

COLOFON

E-mail

ezinfo@postbus51.nl

Telefoon / Phone

Postbus 51 iedere werkdag bereikbaar van 9.00 tot 21.00 uur onder telefoonnummer

0800 - 646 39 51 of (+31) (0)70 3081986

Het algemene telefoonnummer van het ministerie van Economisch Zaken is 070 - 3798911

Bezoek Economische Zaken / Visit Economic Affairs

Het bezoekadres van het ministerie van Economische Zaken is:

Bezuidenhoutseweg 30,
2594 AV Den Haag

Postbus Economische Zaken / P.O. Box

Het postadres van het ministerie van Economische Zaken is:

Postbus 20101,
2500 EC Den Haag

Ministerie van Economische Zaken
Den Haag, februari 2001

Terugneembare berging, *een begaanbaar pad?*

Onderzoek naar de mogelijkheden van
terugneembare berging van radioactief afval
in Nederland

Commissie Opberging Radioactief Afval

Inhoudsopgave

	Voorwoord	<i>pagina</i> 6
	Samenvatting	9
1	Inleiding	19
2	Uitgangspunten en structuur van het onderzoek	21
2.1	Kabinetstandpunt over het gebruik van de diepe ondergrond	
2.2	De taakstelling	
2.3	Terugneembaarheid	
2.4	Het onderzoekprogramma	
2.5	Algemene aspecten van het onderzoek	
3	Langdurige terugneembare bovengrondse opslag	29
3.1	Inleiding	
3.2	100 Jaar opslag bij COVRA	
3.3	300 Jaar bovengrondse opslag bij COVRA	
3.3.1	Veiligheid	
3.3.2	Terugneembaarheid	
3.3.3	Kosten	
3.4	Samenvatting van de onderzoeksresultaten	
3.5	Kanttekeningen van de Commissie	
4	Terugneembare berging in steenzout	39
4.1	Inleiding	
4.2	Ontwerp voor een terugneembare berging	
4.3	Opbergveiligheid van het kernsplijtingsafval	
4.3.1	Mijnbouwkundige beheersbaarheid	
4.3.2	Stralingsbelasting	
4.4	Opbergveiligheid van de splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren	
4.5	Terugneembaarheid	
4.6	Kosten	
4.7	Specifiek onderzoek	
4.7.1	Stralings schade in zout	
4.7.2	Radon	
4.7.3	Zoutgruis als afdichtingsmateriaal	
4.7.4	Een alternatief opvulmateriaal: calciumchloride	
4.7.5	Een ander opbergontwerp	
4.7.6	Natuurlijke processen in steenzout	
4.8	Samenvatting van de onderzoeksresultaten	
4.9	Kanttekeningen van de Commissie	
5	Terugneembare berging in klei	57
5.1	Inleiding	
5.2	Diepgelegen klei in Nederland	
5.3	Ontwerp voor een terugneembare berging	
5.4	Opbergveiligheid van het kernsplijtingsafval	
5.4.1	Mijnbouwkundige beheersbaarheid	
5.4.2	Stralingsbelasting	
5.5	Opbergveiligheid van de splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren	
5.6	Terugneembaarheid	
5.7	Kosten	
5.8	Specifieke onderwerpen	
5.8.1	Radon	
5.8.2	Gevolgen van een ijsijd	
5.9	Samenvatting van de onderzoeksresultaten	
5.10	Kanttekeningen van de Commissie	

6	Alternatieve mogelijkheden voor risicovermindering	71
6.1	Inleiding	
6.2	Scheiden en omzetten	
6.3	Scheiden en immobiliseren	
6.4	Kanttekeningen van de Commissie	
7	Vergelijking en combinatie van de opties	75
7.1	Inleiding	
7.2	Vergelijking van de opties	
7.2.1	Betrouwbaarheid van de gegevens	
7.2.2	Afscherming van de biosfeer	
7.2.3	Beheersbaarheid (bouwkundig/mijnbouwkundig)	
7.2.4	Terugneembaarheid	
7.2.5	Kosten	
7.3	Fasering van bovengrondse opslag en ondergrondse berging	
7.4	Conclusies	
8	Maatschappelijke aspecten	81
8.1	Inleiding	
8.2	Ervaringen met het besluitvormingsproces in het buitenland	
8.3	Ethische en maatschappelijke aspecten	
8.4	Opinies uit andere bron	
8.5	Kanttekeningen van de Commissie	
8.5.1	De studies	
8.5.2	De maatschappelijke dialoog	
8.5.3	Conclusies	
9	Internationale samenwerking	87
9.1	Inleiding	
9.2	Waarom internationale samenwerking?	
9.3	Internationale samenwerkingsverbanden	
9.4	De samenwerkingspositie van Nederland	
9.5	Toekomstige samenwerking	
10	Conclusies en aanbevelingen	91
10.1	Conclusies	
10.2	Aanbevelingen	
10.3	Slotbeschouwing	
	Appendix 1 Overzicht van de CORA-projecten en de deelnemende onderzoeksinstituten	97
	Appendix 2 Samenstelling van Commissies	99
	Appendix 3 Ondiepe berging	101
	Verklarende woordenlijst	103
	Literatuurverwijzingen	109

Voorwoord

De realiteit van de aanwezigheid van het radioactieve afval en de potentieel zeer langdurige blootstelling daaraan voor mens en milieu, stellen ons voor de noodzaak een oplossing te zoeken, die zorgt voor een zo groot mogelijke veiligheid op de zeer lange termijn. Elke oplossing in deze hangt vrijwel uitsluitend samen met de kwaliteit van de beschermende barrière tussen het afval en de biosfeer. In het CORA-onderzoek is daarbij een onderscheid gemaakt tussen de beschermende elementen bij opslag aan het oppervlak en die in geval van diepe ondergrondse berging. Bij bovengrondse opslag ligt die kwaliteit vrijwel uitsluitend in handen van de mens zelf. Bij een ondergrondse oplossing is dit voor een deel ook het geval, maar wordt bovendien een extra en zeer langdurige bescherming geboden door het natuurlijk, isolerend vermogen van een specifieke geologische formatie en zijn bedekking.

Volgens een Regeringsstandpunt uit 1993 is berging van hoog-toxisch afval, waaronder het radioactieve afval, in de diepe ondergrond alleen dan toegestaan als het afval gedurende langere tijd kan worden teruggenomen. Het CORA-onderzoek richtte zich daarom vooral op de technische uitvoerbaarheid van terugneembare berging.

Een bovengrondse opslag is vanzelfsprekend terugneembaar, en bovendien is de beschermende kwaliteit van een opslag, zoals bij COVRA, aangetoond. De belangrijke onzekerheid die blijft bestaan, wordt gevormd door die van de zeer langdurige veiligheid over tienduizenden jaren.

In dat geval is, naast de stabiliteit van onze samenleving, het menselijk vermogen voor het afvalbeheer, zoals het om de zoveel eeuwen vernieuwen van de faciliteit, aan twijfel onderhevig. Daarnaast is het ook de vraag in hoeverre het mogelijk zal zijn om aan ingrijpende, dynamische natuurprocessen aan het oppervlak, het hoofd te blijven bieden. Deze processen hebben nauwelijks invloed op een terugneembare berging in de diepe ondergrond. Sterker nog, als de menselijke controle over een dergelijke berging verloren mocht gaan, zal door de natuurlijke werking van steenzout of klei uiteindelijk een passief-veilige situatie kunnen worden bereikt. Het onderzoek heeft aangetoond dat een dergelijke ondergrondse berging technisch haalbaar is.

Een afdoende oplossing voor het radioactieve afval is het best gediend met een benutting van de sterke kanten van beide mogelijkheden, in het begin bovengronds en daarna terugneembaar ondergronds. Daarom ligt het voor de hand de aandacht te richten op een optimale fasering in de tijd van de bovengrondse en terugneembare ondergrondse opties, meer dan op een keuze tussen deze opties.

De opdracht aan de Commissie is van technisch-wetenschappelijke aard, maar voorbijzien aan de maatschappelijke weerstanden tegen diverse opbergmethoden getuigt van weinig zin voor de realiteit. Dat heeft de Commissie er toe gebracht tijdens het onderzoek de randvoorwaarde van maatschappelijke acceptatie mede in beschouwing te nemen. In dit opzicht staat het Nederlandse onderzoek niet alleen. Ook binnen de internationale kaders is sprake van een snel groeiend besef dat "confidence building" een herkenbaar element van het onderzoek dient te zijn.

Omdat het Nederlandse standpunt van "terugneembaarheid" de toegankelijkheid tot een opslag of berging verzekert, wordt tevens tegemoet gekomen aan een groot aantal van de maatschappelijke bezwaren. Vele van deze bezwaren laten zich immers samenvatten in het degelijke Hollandse gezegde 'eerst zien, dan geloven'.

Door gebruik te maken van de doelstellingen van terugneembaarheid en de verworven toegankelijkheid zijn de volgende aspecten na te streven.

Op grond van terugneembaarheid

- In de toekomst afval alsnog, wellicht gedeeltelijk, onschadelijk maken door middel van technieken die nu in ontwikkeling zijn (transmutatie e.d.).
- Beschikbaarheid van het afval voor hergebruik.
- Verwijdering in geval van ongewenste ontwikkelingen.

Op grond van toegankelijkheid

- Het verrichten van onderzoek in de realistische opbergsituatie en het verifiëren van eerdere berekeningen.
- Het aanbrengen van technische verbeteringen op grond van nieuwe kennis en ervaring.
- Het uitvoeren van "second opinion" onderzoek.
- Brede informatie via ondergronds bezoek in een demonstratiefase en media reportages.

Naar de mening van de Commissie geven deze aspecten een verbreding van de discussiebasis voor een zinvolle maatschappelijke dialoog. Daarbij zou op korte termijn de nadruk dienen te vallen op de vraag of met betrekking tot de bovengenoemde aspecten prioriteiten te stellen zijn, of ze verenigbaar zijn en op welke aspecten verder onderzoek zich thans dient te richten.

In een terugneembare situatie behoeven er geen onherroepelijke beslissingen te worden genomen maar slechts stapsgewijze voortgangsbesluiten. Definitieve besluitvorming vindt pas plaats op grond van kennis en ervaring uit voortgezet onderzoek. Met de terugneembaarheid kan de maatschappelijke dialoog over het afval een constructieve richting inslaan, waardoor niet alleen vertrouwen in mogelijke aanvaardbare technische oplossingen voor het radioactieve afval wordt opgebouwd, maar die vooral ook leidt tot overeenstemming over de route die gevolgd kan worden om ze te bereiken.

De resultaten van het onderzoek kunnen, onder verwijzing naar het Regeringsstandpunt uit 1993, ook van betekenis zijn voor de problematiek van de grote hoeveelheden hoog-toxisch afval van chemische aard.

Tegenover deze voordelen van terugneembaarheid staan ook nadelen, namelijk de noodzaak van speciale voorzieningen en hogere kosten. Bovendien betekent een langdurige toegankelijkheid ook een verhoogd risico dat de mens wordt blootgesteld aan straling.

Dankwoord

Tenslotte wil ik mijn grote waardering uitspreken voor de inzet van alle betrokken onderzoekers en het vele werk dat door hen is verzet. De leden van de Commissie ben ik bijzonder dankbaar voor hun intensieve deelname aan de discussies tijdens de vergaderingen, de grote aandacht voor het "huiswerk", zowel bij het beoordelen van de technische deelrapporten als voor de totstandkoming van dit rapport. Zonder echter de onvermoeibare betrokkenheid van de programma coördinator Leo van de Vate kan ik mij nauwelijks voorstellen dat het onderzoek en de rapportage tot dit resultaat zou hebben gevoerd. Ook de inzet van Jan de Blaauw, die de Commissie de laatste jaren bijstond als secretaris en tenslotte ook als vormgever van het eindrapport, verdient ten volle de dank van de Commissie.



*De Voorzitter van de Commissie Opberging Radioactief Afval (CORA)
Ir. Bob P. Hageman*

Samenvatting

Inleiding

De aanleiding voor het onderzoek naar terugneembare berging van radioactief afval in Nederland is het Regeringsstandpunt uit 1993, waarin uitgesproken wordt dat het gebruik van de Nederlandse diepe ondergrond voor berging van hoog-toxisch afval (o.a. het radioactieve afval) alleen dan is toegestaan als het afval voor lange tijd teruggenomen kan worden.

In overeenstemming met het genoemde Regeringsstandpunt heeft de Beleidscommissie ILONA (Integraal Landelijk Onderzoek Nucleair Afval) aan de Commissie CORA (Commissie Opberging Radioactief Afval) verzocht haar studies te concentreren op onderzoek naar terugneembare bergingsmethoden, zowel ondergronds voor meerdere opberggesteenten als bovengronds en deze qua veiligheid en beheersbaarheid onderling te vergelijken. Daarbij moest rekening gehouden worden met de consequenties van transmutatie (omzetting) van actiniden en directe opberging (zonder opwerking) van splijtstof, en ook met andere mogelijkheden om radioactief afval zodanig te bewerken of te binden dat de risico's zo klein mogelijk zijn.

Het onderzoek richt zich op drie mogelijkheden voor terugneembare berging: langdurig bovengronds en ondergronds in een steenzoutformatie of in diepgelegen kleilagen. Voor ieder van de drie methoden zijn onderzocht de terugneembaarheid van het afval en de gevolgen ervan voor de veiligheid van de berging.

Vanzelfsprekend vormt de veiligheid een cruciale voorwaarde voor een berging. Deze wordt gewaarborgd door een multi-barrière systeem, een combinatie van kunstmatige en natuurlijke barrières, die moet voorkomen dat het afval vrijkomt en risico's oplevert. Zo mogelijk moet een berging bovendien fail-safe zijn, dwz. als de menselijke controle over een berging verloren mocht gaan, dan dient de berging onder invloed van natuurlijke processen uiteindelijk in een passief-veilige situatie terecht te komen.

Terugneembaarheid van het afval biedt komende generaties niet alleen de mogelijkheid eigen keuzes te maken, maar brengt ook de noodzaak met zich mee om een opslag of berging langdurig open te houden. Dit vereist meer onderhoud en kan ook meer risico's opleveren. Vooral voor de ondergrondse mogelijkheden moeten speciale technische voorzieningen worden getroffen, die een berging meer gecompliceerd en duurder kunnen maken. Terugneembaarheid kan in dit verband worden gezien als een uitstel van een passief-veilige eindsituatie.

In het onderzoek is voorts aandacht besteed aan de kosten van een bergingsfaciliteit, waaruit het afval terugneembaar is en zo nodig kan worden ondergebracht in een reserve opslag. Naast berging worden ook de perspectieven voor omzetting naar minder radiotoxisch materiaal geëvalueerd. Deze omzettingstechnieken trekken veel aandacht in het internationale onderzoek.

Samenwerking met België en Duitsland heeft een belangrijke rol gespeeld in het onderzoek. Internationale samenwerking wordt ook voor de toekomst onmisbaar geacht.

De opdracht aan CORA is technisch-wetenschappelijk van aard. De Commissie achtte het echter, gezien de aard van het afvalvraagstuk, wenselijk ook de maatschappelijke en ethische aspecten van berging van radioactief afval in het onderzoek te betrekken.

De nadruk bij het onderzoek ligt op het hoogactieve afval. Daarvoor zijn de uitdagingen het grootst. Bepalend zijn: het kernsplijtingsafval van de kerncentrales van Dodewaard en Borsele en de niet opgewerkte splijtstof van de Nederlandse centrales voor medisch en wetenschappelijk onderzoek, de Hoge Flux Reactor in Petten en de Hoger Onderwijs Reactor in Delft. Dit deel van het hoogactieve afval heeft een volume van ca. 125 m³. Het overgrote deel van het afval is laag- en middelactief en vervalt in de loop van enkele honderden jaren grotendeels tot niet-radioactief bedrijfsafval. Overigens dient ook het laag- en middelactief afval terugneembaar te worden opgeslagen.

Aan het CORA-onderzoekprogramma, dat 21 projecten omvat, is deelgenomen door 20 onderzoeksinstituten uit binnen- en buitenland. Het werd uitgevoerd in de periode 1996-2000 en heeft ongeveer €3,5 miljoen gekost. Daarvan is €2,5 miljoen door het Ministerie van Economische Zaken bekostigd, €0,3 miljoen door de Europese Commissie en ongeveer €0,7 miljoen door de betrokken onderzoeksinstituten.

Resultaten van het onderzoek

Langdurige bovengrondse opslag

De bovengrondse terugneembare opslag gaat uit van de huidige interim faciliteit van COVRA (Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval) in Borsele die gepland is voor opslag gedurende ongeveer 100 jaar (figuur 3.1 en 3.3).

In het onderzoek werd nagegaan of het technisch mogelijk is de opslagperiode te verlengen tot circa 300 jaar.

Terugneembaarheid

Het terugnemen van individuele afvalvaten in een bovengrondse opslag zoals bij COVRA kan relatief eenvoudig en snel worden uitgevoerd. Het uitvoeren van onderhoud en vervangingen maakt het technisch mogelijk de levensduur van de bestaande en geplande gebouwen te verlengen tot ca. 300 jaar [CORA 01]. Voor de opslag van het hoogactieve afval is telkens na ongeveer 100 jaar een mogelijk volledige dan wel een gedeeltelijke vervanging van het gebouw nodig [CORA 03].

Een continue organisatorische inzet, die het onderhoud, het gegevensbeheer en het toezicht gedurende de gehele periode van opslag zeker stelt, is noodzakelijk.

Veiligheid

Een verkennende analyse van de gevolgen van een mogelijke overstroming van de COVRA-faciliteit in de komende 300 jaar levert een zeer lage stralingsbelasting in de biosfeer [CORA 02]. Deze is aanzienlijk lager dan het gemiddelde natuurlijke stralingsniveau in Nederland van $2,4 \cdot 10^{-3}$ Sievert per jaar (Sv/j). In het onderzoek wordt verondersteld dat alleen het laag- en middelactief afval in zeewater terecht komt, de vaten intact blijven en daardoor het afval voor een gering deel kan oplossen. Voor de opslag van het hoogactieve afval geldt dat de gevolgen van een overstroming beheersbaar zijn. Het opslaggebouw is waterdicht tot een waterstand van 10 m + NAP. Klimaatseffecten, zoals zeespiegelstijging, zijn geleidelijke processen die dusdanig langzaam verlopen, dat extra beschermende maatregelen tijdig kunnen worden getroffen.

Terugneembare ondergrondse berging in een steenzoutformatie

De basis voor een terugneembare berging in steenzout is het ontwerp voor een conventionele mijn op een diepte van ca. 800 m in een steenzoutformatie met schachten en galerijen. Het aanleggen en bedienen van zo'n mijn is een bewezen technologie. De vraag is of het ontwerp zodanig kan worden aangepast dat het terugnemen van het afval technisch haalbaar en veilig is.

Terugneembaarheid

Terugneembaar opbergen van hoogactief afval in een mijn in een zoutformatie blijkt technisch mogelijk. Het onderzochte opbergprincipe gaat uit van korte horizontale opberggaten in de zijwanden van een galerij (figuur 4.2). Per opberggat wordt één vat geplaatst, waarna het gat wordt opgevuld en met een zoutblok wordt afgesloten. In het proces van terugnemen wordt gebruik gemaakt van een speciale machine die het zout rond het afvalvat wegboort, waarna het vat verwijderd kan worden (figuur 4.3 en 4.4). Het terugnemen volgens deze methode van het hoogactieve afval is uitvoerbaar zolang de mijn onderhouden wordt [CORA 08].

Mijnbouwtechnische ervaring geeft aan dat een mijn in zout, mits goed onderhouden, voor minstens 100 jaar opgehouden kan worden, en waarschijnlijk veel langer. Een langdurige technische en organisatorische inzet is vereist om het afval eventueel te kunnen terugnemen.

Veiligheid

Door verwaarlozing van een mijn, waarin kernsplijtingsafval van de kerncentrales terugneembaar ligt opgeborgen, kan deze vol met water lopen. Oplossen van het afval en verspreiding in het grondwater kan in de biosfeer na ca. 100.000 jaar een maximale stralingsbelasting opleveren die veel lager is dan het gemiddelde natuurlijke stralingsniveau in Nederland van ca. $2,4 \cdot 10^{-3}$ Sv/j [CORA 04]. Dit geldt ook voor een mogelijke verwaarlozing van een berging met splijstofelementen van de onderzoeksreactoren [CORA 05].

Criticiteit (spontane kernreactie) vormt in het voorgestelde opbergconcept voor de splijstofelementen van de onderzoeksreactoren geen veiligheidsprobleem. Een berging met dit materiaal, dat een hoog percentage verrijkt uranium bevat, zal echter aan de non-proliferatie voorschriften van de IAEA (International Atomic Energy Agency), o.a. qua toegankelijkheid, moeten voldoen [CORA 05].

Ioniserende straling afkomstig van het afval kan schade in het kristalrooster van zout veroorzaken. Deze schade, die zich manifesteert in de vorm van minuscule holtes in het zout en aanleiding kan geven tot dynamische vrijzetting van energie, is sterk te beperken door het toepassen van speciale, minder schadegevoelige, materialen als opvulling en afdichting rond de afvalvaten [CORA 12].

Het omstorten van afvalvaten met CaCl_2 kan een vermindering van corrosie en gasontwikkeling opleveren [CORA 14].

Terugneembare ondergrondse berging in een kleilaag

België heeft reeds ervaring met het ontwerp en de aanleg van ondergrondse uitgravingen in kleilagen ten behoeve van berging van radioactief afval. De commissie neemt dit ontwerp, met enkele belangrijke aanpassingen, als uitgangspunt voor een terugneembare berging in Nederlandse klei.

Terugneembaarheid

Het ontwikkelde opbergontwerp in diepgelegen kleilagen is zodanig aangepast dat het hoogactieve afval kan worden teruggenomen. Dit ontwerp lijkt technisch uitvoerbaar, zij het dat de beschikbare gegevens voor toetsing aan de Nederlandse situatie beperkt zijn en aangevuld werden met kennis over de Belgische klei [CORA 15 en 16].

Het ontwikkelde ontwerp gaat uit van korte horizontale opberggaten in de zijwanden van een ondersteunde galerij. Per gat wordt één vat met hoogactief afval geplaatst, waarna het gat wordt opgevuld met een klei/bentoniet afdichting. De vaten zijn ofwel voorzien van een extra verpakking of ze worden in een verbuisd gat geplaatst als bescherming tegen corrosie i.v.m. het in de klei aanwezige vocht. Met een speciale machine kan een vat worden teruggehaald nadat de klei is weggeboord [CORA 17 en 18]. Terugneembaarheid vereist een langdurige technische en organisatorische inspanning.

Veiligheid

Het verwaarlozingsmodel van een mijn met kernsplijtingsafval bestaat uit het vollopen met water. Dit leidt volgens het model na ongeveer 200.000 jaar tot een maximale stralingsbelasting in de biosfeer die veel lager is dan het gemiddelde natuurlijke stralingsniveau in Nederland van ca. $2,4 \cdot 10^{-3}$ Sv/j. De stralingsbelasting is wel hoger dan voor de overeenkomstige situatie in zout. Dit is een gevolg van de veronderstelling dat boven de kleilaag drinkwaterwinning kan plaatsvinden (onwaarschijnlijk in het geval van zout) en van ontbrekende gegevens over het afsluitende gedrag van klei [CORA 04].

De gevolgen van berging van splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren zijn bepaald voor een normaal bedreven en afgesloten berging [CORA 05]. De mogelijke stralingsbelasting is veel lager dan het eerdergenoemde natuurlijke stralingsniveau. De verwaarlozings situatie is niet onderzocht maar verdient in vervolgonderzoek zeker aandacht.

Criticiteit kan worden uitgesloten door toepassing van kleine vaten met relatief weinig splijtstof of door lege ruimten in de vaten op te vullen met speciale materialen. Vanwege het hoge percentage verrijkt uranium in de splijtstof zijn de non-proliferatie voorschriften van de IAEA van toepassing op de berging [CORA 05].

Andere mogelijkheden voor risicovermindering

Internationaal wordt onderzocht of de levensduur van het afval kan worden verkort door het scheiden uit de afvalstroom van hoog-toxische, langlevende nucliden (zoals de actiniden plutonium, americium, uranium, neptunium) en het omzetten of splijten ervan in nucliden met een veel kortere halveringstijd. Bovendien tracht men nucliden die in het milieu relatief mobiel zijn en bovendien moeilijk zijn om te zetten, zoals cesium, technetium en jodium, vast te leggen in materialen die eigenschappen hebben om onder bergingscondities deze nucliden lange tijd te "immobiliseren" [CORA 06].

Het verminderen van de radiotoxiciteit van een aantal nucliden met een grote halveringstijd en de scheiding in categorieën biedt positieve perspectieven, maar deze processen staan nog in de kinderschoenen.

Met het omzetten of "verbranden" van actiniden is voor plutonium door toepassing van MOX-splijtstof (mengsel van uranium en plutonium) in bestaande kernreactoren wel al een begin gemaakt; op den duur zijn versneller gedreven reactoren noodzakelijk om ook de moeilijk splijtbare actiniden te verbranden.

Overigens is het merendeel van het Nederlandse afval vastgelegd in gesmolten glas of cement en is daarmee op dit moment nauwelijks meer geschikt voor verdere scheiding en omzetting.

Maatschappelijke aspecten

In de maatschappelijke discussie betreffende de berging van radioactief afval speelt de risicobeleving een hoofdrol. Bepalend zijn in dit verband de negatieve beeldvorming rond kernenergie, de vrees voor hernieuwde kernenergieproductie, en een onvoldoende vertrouwen in de uitvoerbaarheid en veiligheid van ondergrondse berging. Het feit dat bij terugneembaarheid onherroepelijke beslissingen worden vermeden en dat de mogelijkheid open blijft voor controle en toezicht en voor alternatieve oplossingen, kan wellicht de weerstand tegen berging doen afnemen. Tevens zal de samenleving effectiever moeten worden betrokken bij de technische en maatschappelijke aspecten van het afvalprobleem. Zodoende kan hopelijk een constructieve dialoog op gang gebracht worden [CORA 20].

In het buitenland is reeds de nodige ervaring opgedaan met inspraak van belanghebbenden bij de keuze van de opbergmethode en die van de locatie. Het bleek veelal moeilijk om tot een consensus te komen [CORA 21].

Kostenaspect

De kosten van een verlenging van de bovengrondse opslag, zoals bij COVRA, van ca. 100 naar ca. 300 jaar bedragen ongeveer €90 miljoen aan investeringen en bedrijf.

Aanleg, bedrijf en sluiting van een terugneembare berging is duurder dan een verlenging van de bovengrondse opslag en wel resp. een factor 3 voor zout tot ruim 7 voor klei. Het openhouden van een ondergrondse berging om het afval eventueel te kunnen terugnemen vergt een jaarlijkse uitgave van ca. €1,8 miljoen voor onderhoud, management en inspectie [CORA 09 en 18].

Internationale samenwerking

Internationale samenwerking bij het uitvoeren van onderzoek naar berging van het radioactieve afval is een noodzaak, omdat het probleem van behandeling en opslag of berging van het hoogactieve afval complex is. Bovendien zijn voor het aantonen van de technische haalbaarheid en de veiligheid van opbergconcepten uitgebreide en kostbare praktijktesten vereist. Landen die voor ondergrondse berging dezelfde gesteenten (graniet, klei en zout) bestuderen, bundelen dan ook vaak hun inzet zodat kennis en middelen optimaal worden benut wat de kwaliteit van het onderzoek ten goede komt.

Voor het aantonen van de opbergveiligheid van de ondergrondse opties (zout, klei) zijn boringen in zout- en kleiformaties en praktijktesten in een ondergronds laboratorium noodzakelijke stappen. Nederland beschikt op dit moment niet over een dergelijk laboratorium en bovendien wordt het onderzoek belemmert omdat het heden niet is toegestaan voor het afvalonderzoek gegevens te verzamelen door middel van boringen. Landen zoals Duitsland (zout) en België (klei) zijn wel in het bezit van een dergelijke faciliteit en booractiviteiten zijn daar niet verboden. Samenwerking met o.a. die landen ligt dan ook voor de hand, temeer omdat Nederland slechts een beperkte hoeveelheid hoogradioactief afval bezit. Participatie kan voor Nederland uiteraard wel belangrijke financiële consequenties hebben.

Het streven naar een -zowel uit veiligheidsoogpunt als economisch gezien- optimale regionale Europese oplossing kan ook bijdragen aan een wens tot samenwerking, evenals het besef dat milieu-effecten van een berging landsgrenzen kunnen overschrijden.

De huidige internationale samenwerking is voornamelijk tot stand gekomen via internationale organisaties zoals de Europese Unie (EU), het International Atomic Energy Agency (IAEA/Verenigde Naties) en het Nuclear Energy Agency (NEA/Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling). Voor de toekomst is het voor Nederland gewenst de bestaande samenwerking verder uit te breiden en daarbij duidelijke accenten te leggen o.a. op de probabilistische analyse van de opties voor terugneembaarheid, deelneming aan experimenten in ondergrondse laboratoria in klei (België) en zout (Duitsland) en aandacht te besteden aan sociaal-ethische aspecten.

Een ander onderwerp voor samenwerking heeft te maken met de verscherping van de richtlijnen voor radioactieve stoffen van de Europese Commissie, waardoor een zeer omvangrijke hoeveelheid reststof van natuurlijke oorsprong als laag radioactief materiaal moet worden beschouwd. Een opbergconcept voor deze categorie ontbreekt en vraagt om een gezamenlijke Europese aanpak.

Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Terugneembare berging

1. Voor geen van de drie opties, langdurige bovengrondse opslag en ondergrondse berging in zout of klei, zijn problemen naar voren gekomen die de technische uitvoering in de weg zouden kunnen staan, al zijn er met name voor klei nog onzekerheden. De terugneembare optie ondergronds vereist extra voorzieningen in de mijn. Voor het eventuele terugnemen van het afval uit de ondergrond kan een reserve opslag bovengronds gewenst zijn. Terugneembaarheid kan, volgens de huidige inzichten, alleen gegarandeerd worden voor enkele honderden jaren.

Vergelijking van de opties

2. Bovengrondse opslag wint het van ondergrondse berging wat betreft de betrouwbaarheid van de gegevens en de eenvoud van de terugneemoperatie. Deze optie heeft echter geen natuurlijk multi-barrière systeem, mist de belangrijke “fail-safe” waarborg die wel door ondergrondse berging in zout of klei wordt gerealiseerd. Op den duur is ondergrondse berging noodzakelijk. Berging in zout heeft een goede barrière-werking vanwege de natuurlijke neiging van zout om, bij ontbrekend onderhoud, ruimten langzaam dicht te drukken en het afval in te sluiten. Dit leidt uiteindelijk, ook bij verwaarlozing van de berging, tot een passief-veilige opbergsituatie. Ook een goede berging in klei lijkt haalbaar, alhoewel de kennis omtrent klei kleiner is dan voor zout. De kosten van ondergrondse berging in klei vallen waarschijnlijk hoger uit dan die voor zout, vanwege de mijnbouwkundige noodzaak om in klei de galerijen systematisch te ondersteunen. Een opbergtraject bestaat naar verwachting uit een in de tijd gefaseerde combinatie van bovengrondse opslag en ondergrondse terugneembare berging (figuur 7.1).

Veiligheid

3. Voor langdurige bovengrondse opslag zijn alleen de gevolgen van een overstrooming van een volgens plan onderhouden COVRA-faciliteit onderzocht. Uitgaande van relatief gunstige uitgangspunten (o.a. dat de vaten bij overstrooming intact blijven) wordt een zeer lage stralingsbelasting berekend. Minder gunstige scenario's en mogelijk andere locaties dan die van COVRA zijn niet onderzocht.

Verwaarlozing tijdens de terugneembaarheidsperiode van een ondergrondse berging in zout of klei, met als gevolg dat de mijn vol met water loopt, kan worden gezien als een situatie met mogelijk een maximaal risico. Als de berging kern-splijtingsafval van de kerncentrales bevat kan door verwaarlozing, na ongeveer 100.000 tot 200.000 jaar, in de biosfeer een lage tot zeer lage stralingsbelasting optreden.

Dit geldt ook als er splijstofelementen van de onderzoeksreactoren zijn opgeborgen in steenzout. Voor berging in klei is dit niet bestudeerd.

Er is in het onderzoek geen rekening gehouden met de kans van optreden van de onderzochte situaties.

Alle berekende stralingsdoses zijn beduidend lager dan het gemiddelde natuurlijke stralingsniveau in Nederland, dat ca. $2,4 \cdot 10^{-3}$ Sv/j bedraagt.

Risicovermindering door afvalbewerking

4. De scheidingsprocessen en de processen voor omzetting en immobilisatie van actiniden en splijtingsproducten bevinden zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling. Alhoewel deze processen op de lange termijn wellicht mogelijkheden bieden voor vermindering van de risico's die aan het afval verbonden zijn, ontbreekt het momenteel aan duidelijkheid over de haalbaarheid. Bovendien wordt het kern-splijtingsafval, dat bij de opwerking van gebruikte splijstof ontstaat, ingesmolten in duurzaam glas. Dit vormt een belangrijke belemmering voor het toepassen van deze processen.

Maatschappelijke aspecten

5. De verkenning van de maatschappelijke aspecten, waaraan Nederlandse milieu-organisaties hebben meegewerkt, toont aan dat de discussie over het afval direct wordt gekoppeld aan de negatieve beeldvorming rond kernenergie en de mening dat ondergrondse berging, als oplossing van het afvalprobleem, hernieuwde inzet van kernenergie kan betekenen. In de maatschappij bestaat bij sommigen onvoldoende vertrouwen in de uitvoerbaarheid en de veiligheid van ondergrondse berging.
6. Momenteel ontbreekt een toetsing van de mogelijkheden voor terugneembare berging aan ethisch-maatschappelijke criteria. Voor het bereiken van een aanvaardbare oplossing voor het radioactieve afval is deze noodzakelijk.

Kosten

7. Verlenging van de opslagperiode van COVRA van 100 naar 300 jaar kost ongeveer €90 miljoen aan investeringen en bedrijf. Aanleg en bedrijf van een terugneembare berging in zout, inclusief schachten en galerijen, is ongeveer drie maal zo duur en voor een terugneembare berging in klei ruim zeven maal zo duur. De hogere kosten voor klei, vergeleken met zout, zijn voor een deel het gevolg van de mijnbouwkundige noodzaak om de galerijen te ondersteunen. Het openhouden, na plaatsing van het afval, van een ondergrondse berging in zout of klei kost ongeveer €1,8 miljoen per jaar. Naar verwachting zal een volledig bergingstraject uit een combinatie van bovengrondse opslag en ondergrondse berging bestaan. De totale kosten daarvan zijn slechts te berekenen als van een bepaalde combinatie van bergingsmethoden en hun fasering wordt uitgegaan.

Internationale samenwerking

8. Temeer daar de Nederlandse hoeveelheid radioactief afval relatief beperkt is, vraagt de technische en maatschappelijke complexiteit van de bergingsproblematiek om internationale bundeling van kennis en ervaring. Dit geldt vooral voor de uitvoering van in situ onderzoek en het verzamelen van in situ gegevens door middel van boringen, omdat deze tot op heden in Nederland, in tegenstelling tot bijvoorbeeld Duitsland en België, niet zijn toegestaan. Deelnemen aan onderzoek in

ondergrondse laboratoria is voor de opbergopties in zout en klei een noodzakelijke stap in het aantonen van de veiligheid van terugneembare berging. Verder kan samenwerking bijdragen aan Europese oplossingen voor het afval, o.a. voor de aanzienlijke hoeveelheid radioactieve reststoffen van natuurlijke oorsprong als gevolg van verscherpte richtlijnen van de Europese Commissie.

Aanbevelingen

Op basis van haar conclusies beveelt de Commissie aan het onderzoek van de technische en maatschappelijke aspecten van terugneembare berging van radioactief afval voort te zetten. Samenwerking met het buitenland, met name België en Duitsland, is daarbij onmisbaar.

In het onderzoek zijn twee hoofdlijnen te onderscheiden, die samen de basis voor vervolgonderzoek vormen.

Hoofdlijn 1

De technische aspecten.

Verder onderzoek dient te worden gericht op:

1. een analyse van alle mogelijk risicovolle situaties (o.a. de verwaarlozings situatie), voor zowel de bovengrondse als de ondergrondse mogelijkheden, waarbij rekening wordt gehouden met de kans van optreden van die situaties;
2. in-situ experimenten in ondergrondse laboratoria om onder praktijkomstandigheden het gedrag van zout en klei onder de gecombineerde invloed van druk, temperatuur en straling te bestuderen;
3. ontwikkelen, bouwen en beproeven van bewakingsystemen (monitoring) voor de terugneembaarheidsperiode, zowel bovengronds als ondergronds;
4. studie van een gecombineerd opbergconcept waarin rekening wordt gehouden met de verschillende mogelijke bestemmingen van het afval en dat met oog op de meer stringente richtlijnen van de Europese Commissie, behalve het huidige afval ook grote hoeveelheden laag actief afval van natuurlijke oorsprong in beschouwing neemt;
5. verdere evaluatie van de risico's bij overstroming van de COVRA-locatie; studie van langdurige bovengrondse opslag elders in Nederland;
6. studie van ondiepe opslag in bunkerachtige constructies;
7. verificatie van het stralingsschade proces in steenzout.

Hoofdlijn 2

De ethische en maatschappelijke aspecten.

Verwacht mag worden dat een aanvaardbare oplossing voor het afval slechts bereikbaar is als alle relevante maatschappelijke en technische factoren in een maatschappelijk proces op evenwichtige wijze en goed omschreven aan bod komen.

Daarom is het nodig om te komen tot:

1. inventarisatie van alle factoren en belanghebbenden die bij een maatschappelijk keuze proces een rol spelen;

2. toetsing van de mogelijkheden voor terugneembare berging aan maatschappelijk-ethische criteria.
3. stapsgewijze ontwikkeling van een maatschappelijk keuzeprocess, zonder vooropgelegde conclusies en waarbij voorzien wordt in:
 - vroegtijdige betrokkenheid van alle belanghebbenden,
 - een onafhankelijke begeleiding,
 - een open en volledige publieksvoorlichting,
 - inschakeling van sociaal-ethische expertise.

1. Inleiding

Het onderzoekprogramma naar de mogelijkheden van terugneembare berging van radioactief afval in Nederland werd uitgevoerd in de periode 1996-2000. Het maakt deel uit van de activiteiten van de Commissie Integraal Landelijk Onderzoek Nucleair Afval (ILONA), die voor begeleiding van het onderzoek de Commissie Opberging Radioactief Afval (CORA) instelde.

Vanaf de zeventiger jaren wordt reeds onderzoek verricht om oplossingen voor de berging van het radioactief afval te vinden. Dit concentreerde zich oorspronkelijk volledig op maximale isolatie van het afval door definitieve berging in Nederlandse zoutformaties: het OPLA (OPLAnd)-onderzoek ¹¹. Het plan bestond uit meerdere fasen.

De eerste fase, inclusief een aanvullende fase, omvatte laboratorium-onderzoek en bureaustudies en werd in 1993 afgerond. De tweede fase zou bestaan uit veldwerk, zoals proefboringen in zoutpijlers. De Regering achtte het toen echter, mede gezien de maatschappelijke weerstand tegen geologische berging, niet acceptabel om daartoe over te gaan.

Desalniettemin achtte de Regering verder onderzoek wenselijk. Dit diende zich echter te richten op mogelijkheden het afval niet alleen veilig, maar tevens voor langere tijd terugneembaar op te bergen. Niet alleen steenzout, maar ook andere opberggesteenten moesten worden onderzocht. Bovendien dienden de voor- en nadelen van onder- en bovengrondse berging tegen elkaar te worden afgewogen.

Uitgaande van bovengenoemde richtlijnen heeft het CORA-onderzoek zich geconcentreerd op drie opties: enerzijds langdurig bovengronds en anderzijds ondergronds in steenzout, resp. klei.

De belangrijkste resultaten van het onderzoek zijn in dit rapport samengevat.

In hoofdstuk 2 wordt het onderzoekprogramma toegelicht, zoals afgeleid uit een Regeringsstandpunt van 1993 ²¹ en de daaruit voortvloeiende taakstelling van CORA.

De drie opties worden daar beknopt en vervolgens in de hoofdstukken 3, 4 en 5 meer uitvoerig beschreven. Hoofdstuk 6 gaat in op alternatieve mogelijkheden om de blootstellingsrisico's van het afval te verminderen, zoals het verkorten van de levensduur van het afval en het inkapselen in zeer stabiele materialen. In hoofdstuk 7 worden de opties vergeleken, voornamelijk aan de hand van een aantal veiligheidsfactoren. Ook wordt aangegeven hoe boven- en ondergrondse berging gecombineerd kunnen worden. In hoofdstuk 8 komen de maatschappelijke aspecten aan de orde. Hoofdstuk 9 benadrukt het belang van internationale samenwerking en legt daarbij accenten voor de toekomst. Hoofdstuk 10 sluit het rapport af met conclusies en aanbevelingen.

Uiteraard moet in dit rapport worden volstaan met een beknopte weergave van de uitgevoerde studies. De Commissie is er zich van bewust dat zodoende lacunes onvermijdelijk zijn. Voor de volledige resultaten van het onderzoek wordt verwezen naar de deelrapporten over de CORA-studies; een overzicht daarvan en van de deelnemende instituten is opgenomen in Appendix 1. De samenstelling van de Commissie is vermeld in Appendix 2. Tevens zijn de literatuurverwijzingen en een verklarende woordenlijst opgenomen.

2. Uitgangspunten en structuur van het onderzoek

Het CORA-programma beschouwt langdurige bovengrondse opslag en diepe berging in steenzoutvoorkomens en kleilagen. Daarbij vormt, naast de veiligheid, ook de langdurige terugneembaarheid van het radioactieve afval een voorwaarde.

2.1 Regeringsstandpunt over het gebruik van de diepe ondergrond

Het CORA-onderzoek komt voort uit het Regeringsstandpunt van 1993 ²⁾ over de vraag, of en zo ja, onder welke voorwaarden de diepe ondergrond mag en kan worden gebruikt voor het opbergen van hoog-toxisch afval. Deze vraag was neergelegd in Actiepunt 62 van het Nationaal Milieubeleidsplan uit 1989 ³⁾.

In het Regeringsstandpunt werd vastgesteld dat het ontstaan van hoog-toxisch afval uit het oogpunt van duurzame ontwikkeling en milieubeleid in beginsel ongewenst is. Door preventie en hergebruik optimaal te benutten, dient de stroom hoog-toxisch afval (o.a. radioactief afval) geminimaliseerd te worden. Voor het bestaande onverwerkbaar afval en dat wat in de toekomst onvermijdelijk nog ontstaat, zal berging moeten worden gerealiseerd gedurende een lange periode. De berging moet om twee redenen zodanig zijn ingericht, dat er sprake is van terugneembaarheid op langere termijn: in de eerste plaats dient het afval beheersbaar en controleerbaar te worden geborgen op een wijze die omkeerbaar is. In de tweede plaats moet het afval beschikbaar blijven voor eventueel hergebruik.

De eis van terugneembaarheid heeft evenwel tot gevolg dat toekomstige generaties voor geruime tijd worden belast met de zorg voor het hoog-toxische afval.

Gezien het Regeringsstandpunt werd het OPLA-onderzoek, dat puur gericht was op niet-terugneembare opberging van radioactief afval in steenzoutformaties, beëindigd.

2.2 De taakstelling

In overeenstemming met het genoemde Regeringsstandpunt heeft de Commissie ILONA aan de Commissie CORA verzocht haar studies te concentreren op onderzoek naar terugneembare opbergingsmethoden, zowel ondergronds voor meerdere opberggesteenten als bovengronds en deze qua veiligheid en beheersbaarheid onderling te vergelijken. Daarbij moet rekening gehouden worden met de consequenties van transmutatie (omzetting) van actiniden en directe opberging (zonder opwerking) van splijtstof en ook met andere mogelijkheden om radioactief afval zodanig te bewerken of te binden dat de risico's zo klein mogelijk zijn.

Deze opdracht is technisch-wetenschappelijk van aard. De Commissie heeft echter gemeend de maatschappelijke en ethische aspecten die met terugneembare berging verband houden ook in het onderzoekprogramma te moeten betrekken.

De terugneembaarheid van het afval staat centraal in het CORA-programma, maar de veiligheid van de berging staat voorop.

Essentieel voor de veiligheid van een berging^{*)} is de aanwezigheid van een multi-barrière systeem, bestaande uit kunstmatige en natuurlijke barrières.

^{*)} Met "berging" wordt in dit rapport bedoeld de opbergfaciliteit.

Kunstmatige barrières zijn bijvoorbeeld afvalverpakkingen en betonnen omhullingen; natuurlijke barrières bestaan, als het ondergrondse berging betreft, uit het opberggesteente en de afdekkende lagen.

De natuurlijke (geologische) barrière draagt in belangrijke mate bij aan het bereiken van een passief-veilige eindsituatie mochten de kunstmatige barrières falen, zoals dat bij verwaarlozing van een berging kan optreden. Een berging wordt in dit verband fail-safe genoemd, als een dergelijke natuurlijke barrière aanwezig is.

Het onderzoek van de veiligheid richt zich dan ook, naast de technische beheersbaarheid van de bergingsopties, op de mogelijke stralingsbelasting in de biosfeer om, voor risicovolle situaties, na te gaan of de natuurlijke barrière die passief-veilige eindsituatie oplevert.

Overigens dient de veiligheid gegarandeerd te worden onder toepassing van het ALARA-principe (As Low As Reasonably Achievable). Dit is het streven om op redelijke gronden een zo laag mogelijk risico te bereiken.

2.3 Terugneembaarheid

Algemeen

Aangezien het aspect van de terugneembaarheid in het onderzoek een centrale rol speelt, wordt hierop uitvoeriger ingegaan.

Het OPLA-programma ^{1, 4)} en de Raad voor Milieu- en Natuur Onderzoek ⁵⁾ onderzochten het onderwerp terugneembaarheid reeds in de periode 1989-1993.

Aanleiding daartoe vormden onderzoek van ondergrondse berging van chemisch afval, discussies in internationaal verband ⁶⁾ over de maatschappelijke aspecten van definitieve berging van radioactief afval en de directe berging (zonder opwerking) van gebruikte splijtstofelementen. In het laatste geval vormde de mogelijke economische restwaarde de reden voor de terugneembaarheid. Volgens het OPLA-onderzoek is terugneembare berging van radioactief afval in een mijn in steenzout over een periode van 100 jaar tot enkele honderden jaren technisch mogelijk.

Met het eerder genoemde Regeringsstandpunt nam Nederland, internationaal gezien, als eerste een duidelijke positie in. Thans is er in het buitenland (Canada, Frankrijk, Verenigd Koninkrijk, Zweden en Zwitserland) belangstelling voor terugneembaarheid en vormt dit in toenemende mate onderwerp van onderzoek. Aan het begrip terugneembaarheid wordt echter internationaal een verschillende inhoud gegeven, afhankelijk van o.a. de reden voor terugneming, de tijdsperiode, het type afval dat er voor in aanmerking komt en van de vereiste snelheid waarmee een eventuele terugneming dient plaats te vinden.

Het Regeringsstandpunt spreekt van "terugneembaarheid op langere termijn". Huidige technische beperkingen voor wat betreft de beheersbaarheid van een opbergfaciliteit maken het onwaarschijnlijk dat, met de bestaande technieken, het afval voor meer dan enkele honderden jaren terugneembaar kan worden opgeslagen. Rekening houdend met de technische beperkingen, heeft de Commissie het begrip voor de Nederlandse situatie dan ook gedefinieerd als de eis, eenmaal opgeborgen vaten gedurende een periode van enkele honderden jaren weer te kunnen terughalen. Deze eis van terugneembaarheid geldt voor al het radioactieve afval en biedt vele generaties nog zeer langdurig een mogelijkheid om naar eigen inzicht het afval te beheren.

De redenen voor terugneembaarheid

Als mogelijke redenen voor het langdurig beschikbaar en gemakkelijk bereikbaar houden van het radioactieve afval ziet de Commissie:

- vrijheid van handelen voor toekomstige generaties;
- toetsen en zonodig aanpassen van de bergingsmethode;
- hergebruik van het afval;
- omzetting van het afval in minder schadelijke stoffen;
- ingrijpen bij gevaarlijke situaties.

Ook in het Regeringsstandpunt wordt het potentiële hergebruik van het afval genoemd als doelstelling. Echter, zoals in hoofdstuk 6 uiteengezet, lijkt hergebruik vanwege de voorbewerking van het Nederlandse afval vrijwel onmogelijk. Maar het inzicht hierover kan in de loop van de tijd veranderen.

Door een berging lange tijd open te houden wordt ook de mogelijkheid geboden meer inzicht te krijgen in de processen die zich in werkelijkheid tijdens de berging voordoen, zodat deze zonedig kan worden verbeterd, gewijzigd of eventueel definitief gesloten. Een goed toegankelijke bergingssituatie maakt bovendien onafhankelijke inspectie mogelijk.

De reden voor het terugnemen kan invloed hebben op het opbergontwerp en het proces van terugneming, maar blijft in dit onderzoek buiten beschouwing.

De periode van terugneembaarheid

De Commissie meent dat de duur van deze periode afhangt van de bedoeling, die men heeft met het openhouden. Is dat bijvoorbeeld het kunnen terugnemen voor hergebruik, dan bepalen o.a. economische factoren de tijdsduur. Betreft het de omzetting naar minder gevaarlijk materiaal, dan zal de berging opengehouden dienen te worden totdat een toepasbaar omzettingsprocédé beschikbaar is.

Los van specifieke bestemmingen voor het afval kan de periode van terugneembaarheid benut worden voor een praktijktoetsing van de resultaten van veiligheidsberekeningen. Mocht overwogen worden om over te gaan tot definitieve berging dan vormen de resultaten van die toetsing daarvoor een noodzakelijk gegeven.

De snelheid en zekerheid van het terugneemproces

De snelheid en de zekerheid van het terugnemen kan samenhangen met de gekozen bestemming van het afval of met het optreden van onverwachte situaties, die gevolgen zouden kunnen hebben voor de veiligheid.

Consequenties van terugneembaarheid

Terugneembaarheid van het afval biedt komende generaties niet alleen de mogelijkheid eigen keuzes te maken, maar brengt ook de noodzaak met zich mee om een opslag of berging langdurig open te houden. Dit vereist meer onderhoud, en kan ook meer risico's opleveren. Met name voor de ondergrondse mogelijkheden moeten speciale technische voorzieningen worden getroffen, die de berging meer gecompliceerd en duurder kunnen maken. Deze voorzieningen mogen echter het bereiken van een passief-veilige eindsituatie niet belemmeren.

Langdurig open houden van een berging verlangt ook een continu toezicht op de veiligheid, bijvoorbeeld door het controleren van de afvalcondities en van de (mijn)bouwkundige staat van de berging. Eventueel zullen veiligheidsverbeterende maatregelen moeten worden getroffen, zoals herverpakking van beschadigde containers of, in extreme gevallen, het terugnemen van de gehele afvalinventaris. Ook zal de bereikbaarheid van het afval op peil moeten worden gehouden door uitvoering van onderhoud en gegevensbeheer.

Zorgvuldig toezicht op de veiligheid is slechts mogelijk op basis van een grondige kennis van de bergingssituatie. Dit betekent dat de noodzakelijke expertise in stand moet worden gehouden om komende generaties de essentiële kennis te verschaffen, die hen in staat stelt verantwoorde beslissingen over het afval te nemen.

2.4 Het onderzoekprogramma

Onderzoeksvragen

De eerder genoemde taakstelling leidt tot de volgende onderzoeksvragen.

1. Om hoeveel afval gaat het, welke samenstelling heeft het en hoe wordt het opgeborgen?
2. Met welke methoden is terugneembaarheid technisch te realiseren?
3. Zijn deze opbergmethoden veilig en voor hoe lang?

4. Welke kosten zijn aan die methoden verbonden?
5. Wat zijn de perspectieven van scheiding, transmutatie (omzetting) en immobilisatie (duurzame vastlegging) van specifieke nucliden uit het afval en van directe opberging (zonder opwerking) van gebruikte splijtstofelementen als alternatieve oplossingen?

Op maatschappelijk terrein speelt de vraag welke sociaal-ethische aspecten belangrijk zijn met het oog op de aanvaardbaarheid van terugneembare berging van het afval.

Het radioactieve afval

Het onderzoekprogramma gaat uit van al het radioactieve afval dat in de komende periode van 100 jaar bij COVRA (Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval) zal worden opgeslagen. Dit afval is afkomstig van de kerncentrales, ziekenhuizen, de industrie en van wetenschappelijk onderzoek.

Herkomst en samenstelling van het radioactief afval

Kerncentrales, ziekenhuizen en laboratoria produceren laag- en middelactief afval, dat in beperkte mate straling uitzendt en geen warmte afgeeft. Het laag- en middelactief afval bestaat voor een groot deel uit reststoffen afkomstig uit de ertsverwerkende- en procesindustrie.

Het hoogactieve afval is afkomstig van de kerncentrales Borsele (sluiting in 2004) en Dodewaard (gesloten in 1997) en voor een kleiner deel van de Nederlandse onderzoekscentrales. Gebruikte splijtstof van de kerncentrales wordt in Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk opgewerkt (gerecycled) tot nieuwe splijtstof waarbij opwerkingsafval ontstaat, dat naar Nederland wordt teruggezonden.

Dit afval bestaat o.a. uit het warmte producerende kernsplijtingsafval, dat in duurzaam glas is gesmolten en verpakt in roestvast stalen vaten voor opslag bij COVRA. De gebruikte splijtstof van de onderzoeksreactoren (HFR en HOR) wordt, zonder te zijn opgewerkt, ook bij COVRA opgeslagen. Het heeft een andere samenstelling dan het kernsplijtingsafval en bevat bovendien een hoog percentage verrijkt uranium.

Het overige hoogactieve afval bestaat uit ontmantelingsafval van de kerncentrales en metalen delen van splijtstofelementen afkomstig uit de opwerking.

Alhoewel volgens het Regeringsstandpunt al het radioactief afval terugneembaar dient te zijn, beperkt het CORA-onderzoek zich vooral tot het hoogactieve afval. Voor deze categorie zijn de uitdagingen het grootst.

Hoeveelheden radioactief afval na 100 jaar opslag bij COVRA ⁷¹

Laag- en middelactief afval		Hoogactief afval	
		warmte producerend en hiermee gelijkgesteld afval	
bedrijfsafval	168.000 m ³	kernsplijtingsafval	70 m ³
opwerkingsafval	2.000 m ³	splijtstofelementen	40 m ³
ontmantelingsafval	18.000 m ³		
		niet-warmte producerend afval	
		ontmantelingsafval	2.000 m ³
		opwerkingsafval	810 m ³
		overig hoogradioactief afval	120 m ³
totaal	188.000 m³	totaal	3.040 m³

Het hoogactief afval, dat in volume slechts enkele procenten van de totale hoeveelheid omvat, neemt meer dan 95 % van de activiteit van het afval voor zijn rekening.

De belangrijkste componenten van het hoogactieve afval zijn:

- het kernsplijtings- en ontmantelingsafval van de kerncentrales;
- de gebruikte splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren voor wetenschappelijke en medische doeleinden.

De gebruikte splijtstof van de onderzoeksreactoren verschilt van het kernsplijtingsafval.

De samenstelling: de splijtstof bevat een hoog percentage verrijkt uranium (tot ca. 70 %); het kernsplijtingsafval een zeer geringe hoeveelheid (< 1 %).

De aard: de oplosbaarheid van de splijtstof is groter dan die van kernsplijtingsafval, dat in glas gesmolten is en zeer moeilijk oplost.

De hoeveelheid: het kernsplijtingsafval omvat ca. 300 vaten (type COGEMA) en de splijtstof ca. 10 vaten.

Onafhankelijk van de wijze van opslag of berging zal tijdens een periode van enkele honderden jaren de activiteit van het afval (aanzienlijk) verminderen. Een groot deel van het laag- en middelactief afval vervalt dusdanig snel, dat het in de loop van de tijd als niet-radioactief afval kan worden behandeld. Een klein deel van het laag- en middelactief afval en een groot deel van het hoogactief afval blijft echter nog zeer lang radioactief

Van het in 1997 bij COVRA aanwezige laag- en middelactief afval, ca. 21.000 vaten, kunnen na 100 jaar ongeveer 15.000 vaten worden afgevoerd als niet-radioactief afval en na 300 jaar nog eens 4300 [CORA 01]. Daarnaast zullen gedurende de resterende bedrijfsperiode van COVRA nog ongeveer 66.000 vaten met bedrijfsafval en 24.000 vaten met ontmantelingsafval worden aangevoerd. Ook daarvan vervalt eveneens in de loop van 300 jaar een aanzienlijke fractie. Ook het hoogactieve deel van het afval dat wordt opgeslagen vervalt voor een deel [CORA 03].

In de loop van 300 jaar kan bijna al het niet-warmteproducerende hoogactieve afval, waaronder het ontmantelingsafval van de beide kerncentrales, als laag- en middelactief afval worden geclassificeerd. Het ontmantelingsafval is reeds binnen 100 jaar voor meer dan 95% vervallen tot laag- en middelactief afval en deels tot niet-radioactief afval. Het resterende deel is na 200 jaar voor ca 35% en na 300 jaar vrijwel geheel teruggebracht tot laag- en middelactief afval, met uitzondering van ca. 50 vaten met hoogradioactief afval. De activiteit daarvan is, ook na 300 jaar, hoger dan de voorgeschreven limietwaarde van 10 millisievert per uur aan het oppervlak van de vaten. Deze vaten zullen dan ook blijvend als hoogactief afval behandeld moeten worden.

De categorie warmteproducerend (en daarmee gelijkgesteld) hoogactief afval, voornamelijk bestaande uit het kernsplijtingsafval en de splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren, bezit ook na 300 jaar een dusdanig hoge stralingsdosis aan het oppervlak van de vaten, dat hier geen reductie van de omvang kan worden bereikt. Wel is de warmteproductie van dit afval sterk gedaald.

Door verscherping van de richtlijnen van de Europese Commissie kan een omvangrijke hoeveelheid zeer laagactief afval van natuurlijke oorsprong nog in aanmerking komen voor opslag of berging.

De opbergmethoden

Terugneembaar bovengronds voor een periode van enkele honderden jaren, zoals op de huidige COVRA-locatie

Het ontwerp van deze opslag gaat uit van een levensduur van de bunkerachtige gebouwen van ongeveer 100 jaar. Het onderzoek van de langdurige bovengrondse berging gaat na of het technisch mogelijk is de opslagperiode te verlengen tot circa 300 jaar (Hoofdstuk 3).

Andere mogelijkheden, zoals ondiepe berging enkele tientallen meters onder het oppervlak in betonnen bunkers, zijn niet onderzocht; beknopte achtergrondinformatie, gebaseerd op ervaringen in het buitenland, wordt wel gegeven (Appendix 3).

Ondergronds op terugneembare wijze in een mijn aangelegd in een steenzout-formatie

Uitgangspunt is het ontwerp voor berging van radioactief afval uit de OPLA-studie ¹¹. Dit ontwerp gaat uit van een conventionele mijn op een diepte van ca. 800 m in een zoutformatie met schachten en galerijen. Het aanleggen en bedienen van zo'n mijn is een bewezen technologie. De vraag is of het gekozen ontwerp zodanig kan worden aangepast dat terugnemen van het afval technisch haalbaar en veilig is (Hoofdstuk 4).

Ondergronds op terugneembare wijze in een mijn aangelegd in een kleilaag

België heeft reeds ervaring met het ontwerp en de aanleg van ondergrondse uitgravingen in kleilagen. De commissie neemt dit ontwerp, met enkele belangrijke aanpassingen, als uitgangspunt voor een terugneembare berging in Nederlandse klei. Ook hier is de vraag of met deze aanpassingen het terugnemen van afval op een technisch haalbare en veilige wijze kan plaatsvinden (Hoofdstuk 5).

Ondergrondse en bovengrondse berging

Combinatie van opslag- en bergingsopties kan mogelijkheden bieden om optimaal van de sterke kanten van deze opties gebruik te maken. Het gaat dus meer om een fasering in de tijd dan om een keuze tussen opties (Hoofdstuk 7).

Veiligheid

Veiligheid omvat de (mijn)bouwkundige beheersbaarheid en de stralingsbelasting. Onderzoek van de beheersbaarheid is gericht op de technische haalbaarheid van het realiseren en langdurig in stand houden van een opslag of berging. Voor het bepalen van de stralingsbelasting zijn in eerste instantie rekenmodellen ontwikkeld die de processen beschrijven als het afval in bepaalde situaties, o.a. die met een mogelijk maximaal risico, mocht vrijkomen uit een bergingsfaciliteit. Met deze modellen is voor die situaties, als deze mochten optreden, een verkennende berekening van de stralingsbelasting in de biosfeer uitgevoerd. De kans van optreden van deze situaties is niet onderzocht en wordt in de veiligheidsanalyse op 1 gesteld. Op basis van deze deterministische benadering wordt voor genoemde situaties de maximale, jaarlijkse, individuele stralingsdosis berekend die in de biosfeer kan optreden. Deze doses vormen niet meer dan een indicatie van de stralingsbelasting. De onzekerheid erin is relatief groot. Een vergelijking met dosislimietwaarden of overlijdensrisicolimieten is niet zinvol in dit verkennende stadium van het onderzoek. Temeer daar de kans op het vrijkomen van het afval niet onderzocht is.

Voor een indruk van de hoogte van de berekende doses kan ter vergelijking dienen het gemiddelde natuurlijke stralingsniveau in Nederland van $2,4 \cdot 10^{-3}$ Sv/j (Sievert/jaar).

Omdat de gebruikte splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren een hoog percentage verrijkt uranium bevatten is de criticiteit van het opbergsysteem onderzocht.

Criticiteit is een situatie waarin een kernsplijtingsproces zichzelf in stand houdt en explosief gaat verlopen. In de reactor van een kerncentrale wordt een gecontroleerd splijtingsproces op gang gehouden, waarbij iedere kernsplijting van ^{235}U precies één neutron oplevert die vervolgens weer één ^{235}U atoom splijt, enz. Zo'n evenwichtssituatie heeft een criticiteitsfactor 1.

In gebruikte splijtstof, waarin veel van het splijtbaar ^{235}U reeds is verbruikt, gaat het splijtingsproces in verzwakte mate nog door. Dit geldt bijvoorbeeld voor de gebruikte splijtstof van kerncentrales. Voor onderzoeksreactoren die met hoogverrijkte splijtstof werken, is na gebruik nog een aanzienlijke hoeveelheid splijtbaar ^{235}U aanwezig. Het is essentieel dat daarin geen ongecontroleerd splijtingsproces plaatsvindt. De criticiteitsfactor moet kleiner dan 1 blijven (veilige bovengrens 0,95).

De bepalende grootheden zijn daarbij:

- de hoeveelheid ^{235}U ;
- andere aanwezige materialen (o.a. water en zout);
- de afmetingen van het opbergsysteem.

Kosten

De kosten hebben zowel betrekking op de realisering van de opslag of de berging, als op het openhouden om het afval eventueel weer te kunnen terugnemen; de bedragen zijn indicatief. De kosten van het terugnemen van het afval zijn niet onderzocht.

Mogelijkheden voor omzetting naar minder gevaarlijk materiaal

Een beknopt beeld wordt gegeven van de huidige stand van het onderzoek naar deze omzettingmogelijkheden (Hoofdstuk 6).

De maatschappelijke aspecten van terugneembare berging

Een eerste verkenning is uitgevoerd van maatschappelijke aspecten, die een rol spelen bij de acceptatie van berging van radioactief afval. Ook is inzicht verkregen in maatschappelijke processen die in het buitenland hebben plaatsgevonden om tot een oplossing van het afvalvraagstuk te komen (Hoofdstuk 8).

2.5 Algemene aspecten van het onderzoek

Internationale samenwerking

Samenwerking met België en Duitsland, in het bijzonder voor het verkrijgen van in-situ gegevens, is van eminent belang gebleken. Uitgaande van de huidige samenwerkingspositie van Nederland wordt aangegeven voor welke onderzoeksaspecten van terugneembaarheid de internationale samenwerking kan worden geïntensiveerd of uitgebreid (Hoofdstuk 9).

Non-proliferatie

Het langdurig openhouden van een faciliteit met nucleair materiaal, dat meer dan 20 % verrijkt uranium bevat, brengt de noodzaak voor doelgerichte bewaking met zich mee. Volgens het International Atomic Energy Agency (IAEA) moet zo'n faciliteit voldoen aan het volledige systeem van veiligheidsvoorschriften (full safeguards). Dit om te voorkomen dat de nog aanwezige splijtstof in verkeerde handen terechtkomt, bijv. voor de productie van kernwapens.

Het ontwerp en de bouw van een opslag of berging met de splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren zullen dan ook moeten worden uitgevoerd conform de genoemde veiligheidsvoorschriften. Ook alle wijzigingen vallen daaronder. De periode waarin het afval terugneembaar is, wordt eveneens onderworpen aan de veiligheidsvoorschriften van de IAEA. Onverantwoorde verwijdering van het afval dient ook na sluiting van de berging te worden tegengegaan door controles van de IAEA.

Naarmate de mijn langer open blijft, stijgt de kans dat hoogverrijkte splijtstof door kwaadwillenden wordt teruggehaald. Daarom kan de splijtstof ook ongeschikt voor verder gebruik worden gemaakt door deze in een stabiele vorm vast te leggen (bijv. met behulp van een inert materiaal als SYNROC) of door het smelten van de splijtstof en deze te verdunnen met verarmd uranium [CORA 05]. Ook om corrosie en criticiteit tegen te gaan, is een dergelijke behandeling te overwegen.

Belangrijke beperkingen

Belangrijke beperkingen zijn de geringe beschikbaarheid van in-situ gegevens en de onzekerheden die onvermijdelijk gepaard gaan met de extrapolatie van verschijnselen over perioden van honderdduizenden jaren. Dit betekent dat het onderzoek oriënterend van aard is. Voorts ligt het accent op het hoogactieve afval. De terugneembaarheid van het laag- en middelactieve afval is niet onderzocht.

Studie van de gevolgen van directe opberging, d.w.z. berging of opslag van gebruikte, niet-opgewerkte splijtstof heeft zich beperkt tot de splijtstof van de Nederlandse onderzoeksreactoren.

De hoeveelheid afval die na een periode van 100 jaar bij COVRA ligt opgeslagen, vormt het uitgangspunt voor het onderzoek. Nieuw geproduceerd afval in de periode daarna blijft in de studie buiten beschouwing.

Uitvoering

Aan het onderzoekprogramma, dat 21 projecten omvat, is deelgenomen door 20 onderzoeksinstituten uit binnen- en buitenland (Appendix 2). Bijdragen zijn geleverd op het gebied van een groot aantal technische en wetenschappelijke vakdisciplines zoals: geologie, geohydrologie, geochemie, (mijn)bouwtechniek, gesteentemechanica, stralingshygiëne, kernfysica, milieufilosofie, sociologie.

Tijdschema en kosten

In de eerste helft van 1996 kwam een concept voorstel voor het CORA-onderzoekprogramma tot stand, waarna in september 1996 het daadwerkelijke onderzoek van start ging. Het inhoudelijke deel werd ruim 3 jaar later in het voorjaar van 2000 afgesloten.

De totale uitgaven van het onderzoek bedragen ongeveer €3,5 miljoen, waarvan €2,5 miljoen door het Ministerie van Economische Zaken is bekostigd, €0,3 miljoen door de Europese Commissie en ongeveer €0,7 miljoen afkomstig is van de eigen bijdragen van onderzoeksinstituten.

3. Langdurige terugneembare bovengrondse opslag

Bij bovengrondse opslag is het afval in principe permanent relatief eenvoudig terugneembaar. Toch vormt deze optie geen definitieve oplossing voor het afval, vanwege een beperkt multi-barrière systeem waaraan een fail-safe aspect ontbreekt.

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van onderzoek naar de mogelijkheden voor een langdurige (circa 300 jaar) bovengrondse opslag, op een zodanige manier dat het afval terugneembaar is. Als basis voor het onderzoek wordt genomen de opslagsituatie zoals bij COVRA, met een overzicht van de totale afvalinventaris na 100 jaar. In het bijzonder is onderzocht of de opslaggebouwen in stand kunnen worden gehouden als de opslagperiode wordt verlengd van 100 naar 300 jaar en welke vermindering van de hoeveelheid radioactief afval optreedt door natuurlijk verval.

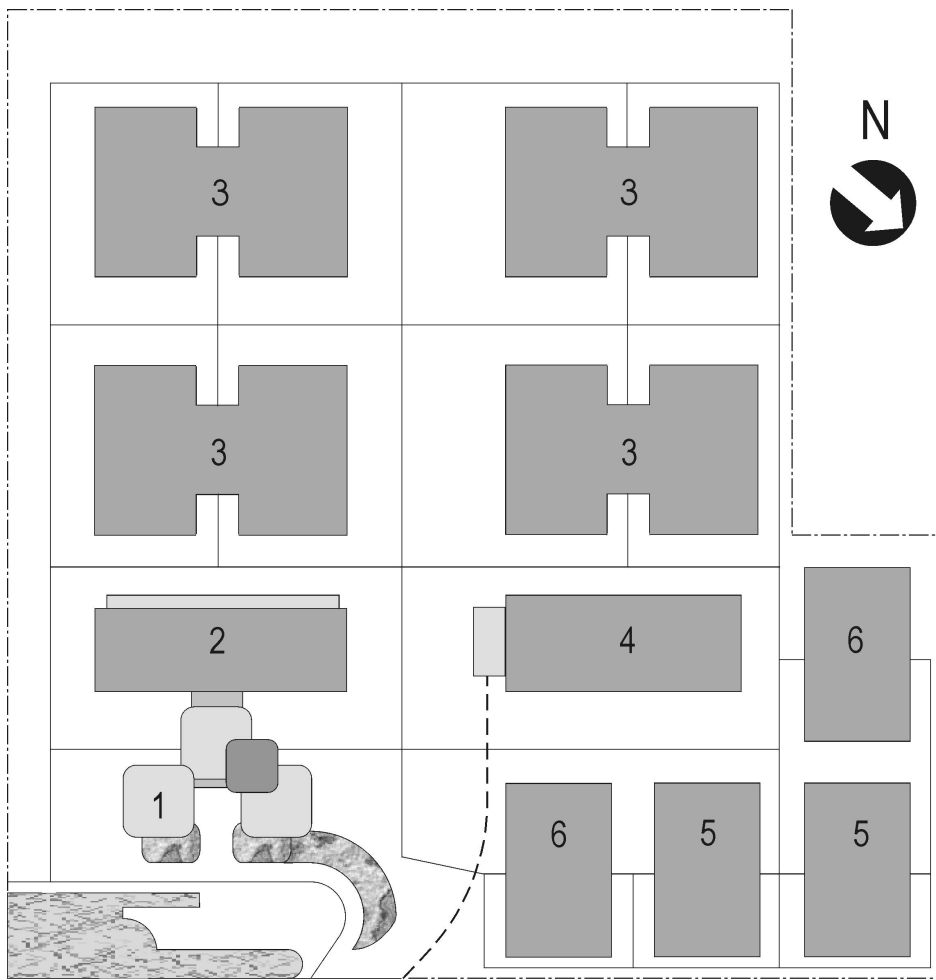
Een andere methode, de ondiepe berging, maakt gebruik van bunkerachtige constructies op een diepte van maximaal enkele tientallen meters onder het maaiveld. CORA heeft deze variant niet onderzocht. Wel is beknopte achtergrondinformatie over reeds functionerende faciliteiten in het buitenland vermeld in Appendix 3. Andere locaties voor een langdurige bovengrondse opslag, zoals bij COVRA, vormen evenmin onderdeel van het CORA onderzoek.

3.2 100 Jaar opslag bij COVRA

De COVRA-faciliteit is bestemd om al het Nederlandse radioactieve afval centraal op te slaan. In de eindfase, na circa 100 jaar, zal de opslag volledig benut kunnen zijn. De opslag bij COVRA bestaat dan uit ca. 188.000 m³ laag- en middelactief en ca. 3.000 m³ hoogactief afval (zie 2.4) ⁷¹. De terreinsituatie voor de huidige en de maximale opslag is aangegeven in de figuren 3.1 en 3.2.



Figuur 3.1 De huidige opslag van laag- en middelactief afval (LOG) bij COVRA met fotomontage van het opslaggebouw voor het hoogactief afval (HABOG). Bron: COVRA



Figuur 3.2 Terreinsituatie van COVRA in volledig gevulde omvang.

Bron: COVRA

1. Kantoorgebouw
2. Afval Verwerkings Gebouw (AVG)
3. Laag- en middelradioactief afval Opslag Gebouw (LOG)
4. Hoogradioactief Afval Behandelings- en Opslag Gebouw (HABOG)
5. Container Opslag Gebouw (COG)
6. Verarmd uranium Opslag Gebouw (VOG)

De opslag van het laag-en middelactief afval (LOG) (figuur 3.3)

Het bestaande LOG-gebouw (12.000m²) op het COVRA terrein is te verdelen in 4 compartimenten: de ontvangsthal, en drie opslagruimten. Voor een vierde opslagruimte is plaats gereserveerd. Tussen de twee aangrenzende opslagruimten is een binnenstraat opgenomen.

Alle ruimten zijn van elkaar gescheiden door middel van een dikke betonconstructie. De vloer van de begane grond is uitgevoerd in beton en voorzien van een epoxy-coating ter voorkoming van beschadiging van de onderliggende betonconstructie en voor ontsmetting van de vloer.

Langs de gehele vloer is een opstaande betonrand aangebracht, zodat reinigingswater niet uit het gebouw kan stromen.

Het merendeel van het vaste laag- en middelradioactief afval wordt bij COVRA aangeleverd in stalen vaten. Deze worden onder een hydraulische pers gecompacteerd en daarna met enkele stuks tegelijk in een stalen vat geplaatst. Dit vat is vooraf inwendig voorzien van een cementbodem. Na de plaatsing van de samengeperste pakketten in het vat wordt deze afgevuld met beton. Als het stralingstempo aan de buitenkant van het vat nog te hoog is, wordt er een betonnen huls omheen geplaatst. Daarna worden ze volgens een vastgestelde procedure in de opslagruimten geplaatst.

Veiligheid

In het algemeen geldt dat een opslagfaciliteit voor radioactief afval veilig is als ⁸¹:

- het individuele overlijdensrisico als gevolg van de opslag van het radioactieve afval beneden een waarde van 10^{-6} per jaar ligt,
- voldaan wordt aan de IBC-criteria (Isoleren, Beheersen, Controleren).

Toepassing van het ALARA-principe ⁸¹ dient daarbij, door het treffen van zoveel mogelijk maatregelen, altijd plaats te vinden.

Maatregelen om het afval te isoleren of de straling af te schermen zijn o.a. cementatie en verglazing van het radioactieve materiaal, de verpakking, de wijze van stapeling van vaten, de constructie van de opslaggebouwen en de verdeling van de gebouwen over het terrein.

Beheersmaatregelen betreffen adequate opslagmethoden, het drogen van de lucht in de opslaggebouwen ter voorkoming van corrosie, de ruimtelijke verdeling van het afval ter voorkoming van criticiteit en de koeling van het warmte-producerende hoogactieve afval. Verder zijn de opslaggebouwen zodanig ontworpen dat ze bestand zijn tegen overstromingen tot een bepaalde waterhoogte.

De controle behelst toezicht op de integriteit van de opslag en de verpakkingen. Dit kan o.a. door metingen van stralingsniveau's in de opslagruimte, aan de buitenkant van de containers, in de ventilatielucht, in de lozingsleiding en aan de terreingrens; bemonstering van de inhoud van de hoogactieve afvalvaten, alsmede druk- en temperatuurmetingen en het toezien op een adequate opslag zodat visuele inspectie mogelijk is.

De COVRA-faciliteit voldoet volgens de verleende vergunning van 1998 aan de IBC-criteria. Dit houdt o.a. in dat de installaties zo zijn ontworpen ⁷¹ dat niet alleen onder normale bedrijfsomstandigheden, maar ook bij storingen en ongevallen het individueel overlijdensrisico voor het COVRA-personeel, de medewerkers van omliggende bedrijven en de omwonende bevolking niet groter mag zijn dan 10^{-6} per jaar. Er wordt naar gestreefd dit risico kleiner dan 10^{-8} per jaar te houden. Bepalend voor het risico in de omgeving is de directe stralingsdosis aan de terreingrens.



Figuur 3.3 De opslag van het laag- en middelactief afval (LOG).

Bron: COVRA

De opslag van het hoogactieve afval (HABOG) *(figuren 3.4 en 3.5)*

Het HABOG (nu in aanbouw) is opgetrokken uit beton, heeft een lengte van ongeveer 90 m en is 45 m breed. Het gebouw is zodanig ontworpen dat er zelfs bij een overstroming van het COVRA-terrein geen water kan binnendringen. Bovendien is het bestand tegen gasexplosies, neerstortende vliegtuigen en aardbevingen. Het gebouw omvat in totaal zes opslagmodules. Drie voor het warmteproducerend afval, het kernsplijtingsafval en de splijtstofelementen van de Nederlandse onderzoekreactoren en nog eens drie voor het niet-warmteproducerend afval. Transportcontainers met het afval worden per spoor of per vrachtwagen aangevoerd, waarna ze vanuit een ontvangsthal via een sluis naar een ontladruimte worden vervoerd. Het hoogactieve afval is verpakt in roestvast stalen vaten.

De vaten met het warmteproducerende afval worden in de ontladruimte uit de transportcontainer gehaald. Vandaar vindt transport met een lorrie plaats naar een ruimte die zich boven de opslagcompartimenten bevindt. Deze compartimenten bestaan uit lange, verticaal opgestelde, stalen cilinders. Vervolgens wordt de afschermplug van een opbergcilinder uit de vloer getild om het afval in de opbergcilinder neer te laten. Na afloop wordt de afschermplug weer teruggeplaatst. De stalen cilinders zijn omgeven door een mantelpijp waardoor lucht stroomt voor de benodigde koeling. De opbergcilinders zijn zodanig ontworpen dat ze, na vulling met een inert gas, hermetisch kunnen worden afgesloten en dat ze de maximale temperatuurbelasting, die gedurende de opslag van het warmteproducerend afval kan optreden, kunnen weerstaan. Het niet-warmteproducerend hoogactieve afval wordt eveneens vanuit de ontladruimte naar het gewenste opslagcompartiment gebracht. Met een kraan, voorzien van speciaal ontworpen grijpers om de verschillende soorten vaten te kunnen hanteren, worden ze daarna in de opslagcompartimenten gestapeld volgens een van te voren vastgestelde procedure.



Figuur 3.4 Het HABOG in aanbouw op het COVRA-terrein (situatie 2000)

Bron COVRA

De volgens de vergunning toegestane verhoging van de stralingsdosis aan de terreingrens bedraagt $0,15 \cdot 10^{-3}$ Sv/j bij continue blootstelling. Door de ligging van de COVRA-vestiging in een industriegebied mogen verblijfsfactoren worden toegepast, die de blootstellingstijd reduceren.

Voorts is bij de inrichting van het terrein het ALARA-principe toegepast door met de gebouwen voor laagactief afval de straling van het hoogactieve afval af te schermen van de terreingrens. Een en ander heeft een verdere reductie van het stralingsniveau tot gevolg, die leidt tot een individueel overlijdensrisico kleiner dan 10^{-8} per jaar. In het ontwerp is extra aandacht besteed aan de overstromings- en onderspoelingsrisico's in verband met de buitendijkse ligging van de opslagfaciliteiten.

De opslag van splijtstofmateriaal dat een hoog percentage verrijkt bevat, zoals de splijtstofelementen van de Nederlandse onderzoeksreactoren, is onderworpen aan de non-proliferatie veiligheidsvoorschriften van de IAEA (2.5).

Terugneembaarheid

De opslag, zoals bij COVRA, is gezien vanuit het oogpunt van terugneembaarheid van het afval een nagenoeg ideale optie. Het afval is gemakkelijk bereikbaar, goed controleerbaar en zondig kunnen afvalvaten snel en eenvoudig worden verwijderd. Er is een beperkte reserve opslagcapaciteit beschikbaar.

Om het terugnemen van het afval gedurende lange tijd (100 jaar) te kunnen garanderen is lange tijd onderhoud en informatiebeheer vereist. Dit brengt een langdurige organisatorische inspanning met zich mee.

3.3 300 Jaar opslag bij COVRA

Onderzocht zijn de gevolgen van een terugneembare opslag bij COVRA als de opslagperiode tot ca. 300 jaar wordt verlengd. Uitgangspunt daarbij is de maximale hoeveelheid afval die in een periode van ongeveer 100 jaar bij COVRA wordt opgeslagen. Met name het laag- en middelactieve deel van het afval neemt in die periode sterk in activiteit af (2.4).

Drie studies zijn uitgevoerd:

- **Inventarisatie en mogelijkheden voor bovengrondse opslag voor 300 jaar van het radioactief afval bij COVRA** [CORA 01].
Het zwaartepunt van deze studie ligt op de analyse van de gebouwtechnische stabiliteit en het verminderen van de afvalomvang door natuurlijk verval over een periode van 300 jaar. Omdat deze vermindering los staat van de wijze van opslag of berging is informatie daarover reeds in 2.4 opgenomen.
- **Risico-evaluatie van een overstroming van het COVRA-terrein** [CORA 02].
Onderzocht worden de gevolgen van een mogelijke overstroming van het COVRA-terrein. Verondersteld wordt dat het laag- en middelactief afval gedurende ongeveer één jaar in het zeewater terechtkomt. De cementverpakking van het afval blijft daarbij intact en lost langzaam op.
Voor het hoogactieve afval is een dergelijke risico analyse niet uitgevoerd, omdat het opslaggebouw waterdicht is tot een hoogte van 10 m +NAP en zodanig ontworpen dat contact van het afval met eventueel toch binnengedrongen water vermeden kan worden. De opslag is zodoende bestand tegen overstromingen.
Bovendien wordt verondersteld dat klimaatseffecten, zoals overstromingen in verband met zeespiegelrijzing, zich in een zodanig langzaam tempo voltrekken dat daarvoor tijdig afdoende maatregelen zijn te treffen.
- **Optimalisatie van de opslag van het hoogactief afval** [CORA 03].
De derde studie richt zich op een mogelijke verbetering van de opslagmethode van het hoogactieve afval als het voor langere tijd (300 jaar) terugneembaar bovengronds wordt opgeslagen.

De genoemde studies leveren de informatie om de langdurige bovengrondse opslag te analyseren op de aspecten veiligheid, terugneembaarheid en kosten. Deze onderwerpen worden in de volgende paragrafen besproken.

3.3.1 Veiligheid

Beheersbaarheid

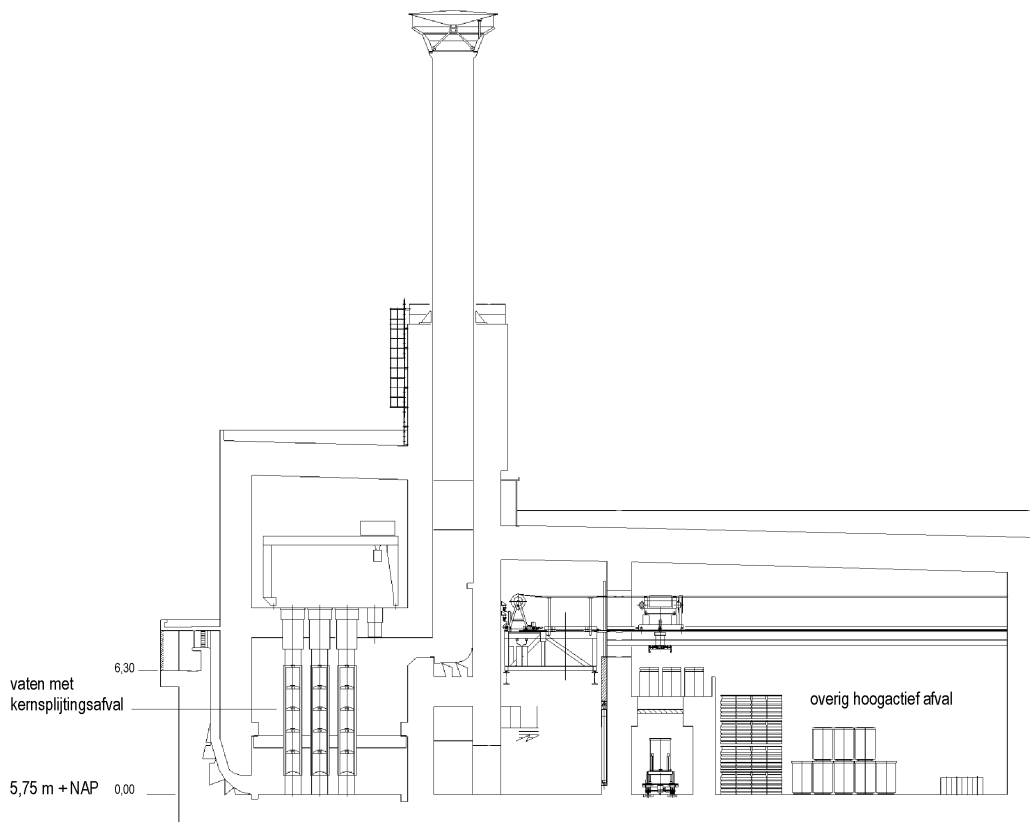
Onder beheersbaarheid wordt verstaan het vermogen om de bestaande COVRA-faciliteit voor een periode van 300 jaar, zowel technisch als bedrijfsmatig, conform de geldende veiligheidseisen en de IBC-criteria in stand te houden.

De gebouwen

De studie [CORA 01] stelt vast dat een levensduur van 300 jaar voor de huidige opslag voor het laag- en middelactief afval technisch haalbaar is, indien regelmatig controles, onderhoudswerkzaamheden en vervangingen worden uitgevoerd. De regelmaat van controles en onderhoud varieert afhankelijk van het gebouwonderdeel van jaarlijks tot éénmaal per 10 jaar, en de vervanging van éénmaal per 10 jaar tot éénmaal per 100 jaar. Bij lagere frequenties dan in [CORA 01] is aangegeven, zijn naar verwachting uitgebreide renovaties nodig om het gebouw in stand te houden.

Het onderhoud van extra gebouwen voor opslag van het laag-en middelactief afval, dat in de resterende bedrijfsperiode van COVRA nog ontstaat, kan beperkt worden door reeds bij het ontwerp met een 300 jaar lange levensduur rekening te houden.

De speciale opslagmodules in het opslaggebouw voor het hoogactieve afval dienen mogelijk na ongeveer 100 jaar vervangen te worden. Daartoe dient een deel van het gebouw te worden afgebroken wat in feite neerkomt op het plaatsen van een vrijwel volledig nieuw gebouw.



Figuur 3.5 Dwarsdoorsnede HABOG (Bron: COVRA)

Over een periode van 300 jaar zou dit dan twee keer nodig zijn. [CORA 03] geeft enkele alternatieven voor volledige vervanging, die neerkomen op hergebruik en gedeeltelijke vervanging van modules. Omdat na 100 jaar de warmteproductie van het hoogactieve afval sterk is afgenomen, kan in de toekomst wellicht met een eenvoudiger gebouw worden volstaan.

De afvalverpakking

De stabiliteit van het toegepaste cement en beton in de vaten met laag- en middelactief afval kan volgens de studie [CORA 01] op een termijn van honderden jaren aangetast worden.

Dit kan zowel van buitenaf als door interne processen gebeuren door o.a.:

- inwerking van kooldioxide vanuit de lucht;
- interactie tussen de gehydrateerde componenten en organische verbindingen, die tijdens radiolyse van het gecementeerde organische materiaal ontstaan;
- inwerking van zouten en zuren vanuit het afval.

Het bij COVRA gebruikte cement en beton heeft evenwel naar verwachting een voldoende lange levensduur om de radioactiviteit ingekapseld te houden. Het hoogactieve afval wordt verpakt in roestvast stalen vaten, die bij een beheersing van de luchtvochtigheid in de opslag ook na een periode van 100 jaar nog intact zijn en goed gehanteerd kunnen worden. Om aan de IBC-criteria te voldoen moet de omhulling een duurzaamheid bezitten om de inhoud niet naar buiten te laten komen. Onder de condities van opslag bij COVRA, in een droge atmosfeer bij gelijkmatige temperatuur, is de verwachting dat de vaten gedurende enkele eeuwen corrosie kunnen weerstaan. Deze uitspraak wordt ondersteund door onderzoek [CORA 01] naar de corrosie van vaten voor laag radioactief afval onder omgevingscondities die overeenstemmen met de condities bij COVRA. Periodieke inspectie van de vaten is niettemin gewenst. De kans op vrijkomen van radioactieve stoffen, bij beschadiging van het vat, is door de verpakking van het afval in cement en beton gering. Zonodig wordt een vat opnieuw verpakt.

Risico's

Een mogelijke ongevalssituatie die werd bestudeerd, is een overstroming van het COVRA-terrein waarbij vaten met afval in het water komen. Door beschadiging en uitloging kan verspreiding van nucliden in het water plaatsvinden. De keuze van deze ongevalssituatie is slechts bedoeld om een eerste indruk van de stralingsbelasting te krijgen.

De risicoanalyse beschouwt het geval dat al het laag- en middelradioactief afval dat recent bij COVRA lag opgeslagen [CORA 01] gedurende één jaar onder water komt te staan. Dat wil zeggen dat na de overstroming het water niet onmiddellijk bedwongen kan worden, zodat gedurende één jaar uitloging van de radionucliden in de afvalvaten door het zeewater optreedt. Voor de gevolgen van het vrijkomen van radioactiviteit in zee zijn pragmatisch alleen die radionucliden uit het afval beschouwd, die een wezenlijke bijdrage aan de stralingsdosis leveren. De keuze is gemaakt op grond van de uitloogbaarheid en de huidige samenstelling van het afval. Verder is gebruik gemaakt van gegevens over de concentratie van radionucliden in zeevoedsel, en over de voedselopname en inademing door de mens.

Hoewel ^{137}Cs voor ca. 97 % de stralingsdosis bepaalt, zijn verder meegenomen ^{14}C , ^{60}Co , ^{90}Sr en enkele specifieke radionucliden. ^{226}Ra (0,02 %) is geselecteerd, om na te gaan of radon (een gasvormig vervalproduct van radium) een belasting voor de bevolking zou kunnen vormen als er op zeezand woningen gebouwd worden.

Verder zijn ^{241}Am , plutonium-isotopen en enkele andere actiniden meegenomen om inzicht te krijgen in de bijdrage van zeer langlevende nucliden.

Het vrijkomende radioactieve materiaal verspreidt zich in het zeewater via stroming en levert een mogelijk extra gezondheidsrisico voor de mens op, door bijvoorbeeld het eten van vis en schelpdieren, het inademen van verstuiven zeewater en het wonen op met zeezand opgehoogd land.

De verspreiding van radionucliden vanaf de Westerschelde langs de Noordzeekust tot aan de Duitse bocht en naar het noordelijke deel van de Noordzee is gemodelleerd, en de stralingsdosis is berekend door die kuststrook te verdelen in 10 compartimenten.

Door de sterke stroming langs de Nederlandse kust zal de horizontale uitwisselings-snelheid tussen de compartimenten de verspreiding van radioactiviteit domineren. Zwevend slib speelt een belangrijke rol in de verspreiding. Enerzijds zal door aanhechten aan slibdeeltjes de activiteit in het water zelf dalen, anderzijds zal door sedimentatie de activiteit van het bodemsediment stijgen. Het effect op de sedimentlagen zal het sterkste zijn in het centrale deel van de Noordzee waar de stroomsnelheden een factor 10-50 lager liggen dan in de kustwateren.

Het noordelijk deel van de Noordzee is veel dieper, zodat de concentraties in het water van dit compartiment onbelangrijk worden.

De studie [CORA 02] concludeert dat voor de referentiegroep van kustbewoners, die tevens aan verstoven zeewater wordt blootgesteld, de extra stralingsdosis het hoogst is over het eerste jaar van blootstelling. Deze dosis als gevolg van inademing en voedselopname bedraagt maximaal $7,2 \cdot 10^{-14}$ Sv en wordt voornamelijk (90 %) door ^{137}Cs (halfwaardetijd ca. 30 jaar) bepaald.

De totale dosis over 10 jaar komt op $4,8 \cdot 10^{-13}$ Sv. Wonen op zeezand, dat extra radium bevat, levert via het vervalproduct radon een vergelijkbare extra dosis op. Deze doses liggen ver beneden de in de studie vermelde grenswaarde van $4 \cdot 10^{-7}$ Sv/j, de dosis die overeenkomt met een risiconiveau van 10^{-8} per jaar. Ook als van een veel grotere hoeveelheid laag- en middelactief afval, dan recent bij CORA lag opgeslagen, zou worden uitgegaan, blijven de doses ver onder de genoemde grenswaarde.

Een niet geheel zekere factor is de snelheid van uitloging van het afval in zeewater. Omdat echter het verschil tussen de berekende stralingsdoses en de gehanteerde grenswaarde zo groot is (factor 10^6) speelt die onzekerheid geen rol van betekenis.

3.3.2 Terugneembaarheid

Bovengrondse opslag volgens het COVRA ontwerp biedt een uitstekende mogelijkheid tot terugneming van het afval. Door voldoende ruimte tussen de stapelingen van de vaten aan te houden blijft ieder vat individueel bereikbaar. De wijze van opslag maakt het direct mogelijk de vaten te identificeren, te inspecteren en desgewenst uit de opslag te verwijderen.

Vanwege de extra maatregelen in het opslaggebouw voor het hoogactief afval, voor zowel stralingsbescherming als warmteafvoer, is de bereikbaarheid van een deel van de vaten minder groot in de opslag voor het laag- en middelactief afval. Niettemin is ook hier, na enkele veiligheidshandelingen, ieder vat bereikbaar om eventueel teruggenomen te worden.

Afvalbeheer en een systeem voor controles zijn onmisbare voorwaarden voor het in stand houden van de bovengenoemde opslagsituatie. Voor een 300-jarige opslagperiode bij COVRA betekent dit de noodzaak voor het langdurig functioneren van een administratie- en registratiesysteem. Informatie over het opgeslagen afval zoals de aard, het volume en de activiteit, en de plaatsing in de gebouwen moet bijgehouden worden én altijd toegankelijk zijn. Dit houdt in dat wijzigingen in die informatie doorgevoerd moeten kunnen worden met gelijktijdige bescherming van opgeslagen data. Wijziging van systeem mag niet leiden tot verlies van informatie.

3.3.3 Kosten

De kosten voor een verlenging van de levensduur van de bovengrondse opslag van ca. 100 tot ca. 300 jaar betreffen de uitgaven voor nieuwe gebouwen en de kosten voor langdurig onderhoud van bestaande en nieuwe faciliteiten.

Voor de opslag van het bestaande en nog te produceren laag- en middelactieve afval zullen in de komende 100 jaar in totaal 4 gebouwen (incl. het reeds bestaande) nodig zijn. Voor een verlenging van 100 tot 300 jaar wordt er dan ook van uitgegaan dat er voor dit afval in deze periode geen extra investeringen voor nieuwe gebouwen nodig zijn. Daarbij mag worden verondersteld dat in de loop van de tijd opslagruimte vrijkomt door afvoer van afval dat door natuurlijk verval niet meer als radioactief behoeft te worden behandeld. Deze ruimte kan worden benut voor opslag van afval dat na 100 jaar nog wordt geproduceerd en aangevoerd. Het onderhoud van de gebouwen vraagt een jaarlijks bedrag van ongeveer €0,5 miljoen.

De opslag van het hoogactieve afval kan verlengd worden door vervanging van het gehele gebouw na ongeveer 100 jaar. Verlenging tot ca. 300 jaar zou dan tweemaal een vervanging van het gebouw betekenen, hetgeen extra kosten van ongeveer €90 miljoen (prijspeil 1998) met zich meebrengt. De jaarlijkse onderhoudskosten zullen ca. €0,2 miljoen bedragen.

Hergebruik van opslagmodules en gedeeltelijke vervanging, met gebruikmaking van het natuurlijk verval van het afval, zijn alternatieven die de kosten kunnen verlagen [CORA 03].

De jaarlijkse uitgaven voor inspectie, onderhoud en management van een eenmaal gevulde opslag zullen vermoedelijk niet sterk afwijken van die voor een ondergrondse opberging (ca. €1,8 miljoen).

Een verdere kostenreductie tot maximaal 25% kan worden bereikt door tussentijdse afvoer van afval dat voldoende vervallen is.

Omdat langdurige bovengrondse opslag geen definitieve oplossing voor het afval is, zullen ook nog kosten gemaakt moeten worden voor de realisering van de uiteindelijke, definitieve berging, bijvoorbeeld ondergronds in zout of klei. De laatstgenoemde kosten kunnen worden gedekt door nu een eenmalige reservering te doen, die een fractie bedraagt van de uiteindelijke investeringen [CORA 01]. De aanpak van COVRA voorziet daarin.

Het financiële voordeel van een langdurige bovengrondse opslag komt vooral voort uit een latere realisatie van de ondergrondse opslag dan momenteel door COVRA wordt voorzien.

3.4 Samenvatting van de onderzoeksresultaten

De belangrijkste resultaten van het onderzoek voor wat betreft de terugneembaarheid, de veiligheid, de levensduur van de gebouwen en de kosten van een langdurige, bovengrondse opslag zijn in deze paragraaf beknopt weergegeven.

Terugneembaarheid

1. Het terugnemen van individuele afvalvaten in een bovengrondse opslag zoals bij COVRA kan relatief eenvoudig en snel worden uitgevoerd. Dit geldt ook voor de lange termijn, mits een continue organisatorische inzet wordt geleverd die het onderhoud, het gegevensbeheer en het toezicht zeker stelt.

Veiligheid

2. Een verkennende analyse van de gevolgen van een overstroming in de komende 300 jaar van de COVRA-faciliteit levert zeer lage individuele stralingsdoses in de biosfeer. Daarbij wordt in het onderzoek verondersteld dat er bij overstroming geen hoogactief afval kan vrijkomen. Het voor de opslag van dit afval bestemde gebouw is, volgens het ontwerp, waterdicht tot een hoogte van 10 m + NAP. Effecten van klimaatverandering, zoals zeespiegelrijzing, hebben bovendien een dusdanig langzaam verloop in de tijd dat beschermende maatregelen tijdig kunnen worden getroffen.

Levensduur van de opslaggebouwen

3. Het uitvoeren van controles, onderhoud en vervangingen maakt het technisch mogelijk de levensduur van de bestaande gebouwen voor laag- en middelactief afval te verlengen tot ca. 300 jaar. Het toekomstige afvalaanbod verlangt in de komende 100 jaar uitbreiding met drie extra gebouwen, die eveneens langdurig in stand kunnen worden gehouden.
4. Het is eveneens technisch uitvoerbaar de opslagtermijn van het hoogactieve afval te verlengen tot ca. 300 jaar. Daarvoor is mogelijk tweemaal een volledige, dan wel een gedeeltelijke vervanging of aanpassing van de opslagfaciliteit vereist. Dit houdt verband met de beperkte levensduur van de opslagmodules (ca. 100 jaar) en het ingrijpende karakter van bouwtechnische herstelwerkzaamheden. Als o.a. het natuurlijk verval van het afval wordt benut, kan met een gedeeltelijke vervanging of aanpassing worden volstaan.

Kosten

5. De kosten (prijsspeil 1998) van een verlenging van de bovengrondse opslag van ca. 100 naar ca. 300 jaar bedragen ongeveer €90 miljoen aan investeringen voor de opslag van hoogactief afval en ca. €0,7 miljoen/per jaar aan onderhoud van de totale opslagfaciliteit.

3.5 Kanttekeningen van de Commissie

Het onderzoek naar de langdurige bovengrondse opslag heeft zich voornamelijk geconcentreerd op de bouwtechnische aspecten van de opslag. De gevolgen van een overstroming zijn alleen voor het laag- en middelactief afval onderzocht en leveren een stralingsbelasting, die veel lager is dan de in [CORA 02] vermelde grenswaarde van $4 \cdot 10^{-7}$ Sv/j en dan het gemiddelde natuurlijke stralingsniveau in Nederland van $2,4 \cdot 10^{-3}$ Sv/j. Het overstromingsrisico voor de opslag van het hoogactieve afval wordt verwaarloosbaar geacht. De kans op overstroming is niet geschat, maar die is, gezien de locatie van de COVRA in een tijdspanne van 300 jaar, niet denkbeeldig. Voorzover hierbij sprake is van structurele klimatologische effecten, valt te verwachten dat er tijd genoeg zal zijn om beschermende maatregelen te treffen. Meer plotselinge gebeurtenissen, zoals een combinatie van een extreme storm met een springvloed, kunnen echter niet uitgesloten worden.

Verder heeft de studie zich beperkt tot het vrijkomen van de radionucliden via uitlozing in zeewater. Hierbij blijft de inhoud van de vaten in hun cementen verpakking, uiteraard een gunstiger situatie dan wanneer één of meerdere vaten niet intact blijven. Een ander mogelijk risico komt voort uit de onzekerheid of de samenleving over een periode van honderden jaren in staat blijft een bovengrondse opslag adequaat te onderhouden of eventueel het afval ondergronds op te bergen. Met het oog hierop moet een opslag of berging dan ook fail-safe zijn.

De Commissie wijst er dan ook op dat een langdurige bovengrondse opslag de belangrijke natuurlijke barrière met zijn fail-safe waarborg mist en zodoende op de lange termijn kwetsbaar is voor de gevolgen van verwaarlozing en politieke instabiliteit.

Op grond van het bovenstaande beveelt de Commissie aan de gesignaleerde onzekerheden te verkleinen door middel van:

- het volgen van studies met betrekking tot klimaatontwikkelingen op lange termijn;
- schatting van de kans van het optreden van stormvloeden en oeverafglijdingen (dijk- en oevervallen);
- een probabilistische analyse van ongevalsituaties, zoals overstromingen en falende afvalverpakkingen;
- onderzoek van het lange termijn gedrag (enkele honderden jaren) van afvalverpakkingen;
- onderzoek naar de veiligheid van een optimaal gesitueerde bovengrondse opslag.

4. Terugneembare berging in steenzout

Steenzout vertoont kruip onder de in de ondergrond heersende hoge druk, omsluit het afval en levert daarmee een belangrijke bijdrage aan het multi-barrière systeem. Op de lange duur kan hierdoor een passief-veilige eindsituatie worden bereikt, ook bij verwaarlozing van de berging. Desondanks is het mogelijk, door goed onderhoud en beheer, het afval honderden jaren toegankelijk te houden.

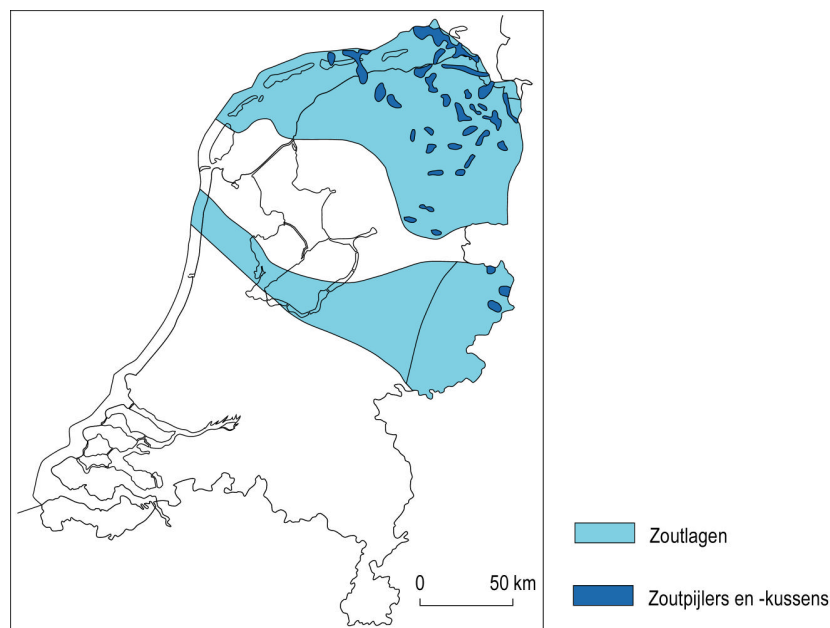
4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk omvat de resultaten van het onderzoek naar de mogelijkheden van terugneembare berging in een zoutformatie. In het onderzoek is gebruik gemaakt van de uitgebreide kennis over het gedrag van steenzout, die in het OPLA-programma werd opgebouwd. Vastgesteld werd toen dat geïsoleerde berging van radioactief afval in Nederlandse steenzoutformaties in principe technisch haalbaar en veilig is. Of dit ook geldt als het afval op terugneembare wijze wordt opgeborgen is de vraag, die in dit hoofdstuk centraal staat.

De daarvoor uitgevoerde studies zijn verkennend van aard, locatie-onafhankelijk en concentreren zich op het opbergontwerp (4.2), de veiligheid (4.3 en 4.4), de terugneembaarheid (4.5) en de kosten (4.6). Verder zijn enkele specifieke onderwerpen bestudeerd, die met de veiligheid of met het opbergontwerp te maken hebben. Het betreft de stralingsschade in steenzout (4.7.1), het vrijkomen van radon (4.7.2), het gedrag van afdichtingsmaterialen (4.7.3 en 4.7.4), een ander opbergontwerp (4.7.5) en de betekenis van enkele natuurlijke processen in steenzout (4.7.6).

In de veiligheidsanalyse is onderscheid gemaakt tussen het kernsplijtingsafval en de splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren, omdat de samenstelling van het materiaal sterk van elkaar verschilt.

Een kaartje met een overzicht waar zich in Nederland steenzoutformaties bevinden, is opgenomen in figuur 4.1.

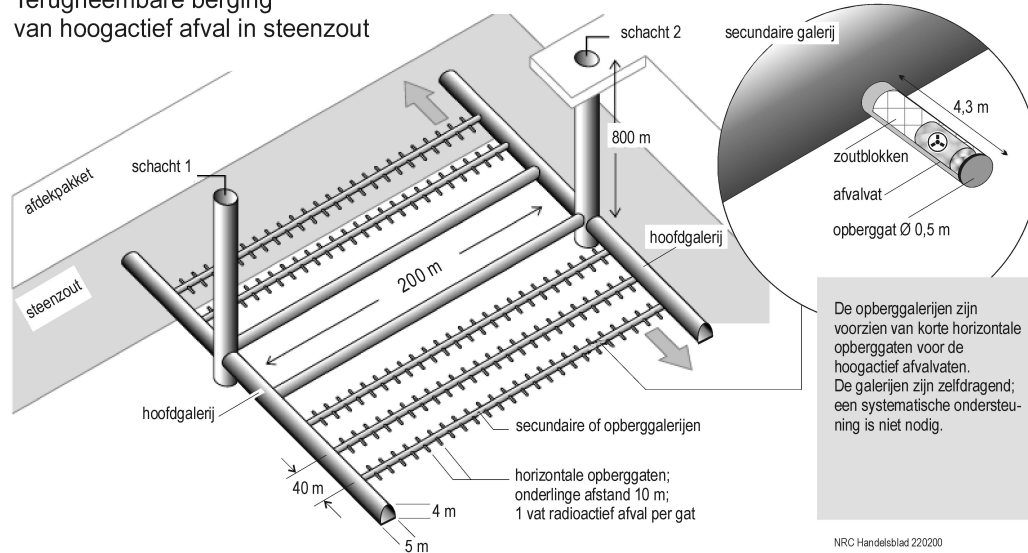


Figuur 4.1 Verbreiding zoutformaties

4.2 Ontwerp voor een terugneembare berging

Het ontwerp is gebaseerd op het principe van schachten en galerijen, die met conventionele mijnbouwtechnieken in steenzout aangelegd worden. De berging (figuur 4.2) omvat een tweetal verticale schachten, met ieder een eigen hoofdgalerij.

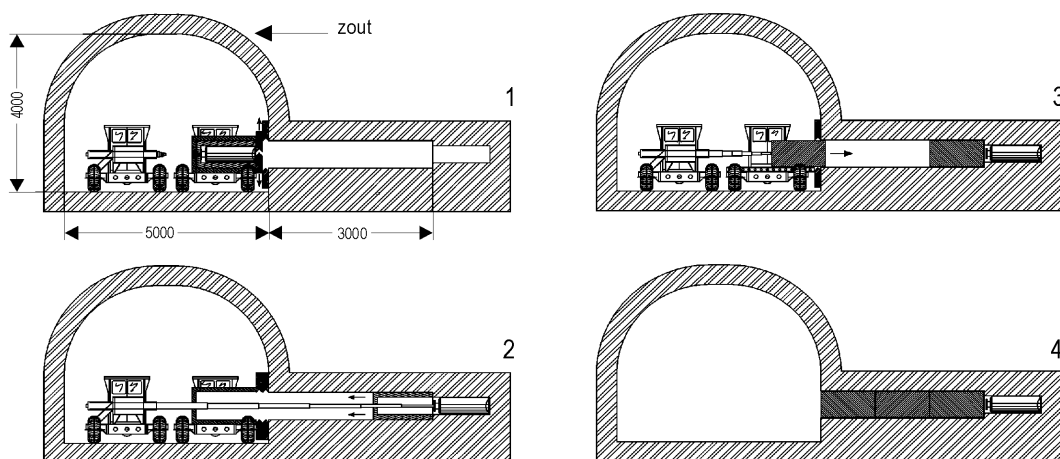
Terugneembare berging
van hoogactief afval in steenzout



Figuur 4.2 Principe van een terugneembare berging voor hoogactief afval in steenzout.

De hoofdgalerijen zijn verbonden door horizontale dwarsgalerijen, waarvan er twee voor de ventilatie zijn bestemd en de overige voor de berging van het afval. Rond de gehele berging is, zoals in de OPLA-studie wordt verondersteld, een dik zoutschild van minstens 200 m aanwezig.

Het hoogactieve afval wordt opgeborgen in korte horizontale gaten in de zijwanden van een dwarsgalerij. Per gat wordt één vat geplaatst. Het gat wordt nagevuld met een drietal voorgereperste cilinders van zoutgruis (figuur 4.3) Navulling van het gat kan ook met zouten die bijvoorbeeld zwellen als ze vocht opnemen (4.7.4).



Figuur 4.3 Het plaatsen in een opberggat van een vat met hoogactief afval in een berging in steenzout.
Bron: [CORA 08]

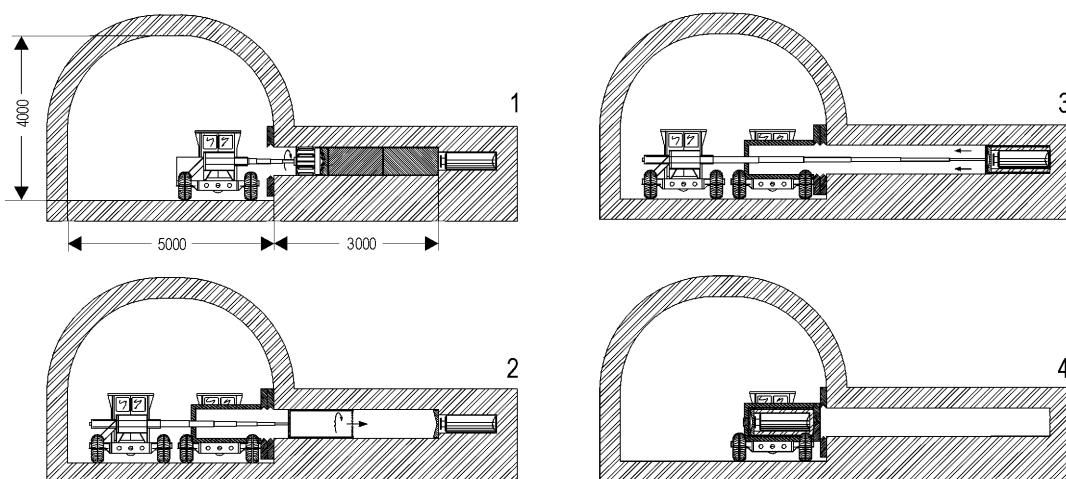
Voor de veiligheidsanalyse is o.a. de opbergdiepte van belang. De minimale opbergdiepte houdt verband met het effect van een toekomstige ijsbedekking. In het verleden opgetreden ijstijden tonen aan dat diepe geulen tot 300 à 400 m diepte door smelt-

waterstromen onder het gletscher-ijs kunnen worden uitgesleten. Op grond hiervan is een minimale opbergdiepte van ca. 500 m gewenst.

Uitgangspunt is dat de berging in homogeen steenzout plaatsvindt; een verdere detaillering naar type zoutformatie (pijlers, kussens, lagen) is in de studie buiten beschouwing gebleven.

Aan het ontwerp zijn eisen gesteld om het afval zonodig weer te kunnen terughalen. Deze houden o.a. in dat iedere container individueel terugneembaar is. Bovendien moeten de werkcondities in de berging in verband met het mogelijk terugnemen aanvaardbaar zijn, dat wil zeggen dat het stralingsniveau en de temperatuur voldoende laag zijn.

In de studie [CORA 08] is het ontwerp verder uitgewerkt voor het kernsplijtingsafval verpakt in standaard COGEMA-vaten. De voorgestelde methode voor het terugnemen behelst het wegboren van de afdichting, waarna met een speciale machine het vat en een dunne schil van het omringende zout teruggenomen wordt (figuur 4.4). De extra schil is een voorzorgsmaatregel omdat de relatief dunwandige vaten door de gesteentedruk na enkele tientallen jaren beschadigd kunnen zijn. Het vat en de zoutschil worden gezamenlijk in een transportcontainer geplaatst en afgevoerd voor verdere behandeling of opslag.



Figuur 4.4 Het terugnemen van een vat met hoogactief afval uit een berging in steenzout.

Bron: [CORA 08]

Een methode om de vaten te beschermen tegen de gesteentedruk is het gebruik van een zogenaamde overpack. Dit is een extra, meestal roestvast stalen container met een grote wanddikte (enkele cm's). De duurzaamheid kan nog verder verbeterd worden indien koper of titanium als materiaal wordt gebruikt. Met een dergelijke overpack verwacht men dat, zeker voor enkele honderden jaren tot zelfs voor meer dan duizend jaar, de afvalcontainer intact blijft.

In de studie is voor een dergelijk omvangrijke overpack voor het kernsplijtingsafval niet gekozen vanwege de nadelen die daaraan verbonden zijn. Robuuste overpacks met een gewicht van enkele tientallen tonnen zijn kostbaar, moeilijk te hanteren en een potentiële bron van corrosiegassen. Bovendien is het kernsplijtingsafval in duurzaam glas gesmolten en daardoor zeer moeilijk oplosbaar.

Gebruikte splijtstof van de Nederlandse onderzoeksreactoren voor wetenschappelijke en medische doeleinden kan op vergelijkbare wijze worden opgeborgen als het kernsplijtingsafval. Maar voor de splijtstof wordt wel een overpack of verhuizing van de opberggaten toegepast, want door eventueel binnendringend water kan in deze zoutomgeving een relatief snelle corrosie van het splijtstofmateriaal plaatsvinden.

Toepassing van een speciale vulling om de radioactiviteit te binden kan, bij eventuele beschadiging van een vat met splijtstof, voorkomen dat verspreiding van het radioactieve materiaal optreedt. De ervaring met dergelijk vullingmateriaal is evenwel nog beperkt.

Er zijn een aantal varianten op het beschreven concept denkbaar. Om een indruk te krijgen van de haalbaarheid van bijvoorbeeld berging in verticale gaten in de vloer van een galerij is in [CORA 11] een verkennende studie uitgevoerd (4.7.5).

4.3 Opbergveiligheid van het kernsplijtingsafval

De veiligheid van een terugneembare berging hangt af van de mijnbouwkundige beheersbaarheid en van de stralingsbelasting bij een mogelijk vrijkomen van het kernsplijtingsafval. Beide onderwerpen worden in de volgende paragrafen besproken.

4.3.1 Mijnbouwkundige beheersbaarheid

Stabiliteit

Met de mijnbouwkundige beheersbaarheid van een conventionele zoutmijn is wereldwijd veel ervaring opgedaan. Een mijnontwerp voldoet dan ook aan wettelijke mijnbouwkundige stabiliteits- en veiligheidseisen. Daartoe moet ook vóór en tijdens de aanleg een grondige in- en uitwendige verkenning van de zoutformatie uitgevoerd worden.

Een in steenzout aangelegde berging is zelfdragend. Dat wil zeggen, dat er meestal geen extra ondersteunende constructie vereist is. Wel vragen ondergrondse ruimten in zout regelmatig onderhoud, omdat zout plastisch is (kruipt) en ruimten langzaam worden dichtgedrukt.

Stralingsafscherming

Om de stralingsbelasting van het personeel binnen de daarvoor gestelde limieten te houden moet de afdichting van de opberggaten voldoende afscherming bieden. De minimaal benodigde dikte van de zoutafdichting is berekend in [CORA 08] en bedraagt ca. 1,5 m. Deze dikte is gebaseerd op conservatieve veronderstellingen. Afscherming tijdens transport vindt plaats door toepassing van een dikke metalen transportcontainer. Deze wordt ter plaatse van het opberggat verwijderd. De afscherming wordt daarna overgenomen door de zoutformatie en het zout waarmee het gevulde opberggat gesloten wordt.

Warmteproductie

De temperatuursverhoging als gevolg van de vervalwarmte van het afval moet beperkt blijven om het uitvoeren van werkzaamheden in de galerijen mogelijk te maken. Bovendien vermindert een hoge temperatuur de stabiliteit van de galerijen en kunnen chemische omzettingen in het zout optreden. De ruimtelijke verdeling van de vaten met kernsplijtingsafval in de berging en de warmteafvoer via het ventilatiesysteem van de mijn zorgen voor een aanvaardbaar temperatuurniveau.

Gebaseerd op het gekozen concept van opbergen is een berekening gemaakt van de te verwachten temperatuur in de nabijheid van de afvalvaten en in de galerij ter plaatse van een vat. In de galerij bereikt deze, zonder ventilatie, na enkele jaren een maximale waarde van 45 graden Celsius.

4.3.2 Stralingsbelasting

Van belang is de stralingsbelasting van de normale bedrijfssituatie en van situaties waaraan mogelijk een maximaal risico is verbonden.

De normale bedrijfssituatie

De gevolgen van een volgens plan bedreven en uiteindelijk zorgvuldig afgesloten berging zijn weliswaar niet onderzocht, maar zullen volgens [CORA 04] vermoedelijk niet sterk afwijken van de resultaten die het OPLA-onderzoek opleverde ¹⁾. De toen berekende mogelijke stralingsbelasting in de biosfeer was zeer laag.

Verwaarlozing van de bergingsfaciliteit

Dit is een situatie, die kan leiden tot het vrijkomen van radionucliden in de leefomgeving en waaraan mogelijk een maximaal risico is verbonden. De voorlopige keuze van deze situatie is gemaakt met behulp van de PROSA-methode ⁹⁾, die daartoe in het CORA-onderzoek is verbeterd. Situaties die ook relatief hoge risico's kunnen opleveren zijn bijvoorbeeld gasontwikkeling, slecht ontwerp en toevallig menselijk indringen. Deze risico's zijn echter niet onderzocht.

Wanneer het onderhoud aan de opberging wordt verwaarloosd, kan de mijn door bijvoorbeeld lekkages in de schachtbekleding na verloop van tijd vollopen met grondwater. Steenzout lost hierin op en vormt pekels. De hydrostatische druk van de pekels in de galerijen bedraagt ongeveer 10 MPa (100 atmosfeer) als de faciliteit volgelopen is. Door deze hoge druk zal de pekels ook kunnen doordringen in die delen van de opberging waar het afval ligt. Het vat kan onder invloed van de gesteentedruk en corrosie lek zijn geraakt, zodat de kans aanwezig is dat het afval in de pekels oplost, via de galerij en de schacht in het grondwater terecht komt en de biosfeer bereikt. De ondergelopen galerijen vormen in dit geval een voorkeursroute en maken een relatief snel transport van radionucliden naar buiten toe mogelijk.

De belangrijkste stappen in het proces van vrijzetting zijn:

Het oplossen van het afval

Verondersteld wordt dat het onderlopen van de mijn 200 jaar na het opbergen van het afval plaatsvindt. De pekels bereikt relatief snel de opberggaten, die zijn afgedicht met zoutblokken bestaande uit geperst zoutgruis. Gedurende de eerste duizend jaar daalt de porositeit (% lege ruimte) van de zoutafdichting slechts beperkt: van 10% naar 8%. Volgens resultaten uit het BAMBUS project [CORA 10] verandert de doorlatendheid (permeabiliteit) dan ook weinig.

De pekels wordt onder druk door de nog doorlatende zoutafdichting geperst en komt dus relatief snel in contact met het afval. Uitgangspunt is dat de relatief dunwandige vaten inmiddels onder invloed van de gesteentedruk en corrosie lek zijn geraakt, zodat de inhoud langzaam in de pekels oplost. Bij een voor de berging representatieve omgevingstemperatuur van 60 tot 90 °C in de nabijheid van het afval duurt het volgens [CORA 04] 2.400 tot 11.000 jaar voordat het afval uit een vat volledig is opgelost in de pekels.

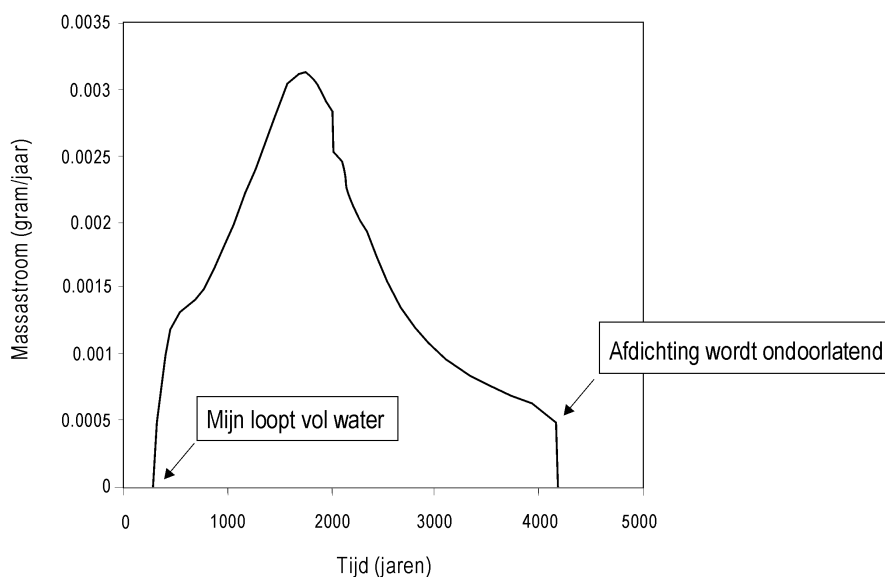
Het uitpersen van de pekels

De druk in het gesteente bedraagt op het niveau van de mijn (800 m) ongeveer 20 MPa (200 atmosfeer). Omdat er een verschil is tussen de gesteentedruk en de druk van de pekels in de galerijen blijft het steenzout convergeren, waardoor de mijngangen en de opberggaten met de afdichtende zoutblokken langzaam worden dichtgedrukt.

Volgens de berekeningen duurt het zeer lang totdat de zoutblokken, die uit geperst zoutgruis bestaan, door samendrukking net zo ondoorlatend zijn als het omringende steenzout. In aanwezigheid van water, zoals in de verwaarlozingssituatie, verloopt het proces sneller. Maar ook dan duurt het altijd nog enkele duizenden jaren totdat de afsluiting zijn maximale isolatie bereikt. Dit proces kan aanzienlijk worden versneld door, in plaats van geperst zoutgruis, in het opberggat passende cilinders van massief steenzout als afdichting te gebruiken. Het effect hiervan is niet onderzocht.

De pekels, met daarin een deel van het opgeloste afval, wordt zolang de afdichting nog doorlatend is, als gevolg van de convergentie van het zout uit de opberggaten geperst. Dit is te zien in figuur 4.5 waarin het uitpersen van de besmette pekels uit een opberggat naar de galerijen is weergegeven. Na ongeveer 4000 jaar, als de afdichting

ondoorlatend is geworden, stopt het uitpersingsproces. Delen van het afval, die dan nog niet zijn opgelost, worden ingesloten. De uitgeperste besmette pekkel bereikt de galerij en kan zich daarna verder verspreiden.



Figuur 4.5 Verloop van de jaarlijkse hoeveelheid vrijkomende besmette pekkel uit een opberggat naar de opberggalerij als gevolg van het onderwater lopen van de berging na verwaarlozing.
Bron: [CORA 04]

Het transport van de besmette pekkel

Het uiteindelijke transport van opgelost afval uit de opberggaten naar de galerijen en schachten wordt bepaald door de pekkelstroming als gevolg van het uitpersen, en de menging van pekkelstromen door o.a. diffusie en verschillen in temperatuur en gasdruk. Uit het verloop van de pekkelstroom in de tijd en de oplossnelheid van het afval wordt afgeleid welk deel van het opgeloste afval uit de opberging kan komen. De besmette pekkel uit de opberggaten wordt nog sterk verdund in de grote hoeveelheid pekkel in de galerijen. Via de schachten die door het onderlopen gevuld zijn met zand, dat voor water goed doorlatend is, vindt opname en verdere verdunding in het grondwater plaats. Dit proces verloopt zeer langzaam omdat de menging door diffusie van het zoute water met bovenliggend zoet water niet erg effectief is. Vanuit het grondwater wordt na lange tijd (meer dan 100.000 jaar) het oppervlaktewater bereikt en kan het afval in de voedselketen van de mens terecht komen.

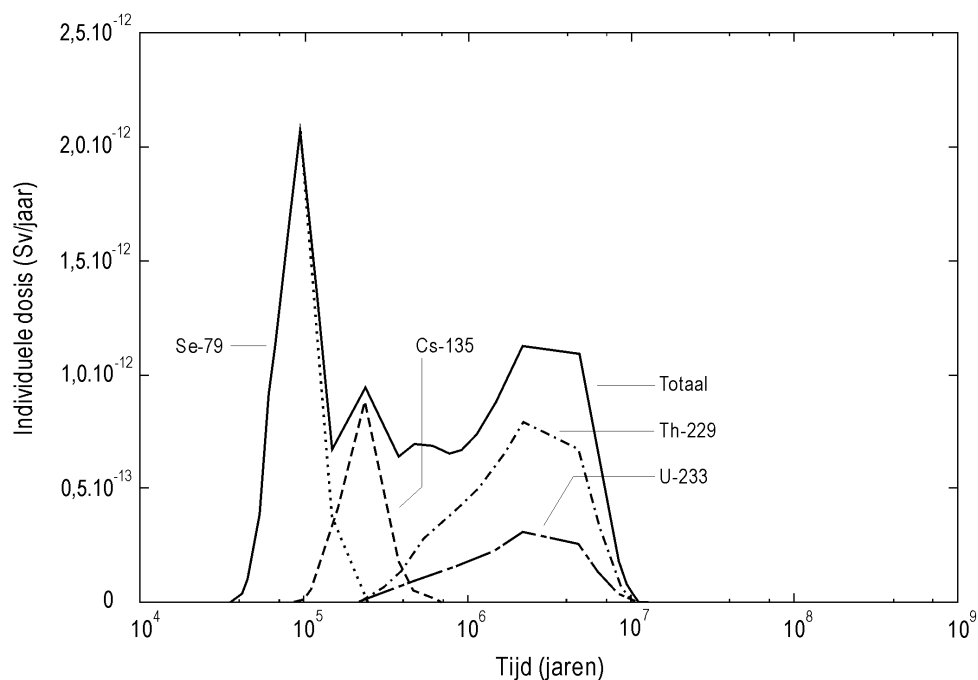
Het volledige proces van waterindringing tot en met het uitpersen van radioactieve pekkel naar buiten toe in het grondwater, is gemodelleerd m.b.v. het EMOS-computerprogramma. Een beknopte beschrijving is opgenomen in [CORA 04].

Bij de modellering van deze processen is gebruik gemaakt van de opgebouwde kennis en ervaring uit de PROSA-studie⁹¹.

Stralingsdoses

Het gezondheidsrisico van de verwaarlozingssituatie wordt uiteindelijk bepaald door de verdere verspreiding van de besmette pekkel in het grondwater, de biosfeer en de wijze van blootstelling van de mens aan de straling. Berekeningen volgens de modellen, ontwikkeld in PROSA, geven in de biosfeer een maximale individuele dosis van ongeveer $2 \cdot 10^{-12}$ Sv/j (figuur 4.6) na ongeveer 100.000 jaar. De grootste bijdrage is afkomstig van ⁷⁹Se.

In het geval dat de besmette pekkel uit de opberging direct in het drinkwater komt of als consumptiezout wordt gebruikt kunnen hogere doses optreden. Dit zijn conservatieve schattingen; de realiteitswaarde ervan moet nader onderzocht worden.



Figuur 4.6 Verloop van de individuele jaarlijkse stralingsdosis in de biosfeer als gevolg van het onder water lopen van de berging na verwaarlozing. De bijdragen van de belangrijkste radionucliden zijn aangegeven. Bron: [CORA 04]

4.4 Opbergveiligheid van de splijstofelementen van de onderzoeksreactoren

In hoofdstuk 2 zijn de eigenschappen van de gebruikte splijstof van de onderzoeksreactoren toegelicht. Deze wijken af van het overige radioactieve afval, o.a. door een veel hoger percentage verrijkt uranium en door de sterkere corrosiegevoeligheid van het splijstofmateriaal. In het bijzonder zijn in de studie [CORA 05] dan ook onderzocht de corrosie, de stralingsbelasting en de criticiteit. De non-proliferatie aspecten zijn in 2.5 vermeld.

De splijstof van de HFR (Hoge Flux Reactor) te Petten is gekozen als uitgangspunt voor een analyse. Zowel de omvang als de aard zijn maatgevend voor het totaal aan gebruikte splijstof van de Nederlandse onderzoeksreactoren.

Berging van de splijstof vindt op dezelfde manier plaats als voor vaten met kernsplijtingsafval, in korte horizontale gaten in een galerijwand. Voor de mijnbouwkundige beheersbaarheid van de berging wordt verwezen naar (4.3.1).

Corrosie

In de berekening is aangenomen dat de splijstof, ontdaan van de aluminium huls, in COGEMA-vaten geplaatst wordt. De huls wordt verwijderd om een betere vullingsgraad van het vat te krijgen. Eén vat kan maximaal de splijstof van ca. 130 splijstofelementen bevatten. De weerstand tegen corrosie van het splijstofmateriaal is gering. Binnen enkele jaren kunnen zowel het vat als de splijstof volledig oplossen in pekel. Door het toepassen van een dikwandige container of een verbuizing van het opberggat wordt een langdurige bescherming tegen corrosie geboden, terwijl het bovendien de terugneembaarheid van de containers bevordert.

Stralingsbelasting

De stralingsbelasting is op verkennende wijze onderzocht voor twee situaties; de normale bedrijfssituatie en de verwaarlozing van de bergingsfaciliteit. Verondersteld wordt dat, zodra het vat en de overpack uiteindelijk door corrosie zijn aangetast, de

splijststof vrijwel meteen en geheel oplost in de pekels als gevolg van de relatief sterke corrosiegevoeligheid van het materiaal.

De normale bedrijfssituatie

De berging wordt goed onderhouden en na een periode van terugneembaarheid volgens plan zorgvuldig afgesloten. De zoutformatie kan door zoutstijging (diapirisme) langzaam naar boven komen en lost aan de bovenzijde dan op in het grondwater (subrosie). Uiteindelijk raakt het afval in het grondwater en kan na ca. 2 miljoen jaar via het oppervlaktewater de mens bereiken. De maximale individuele dosis in de biosfeer bedraagt voor deze situatie ca. $5 \cdot 10^{-10}$ Sv/j.

De verwaarlozingssituatie

Als door verwaarlozing de mijn vol met water loopt, wordt verondersteld dat alle vaten inclusief hun overpack lek raken door de corrosieve invloed van de pekels. Door de beschermende overpack lost alle splijststof pas na ongeveer 500 jaar op. De maximale individuele dosis, die in de biosfeer na ongeveer 100.000 jaar kan worden bereikt, bedraagt ca. 10^{-9} Sv/j.

⁷⁹Se en ²²⁶Ra bepalen in hoofdzaak deze dosis, die hoger is dan in geval van verwaarlozing van een berging met kernsplijtingsafval ($2 \cdot 10^{-12}$ Sv/j). Dit is een gevolg van het direct oplossen van de splijststof na het lek raken van de vaten.

Criticiteit

Mocht, bijvoorbeeld na verwaarlozing van de berging, aanwezig zout water de splijststof bereiken, dan zal de nog aanwezige reactiviteit in de splijststof dalen. Dit komt doordat chlooratomen in het zoute water de eigenschap bezitten effectief neutronen in te vangen. Toetreding van zout water levert dus, in tegenstelling tot zoet water, zodoende een lagere criticiteit op.

Volgens berekeningen zal in zout water de criticiteitsfactor beneden 0,4 blijven (0,95 wordt als veilige bovengrens gesteld). Extra voorwaarden voor het opbergconcept zijn volgens [CORA 05] met betrekking tot de criticiteit niet nodig.

4.5 Terugneembaarheid

De techniek die voor het terugnemen van vaten met kernsplijtingsafval kan worden toegepast is besproken in 4.2, maar ook andere typen (hoogactief) afvalvaten kunnen op vergelijkbare wijze worden teruggenomen.

De mijnbouwkundige beheersbaarheid (4.3.1), het onderhoud, het toezicht op de berging en het informatiebeheer zijn bepalende factoren voor het op peil houden van de terugneembaarheid. Met het langer worden van de terugneembaarheidsperiode wordt de kans op bijvoorbeeld het ontbreken van onderhoud groter.

Onderhoud

Om de terugneembaarheid te kunnen garanderen moeten de galerijen open blijven en dienen de omstandigheden voor werkzaamheden, zoals bij eventuele terugneming en inspectie acceptabel te zijn. Convergentie of kruip van het zout verloopt sneller bij hogere temperatuur. Dus in het geval van de opberging van warmteproducerend afval, zoals het kernsplijtingsafval, zal het zout sneller ruimten dichtdrukken. Extra onderhoud is dan ook noodzakelijk om mijngangen op de vereiste afmetingen te houden. Verwacht wordt dat iedere vier jaar een deel van de galerijen nabij de opberggaten moet worden uitgefreesd (maximaal 1 à 2 dm) om de oorspronkelijke afmetingen te kunnen herstellen. Dit onderhoud en het controleren van druk, temperatuur en convergentie ten behoeve van het bewaken van de mijnbouwkundige stabiliteit behoren tot de normale, gereguleerde activiteiten in een mijn.

Toezicht

Tijdens de terugneembaarheidsperiode moet nagegaan worden of het gastgesteente zich gedraagt zoals voorspeld en waaraan eventuele afwijkingen zijn te wijten.

Dit meetprogramma zal nog nader gedefinieerd moeten worden, maar dient in ieder geval de volgende gebieden te bestrijken:

- de mijnbouwkundige stabiliteit van de opberging o.a. te bewaken door regelmatige metingen van druk en verplaatsingen;
- de staat van onderhoud van het mijnmaterieel (o.a. machines om het afval terug te halen, liften, etc);
- de conditie en juiste plaatsbepaling van het terugneembaar opgeborgten afval. Door convergentie van het zout is het mogelijk dat het vat, bij opberging in een onverbuisd gat, na lange tijd een geringe verplaatsing naar de galerij toe ondervindt. Met behulp van gangbare technieken, zoals radar en sonar, kan de locatie van het vat op centimeters nauwkeurig worden bepaald.

Aanbevolen wordt om in vervolgonderzoek een lange termijn controleplan op te stellen, dat rekening houdt met alle voor de veiligheid en de terugneembaarheid relevante processen. In samenhang daarmee zal een actieschema aan moeten geven welke maatregelen vereist zijn, als de resultaten van de controle daartoe aanleiding geven.

Informatiebeheer

Het kunnen uitvoeren van een planmatig terugnemen van afvalvaten maakt een duurzaam bestandsbeheer noodzakelijk. Het betreft o.a. de procedure voor het terugnemen, de identificatie van de vaten en de exacte opbergplaats van ieder vat. Ook moet de afvalinventaris van iedere vat bekend zijn, alsmede de mijnbouwkundige staat van de opbergfaciliteit en de staat van onderhoud van het materieel waarmee het afval kan worden teruggenomen. Een procedure voor nazorg (transport, tijdelijke opslag, etc) dient eveneens beschikbaar te zijn.

4.6 Kosten

De kosten van een terugneembare berging in zout betreffen de aanleg van de gehele mijn, de extra voorzieningen om het afval te kunnen terugnemen, het bedrijf, het openhouden en het afsluiten. In de studie [CORA 09] zijn deze op verkennende wijze onderzocht.

De kostenanalyse baseert zich op het ontwerp, zoals dat in (4.2.1) is beschreven en beperkt zich tot het hoogactieve afval. De extra kosten voor opberging van het laag- en middelactief afval zijn beperkt omdat voor het hoogactief afval de duurste onderdelen van de mijn reeds zijn meegenomen. Er is een groot aantal factoren dat de kosten analyse bepaalt ¹⁰¹.

De kosten van onderzoek, ontwikkeling, locatiespecifiek onderzoek en monitoring worden buiten beschouwing gelaten. De hoogte van deze kosten hangt onder andere af van nationaal beleid, wetgeving en maatschappelijke factoren.

Een schatting van de kosten betreffende investeringen en jaarlijkse uitgaven voor onderhoud en inspectie is weergegeven in de volgende tabel. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat de mijn uiteindelijk zal worden afgesloten.

Kosten van terugneembare berging in steenzout *(prijsspeil 1994)*

Ontwerp en bouw	ca. €180 miljoen
Bedrijf	ca. € 50 miljoen
Afsluiten van de mijn	ca. € 50 miljoen
Totaal aan investeringen	ca. €280 miljoen
Open houden	ca. € 1,8 miljoen/jaar

4.7 Specifiek onderzoek

In deze paragraaf worden enkele onderwerpen behandeld die van invloed kunnen zijn op de veiligheid, het ontwerp en het in bedrijf houden van een terugneembare berging.

4.7.1 Stralings schade in zout

Door plaatsing van radioactief afval in steenzout ontvangt het zout, dat zich direct rondom de containers met afval bevindt, warmte en wordt het blootgesteld aan gammastraling. De warmtetoevoer veroorzaakt temperatuurverhoging. Bestraling veroorzaakt daarnaast veranderingen (defecten) in het kristalrooster van het zout (NaCl). Een deel van het NaCl valt uiteen in afzonderlijke natriumatomen en chloormoleculen, die zich verzamelen tot natrium-colloïden en chloorgasbelletjes. Op deze manier wordt een deel van de energie van de gammastraling in een andere energievorm opgeslagen (stralings schade). Deze energie komt naderhand vrij in de vorm van warmte als het Na en Cl weer in NaCl overgaat.

Voor de veiligheid van een opberging in steenzout is het belangrijk te weten wat de gevolgen van het vrijkomen van deze energie in het zout kunnen zijn, met name wat betreft de hoeveelheid opgeslagen energie, de reikwijdte van het proces, eventuele natuurlijke processen die de schade herstellen, de wijze waarop de opgeslagen energie wordt omgezet in warmte en niet in de laatste plaats: de gesteentemechanische gevolgen (bijvoorbeeld breukvorming) van energievrijzetting onder omstandigheden in een opberging, zoals bepaald door temperatuur, druk, steenzoutsamenstelling en stralingscondities.

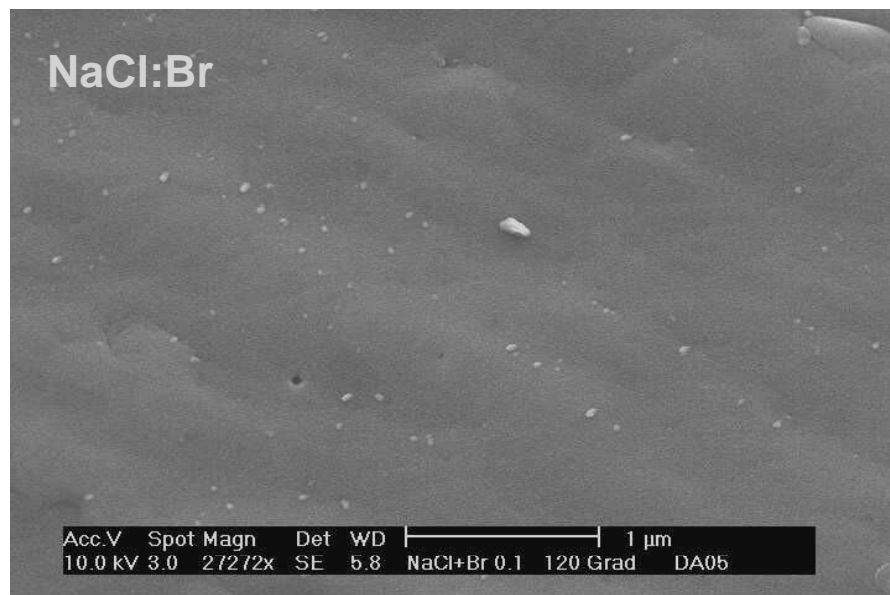
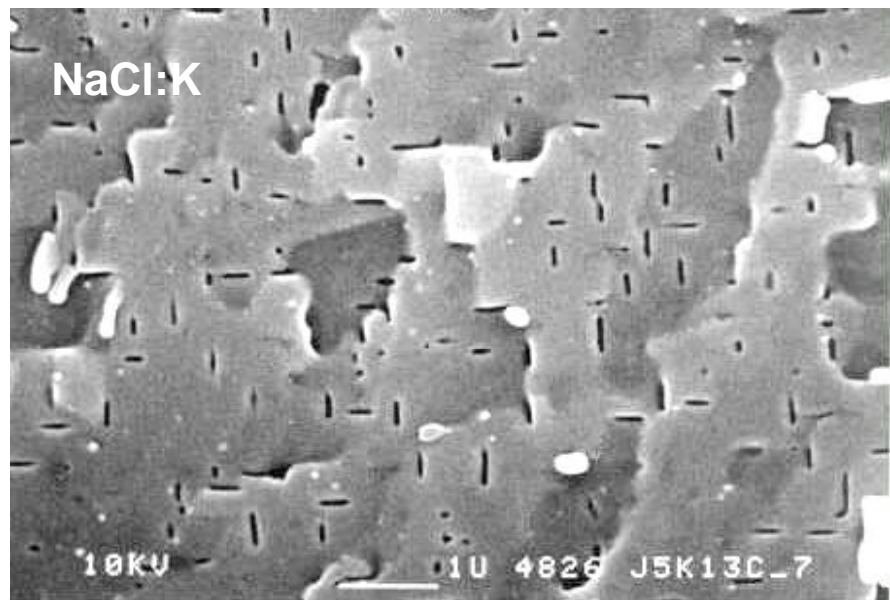
Met onderzoek aan dit onderwerp is reeds in het OPLA-programma begonnen. Een uitgebreide omschrijving van het stralings schade proces en de toen bereikte resultaten is te vinden in de OPLA- en EU-rapporten ^{1, 11}. Het onderzoek kon niet binnen het OPLA-onderzoek worden afgerond en is daarom in het CORA-programma voortgezet. De studie [CORA 12] omvat het stralings schade onderzoek en richt zich op het dynamische karakter van energievrijzetting onder laboratorium omstandigheden, de maatregelen om de stralings schade te voorkomen en het controleren van het proces: de monitoring.

Het onderzoek op deze onderdelen levert de volgende resultaten.

Energievrijzetting

Uit laboratoriumonderzoek blijkt dat straling, naast het losmaken van natrium en chloor uit het kristalrooster van NaCl, minuscule gaten of kleine holtes van minder dan 10 tot enkele tientallen nanometer in het rooster doet ontstaan. Deze holtes groeien doorgaans in aantal en omvang als de stralingsdosis toeneemt. De vorming van holtes hangt ook sterk af van kleine hoeveelheden kalium, broom, lithium, etc., die zich in steenzout kunnen bevinden. Kalium produceert veel en grote holtes, broom gaat de productie van holtes tegen (figuur 4.7). Deze holtevorming is met bestaande modellen niet te verklaren. Resultaten verkregen in het onderzoek [CORA 12] hebben tot een nieuw model geleid dat de waarnemingen beter beschrijft.

Laboratoriumexperimenten op kleine zoutmonstertjes (diameter ca. 6,5 mm, dikte ca. 0,7 mm) laten zien dat de aanwezigheid van grotere aantallen holtes van grotere afmetingen het begin kan zijn van dynamische vrijzetting van energie. Dit gebeurt volgens de onderzoekers als de afmeting van de holtes groter wordt dan de gemiddelde afstand tussen het losse chloor (in kleine belletjes) en het losse geclusterde natrium. Het chloor en het natrium reageert dan tot NaCl waarbij in zeer korte tijd energie vrijkomt, die volgens [CORA 12] tot een schokgolf aanleiding kan geven. In sommige gevallen treden dan scheurtjes in de zoutkristallen op. Dit kan een verklaring zijn voor het eerder in het laboratorium waargenomen uiteenvallen van zoutkristallen.



Figuur 4.7 Vorming van kleine holtes in zout als gevolg van ioniserende straling. Een kleine hoeveelheid kalium (K) in het zout versterkt deze vorming, in tegenstelling tot broom (Br) dat de groei van holtes afremt. Bron: [CORA 12]

Maatregelen

Het blijkt dat zout waaraan natriumbromide is toegevoegd van alle onderzochte materialen de geringste hoeveelheid stralingsschade oplevert, zelfs minder dan in zuiver keukenzout (NaCl).

Indien stralingsschade een probleem zou zijn voor de veiligheid van de berging dan lijkt dit oplosbaar door zout met de voornoemde toevoeging te gebruiken als opvul- of afdichtingsmateriaal direct rond de afvalvaten.

Controle

Het optreden van holtes kan aanleiding geven tot een dynamische energievrijzetting, die voor de onderzochte materialen sterker is als de holtes in aantal en grootte toenemen. Door het aantal, de grootte en de vorm te meten kan de mate van stralingsschade in-situ onderzocht worden.

4.7.2 Radon

Radon (^{222}Rn) is een radioactief gas dat voortkomt uit materialen die radium (^{226}Ra) bevatten. Dit radium is op zijn beurt weer een vervalproduct van thorium en uranium isotopen. Het radon vervalt relatief snel (halveringstijd 3,8 dagen) via een paar stappen naar stabiel lood (^{206}Pb). Delen van het laagactieve afval bevatten ^{226}Ra . Hieruit zal dus ^{222}Rn ontstaan. Daarnaast wordt ook in de bodem door natuurlijk radioactief verval ^{226}Ra gevormd dat ook ^{222}Rn produceert.

In een bergingsfaciliteit die opgehouden wordt in verband met de terugneembaarheid van het afval kunnen werknemers gevaar lopen als het radon vrijkomt. Bovendien kan dit radon via het ventilatiesysteem van de zoutmijn ontsnappen naar de buitenlucht.

Het blijkt [CORA 07] dat, bij een onvoldoende functionerende afdichting van de opberggaten en meerdere lekkende containers met laag- en middelactief afval waarin veel radium voorkomt, bij normale ventilatie een overschrijding van de grenswaarde voor radon 121 kan optreden. Bij een geschikte configuratie van de ventilatieuitlaat zal de jaarlijkse stralingsdosis in de directe omgeving niet hoger zijn dan $0,4 \cdot 10^{-6}$ Sv.

Radon in de mijn kan dienen als indicator voor lekkages van een deel van het afval, maar alleen als er sprake is van falende afdichtingen en de radonconcentratie voldoende boven het natuurlijke niveau ligt.

4.7.3 Zoutgruis als afdichtingsmateriaal

Zoutgruis is het materiaal dat vrijkomt bij het uitgraven van galerijen en opbergruimten in steenzout. Het ligt voor de hand dit natuurlijke materiaal zo veel mogelijk in de opberging weer te benutten voor opvulling en afdichting na berging van het afval.

In het ontwerp (4.2) wordt dit ook toegepast in de vorm van uit zoutgruis geperste blokken, die een met afval gevuld opberggat afdichten. Door convergentie van het omringende zout wordt het zoutgruis uiteindelijk samengedrukt tot een homogene massa met eigenschappen van het oorspronkelijke steenzout.

Het gedrag van het zoutgruis onder de gecombineerde invloed van druk en temperatuur is reeds vele jaren onderwerp van studie 131 . Ook in het 5e Kaderprogramma "Nuclear Fission" van de EU zijn daartoe studies en ondergrondse experimenten in de Asse mijn (Duitsland) uitgevoerd binnen het BAMBUS-project.

In dit project (1996-1998) werd samengewerkt door Duitse, Franse, Spaanse en Nederlandse onderzoeksinstituten. De resultaten van het onderzoek zijn opgenomen in de studie [CORA 10]. Van Nederlandse zijde werd deelgenomen door het NRG.

Het doel van het BAMBUS project is het bereiken van een beter inzicht in het gedrag van zoutgruis als navulling in een berging in steenzout. Daartoe zijn zowel in situ experimenten en laboratoriumproeven uitgevoerd als computermodellen ontwikkeld, waarmee aan de hand van materiaalwetten deze processen zijn beschreven.

Het project is toegespitst op twee concepten voor opslag van warmteproducerend afval in een ondergrondse berging: één concept voor berging in galerijen en één voor boorgatberging. Het project kent vier werkpakketten: in situ experimenten, uitgevoerd in de Asse mijn in Duitsland; laboratoriumonderzoek van zoutgruis navulling; een systematische vergelijking van materiaalmodellen voor zoutgruis navulling en de ontwikkeling van thermomechanische modellen.

Het onderzoek heeft laten zien dat het gedrag van zoutgruis als navulling voor opslag in steenzout bepaald wordt door continue processen. Deze processen worden nu kwalitatief goed begrepen en kunnen over een groot gebied van condities worden gesimuleerd. Verder onderzoek is nodig om het voorspellend vermogen van de thermomechanische berekeningen en de daarin gebruikte materiaalwetten te verbeteren. Uit de resultaten van het experimenteel onderzoek zijn algemene relaties afgeleid voor de onderlinge verbanden tussen porositeit, doorlatendheid en thermische geleidbaarheid van zoutgruis.

Een belangrijke vaststelling is dat de convergentie van zout langzamer verloopt dan in de OPLA studie ¹⁾ werd bepaald. Het proces van dichtdrukken of compacteren van afdichtmaterialen in de berging verloopt daardoor ook langzamer dan eerst werd verondersteld.

Deze resultaten van het BAMBUS-project zijn toegepast in de studie [CORA 04] voor de analyse van de veiligheid van terugneembare berging in zout.

Enkele aanbevelingen die uit het onderzoek volgen betreffen:

- verder onderzoek naar het niet-homogene gedrag van het zoutgruis; de samendrukking verloopt niet homogeen, wat kan leiden tot niet homogene afdichting van opbergruimten;
- analyse van de invloed van het vochtgehalte van het zoutgruis op de compactie; bij in situ verhitting van het zoutgruis bleek daaruit veel vocht vrij te komen.

4.7.4 Een alternatief opvulmateriaal: calciumchloride

De eigenschap van het sterk hygroscopische (vochtonttrekkende) calciumchloride (CaCl_2) om sterk te zwellen zodra vocht aanwezig is, kan benut worden voor een verbetering van de afsluiting. Een methode om de doorlatendheid van een afsluiting van een opbergruimte te beperken is onderzocht in de studie [CORA 14]. Enkele resultaten worden hierna besproken.

Steenzout is uitermate droog (vochtgehalte $< 0,5\%$). Niettemin is er een zeer geringe hoeveelheid vocht aanwezig in de vorm van minuscule pekelbelletjes. Direct rond de vaten met hoogactief afval wordt het zout opgewarmd. Dit levert temperatuurverschillen in het zout op. Daardoor bewegen de pekelbelletjes langzaam naar de vaten toe. Deze pekel zal door corrosie de vatwand aantasten waarbij gassen vrijkomen. Bovendien kan het water in de pekel door straling uiteenvallen (radiolyse) in waterstofgas en zuurstof. Een en ander betekent dat er een gasdruk kan worden opgebouwd in het opberggat. De vraag is of het pekeltransport kan worden gereduceerd. Dit zou kunnen door bijvoorbeeld rond het vat een schil van calciumchloride aan te brengen. Laboratorium experimenten tonen aan dat toepassing ervan in principe het vochttransport naar het vat kan beperken, maar er zijn ook enkele beperkingen.

- Vocht dat door CaCl_2 is opgenomen kan bij temperatuursverhoging weer vrijkomen.
- CaCl_2 onttrekt ook reeds gebonden vocht uit andere mineralen die in steenzout aanwezig kunnen zijn zoals bischoffiet, carnalliet en gips. Dit kan de hygroscopische werking van CaCl_2 beperken.
- CaCl_2 in vervloeide vorm (bij overmaat water) heeft, zoals ieder zout, een sterke corrosieve werking.

4.7.5 Een ander opbergontwerp

In plaats van opberging in horizontale gaten in de zijwand van een mijngalerij kan ook gebruik gemaakt worden van verticale gaten in de vloer van een galerij. Deze opbergtechniek werd ook toegepast in het OPLA onderzoek en sluit nauw aan bij het Duitse opbergconcept.

De studie [CORA 11] verkent de technische haalbaarheid van het terugneembaar opbergen van vaten met hoogactief afval, die op elkaar gestapeld worden in diepe verticale boorgaten vanuit een mijngalerij. Deze methode beperkt het ruimtebeslag van de berging. Ook wordt op die manier nuttig gebruik gemaakt van de vaak grote verticale afmetingen van zoutformaties. De boorgaten zijn voorzien van een aan de onderzijde gesloten verbuizing, die bestand is tegen de heersende gesteentedruk en voorkomt dat het zout de afvalvaten insluit.

De technische haalbaarheid van het opbergconcept is o.a. geanalyseerd aan de hand van de hierna besproken factoren. Onderzoek naar de lange termijn veiligheid maakt geen deel uit van deze analyse.

Ontwerp van de verbuizing

In de olie-industrie is ruime ervaring voorhanden met het ontwerpen en toepassen van verbuizing van diepe boorgaten. Het blijkt dat voor de verbuizing van diepe boorgaten in steenzout het bezwijken onder een hoge uitwendige belasting het belangrijkste ontwerpcriterium is.

Bij het bepalen van een "veilige dikte" van de verbuizing is uitgegaan van een verticaal boorgat met een diameter van 0,7 m en een diepte van 500 m, geboord vanaf een galerij op 800 m onder het maaiveld. De gesteentedruk over deze diepte zal liggen tussen ca. 19 MPa en 30 MPa. In de analyse is uitgegaan van een gelijkmatig verdeelde uitwendige belasting, waarbij een veiligheidsfactor van 1,5 is gebruikt om het effect te verdisconteren van een mogelijk ongelijkmatig verdeelde belasting. Het opvullen van de ruimte tussen de verbuizing en de boorgatwand met geschikt materiaal werkt het bereiken van een gelijkmatige verdeling in de hand.

Uit de berekeningen blijkt dat de minimale wanddikte van de buis ca. 49 mm moet bedragen om de maximale ontwerpdruk te weerstaan. Hierop wordt een toeslag gelegd, die kan worden gezien als een veiligheidsmarge voor corrosie gedurende een lange opslagperiode en ook als extra veiligheid voor het geval dat er een lichte afwijking in de gelijkmatig veronderstelde spanningstoestand ontstaat. De resulterende wanddikte van 60 mm zou bestand tegen knik moeten zijn, mits de drukverdeling gelijkmatig is. Voor de massieve, vlakke bodem van ca. 100 mm blijven de spanningen ruim onder de toelaatbare waarden. Er is dan rekening gehouden met een veiligheidsfactor van 1,8 voor het geval er tijdelijk extra belastingen optreden.

De sterkte van het afvalvat

Gezien de relatieve dunwandigheid van de COGEMA-vaten, waarin het kernspijtingsafval is verpakt, is de stapelbaarheid ervan beperkt. Het gewicht van de stapel mag het onderste vat -in verband met een terughaal operatie- niet vervormen. Daarom zullen de vaten verstevigd moeten worden met een overpack.

Het ontwerp van een overpack houdt zowel rekening met de statische belasting - de overpack van het onderste vat moet het gewicht van de stapel vaten met overpack kunnen dragen - als met de dynamische belasting (de onderste overpack moet bestand zijn tegen een botsing met een vallend vat met overpack).

Voor de ontwikkeling van een overpack zijn een aantal mogelijkheden onderzocht waaronder combinaties van enkele vaten in een overpack. Vanwege de geringere massa is gekozen voor een individuele overpack van het COGEMA-vat met een diameter van ca. 50 cm, een dikte van ca. 2 cm en een hoogte van ca. 1,4 m.

Deze uitvoering is bestand tegen de maximaal optredende statische belastingen. Met betrekking tot de dynamische belasting is de maximale toelaatbare valsnelheid ca. 18,5 m/s. Bij een vrije val van een vat over een hoogte van 500 m, bijvoorbeeld ten gevolge van het falen van het hijssysteem, zou dit maximum met een factor 5 worden overschreden, hetgeen zou leiden tot blijvende vervorming. De studie geeft enkele suggesties om zo'n situatie uit te sluiten, bijvoorbeeld door gebruik te maken van kortere boorgaten of door het toepassen van een remmechanisme op de overpack.

Het niveau van straling en temperatuur

Verblijf in de opberggalerij moet mogelijk zijn in verband met inspecties en het eventuele terugnemen van het afval. De condities daarvoor zijn niet wezenlijk verschillend van de situatie met horizontale opberggaten.

Thermomechanische stabiliteit

De situatie verschilt van die voor horizontale berging omdat door meerdere vaten in een boorgat te plaatsen, de temperatuur in het zout dichtbij het gat hoger kan worden. Onderzocht is hoe de ontworpen verbuizing van een boorgat zich gedraagt onder de

heersende opbergconditie van temperatuur en druk. Analyse van de opbergsituatie met meerdere diepe boorgaten in een tweetal galerijen toont aan dat, uitgaande van een wanddikte van 60 mm, de optredende spanning in de buis de sterkte van de verbuizing niet nadelig beïnvloedt: de vervorming van de verbuizing is betrekkelijk gering en beperkt het terugnemen van de afvalvaten niet.

Inbrengen en terugnemen van het afval

Nadat het boorgat tot op ca. 10 m van de galerijvloer gevuld is met een groot aantal afvalvaten, die individueel voorzien zijn van een overpack, wordt de buis aan de bovenzijde afgesloten met een metalen deksel. Dit deksel wordt op afstand aan de verbuizing gelast. De bovenste 10 m van het boorgat, die niet verbuisd is en een grotere diameter heeft, wordt nagevuld met enkele uit massief steenzout geboorde cilindervormige blokken in combinatie met een hoeveelheid zoutgruis of bentoniet ter opvulling van oneffenheden.

Bij het terugnemen van het afval boort men deze zoutafdichting weg. Het deksel van de verbuizing wordt hierna blootgelegd en op afstand doorgeslepen. Stuk voor stuk hijst men vervolgens met een kraan de vaten uit het verbuisde boorgat.

De individuele bereikbaarheid en de monitoring van de afvalvaten is beperkter dan bij de opberging in horizontale gaten, zoals behandeld in 4.2 en waarbij in elk gat slechts één afvalvat is geborgen.

4.7.6 Natuurlijke processen in steenzout

Het inzicht in het lange termijn gedrag van zoutstructuren (pijlers of koepels, kussens en lagen) is door uitvoering van de OPLA-studies sterk toegenomen. Deze kennis is ook voor terugneembare opberging in zout van belang, omdat komende generaties zouden kunnen besluiten de berging definitief te sluiten. Maar ook voor het geval dat de berging verwaarloosd wordt, is die kennis noodzakelijk om te kunnen beoordelen of door natuurlijke processen in het zout de berging uiteindelijk in een veilige situatie terechtkomt.

In aanvulling op dit onderzoek zijn in het CORA programma nog een aantal aspecten nader onderzocht [CORA 13], te weten: de gevolgen op de zoutstructuur van temperatuurfluctuaties, omzetting van calciumsulfaat in anhydriet, vorming van oplosloten, opwaartse beweging van de zoutpijler, de compactie van het afdekpakket en de volumeverandering van het steenzout.

Krimp ten gevolge van afkoeling, bijvoorbeeld tijdens een ijstijd, zou mogelijk kunnen leiden tot scheurvorming in de zoutformatie en daarmee het transport van radionucliden kunnen beïnvloeden. Overigens blijken deze effecten geen ingrijpende gevolgen voor de veiligheidsberekeningen te hebben, omdat de effecten gering zijn en in het niet vallen bij andere effecten en doordat in de veiligheidsanalyse conservatieve waarden zijn aangenomen.

4.8 Samenvatting van de onderzoeksresultaten

De belangrijkste resultaten van het onderzoek voor wat betreft de terugneembaarheid, de veiligheid en de kosten van een terugneembare berging in zout zijn in deze paragraaf beknopt weergegeven, aangevuld met resultaten voor enkele specifieke onderwerpen.

Terugneembaarheid

1. Terugneembaar opbergen van hoogactief afval (kernsplijtingsafval en splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren) in een zoutmijn is technisch mogelijk. Het onderzochte opbergprincipe gaat uit van korte horizontale opberggaten in de zijwanden van een galerij. Per gat wordt één vat geplaatst. In het proces van terug-

nemen wordt gebruik gemaakt van een speciale machine die, nadat het zout rond het afvalvat is weggeboord, het vat verwijdert.

2. Het terugnemen van het hoogactieve afval is uitvoerbaar zolang de mijn nog onderhouden wordt. Mijnbouwtechnische ervaring geeft aan dat het openhouden van een zoutmijn voor minstens 100 jaar mogelijk is, en waarschijnlijk veel langer. Een langdurige organisatorische inzet is vereist om het afval terug te kunnen nemen.
3. Terugneembare berging in zout van de splijtstofelementen van de Nederlandse onderzoeksreactoren vereist de toepassing van dikwandige containers als langdurige bescherming tegen corrosie gedurende de open periode van de zoutmijn.

Veiligheid

4. Uit een verkennende analyse van de gevolgen van een mogelijk ernstig ongeval, het door verwaarlozing onderlopen van de mijn met hoogactief afval, volgt een maximale individuele stralingsdosis van ca. 10^{-12} Sv/j voor het kernsplijtingsafval en ca. 10^{-9} Sv/j voor een berging met splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren. Deze stralingsdoses kunnen in de biosfeer na ongeveer 100.000 jaar optreden. In de berekeningen verspreidt het vrijkomende afval zich langs de meest waarschijnlijke route, d.w.z. via het grondwater en het oppervlaktewater.
5. Het onderzoek van de veiligheid van terugneembare berging heeft niet alleen geleid tot een verbetering in de ontwikkeling en selectie van situaties met een mogelijk risico, maar ook tot een betrouwbaarder modellering van de processen die van invloed zijn op het vrijkomen van het afval. Daarbij is zo veel mogelijk gebruik gemaakt van opgebouwde kennis en ervaring uit het OPLA-onderzoek en gezamenlijke in situ experimenten in Duitsland. Hiermee is nu ten behoeve van vervolgonderzoek een goede basis gelegd voor het uitvoeren van een probabilistische veiligheidsanalyse van terugneembare berging. Deze basis dient door verder in situ onderzoek te worden versterkt.
6. Criticiteit vormt in het voorgestelde opbergconcept voor de splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren, die een relatief hoog percentage verrijkt uranium bevatten, geen veiligheidsprobleem. Een berging met dit materiaal zal aan de volledige non-proliferatie voorschriften van de IAEA moeten voldoen.

Kosten

7. De kosten voor aanleg, bedrijf en sluiting van een terugneembare berging in zout bedragen ongeveer €280 miljoen, de jaarlijkse uitgaven voor het openhouden van de berging ca. €1,8 miljoen.

Specifieke onderwerpen

8. Als gevolg van stralingsschade in steenzout ontstaan in het kristalrooster van NaCl minuscule holtes. In laboratoriumexperimenten is aangetoond dat groeiende afmetingen en een speciale vorm van die holtes de kans op dynamische vrijzetting van energie die door de stralingsschade is opgebouwd, verhogen. Dit resultaat is van belang om in een terugneembare berging het stralingsschade proces te kunnen controleren.
Het blijkt dat NaCl (keukenzout) waaraan bijvoorbeeld broom is toegevoegd een bepaalde mate van "stralingsongevoeligheid" bezit. In dergelijke stoffen ontstaan ook bij hoge stralingsniveaus nauwelijks holtes in het kristalrooster; dit maakt ze mogelijk geschikt als opvul- en afdichtmateriaal rond de vaten.
9. Radon (^{222}Rn) is een vervalproduct van radium (^{226}Ra) dat voornamelijk in een deel van het laag- en middelactief afval voorkomt. Als vaten met dit afval beschadigd raken en als de afdichting van de opberggaten onvoldoende functioneert, dan

kan in een open berging een overschrijding optreden van de radon-grenswaarde. Overigens kan radon wellicht als indicator dienen voor falende afdichtingen en lekgeraakte laag- en middelactieve afvalvaten die veel radium bevatten.

10. Variaties in het onderzochte opbergconcept zijn mogelijk.
Onderzoek naar diepe verticale opberggaten die vanuit een galerij in een zoutmijn zijn geboord en die voorzien zijn van een robuuste verbuizing levert goede vooruitzichten voor ontwikkeling van dat concept. De keuze voor ondiepe gaten met slechts één of een beperkt aantal vaten maakt het individueel terugnemen en monitoren echter eenvoudiger.
Omstorten van vaten met het zeer hygroscopische calciumchloride kan, zolang het nog niet vervloeid is, een beperking van corrosie en gasontwikkeling opleveren,.
11. De effecten van enkele onderzochte natuurlijke processen in steenzout hebben geen ingrijpende invloed op de veiligheidsberekeningen.

4.9 Kanttekeningen van de Commissie

De Commissie benadrukt het verkennende karakter van de veiligheidsanalyse. De berekende stralingsdoses vormen voor enkele onderzochte situaties waarin het afval kan vrijkomen, dan ook niet meer dan een indicatie van de gevolgen. Ze zijn in het algemeen gebaseerd op pessimistische veronderstellingen en desondanks veel lager dan het gemiddelde natuurlijke stralingsniveau in Nederland van $2,4 \cdot 10^{-3}$ Sv/j.

De Commissie acht de onzekerheid in de berekening van de stralingsdoses en de achterliggende veronderstellingen van dien aard dat een nadere analyse noodzakelijk is. Deze onzekerheid houdt o.a. verband met de keuze van de verwaarlozing als situatie met een mogelijk maximaal risico, het verloop van het vrijzettingsproces in en buiten een ondergelopen berging en de wijze waarop de mens wordt blootgesteld aan de straling.

Bij enkele specifieke punten plaatst de Commissie de volgende kanttekeningen.

Vrijkomen van het afval

Het stromingsproces in ondergelopen galerijen en schachten is sterk vereenvoudigd. In het onderzoek wordt verondersteld dat stroming op basis van convectie, bijvoorbeeld als gevolg van verschillen in temperatuur tussen het opbergdeel en de schachten, verwaarloosd kan worden. Mocht convectie wel optreden dan zal de verspreiding van het opgeloste afval in de galerijen aanzienlijk sneller verlopen. In het schachtgebied wordt het afval vervolgens onmiddellijk opgenomen in de grondwaterstroming, waardoor aanzienlijk grotere hoeveelheden activiteit in het leefmilieu terecht kunnen komen. Verdere verificatie van het stromingsproces is nodig.

Afdichting

Geperst zoutgruis, toegepast voor de afdichting van opberggaten, laat nog lange tijd opgelost afval door. De Commissie stelt dan ook voor verder onderzoek uit te voeren naar andere, snellere en meer afdoende, afdichtingsmethoden in combinatie met in situ studie van het convergentieproces. Daarmee kan een versterking van het fail-safe gedrag van steenzout bereikt worden.

Andere situaties met een mogelijk risico

Het langdurig openhouden van een berging maakt naast verwaarlozing ook het optreden van andere situaties met eventueel ernstige gevolgen mogelijk, bijvoorbeeld gasontwikkeling in de berging of toekomstig menselijk indringen. Dit laatste kan leiden tot opslag van reactief (chemisch) afval in de faciliteit, schadelijk (her-)gebruik van opgeborgen afval en ontwrichting van de faciliteit doordat economisch waardevolle

materialen verwijderd worden. Een kwantitatief-technische analyse van de gevolgen is complex, maar verdient niettemin de volle aandacht.

Toezicht

Terugneembaarheid van het afval brengt de noodzaak van een langdurig toezicht op de berging met zich mee. Dit vereist het opstellen van een monitoringsplan waarin alle te controleren technische en procedurele factoren zijn opgenomen, alsmede de eventueel te treffen maatregelen.

Stralingsschade

Ook na dit onderzoek blijft de vraag of het optreden van stralingsschade in de werkelijke opbergsituatie een gevaar voor de veiligheid betekent, nog onbeantwoord.

Weliswaar wordt het proces vanuit de ontwikkelingen in het laboratorium nu beter begrepen, maar de verificatie in de praktijk ontbreekt nog. Een belangrijke eerste stap kan worden gezet door gebruik te maken van gegevens uit langdurige in situ bestralingsexperimenten in de zoutmijn Morsleben (Duitsland). Het is gewenst dit in vervolgonderzoek op te nemen. Daarnaast verdient het aanbeveling om het onderzoek van stoffen waarin nauwelijks stralingsschade optreedt, en die toegepast kunnen worden als opvul- of afdichtmateriaal rond afvalvaten, voort te zetten. Verder is het nuttig om, op grond van kennis op het gebied van explosies en schokgolven, te bepalen in hoeverre de in het laboratorium waargenomen verschijnselen een rol spelen bij de hoge drukken die zich onder opbergcondities voordoen.

Kosten

Indien er naast een ondergrondse berging sprake is van een reserveopslag bovengronds om desgewenst het afval terug te kunnen nemen, komen er daarvoor nog kosten bij.

5. Terugneembare berging in klei

Diepgelegen kleilagen lijken geschikt voor het terugneembaar opbergen van het afval. Ondersteuning van galerijen in een opbergmijn is noodzakelijk. De eigenschappen op grotere diepte zijn nog minder goed bekend.

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk staat centraal de vraag of Nederlandse kleilagen dusdanige eigenschappen bezitten, dat daarin radioactief afval op veilige en terugneembare wijze kan worden opgeborgen.

Diep gelegen, slecht doorlatende, kleilagen kunnen geschikt zijn voor berging als ze voldoende homogeen en dik zijn, en eigenschappen bezitten die mijnbouw mogelijk maakt. Ook moet de geproduceerde afvalwarmte goed kunnen worden afgevoerd.

Aan berging in klei werd in Nederland, tot bij de start van het CORA-onderzoek, nauwelijks aandacht besteed. Daarentegen wordt in België opberging van radioactief afval in diep gelegen kleilagen reeds enkele tientallen jaren bestudeerd. Hieruit is veel waardevolle praktijkinformatie beschikbaar gekomen, waar CORA dan ook gebruik van heeft gemaakt.

De uitgevoerde, locatie-onafhankelijke studies zijn verkennend van aard en concentreren zich op een inventarisatie van diep gelegen kleilagen (5.2), het opbergontwerp (5.3), de veiligheid (5.4 en 5.5), de terugneembaarheid (5.6) en de kosten (5.7).

In een afzonderlijke paragraaf (5.8) wordt aandacht gegeven aan een tweetal specifieke onderwerpen: de betekenis van radon voor de veiligheid in en buiten de opberging alsmede de invloed van een toekomstige ijstijd op een berging in klei.

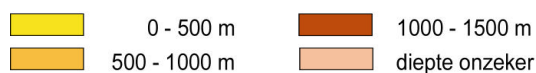
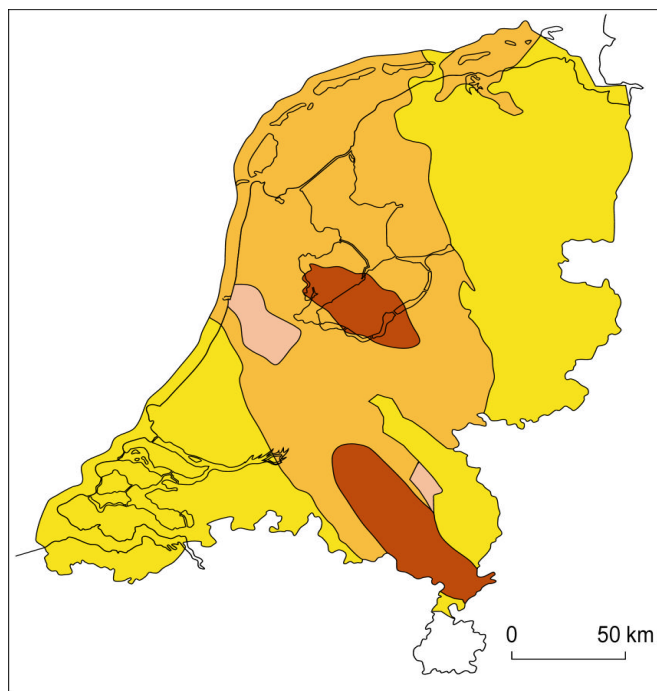
5.2 Diepgelegen klei in Nederland

Het voorkomen van kleiafzettingen op grotere diepten in Nederland is onderzocht in de studie [CORA 15]. De inventarisatie is uitsluitend gebaseerd op openbaar beschikbare gegevens.

Het onderzoek richt zich in eerste instantie op de Boomse klei. Maar ook andere kleilagen, zoals bijvoorbeeld de klei van Ieper, kunnen mogelijk geschikt zijn voor verder onderzoek.

De Klei van Boom komt onder het merendeel van het vaste land van Nederland voor (figuur 5.1). De zuidelijke verbredingsgrens loopt in oost-west richting over Noord-België. In westelijke richting komt de Klei van Boom ook voor in het Noordzeebekken. In het zuidwesten van Nederland helt de bovenkant van de Klei van Boom vanaf de Nederlands-Belgische grens naar het noordoosten en bereikt een diepte van ongeveer 500 m bij Rotterdam. In de Centrale Slenk komt de bovenkant van de Klei van Boom op de voor het Nederlandse vasteland grootste diepte voor, 1700 m, waarbij het diepste punt ten zuidwesten van Boxtel ligt. De Klei van Boom is hier ook doorsneden door een uitgebreid breukensysteem, dat een noordwest-zuidoost oriëntatie heeft. In de provincies Zuid-Holland en Utrecht varieert de diepte tot de bovenzijde van de Klei van Boom van ongeveer 400 tot 800 m. Ter plaatse van het Zuid-IJsselmeer/Veluwe-bekken bereikt de top van de Klei van Boom diepten tot 1250 m. In Noord-Nederland is het verloop van de ligging van de bovenkant van de Klei van Boom grillig mede ten gevolge van de aanwezigheid van zoutpijlers. Deze zijn op enkele plaatsen door de Klei van Boom heen geperst. De klei vertoont tevens naar het noorden een grotere lithologische variatie en lijkt daarom ter plaatse minder geschikt

voor mijnbouwactiviteiten. Ten zuidoosten van Den Haag is de Klei van Boom tengevolge van vroegere erosie niet aanwezig.



Figuur 5.1 Verbreiding en diepte van de Boomse klei

De Klei van Boom bereikt de grootste dikten in het Peelgebied (100-150 m), de Noordoost polder (150 m), in de omgeving van Arnhem (250 m) en ten zuiden van Schiermonnikoog (275 m).

5.3 Ontwerp voor een terugneembare berging

Evenals voor zout wordt uitgegaan van een opbergdiepte van minstens 500 m; dit in verband met de effecten van een toekomstige ijsbedekking in Nederland. Bovendien wordt een minimale dikte van de kleilaag, zoals in het Belgische concept, van minstens ongeveer 100 m aangehouden.

De ontwikkeling van een mijnontwerp in Nederlandse klei vereist gegevens over de geomechanische, geohydrologische en geothermische eigenschappen van de klei op ca. 500 m. Uit die gegevens is o.a. af te leiden, de reactie van de klei op het aanleggen van schachten en galerijen, de sterkte van de klei, het percentage water en de warmtegeleiding op die diepte. Uit [CORA 15 en 16] blijkt dat over het gedrag van de diepgelegen Nederlandse klei slechts weinig bekend is. Wel beschikbaar zijn gegevens uit het onderzoek van het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK-CEN, Mol, België) over de Boomse klei tot op een diepte van 225 m en de aanleg van de Westerschelde tunnel, waar de Boomse klei op ca. 50 m diepte aanwezig is. Ook zijn openbare boorgegevens van het Nederlandse continentale plat (diepte 500-700 m) gebruikt.

De meeste van deze gegevens hebben echter betrekking op een geringere diepte dan voor de Nederlandse situatie (minimaal 500 m) gewenst is. Met toenemende diepte veranderen de eigenschappen van de kleilagen. Dit heeft invloed op de mijnbouwkundige stabiliteit van een berging en op het opbergontwerp. Bovendien treden regionale verschillen op, zodat de eigenschappen van de Nederlandse klei anders kunnen zijn dan de Belgische.

Uit een onderzoekproject, [CORA 19], zijn extra gegevens van enkele recente Belgische en één Nederlandse boring (Bleija) verkregen. Hiermee is voor een aantal geotechnische eigenschappen van de klei het verloop met de diepte bepaald. Doorgaans bevestigen deze gegevens de verwachting dat met toenemende diepte de kleieigenschappen gunstiger worden voor mijnbouw; op grotere diepte verminderen de porositeit en het watergehalte en nemen de dichtheid en de effectieve cohesie toe. Eén van de geotechnische eigenschappen lijkt minder gunstig en verdient verder onderzoek. Een mogelijke verklaring kan liggen in een te korte consolidatiefase bij de voorbereiding of een te grote belastingssnelheid tijdens de analyse van de monsters. Ook de methode van monsterneming kan van invloed zijn geweest.

De beschikbare gegevens zijn toegepast in een tweetal studies [CORA 17, CORA 18] voor het ontwikkelen van een mijnontwerp, waarin de afvalvaten terugneembaar zijn. Deze ontwikkeling verliep in twee stappen. Begonnen is met een basisontwerp, dat vervolgens geoptimaliseerd werd.

Basisontwerp

De ontwikkeling van een basisontwerp is uitgevoerd toen gegevens over de klei op grote diepte nog ontbraken, zodat voornamelijk eigenschappen van de Boomse klei op ongeveer 200 m uit Belgisch onderzoek zijn gebruikt.

De belangrijkste kenmerken van het ontwerp zijn:

- twee schachten tot ca. 500 m diepte met twee hoofdgalerijen;
- één opbergniveau in het midden van een 100 m dikke kleilaag (50 m klei erboven en eronder);
- drie afzonderlijke opbergsectoren voor:
 - hoogactief warmteproducerend afval;
 - hoogactief niet-warmteproducerend afval;
 - laag- en middelactief afval.

De hoeveelheid afval, die in ieder van de sectoren kan worden geborgen, is aangegeven in hoofdstuk 2 en [CORA 17].

De sectoren, gelegen op hetzelfde diepteniveau, zijn van elkaar gescheiden door een minimaal 50 m dikke horizontale klei-barrière. In elke sector is er een set van secundaire horizontale galerijen met een onderlinge afstand van 50 m, die parallel gedolven zijn aan de centrale verbinding tussen de twee schachten. Alle galerijen zijn ondersteund met cirkelvormige segmenten van beton of staal.

Voor het hoogactief afval zijn vanuit deze secundaire galerijen korte doodlopende horizontale opberggaten gedolven met een lengte van ongeveer 12,5 m. Per gat wordt één vat geborgen. De afstand tussen deze opberggaten bedraagt 40 m voor het niet-warmteproducerend afval en 50 m voor het warmteproducerend afval.

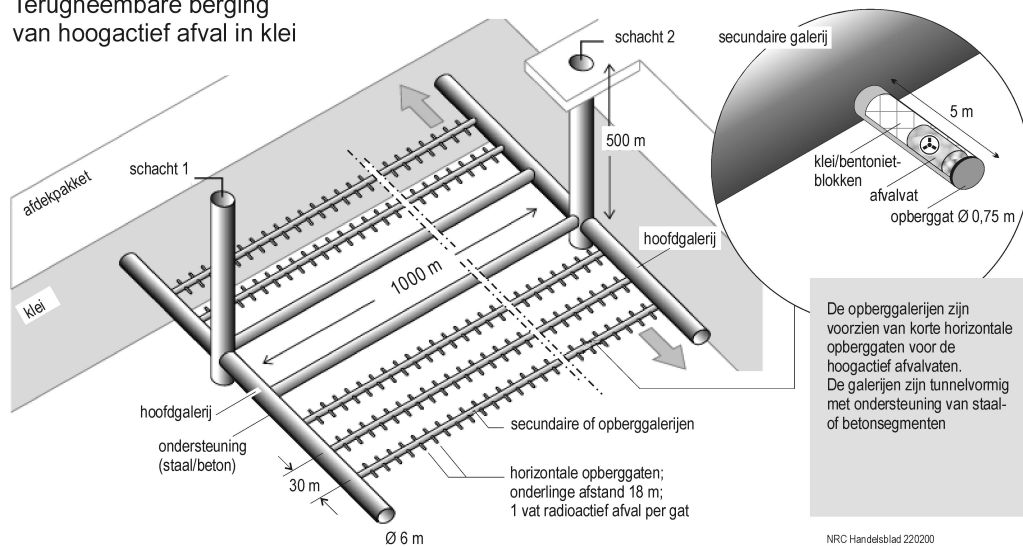
Voor de opberging van het laag- en middelactief afval worden langere en grotere opberggaten uitgegraven over de hele breedte van de sector en op een onderlinge afstand van 40 m. In deze gaten tussen twee secundaire galerijen worden de vaten (ca. 150 per gat) geplaatst.

De totale oppervlakte die zo ontstaat is ongeveer 4 km² voor de drie typen afval samen. Het delven van de gehele ondergrondse mijn neemt naar schatting 10 tot 13 jaar in beslag. Het opslaan van het afval wordt geschat op 5 jaar voor het laag- en middelactief afval, en op respectievelijk ongeveer 300 tot 600 werkdagen voor het warmteproducerende en niet-warmteproducerende hoogactieve afval.

Ontwerp optimalisatie

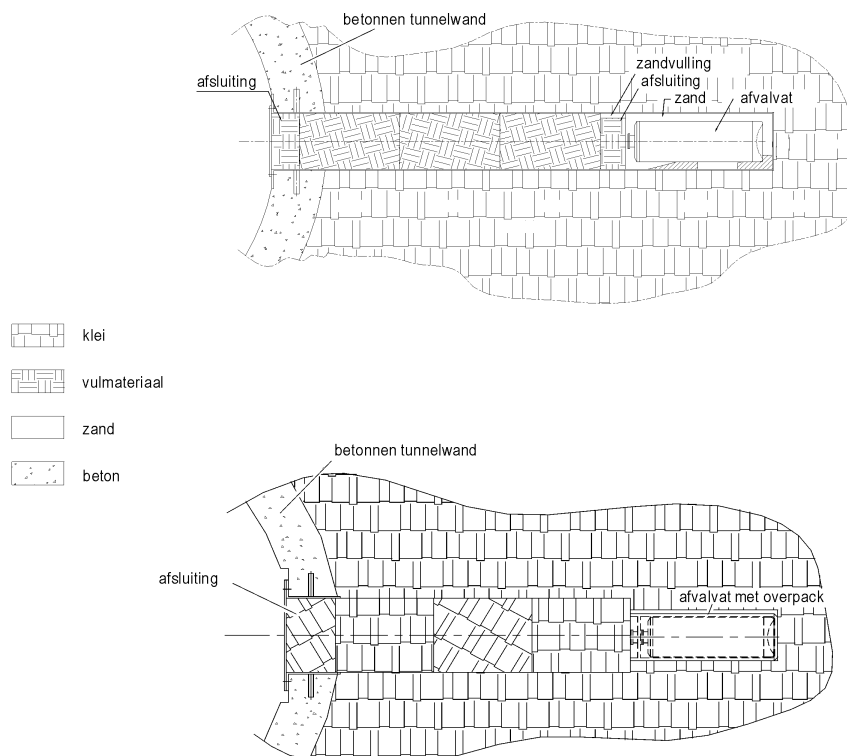
Het basisontwerp is geoptimaliseerd voor de sector waar het warmteproducerende hoogactieve afval ligt opgeslagen (voornamelijk kernsplijtingsafval). Er wordt o.a. rekening gehouden met de eigenschappen van de klei op 500 m, en er wordt een meer realistische analyse van de warmteproductie en -verdeling in de mijn beschouwd.

Terugneembare berging
van hoogactief afval in klei



Figuur 5.2 Principe van een terugneembare berging voor hoogactief afval in klei.

In dit ontwerp (figuur 5.2) wordt van een kleinere diameter (0,75 m i.p.v. 3,2 m) en een kortere lengte (5 m i.p.v. 12,5 m) van de opberggaten uitgegaan. Daardoor dienen alle handelingen voor aanleg en vulling van een opberggat vanuit de opberggalerij te worden uitgevoerd. Dit vereist omvangrijk materieel. De diameter van de galerij zal dan groter moeten zijn (buitendiameter 6 m i.p.v. 4,6 m). Een en ander resulteert [CORA 18] in een aantal varianten voor een compactere mijn met onderlinge afstanden van de individuele opberggaten, variërend van 50 m tot 5,5 m. Voor de afstand tussen de opberggalerijen onderling wordt een afstand van 50 m en 30 m beschouwd.



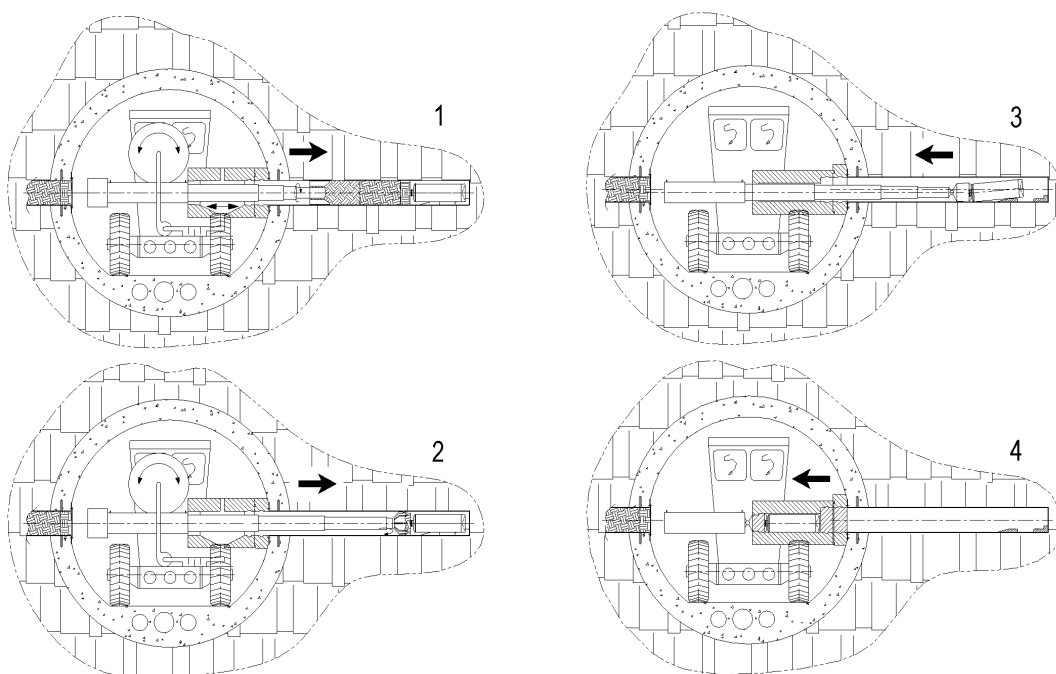
Figuur 5.3 Twee mogelijkheden voor het ontwerp van een opberggat: verbuisd (boven) en onverbuisd (onder). Bron: [CORA 18]

Van alle onderzochte alternatieve ontwerpen blijven er slechts twee als realistisch over. De afstand tussen de opberggalerijen is voor deze ontwerpen 30 m, en tussen de opberggaten 30 m of 18 m. Deze aanpassing van het ontwerp resulteert in een vermindering (in de sector van het warmteproducerend hoogactief afval) van de lengte van de galerijen met 40 tot 60 % en, in een vermindering van de overeenkomstige bergingsoppervlakte met 65 tot 80 %.

Onderzocht zijn twee mogelijkheden voor het ontwerp van het opberggat: een verbuisde en een niet-verbuisde variant (figuur 5.3).

In de verbuisde variant wordt het vat met hoogactief afval zonder overpack opgeborgen. In het onverbuisde gat wordt wel een overpack (wanddikte 3cm) toegepast. Beide ontwerpen bieden zodoende een langdurige bescherming tegen beschadiging van het vat door corrosie en de gesteentedruk.

Het verbuisde gat wordt rond het vat opgevuld met fijn kwartzand en afgesloten met blokken opvulmateriaal op basis van klei, bijvoorbeeld bentoniet. Het onverbuisde gat kan met klei uit dezelfde formatie of met bentoniet worden nagevuld. Verder onderzoek naar geschikte materialen is gewenst.



Figuur 5.4 Het terugnemen van een afvalvat uit een verbuisd opberggat in een berging in klei.
Bron: [CORA 18]

Het ontwerp maakt het mogelijk om met gebruik van speciale apparatuur op veilige wijze individuele vaten uit de korte horizontale opberggaten terug te nemen (figuur 5.4).

Bovendien is de ruimtelijke verdeling van de vaten zodanig dat de temperatuur in de opberggalerijen niet te hoog oploopt voor een terugneemoperatie. De afdichting van het opberggat zorgt voor de noodzakelijke stralingsafscherming.

5.4 Opbergveiligheid van het kernsplijtingsafval

De veiligheid van een terugneembare berging hangt af van de mijnbouwkundige beheersbaarheid en van de stralingsbelasting van een mogelijk vrijkomen van radioactief materiaal.

5.4.1 Mijnbouwkundige beheersbaarheid

Hierbij spelen de volgende factoren een rol:

Stabiliteit

Bij uitgraven van een galerij in klei ontstaat een zone met vervormingen waarin breuken zouden kunnen ontstaan. De grootte van deze zone is ongeveer recht evenredig met de diameter van de tunnel. De hydromechanische reactie van de klei bestaat uit die van de klei zelf en van het poriënwater in de klei. Gezamenlijk bepalen ze de spanning die de kleimassa uitoefent op de ondersteuning van de galerij.

Er moet een onderscheid worden gemaakt tussen de onmiddellijke respons van het systeem van -ondersteuning en kleimassa- en de lange termijn interactie. Onmiddellijk na de uitgraving treedt er een radiale beweging op van meerdere centimeters. De grootte ervan is een functie van de diameter. Bijvoorbeeld voor een buitenstraal van de galerij van 2,3 m, wordt de radiale beweging geschat op 0,15 m. Bij het ontwerp van de ondersteuning wordt hiermee rekening gehouden. Er wordt uitgegaan van een cilindrische ondersteuning van beton of staal. Tijdens de relatief korte periode van uitgraving zal wegens de lage permeabiliteit geen of zeer weinig water uit het kleimassief treden. Ook de ondersteuning zal in het begin ondoorlatend zijn, en daardoor een vrij grote belasting ondervinden door de totale spanningsdruk. Als de ondersteuning doorlatend wordt, wat vroeg of laat zal gebeuren, wordt deze asymmetrisch belast.

Ontwerptechnisch levert geen van beide situaties een onoverkomelijk probleem op. Na afsluiting worden de galerijen opgevuld en wordt de ondersteuning niet meer belast.

De aanleg van het ondergrondse laboratorium bij het SCK-CEN te Mol toont aan dat het mogelijk is tunnels met een cirkelvormige doorsnede op een diepte van 225 m in klei aan te leggen. Uit diverse berekeningen kan worden geconcludeerd dat dit ook op een diepte van ca. 500 m technisch haalbaar is, indien de mechanische eigenschappen van de klei daar minstens even gunstig zijn als in Mol op een diepte van 225 m.

Algemeen mag men verwachten dat de mechanische eigenschappen op grotere diepte gunstiger worden, al zal verder onderzoek dit moeten bevestigen.

De warmteproductie

Het effect van de warmteproductie door het kernsplijtingsafval op de klei is onderzocht in [CORA 17] en uitgewerkt in een geoptimaliseerd mijnontwerp in [CORA 18]. De ruimtelijke verdeling van de vaten in de onderzochte configuraties is zodanig dat de uiteindelijke temperatuurstijging aan de rand van de kleilaag (op 50 m afstand van de berging) minder is dan 4 °C. Deze randvoorwaarde wordt gehanteerd in het Belgische opbergontwerp en is bedoeld om de groei van micro-organismen in het grondwater te beperken.

Het aantal vaten per oppervlakte-eenheid en de voorafgaande afkoelingsperiode hebben invloed op de temperatuurstijging in de kleimassa en de lagen erboven. Voor een afkoelingsperiode bovengronds van bijvoorbeeld 50 jaar is 270 m² (horizontaal) per vat voldoende. Dit komt overeen met afstanden tussen de galerijen van 30 m en van 18 m tussen de opberggaten. Verder onderzoek naar de maximale temperatuur in de nabijheid van een opberggat is gewenst.

Stralingsafscherming

Afscherming tegen straling tijdens het transport van de vaten met kernsplijtingsafval vindt plaats door gebruik te maken van een dikke transportcontainer. Via een sluis wordt het vat in het opberggat geplaatst. De afscherming wordt daarna overgenomen door de klei/bentoniet-blokken, die het opberggat afsluiten. Omdat een vat met kernsplijtingsafval ofwel voorzien wordt van een extra (minimaal 3 cm dikke) corrosiewerende container, of in het opberggat een stalen verbuizing wordt geplaatst, mag worden verwacht dat het stralingsniveau in de opberggalerij voldoende laag is en verblijf daar mogelijk maakt.

5.4.2 Stralingsbelasting

Een keuze is gemaakt uit situaties die kunnen leiden tot het vrijkomen van terugneembaar opgeborgen radioactief materiaal. Daarbij werd gebruik gemaakt van een verbeterde PROSA-methode [CORA 04]. Tevens is de Belgische kennis benut over de verschijnselen, gebeurtenissen en processen (de FEP's, Features, Events en Processes) die invloed kunnen hebben op het vrijkomen en het transport van radionucliden uit de opberging. Twee situaties zijn geselecteerd voor verdere analyse, de normale bedrijfs-situatie van een goed onderhouden berging en de situatie van verwaarlozing van de faciliteit waarbij deze onder water loopt. Aan deze laatste situatie is mogelijk een maximaal risico verbonden.

Omdat voor klei niet kon worden gerefereerd aan vroegere berekeningen, zoals bij zout aan het OPLA-onderzoek, is de normale bedrijfssituatie hier ook onderzocht.

De normale bedrijfssituatie

In deze situatie wordt de opberging volgens plan bedreven en in een later stadium, na een terugneembaarheidsperiode, zorgvuldig afgesloten. Opgeborgen afvalvaten (type COGEMA) worden zeer geleidelijk, maar onvermijdelijk aangetast door o.a. corrosie. Uit analyse blijkt dat na lekkage van vaten het oplossen van het afval in water dat zich normaal in de klei bevindt zeer langzaam verloopt. Het duurt tenminste ongeveer 75.000 jaar ¹⁴¹ voordat de gehele inhoud van een vat opgelost is. De opberggaten en de afdichting zijn zo ontworpen dat gedurende een terugneembaarheidsperiode van enkele honderden jaren geen lekkages zullen optreden. Indien er een lekkage van de afsluiting opgemerkt wordt, zijn maatregelen te nemen, aangezien de vaten individueel terugneembaar zijn. Nadat de galerijen en de schachten zijn opgevuld, vormen deze geen speciale vrijzettingroute voor de radionucliden meer. De radionucliden lossen op in het normaal in de klei aanwezige water (het poriënwater). Verdere verspreiding vindt plaats door de kleilaag zelf en voornamelijk door diffusie; een moleculair transportproces onder invloed van concentratieverschillen. Deze diffusie wordt vertraagd door de retentie-eigenschappen van de klei, waardoor de meeste radionucliden aan de klei gebonden worden.

In de directe omgeving (enkele meters afstand) van het opberggat en de galerijen is de klei door het aanleggen van die ruimten verstoord, en zijn bijvoorbeeld kleine breuken gevormd. Dit heeft nauwelijks invloed op het transport van de nucliden naar het aangrenzende grondwater. In hoofdzaak wordt dit transport bepaald door de 50 m dikke kleilaag boven de opberging.

De verspreiding van de nucliden door het afdekkpakket en de biosfeer is gemodelleerd, waarbij gebruikt gemaakt werd van de resultaten van de PROSA-studie.

Het transport van radionucliden door klei wordt voornamelijk bepaald door de geochemische eigenschappen. Deze zijn constant verondersteld over de laagdikte en gerelateerd aan die van de Boomse klei in Mol. Uit analyse blijkt dat het transportproces door de kleilaag zelf bijzonder langzaam verloopt. Klei bindt de meeste radionucliden, met uitzondering van ¹²⁹I, zeer sterk aan zich. Eenmaal buiten de kleilaag kunnen de nucliden in het grondwater komen en zich daarna in het oppervlaktewater verspreiden. Het duurt dan nog vele tienduizenden jaren voordat de radionucliden de mens kunnen bereiken. Als echter uit het grondwater boven de berging drinkwater wordt gewonnen, kan eerder blootstelling plaatsvinden.

De individuele, maximale stralingsdosis als gevolg van het volledig vrijkomen van het afval uit alle vaten met kernsplijtingsafval is zeer laag [CORA 04].

Na verspreiding in het oppervlaktewater kan deze na 200 miljoen jaar een maximum van 10^{-12} Sv/j bereiken. Verspreiding via het drinkwater levert een maximum na 20 miljoen jaar van $4 \cdot 10^{-9}$ Sv/j. ²²⁶Ra levert de grootste bijdrage aan deze doses.

De verwaarlozingssituatie

De kans op verwaarlozing van de berging stijgt naarmate de mijn langer open blijft. Deze verwaarlozing is mogelijk een situatie met een maximaal risico. Verondersteld

wordt dat de mijn vol met water loopt, en dat alle vaten met kernsplijtingsafval inclusief hun extra bescherming na verloop van tijd lek zijn geraakt. Na ongeveer 75.000 jaar is al het afval opgelost in het binnengedrongen water. Bij gebrek aan inzicht in het convergentiegedrag van klei is vervolgens uitgegaan van de pessimistische veronderstelling dat al het materiaal oplost, en de met water gevulde galerijen bereikt.

Transport door de ondergelopen galerijen en schachten

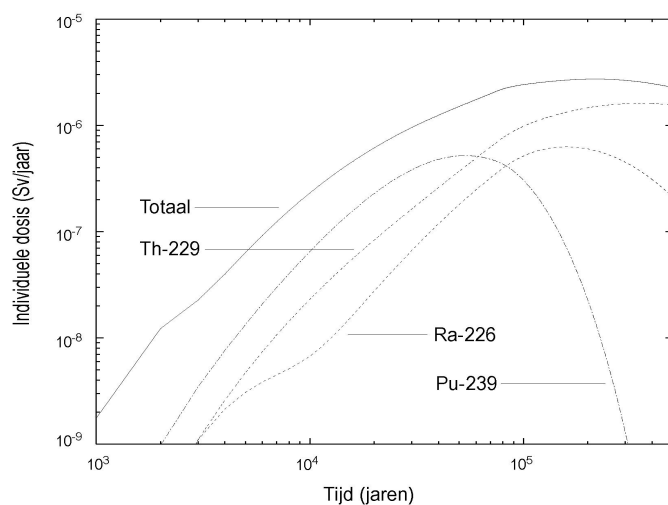
In het schachtgebied is een stroming in rekening genomen, omdat de beide verticale schachten in verbinding staan met stromend grondwater. In de studie is deze stroming beperkt tot de schachten en het schachtgebied in de mijn. Het effect van de stroming hangt af van de stroomsnelheid, de omvang van de doorstroomde delen en het ontwerp van de berging. Door een geschikt ontwerp kan het potentiële doorstromingsgebied beperkt worden. Doorstroming van het opbergdeel is niet onderzocht en wordt voor vervolgonderzoek aanbevolen.

Opgeloste radionucliden uit lekgeraakte vaten met kernsplijtingsafval kunnen zowel door de kleilaag zelf als door de ondergelopen galerijen en schachten in het grondwater komen. De volgelopen galerijen of restanten daarvan vormen echter een voorkeursroute voor vrijzetting van het opgeloste afval. De modellering van de verspreiding is beschreven in [CORA 04].

De hoeveelheid radionucliden die via de schachten vrijkomt, is berekend [CORA 04] op basis van het lekcraken van alle vaten met kernsplijtingsafval. In deze situatie heeft de ondersteuning van de galerijen het begeven en zijn de galerijen ingestort. De restanten blijven nog lange tijd een open transportverbinding met de schachten vormen. Er is een direct contact tussen het opgeloste afval en de ingestorte kleimassa. Sommige opgeloste radionucliden waarvoor de klei een hoge retentie bezit, zullen zich aan de kleimassa hechten. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een situatie dat het water in de opberggalerijen stilstaat, en verspreiding van de nucliden naar de schachten alleen door diffusie plaatsvindt.

De stralingsdoses

De stralingsdosis als gevolg van verspreiding van de radionucliden door de ondergelopen opberging is berekend voor het geval dat het drinkwater besmet raakt. Verondersteld wordt dat het grondwater boven de kleilaag in de onmiddellijke omgeving van de berging als drinkwater gebruikt wordt. De individuele stralingsdosis in de biosfeer bedraagt maximaal ca. $3 \cdot 10^{-6}$ Sv/j en wordt na ongeveer 200.000 jaar bereikt. Het verloop in de tijd en de bijdragen van een aantal radionucliden zijn weergegeven in figuur 5.5. ^{229}Th blijkt de belangrijkste bijdrage te leveren met een maximum van ongeveer $2 \cdot 10^{-6}$ Sv/j na ongeveer 350.000 jaar.



Figuur 5.5 Het verloop van de jaarlijkse individuele stralingsdosis in de biosfeer als gevolg van het onder water lopen van een berging in klei na verwaarlozing. De bijdragen van een enkele bepalende radionucliden zijn aangegeven. Bron: [CORA 04]

5.5 Opbergveiligheid van de splijtstofelementen van onderzoeksreactoren

Gebruikte splijtstof van de Nederlandse onderzoeksreactoren bezit eigenschappen die afwijken van het overige radioactieve afval. Deze zijn in hoofdstuk 2 toegelicht. Deze eigenschappen vereisen o.a. onderzoek naar de gevolgen voor de veiligheid van corrosie en criticiteit. In [CORA 05] zijn deze naast de stralingsbelasting bestudeerd. Voor non-proliferatie aspecten wordt verwezen naar 2.5. De mijnbouwtechnische beheersbaarheid van de berging komt overeen met die voor het kernsplijtingsafval en is behandeld in 5.4.1.

Corrosie

Experimentele gegevens over corrosie van de splijtstofelementen in klei zijn niet bekend. Het valt te verwachten dat de aluminiumhuls en de aluminium-uranium legering van het element na enkele jaren door zowel corrosie als vervorming onder invloed van de gesteentedruk zijn aangetast. Door het toepassen van een overpack zullen de vaten tenminste gedurende de terugneembaarheidsperiode intact blijven. Uiteindelijk zullen ze lek raken en komt de splijtstof in contact met het kleiwater.

Stralingsbelasting

De normale bedrijfssituatie

Voor de berekeningen wordt uitgegaan van standaard COGEMA-vaten als verpakking van de splijtstof, en een opberging conform het ontwerp van 5.3, d.w.z. met een extra bescherming in de vorm van een overpack of in een verbuisd gat.

Als alle vaten inclusief de bescherming lek raken, lost de splijtstof relatief snel en volledig op in het poriënwater van de klei. Vervolgens verspreiden de radionucliden zich in de kleilaag, raken in het grondwater en kunnen het oppervlaktewater en de mens bereiken. Na zeer lange tijd (miljoenen jaren) levert dit, volgens de berekeningen in de biosfeer een maximale individuele dosis van ca. $2 \cdot 10^{-13}$ Sv/j.

Drinkwaterwinning direct boven de kleilaag resulteert in een maximale individuele dosis van ca. 10^{-8} Sv/j, die na ongeveer 100.000 jaar optreedt. De belangrijkste bijdrage is afkomstig van ^{129}I . Door de relatief grote hoeveelheid I in de splijtstof van de onderzoeksreactoren is de bijdrage van I aan de stralingsdosis ca. twintig maal hoger dan bij de berging van kernsplijtingsafval.

De verwaarlozingssituatie

De gevolgen van verwaarlozing van de berging zijn in de studie [CORA 05] niet onderzocht. Als de berging vol met water loopt zullen de ondergelopen galerijen een voorkeursroute voor verspreiding van de radionucliden vormen. Hogere stralingsdoses dan de hierboven genoemde kunnen dan optreden. In vervolgonderzoek dient dit verder te worden onderzocht.

Criticiteit

Voor de terugneembare berging van de splijtstofelementen conform het ontwerp uit 5.3 wordt de splijtstof, ontdaan van de aluminiumverpakking, in COGEMA-vaten geplaatst. Bij langdurige opslag in klei is het toetreden van (zoet)water uit de kleiporiën waarschijnlijk. Hierdoor zou een criticiteitsfactor van ca. 0,95 of hoger kunnen optreden, hetgeen onacceptabel is.

Om dit uit te sluiten kan bijvoorbeeld de lege ruimte in het vat worden opgevuld met speciale materialen. Dit voorkomt watertoetreding, waardoor de criticiteitsfactor beperkt blijft tot veilige waarden tussen 0,4 en 0,79. Een andere mogelijkheid is de hoeveelheid splijtstof per vat te verminderen. Als de diameter van het vat wordt verkleind van 43 cm tot ca. 13 cm stijgt weliswaar het totaal aantal vaten van ca. 10 tot 30 à 40, maar blijft de criticiteitsfactor beneden de grens van 0,95.

5.6 Terugneembaarheid

De techniek die voor het terugnemen kan worden toegepast, komt overeen met die in zout (4.2). Onderscheid is gemaakt tussen terugnemen uit een verbuisd en een onverbuisd gat. Het voorbeeld is uitgewerkt voor vaten met kernsplijtingsafval, maar andere typen (hoogactief) afvalvaten kunnen op vergelijkbare wijze worden teruggehaald. Het gekozen ontwerp (5.3) maakt het mogelijk individuele vaten uit de berging terug te halen.

De zekerheid dat terugnemen nog adequaat kan worden uitgevoerd hangt o.a. af van de beheersbaarheid van de berging (5.4.1) en verder van factoren, zoals toezicht op de berging en informatiebeheer betreffende het opgeslagen materiaal.

Toezicht

Het langdurig openhouden van de opbergfaciliteit brengt de noodzaak van doelgerichte controle met zich mee. Het is belangrijk dat vastgesteld kan worden, dat de klei zich onder de gecombineerde invloed van warmte, straling en gesteentedruk gedraagt zoals berekend was. Momenteel is, evenals voor zout, nog onvoldoende systematisch onderzocht welke grootheden daartoe gemeten of bepaald moeten worden (4.5).

Informatiebeheer

Voor het volgens plan terugnemen van de afvalvaten is het noodzakelijk dat langdurig informatie beschikbaar is over de procedure voor terugneming, de identificatie van het vat, de exacte opbergplaats en de afvalinventaris van iedere vat. Ook over de mijnbouwkundige staat van de opbergfaciliteit, de staat van onderhoud van het mijnmaterieel en de procedure voor nazorg (transport, tijdelijke opslag, etc.) dienen gegevens te worden bijgehouden. Hiervoor moet constant een organisatorische inspanning worden geleverd.

5.7 Kosten

De kosten van een terugneembare berging in klei betreffen de aanleg van de gehele mijn, de extra voorzieningen om het afval te kunnen terugnemen, het bedrijf, het openhouden en het afsluiten. Een verkenning ervan heeft plaatsgevonden in de studie [CORA 18]; de resultaten zijn vermeld in de onderstaande tabel.

De kostenanalyse baseert zich op het ontwerp zoals dat in 5.3 is beschreven en omvat de volledige afvalinventaris (hoog-, middel- en laagactief). Een groot aantal factoren is in die kostenanalyse meegenomen ¹⁰⁾.

De kosten van onderzoek, ontwikkeling, locatiespecifiek onderzoek en monitoring worden buiten beschouwing gelaten. De hoogte van deze kosten hangt af van nationaal beleid, wetgeving en maatschappelijke factoren.

Kosten terugneembare berging in klei		(prijspeil 1994)
Ontwerp en bouw	ca. €600 - 1.100 miljoen	
Bedrijf	ca. € 50 miljoen	
Afsluiten van de mijn	ca. € 50 miljoen	
Totaal aan investeringen	ca. €700 - 1.200 miljoen	(waarvan ca. €140 - 200 miljoen voor het laag- en middelactief afval)
Totaal na optimalisatie galerijen	ca. €400 - 860 miljoen	
Open houden	ca. € 1,8 miljoen/jaar	

De totale kosten worden hoofdzakelijk bepaald door die van de ondergrondse constructies: galerijen ca. 50-60 % en schachten ca. 15-35 %.

Vergelijking van de resultaten van [CORA 18] met een studie van de NEA (Nuclear Energy Agency) ¹⁰⁾ geeft aan dat een verdere optimalisatie van de galerijlengte en

daarmee een kostenreductie tot €400-860 miljoen mogelijk is. De gevolgen van die optimalisatie voor de terugneembaarheid zijn niet bekend en dienen onderzocht te worden.

5.8 Specifieke onderwerpen

5.8.1 Radon

Ook voor een berging in klei is de rol van radon onderzocht [CORA 07]. De conclusies komen in grote lijnen overeen met die voor zout, zij het dat voor klei de natuurlijke radonconcentratie in het algemeen hoger ligt dan in zout.

5.8.2 Gevolgen van een ijstijd

De effecten van klimaatsveranderingen, zoals ijsbedekkingen, op de veiligheid van geologische berging van radioactief afval zijn uitgebreid onderzocht ^{15]}. In het verleden zijn in ons land onder ijsmassa's, door snel stromend smeltwater, diepe geulen tot 300 à 400 m uitgesleten. In het opbergontwerp voor terugneembare berging wordt daarmee rekening gehouden door een opbergdiepte van minstens 500 m aan te houden. Omdat een volgende glaciële periode waarschijnlijk niet eerder dan over enkele tienduizenden jaren zal optreden, mag ervan worden uitgegaan dat een berging dan afgesloten is. De studieresultaten zijn dan ook voornamelijk van belang voor de passief-veilige eindsituatie van een berging in klei.

Een omvangrijke ijsbedekking zal door zijn gewicht de ondergrond samendrukken en de grondwaterstroming sterk doen toenemen [CORA 19]. Het grondwater verplaatst zich voornamelijk horizontaal naar de rand van de ijsbedekking toe. De klei is waterhoudend en samendrukbaar en onder het gewicht van de ijskap wordt bovendien het poriënwater uit de klei verdreven, met als mogelijk gevolg een versnelde verspreiding van radionucliden.

5.9 Samenvatting van de onderzoeksresultaten

Gegevensbestand

1. Het beschikbare gegevensbestand over de eigenschappen van diepgelegen kleilagen in Nederland is uitermate beperkt. Eigenschappen van de klei op grotere diepten zijn dan ook grotendeels uit Belgisch onderzoek en door extrapolatie uit gegevens over ondiep gelegen klei verkregen.
2. Op basis van het zo ontwikkelde gegevensbestand en de Belgische praktijkervaring is een terugneembare berging in diepgelegen kleilagen ontworpen. Dit opbergontwerp lijkt technisch uitvoerbaar, maar vereist verdere onderbouwing gebaseerd op meer betrouwbare gegevens.

Terugneembaarheid

3. Het ontwikkelde ontwerp gaat uit van korte horizontale opberggaten in de zijwanden van een galerij. Per gat wordt één vat met hoogactief afval geplaatst. Alle vaten zijn, ofwel voorzien van een extra verpakking, of ze worden in een verbuisd gat geplaatst; dit als bescherming tegen corrosie in verband met het in de klei aanwezige vocht. Met een speciale machine kan een vat worden teruggehaald, nadat de afdichting is weggeboord.

4. Mijnbouwkundige ervaring met het langdurig bedrijven van ondergrondse uitgravingen in de klei is afkomstig uit het Belgische onderzoek in het ondergrondse laboratorium in Mol. Deze biedt goede vooruitzichten voor de ontwikkeling van een duurzaam mijnbedrijf.

Over de technische levensduur van de ondersteunende mijnconstructies (beton- of staalsegmenten), een bepalende factor voor het langdurig openhouden van de berging, zal evenwel nog meer zekerheid moeten worden verkregen.

In de periode van terugneembaarheid is een langdurige organisatorische inspanning vereist om het afval eventueel te kunnen terugnemen.

Veiligheid

5. Een verkennende analyse van de gevolgen van een mogelijk risicovol scenario, het onderlopen van de mijn door verwaarlozing resulteert in een maximale individuele stralingsdosis in de biosfeer van ca. $3 \cdot 10^{-6}$ Sv/j voor het kernsplijtingsafval na ongeveer 200.000 jaar. Deze dosis is enkele orden van grootte hoger dan voor een situatie met een volgens plan bedreven en uiteindelijk afgesloten berging.

De mogelijke gevolgen van berging van splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren zijn bepaald voor een goed bedreven en afgesloten berging. In de biosfeer kan maximaal een individuele stralingsdosis van ca. 10^{-8} Sv/j optreden, na ongeveer 100.000 jaar.

De verwaarlozings situatie is voor dit geval niet onderzocht, maar verdient in vervolgonderzoek zeker aandacht. De resultaten zijn berekend op basis van een verbeterde scenario- en modelleringsmethode. Daardoor is het mogelijk in vervolgonderzoek de huidige resultaten beter te onderbouwen met probabilistische analyses, dus rekening houdend met de kans dat mogelijk risicovolle situaties kunnen optreden.

Onzekerheid bestaat er over het verloop van processen wanneer de mijn is ingestort; verder onderzoek is gewenst.

6. Criticiteit kan worden uitgesloten door toepassing van kleine vaten met weinig splijtstof of door lege ruimten in de standaard vaten op te vullen met speciale materialen. Ook is het mogelijk de splijtstof in een stabiele vorm vast te leggen of het te smelten en te verdunnen met verarmd uranium.

De berging van de splijtstof, die een hoog percentage verrijkt uranium bevat, is onderworpen aan de volledige non-proliferatie voorschriften van de IAEA.

Kosten

7. De kosten voor de aanleg, het bedrijf en de sluiting van een terugneembare berging in klei bedragen €700-1.220 miljoen.

Door optimalisatie is een reductie tot €400-860 miljoen mogelijk. Onderhoud en inspectie van de berging vergen een jaarlijkse uitgave van ca. €1,8 miljoen.

Specifieke onderwerpen

8. Radon is een vervalproduct van radium, dat voornamelijk in een deel van het laag- en middelactief afval voorkomt. Als vaten met dit afval beschadigd raken en als de afdichting van de opberggaten onvoldoende functioneert, dan kan in een open berging een overschrijding optreden van de radon-grenswaarde. Overigens kan radon wellicht als indicator dienen voor falende afdichtingen en lekgeraakte laag- en middelactieve afvalvaten, die veel radium bevatten.

9. Een omvangrijke ijsbedekking zal door zijn gewicht de ondergrond samendrukken. Dit effect is tot grote diepte merkbaar. De horizontale grondwaterstroming naar de rand van de ijsbedekking neemt hierdoor toe. Het poriënwater in de klei zal tevens uitgedreven worden. Verspreiding uit een berging van radionucliden kan door een ijsbelasting worden versneld.

5.10 Kanttekeningen van de Commissie

De Commissie beklemtoont dat de hoeveelheid vrij beschikbare gegevens over de eigenschappen van de diepgelegen kleilagen in Nederland beperkt is. De technische haalbaarheid van het onderzochte opbergontwerp vereist dan ook voor de Nederlandse omstandigheden een verdere onderbouwing. Daarvoor zijn meer gegevens over de eigenschappen van de klei op grotere diepte nodig, o.a. uit in-situ experimenten voor wat betreft de interactie tussen de klei en de mijnconstructie. Hierbij moet het onderzoek niet noodzakelijkerwijze beperkt worden tot de Boomse klei, maar andere kleipakketten onder de Nederlandse bodem kunnen ook geschikt zijn voor verder onderzoek.

De berekende stralingsdoses zijn lager dan het gemiddelde natuurlijke stralingsniveau in Nederland van $2,4 \cdot 10^{-3}$ Sv/j. Maar ook voor de berging in klei geldt dat aan de stralingsdoses, en de gedane veronderstellingen voor het vrijzettingsproces van het afval de nodige onzekerheden kleven, die met verder onderzoek op probabilistische basis dienen te worden verkleind.

Verder constateert de Commissie dat een nauwe samenwerking tussen Belgische en Nederlandse onderzoeksinstituten grote voordelen biedt, en derhalve ook voor de toekomst aan te bevelen is.

Bij enkele specifieke punten van het onderzoek plaatst de Commissie de volgende kanttekeningen.

Vrijkomen van het afval

Het stromingsproces in ondergelopen galerijen en schachten is in de berekeningen sterk vereenvoudigd. Stroming op basis van convectie, die tot verhoogde vrijzetting van het afval kan leiden, is in de berging met uitzondering van het schachtgebied verwaarloosd. Bovendien is onzeker op welke wijze het vrijzettingsproces verloopt, nadat de ondersteuning van de mijn het heeft begeven. Een nadere analyse van het volledige transportproces en het fail-safe gedrag van klei is noodzakelijk.

Andere situaties met een mogelijk risico

Het langdurig openhouden van een berging maakt naast verwaarlozing ook het optreden van andere situaties met eventuele ernstige gevolgen mogelijk, bijvoorbeeld gasontwikkeling in de berging of toekomstig menselijk indringen. Een kwantitatief-technische analyse van de gevolgen is complex, maar verdient niettemin de volle aandacht.

Toezicht

Terugneembaarheid van het afval brengt de noodzaak van een langdurig toezicht op de berging met zich mee. Dit vereist het opstellen van een monitoringsplan waarin alle te controleren technische en procedurele factoren zijn opgenomen, alsmede de eventueel te treffen maatregelen.

Splijstofelementen van de onderzoeksreactoren

De gevolgen van de verwaarlozing van een berging met splijstofelementen van de onderzoeksreactoren zijn niet onderzocht. Voor vervolgonderzoek wordt aanbevolen dit alsnog uit te voeren.

Kosten

Met het oog op een mogelijk terugnemen van het afval kan een reserve opslag bovengronds nodig zijn. De kosten daarvoor komen dan nog bovenop die van de terugneembare bergingsfaciliteit in klei.

6. Alternatieve mogelijkheden voor risicovermindering

Scheiding, gecombineerd met omzetting en immobilisering van radionucliden uit het hoogactieve afval biedt voor Nederland weinig perspectieven, omdat dit afval bij het opwerkingsproces in duurzaam glas gesmolten wordt en zodoende moeilijk toegankelijk is voor deze processen.

6.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een beknopt overzicht van de mogelijkheid voor chemische en nucleaire bewerking van het radioactieve afval, en de gevolgen die deze bewerkingen kunnen hebben voor de berging van het afval.

Gebruikte splijtstof uit kernreactoren (vermogens- en onderzoeksreactoren) bevat twee groepen radionucliden: actiniden (o.a. U, Pu, Am, Cm, Np) en splijttingsproducten (o.a. Cs, I, Sn, Sr, Tc, Zr). Sommige isotopen van plutonium bepalen voor ca. 1 miljoen jaar in hoge mate de radiotoxiciteit van de gebruikte splijtstof, terwijl de americium-isotopen voor ongeveer 10 % bijdragen in de eerste 100.000 jaar van opberging. Na ongeveer 300 jaar is de bijdrage van de meeste splijttingsproducten te verwaarlozen. Een uitzondering vormen de radionucliden ^{129}I , ^{135}Cs en ^{99}Tc .

Deze blijven een potentieel risico vormen door hun zeer lange halveringstijden van 100.000 - 10 miljoen jaar, en hun mobiliteit waardoor ze relatief snel de biosfeer kunnen bereiken.

Internationaal concentreert de verwerking van het radioactieve afval, waaronder gebruikte splijtstof, zich vooral op drie onderwerpen.

- Het verminderen van de plutoniumvoorraden (incl. de nucleaire wapenvoorraden). Dit gebeurt in de praktijk door de plutonium te mengen met uranium tot MOX-brandstof (Mixed Oxide) voor kerncentrales. De huidige mate van bijmenging betekent slechts een vermindering van de groei van de plutoniumvoorraden. Voor een daadwerkelijke vermindering van de plutoniumvoorraden zijn in de toekomst andere dan de huidige reactortypen nodig.
- Het verkorten van de levensduur van het afval. Dit richt zich in eerste instantie op het afscheiden van de hoog-toxische, langlevende en mobiele radionucliden uit de afvalstroom. Daarna volgt het omzetten of splijten van zeer langlevende nucliden (zoals de actiniden Pu, Am, U, Np) in nucliden met een veel kortere halveringstijd.
- Het vastleggen van radionucliden. Tenslotte wordt het vastleggen of immobiliseren van radionucliden onderzocht, zoals Cs, Tc en I, die moeilijk zijn om te zetten. Voor het vastleggen wordt gezocht naar materialen die eigenschappen bezitten om onder bergingscondities die nucliden lange tijd vast te houden. Vooral gaat het om nucliden waarvoor de ondergrond weinig bindend vermogen heeft.

Aan deze onderwerpen is onderzoek uitgevoerd binnen het programma voor Recyclage van Actiniden en Splijttingsproducten ^{16]}. Een enkel onderdeel met betrekking tot de immobilisatie werd bestudeerd in [CORA 06]. De ontwikkelingen op dit punt zijn in de volgende paragraaf weergegeven, en kunnen van invloed zijn op het toekomstige aanbod van radioactief afval dat voor berging in aanmerking kan komen.

6.2 Scheiden en omzetten

Het scheiden van de hoog-toxische radionucliden is een chemisch proces. De eerste fase (het PUREX-proces) omvat de afscheiding van uranium en plutonium na oplossing van de gebruikte splijtstof in salpeterzuur. In de huidige opwerking bedraagt de effectiviteit van dit proces 99,88%. Vervolgens dienen de andere actiniden, neptunium, americium en curium afzonderlijk te worden gescheiden van de splijtingsproducten, gevolgd door de scheiding van langlevende splijtingsproducten jodium, technetium en cesium. Deze stappen zijn nog in de laboratoriumfase van ontwikkeling.

Omzetting, ook wel nucleair verbranden of transmteren genoemd, is een nucleair proces waarbij kernen, zoals de actiniden (U, Pu, Np, Am, Cm) worden verspleten door ze met neutronen te beschieten. Na splijting ontstaan dan lichtere kernen met kortere halveringstijden. Voor plutonium gebeurt dit al in bestaande kerncentrales door inzet van MOX-brandstof. Een nieuw nog in ontwikkeling zijnd proces is de omzetting met neutronen, die met behulp van een versneller worden geproduceerd.

Het onderzoek naar afscheiding en omzetting is in Japan (OMEGA-project) en Frankrijk (SPIN-programma) in 1980 gestart. Later heeft binnen een internationaal kader Nederland zich daarbij gevoegd met het RAS-onderzoek¹⁶¹. Daaruit blijkt dat met die technieken in verschillende typen kerncentrales het afvalprobleem weliswaar kan worden verkleind, maar niet kan worden opgelost.

Ook in OESO/NEA-verband (Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling / Nuclear Energy Agency) is over dit onderwerp een studie uitgevoerd¹⁷¹.

Tevens werd in deze studie nagegaan in hoeverre een geheel nieuw type kernreactor (ADS, Accelerator Driven System) kan bijdragen aan een oplossing voor het afval. Het Department of Energy van de Verenigde Staten onderzocht in 1999 de mogelijkheden om ADS als een soort verbrander van nucleair afval toe te passen. Uit de studie blijkt dat dit concept technisch waarschijnlijk haalbaar is, alhoewel enkele technologieën zich nog niet in de praktijk hebben bewezen¹⁸¹.

Uit voornoemde studies kunnen de volgende specifieke conclusies worden getrokken.

Actiniden U, Pu, Np, Am, Cm

- Afscheidingstechnieken voor Pu en U zijn beschikbaar, efficiency 99,88 %.
- Afscheidingstechnieken voor Np, Am, en Cm zijn in ontwikkeling; voor Am en Cm is de techniek gecompliceerd, vanwege de aanwezigheid van lanthaniden in de splijtstof. Deze elementen zijn zeer moeilijk te scheiden van het Am en Cm en belemmeren, door het invangen van neutronen, sterk het omzettingsprocédé. Meer laboratoriumonderzoek is nodig voordat industriële toepassing mogelijk is.
- Voor een efficiënte omzetting van de actiniden naar kortlevende nucliden zal de ontwikkeling van speciale, versneller gedreven reactoren nodig zijn.

Splijtingsproducten, Tc, I, Cs.

- Afscheidingstechnieken zijn gedeeltelijk op laboratoriumschaal beschikbaar; industriële toepassing lijkt mogelijk.
- Omzetting met versnellers lijkt niet haalbaar vanwege o.a. de lange bestralings-tijden, het vinden van geschikte trefplaat-materialen en de grote hoeveelheden Tc en I; de omzetting van Cs vormt een nog niet opgelost probleem. Het duurzaam vastleggen van deze splijtingsproducten lijkt een betere oplossing.

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat er, volgens de huidige inzichten, ook na scheiding en omzetting een hoeveelheid onverwerkbaar radioactief afval zal overblijven, die voor berging in aanmerking kan komen.

6.3 Scheiden en immobiliseren

Enkele splijtingsproducten, Cs, Tc en I, zijn moeilijk om te zetten in kortlevende elementen. Bovendien zijn deze nucliden geochemisch mobiel, d.w.z. in de ondergrond en de biosfeer worden ze relatief snel getransporteerd. Het vastleggen in zeer stabiele, bestendige materialen voor eindberging is een mogelijkheid om het risico van verspreiding sterk te verminderen.

Voor het kernsplijtingsafval, dat uit een mengsel van splijtingsproducten en actiniden bestaat, wordt deze methode al toegepast door het afval in duurzaam boorsilicaatglas te gieten. In de studie [CORA 06] is onderzocht of voor ^{129}I en ^{137}Cs materialen zijn te ontwikkelen, die in het bijzonder deze radionucliden zeer lange tijd vasthouden (selectieve immobilisatie).

Voor jodium is voor vastlegging in bismuthoxi-jodides (BiOI en $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$) gebleken dat deze mineralen in pekelsnel oplossen, en dus niet geschikt zijn voor toepassing onder zoutcondities. In klei of graniet zijn deze mineralen waarschijnlijk wel stabiel.

Kristallijn natriumsiliciumtitanat (CST) lijkt zeer geschikt om ^{135}Cs te binden voor opslag in klei of graniet. De stabiliteit van CST is door thermische behandeling nog verder te verbeteren, zodat ook in zout CST stabiel wordt. Dit CST bezit voor ^{135}Cs een beter bindingsvermogen dan boorsilicaatglas.

Het verdient volgens de studie aanbeveling ook de mogelijkheden voor selectieve immobilisatie van andere moeilijk om te zetten nucliden te onderzoeken, bijv. ^{79}Se , ^{99}Tc en ^{237}Np .

6.4 Kanttekeningen van de Commissie

De scheidingsprocessen en de processen voor omzetting en immobilisatie van actiniden en splijtingsproducten bevinden zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling. Alhoewel deze processen op de lange termijn wellicht mogelijkheden bieden voor vermindering van de risico's die aan het afval verbonden zijn, ontbreekt het momenteel aan duidelijkheid over de haalbaarheid.

Bovendien wordt het huidige kernsplijtingsafval bij de opwerking van gebruikte splijtstof ingesmolten in duurzaam glas, waardoor toepassing van voornoemde scheidings- en omzettingsprocessen nauwelijks meer mogelijk is. Berging van dit afval is dan ook onvermijdelijk.

7. Vergelijking en combinatie van de opties

Langdurige bovengrondse opslag biedt van de onderzochte opties de beste mogelijkheden voor een eenvoudig terugnemen van het afval, maar de lange termijn veiligheid is het meest gediend met ondergrondse terugneembare berging.

7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van de opties, vergelijkt deze en behandelt enkele combinaties van opties. Vergelijking van de opties vindt plaats aan de hand van de criteria aangegeven in tabel 7.1. Maatschappelijke aspecten blijven hier buiten beschouwing. Het onderzoek daarvan heeft resultaten van meer algemene aard opgeleverd die in hoofdstuk 8 worden behandeld.

De vergelijking is gebaseerd op de huidige stand van het onderzoek. Dit houdt in dat bepaalde aspecten nog niet voor alle opties zijn bestudeerd. De eigenschappen van de bovengrondse opslag hebben betrekking op de COVRA-locatie te Borsele. De gegevens voor de ondergrondse opties zijn niet locatie-specifiek. De verschillen tussen de drie opties worden in 7.2 nader toegelicht. In 7.3 wordt aangegeven, hoe bovengrondse en ondergrondse berging gefaseerd zouden kunnen worden. Enkele conclusies volgen in 7.4.

Methoden, zoals scheiding, omzetting en immobilisatie van actiniden en splijttingsproducten verkeren nog in een te vroeg stadium van ontwikkeling om ze als alternatief in de vergelijking van opties mee te nemen.

7.2 Vergelijking van de opties

7.2.1 Betrouwbaarheid van de gegevens

Voor een bovengrondse berging zijn de condities goed gedefinieerd. Alleen de klimaatinvloeden zijn voor perioden van honderden jaren zeer onzeker. Gegevens over de eigenschappen van diepgelegen klei in Nederland zijn beperkt beschikbaar, zodat aan de resultaten voor berging in klei grotere onzekerheden zijn verbonden dan aan die voor zout. Maar ook voor zout bestaat onzekerheid over bepaalde gegevens. Zowel voor zout als voor klei zijn deze onzekerheden slechts te verkleinen door in situ onderzoek.

7.2.2 Afscherming van de biosfeer

Barrièrewerking gebouwen, resp. gastgesteente

De bovengrondse opslag maakt gebruik van duurzame, robuuste opslaggebouwen die bestand zijn tegen externe invloeden, zoals overstromingen, neerstortende vliegtuigen, enz. Zolang de samenleving in staat is tot uitvoering van goed onderhoud, gegevensbeheer en tijdige vervanging of verplaatsing is het in principe mogelijk deze opslag permanent in stand te houden.

Berging in zout en klei levert een extra geologische barrière, en daarmee een versterking van het multi-barrière systeem. Bovendien vertonen zowel klei als zout de eigenschap van convergentie, die zorgt voor een “fail-safe” gedrag van de berging waardoor uiteindelijk een passief-veilige situatie kan worden bereikt. Voor klei vergt dit gedrag

overigens nog verder onderzoek en zal convergentie, althans in het begin, worden belemmerd doordat de galerijen moeten worden ondersteund, hetgeen voor zout niet nodig is. Wel zal gedurende de terughaalbaarheidsperiode een zoutmijn het nodige onderhoud vergen om het effect van de convergentie te compenseren. De ondersteuning in een mijn in klei vraagt eveneens om onderhoud; onzeker is in welke mate.

De barrièrewerking van klei wordt bevorderd door retentie: de radionucliden worden, mochten ze vrijkomen, in meer of mindere mate gebonden door de klei.

De afwezigheid van een natuurlijke barrière bij langdurige bovengrondse opslag, waardoor een belangrijke fail-safe eigenschap ontbreekt, betekent dat deze optie niet kan worden gezien als een definitieve oplossing voor het radioactief afval.

Neveneffecten

Steenzout is een goede warmtegeleider. Zout is, in tegenstelling tot klei, zeer droog, zodat water als transportmedium vrijwel ontbreekt. Daarmee wordt ook de kans op de vorming van waterstofgas door corrosie van het stalen vat verlaagd. Voor zover water aanwezig is, lost zout daar echter goed in op. Dit zoute water is dan sterker corrosief dan het water dat in klei voorkomt.

De criticiteitsfactor voor splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren kan bij berging in klei worden verhoogd als aanwezig zoet water de splijtstof bereikt. Een afdoende aanpassing van het concept is echter mogelijk. Ook bij bovengrondse opslag is met dit aspect rekening gehouden in het ontwerp. Bij zout is geen aanpassing nodig. De criticiteitsfactor wordt nog eens extra verlaagd als zout water in contact met de splijtstof zou komen.

Verspreiding van het afval

Bij overstroming van een langdurige bovengrondse berging kan het afval, mocht het vrijkomen, zich relatief snel via het oppervlaktewater verspreiden in de leefomgeving van de mens. Voor de ondergrondse opties verloopt verspreiding veel langzamer via het gastgesteente en vervolgens via het grond- en drinkwater.

Stralingsbelasting

Voor de bovengrondse opslag is de stralingsbelasting als gevolg van het eventueel vrijkomen van hoogactief afval bij overstroming niet onderzocht. Het opslaggebouw voor het hoogactieve afval is zodanig ontworpen dat water niet kan binnendringen en dat zonodig vroegtijdig maatregelen zijn te treffen. Voor de opslag van het laag- en middelactief afval kan het binnendringen van water niet worden uitgesloten. De resulterende maximale, individuele stralingsdosis als gevolg daarvan is laag in verhouding tot de in de studie [CORA 02] gehanteerde grenswaarde van $4 \cdot 10^{-7}$ Sv/j en aanzienlijk lager dan het gemiddelde natuurlijke stralingsniveau in Nederland van $2,4 \cdot 10^{-3}$ Sv/j. De gevolgen van verwaarlozing van de bovengrondse opslag zijn in dit onderzoek niet bestudeerd en verdienen verdere studie.

Ook voor het geval van verwaarlozing van een ondergrondse berging met kernsplijtingsafval in zout, met als gevolg dat deze volloopt met water, is een lage stralingsdosis berekend, eveneens veel lager dan het gemiddelde natuurlijke stralingsniveau. De hogere dosis, maar nog steeds lager dan het natuurlijke niveau, voor de overeenkomstige berging in klei is vooral het gevolg van het pessimistische uitgangspunt dat al het afval volledig oplost, en leidt tot directe besmetting ten gevolge van drinkwaterwinning direct boven de berging.

Bestaat het afval uit splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren, dan is voor de berging in zout de maximale individuele dosis hoger dan voor het kernsplijtingsafval vanwege het hoge percentage verrijkt uranium in de splijtstof en de veronderstelling dat al het splijtstofmateriaal zeer snel in de pekkel oplost. Voor klei is dit geval niet onderzocht.

De berekende stralingsdoses vormen slechts een indicatie voor de veiligheid van de berging. Weliswaar zijn ze gebaseerd op pessimistische veronderstellingen, maar de onzekerheid erin is groot.

Tabel 7.1 Vergelijking van de opties voor terugneembare berging

<i>aspect</i>	<i>bovengronds (300 jaar)</i>	<i>ondergronds in zout</i>	<i>ondergronds in klei</i>
betrouwbaarheid			
<i>m.b.t. gegevens</i>	goed gedefinieerd muv klimaatgegevens	minder zeker dan voor bovengronds	minder zeker dan voor zout
afscherming van biosfeer			
barrièrewerking			
<i>natuurlijke barrière</i>	niet aanwezig	goed; geologische barrière met convergentie	goed; geologische barrière met retentie en convergentie
<i>kunstmatige barrière</i>	robuuste gebouwen	afdichting opberggaten galerijen, schachten	afdichting opberggaten galerijen, schachten
<i>fail-safe</i>	geen	goed	aanwezig, maar minder goed bekend dan voor zout
neveneffecten			
<i>warmteafvoer</i>	goed	goed	matig
<i>transport door water</i>	geen	gering	gering, groter dan voor zout
<i>kans op radiolyse</i>	geen	gering	gering, groter dan voor zout
<i>corrosie</i>	beperkt	ja	ja, minder dan in zout
<i>criticiteit splijtstofelementen onderzoeksreactoren</i>	geen probleem	geen probleem	geen probleem, mits kleine vaten
vrijkomen afval bij overstroming/onderlopen			
<i>verspreiding</i>	snel	langzaam	langzaam
<i>max. stralingsbelasting, Sv/j</i>	ca. 10 ⁻¹³ voor LAVA/MAVA	ca. 10 ⁻¹² voor KSA ca. 10 ⁻⁹ voor SOR	ca. 10 ⁻⁶ voor KSA (via drinkwaterwinning)
menselijk ingrijpen			
<i>risico</i>	hoog	enig risico bij delfstofwinning	enig risico bij drinkwaterwinning
beheersbaarheid			
<i>mijn/bouwkundig</i>	goed	goed	goed, ondersteuning galerijen nodig
terugneembaarheid			
<i>bij normaal bedrijf</i>	snel, eenvoudig	uitvoerbaar minder eenvoudig	uitvoerbaar, minder eenvoudig
<i>bij overstroming/onderlopen</i>	zeer moeilijk	vrijwel onmogelijk	vrijwel onmogelijk
globale kosten hoogactief afval *			
<i>aanleg t/m afsluiting</i>	ca. €90 miljoen voor verlenging met 200 j.	ca. €280 miljoen	ca. €400 - 860 miljoen
<i>openhouden**</i>	= ondergrondse berging	ca. €1,8 miljoen	ca. €1,8 miljoen

LAVA/MAVA: laag- en middeldactief afval, KSA: kernsplijtingsafval, SOR: splijtstof onderzoeksreactoren

* De kosten van een volledig opbergingstraject zullen naar verwachting worden bepaald door de kosten van een gefaseerde combinatie van bovengrondse opslag en ondergrondse berging.

** Kosten voor het openhouden van de faciliteit om het afval na bedrijf te kunnen terugnemen.

Menselijk ingrijpen

Zout is aantrekkelijk als delfstof en zodoende kan latere winning een risico opleveren van rechtstreeks contact met de opbergfaciliteit, als de kennis daarover verloren is gegaan. Dit geldt momenteel niet voor klei, al kan drinkwaterwinning boven de faciliteit ook een groter risico voor besmetting inhouden.

De kans op sabotage in een berging lijkt voor een bovengrondse opslag aanzienlijk groter dan voor een ondergrondse.

7.2.3 Beheersbaarheid (bouwkundig/mijnbouwkundig)

Zowel een bovengrondse opslag als een ondergrondse berging in zout en klei zijn uitstekend beheersbaar bij regelmatig onderhoud en "up to date" informatiebeheer. Dat lijkt zeker voor enkele honderden jaren mogelijk. De situatie is voor klei minder duidelijk dan voor zout.

7.2.4 Terugneembaarheid

Bij normaal bedrijf is het terugnemen van individuele containers het eenvoudigst voor bovengrondse berging. In een ondergrondse berging vereist dit speciaal boorgereedschap. Bovendien kan bij ondergrondse berging een bovengrondse opslag gewenst zijn om het afval uit de ondergrondse opslag eventueel te kunnen terugnemen.

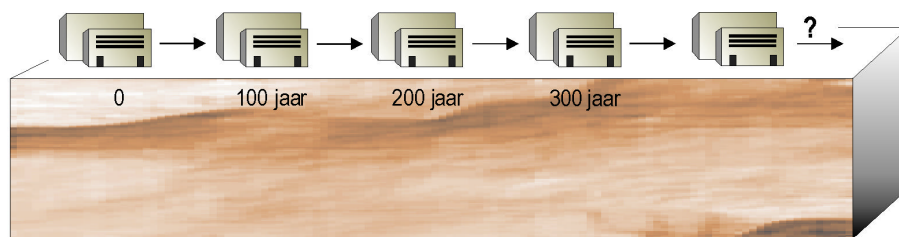
Verwaarlozing van langdurige bovengrondse opslag is niet onderzocht, maar het ligt voor de hand dat bij lekkage van containers in combinatie met een overstroming terugneming uitermate gecompliceerd wordt. Het terugnemen van afvalvaten uit een ondergelopen, verwaarloosde ondergrondse berging lijkt vrijwel onuitvoerbaar.

7.3 Fasering van bovengrondse opslag en ondergrondse berging

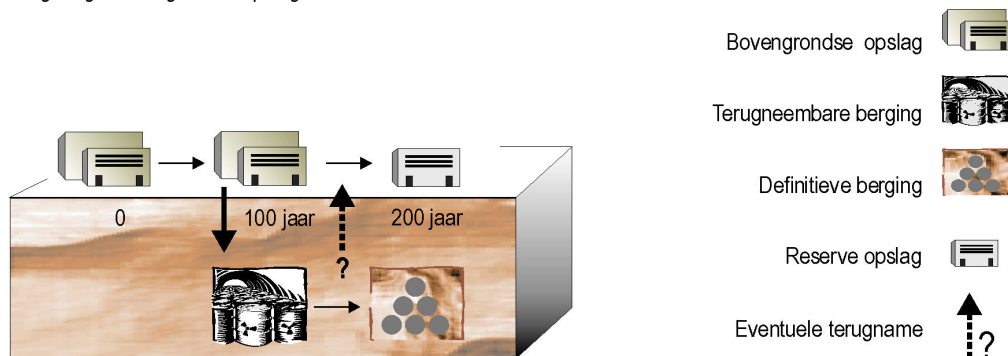
In het voorgaande ging het om de vergelijking van de afzonderlijke opbergmethoden. Bij bewezen geschiktheid en acceptatie van ondergrondse berging zal er waarschijnlijk sprake zijn van een kortere of langere periode van bovengrondse opslag, gevolgd door terugneembare ondergrondse berging. In het laatste geval kan bovendien de periode van terugneembaarheid een verschillende tijdsduur hebben. Gedurende of aan het eind van de terugneembaarheidsperiode kan dan beslist worden of het afval geheel of gedeeltelijk moet worden teruggehaald dan wel definitief opgeborgen.

Om de gedachten te bepalen is een aantal mogelijke opbergtrajecten schematisch weergegeven in figuur 7.1. Deze figuur illustreert nog eens dat het principe van terugneembaarheid aan toekomstige generaties een grote mate van keuzevrijheid laat.

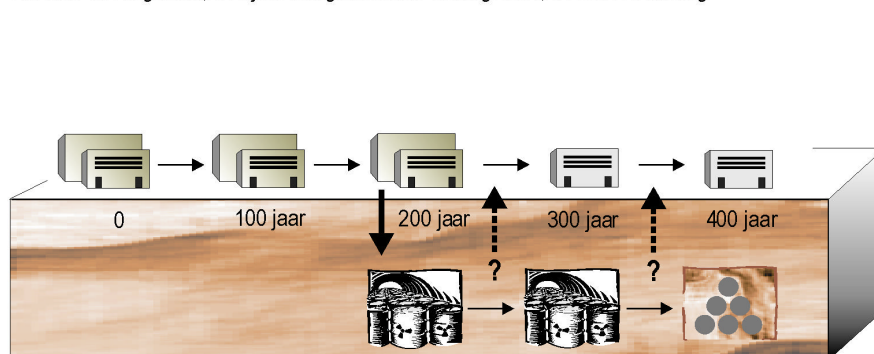
In ieder geval zal een periode van bovengrondse opslag (50 à 100 jaar) lang genoeg moeten zijn, om door middel van voortgaand onderzoek, incl. in-situ testen, de eventuele aanleg en inrichting van een ondergrondse berging, met alle daaraan verbonden aspecten, zoals transport, controle en onderhoud, te kunnen voorbereiden. Aan het eind van deze periode kan een keuze gemaakt worden tussen blijvende opslag bovengronds of ondergrondse berging in zout of klei voor het deel van het afval dat daarvoor in aanmerking komt. Om desgewenst het afval uit een ondergrondse berging geheel of gedeeltelijk te kunnen terugnemen kan het nodig zijn een reserve-opslag bovengronds beschikbaar te hebben.



Opbergtraject A
Langdurige bovengrondse opslag



Opbergtraject B
100 Jaar bovengronds, 100 jaar terugneembaar ondergronds, definitieve sluiting



Opbergtraject C
200 Jaar bovengronds, 200 jaar terugneembaar ondergronds, definitieve sluiting

Figuur 7.1 Schematische voorstelling van enkele opbergtrajecten

In traject A blijft het afval zeer langdurig bovengronds, bijvoorbeeld omdat de maatschappelijke acceptatie voor ondergrondse berging blijft ontbreken.

Traject B illustreert een bovengrondse opslag voor 100 jaar, gevolgd door een ondergrondse terugneembare berging in zout of klei, die na 100 jaar wordt omgezet in een definitieve, als tenminste niet tussentijds wordt besloten het afval weer terug te nemen, bijvoorbeeld voor omzetting tot minder gevaarlijk materiaal of voor hergebruik.

Het is ook mogelijk dat na 100 jaar besloten wordt de bovengrondse opslagperiode te verlengen met nog eens 100 jaar maar dan wellicht op een andere locatie in combinatie met een ondergrondse terugneembare berging.

In traject C is dit weergegeven, waarbij ook de duur van de ondergrondse terugneembare periode is verlengd met nog eens 100 jaar om bijvoorbeeld meer zekerheid te kunnen krijgen over de veiligheid van een eventuele definitieve afsluiting.

De hiervoor geschetste trajecten illustreren dat wat betreft de kosten van terugneembare berging gedacht moet worden aan kosten van gefaseerde combinaties van bovengrondse opslag en ondergrondse berging.

7.4 Conclusies

- De hiervoor samengevatte resultaten geven geen aanleiding om één van de drie onderzochte opties uit te sluiten voor langdurige terugneembare berging.
- Zoals te verwachten was, wint de bovengrondse berging het wat betreft de betrouwbaarheid van de gegevens, de eenvoud van de terughaaloperatie en de kosten.
- Berging in zout heeft een natuurlijke goede barrièrewerking. Berging in klei vergt op dit punt nog nader onderzoek, maar het laat zich aanzien dat ook hier een goede isolatie haalbaar is. De langdurige bovengrondse opslag heeft geen natuurlijk multi-barrière systeem en mist fail-safe eigenschappen.
- De kosten van ondergrondse berging in klei vallen waarschijnlijk hoger uit dan die voor zout vanwege de noodzaak de galerijen te ondersteunen.
- Boven- en ondergrondse berging kunnen, in combinatie met een eventueel terugnemen van het afval, op verschillende wijze flexibel gefaseerd worden. Een reserve opslag bovengronds op de locatie van de ondergrondse berging kan nodig zijn om desgewenst het afval uit de ondergrond terug te nemen.

8. Maatschappelijke Aspecten

Openheid betreffende aanpak en resultaten van het onderzoek is een voorwaarde voor een maatschappelijke dialoog over de berging van radioactief afval. De vrees voor hernieuwde inzet van kernenergie vormt echter een belemmering voor een open aanpak.

8.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van maatschappelijke processen betreffende berging van radioactief afval in het buitenland en behandelt de resultaten van onderzoek naar de maatschappelijke aspecten van terugneembare berging.

De opdracht aan CORA, ofschoon technisch van aard, heeft uiteraard een ethisch-maatschappelijk uitgangspunt, namelijk de eis tot optimale bescherming van de mens en zijn omgeving nu en in de verre toekomst tegen blootstelling aan de effecten van radioactief afval. Ethisch-maatschappelijke overwegingen spelen dus een belangrijke rol bij de keuze van een optimale opbergoptie.

De afzonderlijke bestudering van dit verband behoorde niet specifiek tot de taak van de Commissie. Bovendien is dat pas mogelijk, als de relevante opties technisch min of meer in kaart gebracht zijn. Een oriëntatie op dit terrein leek evenwel wenselijk. Met dit doel zijn twee studies uitgevoerd: [CORA 21 en 20]. De eerstgenoemde betreft de besluitvormingsprocessen in het buitenland, de tweede behandelt algemene maatschappelijke en ethische aspecten van terughaalbare opslag van radioactief afval. De resultaten van deze studies, gebaseerd op interviews en literatuurstudies, worden hieronder besproken in 8.2 en 8.3. In 8.4 worden enkele opinies uit andere bronnen geciteerd. De kanttekeningen van de Commissie, aanbevelingen betreffende de maatschappelijke dialoog en conclusies zijn opgenomen in 8.5.

8.2 Ervaringen met het besluitvormingsproces in het buitenland

In het onderstaande worden de resultaten van de studie [CORA 21] samengevat.

België

Er is een omvangrijk ondergronds laboratorium in Mol. De discussie over een integraal beleid voor het radioactief afval is tot op heden niet gevoerd. Het plan bestaat om op lokale schaal "partnerships" op te zetten, waarin lokale overheden, organisaties, nucleaire bedrijven en de Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Splijtstoffen (NIRAS/ONDRAF) samenwerken.

Terugneembaarheid vormt geen onderdeel van het Belgische opbergconcept. Wel wordt door NIRAS/ONDRAF een nieuw plan ontwikkeld voor bovengrondse berging van laag- en middelradioactief afval.

Canada

In 1988 werd een onafhankelijk panel benoemd om een door de Atomic Energy of Canada Ltd (AECL) ontwikkeld concept voor diepe berging te beoordelen. De wenselijkheid van kernenergie als zodanig viel buiten het mandaat van het panel. Dit was voor sommige groepen (o.a. enkele provincies en Greenpeace) reden om niet aan de discussies deel te nemen. Na consultaties in verschillende provincies en op verschillende niveaus concludeerde het panel in 1998 dat het door de AECL ontworpen con-

cept technisch gezien als veilig kon worden beschouwd, maar dat niet was aangetoond dat dit breed gesteund werd door de bevolking, en dus moest worden afgewezen. Het panel beval vervolgens een nieuwe ronde van consultaties aan, alsmede coördinatie van alle activiteiten betreffende radioactief afval door een instituut waarvan de directie zou moeten bestaan uit vertegenwoordigers van belangengroeperingen, onafhankelijk van de industrie. De regering heeft inmiddels een aantal van de aanbevelingen overgenomen, maar blijft de verantwoordelijkheid voor het beheer van het afval leggen bij de producenten, zij het onder overheidstoezicht.

Duitsland

Vanaf 1973 is een onderzoek gestart om tot de keuze van een zoutpijler (of zoutkoepe) te komen die wellicht geschikt is voor definitieve berging van het radioactieve afval. In 1977 viel de keuze op Gorleben. Hiertegen ontstond sterke weerstand. Het onderzoek aldaar is onlangs gestopt. Gesprekken tussen de regering en de electriciteitssector hebben plaatsgehad over zowel het beëindigen van kernenergie als de berging van het afval. Inmiddels is men het eens geworden over de sluitingstermijn van de kerncentrales.

De regering heeft verder een commissie van deskundigen opdracht gegeven, criteria te ontwikkelen voor de keuze van een geschikte opberglocatie. De bedoeling is daarover een openbaar debat te organiseren voor het bereiken van een zo breed mogelijke consensus.

Frankrijk

Protesten tegen diepe ondergrondse berging dwongen de overheid om boringen te stoppen. Men zocht vervolgens locaties voor ondergrondse laboratoria via een dialoog met de bevolking, met garanties voor terugneembaarheid en een passende compensatie. Uiteindelijk bleef er een geschikte locatie over (Bure) waar men bereid was, zo'n faciliteit te accepteren, zij het niet zonder verzet.

In de periode 2002-2006 zullen een tiental mogelijke opbergconcepten onderzocht worden. Het niet-warmte producerend plutoniumhoudend afval zal gescheiden worden van het hoogactieve afval en geplaatst in een diepgelegen opberging. Terugneembaarheid voor ongeveer 300 jaar dient verzekerd te zijn. Het overige hoogactieve afval zal, eveneens terugneembaar, op geringere diepte worden opgeslagen en voorzien van continue monitoring. Het is inmiddels vrijwel onmogelijk om de wettelijke datum van 2006 voor de aanleg van twee ondergrondse laboratoria nog te halen, mede gezien de nog vereiste veiligheidsstudies.

Spanje

Hier is de keuze van een opberglocatie uitgesteld en wel tot 2010, vanwege oppositie van de bevolking. Een rapport, opgesteld door een speciale commissie, met aanbevelingen ter voorkoming van oppositie werd door de Senaat verworpen vanwege de politieke gevoeligheid van het onderwerp.

Verenigd Koninkrijk

Vanaf 1970 zijn studies voor diepe berging verricht.

Een commissie uit het Hogerhuis heeft de problemen rondom de opslag bestudeerd en geconcludeerd, dat binnen 50 jaar één of meer ondergrondse opslagplaatsen nodig zijn. De commissie signaleert als fundamentele problemen: wetenschappelijke onzekerheid en potentieel risico van radioactief afval gedurende lange tijd. Zij beveelt de instelling aan van aparte commissies voor het sturen van het nationale beleid en voor locatiekeuze en constructie. Andere aanbevelingen betreffen duidelijke informatie, vroegtijdige inspraak, vrijwilligheid en compensatie.

Een panel bestaande uit willekeurig uitgekozen burgers kwam, na literatuurstudie en deskundige voorlichting tot de volgende (overigens niet unanieme) aanbevelingen. Radioactief afval moet ondiep ondergronds, op controleerbare en terughaalbare wijze worden opgeslagen. Een neutrale instelling moet verantwoordelijk worden voor het beheer van het afval en de keuze van een locatie. Onderzoek en internationale samen-

werking moeten geïntensiveerd worden. Besluitvorming moet open en transparant zijn, ten einde vertrouwen bij het publiek te wekken. Uitbreiding van kernenergieproductie is alleen aanvaardbaar als er een oplossing voor het afvalprobleem is gevonden.

Zweden

Beleid is, de 11 kernreactoren geleidelijk te sluiten, echter zonder een vaste einddatum. Laag- en middelactief afval is opgeslagen in graniet, onder de bodem van de Oostzee. Hoog radioactief afval is voorlopig ondiep ondergronds opgeslagen in Oskarshamn. Deze gemeente heeft zich ook, met enkele andere gemeenten, bereid verklaard, definitieve opslag te accepteren, afhankelijk van de uitslag van haalbaarheidsstudies. In twee gemeenten heeft men zich via referenda tegen de opbergplannen uitgesproken. Daarmee blijven er 6 à 7 over waar, afhankelijk van de uitslag van referenda, mogelijk proefboringen zullen worden uitgevoerd.

Men gaat uit van een concept met beperkte terughaalbaarheid, d.w.z. gedurende een 5-jarige demonstratieperiode. In 1996 is een nationaal coördinator benoemd met als taak om de informatie uitwisseling tussen gemeenten en de overheden te regelen. Hij heeft in dit verband een forum ingesteld ten behoeve van een Milieu-effectrapportage. In dit forum is de milieubeweging niet vertegenwoordigd.

Zwitserland

Na 100 locaties de revue te hebben laten passeren, heeft men in 1993 uiteindelijk gekozen voor Wellenberg. Het bergingsplan werd evenwel verworpen bij referendum. Achteraf bleek, dat de stemming positief had kunnen uitvallen, als het plan zou hebben voorzien in terugneembaarheid en controleerbaarheid. Waarschijnlijk zal het in die zin herzien en opnieuw aan een referendum onderworpen worden.

8.3 Ethische en maatschappelijke aspecten

In verband met het niet-technische karakter van dit onderwerp werd besloten externe deskundigheid in te schakelen voor de begeleiding van het onderzoek (Appendix 2).

De auteurs concluderen in de studie [CORA 20] dat terughaalbare opslag beter is dan definitieve opslag, omdat dit de mogelijkheid van controle open laat en dat het afval bovengronds moet worden opgeslagen. Huns inziens kan langdurige terughaalbaarheid bij ondergrondse opslag niet gegarandeerd worden.

Verder blijkt dat een vruchtbare dialoog openheid vergt van de kant van de deskundigen en beleidsmakers, ook t.a.v. onzekerheden. Voorts is nodig een goede definitie van de hoeveelheid afval, toegankelijke en voor leken begrijpelijke informatie, met aandacht voor de maatschappelijke aspecten en vroegtijdige participatie van alle betrokkenen in de besluitvorming. Nodig zijn duidelijke uitgangspunten, echter zonder vooropgestelde conclusies.

Ook verdient het aanbeveling de discussie te doen begeleiden door een instelling die onafhankelijk is van overheid en industrie, en zonodig de tegenpartij door financiële ondersteuning in staat te stellen om standpunten door deskundigen te doen onderbouwen. Keuze van een opslaglocatie mag alleen op basis van vrijwilligheid.

Potentiële struikelblokken hierbij zijn de vrees, dat een oplossing van het afvalprobleem zal leiden tot hernieuwde kernenergieproductie, het feit dat men niet vertrouwd is met dit soort (oncontroleerbare) risico's en dat men het afval ziet als een vermijdbaar risico waaraan men onvrijwillig wordt blootgesteld. Tenslotte speelt het gevoel van onbillijke verdeling een rol: risico's en ongemak worden afgewenteld op een kleine groep die dicht bij de faciliteit woont. Financiële compensatie blijkt daarvoor in het algemeen geen genoegdoening te kunnen geven.

Uit een enquête onder milieuorganisaties, gehouden in het kader van dit project, bleek dat in deze kringen de houding tegenover ondergrondse berging vooral bepaald wordt door de vrees, dat een meer definitieve oplossing voor het afvalprobleem de deur zal openzetten voor de bouw van nieuwe kernenergiecentrales. De voorwaarde, dat het afval gedurende lange tijd terughaalbaar moet zijn, blijkt op dit standpunt weinig

invloed te hebben. Dit wordt gezien als een manoeuvre van de overheid om ondergrondse berging aanvaardbaar te maken, te meer omdat permanente terughaalbaarheid niet gegarandeerd kan worden. Men heeft in het algemeen weinig vertrouwen in ondergrondse berging en ziet het afval liever zichtbaar, controleerbaar, bovengronds opgeslagen. In Zeeland bleek de organisatie Leefbaar Zeeland daarentegen minder ingenomen met langdurige opslag van al het Nederlandse afval bij de COVRA. Van eventuele financiële compensatie wordt veelal weinig heil verwacht.

8.4 Opinies uit andere bron

Collective opinion Radioactive Waste Management Committee ^{6]} (Nuclear Energy Agency):

De strategie voor het opbergen van radioactief afval moet niet gebaseerd zijn op een stabiele maatschappijstructuur voor onbepaalde tijd, noch op technische vooruitgang; zij dient gericht te zijn op een passief-veilige situatie, die actieve beheersingsmaatregelen overbodig maakt. Toekomstige generaties zijn daarom meer gediend met definitieve berging dan met voorlopige opslag die toezicht vereist.

Opberging in de diepe ondergrond is dan ook de aanpak die de voorkeur verdient voor radioactief afval dat langer dan enkele honderden jaren van de biosfeer geïsoleerd moet worden.

EC Concerted Action on the Retrievability of Long-Lived Radioactive Waste in Deep Underground Repositories ^{19]}

Een internationale werkgroep heeft zich onder auspiciën van de Europese Commissie over dit onderwerp gebogen en daarbij ook aandacht besteed aan de "sociaal-politieke" aspecten van dit probleem. Dit leidde tot de volgende conclusie.

Terugneembaarheid laat een stapsgewijs beslissingsproces toe, waarbij beslissingen kunnen worden herzien en biedt zodoende flexibiliteit zowel voor tegenwoordige als voor toekomstige generaties. Tevens blijft de mogelijkheid open voor controle en toezicht, met name van overheidswege. Dit blijkt bij belanghebbende groepen vertrouwen te wekken. Terugneembaarheid dient echter altijd gecombineerd te worden met een systeem van passieve veiligheid. Op de lange termijn moet de veiligheid niet afhankelijk zijn van actieve maatregelen en controle. Als hier sprake is van strijdigheid, moet het belang van passieve veiligheid voorrang krijgen. Terugneembaarheid mag niet gebruikt worden als een excuus voor de toepassing van niet geheel bewezen methoden, met de gedachte dat in geval van een tegenvallend resultaat het afval altijd nog kan worden teruggehaald.

8.5 Kanttekeningen van de Commissie

8.5.1 De studies

Het rapport [CORA 21] geeft een nuttig overzicht van de ervaringen in het buitenland. In het rapport [CORA 20] valt de nadruk op de algemene ethisch-maatschappelijke aspecten van kernenergie. Daardoor zijn die aspecten m.b.t. het eigenlijke onderwerp: terugneembare berging van radioactief afval onderbelicht gebleven. Een toetsing van de diverse opties van terugneembare berging aan ethisch-maatschappelijke criteria heeft niet plaatsgehad. De conclusie dat opslag bovengronds te prefereren is, wordt dan ook niet ethisch-maatschappelijk onderbouwd. Ofschoon nuttig als eerste verkenning, geeft de studie zodoende weinig houvast voor de keuze van een opbergstrategie,

die zowel vanuit technisch als maatschappelijk standpunt gezien, optimaal is. Wel is de nodige aandacht besteed aan factoren, die de risicobeleving t.a.v. kernenergie en kernafval beïnvloeden en aan voorwaarden voor een vruchtbare openbare discussie.

8.5.2 De maatschappelijke dialoog

Het voorgaande bevestigt nog eens dat er naast het technisch-wetenschappelijke probleem ook een maatschappelijk probleem ligt. Ook in Nederland is er maatschappelijk verzet tegen kernenergie en wat daarmee samenhangt. Daarnaast kan wantrouwen ontstaan doordat men het gevoel heeft, te worden geconfronteerd met een technisch-wetenschappelijke "black box", ontsproten aan het brein van gedreven, maar mogelijk niet geheel objectieve onderzoekers. Daar komt in dit geval bij de onzekerheid over de geologische aspecten van ondergrondse berging en over voorspellingen op de zeer lange termijn.

De resultaten van 8.2 en 8.3 samenvattend, luidt de conclusie dat er in wezen twee dingen nodig zijn voor een zinvolle maatschappelijke discussie over het probleem van de afvalberging: *communicatie en participatie*. De buitenwereld zal dan ook zoveel mogelijk bij het onderzoek moeten worden betrokken. Maar daarvoor is een lange periode beschikbaar, meerdere generaties omvattend.

Wij bevinden ons in Nederland om verschillende redenen in een unieke positie. Ten eerste is er sprake van een beperkte hoeveelheid afval, ten tweede rust er vanwege het geringe maatschappelijke draagvlak een taboe op de verkrijging van locatiespecifieke gegevens en ten derde zal het afval nog minstens 50 jaar jaar in Borsele worden opgeslagen.

In het huidige stadium gaat het dus allereerst om regelmatige informatie betreffende de stand van het onderzoek. Verder moet duidelijk aangegeven worden, om hoeveel afval het gaat en waar het vandaan komt. Ook een overzicht van de situatie in het buitenland kan nuttig zijn. De samenleving moet in de gelegenheid gesteld worden, hierover in discussie te gaan. Enerzijds kan dit leiden tot een beter inzicht in de technische aspecten van de diverse opbergopties en zodoende het wantrouwen waarvan hierboven sprake is, verminderen. Anderzijds kan dit een wezenlijke bijdrage aan de sturing van het onderzoek geven, mits de discussie wordt toegespitst op de verschillende opbergopties, die ons ter beschikking staan en gebaseerd op duidelijke argumenten. Naast de diverse technische criteria, zoals gehanteerd in hoofdstuk 7, kan daarbij gedacht worden aan een aantal maatschappelijke criteria, zoals lasten versus compensatie, effect van de aanleg op het milieu, al of niet vertrouwd concept, risico en lasten voor toekomstige generaties en de mogelijkheid tot langdurige markering. Het eindoordeel zal natuurlijk altijd bepaald worden door het gewicht dat men aan deze criteria toekent.

Zodra er sprake is van specifieke locaties, krijgt de maatschappelijke discussie uiteraard een minder vrijblijvend karakter en zullen alle belanghebbenden bij de besluitvorming betrokken moeten worden, zo mogelijk met steun van externe deskundigen.

8.5.3 Conclusies

- In de maatschappelijke discussie betreffende de berging van radioactief afval speelt de risicobeleving een hoofdrol. Bepalend zijn in dit verband de negatieve beeldvorming rond kernenergie en de vrees voor hernieuwde kernenergieopwekking. Verder is er onvoldoende vertrouwen in de uitvoerbaarheid en veiligheid van ondergrondse berging.
- Het feit dat bij terugneembaarheid onherroepelijke beslissingen worden vermeden en dat de mogelijkheid open blijft voor controle en toezicht en voor alternatieve oplossingen, zowel voor tegenwoordige als voor toekomstige generaties, kan wellicht de weerstand tegen ondergrondse berging doen verminderen. Tevens zal de

samenleving effectiever moeten worden betrokken bij de technische en maatschappelijke aspecten van het afvalvraagstuk, waardoor hopelijk een constructieve dialoog op gang kan worden gebracht.

- In het buitenland is reeds de nodige ervaring opgedaan met inspraak van belanghebbenden bij de keuze van de opbergmethode en die van de locatie. Het bleek in vrijwel alle gevallen uiterst moeilijk om tot een consensus te komen.

9. Internationale samenwerking

Internationale samenwerking is van belang voor een brede en complexe problematiek, zoals de ondergrondse berging. Deze samenwerking biedt aanvullende expertise en voorkomt doublures.

9.1 Inleiding

In de huidige situatie is elk land verantwoordelijk voor het radioactieve afval dat dit land heeft en nog zal produceren. Op dit moment zijn er geen aanwijzingen dat hierin op korte termijn verandering zal komen. Ieder land zoekt dus voorlopig naar nationale oplossingen voor het afval. Dat daarbij internationale samenwerking onontbeerlijk is, wordt in dit hoofdstuk toegelicht. Tevens worden de bestaande samenwerkingsverbanden besproken, terwijl voor de Nederlandse situatie zal worden aangegeven op welke concrete onderzoeksterreinen het wenselijk is de samenwerking met het buitenland in de komende periode uit te breiden (zie ook de aanbevelingen in hoofdstuk 10).

9.2 Waarom internationale samenwerking?

Samenwerking tussen onderzoeksinstituten en verantwoordelijke organisaties uit verscheidene landen biedt de mogelijkheid de noodzakelijke middelen efficiënt te gebruiken. Voor ondergrondse berging worden internationaal vooral drie opberggesteenten onderzocht namelijk graniet, klei en zout. Landen die dezelfde gesteenten bestuderen, bundelen vaak hun inzet zodat kennis en middelen optimaal worden benut, wat de kwaliteit van het onderzoek ten goede komt. Bovendien komen zo de resultaten van onderzoek voor alle deelnemende landen beschikbaar. Tevens bevordert dit het harmoniseren van de aanpak die verschillende landen voor de veiligheidsanalyse hanteren, en het gezamenlijk ontwikkelen van algemeen toepasbare rekenmodellen.

Omdat voor Nederland de hoeveelheid radioactief afval relatief beperkt is, vraagt de technische en maatschappelijke complexiteit van de bergingsproblematiek om bundeling van kennis en ervaring. Internationale samenwerking is voor Nederland dan ook noodzakelijk omdat o.a. voor het aantonen van de opbergveiligheid van de ondergrondse opties boringen in zout- en kleiformaties en demonstratietesten in een ondergronds laboratorium onmisbare en omvangrijke stappen zijn. In tegenstelling tot landen als Duitsland (zout) en België (klei) beschikt Nederland niet over een dergelijk laboratorium en is het op dit moment niet toegestaan voor het afvalonderzoek locatie-specifieke gegevens te verzamelen door middel van boringen. Samenwerking met de genoemde landen ligt dan ook voor de hand.

Andere redenen voor samenwerking zijn:

- het streven naar een -zowel uit veiligheidsoogpunt als economisch gezien- optimale supra-nationale oplossing, bijvoorbeeld op Europese schaal;
- het besef dat milieu-effecten van een berging landsgrenzen kunnen overschrijden.

9.3 Internationale samenwerkingsverbanden

De internationale samenwerking rond het radioactief afvalprobleem is voornamelijk tot stand gekomen via internationale organisaties zoals de Europese Unie (EU), het International Atomic Energy Agency (IAEA/Verenigde Naties), het Nuclear Energy Agency (NEA/Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling, OESO).

Sinds 1972 draagt de Europese Unie bij aan onderzoek en ontwikkeling van beheer en opslag van radioactief afval. Het in dit verband nu lopende 5e Kaderprogramma richt zich op: een veilige en kosten-effectieve opberging van het langlevende afval; het minimaliseren van de hoeveelheid afval die voor opberging, met name op grote diepte, in aanmerking komt bijvoorbeeld door preventie, afscheiding en transmutatie (omzetting). Naast testen en demonstraties in ondergrondse laboratoria omvat dit ook onderzoek van de sociale aanvaardbaarheid van het afvalbeheer.

Het Nuclear Energy Agency is een organisatie binnen de OESO en omvat de meeste West-Europese landen, de Verenigde Staten, Canada, Japan, Australië en Korea. Het doel van de NEA, die 85 % van het geïnstalleerde nucleaire vermogen in de wereld vertegenwoordigt, is de lidstaten te ondersteunen in het ontwikkelen van veilige management strategieën voor opberging van langlevend afval. Zij doet dit door bevordering van gezamenlijk onderzoek en het coördineren en stimuleren van kennisuitwisseling. Ook toetst zij op verzoek de aanpak en resultaten van nationale onderzoeksprogramma's. Voor het Nederlandse onderzoek heeft dat in het verleden enkele malen plaats gevonden.

Het International Atomic Energy Agency is een organisatie van de Verenigde Naties. Naast de controlerende taak op het gebied van de vreedzame toepassing van kernenergie is het IAEA ook betrokken bij een aantal activiteiten op het gebied van het radioactief afval. Daarmee is het voor dit laatstgenoemde onderwerp tevens een mondiaal discussieplatform waaraan ook Nederland deelneemt. Voor veel landen is het van belang de invulling van nationale programma's in IAEA-verband te laten toetsen.

9.4 De samenwerkingspositie van Nederland

Vanaf het begin van het onderzoek naar berging van het radioactieve afval (eind zeventiger jaren) is vanuit Nederland nauw samengewerkt met buitenlandse onderzoeksinstellingen; in de OPLA-periode (1983-1993) vooral met Duitse, Spaanse en Franse partners en specifiek gericht op berging in steenzout. Uitgebreid in situ onderzoek dat onderdeel vormde van het EU-programma is verricht in de Duitse Asse-mijn.

Het in Nederland reeds lang lopende en voor een groot deel theoretische onderzoek naar berging in zout vraagt met name om samenwerking bij in situ experimenten. Deze zijn noodzakelijk voor het in de praktijk testen van theoretische modellen. Het NRG (Nuclear Research and Consultancy Group) neemt daartoe vanuit het CORA-programma deel aan het BAMBUS-project [CORA 10], een in situ project in de Asse-mijn om het gedrag van zoutgruis als afdichtingmateriaal voor opberg ruimten uit te testen. De coördinatie van dit onderzoek is in handen van FZK (ForschungsZentrum Karlsruhe); het onderzoeksconsortium bestaat uit onderzoeksinstellingen uit Duitsland, Frankrijk, Nederland en Spanje.

Klei als mogelijk opberggesteente voor terugneembare berging bracht samenwerking met Belgische onderzoeksinstellingen met zich mee. Deze is er met name op gericht de in Nederland ontbrekende kennis over berging in klei op peil te brengen. Belangrijk is in dit verband de samenwerking van het NRG met het SCK-CEN (Mol, België) en de KU Leuven (België) bij de studie voor een terugneembaar opbergconcept in klei en de daaraan verbonden veiligheidsanalyse [CORA 04, 17 en 18]. Ook de UCL (België), het SCK-CEN en het TNO-NITG bundelen hun kennis in een project [CORA 19] om voor het Nederlandse concept de gesteentemechanische eigenschappen van de Boomse klei te onderzoeken.

De toegenomen belangstelling voor het onderwerp terugneembaarheid heeft de EU doen besluiten een "Concerted Action" te laten uitvoeren. Deze inventarisatie van "experts opinions" heeft in de periode 1998-1999 plaatsgevonden (zie ook 8.4).

De coördinatie lag in handen van het NRG en deelgenomen werd door deskundigen uit België, Duitsland, de EU, Finland, Frankrijk, Nederland, Spanje, het Verenigd Koninkrijk, Zweden en Zwitserland.

9.5 Toekomstige samenwerking

Voor de toekomst acht de Commissie het gewenst de bestaande samenwerking verder uit te breiden en daarbij duidelijke accenten te leggen. Deze accenten komen zowel voort uit de resultaten van het CORA onderzoek als uit het Nederlandse standpunt ten aanzien van de terugneembaarheid van het afval.

Samenwerking, o. a. met België en Duitsland, is wenselijk en mogelijk op de volgende gebieden:

- systematisch en probabilistisch vervolgonderzoek aan de terugneembaarheids-opties (zout, klei, langdurig bovengronds). Het laag- en middelactief afval zal daarbij in het onderzoek moeten worden betrokken;
- een actieve deelneming aan Belgisch onderzoek in het ondergrondse laboratorium in Mol. Dit levert de noodzakelijke informatie, die nodig is om de technische haalbaarheid van het Nederlandse opbergconcept voor klei in de praktijk te verifiëren; speciale aandacht verdienen daarbij het thermomechanische gedrag van klei en technieken voor vulling en afdichting;
- onderzoek naar terugneembare berging in zout op basis van in situ experimenten in samenwerking met Duitse partners;
- studie van langdurige bovengrondse opslag in een ruimer perspectief met inbegrip van andere gebieden, in combinatie met locaties voor terugneembare ondergrondse berging en tevens betrokken op de omvangrijke hoeveelheid laagactief afval van natuurlijke oorsprong die door de verscherping van Europese richtlijnen in aanmerking komt voor bovengrondse of ondiepe opslag;
- ontwikkelen van technieken en strategie met betrekking tot het monitoren van terugneembare ondergrondse berging;
- studie van de maatschappelijke aspecten van terugneembaarheid.

10. Conclusies en aanbevelingen

Terugneembaarheid is in Nederland een opgelegde voorwaarde voor berging van radioactief afval. Zoutformaties en kleilagen in de diepe ondergrond bieden mogelijkheden om daaraan te voldoen. Ook langdurige bovengrondse opslag voorziet in de terugneembaarheid van het afval, maar deze optie heeft geen natuurlijk barrière systeem en mist de fail-safe waarborg die wel door zout en klei wordt geboden.

10.1 Conclusies

Terugneembare berging

1. Voor geen van de drie opties, langdurige bovengrondse opslag en ondergrondse berging in zout of klei, zijn problemen naar voren gekomen die de technische uitvoering in de weg zouden kunnen staan, al zijn er met name voor klei nog onzekerheden. De terugneembare optie ondergronds vereist extra voorzieningen in de mijn. Voor het eventuele terugnemen van het afval uit de ondergrond kan een reserve opslag bovengronds gewenst zijn. Terugneembaarheid kan, volgens de huidige inzichten, alleen gegarandeerd worden voor enkele honderden jaren.

Vergelijking van de opties

2. Bovengrondse opslag wint het van ondergrondse berging wat betreft de betrouwbaarheid van de gegevens en de eenvoud van de terugneemoperatie. Deze optie heeft echter geen natuurlijk multi-barrière systeem, mist de belangrijke “fail-safe” waarborg, die wel door ondergrondse berging in zout of klei wordt gerealiseerd. Op den duur is ondergrondse berging noodzakelijk. Berging in zout levert uiteindelijk een goede barrière-werking vanwege de natuurlijke neiging van zout om, bij ontbrekend onderhoud, ruimten langzaam dicht te drukken en het afval in te sluiten. Dit leidt uiteindelijk, ook bij verwaarlozing van de berging, tot een passief-veilige opbergsituatie. Ook een goede berging in klei lijkt haalbaar, alhoewel de kennis omtrent klei kleiner is dan voor zout. De kosten van ondergrondse berging in klei vallen waarschijnlijk hoger uit dan die voor zout, vanwege de mijnbouwkundige noodzaak om in klei de galerijen te ondersteunen. Een opbergtraject zal naar verwachting bestaan uit een op verschillende wijze in de tijd gefaseerde combinatie van bovengrondse opslag en ondergrondse terugneembare berging.

Veiligheid

3. Het onderzoek heeft een tweetal belangrijke aanpassingen in de analysemethode van de veiligheid opgeleverd. Zowel de methode voor ontwikkeling en selectie van mogelijk risicovolle situaties als de modellering van processen die de veiligheid van de berging beïnvloeden, werden sterk verbeterd. Hiermee is een basis gelegd voor een meer betrouwbare analyse van de veiligheid waarin ook rekening kan worden gehouden met de kans van optreden van mogelijk risicovolle situaties. Deze kans is in het uitgevoerde onderzoek pessimistisch op 1 gesteld, dat wil zeggen, verondersteld wordt dat de onderzochte situaties zich ook werkelijk zullen voordoen. In de regel zal de genoemde kans echter kleiner dan 1 zijn. Verder zijn ook bij het berekenen van de stralingsbelasting van mogelijk risicovolle situaties, vanwege de vrij grote onzekerheidsmarge in een aantal basisgegevens, pessimistische veronderstellingen gedaan.

4. Voor langdurige bovengrondse opslag zijn alleen de gevolgen van een overstroming van een volgens plan onderhouden COVRA faciliteit onderzocht. Uitgaande van relatief gunstige uitgangspunten (o.a. dat de afvalvaten bij overstroming intact blijven) wordt een individuele stralingsdosis berekend van maximaal ca. 10^{-13} Sv/j. Minder gunstige scenario's en mogelijk andere locaties dan die van COVRA zijn niet onderzocht.

Voor een ondergrondse berging wordt verwaarlozing tijdens de terugneembaarheidsperiode, met als gevolg dat de mijn vol met water loopt, gezien als een situatie met mogelijk een maximaal risico. Dit kan in de biosfeer leiden tot een maximale, individuele stralingsdosis van ca. 10^{-12} Sv/j na ca. 100.000 jaar voor een berging met kernsplijtingsafval in zout en 10^{-6} Sv/j na ongeveer 200.000 jaar voor berging in klei. De hogere dosis voor berging in klei is vooral het gevolg van de pessimistische veronderstelling, dat al het afval volledig oplost en leidt tot directe besmetting als gevolg van drinkwaterwinning boven de berging.

Verwaarlozing van een berging in zout met (niet-opgewerkte) splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren kan leiden tot een stralingsdosis van 10^{-9} Sv/j, die na ongeveer 100.000 jaar in de biosfeer wordt bereikt. Voor berging in klei is dit niet bestudeerd.

De berekende doses zijn zeer laag en aanzienlijk lager dan het natuurlijke stralingsniveau in Nederland dat gemiddeld ca. $2,4 \cdot 10^{-3}$ Sv/j bedraagt.

5. Criticiteit vormt in het onderzochte opbergconcept voor de splijtstofelementen van de onderzoeksreactoren in een ondergrondse berging in zout geen veiligheidsprobleem. Bij berging in klei kan verpakking van de splijtstofelementen in standaard COGEMA-vaten criticiteitsproblemen veroorzaken in het geval dat (zoet)water uit de klei in contact komt met de splijtstof. Criticiteit kan worden uitgesloten door toepassing van kleinere vaten met minder splijtstof of door lege ruimten in de vaten op te vullen met speciale materialen. Een berging zal, gezien het hoge percentage verrijkt uranium in de splijtstof, aan de volledige non-proliferatie voorschriften van de IAEA moeten voldoen.

Risicovermindering door afvalverwerking

6. De scheidingsprocessen en de processen voor omzetting en immobilisatie van actiniden en splijtingsproducten bevinden zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling. Alhoewel deze processen op de lange termijn wellicht mogelijkheden bieden voor vermindering van de risico's die aan het afval verbonden zijn, ontbreekt het momenteel aan duidelijkheid over de haalbaarheid. Bovendien wordt het kernsplijtingsafval, dat bij de opwerking van gebruikte splijtstof ontstaat, ingesmolten in duurzaam glas. Dit vormt een belangrijke belemmering voor het toepassen van voornoemde processen.

Maatschappelijke aspecten

7. De verkenning van de maatschappelijke aspecten, waaraan Nederlandse milieuorganisaties hebben meegewerkt, toont aan dat de discussie over het afval direct wordt gekoppeld aan de negatieve beeldvorming rond kernenergie, en de mening dat ondergrondse berging als oplossing van het afvalprobleem hernieuwde inzet van kernenergie kan betekenen. Bij de betrokken milieubewegingen bestaat onvoldoende vertrouwen in de uitvoerbaarheid en de veiligheid van ondergrondse berging.
8. Momenteel ontbreekt een toetsing van de mogelijkheden voor terugneembare berging aan ethisch-maatschappelijke criteria. Voor het bereiken van een aanvaardbare oplossing voor het radioactieve afval is deze noodzakelijk.

Kosten

9. Verlenging van de opslagperiode van COVRA van 100 naar 300 jaar kost ongeveer €90 miljoen aan investeringen en bedrijf. Aanleg en bedrijf van een terug-

neembare berging in zout, inclusief schachten en galerijen, is ongeveer driemaal zo duur en voor een terugneembare berging in klei ruim zeven maal zo duur. De hogere kosten voor klei zijn, vergeleken met zout, voor een deel het gevolg van de mijnbouwkundige noodzaak om de galerijen te ondersteunen.

Het openhouden, na plaatsing van het afval, van een ondergrondse berging in zout of klei kost ongeveer €1,8 miljoen per jaar aan technisch onderhoud en organisatie. Voorwaarden betreffende monitoring en maatschappelijke eisen kunnen deze kosten doen stijgen.

Naar verwachting zal een volledig bergingstraject uit een combinatie van bovengrondse opslag en ondergrondse berging bestaan, zodat het in werkelijkheid wellicht gaat om een combinatie van de kosten van de afzonderlijke opties. Deze kosten zijn slechts te berekenen als van een bepaalde combinatie van bergingsmethoden en hun fasering wordt uitgegaan.

Internationale samenwerking

10. Temeer daar de Nederlandse hoeveelheid radioactief afval relatief beperkt is, vraagt de technische en maatschappelijke complexiteit van de bergingsproblematiek om internationale bundeling van kennis en ervaring. Dit geldt vooral voor de uitvoering van in situ onderzoek en het verzamelen van lokatie-specifieke in situ gegevens door middel van boringen, omdat deze in Nederland, in tegenstelling tot bijvoorbeeld Duitsland en België, op dit moment niet zijn toegestaan. Het deelnemen aan onderzoek in ondergrondse laboratoria is voor de opbergopties in zout en klei een noodzakelijke stap in het aantonen van de veiligheid van terugneembare berging. Verder kan samenwerking bijdragen aan Europese oplossingen voor het afval, o.a. voor de aanzienlijke hoeveelheid radioactieve reststoffen van natuurlijke oorsprong als gevolg van verscherpte richtlijnen van de Europese Commissie.

Specifieke onderwerpen

11. In laboratoriumexperimenten is aangetoond dat als gevolg van straling minuscule holtes ontstaan in het kristalrooster van NaCl (keukenzout), die de kans op dynamische vrijzetting van opgebouwde energie verhogen. Het blijkt echter dat de vorming van deze holtes in NaCl waaraan bijvoorbeeld NaBr (natriumbromide) is toegevoegd zich nauwelijks voordoet. Door deze materialen te gebruiken als opvul- en afdichtmateriaal rond de afvalvaten kan stralingsschade sterk beperkt worden.
12. Als in een ondergrondse berging in zout of klei vaten met radiumhoudend afval, die een onderdeel van het licht- en middelactief afval vormen, mochten lekken en als de afdichting van de opberggaten onvoldoende functioneert, dan kan het gasvormige vervalproduct radon vrijkomen. Dit radon kan onder die omstandigheden als indicator dienen.
13. Enkele variaties in het opbergconcept zijn onderzocht.
Verticale opberggaten die vanuit een galerij in een zoutmijn zijn geboord en die voorzien zijn van een robuuste verbuizing bieden goede vooruitzichten.
Omstorten van containers met het zeer hygroscopische calciumchloride ter beperking van corrosie en gasontwikkeling.

10.2 Aanbevelingen

Op basis van haar conclusies beveelt de Commissie aan het onderzoek van de technische en maatschappelijke aspecten van terugneembare berging van radioactief afval voort te zetten. Samenwerking met het buitenland is daarbij onmisbaar.

In het onderzoek zijn twee hoofdlijnen te onderscheiden, die samen de basis voor vervolgonderzoek vormen en waarbij samenwerking met vooral België en ook Duitsland sterk wordt aanbevolen.

Hoofdlijn 1

De technische aspecten

Het onderzoek dient te worden gericht op:

1. een analyse van alle mogelijk risicovolle situaties (o.a. de verwaarlozings situatie), voor zowel de bovengrondse als de ondergrondse mogelijkheden, waarbij rekening wordt gehouden met de kans van optreden van die situaties en waarin alle categorieën radioactief afval, incl. de splijststofelementen van de onderzoeksreactoren, worden meegenomen. Speciale aandacht is nodig voor stroming van water in ondergelopen en mogelijk ingestorte galerijen in een ondergrondse berging;
2. in-situ experimenten in ondergrondse laboratoria om in een werkelijke opbergsituatie het gedrag van zout en klei te bestuderen, onder de gecombineerde invloed van druk, temperatuur en straling. Speciale aandacht voor het fail-safe gedrag van klei is noodzakelijk. Met de verkregen gegevens kunnen de rekenmodellen worden verbeterd waardoor de betrouwbaarheid van de veiligheidsanalyse wordt verhoogd;
3. ontwikkelen, bouwen en beproeven van bewakings(monitorings)systemen voor de terugneembaarheidsperiode, zowel bovengronds als ondergronds;
4. studie van een gecombineerd opbergconcept, inclusief een kostenanalyse, waarin rekening wordt gehouden met de verschillende mogelijke bestemmingen van het afval en dat met oog op de meer stringente richtlijnen van de Europese Commissie, behalve het huidige afval ook grote hoeveelheden laag actief afval van natuurlijke oorsprong in beschouwing neemt;
5. verdere evaluatie van de risico's bij overstroming van de COVRA-locatie; studie van langdurige bovengrondse opslag elders in Nederland;
6. studie van ondiepe opslag in bunkerachtige constructies;
7. verificatie van het stralingsschadeproces in steenzout. Een belangrijke eerste stap kan worden gezet door gebruik te maken van gegevens uit langdurige in situ bestralingsexperimenten in de zoutmijn Morsleben (Duitsland). Daarnaast verdient het aanbeveling om het onderzoek van stoffen waarin nauwelijks stralingsschade optreedt, en die toegepast kunnen worden als opvul- of afdichtmateriaal rond afvalvaten, voort te zetten. Verder is het nuttig om, op grond van kennis op het gebied van explosies en schokgolven, te bepalen in hoeverre de in het laboratorium waargenomen verschijnselen een rol spelen bij de hoge drukken die zich onder opbergcondities voordoen.

Hoofdlijn 2

De ethische en maatschappelijke aspecten

Verwacht mag worden dat een aanvaardbare oplossing voor het afval slechts bereikbaar is als alle relevante maatschappelijke en technische factoren in een maatschappelijk proces op evenwichtige wijze en goed omschreven aan bod komen.

Daarom is het nodig om te komen tot:

1. inventarisatie van alle factoren en belanghebbenden die bij een maatschappelijk keuzeproces een rol spelen;
2. toetsing van de mogelijkheden voor terugneembare berging aan maatschappelijk-ethische criteria;
3. stapsgewijze ontwikkeling van een maatschappelijk keuzeproces, zonder vooropgelegde conclusies, en waarbij voorzien wordt in:
 - vroegtijdige betrokkenheid van alle belanghebbenden,
 - een onafhankelijke begeleiding,
 - een open en volledige publieksvoorlichting,
 - inschakeling van sociaal-ethische expertise.

10.3 Slotbeschouwing

De Commissie is van mening dat terugneembaarheid een positieve bijdrage kan leveren aan de totstandkoming van een aanvaardbare oplossing voor het hoog-toxische afval in het algemeen en voor het radioactieve afval in het bijzonder. Zij baseert dit op de volgende constatering.

- De eisen met betrekking tot opslag of berging zijn voor hoog-toxisch afval van chemische aard en radioactief afval in grote lijnen gelijk.
- Een terugneembare berging biedt de flexibiliteit om een route te ontwikkelen waarbij, op grond van kennisvergroting, stapsgewijs wordt toegewerkt naar een verantwoorde definitieve oplossing voor het afval.
- Deze route garandeert de toegankelijkheid tot een berging waardoor er gegevens verzameld kunnen worden voor het monitoren van de toestand van het opgeslagen afval. Tevens laat dit de ontwikkeling en evaluatie van kennis toe. Bovendien biedt het een mogelijkheid voor second opinion.
- Een terugneembare berging is volgens de onderzoeksresultaten gedurende enkele eeuwen technisch haalbaar, ondanks het feit dat nog een aantal “witte vlekken” verder dient te worden onderzocht.
- Terugneembaarheid kent een technische begrenzing in de tijd en dus een beslismoment voor definitieve afsluiting, waardoor uiteindelijk een passief-veilige eindsituatie kan worden bereikt.

Appendix 1 - CORA-projecten en deelnemende onderzoeksinstituten

Langdurige bovengrondse opslag	Onderzoeksinstituut
CORA 01 Inventarisatie en mogelijkheden voor bovengrondse opslag voor 300 jaar van radioactief afval bij COVRA	NRG-Arnhem (voorheen KEMA-Nucleair)
CORA 02 Risico-evaluatie overstroming COVRA-terrein	NRG-Arnhem
CORA 03 Optimaliseren aspecten bovengrondse opslag	NRG-Arnhem
Terugneembare ondergrondse berging	
<i>in steenzout en klei:</i>	
CORA 04 Terughaalbare opberging van radioactief afval in diepe zout- en kleiformaties	NRG-Petten (voorheen ECN-Nucleair)
CORA 05 Direct disposal of spent fuel from test and research reactors in the Netherlands	NRG-Petten
CORA 06 Immobilisatie van langlevende splijttingsproducten	NRG-Petten
CORA 07 Veiligheidsaspecten m.b.t. radonproductie in terughaalbaar opgeborgen radioactief afval in de diepe ondergrond	NRG-Petten, KVI
<i>in steenzout:</i>	
CORA 08 Concept ontwerp terughaalbare berging in steenzout	NRG-Petten
CORA 09 De kosten van het terughaalbaar opbergen van radioactief afval in de diepe ondergrond	NRG-Petten
CORA 10 Backfill and material behaviour in underground salt repositories	NRG-Petten, FZK, BGR, CIMNE, GRS, G3S, UPC
CORA 11 Concept ontwerp terughaalbare opslag van radioactief afval in diepe boorgaten in steenzout	NRG-Petten
CORA 12 Radiation damage in NaCl	RUG
CORA 13 Aanvullende analyse zoutproblematiek	TNO-NITG, Groundcontrol
CORA 14 Calciumchloride als vulmiddel voor vochtvrije opslag van hoog-radioactief afval in steenzout	GEOCHEM BV, Groundcontrol
<i>in klei:</i>	
CORA 15 Kartering slecht-doorlatende laagpakketten van Tertiaire formaties	TNO-NITG (voorheen RGD, TNO-GG)
CORA 16 Inventarisatie geomechanische, geochemische en geohydrologische eigenschappen van Tertiaire kleipakketten	TNO-NITG
CORA 17 Mine design in clay	KU Leuven
CORA 18 Terughaalbare opslag op een diepte van 500 m in de Boomse kleiformatie	SCK-CEN, KU Leuven, NRG
CORA 19 Transport of radionuclides disposed of in clay of tertiary origin	TNO-NITG, GeoDelft, UCL
Maatschappelijke aspecten	
CORA 20 Kernafval en Kernethiek	MFG
CORA 21 Discussions on Nuclear Waste	WISE

De samenvattingen van deze studies zijn gebundeld in een werkdocument dat ter inzage ligt bij de afdeling Geo-Energie van het TNO-NITG in Utrecht (l.vandevate@nitg.tno.nl; telefoon 030-256 46 08)

Appendix 2 - Samenstelling van Commissies

Samenstelling van de Commissie Opberging Radioactief Afval

Ir. B.P. Hageman (voorzitter)

Prof. Ir. H.J. de Haan
Technische Universiteit Delft

Prof. Dr. R.J. de Meijer
Rijksuniversiteit Groningen

Ir. G. Ockeloen

Drs. E. Romijn (vanaf 12 december 1996)

Prof. Dr. R.D. Schuiling
Universiteit Utrecht

Prof. Dr. A. Vervoort
Katholieke Universiteit Leuven

Prof. Drs. F. Walter (tot 15 juli 1996 †)
Technische Universiteit Delft

Dr. H.T. Cahen
Ministerie van Economische Zaken

Drs. L. van de Vate (secretaris/programma manager)
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO

Mevr. G. Cornelissen en Mevr. R. Pabbruwee (secretariaat tot 1999)

J.F. de Blaauw (secretariaat vanaf 1999)
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO

Samenstelling van de BegeleidingsCommissie van de studie Maatschappelijke en Ethische Aspecten van terughaalbare opslag van kernafval

Dr. H.G.J. Gremmen
*Departement Maatschappijwetenschappen
Wageningen Universiteit*

Prof. Ir H.J. de Haan (voorz.)
CORA

Dr. W. Smit
*Faculteit Wijsbegeerte en Maatschappijwetenschappen
Universiteit Twente*

Prof. Dr. C.A.J. Vlek
*Faculteit der Psychologische, Pedagogische en Sociologische Wetenschappen
Rijksuniversiteit Groningen*

Appendix 3 - Ondiepe berging

Onder ondiepe berging wordt verstaan het definitief bergen van radioactief afval op een diepte van maximaal enkele tientallen meters onder het oppervlak. Dit kan in de vorm van ondergrondse betonnen bunkers.

Het afval dat in aanmerking komt voor ondiepe berging is laag- en middelactief met een korte halveringstijd. Na een periode van enkele honderden jaren is dit afval voldoende vervallen en kan het als niet-radioactief worden beschouwd.

Ondiepe berging is in het CORA-onderzoek niet meegenomen. Niettemin kan de recente verscherping van de Europese richtlijnen voor laag radioactief afval, waardoor grote hoeveelheden afval van natuurlijke oorsprong wellicht ook voor opslag of berging in aanmerking komen, de belangstelling voor ondiepe berging doen groeien. In deze paragraaf wordt deze methode toegelicht aan de hand van de huidige praktijk in Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk.

Frankrijk

De ondiepe berging voor kort levend laag- en middelactief afval, het "Centre de l'Aube" (50 km ten Westen van Troyes), is gebaseerd op het multi-barrière systeem om het afval optimaal van de biosfeer te isoleren.

In de beginfase van de aanleg wordt een ca. 6 m diepe kuil gegraven waarvan de bodem bedekt wordt met een laag beton. Deze vormt de basis van een compartiment met betonnen/stalen muren waarin afvalvaten, die een langdurige isolatie vereisen, geplaatst worden. Na volledige vulling volgt het storten van beton in het compartiment, zodat één massaal betonblok met daarin het afval ontstaat. Een dergelijk blok noemt men een monoliet. Boven op de monoliet wordt afval, dat minder isolatie verlangt, gestapeld tot een hoogte van ca. 10 m. Aan de binnenzijde worden afvalvaten geplaatst, aan de buitenzijde betonnen containers. De ruimte tussen het afval wordt met klei opgevuld. Afdekking van het geheel vindt plaats door het aanbrengen van een dikke kleilaag met beplanting. Deze beschermt de berging tegen invloeden van buitenaf en gaat het vrijkomen van radionucliden tegen. Voor controle op de waterdichtheid van de opslagcompartimenten is een systeem van ondergrondse tunnels aangelegd. Het grondwater in de omgeving wordt op activiteit gecontroleerd.

Verenigd Koninkrijk

Het huidige principe van de berging voor vast, laagactief afval in het Verenigd Koninkrijk maakt gebruik van uitgravingen in de bodem bij Drigg op ca. 6 km ten zuiden van Sellafeld. Deze worden gevuld met betonnen compartimenten waarin de afvalvaten worden gestapeld. De uitgravingen hebben de vorm van langgerekte sleuven.

De opgevlude sleuven worden afgesloten met een waterbestendig materiaal om de hoeveelheid binnendringend regenwater te reduceren. Afdekking met een dikke laag aarde voorzien van beplanting vormt de laatste barrière.

Beperking van de grondwaterstroming is gerealiseerd door plaatsing in de bodem van een cement/bentoniet wand aan de noordoost zijde van de berging. Deze wand is 9 m diep, 450 m lang en 1 m dik. Zowel de staat van de wand als de grondwaterstroming worden door metingen regelmatig gecontroleerd.

De staat van het afval wordt gemonitord met behulp van verticale, geperforeerde pijpen die door de afdekking in de afvalcompartimenten reiken. Op deze wijze is controle van het grondwaterniveau mogelijk, zijn gas- en watermonsters te nemen en kunnen eventuele geproduceerde gassen, afkomstig van de decompositie van het afval, ontwijken. Voordat tot definitieve sluiting van de berging wordt overgegaan zullen alle sleuven nog extra worden afgedekt met een dikke laag, slecht doorlatende klei.

Verklarende woordenlijst

Achtergrondstraling: De van nature aanwezige straling o.a. uit de bodem en uit het heelal.

Actiniden: De groep elementen met atoomnummers 89 tot en met 103, waaronder actinium (89), thorium (90) en uranium (92).

ADS: Accelerator Driven System.

AECL: Atomic Energy of Canada Limited.

ALARA: As Low As Reasonably Achievable.

Am: Americium.

Anhydriet: Een niet-elastisch, maar bros, vervormend mineraal (calciumsulfaat) dat als onzuiverheid in steenzoutformaties voorkomt, meestal in banden of lagen en soms gemengd met andere mineralen.

BAMBUS: Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories.

Becquerel (Bq): Eenheid van radioactiviteit. Een bron heeft een sterkte van 1 becquerel als er per seconde 1 atoomkern vervalst.

Bentoniet: Speciaal type klei met de eigenschap om sterk te zwellen bij toevoeging van water; wordt vaak gebruikt voor afdichtingsdoeleinden.

BGR: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Duitsland).

Biosfeer: Deel van de aarde waar levende organismen voorkomen.

Bischoffiet: Magnesiumchloride, een mineraal, dat als onzuiverheid in sommige steenzoutformaties voorkomt.

C: Koolstof.

CaCl₂: Calciumchloride.

Carnalliet: Een in steenzoutformaties als onzuiverheid voorkomend mineraal.

CIMNE: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (Spanje).

Clusteren: Samenklonteren.

Cm: Curium.

Co: Kobalt.

COGEMA: Compagnie Générale des Matières Nucléaires (Frankrijk).

Concentratiefactor: De concentratiefactor geeft de empirische verhouding tussen de nuclideconcentratie in een organisme (plant, dier) en de nuclideconcentratie in het omringende medium (bodem, water).

Consolidatiefase: Fase na monsterneming waarin een monster, b.v. een boorkern, herbelast wordt om zo goed mogelijk de oorspronkelijke situatie te bereiken.

Convectie: grootschalige verplaatsing onder invloed van b.v. temperatuur-, druk- of concentratieverschillen.

Convergentie: Geleidelijk kleiner worden van een holte (bv. in steenzout).

CORA: Commissie Opberging Radioactief Afval.

COVRA: Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval.

Criticiteit (kritikaliteit): De situatie waarbij voldoende neutronen beschikbaar zijn (in een kritische massa) om een kettingreactie in stand te houden.

Cs: Cesium.

CST: Crystalline SodiumsiliconTitanite.

Diapirisme: Opwaartse beweging van sommige zoutvoorkomens, waarbij de afdekkende gesteentelagen worden doorbroken; buiten het vakgebied geologie wordt deze term vaak gebruikt om in het algemeen de opwaartse beweging van zoutvoorkomens aan te geven.

Diepe ondergrond: Deel van de ondergrond ca. 500 m beneden het maaiveld.

Diffusie: Transport van atomen of moleculen onder invloed van hun warmte beweging in de richting van afnemende concentratie.

€ Euro (1 Euro = 2,20371 Gulden).

Erosie: Afbraak en transport van sediment en van vast gesteente als gevolg van schurende invloeden zoals water, wind en ijs.

EU: Europese Unie.

EVEREST: Evaluation of Elements Responsible for the effective Engaged dose rates associated with the final Storage of radioactive waste.

Fail-safe: Eigenschap van een bergingsconcept, die er voor zorgt dat, bij verlies van controle over de berging, deze door natuurlijke processen in combinatie met het ontwerp van de berging uiteindelijk in een veilige situatie blijft.

FEP: Features, Events and Processes.

FZK: ForschungsZentrum Karlsruhe (Duitsland).

Gammastraling: Energierijke electromagnetische straling met zeer kleine golflengte.

Gehydrateerd: Met in het kristalrooster van een mineraal opgenomen water.

G.3S: Groupement pour l'Etude des Structures Souterraines de Stockage (Frankrijk).

GRS: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (Duitsland).

HABOG: Hoogradioactief Afval Behandelings- en Opslag Gebouw.

Halveringstijd: De tijd waarin de helft van de radioactiviteit is vervallen.

HAW: High Active Waste.

HFR: Hoge Flux Reactor.

HOR: Hoger Onderwijs Reactor.

Hydrostatische druk: Alzijdige of isotrope druk (bv. in een vloeistof).

I: Jodium.

IAEA: International Atomic Energy Agency.

IBC: Isoleren, Beheersen en Controleren.

ICRP: International Commission on Radiological Protection.

ILONA: Integraal Landelijk Onderzoek Nucleair Afval.

Isotopen: Kernen van eenzelfde element waarbij het aantal neutronen in de atoomkern verschilt.

Kritikaliteit: zie Criticiteit.

KSA: KernSplijtingsAfval.

KU Leuven: Katholieke Universiteit Leuven (België).

KVI: Kernfysisch Versneller Instituut; Rijksuniversiteit Groningen.

LAVA/MAVA: LaagradioActief Vast Afval/MiddelradioActief Vast Afval.

Lithologische variatie: Variatie in gesteentelagen.

LOG: Laag- en middelradioactief afval Opslag Gebouw.

MER: Milieu-Effect Rapportage.

MFG: Milieu Federatie Groningen.

MOX: Mixed Oxide.

MT SF: Metric Tons Spent Fuel.

NaCl: Natriumchloride; zuiver steenzout.

Nanometer: 1 miljardste meter.

NAP: Normaal Amsterdams Peil.

NEA: Nuclear Energy Agency.

NIRAS/ONDRAF: Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Splijtstoffen/Organisme National des Déchets Radioactifs et des Matières Fissiles (België).

Non-proliferatie: Internationaal verdrag ter voorkoming van de verspreiding van kernwapens en de daaruit resulterende controle op splijtstoffen.

Np: Neptunium.

NRG: Nuclear Research and Consultancy Group.

Nuclide: Atoomkern.

OECD/OESO: Organisation for Economic Co-operation and Development/Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling.

OMEGA: Options for Making Extra Gains from Actinides.

OPLA: OPLAnd.

Opwerken: Toepassen van chemische processen om uit splijtstof na gebruik in de reactor de waardevolle stoffen, het nog aanwezige splijtbaar uranium en het gevormde splijtbaar plutonium, te scheiden van de splijtingsproducten (kernsplijtingsafval) en het overige radioactieve afval.

Overpack: Extra beschermingsmantel, b.v. om een vat met kernsplijtingsafval.

Pa: Pascal; eenheid van druk of spanning ($10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$).

Passief-veilig: Veilige eindsituatie van een berging die zonder menselijk ingrijpen wordt bereikt.

Pb: Lood.

Permeabiliteit: Mate van doorlatendheid voor vloeistoffen en gassen.

Porositeit: Deel van materiaal dat bestaat uit tussenruimten.

Probabilistische methode: Analyse methode waarbij rekening wordt gehouden met de kans van optreden van processen en gebeurtenissen.

PROSA: Probabilistic Safety Assessment.

Pu: Plutonium.

PUREX: Plutonium Uranium Recovery by Extraction.

Ra: Radium.

Radiolyse: Uiteenvallen van moleculen als gevolg van ioniserende straling.

Radionuclide: Nuclide dat radioactief is, d.w.z. spontaan zonder invloed van buitenaf vervalt onder uitzending van straling.

RAS: Recyclage van Actiniden en Splijtingsproducten.

Retentie: Bindend vermogen, bijvoorbeeld de eigenschap van klei om de meeste radionucliden aan zich te binden.

RGD: Rijks Geologische Dienst.

Rn: Radon.

RuG: Rijksuniversiteit Groningen.

SCK/CEN: Studie Centrum voor Kernenergie/Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (België).

Se: Seleen.

Secondair risiconiveau: Limiet voor de stralingsdosis die gekoppeld is aan een bepaald risico niveau.

Sievert (Sv): Eenheid van stralingsdosis.

Sn: Tin.

Splijtingsproducten: Nucliden die ontstaan door splijting van een zwaar atoom (uranium, plutonium of thorium) of door het daarop volgende radioactieve verval van de direct door splijting ontstane nucliden, bijvoorbeeld: krypton-85, strontium-90, cesium-137.

Splijtstof: Iedere stof die zich door neutronen laat splijten en voor opwekking van energie gebruikt kan worden; bijvoorbeeld uranium-235, plutonium-239.

Sr: Strontium.

Stralingsdosis: De geabsorbeerde hoeveelheid stralingsenergie per massa-eenheid; eenheid Sievert (Sv).

Stralings schade (in steenzout): Het ontstaan van veranderingen (defecten) in steenzoutkristallen als gevolg van de invloed van ioniserende straling, meestal aangegeven in opgeslagen energie per massa-eenheid (Joule/gram) of in percentages (concentraties van schade-colloïden).

Subrosie: Oplossen van zout op het overgangsvlak tussen het zout en het omringende gesteente als daar grondwater voorkomt.

Sv/j: Sievert per jaar; eenheid van stralingsdosistempo.

SYNROC: Synthetic Rock.

Tc: Technetium.

Th: Thorium.

TNO-GG: Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek-Geo-Energie en Grondwater.

TNO-NITG: Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek- Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen.

U: Uranium.

UCL: Universit  Catholique de Louvain (België).

Uitloging: Oplossing en transport van deeltjes uit een vast materiaal door omringende vloeistof.

UPC: Universitat Polit cnica de Catalunya (Spanje).

Verrijkt uranium: Uranium met een verhoogd percentage uranium-235.

WISE: World Information Service on Energy.

Zoutkoepel of zoutpijler: Grote ondergrondse zoutformatie in de vorm van een pijler muur of paddestoel; door opstuwing ontstaan uit een zoutlaag, waarbij een of meerdere gesteentelagen boven het zout zijn doorbroken.

Zr: Zirkonium

Literatuurverwijzingen

1. Onderzoek naar geologische opberging van radioactief afval in Nederland, Eindrapporten over fase 1 en Aanvullend onderzoek, Commissie Opberging te Land (OPLA), Ministerie van Economische Zaken, mei 1989, september 1993.
2. Kabinetsstandpunt over de vraag of de diepe ondergrond mag en kan worden gebruikt voor het opbergen van afval, Tweede Kamer, vergaderjaar 1992-1993, 23 163, nr. 1.
3. Nationaal MilieubeleidsPlan (NMP), Tweede Kamer, 1988-1989, 21 137, nrs 1-2.
4. Retrievability of radioactive waste, TU Delft, 1993, nr. 54595.
5. Erop of Eronder? Publicatie RMNO nr. 43, 1990; auteur, P. van der Gaag.
6. The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal; NEA Collective Opinion, 1995.
7. Milieu-Effectrapport, COVRA, 1995.
8. Enkele Nota's betreffende Omgaan met risico's en risico's van straling; Tweede Kamer 1988 - 1989, 21 137, nrs.1 - 2, 21 483, nrs. 1 - 2 en 1992 - 1993, 21 483, nr. 15.
9. Probabilistic Safety Assessment, ECN/RIVM/RGD, 1993.
10. The cost of high-level waste disposal in geological repositories; an analysis of factors affecting cost estimates, NEA/OECD, Paris, 1993.
11. The effects of gamma radiation in salt, 1996, EUR 16743 EN.
12. ICRP Publication 65, Protection against radon at home and at work, 1993.
13. The HAW-Project: "Demonstration facility for the disposal of high-active waste in salt, Synthesis Report, 1991, EUR 13263 EN.
14. EVEREST-Project, 1996, EUR 17122 EN.
15. Simulation of the effects of long-term climatic changes on groundwater flow and the safety of geological disposal sites, G.S. Boulton, F. Curle, 1997, EUR 17793 EN.
16. Advanced technologies for the reduction of nuclear waste, H. Gruppelaar, J.L. Kloosterman, R.J.M. Konings, ECN, 1998.
17. Calculation of different transmutation concepts – An international benchmark exercise; OECD/NEA 2000; ISBN: 92-64-17638-1.
18. A roadmap for developing accelerator transmutation of waste (ATW) technology, DOE/RW-0519; A Report to Congress; October 1999.
19. Concerted action on the retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories, 2000, EUR 19145 EN.

