Actualisering beleidskader ten aanzien van de verwerking van gebruikte splijtstof

Evaluatie van het beleidskader, analyse van de impact van mogelijke beleidskeuzes en adviezen t.a.v. de actualisering van het beleidskader

In opdracht van **Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat**

Openbaar

Auteurs(s):		Beoordeeld:	
		Goedgekeurd:	
Referentienr:	913400/22.251127	Status:	Definitief
57 Pagina's	13 december 2022		

Disclaimer
- Dit document is geclassificeerd als vertrouwelijk in het kader van artikel 10 lid 1c van de Wet Openbaarheid Bestuur.
- NRG sluit alle aansprakelijkheden uit voor enige schade welke ontstaat door gebruikmaking van, of vertrouwen op, de informatie uit dit document.

NRG Petten
Westerduinweg 3
P.O. Box 25
1755 ZG Petten
The Netherlands

NRG Arnhem
Utrechtseweg 310 - B50-West
P.O. Box 9034
6800 ES Arnhem
The Netherlands

Samenvatting

Het huidige beleidskader ten aanzien van de opwerking van gebruikte splijtstoffen uit kerncentrales is vastgelegd in de brief van de minister van Economische Zaken en Klimaat van 11 februari 2011 (Kst 32 645, nr.1). Ten tijde van publicatie van deze beleidsbrief was er sprake van plannen voor de uitbreiding van kernenergievermogen in Nederland. Nu, meer dan tien jaar later, is er een enigszins vergelijkbare situatie. De staatssecretaris van IenW heeft aangekondigd eind 2022 met een nieuwe beleidsbrief over nucleaire veiligheid en stralingsbescherming te komen i.v.m. de plannen die het kabinet heeft voor de bouw van nieuwe kerncentrales.

Actualisering beleidsstandpunten

Met de aankondiging van een nieuwe beleidsbrief is er behoefte aan actualisering van de uitgangspunten ten aanzien van het beleidsstandpunt over gebruikte splijtstoffen. Hierbij dient aandacht te worden gegeven worden aan milieu, veiligheid en non-proliferatie, de beschikbaarheid van opwerkingscapaciteit, en de benodigde opslagcapaciteit bij COVRA als gevolg van de gekozen verwerkingsoptie voor gebruikte splijtstof. Bij actualisering van de uitgangspunten dient te worden nagegaan of de conclusies uit Kst 32 645, nr.1, nog steeds actueel zijn, of dat deze moeten worden aangepast.

In Kst 32 645 is geconcludeerd dat er geen bijzondere voorkeur is voor de destijds in diverse studies beschouwde verwerkingsroutes voor gebruikte splijtstof: route 1 met recycling van gebruikte splijtstof (‘opwerking’) – de huidige praktijk in Nederland - of de route 2 zonder recycling van gebruikte splijtstof (dus ‘niet-opwerken’), in het Engels ook wel de Once Through Cycle (OTC) genoemd. Bij de route met opwerking, gaat uiteindelijk zogenoemd verglaasd afval naar de geologische eindberging. Bij de route zonder opwerking gaat gebruikte splijtstof naar de eindberging.

De voorliggende studie komt op basis van literatuuronderzoek tot de conclusie dat het beleidsstandpunt van Kst 32 645 nr.1 gehandhaafd kan blijven. Deze conclusie wordt hieronder voor de diverse aspecten toegelicht. In hoofdstuk 2 zijn hierover meer details te lezen.

Voor diverse *milieu-indicatoren* is in recent uitgevoerde studies een vergelijking gemaakt tussen het wel of niet opwerken van gebruikte splijtstoffen uit vermogensreactoren. Deze studies beschouwen de volledige keten van processtappen die met kernenergie te maken hebben, van grondstofwinning tot en met afvalverwerking. Die keten wordt ook wel de splijtstofcyclus genoemd, omdat de brandstof voor kerncentrales, de splijtstof, hierin centraal staat. Uit de genoemde studies blijkt dat recycling van uranium, maar vooral van plutonium, een significante vermindering geeft van de productie van splijtstof uit gedolven uranium en dus ook van uraniummijnbouw. De scenario's die voorzien in de opwerking van gebruikte splijtstoffen en recycling van zowel plutonium als uranium zijn hierbij de

gunstigste opties. De scenario's zonder opwerking en met directe eindberging van gebruikte splijtstof zijn alleen voordeliger wat betreft de afwezigheid van radioactieve lozingen, die zich kunnen voordoen tijdens het opwerkingsproces. Echter de dosisbelasting door deze processtap en de rest van de splijtstofcyclus heeft zo'n klein aandeel aan de totale dosisbelasting van de bevolking, dat dit geen onderscheidend voordeel is. Aan de andere kant is er bij niet-opwerken meer mijnbouw (buiten Europa) wat lokaal tot grotere stralingsbelasting en andere milieubelastingen kan leiden. Echter dit is niet onderscheidend genoeg voor het maken van een keuze voor wel of niet opwerken.

Wat betreft *veiligheid en non-proliferatie* kan worden gesteld dat niet alle materialen in de splijtstofcyclus interessant zijn voor illegaal opererende actoren die een kernwapen willen maken. Ertsen, uranium concentraten en lastig te hanteren vormen als uraniumhexafluoride zijn hiervoor minder aantrekkelijk en vereisen veel bewerkingen, waarvoor uitgebreide faciliteiten nodig zijn. Hoogverrijkt uranium en weapon-grade plutonium zouden wel kunnen dienen als basis voor kernwapens, maar beiden komen in de beschouwde splijtstofroutes in Nederland niet voor.

Voor de opwerking van gebruikte splijtstof (route 1) zijn meer faciliteiten nodig dan voor het niet opwerken (route 2). Tevens zijn er meer trajecten waarlangs materiaal moet worden getransporteerd. Het bij opwerken afgescheiden 'reactor-grade' plutonium is echter praktisch ongeschikt voor het maken van een kernwapen.

Voor de Nederlandse situatie zijn er bij route 1 mogelijk minder faciliteiten en transporten op eigen (nationaal) grondgebied nodig dan bij route 2. Route 2 vereist namelijk een nieuwe stap, de conditionering van gebruikte splijtstof om dit geschikt te maken voor plaatsing in een eindbergingsfaciliteit. Echter, als in Nederland wordt gekozen voor route 2, zullen de faciliteiten voor route 1 blijven bestaan omdat Frankrijk en sommige andere landen ook gekozen hebben voor opwerking. In totaal zou dus bij keuze voor route 2, het aantal faciliteiten in Europa die gebruikte splijtstof hanteren, toenemen. Immers er zou een conditioneringsfaciliteit gebouwd en in bedrijf genomen moeten worden.

Voor de *toekomst van de verwerkingsroute 1, 'opwerking'* is het van belang wat de ontwikkeling van de opwerkingscapaciteit in Frankrijk zal zijn en of die beschikbaar blijft voor 'buitenlandse' klanten, zoals exploitanten van kerncentrales in Nederland. Hierbij is het beleid van de aanbieder Orano en de Franse overheid van belang. De firma Orano presenteert zich als een wereldspeler op het gebied van nucleaire dienstverlening voor de nucleaire splijtstofcyclus inclusief mijnbouw, transport, verrijking, splijtstofproductie, recycling van gebruikte splijtstof en de productie van MOX. In alle uitingen van het bedrijf is duidelijk dat het zijn binnenlandse en buitenlandse klanten wil blijven bedienen met deze zaken. Verder is in het Franse beleid opgenomen dat een bepaalde serie bestaande kerncentrales geschikt moet worden gemaakt voor gebruik van splijtstof uit

recycling, hetgeen opwerking vereist. Er zijn geen tekenen dat de Franse staat van plan is de buitenlandse dienstverlening van Orano te blokkeren of te beperken. In die zin lijkt de beschikbaarheid van de opwerkingscapaciteit voor Nederlandse klanten de komende decennia stabiel te blijven.

Voor de *economische aspecten* blijkt uit analyses dat de keuze voor een 'open' of 'gesloten' (i.e. met opwerking) splijtstofcyclus maar een beperkte invloed heeft, zoals uitgedrukt door de LCOE (Levelized Cost Of Electricity). Dit gegeven maakt het lastig op basis van economische overwegingen alleen een onderscheid te maken tussen de keuzes voor de 'back-end' van de splijtstofcyclus. Gesloten cycli vereisen op korte termijn kapitaalinvesteringen in installaties voor de opwerking van gebruikte splijtstof indien ze gebouwd of ingrijpend aangepast moeten worden. In Europa zijn deze installaties er al. Voor de open cyclus is een lange periode van relatief goedkope tussentijdse opslag van gebruikte splijtstof benodigd voordat de kosten van geologische eindberging worden gemaakt. Echter zijn er wel lange-termijn kosteneffecten, omdat niet-opgewerkte gebruikte splijtstof meer ruimte inneemt in de eindberging dan afval uit opwerking. In de praktijk zal een uitbater van kerncentrales te maken hebben met de contractvoorwaarden voor opwerking (indien van toepassing) en de financiële voorwaarden in eigen land voor de interim opslag en eindberging van radioactief afval in de vormen die bij de gekozen verwerkingsroute behoren. Het geheel van deze zaken bepaalt welke route netto het voordeligst is voor de uitbater van kerncentrales.

In het algemeen kan dan ook worden gesteld dat de keuze van de back-end strategie niet zozeer afhangt van economische factoren, maar meer van andere factoren, zoals technologische gereedheid (Technological Readiness Level; TRL), aanwezige infrastructuur, (beleid op) voorzieningszekerheid en duurzaamheid.

Ten aanzien van alle aspecten, kan het nuttig zijn om periodiek de diverse beschikbare opties voor de verwerking van splijtstof te evalueren, inclusief de meer geavanceerde splijtstofcyclusopties. Hierbij kan rekening gehouden worden met technische innovaties en andere nieuwe inzichten.

Impact van de keuze van wel of niet opwerken op het beheer van radioactief afval

Uitgaande van de bouw van twee kerncentrales met groot vermogen (1500 MWe per stuk) is nagegaan wat dat betekent voor de verwerking van gebruikte splijtstof. Hierbij zijn twee opties onderzocht: (1) opwerking van gebruikte splijtstof, in analogie met het huidige beleid, en (2) de overweging gebruikte splijtstof niet op te werken. De vraag hier bij was met name wat dit voor gevolg heeft voor de benodigde opslagcapaciteit bij COVRA, en uiteindelijk voor de plaatsing van het hoogradioactieve afval in een diepe geologische eindbergingsfaciliteit. De focus ligt daarbij op gebruikte splijtstof uit lichtwaterreactoren.

Bij toepassing van de strategie van directe opslag dient de niet-opgewerkte gebruikte splijtstof gedurende enkele decennia bovengronds te worden opgeslagen alvorens het, na conditioneren ervan, in een geologische eindbergingsfaciliteit kan worden geplaatst. De huidige opslagfaciliteiten bij

COVRA zijn hiertoe niet ingericht en dienen derhalve te worden aangepast voor deze categorie radioactief afval. Tevens dienen de bestaande veiligheidsevaluaties voor eindberging te worden gerevalueerd, omdat de voorgaande evaluaties uitgingen van de berging van afval uit opwerking.

In hoofdstuk 3 zijn meer details over de verschillen tussen de twee opties beschreven.

Inhoudsopgave

Samenvatting 3

1.	Inleiding	9
2.	Evaluatie van het beleidskader inzake opwerking	12
2.1.	De splijtstofcyclus	12
2.2.	Analyse van het huidige beleidskader opwerking en de onderbouwing ervan	16
2.2.1.	Aspect milieu	17
2.2.2.	Aspect non-proliferatie en veiligheid	20
2.2.3.	Aspect beschikbaarheid opwerkingscapaciteit	25
2.2.4.	Aspect economie	26
2.2.5.	Advies m.b.t. de actualisering van het beleidskader t.a.v. opwerking	28
3.	Impact van de keuze voor wel of niet-opwerken - rekenvoorbeeld	29
3.1.	Gemaakte aannames	29
3.2.	Hoeveelheden eindproduct	30
3.3.	Impact op de eindberging	32
4.	Conclusies	35
Lijst van tabellen		36
Lijst van figuren		36
Bijlage A	Milieuimpact splijtstofcycli	37
A.1.	Milieu-indicatoren	37
A.2.	Bovengrondse opslag	42
A.2.1.	Laag- en middelradioactief afval (TTC en OTC)	43
A.2.2.	Verglaasd hoogradioactief afval (TTC)	43
A.2.3.	Gecompacteerd metallisch hoogradioactief afval (TTC)	44
A.2.4.	Plutonium (TTC)	45
A.2.5.	Opgewerkt uranium (TTC)	45
A.2.6.	Gebruikte splijtstof (OTC)	45
A.3.	Eindberging	48
A.3.1.	Eindberging in steenzout	49

A.3.2. Eindberging in Boomse Klei 50
A.3.3. Thermische belasting van de eindberging 51
A.4. Evaluatie 53
Referentielijst 54

1. Inleiding

Voor het produceren van elektriciteit met kernenergie, zijn naast het bedrijven van een kerncentrale ook andere installaties en activiteiten nodig. De ‘brandstof’ voor de centrale, de zogenoemde splijtstof, moet geproduceerd worden vanuit te mijnen grondstoffen. Na gebruik in de centrale, waarbij energie wordt geproduceerd, dient de gebruikte splijtstof te worden hergebruikt (‘opgewerkt’) of direct als reststof te worden verwerkt en opgeslagen. Het geheel van al die zaken van grondstofwinning tot en met afvalverwerking, noemt men de splijtstofcyclus. De diverse activiteiten van de splijtstofcyclus kunnen verspreid over meerdere landen plaatsvinden.

Sinds het begin van de exploitatie van kerncentrales in Nederland, is er voor gekozen de gebruikte splijtstof te laten opwerken. Bij opwerken worden de te hergebruiken componenten uit de gebruikte splijtstof teruggewonnen en de reststoffen verwerkt tot afval in een stabiele vorm, geschikt voor opslag bij COVRA, de nationale inzamelaar en beheerder van radioactief afval.

Huidig beleidskader ten aanzien van opwerking

Het huidige beleidskader ten aanzien van opwerking is vastgelegd in de brief van de minister van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie van 11 februari 2011 (Kst 32 645, nr.1) [1]. De brief stelt de Tweede Kamer op de hoogte van de belangrijkste randvoorwaarden verbonden aan de totstandkoming van nieuwe kerncentrales, waarbij opwerking één van de benoemde onderwerpen is. De brief stelt onder ‘randvoorwaarden met betrekking tot radioactief afval’ t.a.v. opwerking:

- *De keuze voor al dan niet opwerken van bestraalde splijtstof is vooralsnog aan de vergunninghouder van de kerncentrale. Als de vergunninghouder kiest voor opwerken zal het kabinet zich inspannen om een verdrag te sluiten met het land waar opwerken plaats zal gaan vinden en dat aansluit bij de contractperiode met een maximum van circa dertig jaar.*
- *De vergunninghouder evalueert iedere tien jaar zijn «back-end» strategie. Het Rijk doet dat iedere twintig jaar. Afhankelijk van de resultaten van deze evaluaties kan alsnog een andere «back-end strategy» aan de vergunninghouders worden voorgeschreven. Het ligt voor de hand dat de overheid in alle redelijkheid termijnen stelt waarbinnen deze voorschriften geïmplementeerd dienen te zijn*.

De brief verantwoordt dit beleidsstandpunt onder andere met:

“*Uit verschillende studies die de afgelopen jaren naar de Tweede Kamer zijn verstuurd, blijkt dat er vanuit milieuhygiënisch en veiligheids- en non-*

proliferatieperspectief geen doorslaggevende voorkeur is voor een van deze opties[1]."

Het beleidsstandpunt uit Kst 32 645, nr.1, ziet men terug in paragraaf 4.2 van '*Het nationale programma voor het beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen*', gepubliceerd in 2016 [2]. Het nationale programma van 2016 beschrijft het beleid voor het beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstof, van het ontstaan ervan tot aan de eindberging.

Beschrijving van de onderzoeksvragen

In de tijd van de beleidsbrief Kst 32 645, nr.1, was er sprake van plannen voor de uitbreiding van kernenergievermogen in Nederland. Nu, meer dan tien jaar later, is er een enigszins vergelijkbare situatie. De staatssecretaris van IenW heeft aangekondigd eind 2022 met een nieuwe beleidsbrief te komen i.v.m. de plannen die het kabinet heeft voor de bouw van nieuwe kerncentrales. De volgende onderzoeksvragen zijn onderwerp van voorliggend rapport:

1. Er is behoefte aan actualisering van de uitgangspunten t.a.v. het beleidsstandpunt t.a.v. de keuze voor opwerking dan wel niet-opwerken van gebruikte splijtstof. Hierbij moet o.a. aandacht gegeven worden aan milieu, veiligheid en non-proliferatie. Er moet nagegaan worden of de conclusies uit Kst 32 645, nr.1 nog steeds actueel zijn, of dat deze aangepast moeten worden. De focus ligt daarbij op gebruikte splijtstof uit lichtwaterreactoren.
2. In relatie met punt 1, moet in kaart gebracht worden welke internationale ontwikkelingen spelen op het gebied van opwerking die relevant zijn voor Nederland. Hierbij moet o.a. aandacht zijn voor de beschikbaarheid van capaciteit van opwerking voor Nederlandse gebruikte splijtstof.
3. Er is behoefte aan inzicht in de benodigde opslagcapaciteit bij COVRA als gevolg van de gekozen verwerkingsoptie voor gebruikte splijtstof. Uitgaande van de bouw van twee kerncentrales, wordt gevraagd de volgende opties te beschouwen en te vergelijken:
    a. de benodigde opslagcapaciteit bij COVRA indien gekozen wordt voor opslag na opwerking
    b. de benodigde opslagcapaciteit bij COVRA indien gekozen wordt voor directe opslag.

Leeswijzer bij rapport

In Hoofdstuk 2 is een analyse gegeven van het huidige beleidskader met betrekking tot de behandeling van gebruikte splijtstoffen uit vermogensreactoren,

[1] Ontwikkelingen met betrekking tot eindverwerking van gebruikte splijtstof, NRG, april 2005, bijlage bij Tweede Kamer, Kamerstukken, Vergaderjaar 2004–2005, 30 000, nr. 5; Kerncentrale Borssele na 2013; Gevolgen van beëindiging of voortzetting van de bedrijfsvoering, ECN/NRG, november 2005, bijlage bij Tweede Kamer, Kamerstukken, Vergaderjaar 2005–2006, 30 000, nr. 18; Notitiebijlage bij Tweede Kamer, Kamerstukken, Vergaderjaar 2006–2007, 30 000, nr. 40; Kernenergie & Randvoorwaarden, Een verkenning van mogelijke randvoorwaarden voor de kernenergiescenario's uit het Energierapport 2008, NRG, maart 2010, bijlage bij Kamerstukken, Tweede Kamer, Vergaderjaar 2009–2010, 31 510, nr. 40.

en van recente ontwikkelingen voor de aspecten milieu, non-proliferatie en veiligheid, de beschikbaarheid van opwerkingscapaciteit en economis.

Hoofdstuk 3 bevat een analyse van de impact van de keuze voor al of niet opwerken van gebruikte splijtstof aan de hand van een indicatief rekenvoorbeeld.

Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van de belangrijkste conclusies.

Een uitgebreide analyse van recente ontwikkelingen met betrekking tot milieu-aspecten en –indicatoren is gegeven in Bijlage A.

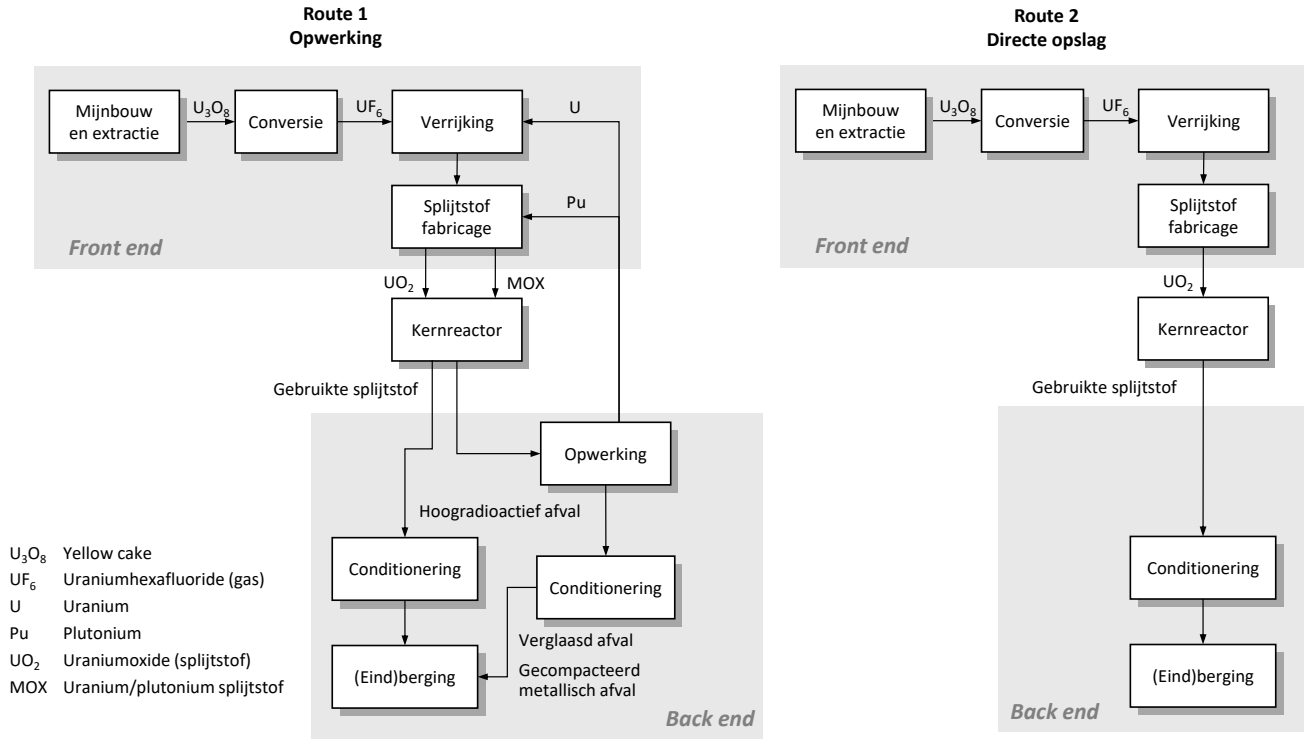
2. Evaluatie van het beleidskader inzake opwerking

In dit hoofdstuk wordt het Nederlandse beleidskader inzake opwerking geëvalueerd middels een analyse van de beleidsstandpunten en hun onderbouwing. Het hoofdstuk sluit af met aanbevelingen ten aanzien van de mogelijke actualisering van het beleidskader.

Omdat er nogal wat technische begrippen in dit hoofdstuk gebruikt worden, begint dit hoofdstuk met een uitgebreide toelichting op de zogenoemde 'splijtstofcyclus', met de mogelijke routes voor de eindverwerking van gebruikte splijtstof, inclusief opwerking.

2.1. De splijtstofcyclus

In de Inleiding is reeds globaal aangegeven uit welke stappen de splijtstofcyclus bestaat. Hieronder wordt dat in meer detail gedaan, waarbij diverse begrippen betreffende de splijtstofcyclus worden geïntroduceerd.



Figuur 1: Overzicht van de splijtstofcyclus met daarin twee routes voor de eindverwerking van gebruikte splijtstof

In de Figuur *1* ziet men dat de splijtstofcyclus globaal opgedeeld kan worden in drie delen: de 'front end', de kernreactor en de 'back end'.

De ‘front end’ van de splijtstofcyclus

De stappen van de splijtstofcyclus die moeten worden doorlopen om de brandstof (‘splijtstof’) voor een kerncentrale te maken, worden gerekend tot de zogeheten ‘front-end’ van de splijtstofcyclus.

De volgende processtappen maken deel uit van de ‘front-end’ van de splijtstofcyclus:

Mijnbouw en extractie: Uraniumerts wordt door mijnbouw gewonnen. Na extractie uit erts en zuivering komt uranium in de vorm van de zogenoemde yellow cake (U_3O_8) beschikbaar voor de volgende processtap: de conversie.

Conversie: De yellow cake wordt omgezet in uranium hexafluoride (UF_6). Deze vaste stof wordt door verwarming omgezet in UF_6 gas dat geschikt is voor het verrijkingsproces.

Verrijking: In de meeste kerncentrales, waaronder de kerncentrale Borssele, wordt licht verrijkte splijtstof gebruikt, waarin het percentage uranium-235 ten opzichte van dat percentage in natuurlijk uranium verhoogd is. Dit is de enige stap van de ‘front end’ die in Nederland gebeurt. Het bedrijf Urenco in Almelo gebruikt hiervoor ultracentrifuges. Hierbij wordt UF_6 op basis van het massaverschil tussen uranium-235 (splijtbaar) en uranium-238 (niet-splijtbaar) gescheiden in UF_6 met een verhoogd percentage uranium-235 (verrijkt uranium) en UF_6 met een verlaagd percentage uranium-235 (verarmd uranium).

Splijtstof fabricage: Het licht verrijkte uranium, in de vorm van UF_6, wordt omgezet in uraniumoxide (UO_2) waaruit splijtstoftabletten worden gemaakt. Een aantal van deze tabletten worden op elkaar gestapeld en opgesloten in een metalen huls, de zogenoemde ‘splijtstofstaaf’. Splijtstofstaven worden weer gebundeld tot ‘splijtstofelementen’, ook wel brandstofelementen genoemd.

De kernreactor of kerncentrale

De *kerncentrale* is de processtap in de splijtstofcyclus waarbij elektriciteit wordt opgewekt. De kernreactor is het nucleaire hart van de centrale. De details van het energieproductieproces en de reacties in de kern vallen buiten het bestek van dit rapport. Hieronder wordt gefocust op het deel dat relevant is voor de splijtstofcyclus.

In de kern van de reactor staan de splijtstofelementen waarin splijting van uranium-235 plaatsvindt. Dit is het proces waarbij energie vrijkomt die in de vorm van warmte overgedragen wordt aan het koelwater. Een deel van de uranium-238 wordt tijdens kernreacties omgezet in splijtbare isotopen van plutonium: plutonium-239 en plutonium-241. Dit levert in de loop van de tijd een belangrijke bijdrage aan de energieproductie en de reactorkern.

Men laat ieder splijtstofelement gedurende een aantal jaren (vaak vier) in de kern om energie te leveren. Daarna noemt men het splijtstofelement ‘uitgeput’ en wordt het gewisseld voor een nieuw element met ‘verse’ splijtstof. De energie die door

een splijtstofelement gedurende zijn verblijf in de kern wordt geleverd, heet de opbrand en deze wordt uitgedrukt in geleverde energie per massa splijtstof. Waarden van rond de 50 GWd/tHM en hoger zijn tegenwoordig gangbaar. Waarbij HM staat voor 'heavy metal', wat ingeval van traditionele UO_2 splijtstof uranium is, maar bij de zogenoemde MOX-splijtstof een mix van uranium en plutonium.

De 'back end' van de splijtstofcyclus

De processtappen van de splijtstofcyclus waarbij gebruikte splijtstof wordt verwerkt en die leiden naar de eindbestemming van dit materiaal, worden gerekend tot de 'back-end' van de splijtstofcyclus.

De gebruikte splijtstofelementen bevatten nog steeds splijtbaar uranium-235, maar wel met een lager percentage dan in 'verse' elementen. Daarnaast bevatten de gebruikte splijtstofelementen veel splijtingsproducten als ook plutonium en andere activeringsproducten. Vooral vanwege de splijtingsproducten produceren de gebruikte splijtstofelementen intense ioniserende straling. Voordat de gebruikte splijtstofelementen mogen worden getransporteerd, zullen deze eerst enige tijd onder water moeten worden opgeslagen, zodat door radioactief verval het stralingsniveau en de warmteproductie voldoende kan afnemen. Deze tijdelijke opslag kan plaats vinden in een splijtstofopslagbassin in het reactorgebouw, zoals in Borssele, of in een aangrenzend gebouw. Na verloop van tijd kan de gebruikte splijtstof ook droog opgeslagen worden.

Na de tijdelijke opslag van de gebruikte splijtstofelementen bij de centrale zijn er twee mogelijke verwerkingsroutes:

1. opwerking van de splijtstof met terugwinning van nog bruikbare materialen (de opwerkroute, 'gesloten' splijtstofcyclus) of
2. directe opslag van de gebruikte splijtstof als hoogradioactief afval ('open' splijtstofcyclus).

Ongeacht de keuze voor een open of gesloten splijtstof zullen de resulterende afvalstoffen in een eindberging worden geplaatst. Met *eindberging* wordt bedoeld: berging in geologisch stabiele, diep gelegen aardlagen, waarmee het afval voldoende lang buiten de leefomgeving van de mens kan worden gehouden.

Er zijn meerdere varianten van de verwerkingsroutes mogelijk, maar dit rapport beperkt zich gezien de vraagstelling tot de bovengenoemde twee.

1. *Route met opwerking:*

De opwerkroute wordt nu onder andere voor Nederlandse en Franse kernreactoren gevolgd. Het resultaat hiervan is dat het merendeel (circa 95%) van de splijtstof (uranium en plutonium) wordt teruggewonnen uit de gebruikte splijtstofelementen en wordt hergebruikt in de splijtstofcyclus. Deze route omvat de volgende stappen:

Opwerking van gebruikte splijtstof: De gebruikte splijtstofelementen worden in speciale transportcontainers overgebracht naar een opwerkingsfabriek waar het grootste deel van de splijtstoffen uit de gebruikte splijtstofelementen wordt teruggewonnen: uranium (ongeveer 94%) en plutonium (ongeveer 1%). De gebruikte splijtstofelementen van de kerncentrale Borssele worden naar de opwerkingsfabriek in La Hague (Normandië) getransporteerd. Het uranium gaat terug naar de verrijkingsstap van de front-end. Het plutonium kan verwerkt worden in de splijtstof Mixed Oxide (MOX), waarin zowel plutonium als uranium wordt verwerkt.

Verglazing van opwerkingsafval: De resterende circa 5% van de gebruikte splijtstof bestaat uit splijtingsproducten en actiniden. Dit restmateriaal (opwerkingsafval) wordt verglaasd. Verglazing is nodig om de (radioactieve) stoffen sterk te binden. Het verglaasde (hoog radioactief) afval wordt verpakt in roestvrijstalen containers (ook wel: ‘canisters’). De geactiveerde metalen structuurdelen van de splijtstofelementen worden samengeperst en verpakt in roestvrijstalen containers, het gecompacteerde metallisch afval.

Tijdelijke opslag van verglaasd afval: Momenteel is nog geen eindberging voor de containers met het verglaasde afval in bedrijf. In afwachting van de definitieve eindberging zullen deze containers tijdelijk worden opgeslagen. Nederland heeft ervoor gekozen om, in afwachting van een beslissing over de eindberging, het verglaasde afval tijdelijk bovengronds op te slaan. Dit gebeurt bij de COVRA in Vlissingen. Hier wordt dit afval opgeslagen in het HABOG, een betonnen bunkerachtig gebouw, ontworpen om het afval gedurende tenminste 100 jaar veilig op te slaan en de door radioactief verval nog vrijkomende warmte af te voeren. Na 100 jaar is de activiteit door radioactief verval met meer dan 90% afgenomen.

Eindberging van hoogradioactief afval: In plannen voor eindberging wordt uitgegaan van containers met hoogradioactief afval opgeborgen in diep gelegen stabiele geologische formaties. In Nederland zijn er zoutkoepels en kleilagen die hiervoor in aanmerking komen. Er zijn landen waar graniet het geprefereerde ‘gastgesteente’ is. Het volume hoogradioactief afval dat per eenheid opgewekt elektrisch vermogen zal worden opgeborgen is enkele malen kleiner dan bij directe berging van gebruikte splijtstof.

2. *Route met directe berging:*

Deze route wordt onder andere in Finland en Zweden gevolgd. Het omvat de volgende stappen:

Tijdelijke opslag: In afwachting van de definitieve eindberging kunnen splijtstofelementen worden opgeslagen in een waterbassin of in opslagcontainers waarin de elementen droog (en bij onderdruk) worden opgesloten. Deze onderdruk zorgt ervoor dat bij kleine schade aan de insluiting de (mogelijk) in de container aanwezige radioactieve stofdeeltjes niet buiten de container komen.

Conditionering: Om de splijtstof(staven) definitief te kunnen opbergen, moet de gebruikte splijtstof eerst in een voor de eindberging geschikte vorm worden gebracht. Dit gebeurt in een conditioneringinstallatie. De conditioneringmethode hangt af van de wijze van eindberging.

Eindberging: Het is de bedoeling de geconditioneerde splijtstof op te bergen in diep gelegen stabiele geologische formaties, zoals zout- en kleilagen of in rotsformaties. In Finland is men bijna bij het punt van ingebruikname van een eindberging voor gebruikte splijtstof, maar de meeste landen zijn nog niet zo ver.

2.2. Analyse van het huidige beleidskader opwerking en de onderbouwing ervan

Het huidige beleidskader zoals beschreven in de beleidsbrief uit 2011 (Kst 32 645 nr.1) [1] is gebaseerd op de conclusie van destijds, dat er op basis van milieu- en veiligheidsoverwegingen geen grote voorkeur is uit te spreken voor één van de twee opties voor de eindverwerking van gebruikte splijtstof: opwerken of niet-opwerken. Zoals in de inleiding beschreven, verwijst de beleidsbrief naar een drietal rapporten, waarin de opties zijn vergeleken op allerlei aspecten. Deze rapporten zijn allen tot stand gekomen in overleg met begeleidingscommissies.

“Ontwikkelingen met betrekking tot eindverwerking van gebruikte splijtstof” [3] uit 2005 concentreerde zich op de verschillen tussen twee routes voor de eindverwerking van gebruikte splijtstof voor wat betreft de aspecten milieu, veiligheid, non-proliferatie en kosten. Het gaf ook informatie over nieuwe ontwikkelingen ten aanzien van de praktijk en mogelijkheden voor verwerking van gebruikte splijtstof. Op basis van dit rapport was geen grote voorkeur voor één van de beschouwde routes uit te spreken.

“Kerncentrale Borssele na 2013 – Gevolgen van de beëindiging of voortzetting van de bedrijfsvoering” [4] onderzocht de mogelijke gevolgen van een te nemen besluit over het voortzetten van de bedrijfsvoering van de enige kerncentrale in Nederland na 2013. Hierbij was naast beschouwing van het energiesysteem met vooral economische parameters, ook aandacht voor ecologische aspecten zoals milieuaspecten, stralingsbescherming, afval en gebruik van grondstoffen.

“Kernenergie en randvoorwaarden” [5] bood een verkenning van mogelijke randvoorwaarden voor de kernenergiescenario’s uit het Energierapport 2008 van het kabinet Balkenende IV. Dit rapport is één van de drie rapporten die is opgeleverd in een proces dat geleid werd door een interdepartementale werkgroep en dat ook een serie stakeholderbijeenkomsten kende (2009-2010). Concepten van rapporten werden daarbij ook gedeeld in de bijeenkomsten en voorzagen de gesprekspartners van informatie voor discussies. De in [5] genoemde randvoorwaarden waren deels gekoppeld aan de scenario’s uit het Energierapport

2008 en er werd niet gepleit voor onverkorte toepassing van de mogelijke randvoorwaarden.

In de volgende subparagrafen worden de diverse aspecten van een keuze voor een bepaalde route voor de eindverwerking van gebruikte splijtstof behandeld in de volgorde, zoals die in hoofdstuk 4 van [3] gehanteerd is: milieu, veiligheid en non-proliferatie. Aan de beschouwing is een nieuw aspect toegevoegd: 'beschikbaarheid van opwerkingscapaciteit', dat een eigen subparagraaf heeft gekregen.

2.2.1. Aspect milieu

In de beleidsbrief van 2011 [1] werd gesteld dat er vanuit milieuoogpunt geen bijzondere voorkeur was voor een splijtstofcyclus met of zonder opwerking. De argumenten daarvoor werden in meerdere in de Beleidsbrief gerefereerde studies genoemd. Belangrijk is met name [3], hoewel de referenties [4] en [5] nuttige aanvullende informatie bieden. Hieronder worden de destijds genoemde onderbouwingen kort samengevat. Ze zijn in het kader van de voorliggende studie getoetst aan de huidige inzichten, waarbij gebruik wordt gemaakt van recente literatuur. Een uitgebreider overzicht van de milieu-impact van nucleaire splijtstofcycli is beschreven in Bijlage A.

De conclusie is, dat de inzichten op milieugebied, zoals die waren bij het tot stand komen van de beleidsbrief van 2011, nog steeds actueel zijn. Hieronder worden de toenmalige inzichten behandeld en geëvalueerd.

Stralingsbelasting

In [3] werd in 2005 aangetoond dat de stralingsdosis voor leden van de Nederlandse bevolking niet aantoonbaar beïnvloed wordt door de keuze voor opwerking of directe opslag van gebruikte splijtstof, waardoor dit aspect geen voorkeur opleverde voor een bepaalde route voor verwerking van gebruikte splijtstof.

De totale stralingsbelasting uit alle bronnen van de 'gemiddelde' Nederlander werd destijds geschat op 2,5 millisievert (2,5 mSv) per jaar, op basis van gegevens van het RIVM uit 2003 [6]. Kernenergie zat in de categorie 'overige bronnen', tezamen met fall-out van kernproeven en industriële bijdragen, een categorie met een aandeel van 0,8% van de totale geschatte dosisbelasting. Hierin zou maximaal 1 microsievert (0,001 mSv) veroorzaakt worden door lozingen van radioactieve stoffen uit kerncentrales. In 2022 schat het RIVM [7] de totale stralingsbelasting van de gemiddelde Nederlander op 2,8 mSv per jaar, waarbij de grootste bijdragen geleverd worden door natuurlijke straling binnenshuis (42%), medische diagnostiek (38%) en natuurlijke radioactiviteit in het lichaam (15%). De overige bronnen (inclusief kernenergie) worden ingeschat op minder dan 1%. Hierdoor is de stralingsbelasting geen onderscheidende parameter bij de vergelijking van mogelijke verwerkingsroutes. In die zin is er ten opzichte van eerdere studies geen wezenlijk nieuw inzicht.

In [3] is destijds ook gekeken naar consequenties voor de lozing van radioactieve stoffen in zee, en consequenties voor de mens en het leven in zee. Hierbij werd destijds verwezen naar het MARINA II rapport [8] wat inzicht gaf in de lozing van radioactieve stoffen door diverse niet-nucleaire en nucleaire industrieën in het gebied in en langs het Noordoostelijk deel van de Atlantische oceaan. Destijds werd een dalende trend in lozingen uit de nucleaire industrie vastgesteld en dat niet-nucleaire industrieën de dominante bijdrage leverden aan de stralingsdosis. Verder werd gesteld dat er geen aanwijzingen waren dat schade aan de marine biota wordt toegebracht door de huidige radioactieve emissies.

De resultaten van de MARINA studie werden gerevalueerd door de OSPAR Contracting Parties en dit leidde tot hun aanbeveling tot periodieke rapportage van óók de lozingen van de niet-nucleaire industrie. Sindsdien worden er in OSPAR-verband data over lozingen in OSPAR-gebied verzameld en worden er periodiek assessments van de impact van de lozingen gedaan. In de 'Fifth periodic evaluation[2]' [9] in OSPAR-verband over de periode 2010-2020, wordt gemeld dat er een voortdurende en substantiële daling van lozingen uit de nucleaire sector is geweest en dat het doel 'concentraties van kunstmatige radionucliden dicht bij nul' waarschijnlijk is bereikt.

Een onderscheid, dat nog wel blijft, is dat door opwerking van gebruikte splijtstof, op diverse plekken op de wereld minder mijnbouw nodig zal zijn, wat leidt tot lagere collectieve dosis van werkers en dosisbelasting van lokale bevolking. Maar in het totaalplaatje lijkt ook dit niet doorslaggevend te zijn.

Verstandig grondstofgebruik

In de onderbouwende studies voor de beleidsbrief uit 2011 is grondstofgebruik beschouwd. In het kader van verstandig omgaan met beschikbare grondstoffen, kan gekeken worden naar de eindigheid van economisch winbare voorraden van delfstoffen zoals uranium. De studies lieten destijds zien dat opwerking het hergebruik van uranium en plutonium uit gebruikte splijtstof mogelijk maakt en daarmee bespaart op mijnbouw. Deze constatering is nog steeds van toepassing.

Middels gerecycled materiaal uit gebruikte splijtstof kan onder andere mengoxidesplijtstof worden gemaakt, de zogenoemde MOX, waarin plutonium-239 het splijtbare materiaal is. Deze splijtstof wordt in Frankrijk op grote schaal gebruikt, maar wordt ook in de kerncentrale te Borssele gebruikt. Het gebruik van MOX zorgt ervoor dat er per eenheid geproduceerde energie, minder plutonium wordt geproduceerd, omdat het wordt 'opgebrand'. Ook werd eerder vastgesteld, dat uranium uit opwerking (ook wel REPU genoemd – *REProcessed Uranium*) weer verrijkt kan worden. Het is rijker aan splijtbaar uranium-235 dan uraniumerts en verrijking van REPU bespaart dus ook op mijnbouw. REPU is nog steeds in

[2] 'Fifth periodic evaluation of progress towards the objective of the OSPAR Radioactive Substances Strategy', betreft periode 2010 – 2020.

gebruik, maar kan ook bijdragen aan een ‘strategische voorraad’ uranium. In hoofdstuk 3 van het voorliggende rapport worden energiescenario’s uitgewerkt, die eveneens de verminderde uraniumbehoefte van de splijtstofcyclus met opwerking ten opzichte van de cyclus zonder opwerking laten zien.

Ook recente literatuur laat de besparing op uranium en mijnbouw bij de toepassing van opwerking zien. In 2014 publiceerde de CEA[3] een vergelijking voor Frankrijk van de huidige cyclus met opwerking, met een alternatieve cyclus zonder opwerking [23]. De cyclus zonder opwerking zou in Frankrijk een 16% grotere uraniumbehoefte hebben. In de gepresenteerde Life Cycle Analysis bleek ook een grote ‘environmental footprint’ voor deze ‘open cyclus’ met o.a. grotere productie van hoogradioactief afval. Bovendien zou de ‘winst’ qua uranium gebruik en andere milieu-parameters nog groter zijn, als alle bestaande centrales zouden worden vervangen door de moderne en efficiëntere EPR-reactoren. Recent gepubliceerd (2022) literatuuronderzoek van drie onderzoeksinstellingen in het VK[4] heeft een overzichtsartikel opgeleverd [26] over de verschillen qua milieu-impact en afvalproductie van de cycli zonder opwerking en die met opwerking. Alle gerefereerde bronnen laten een verminderde behoefte aan uraniummijnbouw zien door recycling van gebruikte splijtstof. Wanneer meervoudige recycling zou worden ingevoerd (dus ook MOX recyclen) zouden nog veel grotere besparingen kunnen worden gehaald. Orano en andere instanties werken in Frankrijk aan het ‘MOX 2’ concept, dat multirecycling mogelijk moet maken.

<u>Afvalproductie en enkele praktische aspecten daarvan</u>

In de studies bij de beleidsbrief uit 2011 was al aangegeven, dat niet-opwerken leidt tot de noodzaak tot een grotere opslagcapaciteit voor hoogradioactief afval, met ook een ander ontwerp. Deze conclusie, gebaseerd op vaststaande technische feiten, blijft ongewijzigd.

In hoofdstuk 3 van de voorliggende studie worden twee scenario’s doorgerekend (route zonder opwerking en route met opwerking) op onder meer de productie van hoogradioactief afval, uitgaande van een opgesteld nieuwe kernenergievermogen van 3000 MWe. Dit geeft een idee van de gunstige invloed van opwerking op de vereisten bij COVRA voor hoogradioactief afval.

Bij niet-opwerken zal de eindvorm verpakte gebruikte splijtstof zijn. Deze is sterk stralend en produceert nog langdurig warmte. Dit materiaal moet geconditioneerd worden, om de veilige langdurige interimopslag mogelijk te maken. In speciale faciliteiten moeten splijtstofelementen eerst worden gedemonteerd en daarna in geschikte containers worden verpakt. De keuze van de containers zal o.a. samenhangen met hoe deze in de toekomst mogelijk in een ondergrondse eindberging zullen worden opgeslagen. Hier zijn diverse varianten mogelijk, zoals ook in hoofdstuk 3 is beschreven.

[3] Le Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
[4] Central Laboratory in Sellafield of the National Nuclear Laboratory (NNL), Dalton Nuclear Institute of University of Manchester, Department of Chemical Engineering and Analytical Science at University of Manchester.

Over dit overpakken in speciale containers is kennis aanwezig in Zweden en Finland, landen die niet opwerken en hebben gekozen voor opslaan van gebruikte splijtstof in een eindberging. Nederland beschikt niet over faciliteiten voor conditioneren en overpakken van gebruikte splijtstof voor langdurige opslag. Mocht de opwerkingsroute worden verlaten, dan zal men ofwel dergelijke faciliteiten moeten ontwerpen en bouwen in Nederland, of proberen deze bewerkingen in het buitenland te laten uitvoeren. Het is echter niet zeker dat buitenlandse bedrijvers van dergelijke faciliteiten in de toekomst Nederlandse splijtstof willen of mogen ontvangen.

Bij opwerken is het eindproduct verglaasd afval plus gecompacteerd metallisch afval. Het verglaasde afval is warmte producerend, maar in mindere mate dan gebruikte splijtstof. In Nederland heeft de COVRA een speciaal gebouw voor de interim opslag van dit materiaal, het zogenoemde HABOG. Hierin wordt ook de gebruikte splijtstof van de onderzoeksreactoren[5] opgeslagen. Het HABOG is een gebouw dat recent uitgebreid is met een extra opslagmodule. Op deze wijze kan de capaciteit stapsgewijs uitgebreid worden. Indien de optie opwerking wordt verlaten, zal een ander type opslaggebouw ontworpen en gebouwd moeten worden om gebruikte splijtstof van kerncentrales te kunnen ontvangen.

In Nederland wordt uitgegaan van 100 jaar bovengrondse opslag, waarna berging in de diepe ondergrond in een zogenoemde eindberging volgt, wat internationaal als een veilige optie wordt beschouwd. Het huidige eindbergingsconcept gaat uit van de opslag in de diepe ondergrond van onder meer verglaasd opwerkingsafval. Maar aangezien eindberging pas over een lange tijd is voorzien, zou indien opwerking verlaten zou worden, er genoeg tijd zijn om het eindbergingsconcept en de bijbehorende veiligheidsanalyses volledig te herzien, ook wat dit betekent voor de financiële aspecten.

2.2.2. Aspect non-proliferatie en veiligheid

In [3] hebben Clingendael en NRG de ‘gesloten’ splijtstofcyclus (met opwerking) en ‘open’ splijtstofcyclus (zonder opwerking) vergeleken op de aspecten non-proliferatie en veiligheid. Ook in [4] en [5] is destijds op aspecten daarvan ingegaan. Er is daarbij niet alleen gekeken naar de faciliteiten waarin de processtappen van de splijtstofcyclus plaats vinden, maar ook naar de transporten tussen die faciliteiten. Destijds leidde het onderzoek niet tot een voorkeur voor één van de genoemde verwerkingsroutes van gebruikte splijtstof. De huidige evaluatie heeft niet tot nieuwe inzichten geleid.

Hieronder worden de procedurele en technische voorzieningen toegelicht die er bestaan in het kader van non-proliferatie en veiligheid. Daarna worden de twee beschouwde verwerkingsroute beknopt vergeleken.

[5] De onderzoeksreactoren zijn de HFR te Petten en de HOR te Delft. De splijtstof van de onderzoeksreactoren wordt niet opgewerkt.

Regelgeving en verdragen

De belangrijkste verdragen m.b.t. non-proliferatie en beveiliging zijn:

- *Het IAEA statuut*, dat de basis vormt voor wereldwijde samenwerking bij alle toepassingen van nucleaire technieken.
- *Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT)*. Hierbij beloven naast de vijf bestaande kernwapenstaten, alle andere toegetreden staten geen kernwapens te verwerven. Ongeveer 190 staten zijn partij bij het NPT.
- *Het 'Additional protocol'*, een uitbreiding van het NPT. Dit is van kracht binnen de EU. Dit protocol is ontworpen om het IAEA de mogelijkheid te geven om sneller clandestiene activiteiten waar te laten nemen. Dit betreft niet alleen de faciliteiten van de splijtstofcyclus maar ook die van onderzoeksreactoren en anderen waar met kleine hoeveelheden splijtstof gewerkt wordt.
- *Het Euratom Verdrag*, dat alle vreedzame nucleaire activiteiten in de EU aan regels bindt. Euratom werkt hierbij samen met het IAEA.
- *De 'Convention on the Physical Protection of Nuclear Material' (CPPNM)*, dit verplicht 'contracting parties' zoals Nederland en Frankrijk om nucleair materiaal te beschermen tijdens transport over hun grondgebied.
- *De Guidelines van de Nuclear Supplyers Group*, die beperkingen aan partijen oplegt aan de overdracht van gevoelige technologieën, zoals verrijking en opwerking.

De verdragen leiden tot internationale inspecties op de civiele nucleaire activiteiten door Euratom en het IAEA. Men spreekt in dat verband vaak van internationale 'safeguards'; maatregelen om te verifiëren of staten voldoen aan hun verplichting om nucleaire materialen niet te gebruiken voor toepassingen gerelateerd aan kernwapens.

Er zijn in de afgelopen decennia initiatieven gestart die het NPT bouwwerk moeten aanvullen. Belangrijk zijn resolutie UNSCR 1540 en het zogenoemde PSI. Ze zijn vooral gericht op het actiever benaderen van het probleem van illegale transporten van materiaal dat gebruikt kan worden voor massavernietigingswapens of terreurwapens met beperkte fysieke impact zoals 'dirty bombs'.

Resolutie UNSCR 1540 tegen de dreiging van 'Weapons of mass destruction' (WMD)
Dit is de eerste unaniem aangenomen resolutie tegen dit soort dreigingen. Het gaat niet enkel over de materialen in de wapens maar ook over de middelen om ze bij hun doel te brengen (zoals raketten). Landen tonen via periodieke rapportages aan dat zij voldoen aan de bepalingen uit deze resolutie.

Proliferation Security Initiative (PSI)
Dit is een initiatief dat gezien wordt als een praktische aanvulling op UNSCR 1540. In dit initiatief werken vele landen samen bij het onderscheppen of voorkomen van

illegale transporten van WMD of grondstoffen en middelen. PSI kent geen formele verdragsorganisatie, maar er is wel een samenwerkingsovereenkomst.

Technische voorzieningen voor safeguards en beveiliging in de splijtstofcyclus

Safeguards

Er is toezicht op het naleven van internationale regels voor non-proliferatie en beveiliging, uitgeoefend door Euratom en het Atoomagentschap van de Verenigde Naties (het IAEA), dat zeker in de Europese Unie goed functioneert. Ook de nationale toezichthouder is hierbij betrokken.

Om voldoende zekerheid te geven dat het NPT-regime gehandhaafd wordt, zijn er technische safeguard maatregelen, in aanvulling op de procedurele kant:

- On-site inspecties door inspecteurs, periodiek, op korte termijn en ook onaangekondigd. De inspecteurs doen metingen in de omgeving van nucleaire installaties om eventueel niet-opgegeven activiteiten te ontdekken. Ook binnen de installaties hebben zij meetapparatuur tot hun beschikking.
- Controle van de boekhouding van nucleair materiaal, met review van de logboeken van faciliteiten en ondersteunende documenten.
- Metingen van nucleair materiaal (zoals gewicht, gamma's, neutronenstraling etc.)
- Bewaking met verzegelde optische apparatuur binnen bepaalde kijkhoeken. Als speciale handelingen worden verricht, zoals een splijtstofwisseling, wordt extra monitoring apparatuur geplaatst.
- Continue monitoring: o.a. van materiaalstromen middels stralingsmetingen, operationele data zoals druk, temperatuur of vermogen.
- Monstername en analyse van nucleaire materialen of uit de omgeving van de te inspecteren faciliteit.
- Het recht voor IAEA en haar inspecteurs om alle internationale communicatiesystemen te gebruiken, inclusief satellietverbindingen en andere vormen van telecommunicatie.
- Verificatie van het ontwerp op eigenschappen die relevant zijn in het kader van safeguards.

Beveiliging

De bedrijvers van nucleaire installaties moeten de beveiliging op orde hebben om ontvreemding van materiaal uit hun installaties te voorkomen. Er is de gebruikelijke fysieke beveiliging tegen inbraak en sabotage, maar daarnaast zorgvuldige selectie van personeel, om malversaties vanuit de organisatie te voorkomen. Bij veel installaties moet men zich tot op het ondergoed uitkleden en daarna bedrijfskleding aantrekken om toegang te krijgen tot gebieden waar met splijtstoffen wordt gewerkt. Er zijn vele detectiesystemen om ongemerkt

wegnemen van deze stoffen te voorkomen. De vereiste mate van beveiliging is proportioneel met het belang van de te beschermen processtap en de aard van de stoffen die moeten worden beveiligd. Zo treft men bij sommige faciliteiten zelfs bewapende beveiligers aan.

Naast de gewone technische veiligheidsanalyses, die rekening houden met mogelijke storingen en ongevallen in installaties, moeten er ook veiligheidsanalyses uitgevoerd worden, die rekening houden met acties van kwaadwillenden, zoals terroristen.

Tot nu toe is het enige geval waarin een gewapende aanval op een in bedrijf zijnde nucleaire faciliteit is geregistreerd, de overval door Russische militairen op de kerncentrale bij Zaporizja in Oekraïne, begin 2022. Internationale verdragen verbieden dergelijke aanvallen, maar deze zijn in oorlogssituaties blijkbaar niet uit te sluiten.

Vergelijking route ‘opwerking’ (route 1) met route ‘geen opwerking’ (route 2)

Niet alle materialen in de splijtstofcyclus zijn interessant voor illegaal opererende actoren die een kernwapen willen maken. Ertsen, uranium concentraten en lastig te hanteren vormen als uraniumhexafluoride zijn minder aantrekkelijk en vereisen veel bewerkingen, waarvoor uitgebreide faciliteiten nodig zijn. Interessanter zijn dan hoogverrijkt uranium en weapon-grade plutonium, maar beiden komen in de genoemde routes niet voor.

Route 1 (opwerking) omvat meer faciliteiten en meer trajecten waarlangs materiaal moet worden getransporteerd. Belangrijk is ook de aanwezigheid van afgescheiden plutonium en MOX op een beperkt aantal plekken. Maar ‘reactor-grade’ plutonium is praktisch ongeschikt voor het maken van een kernwapen.

Voor de Nederlandse situatie zijn er bij route 2 mogelijk meer faciliteiten en transporten benodigd op eigen (nationaal) grondgebied. Route 2 vereist een nieuwe stap, de conditionering van gebruikte splijtstof. Hierin wordt de gebruikte splijtstof gereed gemaakt voor interim opslag in containers en later eindberging in de diepe ondergrond. Als gekozen wordt voor route 2, zullen de faciliteiten voor route 1 gewoon blijven bestaan omdat Frankrijk en sommige andere landen ook gekozen hebben voor opwerking. In totaal zou dus bij keuze voor route 2, het aantal faciliteiten in Europa die gebruikte splijtstof hanteren, toenemen. Immers er zou een conditioneringsfaciliteit gebouwd en in bedrijf genomen moeten worden.

Achtergrondinformatie

Recycling van plutonium in geavanceerde reactoren en multi-recycling

Ten aanzien van een verdere vermindering van het proliferatierisico voor plutonium zijn er een aantal mogelijkheden om dit te bewerkstelligen. Een optie waar veel onderzoek naar wordt gedaan betreft het gebruik van plutonium in geavanceerde

kernreactortechnologieën, zoals Generatie IV, en in multi-recycling splijtstofcycli. Multirecycling is in feite een geavanceerdere vorm van route 1.

Multi-recycling van plutonium is een mogelijke oplossing om de kringloopeconomie verder te bevorderen en de nucleaire splijtstofcyclus te sluiten. Bij toepassing in lichtwaterreactoren heeft deze optie echter enkele beperkingen in verband met de degradatie van de Pu-isotopensamenstelling en de productie van actiniden.

De omzetting van alle Pu-isotopen en actiniden in splijtingsproducten met kortere halfwaardetijden kan aanzienlijk worden verbeterd door de invoering van geavanceerde reactorsystemen, zoals de gesmoltenzoutreactor (Molten Salt Reactor; MSR[6]). Dit type reactoren leent zich ook voor het gebruik van plutonium dat van lichtwaterreactoren is ontstaan. Onder andere binnen het recent gestarte project MIMOSA [10] wordt onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om o.a. plutonium via multi-recyclingscenario's toe te passen in MSR's.

Ook een eventuele toekomstige introductie van snel-spectrum reactoren ("Fast Reactors") laat toe het plutonium en veelal ook het verarmd uranium afkomstig van eerdere verrijking te hergebruiken en om te zetten naar bruikbare splijtstof. Op die wijze ontstaat een nagenoeg onuitputtelijke hoeveelheid nucleair materiaal die kan worden gebruikt als splijtstof. Met dit type reactoren is in het verleden reeds kennis en ervaring opgedaan in Frankrijk (Phénix en Superphénix), de Russische Federatie (BN-600 en BN-800), en in Japan, China en India. Ook Nederland heeft onderzoek verricht naar de toepassing van snelle reactoren in het voortijdig beëindigde Kalkar project.

Met het oog op de eventuele toekomstige inzet van kernenergie in Nederland verdient het aanbeveling om deel te blijven nemen aan onderzoeksactiviteiten op het gebied van geavanceerde reactoren en splijtstofcycli, om zodoende ook inzicht te blijven houden en bij te dragen aan optimalisatie van het grondstofgebruik en de vermindering van proliferatie-risico's ten aanzien van het gebruik van plutonium.

Plaatsing van splijtbaar materiaal in de eindberging

In welke eindvorm de producten van de eindverwerking van gebruikte splijtstof ook zullen zijn, de splijtstofcyclus eindigt met de eindberging. Hierbij zijn een aantal fasen te onderscheiden:

1. De berging als 'actieve' berging: met tunnels waarin transportbewegingen plaatsvinden.
2. De berging in fase van 'terugneembaarheid': de tunnels zijn nog toegankelijk maar er vinden geen transportbewegingen plaats. Deze fase is er om het gedrag van de eindberging een tijd te kunnen volgen en het materiaal terug te kunnen halen wanneer daar reden toe is (gewijzigd beleid, nieuwe verwerkingstechnieken, problemen etc.).
3. De berging na afsluiting, opgevuld is deze dan een definitieve berging geworden.

[6] http://www.janleenkloosterman.nl/intermediair_20110603.php

Bij route 2 zal er in de eerste fase gebruikte splijtstof in de eindberging gebracht worden. Verificatie moet aantonen, dat ‘lege’ transportmiddelen, die de berging verlaten, inderdaad leeg zijn om onttrekking van splijtstof te voorkomen. Bij route 1 zal er ook controle nodig zijn, maar bij het verglaasde afval van route 1 is er weinig reden voor ontvreemden van dit warmteproducerend en hoogradioactieve afval; het bevat geen winbare hoeveelheden uranium en plutonium.

Gezien het niveau van de technische en organisatorische veiligheidsvoorzieningen van de installaties van de splijtstofcyclus die reeds in [3], [4] en [5] werden genoemd en nog steeds op peil zijn, wordt geconcludeerd dat de kans op ontvreemding van splijtbare materialen zeer gering is en geen specifieke voorkeur van wel of niet opwerken oplevert. Dit geldt ook voor de transporten van de bijbehorende materialen.

2.2.3. Aspect beschikbaarheid opwerkingscapaciteit

De gebruikte splijtstof uit de kerncentrale Borssele wordt opgewerkt door de firma Orano, in de opwerkingsfabriek te La Hague, Frankrijk. In de wereld zijn meer opwerkingsfaciliteiten in bedrijf en ontwikkeling, maar de faciliteit in Frankrijk is voor Nederland de meest voor de hand liggende optie voor opwerking. Het is ook zo dat sommige opwerkingsfabrieken speciaal voor bepaalde typen splijtstof zijn ingericht. De kerncentrale in Borssele is van het Lichtwatertype (LWR) en de gebruikte splijtstof uit Borssele zal dus alleen in daarvoor geschikte fabrieken kunnen worden opgewerkt.

Tabel 1: Wereldwijd commercieel beschikbare opwerkingscapaciteit voor gebruikte splijtstof uit civiele toepassingen [11]

Type brandstof	**Locatie opwerkingsfaciliteit**	**Opwerkingscapaciteit in ton per jaar**
LWR splijtstof	Frankrijk, La Hague	1700
	Rusland, Ozersk (Mayak)	400
	Japan, Rokkasho (*in aanbouw*)	800
Andere typen splijtstof	India (PHWR)	260
Totale capaciteit:		3160

Voor de toekomst van de verwerkingsroute ‘opwerking’ is het van belang wat de ontwikkeling van de opwerkingscapaciteit in Frankrijk zal zijn en of die beschikbaar blijft voor ‘buitenlandse’ klanten, zoals exploitanten van kerncentrales in Nederland. Daarom is het beleid van de aanbieder Orano en de Franse overheid bestudeerd.

De firma Orano presenteert zich als een wereldspeler op het gebied van nucleaire dienstverlening voor de nucleaire splijtstofcyclus inclusief mijnbouw, transport, verrijking, splijtstofproductie, recycling van gebruikte splijtstof en de productie van MOX. In alle uitingen van het bedrijf is duidelijk dat het zijn binnenlandse en buitenlandse klanten wil blijven bedienen met deze zaken.

Frankrijk zal kernenergie nog vele decennia in zijn 'energiemix' houden. In het meerjarige energieplan van Frankrijk (2019-2023 MEP[7]) is aangegeven dat het land in 2050 een CO_2-neutrale elektriciteitsproductie wil hebben met de helft van de productie met hernieuwbare bronnen en de andere helft met kernenergie. En in het licht van de huidige energiecrisis ten gevolge van de oorlog aan de oostgrens van de EU, lijkt Frankrijk het belang van nucleair nog groter te achten. In het beleid van de Franse overheid wordt opwerking van gebruikte splijtstof gezien als één van de middelen om de hoeveelheid en schadelijkheid van radioactief afval te verminderen. Deze optie moet volgens het MEP zeker tot 2040 beschikbaar blijven.

In het Franse beleid [zie o.a.[12]] is opgenomen dat nog een aantal 1300 MW reactoren aangepast moeten voor het gebruik van MOX (naast de 900 MW reactoren die dat al zijn) en dat er onderzoek moet worden (blijven) gedaan naar multi-recycling van splijtstoffen in PWRs. Recycling in snelle reactoren (FNR) zou in feite nog efficiënter zijn, maar omdat de bronnen van natuurlijk uranium zeer groot zijn en tot circa 2050 beschikbaar tegen relatief lage kosten, is er minder haast met realiseren van een FNR en richt men zich voorlopig op multi-recycling in PWRs.

Er zijn geen tekenen dat de Franse staat van plan is de buitenlandse dienstverlening van Orano te blokkeren of te beperken. In die zin lijkt de beschikbaarheid van de opwerkingscapaciteit voor Nederlandse klanten de komende decennia stabiel te blijven.

Er is wettelijk vastgelegd, dat afval uit o.a. opwerking van buitenlandse splijtstof terug dient te keren naar het land waar de splijtstof vandaan komt. En dat hiervoor bilaterale verdragen tussen landen voor moeten worden gesloten, waarin o.a. geregeld is binnen welke termijn dit moet gebeuren. De eis van bilaterale overeenkomsten, is ook in lijn met Europese eisen, te vinden in Richtlijn 2011/70/Euratom [13].

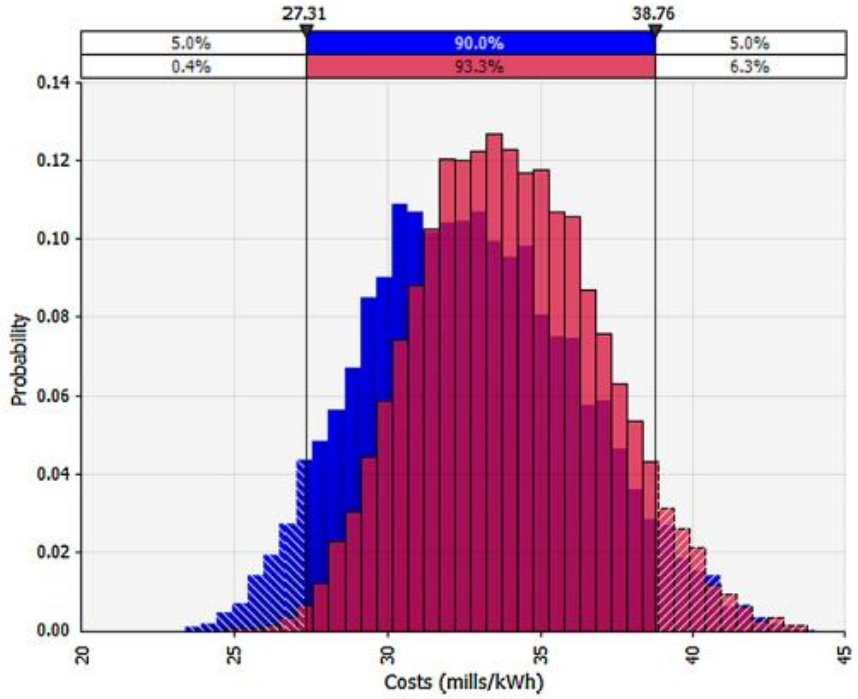
2.2.4. Aspect economie

Een recente studie [26] beschrijft een gedetailleerd en vergelijkend overzicht van economische indicatoren voor de open splijtstofcyclus waarbij gebruikte splijtstoffen niet worden opgewerkt, en de gesloten splijtstofcyclus waarbij materialen, met name uranium en plutonium, worden gerecycled.

[7] Multi-annual Energy Plan, MEP. Het huidige plan is het 2019-2023 MEP.

Deze studie bevestigt dat de kapitaalkosten van nieuwe reactoren relatief hoog zijn in vergelijking met de totale kosten, waaronder ook opslag en eventuele opwerking van gebruikte splijtstoffen. Bovendien leiden onzekerheden in de voorziene totale kosten tot hoge kosten (rente) om de investering te financieren. De kapitaalkosten zijn daarmee in hoge mate dominant voor de LCOE, *Levelised Cost Of Electricity*[8], voor kernenergie. De onzekerheid in deze kostenfactor voor kernenergie is groter dan de totale verwachte kosten van de splijtstofcyclus, die in verschillende studies doorgaans worden geraamd op minder dan 5 tot maximaal 20% van de totale kosten.

Dit laatste is gerepresenteerd in onderstaande Figuur 2, waarin een vergelijking is gegeven van de totale elektriciteitsopwekkingskosten (LCOE) van kernenergiesystemen inclusief onzekerheden voor de open splijtstofcyclus (blauw) en de gesloten cyclus (rood) [14]. De figuur laat zien dat gemiddeld de kosten voor de gesloten cyclus een aantal procenten hoger ligt dan voor de open cyclus, maar ook dat de onzekerheden in deze kosten een grote mate van overlap vertonen.



Figuur 2: Totale elektriciteitsopwekkingskosten (LCOE) van kernenergiesystemen inclusief onzekerheden voor de open cyclus (blauw) en de gesloten cyclus (rood)

[8] Levelized Cost of Energy (LCOE): een maat voor de totale kosten van de bouw, exploitatie en ontmanteling van een centrale gedurende de veronderstelde levensduur gedeeld door de totale energieproductie.

Opwerking en splijtstofrecycling kan op de korte termijn doorwerken in de exploitatiekosten voor reactorexploitanten, met invloed op de rentabiliteit van kerncentrales. Uit de analyses blijkt echter, dat de keuze voor een open of gesloten splijtstofcyclus een beperkte invloed heeft op de economische aspecten, zoals uitgedrukt door de LCOE.

Dit gegeven maakt het lastig op basis van economische overwegingen alleen een onderscheid te maken tussen de keuze van de back-end van de splijtstofcyclus. Gesloten cycli vereisen op korte termijn aanzienlijke kapitaalinvesteringen in installaties voor de opwerking van gebruikte splijtstof, indien deze installaties nog gebouwd moeten worden of als ze ingrijpend aangepast moeten worden. In de Europese situatie zijn deze echter al aanwezig. Voor de open cyclus is er een lange periode van relatief goedkope tussentijdse opslag benodigd, voordat de kosten van geologische opberging worden gemaakt. Echter zijn er wel lange-termijn kosteneffecten, omdat niet-opgewerkte gebruikte splijtstof meer ruimte inneemt in de eindberging dan het verglaasde hoogradioactieve afval uit opwerking. In de In de praktijk zal een uitbater van kerncentrales te maken hebben met de contractvoorwaarden voor opwerking (indien van toepassing) en de financiële voorwaarden in eigen land voor de interim opslag en eindberging van radioactief afval in de vormen die bij de gekozen verwerkingsroute behoren. Het geheel van deze zaken bepaalt welke route netto het voordeligst is voor de uitbater van kerncentrales.

In het algemeen kan dan ook worden gesteld dat de keuze van de back-end strategie niet zozeer afhangt van economische factoren, maar meer van andere factoren, zoals technologische gereedheid (‘Technological Readiness Level’; TRL), reeds aanwezige infrastructuur, (beleid op) zelfvoorzienendheid en duurzaamheid.

2.2.5. Advies m.b.t. de actualisering van het beleidskader t.a.v. opwerking

Op basis van de evaluatie van de uitgangspunten van het beleidskader, is er momenteel geen reden het beleidskader met betrekking tot de eindverwerking van gebruikte splijtstof aan te passen.

Niettemin kan het nuttig zijn om periodiek de diverse beschikbare opties voor de verwerking van splijtstof te evalueren, inclusief de meer geavanceerde splijtstofcyclusopties. Hierbij kan rekening gehouden worden met technische innovaties en andere nieuwe inzichten. Dergelijke studies kunnen uiteenlopende instrumenten gebruiken zoals splijtstofcyclusmodellen, levensloopanalyses (Life Cycle Analysis; LCA), technisch-economische beoordelingen, afval- en milieuevaluaties zoals BBT (beste beschikbare technologie), etc. Dergelijke geïntegreerde beoordelingen zijn van grote waarde voor het begrip van geoptimaliseerde trajecten voor de opwekking van koolstofarme energie, waaronder kernenergie.

3. Impact van de keuze voor wel of niet-opwerken - rekenvoorbeeld

In dit hoofdstuk wordt met behulp van een rekenvoorbeeld een kwantitatieve invulling gegeven van de onderzoeksvraag, wat de consequenties zijn van het wel of niet opwerken van gebruikte splijtstof voor de opslagcapaciteit bij COVRA, uitgaande van een scenario met twee extra kerncentrales in Nederland. Hierbij ligt de focus op de productie van hoogradioactief afval. Daarnaast zal ook de impact op de diepe geologische eindberging kwalitatief worden nagegaan.

Het elektrisch vermogen van dit extra nucleair vermogen wordt gesteld op 3000 MWe. In de voorliggende analyse wordt niet ingegaan op de keuze voor een bepaalde fabrikant, maar wel dat het moderne lichtwaterreactoren betreft.

Voor de scenario's met of zonder opwerking van gebruikte splijtstof kunnen de twee routes onderscheiden worden zoals eerder schematisch weergegeven in *Figuur 1.* Route 1 vertegenwoordigt hierin de route met opwerking van de gebruikte splijtstof, die overeenkomt met de huidige route voor verwerking van gebruikte splijtstof van de bestaande kerncentrale. Route 2 veronderstelt dat de gebruikte splijtstof direct wordt opgeslagen en dan beschouwd wordt als hoogradioactief afval.

Er zijn voor nieuw te bouwen kerncentrales diverse varianten van de splijtstofcyclus mogelijk. Echter in deze beschouwing beperken we ons tot bovengenoemde routes 1 (opwerking) en 2 (niet opwerken).

De keuze voor wel of niet opwerken van gebruikte splijtstof heeft consequenties voor de soorten en hoeveelheden radioactief afval die worden geproduceerd. In dit hoofdstuk is een inschatting gemaakt van die hoeveelheden afval. Tevens is ingegaan op enkele praktische consequenties van de mogelijke keuzes.

Bij de vergelijking tussen scenario 1 opwerking en scenario 2 niet-opwerken voor 3000 MW nieuw kernenergievermogen, is de rol van de bestaande kerncentrale niet relevant. Immers, er wordt aangenomen dat bij beide scenario's er niets verandert aan de huidige bedrijfsvoering (met opwerking) van de bestaande kerncentrale. Die bedrijfsvoering is dus niet onderscheidend bij de vergelijking van de twee scenario's. Zodoende wordt de bestaande centrale hier niet beschouwd.

3.1. Gemaakte aannames

Voor de bepalingen van de hoeveelheden splijtstof die tijdens het bedrijven van kernreactoren benodigd zijn en afval die worden geproduceerd zijn de volgende globale aannames gedaan:

- Er is uitgegaan van twee ongespecificeerde moderne lichtwaterreactoren met elk een netto vermogen van 1500 MWe, in totaal gaat het om 3000 MWe vermogen;
- De verwachte levensduur van de reactoren bedraagt 80 jaar;
- Bij de route opwerking gebruiken de kerncentrales allen een vergelijkbare splijtstofmix, die overeenkomt met wat de huidige kerncentrale gebruikt;
- De productie van hoogradioactief afval of gebruikte splijtstof wordt verondersteld proportioneel te zijn met het reactorvermogen;

De diverse soorten afval dienen te worden opgeslagen in daartoe geschikte afvalvaten. Met inachtneming van de huidige wijze van afvalbeheer zijn in paragraaf A.2 diverse opslagmogelijkheden genoemd. Deze zijn niet uitputtend en geven slechts een indicatie van de mogelijkheden.

3.2. Hoeveelheden eindproduct

Met de hierboven geschetste gegevens en aannames is een schatting gemaakt van de hoeveelheden hoogradioactief afval afkomstig van twee lichtwaterreactoren met elk een netto vermogen van 1500 MWe, voor Route 1 – opwerking van gebruikte splijtstof- en Route 2 – directe opslag van gebruikte splijtstof. Hierbij is gebruik gemaakt van openbare literatuurwaarden.

Route-1 opwerking van gebruikte splijtstof

De waarden voor hoeveelheid hoogradioactief afval (HRA) uit opwerking zijn ontleend aan het recent verschenen inventarisrapport van COVRA [15]. Voor deze route bestaat het HRA uit CSD-V vaten voor verglaasd warmteproducerend afval en CSD-C vaten voor gecompacteerd metallisch afval.

Bij de analyse van COVRA is uitgegaan van 3200 MWe opgesteld vermogen wat resulteert in een productie van HRA van 37 m^3 per jaar en na 80 jaar tot een totaal van 2924 m^3 (volume inclusief de containers).

Bij de aanname van een opgesteld vermogen van 3000 MWe uit het voorliggende rapport zou dit leiden tot 34 m^3 per jaar HRA en na 80 jaar een totaal van 2740 m^3.

Deze getalswaarden kunnen verschillen bij toepassing van andere typen opslagcontainers. Een overzicht van de typen containers die bij de berekeningen zijn beschouwd is gegeven in Appendix A.2. Hierin vindt men onder andere details over de CSD-V vaten voor verglaasd warmteproducerend afval en CSD-C vaten voor gecompacteerd metallisch afval.

In de opwerkingsfabriek wordt gebruikte splijtstof in partijen verwerkt. Er zit enige tijd tussen het afleveren van gebruikte splijtstoffen bij de opwerkingsfabriek in Frankrijk en de terugkeer van afvalstoffen uit de opwerking naar Nederland en

aflevering bij de COVRA. Zodoende zal er ook nog enige tijd na sluiting van alle kerncentrales dit type afval bij COVRA worden aangeleverd.

Het aantal CSD-C vaten met gecompacteerd metallisch afval is momenteel bij benadering gelijk aan het aantal CSD-V vaten. Echter, vanwege hun geringe warmteproductie behoeven de CSD-C vaten geen koeling en kunnen in een aparte silo worden opgeslagen, zoals ook nu het geval is. Het is soms mogelijk om in overleg met de dienstverlener voor opwerking, CSD-V vaten uit te 'ruilen' voor een bepaalde hoeveelheid CSD-C vaten. Dat kan bepaalde keuzes voor de inrichting van HABOG-modules logisch maken. De details daarvan vallen buiten het bestek van dit rapport.

De inzet van twee 1500 MWe lichtwaterreactoren gedurende 80 jaren, resulteert derhalve in hoeveelheden hoogradioactief opwerkingsafval die de vergroting van de capaciteit van het HABOG zullen vereisen. HABOG is een modulair uitbreidbaar gebouw, zodoende is dit technisch mogelijk.

Route-2 niet-opwerken van gebruikte splijtstof

Indien de gebruikte splijtstof *niet* wordt opgewerkt zullen de resulterende splijtstofelementen op enigerlei wijze moeten worden opgeslagen en als HRA te worden beschouwd. Hiervoor zijn de volgende opties mogelijk:

- Natte opslag in splijtstofopslagbassins; dit kan lokale opslag betreffen nabij de reactoren of centrale opslag vergelijkbaar met de Zweedse Clab faciliteit (vgl. Figuur *6* in paragraaf A.2.6);
- Droge opslag in splijtstofopslaghallen. In Nederland heeft een centrale opslagfaciliteit beheerd door COVRA de voorkeur boven een lokale opslagfaciliteit nabij de reactor.

In Nederland zijn nog geen faciliteiten voor de centrale opslag van gebruikte splijtstofelementen van kerncentrales aanwezig[9]. Indien wordt geopteerd voor de directe opslag van gebruikte splijtstof zouden dergelijke faciliteiten beschikbaar moeten komen.

Bij de constructie van een centrale faciliteit voor de droge opslag van gebruikte splijtstofelementen is het van belang na te gaan in welk type afvalpakket de splijtstofelementen worden geplaatst. De verschillen in op te slaan volume voor de diverse typen opslagvaten kunnen significant zijn.

Voor een afschatting van de hoeveelheid gebruikte splijtstof die gedurende 80 jaar wordt geproduceerd door twee kerncentrales met 1500 MWe elk, is gebruik gemaakt van beschikbare informatie over de nieuw gebouwde EPR in Finland (met een vermogen van 1600 MWe [16]). Met inachtneming van een opschalingsfactor

[9] Er is in het HABOG bij COVRA wel ruimte gereserveerd voor gebruikte splijtstof van de onderzoeksreactoren in Delft (de HOR) en Petten (de HFR).

voor het vermogen van 3000/1600 zou de inzet van twee 1500 MWe kerncentrales resulteren in een totaal aantal gebruikte splijtstofelementen van circa 9450 stuks.

Afhankelijk van de wijze van verpakking van deze splijtstofelementen voor opslag (zie ook Bijlage A.2.6) kan het volume aan containers worden berekend dat nodig is voor de opslag van gebruikte splijtstof:

- Opslag in SKB PWR containers (4 gebruikte splijtstofelementen per container): circa 91 m^3 per jaar, en 7630 m^3 totaal inclusief laatste kernbelading;
- Opslag in CASTOR V/19 containers (19 gebruikte splijtstofelementen per container): circa 165 m^3 per jaar, en 13800 m^3 totaal inclusief laatste kernbelading.

Samenvattend

Tabel 2 geeft een samenvattend overzicht van de volumina hoogradioactief afval en gebruikte splijtstof afkomstig uit de inzet van twee nieuwe kerncentrales met elk een vermogen van 1500 MWe voor de route met opwerking (Route 1) en zonder opwerking (Route 2) van de gebruikte splijtstof, na 80 jaar bedrijf. De volumina zijn indicatief en zullen verschillend zijn voor andere wijzen van verpakking van het hoogradioactieve afval.

Tabel 2: Indicatieve hoeveelheden hoogradioactief afval bij opwerking en directe opslag, afkomstig van twee 1500 MWe lichtwaterreactoren.

Afvaltype		**Opwerking (Route 1)**	**Geen opwerking (Route 2)**
Hoogradioactief afval (CSD-V+CSD-C)			
Volume per jaar [m^3/jaar]		34	
Totaal volume [m^3]		2740	
Gebruikte splijtstof			
Opslag in SKB-PWR-4*	Volume per jaar [m^3/jaar]		90
	Totaal volume [m^3]		7630
Opslag in CASTOR V/19**	Volume per jaar [m^3/jaar]		165
	Totaal volume [m^3]		13800

* 4 gebruikte splijtstofstaven per afvalpakket

** 19 gebruikte splijtstofstaven per CASTOR vat

3.3. Impact op de eindberging

De inzet van nieuwe kerncentrales in Nederland betekent op termijn dat ook meer afvalpakketten in een nog aan te leggen diepe geologische eindbergingsfaciliteit zullen worden geplaatst. Hierop dienen het ontwerp en de veiligheidsevaluaties van een dergelijke faciliteit te worden aangepast.

De hoogradioactieve afvalcategorieën die binnen het eerder in Nederland uitgevoerde programma voor eindberging (zie ook paragraaf A.3) zijn beschouwd betroffen verglaasd afval, gecompacteerd metallisch afval en gebruikte splijtstoffen van onderzoeksreactoren.

Voor eindbergingsconcepten in steenzout is een aantal scenario's geanalyseerd waarbij werd uitgegaan van hoeveelheden hoogradioactief afval afkomstig van een nieuw kernergiepotentieel van 3000 MWe, bijvoorbeeld in de PROSA studie [17].

Binnen de diverse onderzoeksprogramma's is de plaatsing van (niet-opgewerkte) gebruikte splijtstoffen van vermogensreactoren in de Nederlandse concepten voor eindberging niet in detail beschouwd. Wel is binnen het OPERA programma voor een aantal kernenergiescenario's nagegaan welke nuclideninventarissen van hoogradioactief afval in een eindbergingsfaciliteit terecht zouden komen, gegeven:

- Een significante toename van het nucleair vermogen in Nederland;
- De inzet van diverse type reactoren, zoals Generatie-III lichtwaterreactoren, hoge-temperatuur gasgekoelde reactoren, snelle reactoren, en gesmolten zoutreactoren.

De resultaten van deze studie [18] zijn echter niet verder gebruikt in nadere beschouwingen van de lange-termijnveiligheid van een eindbergingsfaciliteit.

Eindberging in steenzout

In het verleden is voor de eindberging van radioactief afval in steenzout onderzoek gedaan aan een aantal kernenergiestrategieën waarbij o.a. werd uitgegaan van een uitbreiding van het aantal kerncentrales met 3000 MWe nieuw vermogen (bv. [38], [39], [17]). In het kader van het huidige voornemen van het kabinet om de mogelijkheid te onderzoeken voor de plaatsing van extra nucleair vermogen van 3000 MWe kunnen deze studies een waardevolle bron van informatie zijn.

Sinds het CORA-programma (2001) is in beperkte mate onderzoek gedaan naar eindberging in steenzout. Internationaal zijn op dit gebied wel significante vorderingen gemaakt, met name in Duitsland en de VS. Bij een evaluatie van de stand van de kennis op het gebied van eindbergingen in steenzout is een groot aantal technische aspecten geïdentificeerd die in het Nederlandse concept opnieuw moeten worden bezien en in detail onderzocht, zoals het veiligheidsconcept, de veiligheidsstrategie, het ontwerp van de faciliteit, de karakteristieken van het afval, de conditionering van de afvalcontainers, de analyses van de lange-termijnveiligheid e.a. Deze aspecten en aanbevelingen voor nader onderzoek zijn beschreven in [19].

Eindberging in Boomse Klei

Ook binnen het recentelijk uitgevoerde OPERA programma [20] is de plaatsing van gebruikte (niet-opgewerkte) splijtstoffen van vermogensreactoren in een eindbergingsfaciliteit in Boomse Klei niet beschouwd. Daarnaast is het onderzoek in OPERA gebaseerd op een concept waarbij is uitgegaan van de kerncentrale Borssele als enige vermogensreactor. Wat derhalve geldt voor eindberging in steenzout geldt ook voor een eindberging in Boomse Klei: alle aspecten van het bestaande eindbergingsconcept dienen opnieuw te worden beschouwd bij plaatsing van significant meer afvalvaten dan voorzien voor het OPERA concept, en/of plaatsing van afvalvaten met gebuikte splijtstoffen.

Impact van keuze voor route-1 opwerking of route-2 geen opwerking op een eindberging

Een uitbreiding van het nucleair vermogen in Nederland met 3000 MWe, en de opties van het al of niet opwerken van gebruikte splijtstof heeft voor een toekomstige eindbergingsfaciliteit een drietal globale consequenties:

- De capaciteit van de eindberging dient te worden uitgebreid, ongeacht de gekozen route;
- In geval van route-2 moet deze qua volume meer worden uitgebreid dan bij route-1. Dit is technisch gezien mogelijk en de werkelijke ruimte die in de ondergrond nodig is, wordt bepaald door allerlei keuzes omtrent de manier van plaatsen in de ondergrond.
- De gevolgen van plaatsing van gebruikte splijtstoffen van vermogensreactoren i.p.v. opwerkingsproducten in een eindberging in Nederland dient te worden geëvalueerd.

Indien gebruikte splijtstoffen niet worden opgewerkt dienen ten behoeve van de eindberging ervan alle aspecten van de bestaande Nederlandse eindbergingsconcepten opnieuw te worden bezien en in detail onderzocht, zoals de veiligheidsstrategie, het veiligheidsconcept, het ontwerp van de faciliteit, de karakteristieken van het afval, de conditionering van de afvalcontainers, de thermische impact op de eigenschappen van het gastgesteente, en de analyses van de langetermijnveiligheid.

4. Conclusies

Actualisering beleidsstandpunten

De voorliggende studie komt op basis van literatuuronderzoek tot de conclusie, dat het beleidsstandpunt van Kst 32 645 met betrekking tot de verwerking van gebruikte splijtstof gehandhaafd kan blijven. Deze conclusie is voor de diverse relevante aspecten toegelicht in hoofdstuk 2, waar dit in detail is besproken.

Hierbij is aandacht gegeven aan milieu, veiligheid en non-proliferatie en economische aspecten.

In aanvulling op het beleidsstandpunt is ook de beschikbaarheid van opwerkingscapaciteit beschouwd. De voor Nederland relevante capaciteit is aanwezig bij Orano in Frankrijk. Op basis van de studie van het beleid van de Franse staat en van de firma Orano, wordt geconcludeerd dat de beschikbaarheid van de opwerkingscapaciteit voor Nederlandse klanten voor de komende decennia stabiel lijkt te blijven.

Impact van de keuze van wel of niet opwerken op het beheer van radioactief afval

Uitgaande van de bouw van twee kerncentrales met groot vermogen is nagegaan wat dat betekent voor de verwerking van gebruikte splijtstof. Hierbij zijn twee opties onderzocht: (1) opwerking van gebruikte splijtstof, in analogie met het huidige beleid, en (2) de overweging gebruikte splijtstof niet op te werken. De vraag hierbij was met name wat dit voor gevolg heeft voor de benodigde opslagcapaciteit bij COVRA, en uiteindelijk voor de plaatsing van het hoogradioactieve afval in een diepe geologische eindbergingsfaciliteit. De focus ligt daarbij op gebruikte splijtstof uit lichtwaterreactoren.

Bij toepassing van de strategie van directe opslag in Nederland dient de niet-opgewerkte gebruikte splijtstof gedurende enkele decennia bovengronds te worden opgeslagen. In Nederland zijn hiervoor nog geen faciliteiten aanwezig. Indien wordt geopteerd voor de directe opslag van gebruikte splijtstof zouden dergelijke faciliteiten beschikbaar moeten komen.

Bij de constructie van een centrale faciliteit voor de droge opslag van gebruikte splijtstofelementen is het van belang na te gaan in welk type afvalpakket de splijtstofelementen worden geplaatst. De verschillen in op te slaan volume voor de diverse typen opslagvaten kunnen significant zijn.

Na conditioneren van de opslagvaten voor de diverse categorieën hoogradioactief afval dienen deze in een geologische eindbergingsfaciliteit te worden geplaatst. In geval van afzien van opwerken, dienen de bestaande veiligheidsevaluaties voor eindberging te worden gerevalueerd, omdat de voorgaande evaluaties uitgingen van de berging van afval uit opwerking.

Lijst van tabellen

Tabel 1: Wereldwijd commercieel beschikbare opwerkingscapaciteit voor gebruikte splijtstof uit civiele toepassingen []....25
Tabel 2: Indicatieve hoeveelheden hoogradioactief afval bij opwerking en directe opslag, afkomstig van twee 1500 MWe lichtwaterreactoren. 32
Tabel 3: Vergelijking van milieu-indicatoren voor de open (OTC) en gedeeltelijk gesloten(TTC) splijtstofcycli in studies in Frankrijk en het VK 37
Tabel 4: Karakteristieken van de CSD-V en CSD-C vaten....45
Tabel 5: Karakteristieken van een CASTOR V/19 opslagvat voor gebruikte splijtstofelementen....48

Lijst van figuren

Figuur 1: Overzicht van de splijtstofcyclus met daarin twee routes voor de eindverwerking van gebruikte splijtstof 12
Figuur 2: Totale elektriciteitsopwekkingskosten (LCOE) van kernenergiesystemen inclusief onzekerheden voor de open cyclus (blauw) en de gesloten cyclus (rood) 27
Figuur 3: Relatieve bijdrage van de diverse stappen van de splijtstofcyclus aan geselecteerde milieueffectindicatoren voor het Franse reactorpark (TTC) 39
Figuur 4: Vergelijking tussen de OTC en TTC van geselecteerde milieu-effectindicatoren voor het Franse PWR reactorpark bij gelijke elektriciteitsproductie 40
Figuur 5: Vergelijking van de afvalvolumes, de voetafdruk van de eindberging, en de uitgegraven volumes in de eindberging voor het TTC en het OTC, berekend voor het Franse reactorpark 41
Figuur 6: Overzicht van de Zweedse centrale faciliteit voor de opslag van gebruikte splijtstoffen, Clab. 46
Figuur 7: Voorbeeld van een opslagvat voor 4 gebruikte UO_2 PWR-splijtstofelementen – SKB PWR opslagvat 47
Figuur 8: Impressie van het CASTOR V/19 vat en de plaatsing ervan in een opslagfaciliteit. 48
Figuur 9: Principe van een terugneembare berging voor hoogradioactief afval in steenzout 49
Figuur 10: OPERA concept voor de eindberging van radioactief afval in Boomse klei 51

Bijlage A Milieuimpact splijtstofcycli

Recentelijk zijn in een aantal studies ([21, 22, 23], 24, 25, 26) milieuaspecten vergeleken voor een aantal splijtstofcycli, waaronder ook:

- De, “open splijtstofcyclus” of “Once Through Cycle” (OTC), zonder opwerking van de gebuikte UO_2 splijtstof. Verbruikte UO_2-splijtstofelementen worden, na enkele jaren te zijn afgekoeld in een tussentijdse opslagplaats, geconditioneerd in een container voor plaatsing in een geologische eindberging.
- de “gedeeltelijk gesloten splijtstofcyclus of “Twice Through Cycle” (TTC). In deze cyclus worden gebruikte UO_2-splijtstofelementen opgewerkt, waarbij teruggewonnen plutonium en uranium worden hergebruikt in MOX-splijtstof, die éénmaal in de huidige reactoren wordt gebruikt. De verbruikte MOX-splijtstofelementen volgen dezelfde route als de verbruikte UO_2-splijtstof in de open cyclus, d.w.z. tussentijdse opslag en conditionering in een container voor plaatsing in een geologische eindberging.

De OTC en de TTC komen overeen met, respectievelijk, Route 2 en Route 1 in Figuur *1*.

De belangrijkste uitkomsten van bovengenoemde studies zijn hieronder samengevat, met name over een vergelijking van milieuaspecten voor de open en gedeeltelijk gesloten splijtstofcycli.

A.1. Milieu-indicatoren

Een uitvoerige analyse van de milieubelasting van het Franse nucleaire reactorpark door CEA (Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives) is gerapporteerd in [22] en [23]. Voor deze studie zijn een aantal belangrijke generieke milieu-indicatoren beschouwd, waarvoor de impact op het milieu zijn bepaald voor de open (OTC) en de gedeeltelijk gesloten (TTC) splijtstofcycli. Deze studies zijn aangevuld met recente rapporten van Paullilo *et al*. op basis van ervaringen met splijtstofcycli in het Verenigd Koninkrijk [24]. De splijtstofcycli en de indicatoren die zijn gebruikt om de milieuvoetafdrukken in de Franse en Britse studies te beoordelen, zijn vergelijkbaar (zie Tabel 3).

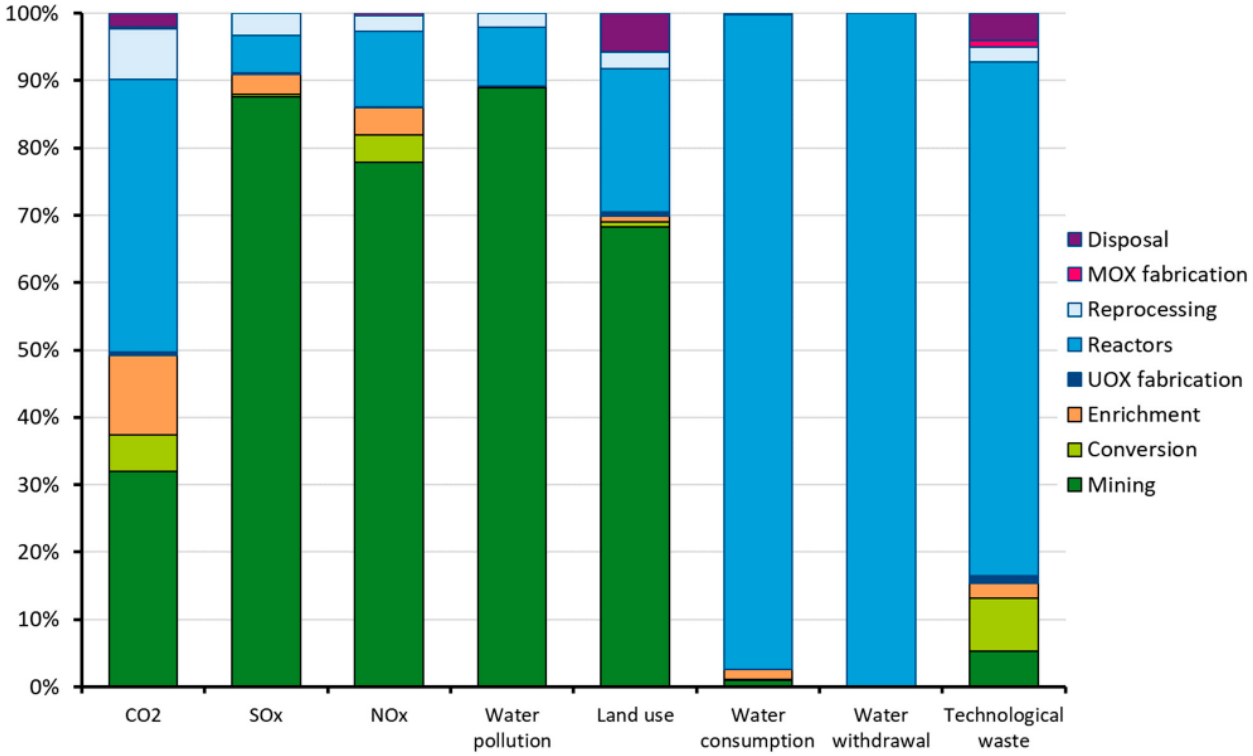
Tabel 3: Vergelijking van milieu-indicatoren voor de open (OTC) en gedeeltelijk gesloten(TTC) splijtstofcycli in studies in Frankrijk en het VK

Indicator	**Fr**	**VK**
Greenhouse gas emissions	√	√
Atmospheric pollution (SOx, NOx)	√	√
Water pollution	√	

Indicator	Fr	VK
Land use	√	
Water consumption and withdrawal	√	√
Technological waste	√	
Radioactive gaseous emissions	√	√
Radioactive liquid emissions	√	√
Solid radioactive waste	√	√
Repository footprint	√	
Acidification	√	√
Eutrophication	√	√
Photochemical ozone creation potential	√	√
Ecotoxicity	√	√
Human toxicity	√	√
Ozone depletion		√
Resource depletion, mineral, fossils and renewables		√

Resultaten van de Franse studie zijn samengevat in Figuur 3, met daarin de bijdragen van de afzonderlijke stappen in de splijtstofcyclus voor de verschillende indicatoren [23] voor de gedeeltelijk gesloten splijtstofcyclus (TTC). Deze figuur laat zien dat voor alle indicatoren, met uitzondering van waterverbruik en -onttrekking en de productie van technologisch afval, de front-end activiteiten, en in het bijzonder de uraniumwinning, bijdragen tot meer dan 70% voor elke indicator. Recycling (opwerking en MOX-splijtstoffabricage) heeft minder dan 15% effect op alle niet-radioactieve factoren. Radioactieve emissies worden gedomineerd door gasvormige emissies (53% radon uit mijnbouw, 45% edelgassen uit opwerking), terwijl tritium (~2% uit opwerking en reactoren) de vloeibare emissies domineert.

De broeikasgasemissies voor het back-end gedeelte van de splijtstofcyclus (d.w.z. opwerking en eindberging) blijken gering te zijn in vergelijking met de rest van de splijtstofcyclus, met name de winning, zuivering en verrijking van uranium.



Figuur 3: Relatieve bijdrage van de diverse stappen van de splijtstofcyclus aan geselecteerde milieueffectindicatoren voor het Franse reactorpark (TTC)

Uit de bovenstaande bevindingen kan worden vastgesteld dat de ecologische voetafdruk van kernenergie voornamelijk afhangt van front-end activiteiten van de splijtstofcyclus, en dan met name de mijnbouw in verband met de winning van uranium. Vermindering van de ecologische voetafdruk kan derhalve worden bewerkstelligd door:

- Verbetering van de intrinsieke impact door efficiëntere en schonere processen;
- Vermindering van de materiaalstroom in het front-end gedeelte van de splijtstofcyclus.

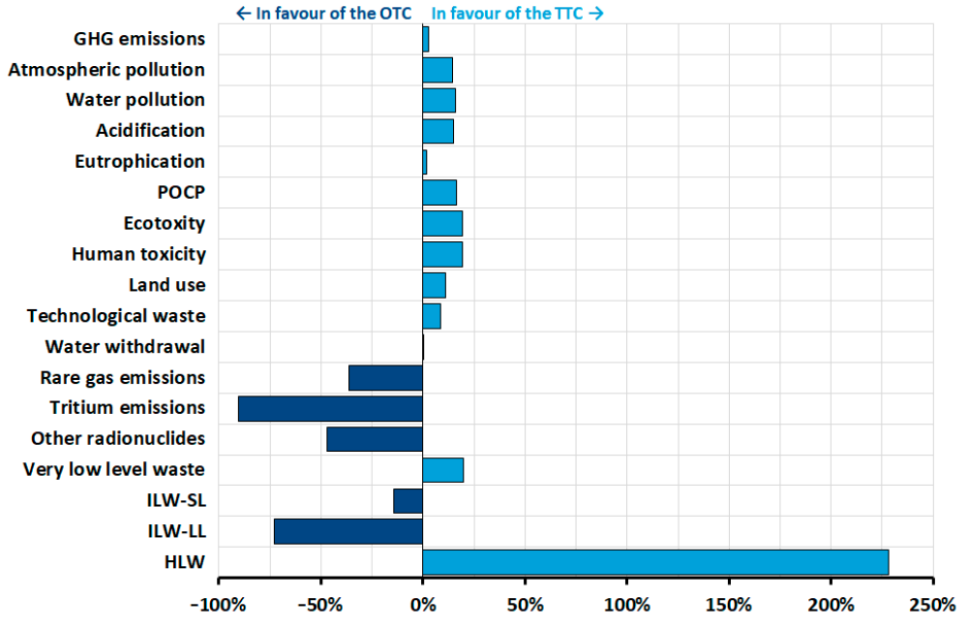
Vermindering van de materiaalstroom aan het front-end gedeelte van de splijtstofcyclus kan worden bereikt door toepassing van de gedeeltelijk gesloten splijtstofcyclus zoals die ook sinds 2014 wordt toegepast in de Borssele reactor. Daardoor kan worden bespaard op de benodigde hoeveelheid natuurlijk uranium en dus op de daarmee samenhangende mijnbouwactiviteiten.

Voor de gedeeltelijk gesloten splijtstofcyclus met enkelvoudige recycling van plutonium in thermische neutronenreactoren zoals die nu wordt toegepast, wordt ongeveer 11% meer elektriciteit geproduceerd per ton natuurlijk uranium. Als het opgewerkte uranium ook als splijtstof wordt gerecycled, kan per ton natuurlijk uranium nog eens 10% extra elektriciteit worden geproduceerd [21]. Volgens [27]

kan met recycling van zowel uranium als plutonium in de huidige reactoren tot 30% op de behoefte aan natuurlijk uranium worden bespaard.

In de gedeeltelijk gesloten splijtstofcyclus (TTC) wordt het grootste deel van het opgewerkte uranium (RepU – reprocessed uranium) niet gerecycled maar opgeslagen voor toekomstig gebruik. De belangrijkste voorziene toepassing van RepU betreft het gebruik in toekomstige snelle neutronenreactoren. Indien snelle neutronenreactoren worden toegepast met volledige recycling van plutonium en uranium, dan zouden de huidige uraniumreserves een exploitatieduur van enkele duizenden jaren mogelijk maken bij de huidige wereldwijde niveaus van kernenergieopwekking [27]. Uraniumwinning wordt in dat geval veel minder belangrijk.

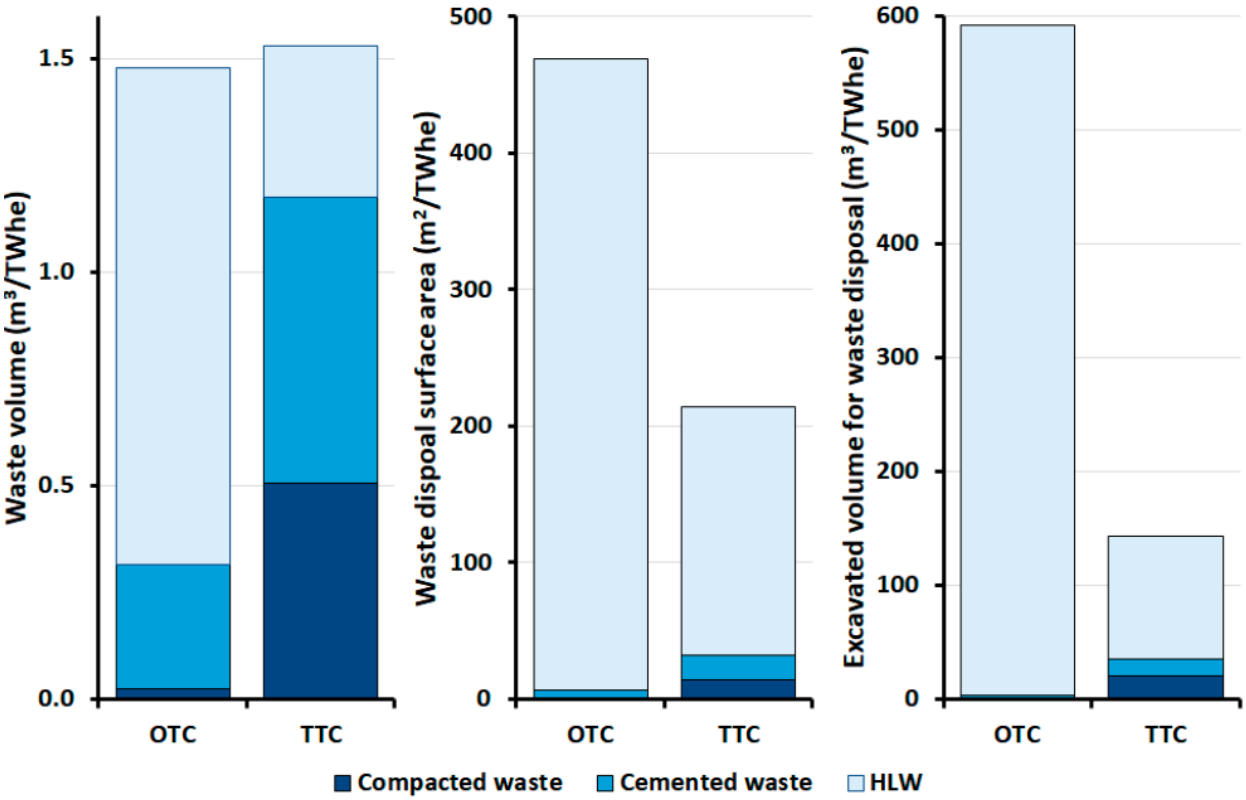
Uit een vergelijking van het huidige Franse TTC (gedeeltelijk gesloten cyclus) met een hypothetisch Frans OTC (open splijtstofcyclus) blijkt dat vrijwel alle geanalyseerde milieu-indicatoren een verhoogde impact hebben voor de OTC in vergelijking met de TTC, met uitzondering van gasvormige en vloeibare lozingen en de hoeveelheid geproduceerde ILW (Intermediate Level Waste-middelradioactief afval).



Figuur 4: Vergelijking tussen de OTC en TTC van geselecteerde milieu-effectindicatoren voor het Franse PWR reactorpark bij gelijke elektriciteitsproductie

In vergelijking met de TTC wordt bij toepassing van de OTC de hoeveelheid langlevend hoogradioactief afval (HLW), waarin meer dan 95% van de totale radioactiviteit van de splijtstofcyclus is geconcentreerd, sterk vergroot. Voor de OTC resulteert dit ook in een vergroting van de eindberging. Dit houdt verband met de grotere productie van afvalwarmte voor gebruikte splijtstoffen (OTC) in

vergelijking met het verglaasde hoogradioactieve afval (HLW), zie hiervoor ook paragraaf A.3. Figuur 5 geeft een vergelijking van de afvalvolumes, de voetafdruk van de eindberging, en de uitgegraven volumes voor het TTC en het OTC, berekend voor het Franse reactorpark [23].



Figuur 5: Vergelijking van de afvalvolumes, de voetafdruk van de eindberging, en de uitgegraven volumes in de eindberging voor het TTC en het OTC, berekend voor het Franse reactorpark

Een vergelijkbare studie als voor het Franse reactorpark zoals hierboven is beschreven is recentelijk ook uitgevoerd voor het reactorpark in het Verenigd Koninkrijk [24].

Het VK is onlangs overgestapt van de eerder toegepaste “twice-through-cycle” (TTC) - waarbij gebruikte splijtstoffen werden opgewerkt, maar waarbij uranium en plutonium niet in de splijtstofcyclus werden hergebruikt - naar een "one-through cycle" (OTC), waarbij gebruikte splijtstoffen worden opgeslagen in afwachting van hun eindberging. De huidige strategie in het VK omvat echter ook de openhouden van andere opties dan de OTC voor de verwerking van gebruikte splijtstoffen. Hieronder valt ook de optie van TTC op basis van een ander chemisch scheidingsproces dan het conventionele PUREX. De uitgebreide analyse van scenario's voor de back-end van de Britse nucleaire splijtstofcyclus zoals

gepresenteerd in [24], had tot doel de effecten van de diverse opties te inventariseren voor milieu-indicatoren zoals weergegeven in Tabel 3.

In overeenstemming met de Franse studie ([22], [23]) wijst ook de Engelse studie uit dat het OTC scenario met directe eindberging van gebruikte splijtstof in vrijwel alle onderzochte categorieën de hoogste milieueffecten oplevert. Dit is met name het gevolg van de milieubelasting ten gevolge van de extra mijnbouwactiviteiten in geval van de OTC ten opzichte van de TTC. Ten aanzien van de stralingsbelasting is de OTC minder belastend vanwege de afwezigheid van directe radioactieve lozingen, die zich wel kunnen voordoen bij de TTC tijdens de diverse stappen van het opwerkingsproces.

Ook uit de resultaten van de Engelse studie blijkt dat recycling van uranium, maar vooral van plutonium een significante vermindering geeft van de productie van splijtstof uit gedolven uranium. De TTC-scenario's die voorzien in de opwerking van gebruikte splijtstoffen en recycling van zowel plutonium als uranium zijn hierbij de gunstigste opties. De OTC met directe eindberging van gebruikte splijtstof is alleen voordelig wat betreft de stralingsbelasting.

A.2. Bovengrondse opslag

De aard van de bovengrondse opslag van gebruikte splijtstoffen en ander radioactief afval afkomstig van vermogensreactoren hangt mede af van de strategie voor de verwerking van de gebruikte splijtstoffen. Deze paragraaf geeft een beknopt overzicht van de huidige praktijk voor de opslag van de diverse materialen die worden geproduceerd bij de twee in aanmerking genomen strategieën.

Strategie: opwerking van gebruikte splijtstof (TTC)

Binnen de huidige strategie in Nederland wordt de TTC toegepast, waarbij gebruikte splijtstof van vermogensreactoren opgewerkt. Hierbij wordt de gebruikte splijtstof na enige jaren van afkoeling in de Borssele centrale overgebracht naar een opwerkingsfabriek, in dit geval die van Orano in Frankrijk. Daar wordt het materiaal opgewerkt en nuttig materiaal (plutonium, uranium) hergebruikt of in opslag gehouden. Niet herbruikbaar hoogradioactief afval, met name de splijtingsproducten en de restanten van de splijtstofstaafhulzen en splijtstofelementen, wordt vermengd met glas en overgebracht in stalen containers. Bij COVRA worden deze containers opgeslagen in de HABOG in verticale silo’s.

Strategie: directe berging van gebruikte splijtstof (OTC)

Bij toepassing van de once-through cycle (OTC) wordt de gebruikte splijtstof gedurende een aantal jaren (circa 50 jaar) opgeslagen, hetzij in de kerncentrales, hetzij in een centrale opslagplaats of een combinatie van beide. Doel van deze tussentijdse opslag is de gebruikte splijtstof te laten afkoelen en de kortlevende splijtingsproducten te laten vervallen.

A.2.1. Laag- en middelradioactief afval (TTC en OTC)

Tijdens de bedrijfsvoering van kerncentrales wordt laag- en middelradioactief afval geproduceerd. Dit type afval bestaat onder andere uit materialen die in kerncentrales worden gebruikt, zoals bv. bedrijfskleding en gereedschappen. Ook radioactief afval dat wordt geproduceerd als gevolg van de zuivering van het koelwater valt in deze categorie.

Dit type afval wordt verzameld in roestvrijstalen vaten, die vervolgens worden samengeperst en overgebracht in een stalen vat. Ten behoeve van de opslag bij COVRA worden deze opslagvaten tevens nog verpakt in een betonnen omhulling.

Verarmd uranium (DepU – Depleted Uranium) is een nevenproduct afkomstig uit de uraniumverrijkingsinstallatie en valt onder de categorie laagradioactief afval. Het verarmd uranium wordt bij COVRA opgeslagen in het Verarmd uraniumOpslagGebouw (VOG/VOG-2) in kubusvormige DV-70 containers. Eén DV-70 container met een volume 3,5 m^3 kan 12 ton verarmd uranium bevatten en is geschikt voor plaatsing in een eindberging [28].

De typen en hoeveelheden laag- en middelradioactief afval, geproduceerd tijdens de bedrijfsvoering van de reactor, hangen niet af van de wijze van verwerking van de gebruikte splijtstoffen. Wel zullen de hoeveelheden laag- en middenradioactief afval significant toenemen bij de inzet van twee nieuwe kerncentrales. Bij benadering hangen de hoeveelheden laag- en middelradioactief afval af van de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (bv. TWhe – Terawattuur elektrisch vermogen). Bij de inzet van twee 1500 MWe kerncentrales zouden de hoeveelheden laag- en middelradioactief afval toenemen met een factor 6 á 7 in vergelijking met de hoeveelheden afkomstig van de Borssele reactor.

A.2.2. Verglaasd hoogradioactief afval (TTC)

Tijdens de opwerking van gebruikte UO_2 splijtstof, volgens het standaard Purex reprocessing proces, wordt het grootste deel van het uranium en plutonium uit de splijtstof verwijderd. Een deel van het overblijvende materiaal bestaat uit splijtingsproducten en actiniden, waaronder ook geringe restanten uranium en

plutonium. Dit afval wordt gemengd met gesmolten borosilicaatglas en in stalen containers gegoten, de CSD-V vaten (Colis Standards de Déchets Vitrifiés[10]).

Bij COVRA worden de CSD-V vaten opgeslagen in verticale silo's die, vanwege de warmteproductie, continu worden gekoeld met langsstromende lucht.

Karakteristieken van de CSD-V vaten zijn weergegeven in onderstaande Tabel 4 ([29]; Tables 6.4, 6.5, 6.7, 6.8, Figure 6.1).

A.2.3. Gecompacteerd metallisch hoogradioactief afval (TTC)

Tijdens de opwerking van gebruikte UO_2 splijtstof komen ook de restanten van de splijtstofstaafhulzen en splijtstofelementen vrij. Dit materiaal, voornamelijk bestaande uit zircaloy en inconel, wordt gecompacteerd en in stalen containers geplaatst, de CSD-C vaten (Colis Standards de Déchets Compactés). Volume, vorm en gewicht van de CSD-C vaten zijn vergelijkbaar met die van de CSD-V vaten. De inhoud is echter zeer verschillend van aard, evenals de wijze van opslag bij COVRA.

De CSD-C vaten bevatten voornamelijk activeringsproducten. Een klein deel van de inhoud bestaat uit actiniden, welke als verontreinigingsfracties aanwezig zijn. Vanwege de geringe warmteproductie kunnen de CSD-C vaten worden gestapeld en is koeling niet noodzakelijk. De CSD-C vaten worden in een aparte bunker in het HABOG bij COVRA opgeslagen.

Tijdens het opwerkingsproces wordt bij benadering een vergelijkbaar aantal CSD-V en CSD-V vaten geproduceerd.

Karakteristieken van de CSD-C vaten zijn weergegeven in Tabel 4 [29]; Tables 6.4, 6.5, 6.7, 6.8].

[10] Containers van het type CSD worden ook wel aangeduid als Universal Canister (UC)

Tabel 4: Karakteristieken van de CSD-V en CSD-C vaten

	CSD-V	**CSD-C**	
Materiaal	Roestvrij staal	Roestvrij staal	 Opengewerkt model van CSD-V vat
Dimensies			
• Lengte	1 338 mm	1 335 mm	
• Externe diameter	430 mm	430 mm	
• Wanddikte	5 mm	5 mm	
Massa			
• Totaal	492 kg (incl. glas)	520 kg (gemiddeld)	
• Leeg	80 kg	92.5 kg	
Volume			
• Extern	175 L	175 L	
• Intern	170 L Verglaasd, afval: 150 L	~ 160 L	

A.2.4. Plutonium (TTC)

In de huidige Nederlandse praktijk van opwerking, komt uit het opwerkingsproces alleen het verglaasde hoogradioactieve afval en het gecompacteerde metallisch afval terug naar Nederland. Het bij de opwerking vrijgekomen plutonium wordt in opslag gehouden bij de opwerkingsfaciliteit van ORANO of zal worden overgedragen voor recycling en is bestemd om elders te worden gebruikt.

A.2.5. Opgewerkt uranium (TTC)

Het bij de opwerking teruggewonnen uranium (REPU – reprocessed uranium) wordt voor een deel weer in de kerncentrale te Borssele ingezet, het eigendom van het resterende deel is onder toezicht van IAEA en Euratom aan andere partijen overgedragen. Opgewerkt uranium wordt niet bij COVRA opgeslagen.

A.2.6. Gebruikte splijtstof (OTC)

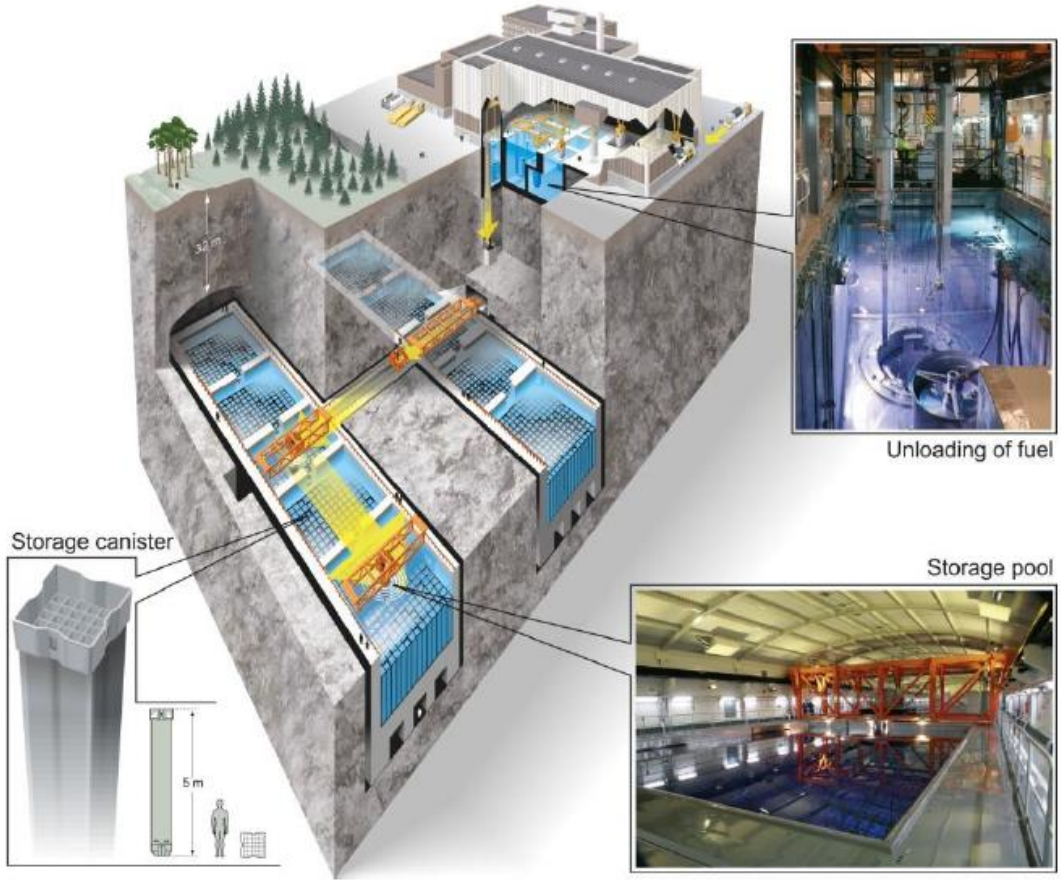
Indien gebruikte splijtstof niet wordt opgewerkt dient het voor langere tijd te worden opgeslagen. Momenteel zijn de installaties van COVRA niet ingericht op de opslag van gebruikte splijtstoffen uit vermogensreactoren.

Voor de opslag van gebruikte splijtstoffen zijn twee mogelijkheden: opslag in een waterbassin en droge opslag.

Opslag in een splijtstofopslagbassin

Als gebruikte splijtstof uit de reactor komt, blijft deze enige jaren in opslag in een waterbassin in de kerncentrale om te worden gekoeld. Na een aantal jaren kan de gebruikte splijtstof worden overgebracht naar bassins met een grotere capaciteit buiten het reactorgebouw. De opslag van gebruikte splijtstof in een centraal opslagbassin wordt momenteel in Nederland niet toegepast.

Een voorbeeld van een dergelijke faciliteit is de centrale tijdelijke opslagplaats voor de Zweedse gebruikte splijtstoffen, Clab, gelegen naast de kerncentrale van Oskarshamn, zie ook Figuur *6* [30; Figure D2]. De faciliteit is uitgegraven in twee cavernen met acht wateropslagbassins, 40 meter onder het aardoppervlak. De totale opslagcapaciteit van de Clab faciliteit bedraagt 8000 ton gebruikte splijtstof [31; Table D3].



Figuur 6: Overzicht van de Zweedse centrale faciliteit voor de opslag van gebruikte splijtstoffen, Clab.

Droge opslag

Als de warmteproductie van de gebruikte splijtstof door het radioactieve verval voldoende is afgenomen, kan de splijtstof worden afgevoerd naar een

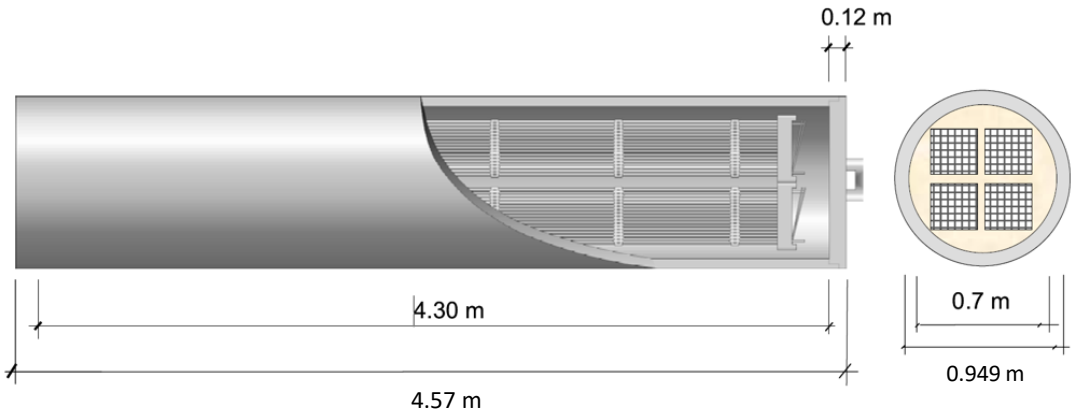
opslagplaats voor droge opslag. In Nederland zijn hiervoor geen voorzieningen aanwezig.

Voor de droge opslag van gebruikte splijtstofelementen dienen deze te worden overgeplaatst in een opslagvat. Een belangrijk criterium voor het aantal splijtstofelementen dat in een opslagvat kan worden geplaatst is de totale warmteproductie. Deze is afhankelijk van:

- het type splijtstof;
- de opbrand;
- de tijdsduur van afkoeling van de gebruikte splijtstofelementen;
- het aantal splijtstofelementen per opslagvat,

Een veilige waarde voor de warmteproductie in een opslagvat voor gebruikte splijtstofelementen bedraagt ca. 1500 W [32] tot 1700 W [33] per opslagvat. Voor gebruikte PWR splijtstofelementen betekent dit dat een ongekoeld opslagvat vier splijtstofelementen kan bevatten [33; par. 6.2.3].

Een voorbeeld van een dergelijk opslagvat is het PWR opslagvat dat wordt toegepast in het Zweedse KBS-3 concept voor eindberging [34]. Figuur 7 [29; Figure 6.2] geeft een impressie van dit vat, dat een volume heeft van 3,23 m^3. Voor de plaatsing van in de voorziene Zweedse eindbergingsfaciliteit worden deze opslagcontainers vervat in een koperen cilinder.



Figuur 7: Voorbeeld van een opslagvat voor 4 gebruikte UO_2 PWR-splijtstofelementen – SKB PWR opslagvat

Een ander voorbeeld van een container voor de opslag van gebruikte splijtstofelementen is het CASTOR V/19 vat - *Transport and Storage Cask for Spent Fuel*. Dit vat is ontworpen voor het transport en opslag van verbruikte splijtstof uit drukwaterreactoren. CASTOR vaten worden onder andere in Duitsland toegepast voor de droge opslag van gebruikte spijtstofelementen [35].



Figuur 8: Impressie van het CASTOR V/19 vat en de plaatsing ervan in een opslagfaciliteit.

Een CASTOR V/19 vat heeft ruimte voor de opslag van 19 gebruikte splijtstofstaven. Op de buitenwand zijn radiale koelribben aangebracht om de passieve warmteafvoer te verbeteren. Enkele karakteristieken ervan zijn weergegeven in Tabel 5 [36].

Tabel 5: Karakteristieken van een CASTOR V/19 opslagvat voor gebruikte splijtstofelementen

Capaciteit	19 gebruikte splijtstofelementen – maximale lengte 4,95 m
Maximaal thermisch vermogen	39 kW
Maximale activiteit	1900 Petabecquerel
Hoogte	5,94 m
Buitendiameter	2,44 m
Volume	27,8 m^3

De twee bovengenoemde voorbeelden van opslagvaten voor de droge opslag van gebruikte splijtstofelementen zijn ter illustratie. Ten behoeve van de verwerking en verpakking van gebruikte splijtstofelementen kan het noodzakelijk zijn om additionele verwerkings- en verpakkingsmethoden te moeten toepassen en hiertoe installaties en ruimten te moeten realiseren.

A.3. Eindberging

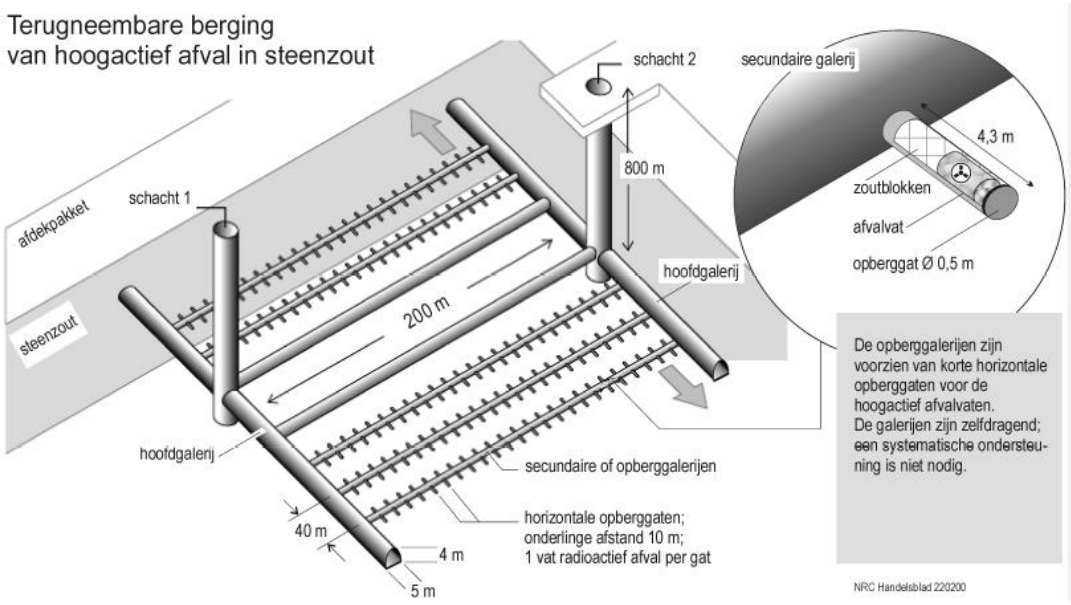
Binnen het Nederlandse beleid zal al het bij COVRA opgeslagen radioactieve afval in een diepe geologische eindbergingsfaciliteit worden geplaatst. In Nederland wordt sinds de jaren 70 van de vorige eeuw gedaan naar de mogelijkheid tot geologische eindberging van radioactief afval in steenzout en in Boomse Klei

binnen de programma's ICK[11] [37], OPLA[12] [38], OPLA-1A [39], CORA[13] [40] en OPERA[14] [41]. Deze twee opties worden hieronder beknopt beschreven.

A.3.1. Eindberging in steenzout

In het verleden is voor de eindberging van radioactief afval in steenzout onderzoek gedaan aan een aantal kernenergiestrategieën waarbij o.a. werd uitgegaan van een uitbreiding van het aantal kerncentrales met 3000 MWe nieuw vermogen (bv. [38], [39], [17]). In het kader van het huidige voornemen van het kabinet om de mogelijkheid te onderzoeken voor de plaatsing van extra nucleair vermogen van 3000 MWe kunnen deze studies een waardevolle bron van informatie zijn.

Een voorbeeld van een eindbergingsconcept in steenzout dat is onderzocht binnen het CORA onderzoeksprogramma, is weergegeven in Figuur 9 [40]; Figuur 4.2]. Hierbij worden vaten met hoogradioactief afval, zoals CSD-V met verglaasd afval en eventueel ook CSD-C vaten met gecompacteerd metallisch afval in opberggalerijen geplaatst. Bij dit ontwerp wordt per opberggalerij één vat geplaatst. De minimale diepte van de eindbergingsfaciliteit is in de CORA studie bepaald op 500 m. In dit concept is de plaatsing van afvalpakketten met gebuikte splijtstof uit vermogensreactoren niet voorzien.



Figuur 9: Principe van een terugneembare berging voor hoogradioactief afval in steenzout

[11] Interdepartementale Commissie Kernenergie
[12] Commissie Opberging op Land
[13] Commissie Opberging Radioactief Afval
[14] Onderzoeks Programma Eindberging Radioactief Afval

Sinds het CORA-programma (2001) is in beperkte mate onderzoek gedaan naar eindberging in steenzout. Internationaal zijn op dit gebied wel significante vorderingen gemaakt, met name in Duitsland en de VS. Bij een evaluatie van de stand van de kennis op het gebied van eindbergingen in steenzout is een groot aantal technische aspecten geïdentificeerd die in het Nederlandse concept opnieuw moeten worden bezien en in detail onderzocht, zoals het veiligheidsconcept, de veiligheidsstrategie, het ontwerp van de faciliteit, de karakteristieken van het afval, de conditionering van de afvalcontainers, de analyses van de langetermijnveiligheid e.a. Deze aspecten en aanbevelingen voor nader onderzoek zijn beschreven in [42].

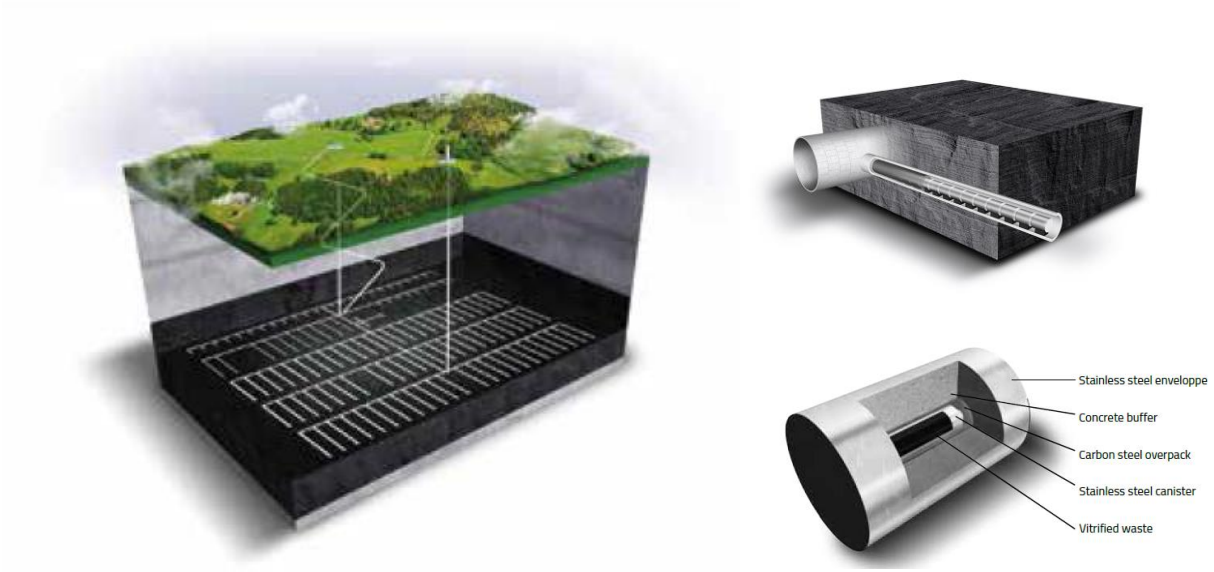
Binnen de diverse onderzoeksprogramma's voor eindberging in steenzout in Nederland is de plaatsing van gebruikte splijtstof niet beschouwd. In diverse Duitse programma's voor eindberging is de plaatsing van gebruikte splijtstoffen in diepe steenzoutlagen wel onderzocht, bv ISIBEL[15] [43] en VSG[16] [44]. Het conditioneren van de gebruikte splijtstofelementen in speciale containers die geschikt zijn voor de eindberging in steenzout was bij deze projecten ook onderwerp van onderzoek.

Momenteel is in Duitsland steenzout één van de mogelijke opties om te fungeren als gastgesteente voor de eindberging van gebruikte splijtstoffen. Onder auspiciën van de Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) wordt onderzocht welke locaties voor een dergelijke faciliteit geschikt zouden kunnen zijn [35].

A.3.2. Eindberging in Boomse Klei

Binnen het Onderzoeks Programma Eindberging Radioactief Afval (OPERA; 2011-2017) is de mogelijkheid onderzocht voor de eindberging van radioactief afval in een 500 meter diep gelegen faciliteit in Boomse klei als gastgesteente [41]. Het eindbergingsconcept is weergegeven in Figuur 10. Het OPERA concept gaat ervanuit dat elk CSD-V en CSD-C vat bovengronds wordt geconditioneerd in een betonnen overpack, de zogenoemde "Supercontainer". Voor verdere mechanische sterkte kan om de supercontainer een stalen omhulling worden aangebracht. De supercontainers worden vervolgens naar de opberggalerijen getransporteerd en hierin geschoven, waarna een plug de opberggalerijen afsluit van de transportgalerijen. Uiteindelijk worden de schachten opgevuld waarna de verbinding met het aardoppervlak wordt verbroken en het radioactieve afval van de buitenwereld is geïsoleerd.

[15] ISIBEL: ISIBEL: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW
[16] VSG: Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben



Figuur 10: OPERA concept voor de eindberging van radioactief afval in Boomse klei

Ook binnen het recentelijk uitgevoerde OPERA programma is de plaatsing van gebruikte splijtstoffen van vermogensreactoren in een eindbergingsfaciliteit in Boomse Klei niet beschouwd. Daarnaast is het onderzoek in OPERA gebaseerd op een concept waarbij is uitgegaan van de kerncentrale Borssele als enige vermogensreactor. Wat derhalve geldt voor eindberging in steenzout geldt ook voor een eindberging in Boomse Klei: alle aspecten van het bestaande eindbergingsconcept dienen opnieuw te worden beschouwd bij plaatsing van significant meer afvalvaten dan voorzien voor het OPERA concept, en/of plaatsing van afvalvaten met gebuikte splijtstoffen. Het conditioneren van gebruikte splijtstofelementen in containers die geschikt zijn voor een dergelijke faciliteit, bv de hierboven genoemde supercontainer, neemt hierbij een belangrijke plaats in.

A.3.3. Thermische belasting van de eindberging

Een specifiek thema voor de plaatsing van warmteproducerend hoogradioactief afval in een eindbergingsfaciliteit betreft de temperatuurstijging van het omliggende gastgesteente ten gevolge van de warmteproductie in de afvalvaten.

Na plaatsing van vaten in de diepe ondergrond zullen eventueel aanwezige technische barrières, zoals bv overpacks of wanden van opberggalerijen, èn het omringende gastgesteente een temperatuurstijging ondergaan als gevolg van warmtediffusie vanuit de afvalvaten. In de technische barrières en de eerste meters van het gastgesteente kan de opwarming aanzienlijk zijn. Verder weg van de warmtebron is de opwarming matig tot beperkt. De temperatuurstijging hangt af van:

- De aard en de verpakking van het warmteproducerend afval.
- De termijn van de bovengrondse tussenopslag. Een langere termijn betekent vanwege het radioactieve verval een geringere warmteproductie en derhalve een lagere temperatuurstijging.
- De aard van het gastgesteente. De thermische eigenschappen van een gastgesteente bepalen mede de diffusiesnelheid van warmte door het gesteente heen.
- De afstand tussen de opberggalerijen. Indien opberggalerijen zich dicht op elkaar bevinden kan er wederzijdse thermische beïnvloeding plaatsvinden waarbij een extra temperatuurstijging kan optreden.

De uitgebreidheid (‘footprint’) van een eindbergingsfaciliteit hangt mede af van de warmtetoevoer naar de diepe ondergrond van de opgeslagen afvalvaten, en dus de mate van temperatuurstijging in het omringende gastgesteente. De mate van temperatuurstijging in het gastgesteente moet voldoen aan limietwaarden, zowel nabij de opberggalerijen, waar te temperatuurstijging lokaal kan pieken, als op verdere afstand van de opbergfaciliteit, waar een meer globale temperatuurstijging kan plaatsvinden. Daarnaast mogen als gevolg van de lokale en globale temperatuurstijging de mechanische [45] en isolerende eigenschappen van het gastgesteente niet in het geding komen.

Binnen het huidige beleid in Nederland wordt ervanuit gegaan dat na opwerking van gebruikte splijtstof het warmteproducerend afval voor het overgrote deel bestaat uit de CSD-V vaten met verglaasd hoogradioactief afval. De warmteproductie in deze vaten is voornamelijk afkomstig door het radioactieve verval van de isotopen strontium-90 (Sr-90) en cesium-137 (Cs-137) en is significant voor een periode van circa 100 jaar. In dit type afval is de warmteproductie vanuit actiniden relatief gering omdat een deel ervan bij het opwerkingsproces is verwijderd.

Indien gebruikte splijtstoffen niet worden opgewerkt en uiteindelijk in de eindberging worden geplaatst dragen naast de splijtingsproducten tevens de actiniden bij aan de warmteproductie. Omdat de betreffende actiniden een langzamer radioactief verval vertonen dan splijtingsproducten, is de warmteproductie in vaten met gebruikte splijtstoffen voor een langere periode van belang dan die in de CSD-vaten met verglaasd afval. Dit kan resulteren in een grotere en langduriger temperatuurstijging in de nabijheid van de opgeslagen vaten dan in geval van de CSD-V vaten met opgewerkt verglaasd afval.

In het verleden zijn thermische analyses aan Nederlandse eindbergingsconcepten verricht voor de berging van verglaasd afval in steenzout (bv. [17], [46]), en kleilagen [47]. Dergelijke analyses zijn in Nederland tot op heden niet verricht voor de plaatsing van gebruikte splijtstoffen uit vermogensreactoren.

Voor het Belgische eindbergingsconcept in Boomse Klei, dat vergelijkbaar is met het Nederlandse OPERA concept, zijn gekoppelde thermo-hydraulische analyses verricht in geval van plaatsing van verglaasd afval (CSD-V vaten) en gebruikte

splijtstoffen uit vermogensreactoren [48; 49]. Een belangrijke conclusie van deze analyse was dat de temperaturen in het nabije veld voor een groot deel afhangen van de thermische belasting vanuit de opbergvaten per meter bergingsgalerij.

Voor de CSD-V vaten met verglaasd afval is deze thermische belasting in het algemeen vergelijkbaar voor de vaten onderling omdat de inhoud ervan moet voldoen aan specificaties en afvalacceptatiecriteria. Voor gebruikte splijtstoffen hangt de thermische belasting per meter opberggalerij mede af van het aantal gebruikte splijtstofelementen dat in een opbergvat wordt geplaatst. Dit laatste kan verschillen per eindbergingsconcept, zoals beschreven in paragraaf A.2.6.

A.4. Evaluatie

Uit de resultaten van recent uitgevoerde studies, waarbij voor diverse milieu-indicatoren een vergelijking is gemaakt tussen het al of niet opwerken van gebruikte splijtstoffen uit vermogensreactoren blijkt dat recycling van uranium, maar vooral van plutonium een significante vermindering geeft van de productie van splijtstof uit gedolven uranium. Dit geeft een reductie van de behoefte aan mijnbouw en verdere bewerkingsstappen voor de productie van splijtstof. De TTC-scenario's die voorzien in de opwerking van gebruikte splijtstoffen en recycling van zowel plutonium als uranium zijn hierbij de gunstigste opties. De OTC met directe eindberging van gebruikte splijtstof is alleen voordelig wat betreft de stralingsbelasting. Echter de splijtstofcyclus heeft een vrijwel verwaarloosbaar aandeel in de totale stralingsdosis van de burgers, waardoor stralingsbelasting geen onderscheidend aspect is voor de keuze voor een bepaalde splijtstofcyclus.

Bij toepassing van de OTC strategie in Nederland dient de niet-opgewerkte gebruikte splijtstof gedurende enkele decennia bovengronds te worden opgeslagen alvorens het, na conditioneren ervan, in een geologische eindbergingsfaciliteit kan worden geplaatst. De huidige opslagfaciliteiten bij COVRA zijn hiertoe niet ingericht en dienen derhalve te worden aangepast voor deze categorie radioactief afval. Tevens dienen de bestaande safety cases voor eindberging in steenzout en Boomse klei te worden gerevalueerd.

Referentielijst

[1] Tweede Kamer, vergaderjaar 2010-2011, 32 645 (Kernenergie), nr.1 “Brief van de minister van economische zaken, landbouw en innovatie”, met een overzicht van de belangrijkste randvoorwaarden verbonden aan de totstandkoming van nieuwe kerncentrales.

[2] Het nationale programma voor beheer van radioactief afval en gebruikte splijtstoffen, Ministerie van IenW, juni 2016

[3] NRG / Clingendael, “Ontwikkelingen met betrekking tot eindverwerking van gebruikte splijtstof”, 21468/05.6494/C, 13 april 2005.

[4] ECN / NRG, “Kerncentrale Borssele na 2013 – Gevolgen van beëindiging of voortzetting van de bedrijfsvoering”, NRG 21264/05.69766, november 2005.

[5] NRG, “Kernenergie en randvoorwaarden. Een verkenning van mogelijke randvoorwaarden voor de kernenergiescenario’s uit het Energierapport 2008”, NRG 22490/09.97380, maart 2010

[6] RIVM, ‘Ionising radiation exposure in the Netherlands’, 861020002/2003, H. Eleveld

[7] RIVM, https://www.rivm.nl/straling-en-radioactiviteit/blootstelling-en-gezondheidsrisico/blootstelling-aan-ioniserende-straling-samengevat#blootstelling-door-andere-stralingsbronnen, zoals bezocht in oktober 2022.

[8] MARINA II Update of the MARINA Project on the radiologiscal exposure of of the European Community from radioactivity in North European marine waters, C6496/TR/004, augustus 2002.

[9] OSPAR: Fifth periodic evaluation of progress towards the objective of the OSPAR Radioactive Substances Strategy, geraadpleegd in oktober 2022 op https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/quality-status-reports/qsr-2023/other-assessments/5pe/.

[10] HORIZON-EURATOM-2021 project MIMOSA: MultI-recycling strategies of LWR SNF focusing on MOlten SAlt technology, Euratom Proposal number: 101061142, juni 2022.

[11] World Nuclear Association, https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx, zoals bezocht in september 2022.

[12] France 7th national report on compliance with the joint convention, 2020

[13] Richtlijn 2011/70/Euratom van de Raad van 19 juli 2011 tot vaststelling van een communautair kader voor een verantwoord en veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval

[14] Sungyeol Choi, Hyo Jik Lee, Won Il Ko, “Dynamic analysis of once-through and closed fuel cycle economics using Monte Carlo simulation”, Nuclear Engineering and Design, Nuclear Engineering and Design 277 (2014) 234–247.

[15] E. Burggraaff, J. Welbergen, E. Verhoef, “Nationale Radioactief Afval Inventarisatie”, COVRA N.V., oktober 2022.

[16] https://www.tvo.fi/en/index/production/plantunits/ol3/structureandtechnicaldata.html. Laatst bezocht: 6 december 2022.

[17] Prij J, Blok JBM, Laheij GHM, van Rheenen W, Slagter W, Uffink GJM, Uijt de Haag P, Wildenborg AFB, Zanstra DA, “PRObabilistic Safety Assessment, Final report”, Petten, November 1993.

[18] J. Hart, T.J. Schröder, “Report on alternative waste scenarios”, OPERA-PU-NRG112, Petten, 7 juli 2016.

[19] J. Hart, J. Prij, T.J. Schröder, G-J. Vis, D.-A. Becker, J. Wolf, U. Noseck, D. Buhmann, Evaluation of current knowledge for building the Safety Case for salt based repositories, OPERA-PU-NRG221B, 3 augustus 2015.

[20] E. Verhoef, et al., “OPERA Safety Case”, COVRA N.V., 20 december 2017.

[21] Technical assessment of nuclear energy with respect to the ‘do no significant harm’ criteria of Regulation (EU) 2020/852 (‘Taxonomy Regulation’), European Commission Joint Research Centre, Petten, 2021, JRC124193.

[22] Ch. Poinssot, et al., “Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles”, Energy 69 (2014) 199-211.

[23] Ch. Poinssot, S. Bourg, B. Boullis, “Improving the nuclear energy sustainability by decreasing its environmental footprint. Guidelines from life cycle assessment simulations”, Progress in Nuclear Energy, 92 (2016) pp.234-241.

[24] A. Paulillo, **“**Reprocessing vs direct disposal of used nuclear fuels: The environmental impacts of future scenarios for the UK**”,** Sustainable Materials and Technologies 28 (2021) e00278**.**

[25] Taylor, R.; Bodel,W.; Stamford, L.; Butler, G. “A Review of Environmental and Economic Implications of Closing the Nuclear Fuel Cycle—Part One: Wastes and Environmental Impacts”. Energies 2022, 15, 1433. https://doi.org/ 10.3390/en15041433.

[26] Taylor, R.; Bodel,W.; Butler, G.” A Review of Environmental and Economic Implications of Closing the Nuclear Fuel Cycle—Part Two: Economic Impacts”. Energies 2022, 15, 2472. https://doi.org/10.3390/en15072472.

[27] Processing of used nuclear fuel (Updated June 2018), World Nuclear Association, https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx.

[28] COVRA N.V., “Het Oranje Boekje”, revisie 0.3, 24 januari 2017.

[29] W. von Lensa (Ed.), “RED-IMPACT – Impact of partitioning, transmutation and waste reduction technologies on the final nuclear waste disposal – Synthesis Report”, ISBN 978-3-89336-538-8, Forschungszentrum Jülich, September 2007.

[30] Ministry of the Environment of Sweden, “Sweden’s sixth national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management”, Ds 2017:51, 2017.

[31] Ministry of the Environment of Sweden, “Sweden’s sixth national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management”, Ds 2017:51, 2017.

[32] L.H. Johnson, “Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Intermediate Level Waste in Opalinus Clay”, NAGRA Technical Report 01-04, Oktober 2002.

[33] Svensk Kärnbränslehantering AB, “Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository”, SKB Technical Report TR-10-13, December 2010.

[34] Svensk Kärnbränslehantering AB, “Design, production and initial state of the canister”, SKB Technical Report TR-10-14, December 2010.

[35] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety, “Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management - Report of the Federal Republic of Germany for the Sixth Review Meeting in May 2018”, 2018.

[36] GNS, Gesellschaft für Nuklear-Service mbH, “CASTOR® V/19 Transport and Storage Cask for Spent Fuel (PWR)”.

[37] Interdepartementale Commissie Kernenergie, “Report on the feasibilities of radioactive waste disposal in salt formations in the Netherlands”, Ministerie van Economische Zaken, april 1979.

[38] Commissie Opberging te Land (OPLA): “Onderzoek naar geologische opberging van radioactief afval in Nederland. Eindrapportage Fase 1”. Ministerie van Economische Zaken, Den Haag, mei1989..

[39] Rijks Geologische Dienst, “Evaluatie van de Nederlandse zoutvoorkomens en hun nevengesteente voor de berging van radioactief afval - Overzicht van de resultaten – Eindrapport van geologisch onderzoek in het project GEO-1A, een onderdeel van het nationale Programma van Onderzoek OPLA, Fase 1A”, RGD rapport 30.012/ER, Ministerie van Economische Zaken.

[40] Commissie Opberging Radioactief Afval (CORA),“Terugneembare berging, een begaanbaar pad? Onderzoek naar de mogelijkheden van terugneembare berging van radioactief afval in Nederland”, 2001.

[41] E. Verhoef, et al., “OPERA Safety Case” , 20 december 2017.

[42] J. Hart, J. Prij, T.J. Schröder, G-J. Vis, D.-A. Becker, J. Wolf, U. Noseck, D. Buhmann, Evaluation of current knowledge for building the Safety Case for salt based repositories, OPERA-PU-NRG221B, 3 augustus 2015.

[43] Buhmann, D, Mönig J, Wolf J, Keller S, Mrugalla S, Weber JR, Krone J, Lommerzheim A, Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes "Sicherer Einschluss". ISIBEL Projekt. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS, Peine, 2008.

[44] Fischer-Appelt K, Baltes B, Buhmann D, Larue J, Mönig J, Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-290, ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2013.

[45] Yajun Li et al., “Technical feasibility of a Dutch radioactive waste repository in Boom Clay: Geomechanical validation”, OPERA-PU-TUD321d, juli 2018.

[46] J.B. Grupa, M. Houkema, Terughaalbare opberging van radioactief afval in diepe zout en kleiformaties; Modellen voor een veiligheidsstudie, NRG 21082/00.33017/P, Petten, juni 2000.

[47] B. van der Steen, A. Vervoort, “Mine design in clay – CORA-Project TRUCK-I”, CORA 98-46, August 1998.

[48] X. Sillen, J. Marivoet, “Thermal impact of a HLW repository in clay - Deep disposal of vitrified high-level waste and spent fuel”, SCK•CEN-ER-38, mei 2007.

[49] E. Weetjens, “Update of the near field temperature evolution calculations for disposal of UNE-55, MOX-50 and vitrified HLW in a supercontainer- based geological repository”, SCK•CEN-ER-86, februari, 2009.