordt het uranium uit het erts afgescheiden en omgezet tot een concentraat ('yellow cake') met een uraniumgehalte van meer dan 60%. Na transport naar de conversiefabriek wordt het uranium gezuiverd en omgezet in uraniumhexafluoride dat als grondstof dient voor het verrijkingsproces.
Op het eerste gezicht lijken deze processen voor de onderhavige kwestie niet van primair belang te zijn aangezien ze zowel voor route 1 als voor route 2 noodzakelijk zijn. Wanneer echter het opgewerkte uranium en plutonium uit de beide Nederlandse kerncentrales wordt verwerkt in nieuwe splijtstofelementen voor buitenlandse centrales, dan hoeft er minder erts te worden gewonnen, geconverteerd en geconcentreerd. Het effect hiervan wordt in hoofdstuk 3 behandeld.

F4 Uraniumverrijking
Natuurlijk uranium bestaat voor slechts 0,7% uit het splijtbare ^{235}U en voor 99,3% uit het niet splijtbare ^{238}U. Een verrijkingsstap, waarin de concentratie aan ^{235}U wordt verhoogd, is nodig om uranium geschikt te maken voor gebruik als splijtstof in lichtwaterreactoren. De verrijkingsgraden van ^{235}U in de splijtstof van Borssele en Dodewaard zijn respectievelijk 3,3% en 2,8%.

Uraniumverrijking is de kostbaarste stap in het "front-end". Het vindt op grote schaal plaats. In Nederland, Groot-Britannië en Duitsland gebeurt dat volgens het gascentrifugeproces en in Frankrijk en de Verenigde Staten volgens het gasdiffusieproces. Per ton 3% verrijkt uranium leveren beide processen 4,5 tot 5,6 ton verarmd uranium (0,2 - 0,3% ^{235}U). Hergebruik van plutonium zal leiden tot vermindering van de benodigde verrijkingsarbeid en daarmee tot verminderde kosten van het "front-end".

F5 Fabricage van splijtstofelementen
Na de verrijking wordt het uraniumhexafluoride omgezet in uraniumdioxide. Dit wordt tot tabletten geperst en gesinterd. Met deze tabletten worden vervolgens dunwandige buizen van een speciale metaallegering (zircaloy) gevuld, die aan beide uiteinden gasdicht worden afgesloten. Deze splijtstofstaven worden tenslotte gebundeld tot

[1] Indien de splijtstof niet wordt opgewerkt hangt het van de eisen die aan de eindopberging wordenm gesteld af of de splijtstofelementen wel of niet een voorbehandelingsstap moeten ondergaan. De nu geplande Nederlandse opslagfaciliteit HABOG bij Borsssele zal geen splijtstofelementen uit de Dodewaard of de Borssele reactor kunnen ontvangen. Voorbehandeling van de splijtstofelementen of aanpassing van het ontwerp van de opslagfaciliteit is dan noodzakelijk.

splijtstofelementen. De splijtstofelementen worden naar de reactor getransporteerd en in de reactorkern geplaatst.

Dit proces kan niet alleen met "verse", nooit eerder bestraalde, splijtstof worden uitgevoerd maar ook met splijtstof die uranium en plutonium bevat, verkregen door opwerking uit gebruikte splijtstofelementen. Het fabricageproces vereist in die gevallen speciale voorzieningen in verband met de radiotoxiciteit van plutonium en de wat hogere radioactiviteit van het reeds gebruikte uranium. Dit leidt tot extra kosten, die voor plutonium splijtstof aanzienlijk zijn.[2]

2.3 Energie-opwekking in een kerncentrale

Tijdens het gebruik van de splijtstof in een kerncentrale wordt energie geproduceerd door splijting van uranium (^{235}U). Het uranium in de splijtstof van Borssele bestaat voor 3,3% uit ^{235}U en voor de rest uit ^{238}U. Door neutronvangst wordt een deel van het ^{238}U omgezet in het plutoniumisotoop ^{239}Pu. Dit plutonium is goed splijtbaar in een lichtwater reactor en het levert een aanzienlijke bijdrage aan de elektriciteitsproductie van de centrale (circa 35%). ^{239}Pu kan echter ook neutronen absorberen zonder daardoor te splijten, waardoor ook andere, zwaardere plutoniumisotopen ontstaan. Uitgewerkte splijtstof van lichtwaterreactoren bevat daardoor plutonium dat bestaat uit diverse Pu-isotopen. Dit "reactor-grade plutonium" kan weer in nieuwe splijtstofelementen worden verwerkt. Het is beperkt bruikbaar voor kernwapens en veel minder geschikt dan het plutonium dat speciaal voor dat doel is geproduceerd ("weapons-grade plutonium").

Door neutronvangst en radioactief verval ontstaan in de splijtstof voorts kleine hoeveelheden actiniden (neptunium, americium en curium). Tabel 2.1 geeft een overzicht van de actinidenproductie in de kerncentrale van Borssele. De geproduceerde hoeveelheden in de kerncentrale van Dodewaard zijn ca. een factor 10 kleiner.

Tabel 2.1 *Productie van actiniden in de kerncentrale Borssele.*

Element	Productie (kg/jaar)
Neptunium	5
Plutonium	130
Americium	5
Curium	0,50

Na enkele jaren gebruik in de reactor is de hoeveelheid ^{235}U in de splijtstofelementen zo sterk verminderd dat de splijtstof moet worden gewisseld. In Borssele bijvoorbeeld wordt nu jaarlijks circa een derde deel van de splijtstof (dus circa 13 ton) gewisseld.

[2] De extra fabricagekosten van MOX-splijtstof zijn ongeveer gelijk aan de kosten van verrijking en conversie van uranium, waardoor gebruik van MOX-splijtstof financieel aantrekkelijk is voor bedrijven die over plutonium beschikken.

2.4 Het "back-end" van de splijtstofkringloop.

Na een afkoelperiode in het opslagbassin van de kerncentrale worden de splijtstofelementen afgevoerd. Zoals hiervoor beschreven zijn er twee routes mogelijk die uiteindelijk beide tot eindberging in een mijn zullen leiden. Omdat zo'n faciliteit voor definitieve opberging van kernsplijtingsafval of gebruikte splijtstofelementen nog nergens is gerealiseerd, worden deze eerst tijdelijk, meestal bovengronds, opgeslagen.[3] Ook in Nederland wordt uitgegaan van tijdelijke bovengrondse opslag. Hieronder volgt een korte beschrijving van alle stappen in beide routes.

Route 1 - Opwerking

B1.1 Transport van de kerncentrale naar de opwerkingsfabriek
De elementen zijn nog wel sterk radioactief maar leveren veel minder warmte dan direct na ontlading. Zij worden verpakt in een speciale goedgekeurde afschermende transportverpakking. Het transport gaat over de weg naar Frankrijk (COGEMA) en over zee naar Groot Brittannië (BNFL).

B1.2 Opwerking van de splijtstof.
Opwerking van de splijtstof is een proces waarmee al tientallen jaren op industriële schaal ervaring is opgedaan, voornamelijk in de installaties van COGEMA in La Hague in Frankrijk en van BNFL in Groot-Brittannië. De fabrieken UP2 en UP3 van COGEMA hebben elk een capaciteit van 800 ton/jaar, de 'Thermal Oxide Reprocessing Plant' (THORP) van BNFL in Sellafield heeft een capaciteit van 700 ton/jaar. EPZ heeft contracten gesloten met COGEMA , GKN met BNFL.
In de opwerkingsfabriek worden de elementen in stukken geknipt. De splijtstof wordt opgelost in salpeterzuur. Uit de oplossing wordt het uranium en het plutonium afgescheiden. Hierdoor komt ongeveer 96% van het materiaal vrij voor hergebruik in de vorm van REPU en plutonium.

B1.3 Verglazing van het kernsplijtingsafval
De belangrijkste afvalstroom van het opwerkingsproces is het hoogradioactieve vloeibare afval. Het bevat de splijtingsprodukten en kleine hoeveelheden neptunium, americium en curium. Om het voor opslag geschikt te maken wordt het verglaasd. De glasblokken moeten uiteindelijk, net als het andere radioactieve afval, worden opgeslagen in het land van herkomst.

B1.4 Transport van het verglaasde afval naar de faciliteit voor interim opslag van de COVRA
Een beperkt aantal transporten zal nodig zijn om het verglaasde kernsplijtingsafval van de opwerkingsfabriek naar Nederland te transporteren.

B1.5 Opslag gedurende ca. 100 jaar in deze interim-opslagfaciliteit
Het Nederlandse verglaasde kernsplijtingsafval zal worden opgeslagen in een speciaal gebouw dat voor interim opslag geschikt is, het HABOG bij de COVRA, dat begin volgende eeuw gereed zal zijn. In deze faciliteit kunnen de glasblokken afgeschermd, en door natuurlijke circulatie gekoeld, worden bewaard.

B1.6 Transport naar de eindopbergingsfaciliteit en eindopberging
Het verglaasde kernsplijtingsafval zal van het HABOG naar de faciliteit voor de

[3] In landen waar de afvalbehandeling nog onderwerp van politieke discussie is, zoals België en Duitsland, wordt deze tijdelijke bovengrondse opslag van complete splijtstofelementen ook toegepast in afwachting van een beslissing over directe opberging dan wel opwerking. Deze strategie wordt aangeduid met "uitgestelde splijtstofkringloop".

eindopberging worden getransporteerd, waar het definitief wordt opgeborgen. De Nederlandse overheid heeft bepaald dat dit afval zodanig moet worden opgeborgen dat het weer kan worden teruggehaald. Tot op dit moment is het grootste deel van het onderzoek in Nederland, dat door de Commissie Opberging Radioactief Afval (CORA) wordt gecoördineerd, gericht op het opbergen van het verglaasde afval in zoutkoepels. Als alternatief voor Nederland wordt ook opberging in klei bestudeerd. Er is nog geen voorkeur uitgesproken voor een van beide opties.

Route 2 - Opslag zonder opwerking

B2.1 Tussenopslag in het bassin van de centrale
Alhoewel de vergunning voorschrijft dat de opslag in het reactorbassin zo beperkt mogelijk moet worden gehouden, kunnen de elementen uit KCB voor de periode 1996-2004 in principe in het reactorbassin worden opgeslagen. Voor de elementen uit KCD is dat onmogelijk in verband met het gewenste tijdstip van voorbereiding van de ontmanteling. Deze situatie zal overigens na het stilleggen van de KCB in 2004 ook daar ontstaan.

B2.2 Transport van de splijtstofelementen naar een tijdelijke opslagfaciliteit en opslag aldaar
De aard van dit transport verschilt niet van B1.1. Alleen de bestemming is mogelijk een andere. In het huidige ontwerp voor het HABOG is namelijk geen rekening gehouden met opslag van splijtstofelementen met de afmetingen van die van de KCB en KCD. Men heeft in principe de keuze tussen twee mogelijkheden, namelijk a) aanpassen van het HABOG aan de afmetingen van de splijtstofelementen en b) het bouwen van een nieuwe opslagfaciliteit. Zolang er echter in Nederland geen tijdelijke opslagfaciliteit is gepland is de bestemming in feite onbekend. Geprobeerd zou kunnen worden BNFL bereid te vinden de elementen van KCD zolang op te slaan bij THORP. Voor de elementen van KCB zou iets dergelijks kunnen worden geprobeerd bij COGEMA. In dat geval is het transport identiek aan B1.1.

B2.3 Transport van de splijtstofelementen naar de conditioneringsfaciliteit
De omvang van dit transport is gelijk aan die van B2.2. De bestemming is nog niet duidelijk. In het geval van conditionering in het buitenland is deze stap vrijwel gelijk aan B1.1, het transport naar de opwerkingsinstallaties. Indien de conditionering in Nederland zal plaatsvinden ligt het voor de hand dat de daartoe benodigde faciliteit wordt gebouwd op dezelfde locatie als die voor de tijdelijke opslag.

B2.4 Conditionering
Voor conditionering van gebruikte splijtstofelementen is nog geen technologie ontwikkeld. Installaties op productieschaal zijn nog nergens ter wereld gerealiseerd. In Duitsland is een proefinstallatie beschikbaar terwijl in Zweden vergevorderde plannen voor zo'n installatie bestaan. Ook Nederland zou kunnen besluiten om een conditioneringsfaciliteit te bouwen, al zal die slechts een beperkt gebruiksdoel hebben. De periode vanaf het besluit tot realisatie van zo'n conditioneringsfaciliteit tot aan het tijdstip van ingebruikname zal waarschijnlijk niet korter maar aanzienlijk langer zijn dan die voor het HABOG, omdat er complexere en potentieel gevaarlijker handelingen moeten worden verricht. Eén van de veronderstellingen is immers dat bij conditioneren de splijtstofelementen worden gedemonteerd en de splijtstofstaven verpakt, en mogelijk zelfs verzaagd, zodanig dat de afmetingen overeenkomen met die van de verglaasde blokken kernsplijtingsafval.

B2.5 Transport naar de tijdelijke opslagfaciliteit en opslag gedurende circa 100 jaar
Opslag van geconditioneerde splijtstofelementen zal moeten plaatsvinden in het HABOG, als de elementen verkleind zijn, of in een aangepaste faciliteit als dat niet het geval is.

B2.6 Transport naar de eindopbergingsfaciliteit en eindopberging
Gelijk B1.6 zullen de geconditioneerde elementen van het HABOG naar de faciliteit voor de eindopberging worden getransporteerd, waar het definitief maar terughaalbaar zal worden opgeborgen.

2.5 Hergebruik van uranium en plutonium

Reactorplutonium (zie pagina 11, route 1, Opwerking)

Als een splijtstofelement uit de reactorkern wordt verwijderd is het gehalte aan splijtbaar materiaal teruggelopen en het gehalte aan neutronen absorberende splijtingsproducten toegenomen. Daardoor is de reactiviteit van het element onvoldoende. Het nog aanwezige ^{235}U en het nieuw gevormde plutonium, dat bestaat uit een mengsel van splijtbare (^{239}Pu en ^{241}Pu) en niet-splijtbare isotopen (^{238}Pu, ^{240}Pu en ^{242}Pu), kunnen opnieuw als grondstof voor splijtstofelementen worden gebruikt. Gezien de relatieve schaarste aan bruikbare uraniumvoorkomens is men er in de nucleaire technologie altijd van uitgegaan dat ook het in de reactor gevormde splijtbare materiaal zoveel mogelijk zou moeten worden gebruikt.

In de jaren zestig ging men er in de meeste landen waar kernenergie werd toegepast van uit dat splijtstof uit thermische reactoren zou worden opgewerkt. In die tijd zijn processen ontwikkeld voor de opwerking van splijtstof en diverse grote installaties zijn ervoor gebouwd en in bedrijf genomen. (COGEMA in Frankrijk en die van BNFL in Groot Brittannië).

Eind jaren zeventig is men daar in de Verenigde Staten, tijdens het presidentschap van Carter, van afgestapt, in hoofdzaak uit beduchtheid voor het gevaar voor proliferatie. In Europa en Japan heeft men deze Amerikaanse lijn niet gevolgd. De meeste splijtstofelementen afkomstig uit de kerncentrales in België, Frankrijk, Duitsland, het Verenigd Koninkrijk worden dan ook opgewerkt. Ook in Nederland hebben de eigenaren van de beide kerncentrales, met instemming van de overheid, besloten tot opwerking. In de jaren zeventig zijn daarvoor de contracten afgesloten: door GKN met BNFL, door EPZ met COGEMA.

Deze koers die in de jaren zestig en zeventig is uitgezet heeft in het Europa van vandaag geresulteerd in een goede infrastructuur voor opwerking. Naast een relatief grote opwerkingscapaciteit, gebaseerd op langlopende contracten, is er capaciteit opgebouwd voor de fabricage van MOX-splijtstof. Diverse reactoren zijn aangepast en hebben vergunning voor de inzet van MOX-splijtstof. In de meeste landen werkt men ook aan de realisatie van opslagfaciliteiten voor het kernsplijtingsafval dat bij de opwerking overblijft.

Redenerend vanuit de huidige situatie is het niet vanzelfsprekend dat ook nu voor de opwerkingsroute zou worden gekozen, ook al is het a priori verstandig beleid om, in het licht van de nu bestaande onzekerheid over de energievoorziening op de lange termijn, onnodige verspilling van energiegrondstoffen (REPU en Pu) te vermijden. Maar kernenergie heeft in Europa een minder hoge vlucht genomen dan in de jaren zeventig werd verwacht, en mede daardoor zijn de uraniumprijzen laag.
De huidige toestand, gebaseerd op in het verleden gemaakte keuzes, vertoont kenmerken die op het eerste gezicht tegenstrijdig lijken. Zo is de fabricage van MOX-splijtstof aanzienlijk duurder dan van verse uraniumsplijtstof, onder meer doordat het plutonium meer gecompliceerde en beter beveiligde fabrieken noodzakelijk maakt. Maar voor de reactorbedrijver die de splijtstof laat opwerken betekent gebruik van MOX-splijtstof de beste methode om van het opgewerkte plutonium af te komen en biedt het in principe de mogelijkheid de voorraad opgewerkt plutonium niet te laten toenemen. In een

lichtwaterreactor met 30% MOX splijtstofelementen wordt namelijk evenveel plutonium verspleten als geproduceerd. Bovendien worden door gebruik van plutonium in huidige reactoren de kosten van conversie en verrijking van uranium uitgespaard, die ongeveer even hoog zijn als de extra fabricagekosten van MOX-splijtstof. Ook is er navenant minder nieuw gewonnen uranium nodig (ongeveer evenveel als het percentage MOX-splijtstofelementen in de kern), wat een vermindering geeft van de milieueffecten van het "front-end".

Op dit moment hebben 30 reactoren in Europa een vergunning voor het gebruik van MOX-splijtstof (waarvan er 20 nu ook daadwerkelijk MOX-splijtstof gebruiken) en naar de huidige verwachting zal het aantal binnen enkele jaren toenemen tot 50. Verwacht wordt dat dit al in het jaar 2000 de jaarlijkse vraag naar MOX-splijtstof zal doen toenemen tot ongeveer 350 ton.
Om aan deze toenemende vraag te kunnen voldoen wordt de fabricagecapaciteit voor MOX-elementen aanzienlijk uitgebreid. Tabel 2.2 geeft hiervan een overzicht. In het jaar 2000 zal de MOX-splijtstoffabricagecapaciteit in de EU (circa 350 ton/jaar) ruim voldoende zijn om al het opgewerkte plutonium te verwerken tot MOX-splijtstof.

Tabel 2.2: *Productiecapaciteit voor MOX-splijtstofelementen in de EU (ton/jaar).*

Land	Plaats/Industrie	1995	2000
België	Dessel P_0	35	40
	Dessel P_1		40
Frankrijk	Cadarache CFCa	30	35
	Marcoule MELOX		115(1)
Verenigd Koninkrijk	Sellafield Test Plant	8	8
	Sellafield MOX-plant		120
Totaal (ca.)		70	350

Noot:
(1) In 1997 bedraagt de capaciteit van de MELOX installatie 115 ton splijtstof voor drukwaterreactoren. Na 2000 zal de eerste uitbreiding gereed komen: 50 ton splijtstof voor kokendwaterreactoren. Een tweede uitbreiding van 125 ton splijtstof voor drukwaterreactoren is gepland.

Uitgewerkte MOX-splijtstof kan opnieuw worden opgewerkt om het resterende plutonium nogmaals af te scheiden en voor hergebruik geschikt te maken. Wel moet uitgewerkte MOX-splijtstof worden vermengd met uitgewerkte UO_2-splijtstof, in een verhouding van 1:3, om de warmteproductie en de stralingsbelasting tijdens het opwerkingsproces en de fabricage van splijtstof te beperken. Studies wijzen uit dat plutonium in de huidige reactoren zeker twee keer kan worden hergebruikt. Dit gebeurt nog vrijwel nergens en het is ook in het komende decennium nog niet aan de orde. In geavanceerde reactoren, met in de kern een splijtstofverdeling die voor MOX-splijtstof geoptimaliseerd is, kan plutonium meer dan twee keer worden hergebruikt.

Wapenplutonium

Zowel in de Verenigde Staten als in Rusland komt in de komende decennia, dankzij de afspraken die voortvloeien uit de internationale akkoorden voor wapenreductie, circa 50 ton wapenplutonium vrij. Plutonium voor kernwapens bestaat voor circa 93% uit het splijtbare isotoop ^{239}Pu. MOX-splijtstof, gemaakt van wapenplutonium, is een goede splijtstof die zonder grote problemen kan worden gebruikt in kernreactoren. Hierdoor

kunnen de wapenplutoniumvoorraden effectief worden gereduceerd. De VS heeft daarom recent besloten het grootste deel van hun wapenplutonium onschadelijk te maken door het in kernreactoren in de vorm van MOX-splijtstof in te zetten. Het is de bedoeling dat een deel van het Amerikaanse wapenplutonium, dat minder geschikt is voor gebruik in reactoren, wordt geïmmobiliseerd (verglaasd) en (ondergronds) opgeslagen.

2.6 Enkele praktijk-aspecten van de huidige Nederlandse situatie

EPZ heeft drie opwerkingscontracten gesloten met COGEMA. Deze contracten dekken respectievelijk de opwerkingsbehoeftes van de perioden:

I 1973 tot 1980,
II 1981 tot halverwege 1993 en
III van halverwege 1993 tot 2004

De werkzaamheden onder contract I werden al in 1988 afgerond. Van de werkzaamheden die onder contract II vallen, is ruim de helft in de periode 1992-1993 uitgevoerd. Voor 1997 staat de verwerking van nog eens 203 elementen (van de in totaal 446 elementen waarop contract II betrekking heeft) op het programma. Met het opwerken van de 491 splijtstofelementen die onder contract III vallen, zal naar verwachting pas in het jaar 2000 worden begonnen. De splijtstofelementen afkomstig uit de ontladingen van 1993, 1994 en 1995, zijn al naar Frankrijk afgevoerd.

In deze studie is daarom alleen rekening gehouden met de elementen die onder contract III vallen. Dit contract heeft betrekking op 491 splijtstofelementen met naar de huidige raming circa 155 ton uranium en circa 1300 kg plutonium.

GKN heeft met BNFL een contract gesloten dat de opwerking van het merendeel van de splijtstofelementen van de kerncentrale Dodewaard omvat. Het contract heeft betrekking op 974,5 splijtstofelementen en omvat circa 57 ton uranium en circa 264 kg plutonium. Hiervan bevinden zich al 794 elementen in Sellafield.

Een complicatie is dat de KCD in het voorjaar van 1997 is stilgelegd. In de komende jaren wordt de reactor definitief uit bedrijf genomen. Om grote vertraging en daardoor hoge kosten bij het buiten bedrijf stellen van de KCD te vermijden is het voor GKN noodzakelijk de resterende splijtstofelementen binnen enkele jaren af te voeren, ongeacht welke strategie inzake de ontmanteling van de KCD ('40 jaar wachten' of directe ontmanteling) wordt gekozen. Dit zou in de praktijk betekenen dat alle splijtstofelementen die nu nog in Dodewaard aanwezig zijn naar Sellafield worden afgevoerd en daar worden opgeslagen, ongeacht wat er daarna mee gebeurt, mits uiteraard BNFL en de Britse overheid accoord gaan met alleen opslag.

3. DE MILIEU-ASPECTEN

3.1 Inleiding

In elke fase van de splijtstofkringloop heeft men te maken met stoffen die ioniserende straling uitzenden. Daarbij kunnen ook radioactieve stoffen vrijkomen en zich in het milieu verspreiden, via de atmosfeer of het oppervlaktewater, waardoor mensen worden blootgesteld aan ioniserende straling. In deze studie zal alleen worden ingegaan op de blootstelling van de bevolking, die kan plaatsvinden door de opname van radioactieve stoffen in het lichaam door inademing of door inslikken met water en voedsel, of door uitwendige bestraling, bijvoorbeeld bij transporten van radioactief materiaal. Op de blootstelling van personen die werkzaam zijn bij nucleaire installaties (radiologische werkers) zal niet worden ingegaan.

Voor de milieu-aspecten is het van belang dat de radioactieve stoffen uit de splijtstofkringloop onderling sterk verschillen. Ze behoren tot uiteenlopende elementen uit het periodiek systeem, hebben zeer uiteenlopende snelheden van radioactief verval en zenden, soms in combinatie, uiteenlopende soorten straling uit. De belangrijkste soorten straling zijn: α-straling, zware deeltjes met een gering doordringend vermogen; β-straling, electronen met een wat groter doordringend vermogen; en γ-straling, electromagnetische straling die zeer doordringend en lastig af te schermen kan zijn. Na verspreiding van γ-stralers in het milieu kan zowel inwendige bestraling optreden door opname in het lichaam, als uitwendige bestraling, bijvoorbeeld na lozing in de atmosfeer of op de grond. Voor de α- en β-stralers geldt dat ze vrijwel uitsluitend blootstelling aan straling kunnen veroorzaken als ze in of direct op het lichaam terechtkomen. De maat voor de blootstelling aan ioniserende straling is de eenheid sievert (Sv) waarin zowel de ongelijkmatige bestraling van het lichaam door de daarin opgenomen radioactieve stoffen is verdisconteerd, als de aard van de daardoor uitgezonden straling en de eventuele bijdrage van uitwendige bestraling [14].

Om de milieu-aspecten van de twee mogelijke verwerkingsroutes te vergelijken is het nodig de verschillen te bepalen in de mate waarin de bevolking wordt blootgesteld aan extra straling door aanwezigheid in het stralingsveld van een niet volledig afgeschermde stralingsbron of door in- of uitwendige besmetting met radioactieve stoffen. Het is daarvoor nodig in te gaan op de verschillen in dit opzicht tussen het "front-end" van de splijtstofkringloop, de kerncentrale en het "back-end" van de splijtstofkringloop (zie de paragrafen 3.4, 3.5 en 3.6).

3.2 De maat voor de milieu-effecten

Voordat men de milieu-effecten van twee alternatieve routes met elkaar kan vergelijken moet men eerst vaststellen naar welke milieu-effecten men precies kijkt. Het enige milieueffect waar het in dit verband om gaat is het effect van de blootstelling van de bevolking aan de straling die rechtstreeks het gevolg is van de in deze studie behandelde processen en handelingen. De vergelijking wordt beperkt tot normale bedrijfsomstandigheden. Het gaat in dit rapport dus uitsluitend om de stralingsdosis die de bevolking extra, dat wil zeggen boven de dosis afkomstig van andere menselijke activiteiten en van de natuurlijke achtergrondstraling, oploopt als gevolg van lozing door de hier beschouwde installaties van radioactieve stoffen of door de nabijheid van eventueel onvoldoende afgeschermde stralingsbronnen.
In de praktijk zijn er twee benaderingen:

a. *Bij de beoordeling van reguliere lozingen van nucleaire installaties*
Overeenkomstig de basisnormen van de Europese Unie voor stralingsbescherming [1] wordt in alle landen van de Europese Unie de maximale individuele dosis gebruikt om de reguliere lozingen van nucleaire installaties te beoordelen. De maximale individuele dosis is de dosis in een door de overheid vastgestelde referentiegroep waarvoor de blootstelling het hoogste is. Voor alle bronnen tezamen is de limietwaarde voor de maximale individuele dosis 1 millisievert per jaar [2]. Daarnaast mogen individuele lidstaten van de Europese Unie limieten per bron vaststellen. In Nederland bijvoorbeeld geldt, overeenkomstig het gewijzigde Besluit stralenbescherming Kernenergiewet [2], per stralingsbron (bijvoorbeeld een kerncentrale) een limiet van 0,1 millisievert per jaar. Ter illustratie, de gemiddelde Nederlander ontvangt circa 2 millisievert per jaar als gevolg van blootstelling aan de natuurlijke achtergrondstraling (bijvoorbeeld kosmische straling en radon).

b. *Bij de vergelijking van nucleaire processen*
Voor een onderlinge vergelijking van de potentiële schadelijke (stralings-) effecten op de bevolking van de verschillende opties voor de splijtstofkringloop moet een grootheid worden gehanteerd die een maat is voor alle totale effecten op alle leden van de bevolking tezamen. Daarvoor dient de collectieve dosis, die wordt uitgedrukt in menssievert. Daarin worden de stralingsdoses gesommeerd over alle leden van de bevolking en over de periode dat de blootstelling als gevolg van lozingen duurt of in beschouwing wordt genomen.
In een vergelijking tussen opties voor de splijtstofkringloop moeten die collectieve doses berekend worden op basis van eenzelfde eenheid van opgewekte electrische energie, zoals bijvoorbeeld per geproduceerde TWh. Collectieve doses kunnen ook gebruikt worden om na te gaan wat de potentiële stralingsschade in de bevolking is van bijvoorbeeld een jaar bedrijf van een bepaalde installatie ten opzichte van de blootstelling van dezelfde bevolking aan andere bronnen van straling (bijvoorbeeld natuurlijke achtergrondstraling, straling als gevolg van medische handelingen, het gebruik van fossiele brandstoffen, beeldschermen, etc.). Omdat de collectieve dosis uitsluitend wordt gebruikt voor onderlinge vergelijking van opties bestaan daarvoor geen nationale of internationale limieten.

3.3 De relatie tussen lozingen en stralingsdosis.

Voor elke installatie wordt in de vergunning vastgelegd hoeveel radioactiviteit maximaal door die installatie mag worden geloosd. De in 3.2 besproken dosislimiet maakt het in beginsel mogelijk om de maximaal toegestane lozingen vast te stellen, met behulp van modellen voor de verspreiding van geloosde radionucliden en een aantal aangenomen mechanismes voor de blootstelling van mensen aan de straling ervan. In de praktijk echter zijn de vergunde lozingen zo gering dat ermee samenhangende maximale dosis doorgaans lager, en soms aanzienlijk lager, is dan de geldende bronlimiet van 0,1 millisievert per jaar. Bijvoorbeeld, zowel bij de KCB als de KCD zouden lozingen in lucht en in water ter grootte van de vergunningslimieten leiden tot een maximale individuele dosis van circa 0,001 millisievert per jaar. Voor de twee opwerkingsinstallaties van COGEMA in La Hague (UP2 en UP3) samen zouden lozingen in de atmosfeer ter grootte van de vergunningslimieten leiden tot doses van circa 0,05 millisievert per jaar voor de lokale bevolking. Lozingen in zee ter grootte van de vergunningslimieten van deze twee opwerkingsinstallaties zouden ook tot doses van circa 0,05 millisievert per jaar leiden. De werkelijke lozingen liggen normaliter ruim onder de vergunningslimieten aangezien de installaties in beginsel de blootstelling "zo laag als redelijkerwijs mogelijk is" moeten houden (ALARA-principe). Als gevolg hiervan zijn de werkelijke maximale individuele doses lager dan de dosislimiet.

Alle bestaande en geplande nucleaire installaties voldoen aan de vergunningseisen, wat

betekent dat de erdoor veroorzaakte maximale individuele stralingsdosis lager is dan de relevante dosislimiet. Ook eventuele additionele faciliteiten, bijvoorbeeld voor de lange termijn opslag en opberging van gebruikte splijtstofelementen, zullen aan de vergunningseisen moeten voldoen. Op basis hiervan kan dus geen onderscheid worden gemaakt tussen route 1 en route 2. In dit hoofdstuk wordt daarom niet verder ingegaan op de maximale individuele doses die met de verschillende installaties samenhangen.

Omdat de door de nucleaire installaties geloosde radionucliden onderling sterk verschillen, onder meer in halveringstijd en gedrag in de biosfeer, kunnen de collectieve stralingsdoses als gevolg van een bepaalde hoeveelheid geloosde radioactiviteit sterk uiteenlopen. In Tabel 3.1 zijn als voorbeeld voor de belangrijkste langlevende radionucliden die tijdens opwerking van splijtstofelementen in de lucht worden geloosd de volgende grootheden gepresenteerd:
- de relatieve bijdrage aan de jaarlijkse totale emissie per hoeveelheid bestraalde splijtstof die jaarlijks wordt verwerkt;
- de dosisconversiefactor: de collectieve dosis (mensSv) in de komende 100 jaar per eenheid van emissie (TBq);[4]
- de relatieve bijdrage aan de collectieve dosis (voor de wereldbevolking) in de komende 100 jaar na het jaar van emissie.

Tabel 3.1 geeft de doses die de wereldbevolking de komende 100 jaar zal ontvangen tengevolge van de emissie in één jaar. Hierbij moet in ogenschouw worden genomen dat bij de zeer langlevende radionucliden slechts een deel van de totale collectieve dosis de komende 100 jaar wordt ontvangen, bij ^{14}C 10%, bij ^{129}I slechts 0,003%. Bij een relatief kort levend nuclide als ^{85}Kr wordt daarentegen 10 jaar na lozing 50% van de maximale dosis bereikt (bron: UNSCEAR [3]).

Tabel 3.1: *De relatie tussen lozingen en bijdrage aan de collectieve dosis voor vier nucliden die in gasvormige toestand in het "back-end" van de splijtstofkringloop kunnen worden geloosd.*

Nuclide	% van de totale emissie	Dosisconversiefactor (mensSv/TBq)	Relatieve bijdrage aan de mondiale collectieve dosis in de komende 100 jaar (% dosis)
^{14}C	0,02	8,5	87
^{85}Kr	95	0,0002	9,9
^{3}H	5	0,0012	3,3
^{129}I	0,0003	0,36	0,05
Totaal	100%	n.v.t.	100%

De vergelijking in dit hoofdstuk zal uitsluitend gebaseerd zijn op de collectieve dosis. Nergens ter wereld zijn limieten voor de collectieve dosis vastgesteld, ook in het Nederlandse milieubeleid niet.

[4] Radioactiviteit wordt uitgedrukt in de eenheid becquerel (Bq). Eén Bq betekent één vervallende atoomkern per seconde.

De collectieve dosis wordt alleen maar gebruikt om verschillende opties met elkaar te vergelijken.
In de Paragrafen 3.4 tot en met 3.6 worden achtereenvolgens de verschillende stappen van de gehele splijtstofkringloop besproken. Aan de hand van de stappen die in Hoofdstuk 2 werden beschreven zijn wordt aangegeven wat de verschillen tussen route 1 en route 2 in collectieve dosis zijn. In Paragraaf 3.7 zal de balans worden opgemaakt.

3.4 Het "front-end" van de splijtstofkringloop

In het "front-end" van de splijtstofkringloop worden de milieu-aspecten bepaald door de natuurlijke radioactiviteit van vervalprodukten van het uranium in het erts, namelijk radon en zijn vervalproducten. Radon komt vrij bij mijnbouw en bewerking van het erts. In het "front-end" van de splijtstofkringloop domineren derhalve de milieueffecten van deze processen [3,4,5].

3.4.1 Mijnbouw en extractie van uranium

Bij de mijnbouw van uranium zijn radon en haar vervalprodukten verantwoordelijk voor het grootste deel van de stralingsbelasting voor de bevolking in de omgeving. Tijdens de operationele fase van de uraniummijn komen deze stoffen vooral door ventilatie van de mijn (of direct vanuit een open mijn) in de atmosfeer terecht. Zelfs na het sluiten van de mijn komt nog gedurende zeer lange tijd (tienduizenden jaren) radon uit het mijnafval vrij. De lozing van radon is niet geheel te voorkomen maar kan wel worden beperkt. De tijdsgeïntegreerde stralingsbelasting die met uranium mijnbouw samenhangt is in Tabel 3.2 gegeven.[5]

Tabel 3.2: *De collectieve stralingsbelasting van uranium mijnbouw uitgedrukt in menssievert per TWh*[6]

		Collectieve dosis [4, 5]
Bedrijfsfase:	Lokale bevolking	0,08
	Lokale & regionale bevolking	0,17
Mijnafval:	Lokale & regionale bevolking	17 (1)

Noot
(1) Indien het mijnafval in de mijn wordt teruggeplaatst is dit aanzienlijk minder.

Zoals besproken in Hoofdstuk 2 biedt het opwerken van gebruikte splijtstofelementen de mogelijkheid het opgewerkte uranium en plutonium in kernreactoren te hergebruiken. Grootschalig hergebruik van plutonium en uranium in de bestaande kernreactoren (met een vergunningslimiet van 30 - 50% MOX in een reactorkern) zou de benodigde hoeveelheid natuurlijk uranium met 30 - 50% reduceren, wat tot een evenredige reductie in de collectieve stralingsbelasting door de uranium mijnbouw zal leiden. In dit opzicht is route 1 dus duidelijk gunstiger dan route 2.

[5] De getallen in Tabellen 3.2, 3.3. en 3.4 bevatten veronderstellingen over de omvang van de wereldbevolking gedurende de komende duizenden jaren en zij hebben alleen betekenis als een ruwe indicatie.

[6] Ter vergelijking, de jaarlijkse collectieve dosis op de Nederlandse bevolking tengevolge van alle technologische toepassingen tezamen (ook via milieublootstelling en consumentenproducten, maar exclusief natuurlijke en medische blootstelling) is ruim 5000 menssievert (Bron: De geschatte stralingsbelasting in Nederland in 1987, Min. van VROM, STRAVE-rapport 41, 1989). De totale jaarlijkse elektriciteitsproductie uit kernenergie in Nederland is 3,5 TWh.

3.4.2 Conversie, verrijking en fabricage van splijtstofelementen

Bij de conversie en verrijking van uranium en bij de fabricage van splijtstofelelementen worden geringe hoeveelheden uraniumisotopen en radon geloosd. De collectieve dosis ten gevolge van deze drie fasen tezamen wordt geschat op circa 0,00007 menssievert per TWh [4], gering in vergelijking met die van sommige andere fasen van de splijtstofkringloop (bijv. mijnbouw van uranium, reactorbedrijf en opwerking).

Route 1 zal leiden tot een vermindering van de behoefte aan uraniumoxide splijtstof. In plaats daarvan zal MOX splijtstof moeten worden gefabriceerd. Er zijn in de openbare literatuur geen gegevens beschikbaar over lozingen van installaties voor fabricage van MOX splijtstofelementen. Er is echter geen reden te verwachten dat deze lozingen hoger zullen zijn van die van de fabricage van uraniumoxide splijtstof. Er is op deze gronden geen voorkeur voor één van de beide routes. Voor beide routes zullen deze stappen slechts een kleine bijdrage leveren aan de collectieve stralingsbelasting tengevolge van de gehele splijtstofkringloop.

3.5 De kerncentrale

Pas in de kernreactor worden de sterk radioactieve, kunstmatige isotopen gevormd die het noodzakelijk maken alle verdere processtappen met de splijtstofelementen, i.c. opslag, transport, opwerking en conditionering, achter een effectieve afscherming te laten plaatsvinden. Kernreactoren zijn ontworpen en gebouwd om de radioactieve materialen binnen een meervoudige afschermende omhulling ingesloten te houden. Voor het allergrootste deel van de radioactieve inventaris is dat ook geen enkel probleem, doordat die verbonden is met vaste stoffen, namelijk splijtstof en constructiematerialen. De voornaamste bijdrage aan de milieueffecten komt van de in het koelwater en de lucht gevormde radionucliden die voor een deel geloosd worden in het water en in de atmosfeer.

De collectieve dosis tengevolge van het bedrijf van een kerncentrale wordt voor een groot deel bepaald door de lozing van ^{14}C, dat wordt gevormd door activering van stikstof en zuurstof in de splijtstofelementen en in het koelmiddel. Het in het koelmiddel gevormde ^{14}C wordt tijdens het reactorbedrijf geloosd. De straling afkomstig van ^{14}C draagt in belangrijke mate bij aan de totale dosis van de splijtstofkringloop. De met het reactorbedrijf samenhangende tijdsgeïntegreerde stralingsbelastingen zijn in Tabel 3.3 weergegeven. Het maakt voor de vorming en lozing van ^{14}C nauwelijks uit of de reactor alleen met uraniumoxide splijtstof of met ook een zeker percentage MOX splijtstof wordt bedreven. Er is op dit punt geen verschil tussen route 1 en route 2.

Tabel 3.3: *Collectieve stralingsbelastingen van electriciteitsopwekking uitgedrukt in menssievert per TWh*

	collectieve dosis [4]
Lokale Bevolking	0,0014
Regionale Bevolking	0,18
Wereldbevolking	2

3.6 Het "back-end" van de splijtstofkringloop

In het "back-end" van de splijtstofkringloop heeft men onherroepelijk te maken met een hoeveelheid sterk radioactief materiaal. "Back-end" processen, met name opwerking en

conditionering, waarbij als gevolg van de bewerkingen in principe radioactief materiaal kan worden verspreid, vinden daarom plaats in afgeschermde installaties. Zoals in alle stappen van de splijtstofkringloop worden deze lozingen met technische middelen geminimaliseerd.

3.6.1 Opwerking van splijtstofelementen

Bij het opwerken van bestraalde splijtstof scheidt men het uranium en plutonium van de radioactieve afvalstoffen. Een groot deel van de afvalstoffen komt tijdens dit proces in vloeibare en in gasvorminge toestand terecht. Door verschillende chemische en fysische processen wordt het grootste deel van de radioactieve stoffen uit deze afvalstroom in een vaste vorm omgezet. Een kleine fractie van het afval komt echter toch in het milieu terecht: een klein deel van de radioactieve gassen en luchtgedragen stoffen worden via de ventilatie in de atmosfeer geloosd, en gezuiverd afvalwater waarin zich toch nog geringe hoeveelheden radioactieve stoffen bevinden wordt op het oppervlaktewater geloosd. Een deel van de radioactieve stoffen die in het milieu vrijkomen bestaat uit langlevende radionucliden. Deze radionucliden worden op wereldschaal verspreid en cumuleren in de atmosfeer en de zee. De tijdsgeïntegreerde collectieve stralingsbelastingen die met deze lozingen samenhangen zijn in Tabel 3.4 weergegeven.

Tabel 3.4: *Collectieve stralingsbelastingen van opwerking uitgedrukt in menssievert per TWh*

	Collectieve dosis [4]
Lokale Bevolking	0,0002
Regionale Bevolking	0,06
Wereldbevolking	10

De omvang van de door opwerkingsinstallaties geloosde activiteit (in Bq) in de atmosfeer wordt voor een belangrijk deel bepaald door ^{85}Kr. De dosis die door dit radionuclide wordt veroorzaakt is echter relatief klein waardoor het slechts een zeer beperkte bijdrage aan de stralingsbelasting van de lozingen van opwerkingsinstallaties levert (zie Tabel 3.1, pagina 19).

Opwerkingsfabrieken hebben een slechte reputatie vanwege de grote lozingen in de jaren zeventig. Moderne opwerkingsinstallaties lozen echter aanzienlijk minder dan hun voorgangers. In de afgelopen 15 jaar zijn de lozingen van zowel La Hague als van Sellafield zeer sterk afgenomen (ALARA). Begin jaren negentig bijvoorbeeld waren bij La Hague de lozingen in zee van alpha-activiteit ongeveer een factor 7 lager dan 10 jaar eerder. In diezelfde periode nam de hoeveelheid jaarlijks opgewerkte splijtstof toe met ongeveer een factor 5. De lozingen per ton opgewerkte splijtstof zijn dus in deze periode met circa een factor 35 verminderd, voornamelijk als resultaat van technische verbeteringen in afvalbehandelings-technieken en in het opwerkingsproces zelf. Dit geldt ook voor de nieuwe THORP-installatie in Sellafield.

Het plutonium uit de opwerkingsfabrieken kan worden hergebruikt in MOX-splijtstof. Aangezien de Nederlandse kerncentrales geen vergunning hebben voor het gebruik van MOX-splijtstof, zal het Nederlandse plutonium zeer waarschijnlijk in MOX-splijtstof voor buitenlandse kerncentrales worden verwerkt. In het onwaarschijnlijke geval dat het Nederlandse plutonium uit de opwerking (route 1) niet op deze wijze kan worden hergebruikt, zal dit materiaal moeten worden omgezet in een materiaal dat geschikt is voor geologische eindopberging, dat wil zeggen, in een stabiele mineralogische toestand of in verglaasde toestand.

3.6.2 Conditionering

Er is weinig ervaring met deze stap van de splijtstofkringloop (zie Hoofdstuk 2). Er zijn geen lozingsgegevens voor de nog niet gerealiseerde conditioneringsinstallaties gepubliceerd. Men kan zich niettemin een globaal beeld vormen over de soort en de omvang van lozingen en de vermijdbaarheid ervan.
De aard en omvang van de lozingen zal afhangen van de toegepaste conditioneringstechniek. De omvang van de lozingen zal gering zijn wanneer de splijtstofstaven intact worden gelaten en het grootst wanneer de splijtstofstaven in stukken worden gezaagd. In dat geval zullen de gasvormige radionucliden die aanwezig zijn in de spleet tussen de splijtstof en de omhulling vrijkomen. Dit zijn in hoofdzaak de enkele procenten uit de splijtstof vrijgekomen gasvormige splijtingsproducten. De filters van het ventilatiesysteem zullen het meeste hiervan afvangen maar een klein gedeelte, met name de edelgassen, zal toch worden geloosd. Omdat, anders dan bij het opwerken, slechts een klein deel van de gasvormige splijtingsproducten op deze wijze vrijkomt is het plausibel dat de atmosferische lozingen bij het conditioneren van de splijtstofelementen aanzienlijk kleiner zullen zijn dan die bij opwerken van dezelfde hoeveelheid splijtstof. Hoewel kwantitatieve gegevens ontbreken mag worden verwacht dat conditionering resulteert in lozingen die maximaal enkele procenten bedragen van die bij opwerking.

3.6.3 Tijdelijke bovengrondse opslag

In het geval van opwerking zal het Nederlandse opwerkingsafval worden opgeslagen bij de COVRA in het HABOG. Verwacht wordt dat tijdens normaal bedrijf van het HABOG een kleine hoeveelheid radioactief materiaal, afkomstig van de vaten met de omhullingen van de splijtstofelementen en de verpakkingen met overig hoogradioactief afval [6], naar de atmosfeer zal worden geloosd. Uit het verglaasde hoogradioactief afval zijn geen emissies te verwachten. De bijdrage van deze lozingen aan de totale stralingsbelasting die met het bedrijven van de gehele COVRA faciliteit samenhangt is volgens een recent ECN-rapport [5] gering (minder dan 1%). In totaal wordt de stralingsbelasting tengevolge van het opslaan in het HABOG van radioactief afval uit de splijtstofkringloop op circa 0,00005 mensSv/TWh geschat.

Indien van opwerking wordt afgezien zullen de gebruikte, al dan niet geconditioneerde, splijtstofelementen direct moeten worden opgeslagen. Naar verwachting zal ook bij intacte splijtstofelementen in de opslagfaciliteit een klein deel van de vrije gasvormige radionucliden uit de splijtstofstaven ontsnappen. Een klein gedeelte hiervan, dat niet door de filters van het ventilatiesysteem wordt afgevangen, zal worden geloosd. In het geval dat de splijtstofstaven tijdens het conditioneren in stukken zijn gezaagd is dit gas al in de conditioneringsfaciliteit vrijgekomen. Bij opslag van intacte splijtstofelementen of -staven kan de lozing van gasvormige radionucliden in de opslagfaciliteit iets hoger zijn dan wanneer alleen hoogradioactief afval of geconditioneerde splijtstof is opgeslagen. (Het betreffende gas is immers al vrijgekomen in de opwerkingsfaciliteit, respectievelijk conditioneringsfaciliteit). Verwacht kan worden dat de milieugevolgen hoe dan ook zeer klein zijn vergeleken met die van de andere fasen van de splijtstofkringloop.

3.6.4 Transporten

In elke fase van de splijtstofkringloop zijn transporten van radioactieve materialen nodig. Om de werknemers en bevolking te beschermen zijn deze transporten gebonden aan regels voor de toegestane hoeveelheid radioactief materiaal per verpakking en voor het stralingsniveau buiten de verpakking. In Nederland zijn deze regels overeenkomstig het

'Accord Européen Relatif Au Transport des Marchandises Dangereuses Par Route' (ADR) [7], waarin de regelgeving van de IAEA is verwerkt. Het ADR stelt ook stringente eisen aan de bestendigheid van de verschillende types verpakking bij ongevallen. De kans dat een container met gebruikte splijtstofelementen (type B-verpakking) bij een ongeval zodanig defect raakt dat het stralingsniveau buiten de container toeneemt, wordt bijvoorbeeld geschat op minder dan 6×10^{-3} per transport ongeval [8]. Daarnaast moet de kans dat een dergelijke ongeval daadwerkelijk optreedt worden meegenomen: de gemiddelde frequentie van ernstige verkeersongevallen voor het vervoer over de weg is circa 2×10^{-7} per voertuig kilometer [8]. De kans op een ongeval waarbij de container defect raakt, is derhalve circa 1×10^{-9} per voertuigkilometer.

Er zijn geen getallen beschikbaar van de collectieve dosis tengevolge van de transporten in de Nederlandse splijtstofkringloop. Voor de Franse splijtstofkringloop wordt de collectieve dosis ten gevolge van transporten geschat op circa 0,001 menssievert per TWh [4]. Deze dosis vormt minder dan 1% van de belasting van de 'lokale bevolking' tengevolge van de hele splijtstofkringloop.Voor de hele wereldbevolking dragen deze transporten minder dan 0,01% bij aan de totale belasting door de splijtstofkringloop. Van deze belasting is slechts een klein gedeelte afkomstig van transporten van gebruikte splijtstofelementen en opwerkingsafval. De feitelijke dosis als gevolg van transporten wordt opgelopen door de mensen die zich enige tijd in de nabijheid van de transportcontainers bevinden.

Zoals in hoofdstuk 2 werd uiteengezet verschillen de transporten van een splijtstofkringloop met en zonder opwerking van elkaar doordat het te transporteren materiaal verschillend is, en de bestemmingen mogelijk eveneens. De bijdrage van transporten aan de collectieve dosis is echter uiterst gering en eventuele verschillen leveren geen grond voor voorkeur voor route 1 of 2.

3.6.5 Eindopberging

Wereldwijd is veel onderzoek gedaan naar de veiligheid van de verschillende opties voor de eindopberging van radioactief afval. In de afgelopen 10 jaar is dit onderzoek geconcentreerd op het opbergen in de diepe ondergrond, in klei, graniet of zout. Het grootste deel van het onderzoek in Nederland is totnutoe gericht op het opbergen van verglaasd hoogradioactief afval in zoutkoepels. Recent heeft de Nederlandse overheid bepaald dat dit afval zodanig moet worden opgeslagen dat het weer kan worden teruggehaald.

De Nederlandse onderzoekers hebben geconcludeerd dat de opberging van verglaasd radioactief afval in de diepe ondergrond technisch haalbaar is. Een goede beoordeling van de milieugevolgen van deze fase van de splijtstofkringloop is echter zeer moeilijk omdat de tijdschaal van een geheel andere orde van grootte is (de komende miljoenen jaren) dan bij andere delen van de splijtstofkringloop.

Een analyse van de gevolgen van het direct opbergen van gebruikte splijtstofelementen is in Nederland nog niet uitgevoerd. In het OPLA-onderzoek is directe opberging alleen globaal verkend. In België heeft een onderzoek [9] tot de conclusie geleid dat de het opbergen in klei van gebruikte onbehandelde splijtstofelementen en van verglaasd afval ongeveer gelijke milieu-gevolgen heeft. Men verwacht dat de directe opberging van gebruikte splijtstofelementen ook op een veilige manier kan plaatsvinden.

Voor zover nu bekend is eindopberging in de diepe ondergrond voor beide routes technisch mogelijk. Hoewel de karakteristieken van het afval en het ontwerp van de mijn voor route 1 en 2 verschillend zijn, kunnen grote verschillen in milieueffecten a priori nauwelijks worden verwacht.

3.7 Conclusies ten aanzien van de milieuaspecten

Voor een vergelijking tussen beide opties is de collectieve dosis beschouwd, dat wil zeggen de som van alle individuele doses die als gevolg van de verschillende fasen in de splijtstofkringloop worden opgelopen. Met betrekking tot de collectieve dosis tengevolge van route 1 (opwerking) en route 2 (directe opslag) kan het volgende worden geconstateerd:

1. Sommige fasen van de splijtstofkringloop dragen nauwelijks bij aan de collectieve dosis van de hele splijtstofkringloop. Dat zijn conversie, verrijking, splijtstoffabricage, tijdelijke opslag en transport. De collectieve stralingsbelasting van electriciteitsopwekking en de te verwachten stralingsbelasting als gevolg van eindopberging zijn weliswaar niet verwaarloosbaar maar zij zijn voor beide opties van dezelfde orde van grootte.

2. De verschillen tussen beide opties worden derhalve vooral bepaald door de uranium mijnbouw en het opwerkingsproces.
   Opwerking leidt in vergelijking met directe opslag enerzijds tot een verhoging van de collectieve dosis, maar anderzijds ook tot een vermindering. De verhoging is het gevolg van de lozingen van opwerkingsinstallaties: het opwerken van gebruikte splijtstofelementen brengt lozingen met zich mee die aanzienlijk hoger zijn dan de te verwachten lozingen van het conditioneren van splijtstof-elementen. Opwerking biedt echter de mogelijkheid om de behoefte aan uraniummijnbouw te verminderen door hergebruik van uranium en plutonium. Dit leidt tot een reductie in de stralingsbelasting die met de mijnbouw van uranium samenhangt.

2. De grootte van de collectieve stralingsbelastingen op de lange termijn als gevolg van mijnbouw van uranium en van opwerking is niet zo nauwkeurig te bepalen. Uit de hier gepresenteerde analyse kan worden geconcludeerd dat de collectieve stralingsbelastingen (wereldbevolking) van beide fasen uit de nucleaire electriciteitsopwekking in de orde liggen van 10 - 20 menssievert per TWh (Tabel 3.2 en 3.4), wat neerkomt op 40 - 80 menssievert per jaar tengevolge van de splijtstofkringloop van de Nederlandse kerncentrales.

4. De collectieve stralingsdosis van zowel route 1 als route 2 voor de splijtstofelementen uit de Nederlandse kerncentrales is gering in vergelijking met de eerder vermelde collectieve dosis door toepassing van niet-nucleaire technologieën, die alleen al voor Nederland ca. 5000 menssievert per jaar bedraagt. Het milieu-aspect kan daarom geen reële basis vormen voor een keuze tussen beide opties.

4. PROLIFERATIE-RISICO'S

4.1 Inleiding

Bij het vergelijken van de twee alternatieven voor het back-end van de splijtstofkringloop voor de Nederlandse kerncentrales moet men zeker ook aandacht schenken aan de proliferatie-risico's. Gebruikte splijtstofelementen bevatten splijtbaar materiaal, in het bijzonder ^{239}Pu, dat voor kernwapens te gebruiken is. In de afweging tussen beide routes moet daarom worden geanalyseerd hoe groot de kans is dat het "Nederlandse" plutonium gebruikt wordt voor de fabricage van kernwapens, ongeacht of dat door kernwapenstaten of anderen wordt gedaan. Na een inleiding over de maatregelen tegen proliferatie van kernwapens zal nader worden ingegaan op de verschillen in proliferatie-risico tussen een kringloop met en één zonder opwerking.

1. Het Non-proliferatie Verdrag
Het door 185 staten getekende Non-Proliferatie Verdrag (NPV), dat in 1970 van kracht werd, erkent vijf kernwapenstaten (de Verenigde Staten, Rusland, Groot-Brittannië, Frankrijk en China) en plaatst alle nucleaire activiteiten van de toegetreden niet-kernwapenstaten onder IAEA controle. In de praktijk houdt dit een streng gereglementeerde controle in op al het kerntechnische materiaal.

In de begintijd van het NPV overheerste bezorgdheid dat ruim twintig technisch geavanceerde landen, waaronder Argentinië, Duitsland, Japan, Nederland, Spanje, en Zweden, een kernwapen programma zouden opzetten. Tegenwoordig betreft die bezorgdheid overwegend landen die door hun gedrag, bijvoorbeeld steun aan terrorisme, die verdenking op zich laden. Hoewel de controles niet volmaakt zijn, is het voor de geïnspecteerde staten wel steeds moeilijker geworden kernwapenactiviteiten verborgen te houden. In het kader van de versterking van het splijtstofbewakingsstelsel wordt nu overeenstemming bereikt over ruimere bevoegdheden en toegangsregels voor het IAEA.

In de periode 1977-1979 is in Wenen bovendien het verdrag op het gebied van de beveiliging van kerntechnisch materiaal opgesteld. Daarmee is een basis gelegd voor samenwerking tussen de staten om smokkel en diefstal van splijtbaar materiaal tegen te gaan. Dat is vooral moeilijk door de grote verscheidenheid van staten en hun wetgeving en rechtspraak.

2. De Nuclear Suppliers Guidelines
In aanvulling op het NPV zijn de Nuclear Suppliers Guidelines (NSG) tot stand gekomen. Vrijwel alle belangrijke landen die nucleaire technologie exporteren houden zich aan deze richtlijnen en eisen IAEA-splijtstofbewaking op alle nucleaire activiteiten in het ontvangende land, stellen restricties aan export van het geleverde naar andere landen, en eisen een voldoende niveau van beveiliging. Verder betrachten zij terughoudendheid bij gevoelige leveranties en volgen zij wat er aan welke landen wordt geleverd, om afwijkend gedrag snel te kunnen signaleren. Recent zijn de NSG aangevuld met lijsten van materialen en apparatuur die zowel voor nucleaire als voor niet-nucleaire activiteiten kunnen worden gebruikt ("dual use"-goederen). De NSG zijn in 1984 bindend geworden voor de hele EU.

3. Euratom
Volgens het Euratom-verdrag vallen alle nucleaire activiteiten van de aangesloten EU-landen onder de Euratom splijtstofbewaking. De bevoegdheden van Euratom gaan verder dan het Statuut van het IAEA en de inspectieregels die uit het NPV zijn voortgekomen. Het Euratom-verdrag kent slechts één uitzondering, namelijk voor kernmateriaal dat landsverdedigingsdoeleinden dient. Nu Frankrijk en Groot-Brittannië officieel hebben

verklaard geen splijtstof voor kernwapens meer te zullen produceren, zullen de opwerkingsinstallaties in deze landen ook onder de splijtstofbewaking vallen. Een belangrijk aspect van het Euratom-verdrag is dat het ontwerp en de bouw van de installaties voor opwerking door het Euratom-inspectoraat moeten worden goedgekeurd. Ook hebben Euratom-inspecteurs op grond van het verdrag te allen tijde toegang tot alle plaatsen en alle informatie welke nodig is voor de doeleinden van de inspectie. Deze regelingen maken een goede controle mogelijk. Het Euratom-inspectoraat streeft er naar permanent aanwezig te zijn als een opwerkingsfabriek in werking is. Dit geldt dus ook wanneer de Nederlandse splijtstof in Groot-Brittannië en Frankrijk wordt opgewerkt.

4.2 Non-proliferatie en opwerking

In een splijtstofkringloop met opwerking en hergebruik komt plutonium voor als zuiver oxide en als verse MOX-splijtstofelementen. Dat zijn uit oogpunt van proliferatie de meest gevoelige stappen. Voor de volledigheid worden voor alle afzonderlijke processtappen de inspecties en metingen beschreven die tegenwoordig routinematig worden uitgevoerd en die in hun volle omvang ook gelden voor de splijtstofelementen uit de Nederlandse kerncentrales.

Transport
Een voorgenomen transport van splijtstofelementen van de reactor naar de opwerkingsfabriek wordt zowel door de reactorbedrijver als door de opwerkingsfabriek aan de inspectoraten aangemeld. Aan de hand van deze dubbele melding èn bij controles in de opwerkingsfabriek kunnen de inspecteurs van IAEA of EURATOM vaststellen of onderweg onregelmatigheden (bijvoorbeeld verwisseling van splijtstofelementen) hebben plaatsgevonden. De opslagbassins, waarin de splijtstofelementen bij de opwerkingsfabriek worden geplaatst, staan onder controle van Euratom en IAEA. Videobewaking van het bassin geeft voldoende zekerheid dat de splijtstof niet anders wordt getransporteerd dan door de bedrijfsleiding wordt opgegeven.

Opwerking
Bij de opwerkingsfabrieken wordt de splijtstof continu bewaakt. Bij de nieuwste grote opwerkingsfabrieken voldoet deze continue splijtstofbewaking aan stringentere eisen dan bij de oudere installaties. Bovendien wordt tegenwoordig gebruik gemaakt van een aantal nieuwe meetmethoden en -instrumenten. Ondanks de veel grotere schaal moet de splijtstofbewaking bij de nieuwste opwerkingsfabrieken nog steeds in kwantitatief opzicht voldoen aan de criteria die vroeger voor de kleinere fabrieken zijn opgesteld. Dit betekent onder andere dat een verschil in de materiaal-balans van meer dan 8 kg plutonium per jaar tot een alarm leidt.

Tijdens de opwerkingscampagne zien de inspecteurs er op toe dat de juiste splijtstofelementen worden opgelost, en dat niets aan het proces wordt onttrokken. In THORP hanteert men drie van elkaar onafhankelijke en nauwkeurige technieken voor de bepaling van de hoeveelheid uranium en plutonium in de gekalibreerde invoertank die de oplossing van splijtstof en splijtingsproducten bevat. In THORP en UP3 zijn ook de resultaten van metingen in het procesgebied direct voor de splijtstofbewaking beschikbaar. De niet-opgeloste hulzen van de splijtstof, die als afval worden afgevoerd, worden gecontroleerd op de kleine hoeveelheid splijtstof die langs die weg aan het proces en daarmee aan verdere inspectie kan ontsnappen.

Het belangrijkste is echter de meting van de ingevoerde en de afgevoerde hoeveelheden gedurende de opwerkingscampagne. Door regelmatige vergelijking van de ingevoerde en de afgescheiden hoeveelheid plutonium, waarbij rekening wordt gehouden met de kleine hoeveelheden plutonium in de afvalstromen, is het mogelijk over de gehele campagne waarmee 10 ton plutonium gemoeid is een boekhoudkundige discrepantie van 6,3 kg Pu

met 95% zekerheid te ontdekken. Voor de plutoniuminventaris in het proces, die honderden kilogrammen omvat, geldt met dezelfde techniek een standaarddeviatie van 2 kg. Met deze evaluatiemethode kan men ook geleidelijke onttrekking van kleine hoeveelheden per keer ontdekken.
Na afloop van de campagne wordt het inwendige van de opwerkingsfabriek schoongemaakt, de zogenaamde "clean out", waarbij alle gevonden splijtstof wordt gemeten. Deze jaarlijkse balans vormt een additionele maat voor de splijtstofbewaking. In de praktijk heeft de materiaal-balans in UP3 een totale MUF-waarde ("material unaccounted for") een onzekerheid van 0,3% [10].

Het gezuiverde plutoniumoxide wordt in porties van enkele kilogrammen opgeborgen in drievoudig afgesloten verzegelde vaten. Voordat de vaten worden gesloten wordt de hoeveelheid plutonium nauwkeurig bepaald. De opslagplaats wordt bewaakt. Met niet-destructieve meetmethoden kan de hoeveelheid plutonium in het verzegelde vat worden geverifieerd. De standaarddeviatie is ca. 1 procent, dat wil zeggen iets minder nauwkeurig dan vóór de sluiting van het vat.

Naast veelvuldige controle van de hoeveelheden plutonium in het proces geven de fysieke insluiting en het toezicht op de strategische punten in het bedrijf extra zekerheid dat geen materiaal langs andere dan de normale weg aan het proces wordt onttrokken en de fabriek verlaat. De resultaten van insluiting en toezicht zijn echter niet direct in hoeveelheden plutonium uit te drukken.

De plutoniumboekhouding
Van opgewerkt plutonium valt op grond van fysische en chemische kenmerken niet te bepalen van wie het afkomstig is. Daarom wordt het opgewerkte plutonium aan de eigenaars toegedeeld naar rato van de aangeboden hoeveelheden. Om voldoende zekerheid te hebben dat de toegedeelde hoeveelheid plutonium juist is, zullen de reactorbedrijvers in eerste instantie zelf nauwkeurig moeten bepalen hoeveel plutonium zij naar de opwerkingsfabrieken sturen. Dat doen zij door berekening van de opbrand van de splijtstof. In samenwerking met de opwerkingsinstallatie toetsen zij in een nauwkeurig uitgevoerd experiment de resultaten van deze opbrandberekeningen aan de resultaten van de massa-spectrometrische plutoniumbepaling aan de monsters die worden genomen aan de ingang van het opwerkingsproces. Indien wordt gewerkt volgens de beste (IAEA) internationale standaarden, waartoe de opwerkingsfabrieken verplicht zijn, is de totale relatieve onzekerheid in deze bepaling minder dan 1%.

In het laatste contract van EPZ met COGEMA en het contract van GKN met BNFL, gesloten in een tijd dat de betreffende opwerkingsfabrieken (UP3 en THORP) nog niet gereed en de scheidingsefficiënties nog niet bekend waren, worden marges toegelaten die nu niet meer relevant zijn, omdat inmiddels de onzekerheden van de bedrijfsmetingen sterk verminderd zijn en de controle op die meetresultaten van Euratom en de IAEA (voor zover dat laatste van toepassing is) sterk verbeterd.

Hergebruik van plutonium
In de vorige sectie is beschreven op welke manieren het onttrekken van plutonium aan het opwerkingsproces kan worden gesignaleerd. Bij de fabricage van MOX-splijtstofelementen bestaat een vergelijkbaar scherp toezicht door IAEA en EURATOM. Na de fabricage van de splijtstofelementen is het proliferatie-risico sterk verminderd in verband met de grote massa en de afmetingen van de splijtstofelementen en de eenvoudige controle op de aanwezigheid van deze elementen.

Het Nederlandse plutonium zal waarschijnlijk worden verkocht voor gebruik in MOX-splijtstofelementen voor electriciteitsopwekking in het buitenland. Het zal in dat geval niet naar Nederland terugkomen.

4.3 Non-proliferatie en opslag zonder opwerking

In het geval van opslag zonder opwerking blijft het plutonium vermengd met een onaantrekkelijk grote massa sterk radioactieve materialen. Het plutonium uit de onopgewerkte splijtstofelementen zijn in principe te gebruiken voor het fabriceren van kernwapens, zij het alleen wanneer men over een complete opwerkingsinstallatie beschikt. Dat maakt ook voor deze onopgewerkte elementen een zorgvuldige registratie en bewaking noodzakelijk. Dit geldt tijdens de transporten en gedurende de opslagperiode, zowel de tijdelijke opslag als de interimopslag als, na ca.100 jaar interimopslag, de eindberging. De definitief opgeborgen splijtstofelementen moeten permanent worden bewaakt. De eis dat de splijtstofelementen uit de eindberging terughaalbaar zijn werkt enigszins in het nadeel van de non-proliferatie: op de lange termijn kan het plutonium in deze elementen toch interessant worden voor het maken van kernwapenmateriaal en garanties voor een permanente goede beveiliging en bewaking kunnen momenteel niet worden gegeven.

4.4 Conclusies ten aanzien van de proliferatierisico's

De resultaten van de vergelijking van de proliferatierisico's voor Route 1 en Route 2 kunnen als volgt worden samengevat:

1. Institutionele belemmeringen (NPV, NSG, EURATOM) maken het zeer moeilijk om plutonium onopgemerkt aan het opwerkingsproces te onttrekken hoewel het in diverse stadia van het proces in een vorm voorkomt die voor misbruik aantrekkelijk is. Wanneer geen opwerking wordt toegepast is dat in zeer veel mindere mate en pas na zeer lange tijd het geval.

2. Opwerking en hergebruik vereisen een uiterst zorgvuldige boekhouding, nauwkeurige meettechnieken en -instrumenten, registratie en bewaking. De bestaande verdragen en de georganiseerde internationale inspecties leveren nu een vergaande beveiliging op tegen misbruik van plutonium. De kans dat het uit Nederlandse splijtstof afgescheiden plutonium voor kernwapens wordt misbruikt moet dan ook als zeer klein worden beschouwd. Voor de toekomst is dat echter niet te garanderen.

3. Ingeval geen opwerking wordt toegepast, beschermen de splijtstofelementen zichzelf aanvankelijk tegen diefstal. Op de lange duur wordt deze zelfbescherming minder effectief. Ook in dit geval kunnen daarom inspectie en bewaking niet worden gemist.

5. DE KOSTEN

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal op de kostenverschillen tussen route 1 en route 2 worden ingegaan. De vraagstelling is hier eenvoudiger dan bij de milieu-aspecten en het proliferatie-risico. Er is immers uiteindelijk geen afweging nodig tussen verschillende effecten van verschillende zwaarte: alles kan hier bij wijze van spreken worden uitgedrukt in één getal, de kosten voor een concrete handeling[7]. Toch is het antwoord op de vraag naar de kosten niet gemakkelijker.

De kosten van de route met opwerking liggen grotendeels vast. Voor de opwerking en de interim opslag zijn contracten afgesloten en zijn de kosten bij de betrokken partijen, de bedrijvers van de beide kerncentrales, bekend. De getallen zijn echter niet openbaar. Voor de route van opslag zonder opwerking zijn daarentegen faciliteiten vereist waarvan men ten hoogste een globaal en voorlopig kostenbeeld. Dat betreft in het bijzonder de conditionering van de splijtstofelementen. Een tweede belangrijke onzekerheid van opslag zonder opwerking is het feit dat contractueel is vastgesteld dat de betreffende elementen zullen worden opwerkt. Verwacht moet worden dat het openbreken van de opwerkingscontracten geld kost. De hoogte van het bedrag moet worden geschat aangezien de contracten niet openbaar zijn. Meer dan het aangeven van een kostengebied, begrensd door het resultaat van een optimistische schatting enerzijds en een pessimistische anderzijds, is dus niet mogelijk.

De berekening van de kosten is gebaseerd op gegevens uit de openbare literatuur aangevuld met schattingen daar waar de vereiste gegevens niet openbaar zijn. De voornaamste openbare bronnen zijn de internationale onderzoeken die recent zijn uitgevoerd naar de kosten van de splijtstofkringloop. De meest gezaghebbende studie werd in 1994 door de NEA gepubliceerd [11]. Daarnaast is onlangs in Duitsland een uitgebreide analyse uitgevoerd naar de kosten van de 'back-end' opties van de splijtstofkringloop voor de Duitse kerncentrales [12].

In het NEA-onderzoek zijn berekeningen gedaan voor een <u>nieuw</u> te bouwen 1400 MW_e kerncentrale. Dat betekent dat de kosten die met het 'back-end' van de splijtstofkringloop samenhangen worden gespreid over de hele operationele levensduur (30 jaar) van de centrale. Verder worden in de NEA studie marginale kosten berekend: er wordt aangenomen dat de nieuwe kerncentrale deel uitmaakt van een groot 'reactor park', waardoor de bouw- en bedrijfskosten van de installaties die nodig zijn voor het 'front-end' en het 'back-end' van de splijtstofkringloop over een aantal kerncentrales worden verdeeld. De algemene conclusie van de NEA studie is dat opwerking iets duurder is dan directe opslag.

De actuele Nederlandse situatie veschilt echter aanzienlijk van die welke als basis voor de NEA-studie werd aangenomen. Het gaat in Nederland immers over een deel van de splijtstofelementen uit slechts twee kerncentrales. Alle kosten van eventuele additionele installaties drukken volledig op deze elementen. Bovendien hebben de Nederlandse kerncentrales contracten met opwerkingsbedrijven, die eventueel opengebroken moeten worden. Dit zal ongetwijfeld extra kosten met zich meebrengen die in NEA-scenario's niet voorkomen.

Ook de Duitse studie is niet zonder meer te gebruiken. Door de vrij grote omvang van het

---

[7] Het is wel van groot belang hier onderscheid te maken tussen de nominale waarde en contante waarde.

in Duitsland opgestelde kernenergievermogen spelen ook daar schaalvoordelen een rol (bijv. met betrekking tot de conditioneringskosten). Nederland profiteert bij de opwerking ook van schaalvoordelen in Frankrijk en Engeland maar bij conditionering zijn zulke voordelen onzeker. Daarnaast is het onzeker of de Duitse gegevens met betrekking tot de kosten van annulering van opwerkingscontracten geldig zijn voor de Nederlandse situatie. Deze kosten zijn namelijk afhankelijk van het tijdstip van annulering.

Uit het bovenstaande blijkt dat een vergelijking tussen de kosten van de beide routes niet uitsluitend met behulp van gegevens in de open literatuur kan worden gemaakt.
De benodigde gegevens zijn immers slechts in beperkte mate openbaar en dan nog slechts beperkt bruikbaar voor het doel van dit rapport. Om niettemin aan de opdracht van het Ministerie van Economische Zaken te voldoen en enige vorm van kostenvergelijking tussen beide routes te maken, was het noodzakelijk bepaalde gegevens te schatten of aan te nemen.

ECN heeft deze schattingen en aannames niet afgeleid uit vertrouwelijke gegevens en zulke gegevens kunnen dan ook niet uit die schattingen en aannames worden afgeleid. Kostenschattingen worden doorgaans pas betrouwbaar nadat de uit te voeren werkzaamheden en de daarvoor benodigde middelen, locaties, vergunningsvoorwaarden etc. volledig in kaart zijn gebracht en op basis daarvan offertes en begrotingen beschikbaar zijn. Om dit stadium te bereiken zal veel meer werk en studie moeten worden geïnvesteerd. De kostenschattingen voor route 2 zijn gebaseerd op de beste schattingen voor nog niet gerealiseerde projecten elders. Deze uitgangsgegevens zijn voor de analyse van dit rapport voldoende nauwkeurig.

5.2 Kosten van opslag zonder opwerking

In zijn eenvoudigste vorm zouden in deze route de gebruikte splijtstofelementen, uiteraard goed verpakt, in hun geheel moeten worden opgeslagen. Het huidige ontwerp van het HABOG is echter niet geschikt voor het ontvangen en opslaan van gebruikte splijtstofelementen van de kerncentrales Borssele en Dodewaard. Wordt route 2 gekozen dan zou of dit ontwerp moeten worden aangepast of een aparte opslagfaciliteit moeten worden gebouwd. Bovendien zijn er voorzieningen nodig om de splijtstof gereed te maken voor de eindopberging (het conditioneren of verpakken van de elementen). In wezen wordt bij deze route 2 de gehele opwerkingsstap vervangen door de conditioneringsstap. Dit is technisch een minder gecompliceerde stap dan opwerking maar er is wel een gespecialiseerde installatie voor nodig.

Eén mogelijkheid is dat Nederland een eigen conditioneringsfaciliteit bouwt. In principe zou men die conditioneringsfaciliteit kunnen combineren met de opslagfaciliteit. Dit is niet waarschijnlijk omdat enerzijds de opslagfaciliteit op korte termijn gereed moet zijn en anderzijds eerst nog zorgvuldig zal moeten worden onderzocht aan welke eisen de geconditioneerde en verpakte gebruikte splijtstofelementen moeten voldoen, en dus ook welke eisen aan de conditioneringsfaciliteit worden gesteld. Een mogelijk alternatief is dat Nederland gebruik maakt van een conditioneringsfaciliteit in het buitenland. Er zijn op dit moment geen commerciële conditionerings-faciliteiten in bedrijf, maar wel worden in onder andere Duitsland en Zweden conditionerings-technieken ontwikkeld (zie Hoofdstuk 2). Het zal waarschijnlijk alleen mogelijk zijn gebruik te maken van een faciliteit in het buitenland wanneer een 'internationale' conditionerings-industrie (analoog aan de bestaande opwerkingsindustrie) tot stand komt. Het ziet er hoe dan ook naar uit dat de opslag van ongeconditioneerde splijtstofelementen in afwachting van het gereedkomen van een conditioneringsfaciliteit vrij langdurig, en daarmee relatief kostbaar, zal zijn.

Het is in wezen onmogelijk de kosten die zouden voortvloeien uit de benodigde conditioneringsfaciliteiten met enige nauwkeurigheid te schatten. Details over hoe zulke faciliteiten er uit moeten zien ontbreken immers volledig. Evenmin zijn de eisen bekend

die de Nederlandse overheid zou stellen aan directe opslag. Wel kan door het analyseren van een aantal scenario's een beeld worden gevormd van de relatieve hoogte van de kosten van een route met opwerking ten opzichte van die zonder opwerking. Dit wordt in de twee volgende paragrafen gedaan. Alhoewel de conclusies van bovengenoemde NEA-studie en van de Duitse studies niet direct van toepassing zijn op de Nederlandse situatie, kan een deel van de gegevens in deze studies worden gebruikt bij de huidige analyse. In paragrafen 5.3 en 5.4 worden een aantal scenario's gedefinieerd voor respectievelijk de KCB en de KCD. In paragraaf 5.5 worden deze scenario's geëvalueerd.

Indien in de toekomst in Nederland tot "uitgestelde opwerking" zou worden besloten, hetgeen wil zeggen dat nu besloten wordt route 2 te volgen maar later alsnog wordt overgeschakeld op route 1 (wat technisch in beginsel mogelijk is), dan zal dit leiden tot extra kosten. Met deze optie is in de scenario's geen rekening gehouden.

5.3 Scenario's voor de kerncentrale Borssele

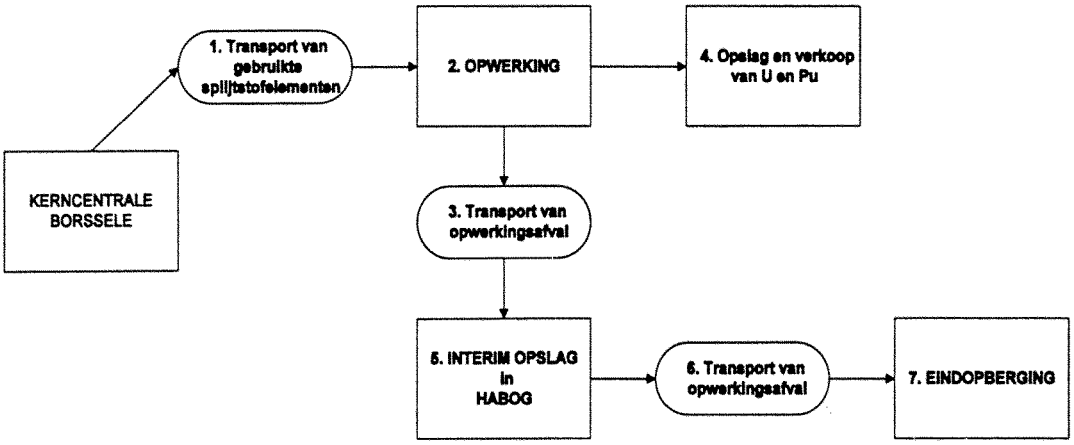
Zoals in 2.6 is vermeld heeft EPZ drie opwerkingscontacten gesloten met COGEMA. In deze studie is alleen rekening gehouden met het openbreken van het laatste contract (contract III), dat betrekking heeft op circa 155.000 kg uranium waarvan reeds een deel (de splijtstofelementen die in 1993, 1994 en 1995 werden ontladen) naar Frankrijk is afgevoerd.

Bovenstaande beschouwing leidt tot de volgende twee scenario's: in scenario 1 is aangenomen dat het laatste opwerkingscontract tussen EPZ en COGEMA wordt gehonoreerd (= route 1). In scenario 2 is aangenomen dat het laatste opwerkingscontract tussen EPZ en COGEMA wordt geannuleerd (= route 2). Omdat er verschillende mogelijkheden zijn na het annuleren van het opwerkingscontract worden twee versies van scenario 2 gedefinieerd: scenario's 2a en 2b.

In scenario 2a wordt aangenomen dat de gebruikte splijtstofelementen worden opgeslagen en geconditioneerd in twee nieuw te bouwen faciliteiten in Nederland. Daarnaast worden de annuleringskosten van het opwerkingscontract gelijkgesteld aan de maximale boete in een standaard COGEMA contract [11]. Weliswaar is het bij het onmiddellijk (medio 1997) openbreken van het contract onwaarschijnlijk dat EPZ de maximale boete zou moeten betalen, maar als het contract pas over een jaar of nog later zou worden opengebroken zou de te betalen boete tot het maximum kunnen oplopen. Scenario 2a geeft dan ook een pessimistische schatting van de kosten voor route 2.

In scenario 2b wordt aangenomen dat Nederland van een conditioneringsfaciliteit in het buitenland gebruik kan maken. Daarnaast worden de annuleringskosten gelijk gesteld aan het gemiddelde van de minimale en de maximale boete in een standaard COGEMA contract [13]. Scenario 2b geeft derhalve een wat meer optimistische schatting van de kosten voor route 2.

De kostenschattingen voor alle scenario's zijn gemaakt op basis van openbare informatie. De kosten van het scenario voor route 1 liggen grotendeels vast door afgesloten contracten, waardoor de onzekerheid gering is. Over de kosten voor de verschillende onderdelen van scenario's 2a en 2b is op dit moment echter veel minder bekend. Zij zouden als gevolg van ontwikkelingen in de regelgeving en de technologie zowel hoger als lager kunnen worden. De aannames die gebruikt worden bij het analyseren van de drie scenario's voor de KCB zijn in de subparagrafen hieronder beschreven.



Figuur 5.1: *Scenario 1*

5.3.1 Scenario 1

Scenario 1 komt overeen met de huidige situatie. Voor dit scenario kan een zevental stappen - d.w.z. kostenposten - worden gedefinieerd. Deze stappen zijn weergegeven in Figuur 5.1.

Hieronder volgt een korte toelichting op de kostengegevens die voor elke van deze stappen zullen worden gebruikt. Deze gegevens zijn in Tabel 5.1 samengevat.

1: *Het transport van de gebruikte splijtstofelementen van de kerncentrale te Borssele naar de opwerkingsfabriek in Frankrijk.*
De kosten van deze transporten zijn gebaseerd op de gegevens uit het NEA-rapport. Zij kunnen als representatief worden beschouwd voor transporten binnen Europa. Verder wordt er rekening mee gehouden dat de splijtstofelementen die in 1993, 1994 en 1995 werden ontladen al naar Frankrijk zijn getransporteerd.

2: *Het opwerken van de splijtstofelementen.*
De tekst van het opwerkingscontract dat EPZ met COGEMA heeft afgesloten is niet openbaar. De kosten die samenhangen met deze fase van de Nederlandse splijtstofkringloop worden daarom geschat op basis van andere bronnen. In deze studie is de opwerkingsprijs uit het standaardcontract van COGEMA gehanteerd.

3: *Het transport van het verglaasd afval en overig opwerkingsafval van de opwerkingsfabriek naar Nederland.*
Een beperkt aantal transporten (in vergelijking met het transport van gebruikte splijtstofelementen) zal nodig zijn om het opwerkingsafval terug te halen uit Frankrijk. Bovendien zullen deze transporten op zijn vroegst pas 10 jaar na het ontladen van de splijtstof uit de reactorkern plaatsvinden. Deze kostenpost zal nauwelijks bijdragen aan de totale kosten.

4: *Het opslaan en de eventuele "verkoop" van het plutonium en het uranium (REPU) die in de opwerkingsfabrieken wordt afgescheiden van de gebruikte splijtstof.*
Het toenemende wereldwijde overschot aan plutonium en de hoge kosten die verbonden zijn aan de fabricage van MOx-splijtstof, betekenen dat dit afgescheiden plutonium momenteel een negatieve marktwaarde heeft. Er wordt hier aangenomen dat EPZ 30 NLG/gPu op de verkoop zal moeten toeleggen (ECN schatting). Het uranium zal wel een positieve marktwaarde hebben: in deze studie is aangenomen dat de prijs van

het REPU de helft is van die van natuurlijk uranium. Verder is voor deze analyse aangenomen dat in de opwerkingsprijs ook de kosten van de korte termijn opslag van het uranium en het plutonium begrepen zijn.

5: *De tijdelijke opslag van hoogradioactief opwerkingsafval in het HABOG.*
De bouw- en bedrijfskosten van het HABOG zullen worden verdeeld over de twee Nederlandse kerncentrales en de Nederlandse onderzoeksreactoren. De bouwkosten van het HABOG zullen circa 240 miljoen gulden bedragen. De bedrijfskosten worden op enkele miljoenen guldens per jaar geschat. Ook bij het openbreken van het laatste opwerkingscontract zal het HABOG nodig zijn omdat circa de helft van de Nederlandse splijtstof al is opgewerkt. De kosten van het HABOG zullen in alle scenario's praktisch even groot zijn en zij worden daarom in de kostenvergelijking van de verschillende scenario's niet meegenomen.

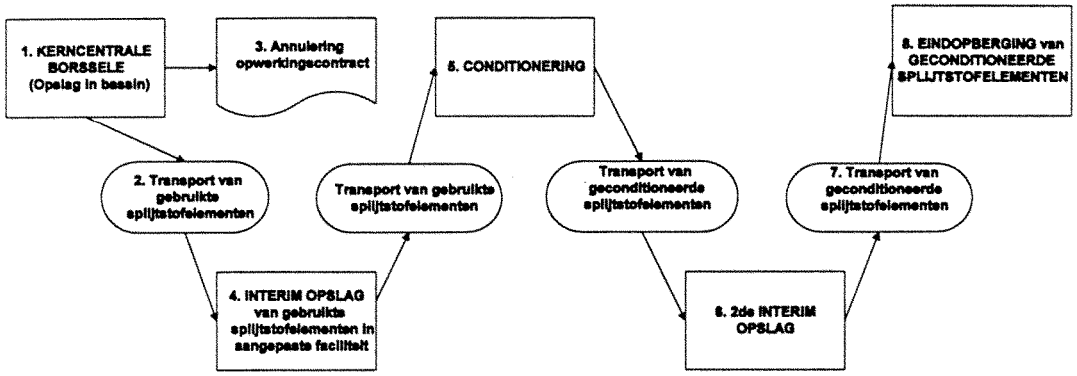
6: *Het transport van het afval naar de eindopbergingsfaciliteit.*
Er zal een beperkt aantal transporten nodig zijn om het afval naar de eindopbergingsfaciliteit te brengen. Deze transporten zullen pas over circa 100 jaar plaatsvinden. Deze kostenpost zal nauwelijks aan de totale kosten bijdragen en is in deze studie niet meegenomen.

7: *Eindopberging van het hoogradioactief afval.*
In de laatste decennia zijn enige studies uitgevoerd naar de kosten van een eindopbergingsfaciliteit voor het hoogradioactieve afval. De kostenramingen lopen uiteen van circa 500 miljoen tot circa 2 miljard gulden (prijspeil van begin jaren negentig). Vanzelfsprekend zijn deze ramingen niet meer dan een eerste indicatieve verkenning: de realisatie van een dergelijke faciliteit zal pas over circa honderd jaar plaatsvinden.Volgens de huidige inzichten zullen deze kosten door EPZ, GKN en de eigenaren van de Nederlandse onderzoekreactoren worden betaald. ECN schat het aandeel van EPZ op 65%.

In een recente ECN-studie [13] zijn de kosten geschat van eindopbergingsfaciliteiten voor twee soorten afval, namelijk verglaasd afval en gebruikte splijtstof. De geschatte kosten van de faciliteiten voor beide soorten afval liggen relatief dicht bij elkaar: de kosten van een faciliteit voor uitsluitend gebruikte splijtstof liggen gemiddeld 25% hoger dan de kosten van een faciliteit voor verglaasd afval. De kosten van een gecombineerde eindopbergingsfaciliteit voor beide soorten afval zal waarschijnlijk niet veel afwijken van die voor uitsluitend gebruikte splijtstof. Omdat naar verwachting de nominale kosten van eindopberging voor elk van de drie scenario's voor de KCB ongeveer gelijk zijn, worden zij verder buiten beschouwing gelaten.
Uitgaande van een reële rente van 4% per jaar is een bedrag van 2 miljard gulden (prijspeil 2000) in het jaar 2100 met een reservering van 40 miljoen gulden in het jaar 2000 op te bouwen. De kosten van eindopberging leveren dus geen belangrijke bijdrage aan de contante waarde van de kosten van de drie scenario's.

Tabel 5.1: *Gegevens voor scenario 1*

Kostenpost	Kosten (prijspeil 1997)	Tijdstip
Transport	125 NLG/kgU	ontladen + 1 jaar
Opwerking	2225 NLG/kgU	ontladen + 7 jaar
Verkoop Pu	-30.000 NLG/kgPu	2011
Verkoop REPU	55 NLG/kgU	2011



Figuur 5.2 Scenario 2

Figuur 5.2: *Scenario 2*

5.3.2 Scenario 2

Van route 2, opslag van de nog onopgewerkte splijtstofelementen van de KCD zijn twee varianten bekeken, namelijk één met een pessimistische schatting van een aantal kostenposten (scenario 2a), de ander met een wat optimistischer schatting van deze kosten (scenario 2b). De stappen zelf zijn in beide scenario's gelijk. Zij zijn weergegeven in Figuur 5.2.

5.3.2.a Scenario 2a

Scenario 2a is de versie van route 2 met relatief hoge kosten. De splijtstof wordt opgeslagen en geconditioneerd in twee speciaal daartoe nieuw te bouwen faciliteiten in Nederland. De annuleringskosten van het opwerkingscontract zijn gelijk gesteld aan de maximale boete in een standaard COGEMA contract.
Hieronder volgt een toelichting op de kosten van elk van deze stappen. Deze gegevens zijn in Tabel 5.2 samengevat.

1: *Het uitbreiden van de capaciteit van het opslagreksysteem in het opslagbassin van de KCB.*
Deze uitbreiding is nodig omdat een geschikte centrale opslagfaciliteit momenteel ontbreekt. Indien alle opslagrekken als compact-rekken worden uitgevoerd zal de capaciteit van het opslagsysteem voldoende zijn om alle gebruikte splijtstof uit de periode 1996 tot 2004 op te slaan. Aangenomen wordt dat de kosten van de additionele compactrekken 10 miljoen NLG zullen bedragen (ECN schatting). De splijtstofelementen die nu al in Frankrijk liggen, zouden daar moeten blijven tot de interim opslagfaciliteit gereed is, omdat er onvoldoende ruimte voor opslag in het bassin van KCB voor bestaat. COGEMA zal EPZ hiervoor kosten in rekening brengen. Deze kosten zullen, gezien het kleine aantal splijtstofelementen, relatief laag zijn. Zij zijn in deze studie niet meegenomen.

2: *Het transport van de gebruikte splijtstofelementen van de KCB naar de tijdelijke opslagfaciliteit.*
In de toekomst zullen de gebruikte splijtstofelementen van de KCB direct naar de tijdelijke opslagfaciliteit worden gebracht. Daarnaast zullen de splijtstofelementen die momenteel, in afwachting van opwerking, bij de opwerkingsinstallatie aanwezig zijn, teruggebracht moeten worden naar Nederland. De kosten per kg zullen dezelfde zijn als voor scenario 1. De kostenspreiding in de tijd zal echter anders zijn.

3: *Kosten annulering opwerkingscontract.*
Het opzeggen van het opwerkingscontract zal financiële consequenties hebben: d.w.z. er zal een "boete" aan COGEMA moeten worden betaald. De hoogte van deze annuleringskosten is afhankelijk van het tijdstip van annulering [12]. In dit scenario wordt aangenomen dat de annuleringskosten gelijk zijn aan de maximale boete in een standaard COGEMA contract, wat neerkomt op 95% van de totale opwerkingskosten. Er is van uitgegaan dat deze kosten in 1998 betaald zullen moeten worden.

4: *Tijdelijke opslag van de splijtstofelementen.*
Omdat het ontwerp van het HABOG niet geschikt is voor het ontvangen en opslaan van gebruikte splijtstofelementen van de Kerncentrale Borssele moet of dit ontwerp worden aangepast, of een aparte faciliteit worden gebouwd. De bouwkosten van een aangepast HABOG zullen hoger zijn dan die van het huidige ontwerp en bovendien moeten in dat geval de tot nu toe voor het HABOG gemaakte kosten (circa 50 miljoen gulden) voor een groot deel worden afgeschreven. Voorts zullen waarschijnlijk additionele opslagkosten aan de opwerkingsinstallaties moeten worden betaald ('vertragingskosten'). In deze analyse is aangenomen dat de meerkosten van een aangepast HABOG gelijk zullen zijn aan die van een nieuw te bouwen faciliteit voor opslag van gebruikte splijtstofelementen. ECN schat deze kosten op 200 miljoen NLG

5: *Conditioneren van de splijtstofelementen.*
Voor dit scenario wordt aangenomen dat Nederland een eigen conditioneringsfaciliteit bouwt bij COVRA. Een nauwkeurige schatting van de kosten van een dergelijke faciliteit is op dit moment niet mogelijk. ECN schat deze kosten op 500 miljoen NLG. Om deze schatting te maken is gekeken naar de hoogste conditioneringskosten in de Duitse studie [12] en naar de kostenschatting voor de Zweedse faciliteit. Aangenomen is verder dat deze kosten pas in 2030 zullen worden gemaakt.

6: *Tweede periode van tijdelijke opslag.*
Na de conditionering van de splijtstofelementen worden deze opgeslagen totdat zij naar de eindopbergingsfaciliteit kunnen worden gebracht. Er is aangenomen dat deze opslag in dezelfde faciliteit plaatsvindt als vóór de conditionering.

7: *Transport naar de eindopbergingsfaciliteit.*
Deze kosten zullen evenmin als in scenario 1 een rol spelen en zij zijn derhalve niet meegenomen.

8: *Eindopberging van het hoogradioactief afval.*
Er is aangenomen dat de kosten van de eindopbergingsfaciliteit voor dit scenario gelijk zullen zijn aan die voor scenario 1.

Tabel 5.2: *Gegevens voor scenario 2a*

Kostenpost	Kosten (prijspeil 1997)	Tijdstip
Compact-rekken	10 miljoen NLG	1998
Transport	125 NLG/kgU	verscheidene
Opwerking: boete	2115 NLG/kgU	1998
Tijdelijke Opslag	200 miljoen NLG	1998 - 2002
Conditionering	500 miljoen NLG	2030

5.3.2b Scenario 2b

Scenario 2b verschilt van scenario 2a op de volgende punten:

1: *Kosten annulering opwerkingscontract.*
Er is aangenomen dat de annuleringskosten 55% van de totale opwerkingskosten bedragen (zie bladzijde 33).

2: *Conditioneren van de splijtstofelementen.*
Aangenomen is dat Nederland van een verpakkings- en conditioneringsfaciliteit in het buitenland gebruik maakt: de kosten voor het conditioneren worden geschat op 155 miljoen NLG. Deze schatting is gebaseerd op de laagste conditioneringskosten in de Duitse studie - circa 1000 NLG/kgU (prijspeil 1997) [12]. De werkelijke conditioneringskosten voor de splijtstofelementen uit de KCB kunnen echter zowel hoger of lager uitvallen.
Aan de ene kant zal EPZ waarschijnlijk een bijdrage moeten betalen aan de ontwikkelingskosten van de verpakkings-/conditioneringstechnologie. Daarnaast zal de eigenaar van deze faciliteit een winstmarge berekenen. Deze kosten zijn niet in bovengenoemde schatting meegenomen. Aan de andere kant zouden de conditionerings-kosten als resultaat van technologische ontwikkelingen lager kunnen uitvallen.

3: *Het transport van en naar de conditioneringsfaciliteit.*
Voor deze transporten zijn dezelfde kosten per kg aangenomen als voor de andere transporten. De transporten zullen pas in 2030 plaatsvinden.

5.3 Scenario's voor de kerncentrale Dodewaard

GKN heeft met BNFL een contract gesloten dat de opwerking het merendeel van van de splijtstofelementen van de kerncentrale Dodewaard omvat. Dit contract heeft betrekking op circa 57 ton uranium. Volgens de huidige planning zullen deze splijtstofelementen in de komende jaren in de nieuwe THORP-installatie te Sellafield worden opgewerkt. Bovendien zal GKN moeten meebetalen aan de meerkosten van een aangepast HABOG of aan de kosten van een aparte faciliteit voor het opslaan van gebruikte splijtstof-elementen (zie bladzijde 31).

De KCD is in het voorjaar van 1997 gestopt met het opwekken van electriciteit en zal de komende jaren definitief uit bedrijf worden genomen. Het is van belang dat de resterende splijtstofelementen binnen enkele jaren worden afgevoerd, onafhankelijk van de strategie voor de uiteindelijke ontmanteling van de KCD ('40 jaar wachten' of directe ontmanteling). Als deze elementen in Dodewaard blijven tot een eventuele faciliteit voor opslag van gebruikte splijtstofelementen in bedrijf is genomen zal GKN grote vertraging, en daardoor hoge kosten, oplopen bij het buiten bedrijfstellen van de KCD.

In het geval dat het GKN/BNFL-contract daadwerkelijk wordt opengebroken is het volgende scenario plausibel: de splijtstofelementen die nu nog in Dodewaard aanwezig zijn worden naar Sellafield afgevoerd; alle splijtstofelementen worden te Sellafield opgeslagen totdat de tijdelijke opslagfaciliteit in Nederland gereed is; net zoals voor de KCB worden deze elementen na een periode van tijdelijke opslag in een nieuw te bouwen opslagfaciliteit of in Nederland of in het buitenland geconditioneerd.

Bij de kostenanalyse is alleen gekeken naar de additionele kosten ten opzichte van de huidige aanpak. De belangrijkste kostenposten zijn de volgende:

1. *Het transport van de gebruikte splijtstofelementen van Sellafield naar de tijdelijke opslagfaciliteit.*
   De transportkosten zoals gegeven in [11] zijn geldig voor een grote vermogensreactor en zijn dus niet van toepassing op de KCD (waarvan de splijtstofelementen veel kleiner en lichter zijn). Voor deze analyse is aangenomen dat de kosten van het transport van de splijtstofelementen van de KCD per kilogram splijtstof een factor drie hoger zijn dan voor een standaard centrale. In totaal zullen circa 100 transporten nodig zijn om de splijtstofelementen naar Nederland te transporteren.

2. *Tijdelijke opslag van de splijtstofelementen in Nederland.*
   De hiermee samenhangende kosten worden op 200 miljoen NLG geschat (zie paragraaf 5.3). Daar in route 2 ook het EPZ/COGEMA-contract wordt opengebroken zullen deze kosten verdeeld kunnen worden over EPZ en GKN.

3. *Conditioneren van de splijtstofelementen.*
   Net als voor de KCB zou de conditionering hetzij in Nederland, hetzij in het buitenland plaats kunnen vinden. De kosten van een Nederlandse conditioneringsfaciliteit zijn voor deze studie op 500 miljoen NLG geschat (zie paragraaf 5.3). Omdat ook het EPZ/COGEMA contract wordt opengebroken zullen deze kosten verdeeld kunnen worden over EPZ en GKN.Voor conditionering in een buitenlandse faciliteit is een bedrag van circa 1000 NLG/kgU aangenomen. (zie 5.3.2b., scenario 2b, punt 2)

Het openbreken van het GKN/BNFL contract zal ook leiden tot een besparing: de kosten verbonden aan de verkoop van het plutonium dat bij het opwerken van de splijtstofelementen wordt afgescheiden. Bij het berekenen van deze besparing zijn dezelfde aannames gebruikt als voor de verkoopkosten van plutonium in scenario 1 voor de KCB. In de analyse is aangenomen dat bij het openbreken van het contract GKN de kosten van opwerking en van haar aandeel in de kosten van het HABOG zal moeten betalen. Verder wordt er van uitgegaan dat andere mogelijke additionele kostenposten (zoals de additionele kosten van tijdelijke opslag van de splijtstofelementen in Sellafield en de kosten van een extra transportcontainer) geen grote bijdrage aan de kosten zullen leveren.

5.4 Resultaten van de kostenberekeningen

Bij het berekenen van de kosten is verondersteld dat beide opwerkingscontracten, zowel het laatste EPZ/COGEMA-contract als het GKN/BNFL-contract, zijn opengebroken en dat daarom de kosten voor de interim opslag van gebruikte splijtstofelementen en de kosten voor conditionering in Nederland over EPZ en GKN zijn verdeeld, waarbij het aandeel van EPZ in de kosten van deze faciliteiten 70% is en van GKN 30%, evenredig met de hoeveelheid gebruikte splijtstof.

Tabel 5.3: *Resultaten kostenberekeningen KCB*

	kosten van Scenario's - miljoen NLG					
	Scenario 1		Scenario 2a		Scenario 2b	
	N(1)	C(2)	N(1)	C(2)	N(1)	C(2)
Compactrekken	-	-	10	10	10	10
Transportkosten	15	13	20	15	59	25
Opwerkingskosten	347	244	-	-	-	-
Annulering opwerkingscontract	-	-	330	317	191	184
Kosten verbonden aan Pu & U	38	22	-	-	-	-
Tijdelijke Opslag: verglaasd afval	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.
Tijdelijke Opslag: gebruikte splijtstof	-	-	140	125	140	125
Conditionering	-	-	350	89	154	39
Eindopberging	p.m	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.
Totaal	400	279	850	556	554	383

Noot:
(1) N: Nominale waarden - prijspeil 1997
(2) C: Contante waarden (1997) berekend met een reële rente van 4%.

De resultaten van de kostenberekeningen voor de drie scenario's voor de KCB zijn in Tabel 5.3 gegeven. De nominale waarden (prijspeil 1997) van de kosten van scenario's 2a en 2b (alternatieve aanpak) liggen respectievelijk 450 miljoen NLG en 154 miljoen NLG hoger dan de kosten van scenario 1 (huidige aanpak). De contante waarden van de kosten van scenario's 2a en 2b liggen respectievelijk 277 miljoen NLG en 104 miljoen NLG hoger dan de kosten van scenario 1. De verschillen in zowel de nominale waarden als de contante waarden van de kosten van scenario 1 en scenario 2a worden vooral bepaald door de kosten van interim opslag van de splijtstofelementen en de kosten van conditionering. De verschillen in zowel de nominale waarden als de contante waarden van de kosten van scenario 1 en scenario 2b worden vooral bepaald door de kosten van interim opslag van splijtstofelementen en het verschil tussen de kosten van opwerking en de "boete".

De resultaten van de kostenberekeningen voor de twee scenario's voor de KCD zijn in Tabel 5.4 gegeven. De nominale waarden (prijspeil 1997) van de kosten van het openbreken van het GKN/BNFL-contract liggen 217 miljoen NLG (conditionering in

Nederland) en 167 miljoen NLG (conditionering buiten Nederland) hoger dan de kosten van de huidige aanpak. De contante waarden van de kosten van het openbreken van het contract liggen respectievelijk circa 100 miljoen NLG en 87 miljoen NLG hoger dan de kosten van de huidige aanpak.

Tabel 5.4: *Additionele kosten bij het openbreken van het GKN/BNFL contract*

	Additionele kosten - miljoen NLG			
	Conditionering in Nederland		Conditionering in het Buitenland	
	N (1)	C (2)	N (1)	C (2)
Additionele transport kosten	21	17	64	28
Kosten verbonden aan Pu & U	-14	-8	-14	-8
Interim Opslag	60	53	60	53
Conditionering	150	38	57	14
Totaal	217	100	167	87

Noot:
(1) N: Nominale waarde - prijspeil 1997.
(2) C: Contante waarde (1997) berekend met een reële rente van 4%.

De totale kosten die samenhangen met het openbreken van beide contracten zijn dus:
- 667 miljoen NLG in nominale waarde en 377 miljoen NLG in contante waarde, voor conditionering in Nederland en maximale annuleringskosten;
- 321 miljoen NLG in nominale waarde en 191 miljoen NLG in contante waarde, voor conditionering in het buitenland en minimale annuleringskosten.

5.5 Conclusies ten aanzien van de kosten

1. Over de kosten van de huidige aanpak (route 1) bestaan er noch voor EPZ, noch voor GKN onzekerheden aangezien beide bedrijven contracten hebben afgesloten voor de opwerking van de splijtstofelementen, en voor de opslag en eindopberging van het kernsplijtingsafval.
   Over de kosten van een alternatieve aanpak (route 2, met onder meer het openbreken van de opwerkingscontracten) bestaan daarentegen grote onzekerheden.
   Door een aantal scenario's te analyseren is een beeld verkregen van de mogelijke omvang van de kosten van een dergelijke wijziging van aanpak.

2. Geconcludeerd kan worden dat de kosten van de alternatieve route (Route 2), mede als gevolg van het openbreken van het laatste EPZ/COGEMA contract en het GKN/BNFL contract, honderden miljoenen NLG hoger uit zullen vallen dan de kosten van de huidige aanpak. De nominale waarden van de kosten liggen 300 - 700 miljoen NLG hoger en de contante waarden van de kosten liggen 200 - 400 miljoen NLG hoger dan de kosten van de huidige aanpak.

6. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

In dit rapport wordt een analyse gepresenteerd van de gekozen route voor de verwerking en opslag van gebruikte splijtstofelementen uit de Nederlandse kerncentrales en van een alternatieve route, waarin de elementen direct, dat wil zeggen zonder opwerking, worden opgeborgen. Hiertoe worden de beide routes in enig detail beschreven. Voorzover mogelijk worden de milieuaspecten, de proliferatieaspecten en de kosten van elke stap in beide routes besproken.

Met splijtstofelementen uit een kerncentrale kan men na gebruik in beginsel twee dingen doen:
- Route 1: Men kan de elementen opwerken en de nog bruikbare splijtbare materialen, uranium en plutonium, afscheiden van het sterk radioactieve kernsplijtingsafval. Van de splijtbare materialen worden nieuwe splijtstofelementen gemaakt. Het kernsplijtingsafval wordt verglaasd en opgeslagen.
- Route 2: Men kan afzien van opwerken en de elementen direct opslaan.

Route 1 en route 2 verschillen in een aantal opzichten wezenlijk van elkaar. Deze verschillen komen tot uiting in de milieuaspecten, het proliferatierisico en de kosten.

Vast staat dat het kernsplijtingsafval dat afkomstig is van Nederlandse kerncentrales na opwerking van de splijtstofelementen naar Nederland terugkomt. Ook is vastgesteld dat kernsplijtingsafval eerst gedurende ca.100 jaar bovengronds wordt opgeslagen (interim opslag). In de definitieve opberging moet het afval terughaalbaar zijn.

Met uitzondering van de eindbergingsfaciliteit, waarvoor nog geen definitieve plannen bestaan, zijn voor Route 1 alle benodigde installaties beschikbaar, dan wel in vergevorderd stadium van voorbereiding (HABOG).
Voor Route 2 is dat niet het geval. Er bestaat in Nederland geen opslagfaciliteit voor complete splijtstofelementen uit de beide kerncentrales en evenmin een faciliteit waarin deze elementen geschikt kunnen worden gemaakt (geconditioneerd) voor opslag.

Route 1 omvat een chemische bewerking waarbij de splijtstof in oplossing wordt gebracht, waaruit de splijtbare materialen, uranium en plutonium, worden afgescheiden. De oplossing met het overblijvende radioactieve afval wordt weer vast gemaakt. Bij het oplossen komen onder meer de gasvormige splijtingsproducten vrij. De huidige moderne opwerkingsfabrieken in Sellafield en La Hague lozen echter slechts zeer geringe hoeveelheden radioactieve stoffen in de atmosfeer en in zee.
Route 2 omvat niet zo'n chemische bewerking maar het is mogelijk dat de splijtstofelementen moeten worden bewerkt om ze voor tussenopslag en eindberging geschikt te maken. Ook daarbij zullen zeer geringe hoeveelheden radioactief materiaal in het milieu terechtkomen.

Alle bestaande en geplande nucleaire installaties voldoen aan de vergunningseisen, wat betekent dat de erdoor veroorzaakte maximale individuele stralingsdosis lager is dan de relevante dosislimiet. Ook de additionele faciliteiten, bijvoorbeeld voor de lange termijn opslag en opberging van gebruikte splijtstofelementen, zullen aan de vergunningseisen moeten voldoen.

In Route 1 wordt plutonium in min of meer zuivere vorm afgescheiden. Een zorgvuldige procescontrole en strenge bewaking voorkomt dat dit plutonium wordt gebruikt voor kernwapens.
In Route 2 komt geen afgescheiden plutonium voor. Het plutonium blijft, omdat het niet wordt opgewerkt, vermengd met de sterk radioactieve afvalstoffen.

Route 1 is door de Nederlandse kerncentrales gekozen voor het "back-end" van de splijtstofkringloop. De betreffende contracten zijn afgesloten of voorbereid. De noodzakelijke installaties zijn beschikbaar of zijn in voorbereiding.
Voor Route 2 zijn nog niet alle noodzakelijke technieken ontwikkeld en er bestaat nog geen industriële installatie voor conditionering. Voor Route 2 zijn dus nog extra investeringen nodig, boven de al geplande HABOG, maar wegens het ontbreken van eisen en specificaties, en van relevante ervaring elders, kunnen de investeringskosten slechts bij benadering worden geraamd. Als voor de Nederlandse splijtstof Route 2 gekozen wordt zullen boetes verschuldigd zijn wegens het openbreken van de bestaande opwerkings-contracten. Ook de hoogte van de boetes is niet bekend en moet geschat worden.

Uit deze studie zijn de volgende conclusies te trekken:

1. Vanuit het oogpunt van milieueffecten, met de collectieve dosis als maat, hebben beide routes voor- en nadelen ten opzichte van elkaar. De milieueffecten van de splijtstofkringloop worden gedomineerd door het vrijkomen van radon bij de mijnbouw, door de lozing van ^{14}C door de kernreactor, en door lozing van radioactieve stoffen bij de opwerking.
   Door opwerking en hergebruik van splijtstof heeft men minder nieuw te winnen uranium nodig en vermijdt men een deel van de milieueffecten van de mijnbouw van uranium.
   Het conditioneren en direct opbergen van gebruikte splijtstofelementen geeft minder milieueffecten dan opwerking. (Behalve wanneer in de toekomst deze elementen terugghaald en alsnog opgewerkt zouden worden.)
   Grosso modo wegen deze effecten tegen elkaar op zodat er vanuit milieuoogpunt geen voorkeur aan een van beide routes gegeven kan worden. Bovendien is de collectieve dosis afkomstig van deze processen zeer klein vergeleken bij die van de natuurlijke achtergrondstraling

2. Vanuit het oogpunt van proliferatierisico hebben beide routes voor- en nadelen ten opzichte van elkaar. Het opwerken van splijtstof brengt een zeker risico van proliferatie mee, waartegen echter in deze tijd dankzij internationale verdragen en internationale controles en inspecties, vergaande beveiliging bestaat. De effectiviteit van deze beveiliging wordt bepaald door de politieke stabiliteit van Europa in de komende tientallen jaren.
   Niet opgewerkte splijtstofelementen beveiligen door hun intense straling de eerste tientallen jaren als het ware zichzelf. Omdat deze straling in de loop van de tijd afneemt moet niet opgewerkt materiaal, in verband met de aanwezigheid van plutonium, ook in de toekomst afdoende worden bewaakt. Gezien de lange duur van deze periode kunnen hier geen garanties voor worden verkregen.

3. De kosten van de huidige aanpak, route 1, waarin de splijtstofelementen worden opgewerkt, liggen grotendeels vast aangezien ze voortvloeien uit de contracten die door EPZ en GKN zijn afgesloten met betrekking tot opwerking en betreffende interim opslag en eindberging van verglaasd afval.
   De kosten voor route 2, zonder opwerking, zijn op dit moment niet nauwkeurig te bepalen, onder meer omdat in die route een bewerkingsstap voorkomt (conditioneren van de splijtstofelementen) waarmee nog weinig relevante ervaring is opgedaan en waarvoor de noodzakelijke installaties nog niet bestaan. Ook de eisen die aan een dergelijke installatie en de producten daarvan moeten worden gesteld zijn niet geformuleerd. Dit maakt slechts een zeer ruwe kostenschatting mogelijk. Zo'n kostenschatting levert als resultaat op dat niet opwerken van de betreffende splijtstofelementen 300 - 700 miljoen NLG (200 - 400 miljoen NLG contante waarde) meer kost dan wel opwerken, de huidige route.
   Vanuit het oogpunt van kosten en kostenzekerheid bezien verdient daarom in de huidige Nederlandse situatie route 1, de door zowel de EPZ als GKN gekozen route, de voorkeur boven route 2, directe opberging zonder opwerking.

REFERENTIES

[1] *Richtlijn 96/29/Euratom van de Raad van 13 mei 1996 tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming van de gezondheid der bevolking en de werkers tegen de aan ioniserende straling verbonden gevaren*, Publikatieblad van de Europese Gemeenschappen, 29 juni 1996.

[2] *Besluit van 17 januari 1996, houdende wijziging van het Besluit stralenbeschering Kernenergiewet*, Staatsblad van het Konninkrijk der Nederlanden 44, 1996.

[3] UNSCEAR: *Sources and Effects of Ionising Radiation - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993 Report to the General Assembly with Scientific Annexes*, United Nations, New York, 1993.

[4] M.Dreicer et al: *The External Costs of the Nuclear Fuel Cycle - Implementation in France*, Centre D'Etude Sur L'Evaluation De La Protection Dans Le Domaine Nucleaire, Report N^0 238, Paris, August 1995.

[5] D.H. Dodd: *External Costs of the Nuclear Fuel Cycle - A Scoping Study to Determine the External Costs of the Dutch Nuclear Fuel Cycle in Accordance with the EC/US Methodology*, Netherlands Energy Research Foundation, ECN-C--95-029, Petten, October 1995.

[6] COVRA: *Milieu-Effectrapport Behorend Bij De Aanvraag tot Wijziging van de KEW-vergunning van COVRA N.V.*, nummer 95295, revisie 0, 15 augustus 1995.

[7] *Accord Européen relatif au transport des marchandise Dangereuse par Route*, overeenkomst van 'The ECE Inland Transport Committee', Vermanden, 1990.

[8] SAVE: *Onderzoek naar kansen op mogelijke ongevallen van radioactieve stoffen bij het transport over de weg*, Ingenieurs & Adviesbureau SAVE, januari 1991.

[9] J. Marivoet et al: *First Performance Assessment of the Disposal of Spent Fuel in a Clay Layer*, European Commission, EUR 16752 EN, Luxembourg, 1996.

[10] B.J. Jones, *Near Real Time Material Accountancy using SITMUF and a Joint Page's Test: Improvement of the Test.* ESARDA Bulletin 16 (1989) 13.

[11] OECD/NEA: *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle*, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Cooperation and Development, 1994.

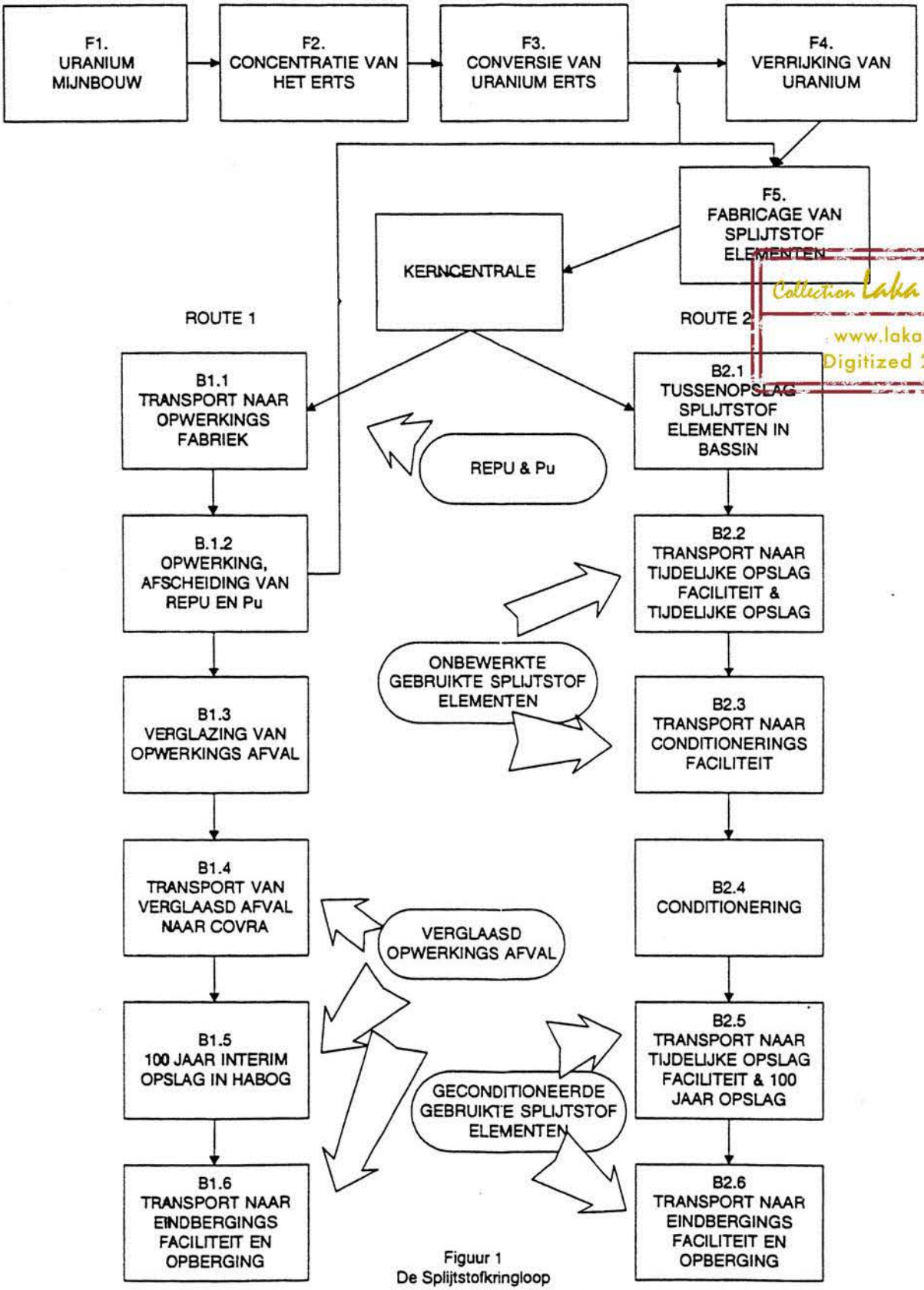
[12] I. Hensing u. W. Schulz: *Wirschaftlichkeitsvergleich verschiedener Entorgungspfade von Kernkraftwerke*, Oldebourg Verlag Munchen, 1995.

[13] J.J. Heijdra et al: *Retrievability of Radioactive Waste from a Deep Underground Disposal Facility*, Report EUR 16197 EN, 1995.

[14] A.S. Keverling Buisman, *Handboek Radionucliden*, Betatext, Bergen 1996, ISBN 90-75441-02-3

ACRONIEMEN

ADR	Accord Européen Relatif Au Transport des Marchandises Dangereuses Par Route
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
BNFL	British Nuclear Fuels Limited
COGEMA	Compagnie Générale des Matières Nucléaires
CORA	Commissie Opberging Radioactief Afval
COVRA	Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval
ECN	Energieonderzoek Centrum Nederland
EPZ	N.V. Elektriciteits-Produktiemaatschappij Zuid-Nederland
EU	Europese Unie
GKN	Gemeenschappelijke Kernenergiecentrale Nederland
HABOG	Hoogradioactief Afval Behandelings- en Opslaggebouw
IAEA	International Atomic Energy Agency
KCB	Kerncentrale Borssele
KCD	Kerncentrale Dodewaard
MOX	Mixed Oxide (mengsel van uraniumoxide en plutoniumoxide)
MWd	Megawatt-dag
MW*e*	Megawatt-electrisch
MUF	Material unaccounted for
NEA	Nuclear Energy Agency
NPV	Non-proliferatie verdrag
NRPB	National Radiological Protection Board (UK)
NSG	Nuclear Suppliers Guidelines
OPLA	Opberging te land
REPU	Reprocessed Uranium
THORP	Thermal Oxide Reprocessing Plant
TWh	Terawatt-uur
UNSCEAR	United Nations Committee on the Effects of Atomic Radiation
UP2	Usine Plutonium 2
UP3	Usine Plutonium 3



Figuur 1
De Splijtstofkringloop

Collection Laka foundation
www.laka.org
Digitized 2018