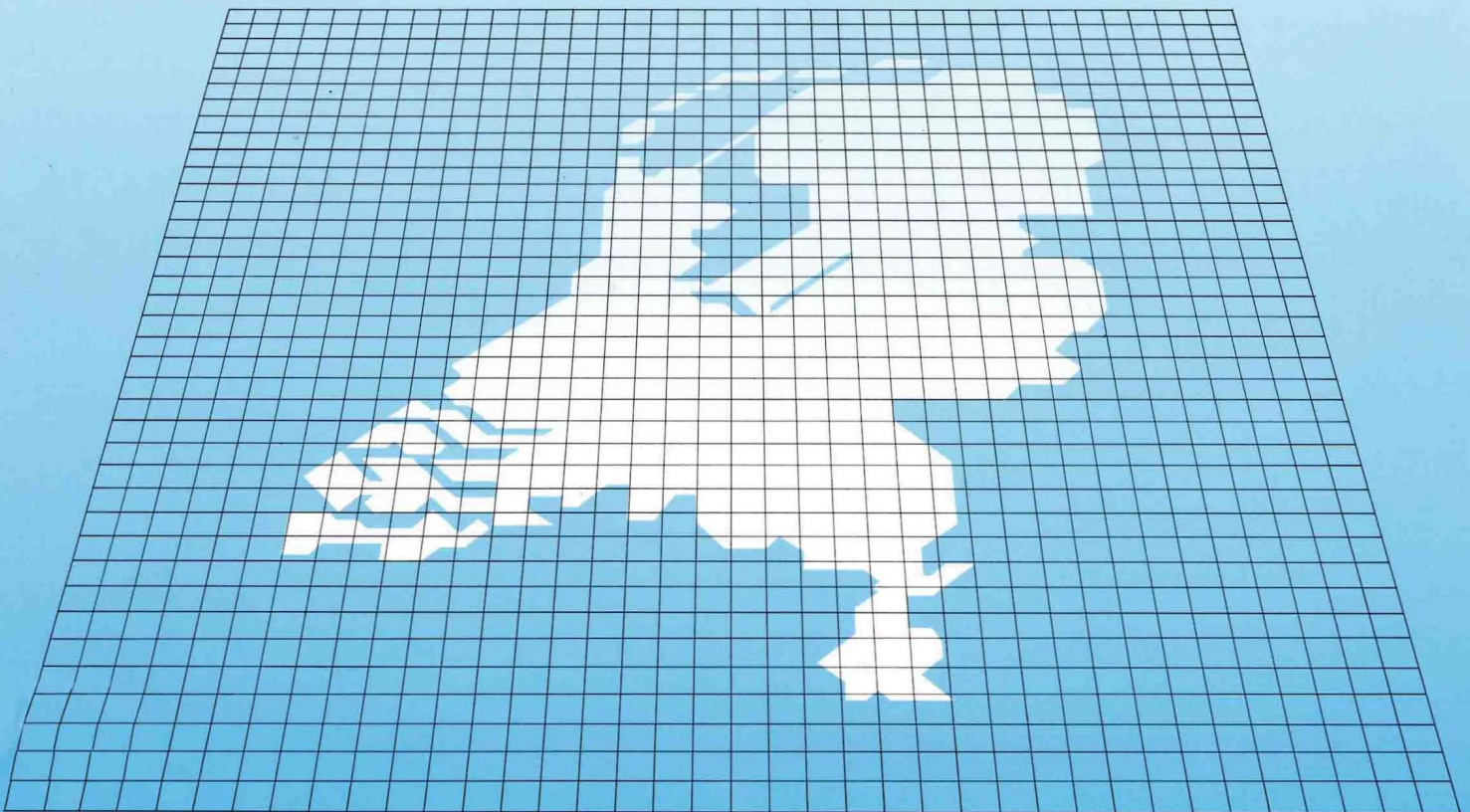
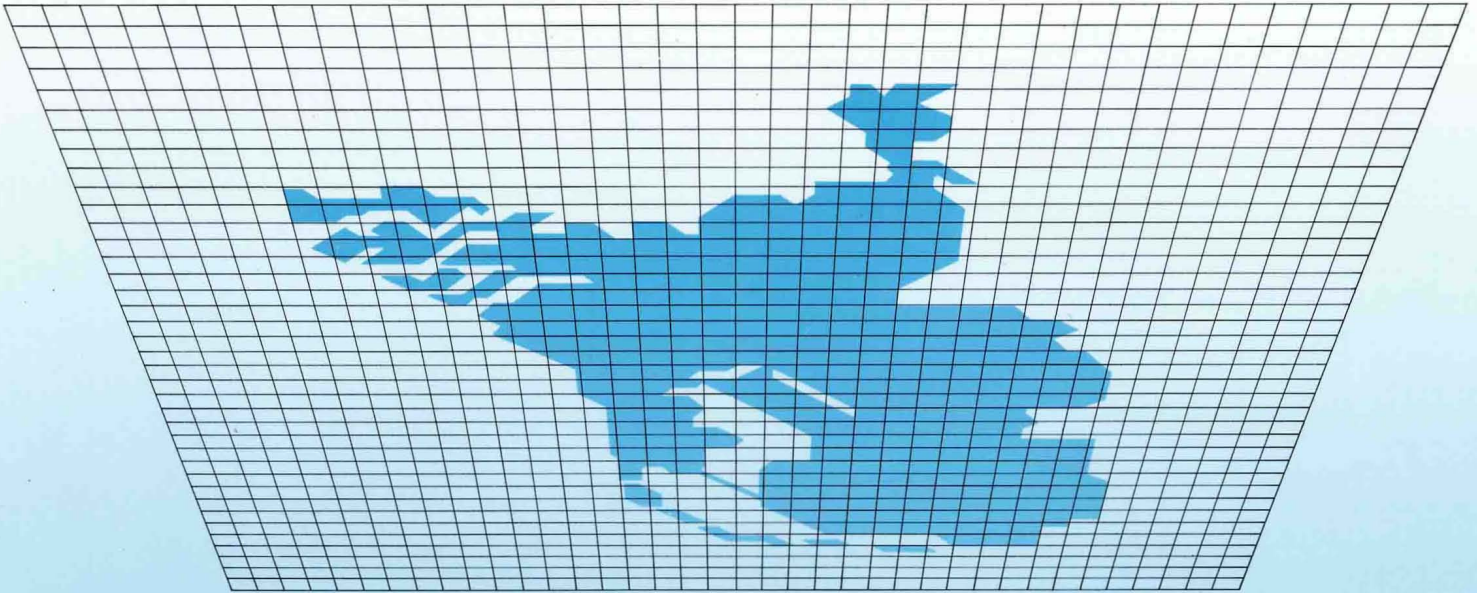


Onderzoek naar geologische opberging van radioactief afval in Nederland



Eindrapport Fase 1

Commissie Opberging te Land (OPLA)

SAMENVATTING EN CONCLUSIES

INLEIDING

Daar waar gewerkt wordt met radioactieve materialen ontstaat radioactief afval. Dit is bijvoorbeeld het geval bij laboratoria, industrie, ziekenhuizen en kerncentrales. Bij alle genoemde categorieën instellingen ontstaat *laag- en middelactief afval* dat in beperkte mate straling uitzendt en geen warmte afgeeft. Bij de kerncentrales ontstaat vloeibaar afval dat ter plaatse in vaste vorm wordt gebracht. Daarnaast is bij de kerncentrales o.a. sprake van *hoogactief afval* dat speciale zorg vereist omdat het meer straling afgeeft en een deel ervan bovendien warmte produceert.

Het verzamelen en beheren van het Nederlandse radioactieve afval is de taak van de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA NV). Deze organisatie verzamelt het laag- en middelactieve afval en slaat dit afval voorlopig op in loodsen in de gemeente Zijpe. Het hoogactieve afval van kerncentrales bestaat in eerste instantie uit gebruikte splijtstofelementen. In sommige landen worden deze als afval behandeld en opgeslagen; in andere landen, waaronder Nederland, sturen de kerncentrales deze elementen naar opwerkingsfabrieken die de nog bruikbare materialen daaruit terugwinnen. Het radioactieve afval dat na opwerking resteert, bevat de niet meer bruikbare materialen van de gebruikte splijtstofelementen. Dit afval omvat in grote lijnen een drietal categorieën.

- Kernsplijtingsafval (KSA). Dit afval bevat het merendeel van de splijtingsproducten, is hoogactief en produceert warmte. Het is in vaste, moeilijk oplosbare vorm gebracht door het te verwerken in (borosilicaat) glas. Het is verpakt in *canisters* van roestvast staal.
- Hoogactief, niet-warmteproducerend afval. Dit bevat de metalen delen van de splijtstofelementen. Het is verwerkt en verpakt in beton.
- Laag- en middelactief (niet-warmteproducerend) afval, verpakt in beton of bitumen.

Nederlandse gebruikte splijtstof wordt opgewerkt in Frankrijk en Engeland. Het radioactieve afval dat bij de opwerking ontstaat kan te zijner tijd naar Nederland worden teruggezonden.

In 1984 hebben regering en parlement besloten, dat al het Nederlandse radioactieve afval dient te worden opgeslagen in één centrale inrichting. De capaciteit daarvan dient voldoende te zijn voor het afval, dat gedurende 50-100 jaar ontstaat. Deze *interimopslag* zal worden verzorgd door COVRA die daartoe een faciliteit voorbereidt te Borsele. Na afloop van de interimopslagperiode zal in elk geval dat deel van dit afval dat na afloop van de interimopslagperiode nog als radioactief is aan te merken, definitief uit het milieu moeten worden verwijderd. In de onderha-

vige studie is ervan uitgegaan dat toekomstige generaties niet genoodzaakt dienen te zijn tot actief beheer van de opbergfaciliteit.

KADER, DOEL EN AANPAK

Genoemd besluit van regering en parlement houdt tevens in, dat gedurende de periode van interimopslag mogelijkheden voor de definitieve opberging worden onderzocht. Dit onderzoek is gebundeld in het Integraal Landelijk Onderzoek Nucleair Afval (ILONA). Dit omvat naast het onderhavige onderzoek inzake geologische opberging in de *diepe ondergrond* onder het vaste land (het OPLA-programma) ook onderzoek naar andere opties, zoals opberging in sedimenten van diepe oceaانبodems en opberging in het kader van een internationaal of bilateraal samenwerkingsverband.

Het OPLA-programma werd in 1984 door de Studiecommissie OPLA opgesteld en door de Beleidscommissie ILONA aan de regering aangeboden met het advies tot uitvoering van de eerste fase. In september 1984 heeft de regering daartoe besloten en na het aanbrengen van enkele wijzigingen heeft de Tweede Kamer daarmee begin 1985 ingestemd. Het onderhavige rapport vormt, na twee tussentijdse rapporten, het eindverslag over deze fase.

Van regeringswege werd tevoren aan dit programma een tweetal randvoorwaarden opgelegd. In de eerste plaats diende het OPLA-onderzoek in een aantal fasen te worden opgedeeld, zodat aan het einde van elke fase regering en parlement zich opnieuw zouden kunnen uitspreken over een mogelijke voortzetting van het onderzoekprogramma. In de tweede plaats diende de eerste fase van dit programma geen veldwerkzaamheden te omvatten.

Dit programma van onderzoek is gericht op mogelijkheden van opberging in steenzoutvoorkomens van een aard en omvang, zoals die op grond van de thans beschikbare informatie in de Nederlandse ondergrond aanwezig worden geacht. Dit is conform het programmavoorstel van 1984, waarin de keuze om het onderzoek op steenzout te richten, gemotiveerd werd door:

- het voorkomen van steenzout onder grote delen van Noord- en Oost-Nederland;
- de vele aantrekkelijke eigenschappen van dit gesteente in relatie tot definitieve opberging van radioactief afval;
- aanwezigheid van ruime ervaring met mijnbouwactiviteiten in dit gesteente, vooral in de Bondsrepubliek Duitsland.

Hierbij zij opgemerkt dat in België, waar slechts dunne lagen steenzout voorkomen, omvangrijk onderzoek wordt

verricht aan klei als mogelijk opberggesteente. Dit onderzoek vindt in een ondergronds laboratorium plaats, gevestigd in een kleilaag die zich ook onder Nederland voortzet.

In overeenstemming met het bovenstaande luidt de taakstelling van de eerste fase van het OPLA-onderzoek als volgt: het verwerven van kennis en inzicht omtrent de mogelijkheid tot de definitieve en veilige opberging van radioactief afval met behulp van thans beschikbare mijnbouwkundige technieken in steenzoutformaties van een aard en omvang, zoals die met grote mate van waarschijnlijkheid in de Nederlandse ondergrond voorkomen.

Deze verwerving van kennis en inzicht vond plaats door middel van laboratoriumonderzoek, literatuurstudie, modelberekeningen en deelname aan buitenlandse en internationale onderzoeken. Een aantal van de tot fase 1 behorende onderzoeksprojecten maakt tevens deel uit van het derde programma van de Europese Gemeenschappen inzake onderzoek op het gebied van beheer en opslag van radioactief afval. In dit verband kan onder andere gewezen worden op de Nederlandse deelname aan het in situ onderzoek in de Asse-mijn in de Bondsrepubliek Duitsland, en aan de Europese veiligheidsstudies PAGIS (Performance Assessment of Geological Isolation Systems) en PACOMA (Performance Assessment of Confinement of Medium-level and Alpha bearing waste). Via dit derde programma dragen de Europese Gemeenschappen bij in de kosten van het OPLA-programma. Voorts vindt op diverse wijzen een intensieve internationale uitwisseling van onderzoeksresultaten plaats, waarbij ook Nederland actief betrokken is.

Voor zover bij de bovengenoemde modelberekeningen gebruik gemaakt is van gegevens betreffende geologische verschijnselen met een locatiespecifiek karakter zoals omvang, diepteligging en stijgsnelheid van de zoutstructuren of omtrent doorlatendheidswaarden voor grondwater van afdekkende lagen, betrof het openbaar toegankelijke gegevens met betrekking tot de Nederlandse ondergrond.

INHOUD EN STRUCTUUR VAN HET ONDERZOEK

Het onderzoek van fase 1 had betrekking op drie typen steenzoutvoorkomens, te weten: pijlers, kussens en voorkomens met gelaagd zout. Voor elk van deze drie is gewerkt met een schematisch model, dat representatief is voor hetgeen in de Nederlandse ondergrond verwacht mag worden. Deze modellen zijn opgesteld als onderdeel van het geologische en *geohydrologische* onderzoek.

Wat betreft de *opbergtechnieken* zijn de *droge mijnteknik* en een combinatie van diepe boorgaten (voor hoog-

actief afval) en twee typen *stortholten* (voor laag- en middelactief afval) in beschouwing genomen. Voorontwerpen voor de toepassing van deze technieken in de beschouwde typen steenzoutvoorkomens zijn opgesteld in het mijnbouwkundige onderzoek.

Daarbij zijn drie afvalstrategieën beschouwd, die model kunnen staan voor de huidige situatie (a) of voor mogelijke toekomstige situaties (b, c). Bij alle daarbij beschouwde afvalstromen is ervan uitgegaan dat de hoeveelheid laag- en middelactief afval die jaarlijks ontstaat bij ziekenhuizen, laboratoria en industrie, op het niveau van 1984 blijft. De afvalstromen onderscheiden zich van elkaar door verschillen in opgesteld nucleair vermogen voor de opwekking van elektriciteit en in duur van de interimopslag van het afval:

- a. bestaande kerncentrales en een interimopslagduur van minimaal 50 jaar;
 - b. uitbreiding van het nucleair vermogen met een gezamenlijk vermogen van 3000 MWe, interimopslagduur minimaal 50 jaar;
 - c. zoals b, echter met een interimopslagduur van 10 jaar.
- Een voorontwerp, uitgewerkt voor een bepaald type steenzoutvoorkomen bij een bepaalde afvalstrategie, wordt aangeduid als *opbergconcept*. In fase 1 zijn 21 opbergconcepten betrokken.

Het centrale thema bij dit onderzoek was de stralingshygiënische veiligheid die de beschouwde opbergconcepten voor de lange termijn bieden. Met het oog daarop is nagegaan, welke ontwikkelingen van belang zijn voor de isolatie van opgeborgen afval en welke effecten deze kunnen hebben. In dat verband is aandacht besteed aan het gedrag van steenzout onder druk en verhoging van temperatuur, het effect van *ioniserende straling* op steenzout, de rol van inhomogeniteiten in steenzoutvoorkomens, het ontwikkelen van modellen met betrekking tot grondwaterstroming en transport van *radionucliden* in de lagen rondom en boven de verschillende typen zoutvoorkomens. Voorts zijn de beschikbare mijnbouwkundige technieken bestudeerd en in relatie tot hoge eisen van langdurige isolatie van opgeborgen afval tegen elkaar afgewogen. Cruciale technische aspecten zoals afdichtingen, *achterloopsheid* van boorgaten (lekkage langs de buitenzijde van een boorgatbekleding), *convergentie* (dichtkruipen) van in het zout aangelegde holruimten, kwamen in deze studie nadrukkelijk aan de orde. Bij het opstellen van voorontwerpen voor de mijnbouwkundige vormgeving is, in overeenstemming met het programma-ontwerp van 1984, met betrekking tot de terugneembaarheid van opgeborgen afval het uitgangspunt gehanteerd, dat daar waar voorzieningen ten behoeve van langdurige terugneembaarheid strijdig zouden zijn met het streven naar langdurige isolatie van het afval, dit laatste prevaleert.

Bovengenoemde aspecten zijn in fase 1 bestudeerd in een twintigtal studies en onderzoeken. De uitvoerende onderzoeksinstituten hebben hun bevindingen neergelegd in 26 rapporten [OPLA 1 t/m 26]. Het onderhavige rapport is gebaseerd op de informatie die in deze rapporten is verval.

In dit geheel vormt de veiligheidsstudie het centrale, verbindende element. Vele van de overige studies en onderzoeken leverden gegevens en rekenmodellen, die op uiteenlopende terreinen nodig waren voor de veiligheidsstudie. Het doel van de veiligheidsstudie was na te gaan onder welke omstandigheden radionucliden, afkomstig van het opgeborgen afval, in de *biosfeer* terecht kunnen komen en wat daarvan de gevolgen zouden kunnen zijn. Teneinde deze omstandigheden in beeld te brengen als basis voor de verdere berekeningen, zijn *scenario's* ontwikkeld, welke tot vrijgave van ioniserende straling aan de biosfeer kunnen leiden. Voor elk van deze scenario's is vervolgens berekend, tot welke stralingsdoses het opbergen van radioactief afval in steenzoutformaties volgens de beschouwde opbergconcepten in de toekomst zou kunnen leiden. Voor situaties die tot een hoge *dosis* zouden kunnen leiden is bovendien de kans van optreden in beschouwing genomen. Voorts is bepaald, in welke tijdvakken de berekende doses kunnen optreden.

Dit werd niet alleen gedaan onder de aanname dat de beschouwde processen en gebeurtenissen zich voltrekken zoals verwacht, maar ook onder aannamen van afwijken van de of onwaarschijnlijke, desalniettemin niet ondenkbare, natuurlijke processen zoals lekkage langs scheuren, breuken of doorlatende lagen in het steenzout (b.v. *anhydriet*-banken) en het binnendringen van pekels in de opberging vanuit een in het zout aanwezige, bij de geologische verkenning niet-ontdekte, pekelsluiting. Ook werd rekening gehouden met ingrijpende geologische veranderingen zoals de gevolgen van het optreden van ijstijden. Deze scenario's zijn opgesteld vanuit de overweging dat – afgezien van plotselinge gebeurtenissen – beweging van grondwater (of pekels = een verzadigde oplossing van zout in water) en de opwaartse beweging van zout (*diapirisme*) de belangrijkste verschijnselen zullen zijn die transport van radionucliden in de ondergrond mogelijk maken.

Daarnaast zijn scenario's opgesteld, uitgaande van de mogelijkheid dat de isolatie van het opgeborgen afval zou worden verminderd of tenietgedaan door plotselinge optredende gebeurtenissen, zoals menselijk ingrijpen, aardbevingen, meteorietinslag, enzovoort. Mede op grond van literatuuronderzoek is vastgesteld, dat voor de in de onderhavige studie beschouwde opbergconcepten de mogelijkheid van toekomstig menselijk handelen binnen deze categorie scenario's als maatgevend is te beschouwen.

Voor elk scenario is berekend welke doses maximaal kunnen optreden bij de beschouwde afvalhoeveelheden en

opbergconcepten. Deze berekeningen gaan uit van de veronderstelling dat de scenario's met 100% zekerheid optreden. Deze berekeningswijze wordt *deterministisch* genoemd. Indien ook de (geschatte) kans van optreden wordt meegenomen, kunnen risico's worden bepaald. Risico wordt daarbij gedefinieerd als product van gevolg, in dit geval dus de dosis, en de kans daarop. In fase 1 is in principe de deterministische benadering gevolgd. Voor scenario's waarbij een hoge dosis mogelijk is, maar waarvan de kans van optreden gering is, levert deze benadering echter een sterk vertekend beeld. In zulke gevallen is daarom toch ook de kans van optreden beschouwd.

Ten behoeve van de berekeningen van de mogelijke gevolgen (de dosisberekeningen) van de opgestelde scenario's was het nodig, deze scenario's in detail te beschrijven. Zowel voor deze detaillering als voor de uitvoering van de dosisberekeningen zelf was een groot aantal gegevens nodig, alsmede verdieping van inzicht op de volgende terreinen:

- *Geologie*: eigenschappen en gedrag van steenzoutvoorkomens, alsmede van de gesteenten die voorkomen in de afdekkpakketten boven en rondom de steenzoutvoorkomens;
- *Geohydrologie*: bewegingspatronen en snelheden van grondwater en het daarmee samenhangende transport van radionucliden in de gesteentelagen boven en rondom steenzoutvoorkomens;
- *Gesteentemechanica*: lange-termijngedrag van steenzout met betrekking tot spanningen en vervormingen;
- *Stralingseffecten*: veranderingen en energie-opslag in steenzout als gevolg van straling;
- *Mijnbouwkunde*: mijnbouwtechnische voorzieningen, nodig om radioactief afval in steenzout op te kunnen bergen.

Daarnaast waren uiteraard gegevens nodig met betrekking tot de eigenschappen van het afval zelf, zoals het verloop van de *radioactiviteit*, de warmteproductie en de stralingsintensiteit aan het oppervlak van het afval als functie van de tijd, alsmede de uitlooeigenschappen.

Voorts vereisten deze berekeningen de beschikbaarheid van rekenmodellen voor bepaling van temperatuurverdeling, spanningen en vervormingen van steenzoutformaties, voor het transport van radionucliden door de opbergfaciliteit en het steenzout, voor het transport van radionucliden met het grondwater door de omringende gesteentelagen en tenslotte voor verspreiding ervan in de biosfeer en de berekening van stralingsdoses voor de mens.

Op de aangegeven aandachtsterreinen is daarom in het kader van fase 1 een aantal ondersteunende onderzoeken uitgevoerd die de benodigde invoergegevens hebben geleverd, evenals een deel van de gebruikte rekenmodellen. De overige gebruikte rekenmodellen waren voor de aanvang van fase 1 reeds beschikbaar bij de uitvoerende on-

derzoekinstellingen of werden ten behoeve van dit onderzoek in het kader van de internationale samenwerking op dit gebied overgenomen van buitenlandse instellingen. Aan controle op de betrouwbaarheid en toepasbaarheid van de gebruikte rekenprogramma's is de nodige aandacht besteed. Daartoe is o.a. deelgenomen aan internationale modelvergelijkings- en -toetsingsstudies.

RESULTATEN

In de onderstaande zes paragrafen zijn de belangrijkste resultaten van het uitgevoerde onderzoek bijeengebracht. Achtereenvolgens komen daarbij aan de orde: Veiligheidsstudie, Geologisch onderzoek, Geohydrologisch onderzoek, Gesteentemechanisch onderzoek, Onderzoek naar stralingseffecten, Mijnbouwkundige studies.

RESULTATEN VAN DE VEILIGHEIDSTUDIE

In de veiligheidsstudie [OPLA 1] is nagegaan of er bij het opbergen van radioactief afval met behulp van de thans beschikbare mijnbouwtechnieken in typen steenzoutvoorkomens welke voorkomen in de Nederlandse ondergrond *radiologische effecten* voor de mens zouden kunnen optreden. Deze radiologische effecten zijn berekend in termen van doses en voor sommige situaties die hoge doses tot gevolg kunnen hebben ook in termen van gezondheidsrisico's. De berekeningen zijn op deterministische wijze uitgevoerd, waarbij gebruik is gemaakt van internationaal aanvaarde benaderingen, rekenmethoden en computerprogramma's.

In de veiligheidsstudie zijn de verschillende processen en verschijnselen afzonderlijk en in combinatie met elkaar beschouwd. Hieruit is afgeleid welke grootheden relatief grote invloed hebben op de veiligheid van de beschouwde opbergconcepten. De belangrijkste conclusies hieromtrent worden behandeld aan de hand van een indeling van de processen en verschijnselen welke samenhangt met de oorsprong ervan: de natuur, het afval of de mens.

Natuurlijke verschijnselen

Uit de studie is gebleken dat diapirisme en *subrosie* de belangrijkste processen zijn die op de lange duur zouden kunnen leiden tot aantasting van een veiligheidsbarrière die door de zoutformatie wordt gevormd. Dit geldt met name voor *zoutpijlers* en *zoutkussens*; voor *zoutlagen* zijn deze processen minder belangrijk. De berekeningen laten zien dat de processen diapirisme en subrosie tenminste honderdduizend jaar nodig hebben om de isolerende functie van de zoutformatie te kunnen laten verdwijnen. In het desbetreffende scenario A kunnen pas nadien radionucliden uit het afval in het grondwater terechtkomen. Afhankelijk van de diepte waarop de radionucliden in het grond-

water komen, kunnen deze vervolgens na honderden tot miljoenen jaren het aardoppervlak bereiken. Bij een extreem lage intensiteit van subrosie is het mogelijk dat het afval na enkele miljoenen jaren, zonder tussenkomst van het grondwater, aan het aardoppervlak terecht komt (scenario G). De kans hierop is echter gering. De individuele doses die eventueel aanwezige mensen als gevolg van deze scenario's kunnen ontvangen bereiken de maximale waarden tussen één en vier miljoen jaar na opberging. Deze maxima variëren over de beschouwde opbergconcepten en afvalstrategieën. De hoogste berekende waarde bedraagt hierbij 40×10^{-6} Sv/j, dat wil dus zeggen ten hoogste enkele procenten van de doses die mensen ontvangen als gevolg van de natuurlijke achtergrondstraling. Vooral de diapirismesnelheid en, in mindere mate, de opbergdiepte zijn van belang voor de hoogte van de doses en het tijdstip waarop deze optreden.

Door het afval veroorzaakte verschijnselen

Door het aanleggen van de opbergfaciliteit en door het afval dat hierin wordt opgeborgen verandert de natuurlijke toestand in de zoutformatie. Dit wordt veroorzaakt door de mechanische en thermische belasting en de straling. Geconcludeerd is dat de intensiteit van deze processen te gering is om het *zoutschild* rondom de opbergfaciliteit te doorbreken. Het is niet uitgesloten dat een eventueel aanwezige en niet-ontdekte waterdoorlatende laag in de zoutformatie door de genoemde belastingen watervoerend wordt, waardoor water of pekels in de opbergfaciliteit kan binnendringen. Door de gesteentedruk en het kruipgedrag van zout zal deze pekels die door het afval besmet kan worden na verloop van tijd uit de zoutformatie worden geperst (scenario D). Uit de analyses van dit scenario is gebleken dat er al na enkele honderden jaren radionucliden uit de zoutformatie in het grondwater kunnen komen. Afhankelijk van de dikte en de kwaliteit van het afdekkpakket duurt het vervolgens nog enige duizenden tot enkele tienduizenden jaren voordat de radionucliden het aardoppervlak bereiken. Na ongeveer tienduizend jaar komen er geen radionucliden meer uit de zoutformatie, daar alle volgelopen ruimten dan uitgeperst zijn.

De individuele dosis die eventueel aanwezige mensen kunnen ontvangen, bereikt voor een opbergmijn een maximale waarde van 7×10^{-8} Sv/j in een pijler met een dun en slecht afdekkpakket en 1×10^{-9} Sv/j voor een kussen met een dik afdekkpakket. Voor diepe boorgaten bedragen de maximale waarden voor de beschouwde *formatietypen* respectievelijk 5×10^{-6} en 10×10^{-6} Sv/j. Deze maximale waarden treden niet eerder op dan honderdduizend jaar na voltooiing van de opbergwerkzaamheden. Deze doses kunnen omlaag worden gebracht door dieper op te bergen en door een formatie te kiezen met een beter afdekkpakket, d.w.z. met een geringere waterdoorlatendheid.

Door de mens veroorzaakte verschijnselen

De geologische barrières, gevormd door de zoutformatie en het afdekkpakket, kunnen in de toekomst bewust of onbewust door menselijk ingrijpen worden beschadigd of vernield. De mogelijkheden hiertoe en de omstandigheden waaronder dit kan gebeuren zijn vooraf moeilijk in detail te bepalen. Om een indicatie van de radiologische effecten van menselijk ingrijpen te verkrijgen zijn vier verschillende scenario's bekeken die hiervan uitgaan. Uit de resultaten blijkt dat zeer hoge doses kunnen optreden als mensen na enige honderden jaren in direct contact komen met het hoogactieve afval (ca. 90 Sv na 250 jaar). Indien er nog enige bescherming rondom het afval blijft bestaan, of indien er vóór blootstelling nog verdunning optreedt, resulteren lage tot zeer lage doses (maximaal 3×10^{-5} Sv/j). Omdat voor een juiste beoordeling van de gevolgen niet alleen de dosis maar ook de kans van optreden van belang is, is een schatting gegeven van deze kans voor situaties waarin zich extreem hoge doses kunnen voordoen. Hierbij is gebleken dat voor alle beschouwde scenario's het maximale individuele overlijdensrisico (hier benaderd als het product van kans van optreden van het scenario, dosis, en overlijdensrisico per eenheid van dosis) binnen de beschouwde criteria en aanbevelingen blijft. Uit de studie is overigens geconcludeerd dat dit risico zou kunnen worden verkleind door een grotere opbergdiepte toe te passen. De resultaten van deze berekeningen geven aldus een goede indicatie van de risico's die samenhangen met de mogelijkheid van menselijk ingrijpen. Aangezien echter niet geheel zeker is dat de beschouwde scenario's onder alle omstandigheden een bovengrens van deze risico's vertegenwoordigen, is nadere studie met betrekking tot dit aspect gewenst.

Overzicht van berekende radiologische gevolgen van opberging in steenzout

Tabel 0, op bladzijde 14, geeft een overzicht over de resultaten van de dosisberekeningen, uitgevoerd voor afvalstrategieën b en c. Strategie a heeft betrekking op een geringere hoeveelheid afval en leidt daardoor tot geringere doses dan wel lagere kansen van voorkomen van scenario's.

Toelichting: Bij alle beschouwde scenario's zijn de doses direct na opberging gelijk aan nul. Deze toestand blijft bij de bovengenoemde scenario's gedurende lange tijd ongewijzigd. Daarna zullen de doses geleidelijk toenemen tot maximaal de in de tabel genoemde waarden, om vervolgens weer af te nemen. Het tempo waarin dit gebeurt verschilt per scenario. In de tabel zijn de genoemde maxima (in sievert/jaar) aangegeven. Indien bijvoorbeeld een mijn die in een zoutpijler is aangelegd zou vollopen, zal de dosis niet hoger worden dan 7×10^{-8} Sv/jaar.

De bovenstaande radiologische gevolgen zijn berekend in termen van doses. Voor een enkele situatie (scenario H) waarin hoge doses kunnen optreden is bovendien de blootstellingskans geschat, zodat een indicatie van het gezondheidsrisico kan worden gegeven. Die indicatie is verkregen door deze blootstellingskans te vermenigvuldigen met het individuele overlijdensrisico dat verbonden is aan de in de tabel voor scenario H gegeven dosis. Ter vergelijking zijn ook voor de andere scenario's indicaties van dit risico bepaald. Daarbij is ervan uitgegaan dat de blootstellingskans bij deze scenario's gelijk aan 1 is. Dit is voor bepaalde scenario's een ruime overschatting. De risico-indicaties zijn nu verkregen door vermenigvuldiging van de doses met het overlijdensrisico per eenheid van dosis (10^{-2} /Sv).

Figuur 0, op bladzijde 15, geeft een schematisch overzicht van de berekende risico-indicatie.

De berekende doses zijn vergeleken met in het buitenland gehanteerde dosislimieten; de risico's met in het buitenland gehanteerde en in een bijlage van het Indicatief Meerjaren Programma Milieu 1986-1990 (IMPM) van het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM) voorgestelde risicolimieten.

Bij deze vergelijking is gebleken dat de doses die berekend werden voor de opbergconcepten die uitgaan van beschouwde opbergtechnieken, formatietypen en hoeveelheden afval (strategieën a, b, c) beneden de gehanteerde dosislimieten liggen. Een uitzondering hierop vormt scenario H, waarin hoge doses mogelijk zijn. De kans hierop is echter uiterst gering, als gevolg waarvan het risico dat met dit scenario samenhangt, ruim beneden de in het IMPM voorgestelde onaanvaardbaarheidsgrens ligt. Hetzelfde geldt voor de andere beschouwde scenario's: de gegeven risico-indicaties liggen alle beneden de onaanvaardbaarheidsgrens van het IMPM.

Conclusies en aanbevelingen m.b.t. de veiligheidsstudie

Beoordeeld op grond van de huidige inzichten en informatie kan met betrekking tot de opbergtechnieken en formatietypen het volgende worden geconcludeerd.

- Alle berekende doses en risico's liggen lager dan de gehanteerde dosis- resp. risicolimieten.
- De verschillen tussen de berekende maximale doses voor de beschouwde formatietypen zijn niet erg groot en vallen binnen de betrouwbaarheid van de berekeningen. Indien men zou willen nagaan in hoeverre de beschouwde formatietypen een duidelijk verschillende isolatie van het radioactieve afval mogelijk maken, zou een nadere analyse, gebaseerd op meer informatie, nodig zijn.

- Bij opberging in een zoutpijler of een zoutkussen leiden de scenario's betreffende menselijk ingrijpen tot de hoogste berekende doses. Deze doses zijn voor beide formatietypen gelijk. Het geschatte risico dat met deze doses samenhangt, ligt binnen de gehanteerde limieten. Bij opberging in een zoutlaag is de kans op menselijk ingrijpen naar verwachting kleiner dan bij opberging in de andere beschouwde formatietypen.
- Met betrekking tot de beschouwde opbergtechnieken is geconcludeerd dat een opbergmijn een betere isolatie van het warmte-ontwikkellende kernsplijtingsafval

mogelijk maakt dan diepe boorgaten. De verschillen in isolatie van de beschouwde opbergmogelijkheden voor het laag- en middelactieve afval zijn vrij klein.

Op grond van de uitgevoerde analyses is inzicht verkregen in de processen en verschijnselen welke voor de veiligheid van belang zijn. Dit inzicht is verkregen door een deterministische aanpak van de veiligheidsstudie. Verdere verdieping daarvan is mogelijk door enerzijds een nadere deterministische analyse van de belangrijkste processen, en anderzijds door een probabilistische analyse van het totale opbergsysteem uit te voeren. Deze probabilistische

Tabel 0: Overzicht van de resultaten van de dosisberekeningen. De berekende doses zijn uitgedrukt in Sv/j (ter vergelijking: de doses t.g.v. de achtergrondstraling bedragen 1×10^{-3} à 2×10^{-3} Sv/j).

Scenario's betreffende natuurlijke verschijnselen en het afval					
OPBERGCONCEPT	Pijler		Kussen		Laag
	mijn	dbg	mijn	dbg	dbg
Scenario					
A. Diapirisme en subrosie	10^{-7}	5×10^{-8}	3×10^{-8}	3×10^{-8}	n.v.t.
B. Pekelmigratie	-	-	-	-	-
C. Thermomech. scheuren	-	-	-	-	-
D. Onderlopen	7×10^{-8}	n.v.t.	10^{-9}	n.v.t.	n.v.t.
E. Grote pekelbel	$< 7 \times 10^{-8}$	5×10^{-6}	$< 10^{-9}$	3×10^{-8}	$< 10^{-7}$
F. Achterloopsheid	n.v.t.	$< 5 \times 10^{-6}$	n.v.t.	10^{-5}	10^{-5}
G. Diapirisme in biosfeer	10^{-5}	10^{-5}	4×10^{-5}	4×10^{-5}	n.v.t.

Scenario's betreffende menselijk ingrijpen			
		Maximale dosis (Sv/j)	
		na 250 jaar	na 1000 jaar
Scenario			
H. Verkenningsboring		92 *	24 *
I. Natte zoutwinning		8×10^{-5}	3×10^{-5}
J. Lekkende caverne	pijler	3×10^{-7}	1×10^{-7}
	kussen	3×10^{-9}	1×10^{-9}
K. Droge mijnbouw		2×10^{-5}	2×10^{-7}

* N.B.: De kans van optreden van deze hoge dosis is zeer gering: $2 \times 10^{-9}/j$ à $60 \times 10^{-9}/j$.

Toelichting:

Zoutvoorkomens:

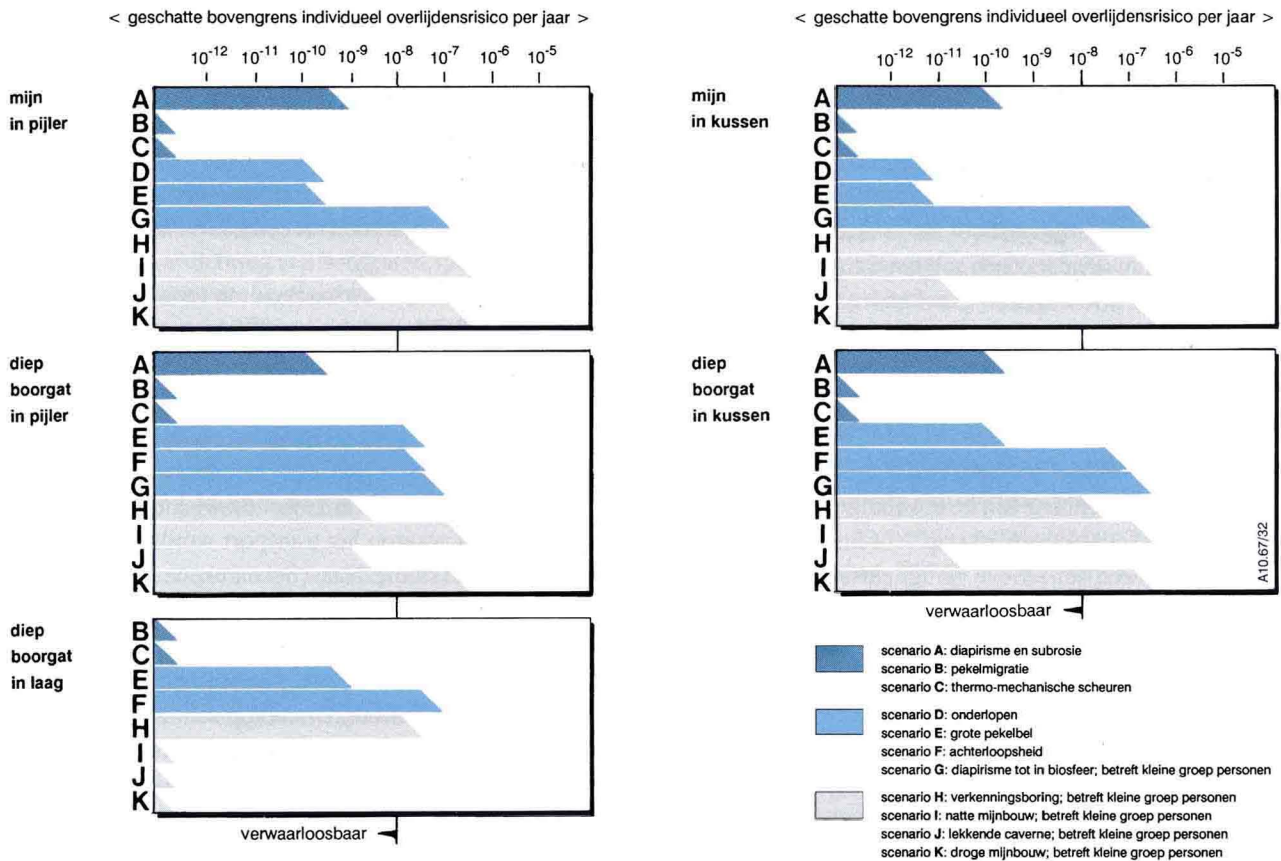
- Pijler : Zoutpijler met een dun afdekpakket (230 m) waarin een breuk voorkomt.
- Kussen: Zoutvoorkomen met een dik afdekpakket (800 m) waarin een breuk voorkomt.
- Laag : Gelaagd zoutvoorkomen met een (1200 m) dik afdekpakket.

Opbergtechnieken:

- Mijn : Droge conventionele mijn.
- Dbg : Diepe boorgaten vanaf het aardoppervlak, gecombineerd met stortholten (cavernen).

Afvalstrategieën:

- Strategie a: Capaciteit van de interimopslag voldoende voor het afval van de kerncentrales Borssele en Dodewaard plus het afval van ziekenhuizen, laboratoria, enz. Interimopslagduur 50 j.
- Strategie b: Als a, vermeerderd met het afval van 30 jaar bedrijf van twee nieuwe kerncentrales met een gezamenlijk vermogen van 3000 MWe.
- Strategie c: Als b, echter met een interimopslagduur van 10 jaar.



Figuur 0 : Geschatte bovengrens van individuele overliedensrisico's per jaar voor de beschouwde scenario's en opbergconcepten.

analysemethode kan ontwikkeld worden met behulp van de inzichten uit de onderhavige en buitenlandse studies.

RESULTATEN VAN HET GEOLOGISCH ONDERZOEK

In fase 1 zijn 38 zoutvoorkomens geïnventariseerd [OPLA 12], te weten:

- 19 zoutpijlers;
- 15 zoutkussens;
- 4 gebieden met gelaagd zout.

De geologische opbouw van het afdekkpakket ter plaatse van de geïnventariseerde zoutvoorkomens is voor de ondiep gelegen gesteentelagen (*Kwartair* en deel van *Tertiair*) goed bekend. Omtrent de dieper gelegen lagen (*Krijt, Jura, Trias*) is minder informatie beschikbaar maar het gegevensbestand kan voor het doel van fase 1 wel als toereikend worden beschouwd.

Op basis van de beschikbare gegevens is voor elk van de geïnventariseerde zoutvoorkomens een schematisch geologisch *profiel* samengesteld. Daaruit blijkt dat de diepte van de top van het homogene steenzout varieert van ca. 170 m voor de meest ondiep gelegen zoutpijler tot ca. 2200 m voor de diepst gelegen zoutlaag. De dikte varieert van enkele honderden tot enkele duizenden meters. Met

uitzondering van een zevental kleinere zoutvoorkomens (voornamelijk zoutkussens) is de omvang van de geïnventariseerde zoutvoorkomens voldoende om er een opbergfaciliteit in onder te brengen.

De inwendige structuur van de individuele zoutvoorkomens is doorgaans niet bekend. Dit geldt met name voor zoutpijlers. Op basis van regionale geologische inzichten is een verwachting aangegeven m.b.t. het voorkomen van inhomogeniteiten in het zout.

Rekening houdend met de beschikbare gegevens en bovengenoemde inzichten m.b.t. de Nederlandse ondergrond is, ten behoeve van de verdere berekeningen die in fase 1 zijn uitgevoerd voor elk van de drie beschouwde formatietypen (pijler, kussen, laag), een schematisch model opgesteld dat representatief is voor hetgeen in de Nederlandse ondergrond verwacht mag worden.

De stijgsnelheid van het grensvlak tussen een zoutvoorkomen en de bovengelegen laag (uitwendige stijgsnelheid) is gelijk aan de snelheid waarmee zout van onderaf wordt toegevoerd (inwendige snelheid), verminderd met de snelheid waarmee de zoutdikte afneemt als gevolg van oplossing van zout aan de top van het zoutvoorkomen in grondwater (subrosiesnelheid). De inwendige stijgsnelheid die bepalend is voor de stijging van een in het zout aangelegde opbergfaciliteit is in het geologische onder-

zoek benaderd door bij de waargenomen uitwendige stijgsnelheid de geschatte subrosiesnelheid op te tellen. De maximale uitwendige stijgsnelheid, die gemiddeld over de afgelopen 400.000 à 500.000 jaar voor enkele zoutvoorkomens is waargenomen, bedraagt 0,25 mm/j. Vele, met name dieper gelegen zoutvoorkomens, vertonen een uitwendige stijgsnelheid die 10 à 100 maal lager is. Rekening houdend met een subrosiesnelheid van ca. 0,15 mm/j, zal de inwendige stijgsnelheid, gemiddeld over het oppervlak van de horizontale doorsnede en gemiddeld over de genoemde periode, ten hoogste 0,4 mm/j geweest zijn.

Ontsluiting van een zoutvoorkomen is noodzakelijk voor een goede verkenning van de inwendige structuur en is in dat verband een onmisbare stap voordat tot een definitief ontwerp en een definitieve veiligheidsevaluatie voor een opbergfaciliteit kan worden gekomen [OPLA 13].

RESULTATEN VAN HET GEOHYDROLOGISCH ONDERZOEK

Met behulp van de beschikbare geohydrologische gegevens over Noord- en Oost-Nederland zijn voor de 38 aanwezige zoutvoorkomens schematische geohydrologische *profielen* van de afdekkende gesteentelagen samengesteld [OPLA 16]. De profielen bevatten gegevens over de doorlatendheid en *porositeit* van de afzettingen boven en naast zoutvoorkomens. Op grond van de geologische ontwikkelingen die in het verleden in Noordoost-Nederland hebben plaatsgevonden, was het mogelijk de extreme hydrologische condities aan te geven die wellicht in de toekomst boven een opberglocatie zouden kunnen optreden. De gegevens uit de profielen, alsmede de hydrologische randvoorwaarden, vormen belangrijke invoergegevens voor de modellen van de veiligheidsstudie. De geohydrologische inventarisatie toont aan dat het grondwatersysteem voortdurend aan veranderingen onderhevig is. IJstijden en daarmee samenhangende verschijnselen zijn van dominante invloed. De schaarse grondwateranalyses tonen aan dat plaatselijk oplossing van steenzout (subrosie) optreedt of is opgetreden. Deze gegevens laten geen conclusies toe over de snelheid van subrosie van de individuele zoutvoorkomens. Uitsluitend lokaal onderzoek naar de samenstelling van het grondwater kan hierin overigens verbetering brengen. Wel was het mogelijk met behulp van deze gegevens een bovengrens voor de subrosiesnelheid te bepalen.

Ten behoeve van transportberekeningen van radionucliden door de ondergrond is in het kader van fase I het model METROPOL ontwikkeld en toegepast in de veiligheidsberekeningen [OPLA 18]. Dit model berekent de verplaatsing van radionucliden door de ondergrond, waarbij het radioactief verval en de vertraging als gevolg van

geochemische processen worden meegenomen. Zonodig kan worden bepaald welk effect toeneming van de dichtheid, als gevolg van grote concentraties opgeloste zouten, heeft op de grondwaterstroming. Het computermodel METROPOL is derhalve in het bijzonder geschikt voor de berekening van de verspreiding van radionucliden door de ondergrond na vrijkomen uit een zoutvoorkomen.

Controle op de betrouwbaarheid en toepasbaarheid van het METROPOL-model is in 1985 in gang gezet en voor een groot deel uitgevoerd binnen de internationale HYDROCOIN-studie. De HYDROCOIN-studie is erop gericht, aan te tonen dat met modelberekeningen de grondwaterbeweging in en rond opberggesteenten kan worden beschreven. Daartoe zijn zowel de wiskundige aspecten als de manier waarop het transport wordt gemodelleerd onderwerp van studie. Naast het narekenen van resultaten van laboratoriumexperimenten zijn ook de grondwaterstromingen nagerekend in enkele gebieden die overeenkomst vertonen met de situaties bij mogelijke ondergrondse opbergplaatsen. De uitkomsten zijn voor de onderzochte situaties positief en vormen een ondersteuning voor de verdere toepassing van METROPOL [OPLA 14]. Met laboratoriumexperimenten is vastgesteld dat met het model beweging van zeer zout water nauwkeurig gesimuleerd kan worden. Verder onderzoek naar de betrouwbaarheid van modellen om transport van radionucliden onder natuurlijke omstandigheden te beschrijven is gaande. Hierbij wordt o.m. het transport van uranium door de bodem bestudeerd, zoals dat op verscheidene plaatsen in de wereld wordt waargenomen. Als gevolg van deze inspanningen tekent zich momenteel een tendens af naar verfijning van de wiskundige beschrijving van het geochemische gedrag van radionucliden.

Gegevens over de transportsnelheid van radionucliden door de ondergrond zijn afkomstig van laboratoriumexperimenten van het RIVM [OPLA 15], van relevante, met name Duitse, literatuur en van een databank van de Nuclear Energy Agency (Het International Sorption Information Retrieval System, ISIRS). Bij toepassing van deze gegevens in de veiligheidsstudie is steeds uitgegaan van een bovengrens-benadering. Een meer gedetailleerde beschrijving van de transportverschijnselen zou de beschikbaarheid van locatiespecifiek bodemmateriaal vereisen.

RESULTATEN VAN HET GESTEENTE-MECHANISCH ONDERZOEK

Gedurende fase I is het stelsel van relaties tussen spanningen en vervormingen van steenzout verder ontwikkeld, getoetst en voor de praktische toepassing in fase I voldoende betrouwbaar bevonden. In dit verband zijn ook de spanningscondities bepaald waaronder microscheurvorming in steenzout optreedt, evenals de invloed daarvan op

het gesteentemechanisch gedrag op lange termijn [OPLA 5, 6, 19].

De theoretische onderbouwing van de relaties tussen in het laboratorium en in situ gemeten gesteentemechanisch gedrag is nog niet optimaal. Op dit terrein is nadere studie in een eventuele volgende fase wenselijk [OPLA 6]. Voor opvulling en afdichting van boorgaten, gangen, kamers en schachten is een vulmateriaal ontwikkeld en in het laboratorium beproefd. Dit bestaat in hoofdzaak uit zoutgruis van een geschikte samenstelling, met een zorgvuldig gedoseerde hoeveelheid vocht. Dit materiaal is geoptimaliseerd met betrekking tot de compactie- en *rekristallisatie*-eigenschappen. Na verloop van tijd vormt dit materiaal een hecht geheel met het omringende zout [OPLA 19].

Van inhomogeniteiten in het steenzout die gemakkelijker vervormbaar zijn dan het steenzout zelf, wordt geen nadelige invloed op de isolatiecapaciteit van het zoutvoorkomen verwacht. Langgerekte inhomogeniteiten welke uit een materiaal bestaan dat stijver en brosser is dan steenzout zullen, indien deze zich in de nabijheid van het opgeborgen warmteproducerende afval bevinden, aan zodanige condities van temperatuur en spanning onderhevig zijn dat zij kunnen worden opgebroken in kortere, niet meer met elkaar verbonden delen. In hoeverre daardoor de isolatiecapaciteit van het steenzoutvoorkomen wordt aangetast zal nadere studie moeten uitwijzen [OPLA 22].

RESULTATEN VAN DE ONDERZOEKEN NAAR STRALINGSEFFECTEN

Voor het bepalen van de hoeveelheid *stralingsschade* die in de vorm van *colloïdaal natrium* en energie-opslag in een opbergfaciliteit verwacht kan worden, is in rapport OPLA 21 een rekenmodel gepresenteerd. Dit model heeft thans echter nog een beperkte toepasbaarheid omdat de controle op de betrouwbaarheid nog niet voltooid is. Bij toepassing van dit model moet daarom vooralsnog rekening worden gehouden met een marge van een factor 8 voor mogelijke afwijkingen en onzekerheden [OPLA 21].

Bovengenoemd model houdt echter nog geen rekening met het verschijnsel *percolatie*. Dit verschijnsel leidt ertoe dat de stralingsschade niet ongelimiteerd kan toenemen. Blijkens rapport OPLA 21 zal de hoeveelheid colloïdaal natrium daardoor naar verwachting niet groter kunnen worden dan 20 à 30%. De bovengenoemde marge is op deze bovengrenswaarde niet van toepassing. Rapport OPLA 23 laat zien dat de schade in de eerste centimeters zout direct rondom KSA-canisters het hoogst is en naar buiten toe snel afneemt. Buiten een ring van enkele decimeters vanaf de canisterwand is er geen sprake meer van schade van enige betekenis. De genoemde bovengrens is

in de veiligheidsstudie gebruikt als basis voor de bepaling van de mogelijke consequenties van stralingsschade voor de veiligheid.

Indien in het zout rondom het KSA rekristallisatie optreedt, zullen de hoeveelheden colloïdaal natrium vrijwel zeker aanzienlijk kleiner worden. Verwacht mag worden dat rekristallisatie in een opberging zal optreden. In een tweetal (mede) daarop gerichte onderzoeken kon dit echter niet met zekerheid worden aangetoond [OPLA 20, 24]. Kwantificering van een reducerend effect van de rekristallisatie op de stralingsschade was dus nog niet mogelijk.

Voor de veiligheid van de opberging is niet alleen van belang, tot welke waarde de met stralingsschade samenhangende energie-opslag kan oplopen, maar ook hoe en onder welke omstandigheden de opgeslagen energie kan worden omgezet in warmte. Wat dit betreft hebben de in fase 1 uitgevoerde stralingsschade-onderzoeken nog niet geresulteerd in een kant en klare rekenmethode. In de veiligheidsstudie [OPLA 1] is daarom een pessimistische berekening uitgevoerd die ervan uit gaat dat de maximaal te verwachten hoeveelheid opgeslagen energie ineens wordt omgezet in warmte. Daaruit is gebleken dat weliswaar lokaal gedurende zeer korte tijd hoge temperaturen en spanningen kunnen optreden, maar dat deze er niet toe zullen leiden dat radionucliden uit het zout vrij kunnen komen [OPLA 1]. Met het oogmerk deze berekeningen in een later stadium te kunnen verfijnen wordt in het lopende deel van het stralingsschade-onderzoek bij de Rijksuniversiteit Groningen aandacht besteed aan het ontwikkelen van beter inzicht in de wijzen waarop en omstandigheden waaronder de opgeslagen energie wordt omgezet in warmte.

Berekeningen hebben aangetoond dat door toepassing van een afschermdende *overpack* (extra beschermingsmantel) om het KSA, met een dikte van 5 cm, de thans nog aanwezige onzekerheid over de te verwachten hoeveelheid stralingsschade en daarmee samenhangende temperatueffecten wordt weggenomen, omdat in dat geval de hoeveelheid stralingsschade verwaarloosbaar zal zijn [OPLA 1].

RESULTATEN VAN HET MIJNBOUWKUNDIG ONDERZOEK

De aanleg en bedrijfsvoering van een opbergfaciliteit voor radioactief afval in Nederlandse steenzoutformaties is in principe technisch haalbaar. Deze conclusie is ontleend aan de voorontwerpstudie van opbergconcepten [OPLA 25]. Twee wezenlijk verschillende mijnbouwkundige methoden staan ter beschikking, te weten:

- De conventionele, voor mensen toegankelijke mijn, met schachten en gangen, die toegang geven tot kamers voor de opberging van laag- en middelactief niet-warmteproducerend afval, en verticale gaten (geboord vanuit de gangen) voor het hoogactieve en warmteproducerend afval, waaronder het KSA. Het af-

dichtingssysteem bestaat uit speciale pluggen ter afdichting van elke opbergruimte, waterdichte dammen op verschillende plaatsen in de mijn, en waterkerende vullingen van gangen en schachten.

- Diepe, voor mensen niet toegankelijke verticale gaten, geboord vanaf het maaiveld, voor het hoogactieve en warmteproducerende afval waaronder het KSA, in combinatie met eveneens voor mensen niet toegankelijke, vanaf het maaiveld (d.m.v. *uitloging*) aangelegde *cavernen* voor het niet-warmteproducerende laag- en middelactieve afval. De afdichting vindt plaats met behulp van lange afsluitpluggen en vulling.

Voor de mijntechniek wordt de technische haalbaarheid verder ondersteund door:

- * uitgebreide ervaring in de conventionele zoutmijnbouw;
 - * de in situ projecten in de Asse-II-zoutmijn in de Bondsrepubliek Duitsland;
 - * elders in de wereld uitgevoerde onderzoeksprojecten.
- Praktische ervaring met de diepe-boorgatentechniek is eveneens ruimschoots voorhanden (olie-industrie), maar deze is in het algemeen beperkt tot kleinere diameters dan benodigd voor opberging van hoogactief afval. Voorzover de Studiecommissie OPLA bekend, vinden geen in situ onderzoeken plaats, gericht op de toepassing van deze techniek voor opbergingsdoeleinden. Met betrekking tot aanleg van cavernen voor winning van zout en tijdelijke opslag van bepaalde producten bestaat uitgebreide ervaring. Samenvattend kan worden gesteld dat, met het oog op opberging van radioactief afval, de mijntechniek aanzienlijk verder is ontwikkeld dan de diepe-boorgatentechniek.

Bovengenoemde voorontwerpstudie omvatte voorts het opstellen van principe-ontwerpen (opbergconcepten), gebaseerd op de twee genoemde technieken en toegespitst op de drie beschouwde typen steenzoutvoorkomens (pijler, kussen, laag). In deze opbergconcepten is voorzien dat elke opbergruimte en ieder boorgat met behulp van speciale uitgeteste afdichtingspluggen zorgvuldig wordt afgesloten nadat het afval erin is geplaatst. Uiteindelijk zal het afdichtingssysteem bestaan uit deze pluggen en waterkerende vullingen van de niet met afval gevulde gedeelten van de boorgaten en vulpijpen. Bij de mijnoptie worden bovendien de gangen en schachten van waterkerende vullingen voorzien en worden op verschillende plaatsen in het mijnwerk waterdichte dammen aangebracht. Deze techniek maakt het mogelijk, de afdichting op beheersbare en controleerbare wijze aan te brengen. Bij de diepe-boorgaten- en cavernentechniek is dat naar huidig inzicht niet zonder meer mogelijk.

Bij de huidige stand van het technische kunnen zijn zoutvoorkomens, waarvan de top niet dieper is gelegen dan ca. 1800 m, met tenminste één van de beschouwde technieken in principe bereikbaar voor geologische opberging van radioactief afval. Toegespitst op de onderscheiden opbergtechnieken betekent dit dat volgens de huidige inzichten van de geïnventariseerde 38 Nederlandse zoutvoorkomens, waarvan er 31 voldoende omvang hebben voor de beschouwde opbergingsdoeleinden,

- 17 zoutvoorkomens zijn gelegen binnen het dieptebereik van een opbergmijn,
- 14 zoutvoorkomens binnen het dieptebereik van de diepe boorgaten met de droge cavernen en
- 26 zoutvoorkomens binnen het dieptebereik van de diepe boorgaten met de natte cavernen.

Lichte aardbevingen veroorzaken ondergronds weinig of geen effect. Zelfs van zware aardbevingen, zo leert de mondiale mijnbouwkundige ervaring, zal het ondergrondse effect gering zijn. De kans op een zware aardbeving in Noordoost-Nederland wordt door het KNMI geschat op zeker minder dan eens in de miljoen jaar; het aandrijfmechanisme voor een dergelijke beving ontbreekt zeer waarschijnlijk. Het mogelijke indirecte gevolg van een beving is het op een of andere wijze vollopen van de opbergfaciliteit. De stralingshygiënische gevolgen daarvan zijn behandeld in het scenario 'Onderlopen van een opbergmijn' (Veiligheidsstudie, scenario D).

OVERWEGINGEN BIJ DE EINDCONCLUSIES UIT HET ONDERZOEK VAN FASE 1

Het onderzoek van fase 1 omvatte een technisch-wetenschappelijke haalbaarheidsstudie met betrekking tot opberging van radioactief afval in steenzoutformaties. Daarbij zijn verschillende mijnbouwtechnieken, typen steenzoutvoorkomens en op te bergen hoeveelheden radioactief afval beschouwd. De daaruit voortvloeiende conclusies hebben betrekking op de beschouwde varianten en kunnen niet zonder meer worden doorgetrokken naar andere varianten, zoals opberging van grotere hoeveelheden afval dan in fase 1 beschouwd.

Deze conclusies zijn onderbouwd met behulp van berekeningen die betrekking hebben op enkele representatieve modellen van de beschouwde steenzoutformaties, samengesteld op basis van de beschikbare gegevens over de Nederlandse ondergrond. Deze modellen geven dus situaties weer, zoals in de Nederlandse ondergrond verwacht mogen worden. Voor parameters en processen die van doorslaggevende betekenis zijn voor de veiligheid zijn daarbij, rekening houdend met de beschikbare gegevens, conservatieve aannamen gedaan. Als gevolg daarvan zullen de resultaten van de berekeningen in het algemeen een over-

schatting geven van de blootstelling van mensen aan straling, afkomstig van het opgeborgen afval.

Voor dit onderzoek kon gebruik gemaakt worden van een uitgebreid scala van algemene vaktechnische inzichten en gegevens. In verhouding was het beschikbare bestand aan locatiespecifieke gegevens echter van beperkte omvang. Daardoor is aan de resultaten van het onderzoek een relatief ruime onzekerheidsmarge verbonden. Dit komt onder andere tot uitdrukking in het feit dat conclusies doorgaans niet zijn gespecificeerd naar concrete locaties, maar meer algemeen zijn gesteld en in termen van verwachtingen. Verwachtingspatronen met betrekking tot geologische en geohydrologische omstandigheden in de verre toekomst zijn samengesteld op grond van informatie uit het recente geologische verleden. Daarbij zijn voorspelbare klimatologische ontwikkelingen met ingrijpende gevolgen voor de zeespiegel, de grondwaterbeweging, het *erosie* patroon en *glaciale* mechanismen in de beschouwing betrokken.

Voorts mag worden verwacht dat enige tijd na afsluiting van een opbergfaciliteit de kennis omtrent de aanwezigheid ervan verloren gaat. Daarmee valt niet uit te sluiten dat door toekomstige mijnbouw mensen onbedoeld in aanraking komen met het afval. Alhoewel e.e.a. een geringe mate van voorspelbaarheid bezit, heeft gezien de mogelijke stralingsrisico's een zorgvuldige beschouwing van dit scenario onderdeel van de veiligheidsstudie uitgemakt. Door het uitvoeren van een viertal scenario berekeningen is een goede indicatie van vernoemde risico's verkregen. Aangezien niet geheel zeker is dat met de beschouwde scenario's onder alle omstandigheden een bovengrens van het risico dat samenhangt met menselijk ingrijpen wordt verkregen, is nadere studie met betrekking tot dit aspect gewenst.

De ontwikkeling van een Nederlands toetsingscriterium voor ondergrondse opberging van radioactief afval is nog niet voltooid. De geldigheid van de hierna volgende eindconclusies dient te zijner tijd, in het licht van een dan vastgesteld criterium, opnieuw beschouwd te worden.

Vanzelfsprekend geldt dat onderzoek naar geologische opberging van radioactief afval, bedoeld om alle mogelijk optredende risico's in kaart te brengen, uitermate zorgvuldig en nauwgezet dient te worden voorbereid en uitgevoerd. Met name in de technische ontwikkelings sfeer, maar ook op theoretisch en wetenschappelijk gebied, levert nauwe internationale samenwerking één van de waarborgen om de vereiste kwaliteit van het onderzoek te bereiken. Dan immers wordt op efficiënte wijze gebruik gemaakt van de ruime kennis en ervaring die elders zijn opgebouwd met behulp van uitgebreid onderzoek en besteding van middelen. In het bijzonder geldt dit voor het in situ onderzoek. Het aanhaken bij internationale ontwikke-

lingen ter zake van de verificatie van de veiligheid van een opbergmijn is naar huidig inzicht dan ook een realistische keuze. Het op dit terrein inslaan van eigen onderzoekswegen brengt onevenredig veel en kostbaar experimenteel werk met zich mee.

EINDCONCLUSIES UIT HET ONDERZOEK VAN FASE 1

Algemene conclusies

1. Aanleg en bedrijfsvoering van een opbergfaciliteit voor radioactief afval in Nederlandse steenzoutvoorkomens is in principe technisch haalbaar. Daartoe staan twee wezenlijk verschillende mijnbouwkundige methoden ter beschikking, te weten:
 - de conventionele (droge) mijn en
 - diepe, vanaf het maaiveld geboorde gaten, in combinatie met stortholten [OPLA 25].
2. Beoordeeld op grond van buitenlandse veiligheidscriteria, internationale aanbevelingen daartoe en de risicolimieten, voorgesteld in het IMP Milieubeheer 1986–1990, rechtvaardigen de resultaten van het verrichte onderzoek de verwachting dat veilige opberging van radioactief afval in steenzoutformaties van een aard en omvang, zoals die met een grote mate van waarschijnlijkheid in de Nederlandse ondergrond voorkomen, mogelijk is [OPLA 1].
3. Voortzetting van het onderzoek naar de mogelijkheden van opberging van radioactief afval in Nederlandse steenzoutvoorkomens is op grond van beide voorgaande conclusies vanuit technisch oogpunt gerechtvaardigd te achten.

Conclusies m.b.t. voortzetting van het onderzoek

4. Uitgaande van de hierboven aangeduide veiligheidscriteria geven de resultaten van veiligheidsstudie en mijnbouwkundige studies geen reden om bepaalde opbergconcepten of formatietypen uit te sluiten voor eventueel nader onderzoek [OPLA 1].
5. Uit de veiligheidsstudie is gebleken, dat een opbergmijn een betere isolatie van het hoogactieve- en kernsplijtingsafval mogelijk maakt dan een opberging in diepe boorgaten. Met betrekking tot de isolatie van laag- en middelactief afval zijn geen grote verschillen tussen de beschouwde opbergconcepten gevonden [OPLA 1].
6. Uit een vergelijking van mijnbouwkundige expertise in relatie tot onderzoek en ontwikkeling van mijnbouwkundige technieken voor opberging van radioactief afval is gebleken dat deze wereldwijd geconcentreerd zijn op de mijntechniek. Dientengevolge bevindt de

mijnstechniek zich in een verder stadium van ontwikkeling dan de diepe-boorgatentechniek.

7. Op grond van beide voorgaande conclusies ligt het momenteel voor de hand eventueel vervolgonderzoek te concentreren op de mijnstechniek. Wellicht kan t.z.t., indien opberging m.b.v. diepe boorgaten door verdere technische ontwikkeling meer perspectieven biedt, een heroverweging van voornoemde keuze aan de orde komen.

SLOTBESCHOUWING EN AANBEVELINGEN

Alles bijeen werden op het terrein van algemene en fundamentele kennis met betrekking tot de geologische opberging van radioactief afval in verschillende typen van steenzoutformaties belangrijke vorderingen gemaakt. Hiertoe werden aanzienlijke wetenschappelijke inspanningen in eigen land verricht, werd samengewerkt in internationale projecten en werd deelgenomen aan enkele 'in situ' onderzoeksprojecten in de Bondsrepubliek Duitsland. Op grond van de hierdoor beschikbaar gekomen informatie en in het bijzonder gelet op fundamentele en algemene mijnbouwkundige en veiligheidstechnische aspecten, kan gesteld worden dat er geen fenomenen of combinaties van fenomenen zijn gevonden welke op voorhand leiden tot het afwijzen van de optie 'opberging van radioactief afval in zoutvoorkomens'.

Een volgende stap dient te zijn het verworven wetenschappelijke en technische instrumentarium toe te passen op de in Nederland van nature gegeven situatie met betrekking tot de aard, stabiliteit, omvang en diepteligging van de specifieke zoutvoorkomens en het karakter van het omringende lagenpakket. Dit is nodig om te komen tot een selectie van die zoutvoorkomens welke goede vooruitzichten bieden voor een veilige opberging en om die reden in aanmerking kunnen komen voor eventueel nader onderzoek. In het huidige stadium van het onderzoek en met inachtneming van de daarmee verworven kennis en inzicht, wordt echter de mogelijkheid om een dergelijke selectie uit te voeren voor een belangrijk deel beperkt door een gebrek aan beschikbare locatiespecifieke gegevens. Dit is een gevolg van enerzijds het embargo op het gebruik van vele van de bestaande gegevens en anderzijds het feit dat voor dit doel geen specifiek veldonderzoek kon worden uitgevoerd. Wel laat de beschikbare informatie de conclusie toe dat van de 38 geïnventariseerde zoutvoorkomens voor eventueel nader onderzoek, er 7 buiten beschouwing gelaten kunnen worden omdat ze naar huidig inzicht te klein zijn. De overige zijn groepsgewijs te verdelen al naar gelang hun geschiktheid voor de toepassing van een specifieke opbergtechniek, dan wel voor de toepassing van verschillende opbergtechnieken.

De aard en omvang van het beschikbare bestand van locatiespecifieke gegevens betekenen overigens niet alleen een beperking in de mogelijkheden van selectie van zoutvoorkomens met het oog op eventueel vervolgonderzoek, maar stellen tevens grenzen aan de representativiteit van het tot nu toe verrichte onderzoek voor de Nederlandse zoutvoorkomens. In de veiligheidsstudies en -berekeningen is immers uitgegaan van gegevens en aannamen die deels verkregen zijn door bewerking van thans beschikbare Nederlandse gegevens, en deels verkregen zijn uit de internationale literatuur of uit omringende landen. Het beschikbaar komen van meer gegevens omtrent de voor ons land specifieke geologische en hydrogeologische omstandigheden zal de representativiteit van het tot nu toe verrichte onderzoek voor de Nederlandse situatie vergroten. In dit kader is het van belang nauwgezet de ontwikkelingen op het gebied van de niet-destructieve *geofysische* verkenningmethoden van zoutvoorkomens te blijven volgen.

Uit de veiligheidsstudie is gebleken dat de scenario's m.b.t. menselijk ingrijpen tot hogere stralingsdoses kunnen leiden dan de andere beschouwde scenario's. Door de geringe kans van optreden blijft echter het risico binnen de gehanteerde criteria en aanbevelingen. Daarbij zij aangekend dat de relevantie van het verschijnsel menselijk ingrijpen internationaal verschillend wordt beoordeeld. Dit geldt ook voor de tijdsduur welke daarbij in beschouwing dient te worden genomen. In dit verband speelt vooral een rol de denkbeeldige scheiding tussen de situatie die gezien kan worden als de ononderbroken beschikbaarheid van tenminste de huidige kennis, en een situatie waarbij deze kennis intussen verloren is gegaan en een nieuwe beschaving zonder locatiespecifieke voorkennis zich ontwikkelt. Over de veiligheidsconsequenties verbonden met het verschijnsel menselijke indringing zullen nog aanvullende studies dienen te worden uitgevoerd.

Ervan uitgaande dat fase 1 heeft aangetoond dat nader onderzoek aan opberging van radioactief afval in steenzoutvoorkomens in Nederland in technisch-wetenschappelijk opzicht zinvol kan worden geacht, zijn in het onderstaande aanbevelingen opgenomen over onderwerpen en vakgebieden waarop dit nadere onderzoek bij voorkeur betrekking zou dienen te hebben. Deze zijn enerzijds af te leiden uit resultaten van mijnbouwkundige en veiligheidstechnische vergelijking van opbergtechnieken en anderzijds uit de constatering dat op een aantal terreinen kennis en inzicht nog dienen te worden uitgebouwd.

Het onderzoeksveld waarvan, uit de veiligheidsstudie en het geologisch en geohydrologisch onderzoek, is gebleken dat kennis en inzicht nog dienen te worden uitgebreid, omvat zowel generieke als meer specifieke onderdelen. De specifieke onderdelen concentreren zich met name op een nadere studie van het gecombineerde effect van de

processen subrosie en diapirisme op de isolerende kwaliteit van bepaalde zoutvoorkomens en afdekpakketten, in relatie tot opbergingsdiepte en diepteligging van het zoutvoorkomen. Een ander specifiek punt van nadere studie betreft een verdere verkenning van de risico's van onbedoelde menselijke indringing, onder andere in relatie tot de diepteligging van zoutvoorkomens. Resultaten van deze en andere relevante studies zouden t.z.t. kunnen bijdragen aan een nadere groepering van de beschouwde zoutvoorkomens voor wat betreft hun isolerende kwaliteiten.

Het generieke deel van nader onderzoek zal zich dienen te richten op de verdere validatie ten behoeve van in de veiligheidsstudie gebruikte rekenmodellen. Het gaat daarbij om rekenmodellen voor beschrijving van het gesteentemechanische gedrag, nucliden*migratie* in steenzout, in de *geosfeer* (met grondwater), in de biosfeer, alsmede modelmatige benaderingen van stralingsschade en van geologische verschijnselen. Voorts verdient het aanbeveling probabilistische methoden voor veiligheidsanalyse te ontwikkelen. Voornoemd onderzoek zal bij voorkeur in internationaal verband dienen te worden uitgevoerd.

Op het vlak van de mijnbouwtechniek is vastgesteld dat beide bestudeerde opbergmethoden karakteristieke kwaliteiten bezitten, die het in principe mogelijk maken een

veilige opberging in de beschouwde zoutvoorkomens te realiseren. Ten opzichte van de diepe-boorgatenmethode bevindt de mijntechniek zich, voor opberging van radioactief afval, in een aanzienlijk verder gevorderd ontwikkelingsstadium. Slechts door uitvoering van zeer omvangrijk experimenteel werk, met inbegrip van in situ onderzoek, zouden deze ontwikkelingsachterstand van de diepe-boorgatenmethode en de daarmee samenhangende onzekerheden zijn te reduceren. Voor dergelijk onderzoek ontbreekt momenteel echter een basis voor internationale samenwerking. Dit leidt tot een aanbeveling om nader onderzoek in eerste instantie te richten op de conventionele mijntechniek. Daarbij dient studie van aspecten zoals afsluiting en afdichting van opberggaten, gangen en kamers in een opbergmijn een belangrijke plaats in te nemen, evenals voortzetting van het lopende in situ onderzoek in de Asse-mijn.

Overigens zij bij het voorgaande aangetekend dat een weergegeven voorkeur m.b.t. nader onderzoek slechts richtinggevend en niet eliminerend van aard kan zijn. Deze kanttekening komt voort uit het besef dat locatiespecifieke gegevens in fase 1 slechts beperkt voorhanden zijn en kennis en inzichten in belangrijke processen in de ondergrond nog uitgebouwd dienen te worden.