

5 Evaluatie van de kosten: een analytische, parametrische en flexibele methodologie

Overeenkomstig de aanbevelingen van de Evaluatiecommissie-SAFIR (1990) heeft NIRAS een systematische methodologie uitgewerkt voor de kostenevaluatie van de realisatie van de oplossingen die zij voorstelt voor het langetermijn beheer van het afval van categorieën B en C. Deze methodologie bestaat erin de basiskosten van de verschillende uitvoeringsfasen van deze oplossingen analytisch en parametrisch op te stellen en ze vervolgens te vermenigvuldigen met coëfficiënten die het onzekerheidsniveau vertalen. NIRAS heeft bovendien een instrument uitgewerkt om de financiering van deze uitgaven in een verre toekomst nu reeds te verzekeren.

NIRAS heeft de realisatiekosten van een industrieel diepebergingsproject tot nu toe alleen in detail geëvalueerd voor verglaasd afval en bestraalde splijtstof. Dat zijn immers de enige afvalklassen waarvoor NIRAS beschikt over een referentiearchitectuur en veiligheids-evaluaties die voldoende vergevorderd zijn, ook al kunnen zij uiteraard nog sterk evolueren. Deze kostenevaluatie is echter gemaakt in de waarschijnlijke veronderstelling van een gemeenschappelijke bergingsinstallatie voor alle afval van de geologische groep (categorieën B en C). Deze bergingsinstallatie zou in stappen worden gebouwd en geëxploiteerd: in een eerste stap het deel bestemd voor afval van categorie B en matig warmteafgevend afval van categorie C, vervolgens het deel bestemd voor verglaasd afval en/of bestraalde splijtstof, zodat voor dit afval zou kunnen worden geprofiteerd van de reeds verworven ervaring. (Deze kostenevaluatie houdt geen rekening met de onderzoeks- en ontwikkelingskosten, die voor de periode 1974–2000 ongeveer 150 miljoen EUR van 2000, dit is 6 miljard BEF van 2000, bedragen, evenmin als met indirecte kosten en lasten.)

De evaluatie van de basiskosten exclusief onzekerheidsmarges (tabel 5.1) vergt een analytische, parametrische en flexibele benadering, om zich op elk moment vlot te kunnen aanpassen aan de evoluties die de basisgegevens (architectuur, inventaris enzovoort) tussen nu en de effectieve verwezenlijking van een bergingsinstallatie onvermijdelijk zullen ondergaan. Op die manier kan men een duidelijke visualisatie van het kostengedrag bekomen. De methode bestaat erin voor elke evaluatie een rekenblad op te stellen met de types en de hoeveelheden te bergen afval (sectie 3.1.2), de gekozen bergingsarchitectuur en de overeenkomstige gedetailleerde meetstaat (sectie 3.3.1), het referentieorganogram van de onderneming die de bergingsinstallatie zal exploiteren, de respectieve realisatieduur van de verschillende werkfasen, de evaluatie van de eenheidskosten, de referentie van de informatiebronnen en de onzekerheidsmarges. Aldus vormt deze benadering ook een onontbeerlijk hulpmiddel voor de technische en economische optimalisering die in een verder stadium van het programma zal moeten plaatsvinden.

De referentiekalender voor de diepe berging van het verglaasde afval en de bestraalde splijtstof werd opgesteld op basis van realistische exploitatiescenario's die steunen op de huidige stand van de kennis over de bergingsarchitectuur en de bouw-, exploitatie- en sluitingstechnieken. Deze indicatieve kalender neemt als vertrekpunt het ogenblik waarop de bevoegde overheid de vergunningen toekent die het mogelijk maken de investeringen met betrekking tot de uitvoering te starten. Dit veronderstelt dat er een site is gekozen. De

geraamde minimale totaalduur van deze uitvoering, vanaf de vergunning tot de sluiting van de bergingsinstallatie, zou ongeveer 40 en 50 jaar bedragen voor respectievelijk de optie “volledige opwerking” en de optie “directe berging” van de bestraalde splijtstof. Ongeveer 10 jaar daarvan zou worden besteed aan de gedetailleerde veiligheids- en ontwerpstudies. Deze indicatieve kalender, die regelmatig zal worden herzien, veronderstelt dat niet wordt gewacht tot het laatste afval is geborgen om de vergunningsprocedure voor de sluiting van de bergingsinstallatie te starten, evenmin als om over te gaan tot de effectieve sluiting van bepaalde delen ervan.

Tabel 5.1 Evaluaties van de kosten van een bergingsinstallatie voor verglaasd afval en bestraalde splijtstoffen in de hypothese van volledige opwerking en in de hypothese van directe berging [in 10⁶ EUR van 2000].

Uitvoeringsfases	Volledige opwerking			Directe berging		
	basiskosten	marge	geraamde kosten	basiskosten	marge	geraamde kosten
Bouw	190	1.95	371	430	2.40	1032
Exploitatie	63	1.95	122	53	2.70	144
Sluiting	36	2.38	85	106	3.00	318
Totaal	289	–	578	589	–	1494

De onzekerheidsmarges zijn door NIRAS geraamd volgens de methodologie van het *Electric Power Research Institute* (EPRI), die werd uitgewerkt in het kader van de kostenanalyse van elektronucleaire installaties en werd getransponeerd naar het geval van de kostenevaluatie van een diepe bergingsinstallatie voor radioactief afval. Deze methodologie maakt een berekening mogelijk van de onzekerheidsfactoren die moeten worden toegekend aan elk van de drie grote levensfasen van de bergingsinstallatie, die als onafhankelijke projecten worden beschouwd: de fase van de detailstudies en van de bouw, de fase van de berging van de afvalcolli (exploitatie) en de sluitingsfase, met inbegrip van het opvullen van galerijen en toegangsschachten en van de ontmanteling van de bovengrondse installaties. (Met de fase van institutionele controle wordt in de huidige economische evaluaties geen rekening gehouden, want de relatieve impact van die fase wordt als verwaarloosbaar geoordeeld. Ook de kosten van eventueel terugnemen van het afval worden buiten beschouwing gelaten.)

De methodologie van het EPRI stelt dat de economische analyse een oordeel over de kwaliteit van haar samenstellende gegevens moet inbouwen. Zij onderscheidt dus twee types van marges voor onvoorziene omstandigheden.

- De *marges voor onvoorziene projectomstandigheden* weerspiegelen de mogelijke verrassingen die verbonden zijn met de uitvoering van het industriële project en zijn des te kleiner naarmate het project gevorderd is en de raming van de projectkosten dus fijner is. Ze worden in vier marges ingedeeld: 30 tot 50 % voor een “vereenvoudigde” raming, 15 tot 30 % voor een “preliminaire” raming, 10 tot 20 % voor een “gedetailleerde” raming en 5 tot 10 % voor de eindraming.

- De *marges voor onvoorziene technologische omstandigheden* geven het kennisniveau betreffende de gebruikte technologieën weer en zijn des te kleiner naarmate er referenties bestaan, zoals vergelijkbare projecten of piloot-installaties, of elementen van vergelijking. Zij worden eveneens in vier marges ingedeeld: ten minste 40 % voor volledig nieuwe technologieën, 30 tot 70 % voor technologieën waarvoor bepaalde elementen van vergelijking voorhanden zijn, 20 tot 35 % als de technologieën op beperkte schaal beproefd zijn en 5 tot 20 % als de technologieën al op ware grootte zijn toegepast.

In de praktijk veronderstellen de huidige analyses dat de vorderingsstaat van het bergingsprogramma een preliminaire kostenraming toelaat van de bouw- en exploitatiefases in het geval van de optie “volledige opwerking” en een vereenvoudigde kostenraming toelaat van de sluitingsfase van die optie alsook van de drie fases van de optie “directe berging”. Zij veronderstellen bovendien dat de technologieën in beide gevallen volledig nieuw zijn, zonder elementen van vergelijking.

Wanneer de globale marges voor onvoorziene omstandigheden eenmaal zijn berekend door combinatie van de twee bovengenoemde marges, kunnen ze worden toegepast op de basiskosten, om aldus de geraamde kosten te bekomen (tabel 5.1). De eind 1997 geëvalueerde vork van de te verwachten kosten gaat voor de optie *volledige opwerking* dus van 290 tot 580 miljoen EUR van 2000 (12 tot 23 miljard BEF van 2000). Voor de optie *directe berging* gaat zij van 590 tot 1500 miljoen EUR van 2000 (24 tot 60 miljard BEF van 2000). Deze evaluaties zullen worden herzien naarmate de kennis evolueert en in het bijzonder na afloop van de PRACLAY demonstratie-experiment. De conclusies van dit experiment zouden de onzekerheid moeten verminderen over bepaalde essentiële posten van de architectuur, zoals de wijze waarop en de snelheid waarmee de galerijen worden gebouwd en uitgerust. NIRAS werkt momenteel bovendien aan fijnere rekeninstrumenten die het onderzoeks- en ontwikkelingsbudget dat nog nodig is voor de uitwerking van de architectuur van de bergingsinstallatie, als indicator gebruiken voor de evaluatie van de technologische rijpheid van een project.

Aangezien de tijdschema's voor de activiteiten inzake langetermijn beheer verschillende decennia bestrijken, heeft NIRAS bovendien een systeem van provisies op tariefbasis uitgewerkt dat van toepassing is op het door haar ten laste genomen afval. Deze provisies, die worden betaald door de afvalproducenten, spijzen een speciaal fonds, *langetermijn-fonds* genoemd, dat moet garanderen dat de nodige middelen voor de concretisering van de gekozen oplossing(en) op het vlak van langetermijn beheer te gelegener tijd beschikbaar zijn. Deze provisies worden berekend op basis van objectieve verdeelcriteria en op basis van de volgende drie begrippen:

- *capaciteitsreservering*, waarbij elke grote afvalproducent aan NIRAS zijn totale afvalproductieprogramma bekendmaakt, wat NIRAS in staat stelt haar vaste kosten om te slaan over de producenten;
- *tarifaire betaling*, waarbij elke producent een bijdrage in het langetermijnfonds stort die overeenkomt met de totale kosten van het langetermijn beheer van het afval dat hij aan NIRAS overdraagt;

- *contractuele garantie*, waarbij elke grote producent zich ertoe verbindt het saldo van de vaste kosten die toe te schrijven zijn aan zijn afval en niet zouden zijn gedekt door tarifaire betalingen, in het langetermijfonds te storten.

De evaluaties van de kosten van de beheersoplossingen vormen dus een belangrijk invoergegeven voor het berekenen van de bedragen van de provisies die moeten worden gestort in het langetermijfonds.

6 Conclusies en evaluatie van het verworven vertrouwen

De tweede fase van het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS (1990–2000) betreffende de berging van afval van categorieën B en C in een weinig verharde klei, welke fase werd gerealiseerd in de lijn van de aanbevelingen van de Evaluatiecommissie-SAFIR (1990), heeft aanzienlijke vorderingen op methodologisch, wetenschappelijk en technisch vlak mogelijk gemaakt. Dit programma heeft tot doel vast te stellen dat een bergingsoplossing binnen een geologische gastformatie op Belgisch grondgebied mogelijk is (dat wil zeggen veilig en haalbaar). Het programma behelst twee hoofdactiviteiten:

- *de ontwikkeling en het op punt stellen van alle methoden die nodig zijn voor het definiëren en het verwezenlijken van een bergingsoplossing, zoals de karakterisering van het afval, de karakterisering en de evaluatie van een gastformatie, de ontwikkeling van een bergingsarchitectuur, de evaluaties van de performanties en van de veiligheid, of nog de identificatie van de resterende onzekerheden;*
- *de evaluatie van de haalbaarheid van de oplossing en van de elementen die de veiligheid van de oplossing ondersteunen, door te steunen op een referentiegeval, namelijk de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol–Dessel.*

In mindere mate betroffen de studies ook de leperiaan-kleien (onderzocht onder de nucleaire zone van Doel) als alternatieve gastformatie. De in Mol–Dessel en Doel uitgevoerde werkzaamheden houden geenszins een beslissing in over de keuze van de site waarop de bestudeerde oplossing eventueel zou verwezenlijkt worden. Ook heeft het onderzoek zich voorlopig beperkt tot de afvalklassen die vanuit radiologisch en thermisch oogpunt het ongunstigst worden geacht. Het Belgische programma profiteert sinds een zeer vroege fase van zijn ontwikkeling van de lering die is getrokken uit de bouw en de exploitatie van het ondergrondse onderzoekslaboratorium HADES, dat op 223 meter diepte ligt binnen de Boomse Klei, onder de site van het SCK•CEN in Mol.

Het geheel van verworvenheden van het onderzoek brengt momenteel geen enkel onoverkomelijk probleem aan het licht betreffende de berging in de Boomse Klei van het verglaasde afval afkomstig van de opwerking van bestraalde splijtstof. Dit versterkt het vertrouwen in de bestudeerde oplossing en bevestigt dat diepe berging binnen een weinig verharde klei een volstrekt te overwegen optie blijft.

De verzamelde kennis maakt het vandaag mogelijk de kwaliteiten van de Boomse Klei als natuurlijke barrière te onderbouwen. De uitgevoerde werken hebben ook de mogelijkheid aangetoond om de ondergrondse installaties te bouwen die nodig zijn voor een bergingsinstallatie op een diepte van om en bij de 200 tot 250 meter. NIRAS heeft bovendien haar vertrouwen versterkt in haar methodologie voor evaluatie van de langetermijn veiligheid en in haar vermogen om een bergingsinstallatie te ontwerpen die de mens en het milieu zo lang als nodig kan beschermen tegen de mogelijke schadelijke effecten van het radioactieve afval.

Desalniettemin, en zonder daarom de basiskeuze voor de Boomse Klei in vraag te stellen, is het vertrouwen dat men vandaag kan stellen in het voorgestelde bergingssysteem, vertrouwen dat hoofdzakelijk berust op de kwaliteit van de gastformatie als barrière, nog onvoldoende om zich definitief uit te kunnen spreken over de technische haalbaarheid en de langetermijn veiligheid van een berging in deze gastformatie. De retentie van de radionucliden door de natuurlijke barrière, de performanties van de kunstmatige barrières en bepaalde aspecten van het ontwerp en de verenigbaarheid van het afval zijn immers nog omgeven met onzekerheden die moeten worden weggenomen of tot een aanvaardbaar peil worden teruggebracht voordat kan worden overwogen over te gaan tot een praktische realisatie. Bovendien zijn de operationele veiligheid van een dergelijke berging en het voldoen van deze berging aan de milieunormen (chemische toxiciteit enzovoort) tot op heden slechts het voorwerp geweest van nog zeer preliminaire studies. Hetzelfde geldt a fortiori voor de alternatieve optie, waarin de leperiaan-kleien als gastformatie worden beschouwd.

Na een samenvatting van de belangrijkste verworvenheden van de periode 1990–2000 zet dit hoofdstuk in grote lijnen de technische en wetenschappelijke elementen uiteen waarmee rekening moet worden gehouden voor het definiëren van de derde methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsfase zoals NIRAS die momenteel beoogt. Ten slotte wordt in dit hoofdstuk het huidige vertrouwen in de bestudeerde optie geëvalueerd.

6.1	De belangrijkste verworvenheden	203
6.1.1	Verworven kennis en open vragen	203
6.1.2	Relatief belang van de resterende onzekerheden	210
6.2	Elementen voor het toekomstige methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma	215
6.2.1	De krachtlijnen	216
6.2.2	De elementen waarmee rekening dient gehouden	217
6.2.3	De volgende etappes	223
6.3	De evaluatie van het vertrouwen	225

6.1 De belangrijkste verworvenheden

De verworvenheden van de werkzaamheden die zijn verricht tussen 1990 en 2000, betreffen zowel de verzamelde wetenschappelijke en technische kennis als de identificatie van de open vragen en de evaluatie van het relatieve belang van de overblijvende onzekerheden.

6.1.1 Verworven kennis en open vragen

Inventaris en kennis van het te bergen geconditioneerde afval

- *Invoering van een coherente algemene benadering inzake definitie van het afval.*
- *Invoering van een algemene classificatie van het geconditioneerde radioactieve afval die de inventarisering en een transparant beheer vergemakkelijkt.*
- *Verbetering van de afvalinventarissen (volumes, gehalten aan kritische radionucliden) die moeten beschouwd worden voor het scenario van volledige opwerking en het scenario van directe berging van de bestraalde UO_2 -splijtstoffen die afkomstig zijn van het huidige Belgische nucleaire programma. De fysische kenmerken (in het bijzonder de warmteafgifte) en de chemische kenmerken (in het bijzonder de aanwezigheid van zware metalen) moeten nog worden bevestigd voor alle afvalklassen en in het bijzonder voor het afval van categorie B.*
- *Opstelling, op basis van de door de autoriteiten goedgekeurde algemene regels, van de acceptatiecriteria voor het verglaasde afval, die hoofdzakelijk de vereisten in verband met het korte- en middellangetermijn beheer van dit afval (transport, opslag) in rekening brengen.*

Evaluatie van de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol–Dessel als natuurlijke barrière en kennis van de omgeving van het bergingssysteem

(zie ook samenvattend kader aan het einde van sectie 6.3)

- *Verbetering van het vermogen om de klei te karakteriseren, met name dankzij verkenningsmethodes met een hoge resolutie. De geïntegreerde interpretatie van alle reeds verworven gegevens, die nog steeds bezig is, suggereert de afwezigheid van structurele discontinuïteiten (breuken) in de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol–Dessel, en maakt het tevens mogelijk de bovengronds waargenomen fijne lithologische variaties, die karakteristiek zijn voor deze formatie, in de diepte te verkennen.*
- *Bevestiging van de waarde van de hydraulische geleidbaarheid ($10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) gemeten op boorkernen (centimeterschaal), aan de hand van in situ metingen in boringen (meterschaal) of rond het ondergrondse laboratorium (decameterschaal).*
- *Herziening van het hydrogeologische model waardoor het belang van de lokale afvoerpunten voor de ondergrondse waterstromingen in het licht kon worden gesteld. Er blijft echter een incoherentie bestaan tussen de lokaal in de Boomse Klei gemeten hydraulische geleidbaarheid en de hydraulische geleidbaarheid die is afgeleid uit de regionale modellering (schaal van een honderdtal kilometer). De complexiteit van de*

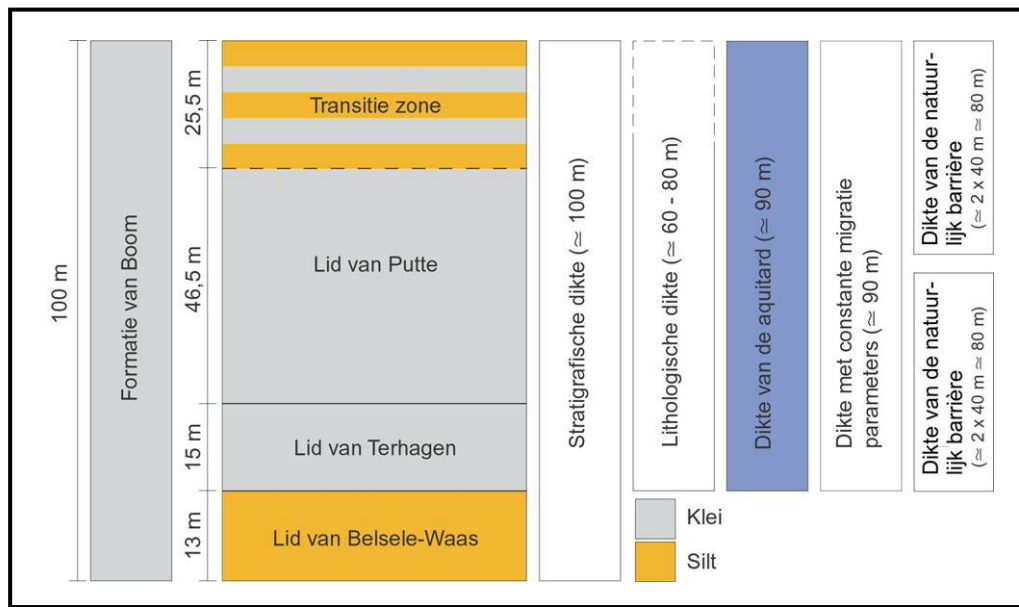
watervoerende laag onder de klei en de mogelijkheid van hydraulische kortsluiting via breuken op regionale schaal zouden verder moeten worden bestudeerd om deze incoherentie op te helderen. De analyse van de oorsprong en de evolutie van de chemische samenstelling van de watervoerende en de semi-watervoerende lagen bevindt zich nog maar in de beginfase, maar zou de resultaten van de modellering van de ondergrondse stromingen kunnen helpen ondersteunen.

- *Bevestiging van de kwaliteiten van de Boomse Klei als natuurlijke barrière voor de migratie van de radionucliden.* De experimentele studie van de eigenschappen die de radionuclidenmigratie in de klei bepalen, werd aanzienlijk verfijnd. De migratie van de kritische radionucliden werd experimenteel bestudeerd in het bovengrondse laboratorium. Het diffusieve karakter van de migratie van de opgeloste stoffen in de Boomse Klei kon worden bevestigd aan de hand van experimenten met vertraagde en niet-vertraagde tracers in een representatief kleivolume en over tijdspannen van een tiental jaren. Het vertrouwen in de kwaliteit van de natuurlijke barrière is nog versterkt door de waarneming dat het uranium en het thorium die van nature aanwezig zijn in de gastformatie, over geologische tijdspannen nagenoeg immobiel zijn gebleven. Een systematische analyse over de totale dikte van de formatie van de migratieparameters van niet of weinig vertraagde radionucliden wijst erop dat deze parameters binnen de marges blijven die in de veiligheidsevaluaties worden beschouwd. Er blijven evenwel onzekerheden bestaan over de precieze sorptiemechanismen voor enkele vertraagde radionucliden en over het voortbestaan van de geochemische omstandigheden die gunstig zijn voor de retentie van de radionucliden.
- *Schematische indeling van de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel in verschillende dikten naar gelang van de context waarin men zich plaatst.* De dikte van de Boomse Klei waarvoor nagenoeg constante *migratieparameters voor de niet-vertraagde radionucliden* gelden, bedraagt ongeveer 90 meter en omvat dus de bovenste overgangszone van de formatie. Voor de berekeningen van de migratie van de radionucliden doorheen de klei wordt echter slechts met een dikte van 80 meter rekening gehouden. Deze vermindering beantwoordt enerzijds aan de dikte die wordt uitgegraven voor de bouw van de bergingsinstallatie en die op maximaal 5 meter wordt geraamd, en anderzijds aan de dikte van de zone waar de migratieparameters op lange termijn zouden kunnen zijn verstoord door de bouw en de aanwezigheid van de bergingsinstallatie. Rekening houdend met de fenomenen van zelfheling van de door de uitgraving veroorzaakte scheuren, is die laatste dikte geraamd op 5 meter. De verschillende dikten van de Boomse Klei naar gelang van de context, zijn dus de volgende (fig. 6.1): een *stratigrafische dikte* (tussen de basis en het dak van de formatie), een *lithologische dikte* (het meest kleiachtige gedeelte van de formatie), een *dikte van de semi-watervoerende laag* (waarvoor $K_v < 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), een *dikte waarin de migratieparameters constant zijn*, en een *dikte van de natuurlijke barrière beschouwd in de veiligheidsevaluaties*.

Ontwerp en bouw van de bergingsinstallatie

- *Invoering van de ontwerpbasis van de installatie die tot doel heeft de invulling van langetermijn veiligheidsfuncties te verzekeren*, rekening houdend met de beperkingen die eigen zijn aan de gastformatie en aan de diepte van de bestaande ondergrondse installaties, en die in het bijzonder tot doel heeft, (i) *de functie fysische insluiting van*

het afval *te verzekeren* tijdens de thermische fase en dit om de uitloging van de matrices en de migratie van de radionucliden onder aanzienlijke thermische gradiënten te verhinderen, *(ii) de verschillende afvalklassen te scheiden* om de risico's van wisselwerkingen tussen verschillende afval- en materiaaltypes tot een minimum te beperken en aldus de robuustheid van het systeem te versterken, en *(iii) de in de gastformatie teweeggebrachte geomechanische, thermische, geochemische en hydrogeologische verstoringen tot een minimum te beperken*.



Figuur 6.1 De verschillende dikten van de laag Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel.

- *Definitie van een referentiearchitectuur* (geometrie van de bergingsinstallatie en gebruikte materialen) voor het verglaasde afval en, op de tweede plaats, voor de bestraalde splijtstoffen. De gedefinieerde architectuur voor het verglaasde afval, vormt de referentie voor het in situ demonstratie-experiment op ware grootte PRACLAY, die één van de centrale elementen is van het huidige en toekomstige programma. Voor de andere afvalklassen bevindt de bergingsarchitectuur zich daarentegen pas in het stadium van een eerste schets.
- *De identificatie*, tijdens de voorbereiding van het PRACLAY-experiment, en met name tijdens de realisatie van de bovengrondse OPHÉLIE-maquette alsook tijdens de voorbereiding van het SAFIR 2-rapport, van een reeks open vragen met betrekking tot de industriële-uitvoeringsaspecten van de installatie en met betrekking tot het beheersen van de wisselwerkingen tussen de verschillende componenten.
- *Verbetering van de technieken voor het uitgraven van de ondergrondse installaties*: bevestiging van de mogelijkheid om een schacht uit te graven in de Boomse Klei zonder een beroep te doen op voorafgaande bevriezing van de kleiformatie en definitie van een methode voor industrieel uitgraven van de galerijen die de convergentie van de klei moet beperken en die getest zal worden bij de realisatie van de verbindingsgalerij (PRACLAY-project). Het verschijnen van scheuren onderaan in de

tweede schacht roept belangrijke vragen op aangaande de verstoringen die worden veroorzaakt door uitgravingen van significante diameters en aangaande de impact ervan op de veiligheid.

- *Demonstratie van de mogelijkheid om afdichtingen te ontwerpen die weinig doorlatend zijn voor gassen, zelfs bij overdruk, en voor water.*
- *Verwerving van aanzienlijke praktische ervaring inzake operationele veiligheid met de bouw en de exploitatie sinds meer dan 20 jaar van het ondergrondse laboratorium HADES (met name dankzij de in situ experimenten met radioactieve bronnen). Aangezien de afgelopen tien jaar prioriteit is gegeven aan de langetermijn veiligheid, bevinden de analyse en de optimalisering van de operationele veiligheid (mijnveiligheid en radiologische veiligheid) zich in een weinig gevorderd stadium.*

Inzicht in de werking van de bergingsinstallatie na haar sluiting en in de verstoringen die de bergingsinstallatie teweegbrengt in de Boomse Klei

- *Verbetering van het inzicht in het gedrag van de afvalmatrices.* Voor het glas werd een levensduur van ten minste 10 000 jaar afgeleid op basis van de initiële, zeer nadelige corrosiesnelheden. De devitrificatie of onthazing van het glas gaat immers zeer traag en heeft geen significante invloed op het oplossen van de matrix. De kennis van de levensduur van de UO₂-matrices en van de andere componenten van de bestraalde splijtstoffen en de kennis van de verenigbaarheid van de cement- en bitumenmatrices zijn daarentegen nog ontoereikend. De verworven kennis van het gebitumineerde afval, wijst erop dat de matrix weinig bijdraagt tot de insluiting van de radionucliden, zodat het bitumen niet als een barrière kan worden beschouwd in de veiligheids-evaluaties. Bovendien zal de studie van hun verenigbaarheid met het bergingsmilieu rekening moeten houden met verschijnselen zoals de veroudering, de zwellen en de radiolyse van de bitumenmatrix alsook het vrijkomen van natriumnitraten (Eurobitumafval). De verenigbaarheid van de andere afvalklassen dan verglaasd afval die uit thermisch, radiologisch en chemisch oogpunt als het meest nadelig worden beschouwd, blijft dus een open vraag.
- *Verbetering van het inzicht in het gedrag van de afvalverpakkingen (en mantels).* De in situ bekomen gegevens lijken te bevestigen dat bepaalde metalen materialen voldoende bestand zijn tegen uniforme corrosie en putcorrosie om in aanmerking te komen als materiaal voor de verpakking en mantel; die verpakking en mantel moeten de functie fysische insluiting kunnen verzekeren tijdens de hele duur van de thermische fase van de berging. De mogelijke aanwezigheid van andere vormen van corrosie zou de keuze van het referentiemateriaal voor de mantel, namelijk austenitisch roestvast staal, echter op losse schroeven kunnen zetten. De oorsprong van de waargenomen chloriden in het poriënwater van de OPHÉLIE-maquette, en hun invloed op de duurzaamheid van de verpakkingen en mantels moeten nog worden bepaald.
- *Verbetering van het inzicht in het gedrag van het opvulmateriaal.* Het beschouwde opvulmateriaal in de referentiearchitectuur is een mengsel van zwellende klei (omwille van de mechanische stabiliteit en de homogenisering van de eigenschappen), zand (om de zwellingsdruk te beperken) en grafiet (om de afvoer van de warmte die door het afval wordt afgegeven, te verbeteren). Het bezit de vereiste warmtegeleidbaarheid

om de afgegeven warmte af te voeren, maar de hydratatie ervan moet beter worden bestudeerd. De evolutie van de chemische karakteristieken van het opvulmateriaal tijdens de thermische fase en de impact van het grafiet op de corrosie van de mantel blijven open vragen.

- *Studies van de thermische effecten van het hoog warmteafgevend afval* (glas en bestraalde splijstof). In de huidige stand van de kennis zetten deze thermische effecten, zowel in het nabije als in het verre veld, de voorziene dimensionering voor de bergingsinstallatie en de geselecteerde materialen niet op de helling. Aan de hand van het PRACLAY demonstratie-experiment zal de kennis over het nabije veld, met name wat betreft de herverzadiging van het opvulmateriaal, kunnen worden bijgesteld. Het CERBERUS-experiment heeft overigens aangetoond dat de mineralogie en de geochemie van de Boomse Klei niet significant worden gewijzigd door opwarming en bestraling. Om de thermische effecten tot een minimum te beperken, werd een eerste reeks van kwantitatieve criteria opgesteld die de maximaal toelaatbare temperaturen op diverse plaatsen van het bergingssysteem bepalen, maar deze reeks criteria moet nog worden bevestigd (met name voor de watervoerende lagen, bij gebrek aan normen terzake).
- *Studie van de vorming en de migratie van de gassen*. Deze studie heeft het mogelijk gemaakt de beperkte gasdiffusie doorheen de Boomse Klei in het licht te stellen, maar ook de geringe gasvorming door het verglaasde afval en de bestraalde splijstof en hun respectieve verpakkingen (en/of mantels). Men kan dus besluiten dat er voor deze twee afvalklassen geen echte moeilijkheden zijn in verband met deze fenomenen. De vorming van gassen zal echter moeten worden beschouwd in de evaluatie van radiologische en conventionele veiligheid en in het ontwerp van het gedeelte van de bergingsinstallatie dat bestemd is voor de andere afvalklassen.
- *Studies van de verstoringen teweeggebracht door radiolyse*. De absorptie van de gammastraling door alle kunstmatige barrières en de sterke sorptie van de belangrijkste alfastralers door het opvulmateriaal staan borg voor een zwak stralingsniveau van de klei. De afwezigheid van significante chemische of mineralogische wijzigingen als gevolg van een sterke bestraling van de klei, kon experimenteel worden vastgesteld.
- *Studies van de verstoringen teweeggebracht door de aanwezigheid van beton*. De betonnen bekleding van de bergingsgalerijen zal op zichzelf geen significant alkalisch front teweegbrengen en zal dus geen significante impact hebben op de geochemie van het nabije veld en van het verre veld.
- *Nog lopende studie van de impact van de in het gebitumineerde afval aanwezige nitraten en van andere in het afval aanwezige chemische elementen* op de geochemie van de Boomse Klei en op de migratie van de radionucliden.

Evaluaties van de langetermijn veiligheid

- *Verbetering van de methodologie voor de evaluatie van de langetermijn veiligheid*, met name dankzij een verbetering van de methodologie van scenario-ontwikkeling en dankzij de definitie van veiligheidsindicatoren die de individuele dosis aanvullen.

- *Bevestiging van de gunstige resultaten betreffende de naleving van de radiologische normen* voor de drie afvalklassen die vanuit dit standpunt als het nadeligst worden beschouwd, namelijk het verglaasde afval, de bestraalde splijtstoffen (UO₂ en MOX) en de hulzen en eindstukken. Ook de fundamentele rol van de gastformatie voor de langetermijn veiligheid werd bevestigd.
- *Bevestiging van het doorslaggevend belang van de niet- of weinig vertraagde radionucliden* (¹²⁹I, ³⁶Cl, ⁷⁹Se, ¹²⁶Sn, ¹⁴C) voor de radiologische impact. De migratie, door diffusie, van deze radionucliden in de klei kan als voldoende gekend worden beschouwd, hoewel er nog onzekerheden blijven aangaande de geochemie van tin en selenium. In het geval van directe berging van bestraalde splijtstoffen veroorzaken deze radionucliden, voor het normale-evolutiescenario, de aanzienlijkste radiologische impact. Deze impact doet zich voor na ongeveer 20 000 tot 40 000 jaar, maar blijft één grootteorde kleiner dan de dosisbeperking (en dus twee grootteorden kleiner dan de dosis als gevolg van de natuurlijke achtergrondstraling in België). Voor alle andere radionucliden blijft de radiologische impact verschillende grootteorden onder de dosisbeperking. De hoeveelheid radionucliden van de uraniumfamilie die doorheen de klei migreert en die na verschillende miljoenen jaren verantwoordelijk is voor de tweede radiologische piek, is vergelijkbaar met de hoeveelheid uranium die van nature reeds aanwezig is in de gastformatie rond de bergingsinstallatie.
- *Preliminaire evaluatie van de radiologische gevolgen van enkele gewijzigde-evolutie-scenario's van het bergingssysteem en zijn omgeving.* Het gaat in het bijzonder om de volgende scenario's: de gasproductie binnen het bergingssysteem, een waterwinning in de watervoerende laag onder de Boomse Klei en een slechte afdichting van de toegangswegen naar de bergingsinstallatie. Hun radiologische gevolgen blijven gering en vergelijkbaar met de gevolgen van het normale-evolutiescenario.
- *Preliminaire evaluatie van de kritikaliteitsrisico's*, waaruit blijkt dat dit risico geen belangrijk probleem zou mogen vormen voor de veiligheid.
- *Preliminaire evaluatie van de milieu-impact van de chemotoxische stoffen die in het afval zitten*, waaruit blijkt dat de chemotoxiciteit van het afval geen significante impact heeft op het milieu.
- *Systematisch gebruik van data collection forms voor de veiligheidsevaluaties:* deze data collection forms geven voor elke parameter de best mogelijke kwantitatieve raming van zijn waarde, de uiterste waarden en de desbetreffende onzekerheden, alsook de argumenten die ten grondslag liggen aan de selectie van deze waarden.

Globale evaluatie van het bergingssysteem en zijn omgeving

- Met behulp van de *langetermijn veiligheidsfuncties* kan een systematische evaluatie gemaakt worden van de rol die door het bergingssysteem en de omgeving in hun geheel wordt verzekerd, alsook door elk van hun componenten. Deze benadering maakt het ook mogelijk een verband te leggen tussen het ontwerp van de bergingsarchitectuur, het inzicht in de fenomenen die er in de loop van de tijd plaatsgrijpen, en de veiligheid. Tabel 6.1 vermeldt de specifieke functies die de belangrijkste componenten van het bergingssysteem en zijn omgeving verzekeren voor de drie fases die volgen op de sluiting van de bergingsinstallatie en die als volgt worden gedefinieerd:

Thermische fase: periode onmiddellijk na de sluiting van de bergingsinstallatie, waarin de *fysische insluiting* door de verpakking of de mantel moet worden verzekerd. Zij beantwoordt aan de periode waarin nog een aanzienlijke thermische gradiënt aanwezig is tussen het afval en de niet-verstoorde Boomse Klei. Ze bedraagt enkele honderden jaren voor het verglaasde afval en enkele duizenden jaren voor de bestraalde splijtstoffen.

Isolatiefase: periode na de thermische fase, waarin de insluiting van het afval door de gezamenlijke kunstmatige barrières nog steeds aanzienlijk is en aangevuld wordt door de functie *vertraging en gespreid vrijkomen* van de gastformatie voor de radionucliden die de gastformatie bereiken. Deze periode duurt ongeveer 10000 jaar en wordt gekenmerkt door een radiologische impact op de omgeving die zo goed als onbestaande is.

Geologische fase: periode na 10000 jaar, waarin de functies *vertraging en gespreid vrijkomen* en *verduunning en verspreiding* de hoofdrol spelen. Deze periode wordt gekenmerkt door een geringe radiologische impact op de omgeving.

- De verschillen tussen de functies die werkelijk worden verzekerd door de verschillende componenten van het bergingssysteem, en de functies die in rekening worden gebracht in de evaluaties van de langetermijn veiligheid, kunnen in zekere zin worden geïnterpreteerd als *veiligheidsreserves* van het systeem en zijn omgeving en dragen dus bij tot het versterken van de robuustheid van de voorgestelde oplossing.

Evaluatie van de leperiaan-kleien als alternatieve gastformatie

- *Geologische en hydrogeologische preliminaire verkenning van de leperiaan-kleien onder de nucleaire zone van Doel.* De interpretatie van de resultaten is nog bezig en laat momenteel niet toe zich een gedetailleerde mening te vormen over de mogelijkheden van de leperiaan-kleien als gastformatie.
- *Vaststelling van een dikte van ongeveer 114 meter met een hoge kleifractie en een geringe hydraulische geleidbaarheid (10^{-10} m·s⁻¹ in situ en 10^{-11} tot 10^{-12} m·s⁻¹ in laboratorium).*
- *Vaststelling van de aanwezigheid van zout poriënwater, van de aanwezigheid van intraformationele breuken op regionale schaal en van geomechanische karakteristieken die wijzen op mogelijke moeilijkheden om in de kleiformatie te graven.*

Evaluatie van de kosten en financiering

- *Ontwikkeling van een analytische, parametrische en flexibele methodologie voor het evalueren van de bergingskosten* die het mogelijk maakt het probleem van de onzekerheidsmarges die inherent zijn aan projecten op zeer lange termijn, in rekening te brengen en die tegelijk zonder problemen aangepast kan worden aan toekomstige architectuurveranderingen.
- *Uitwerking van een systeem van provisies op tarifaire basis dat van toepassing is op het geconditioneerde en niet-geconditioneerde afval waarvoor NIRAS de zorg op zich neemt, systeem dat een langetermijfonds moet spijzen dat moet garanderen dat te*

gelegener tijd de nodige financiële middelen beschikbaar zijn voor het concretiseren van de beheersoplossing(en) op lange termijn die zal/zullen worden gekozen.

Tabel 6.1 De langetermijn veiligheidsfuncties die worden verzekerd door de belangrijkste componenten van het bergingssysteem en zijn omgeving voor de verschillende fasen na de sluiting van de bergingsinstallatie. (In het **vet**, de functies die in rekening worden gebracht in de evaluatie van de radiologische langetermijn veiligheid van het normale-evolutescenario van het bergingssysteem: **C1** = waterdichtheid (fysische insluiting); **R1** = weerstand tegen uitloging (vertraging en gespreid vrijkomen); **R2** = diffusie en retentie (vertraging en gespreid vrijkomen); **D** = verdunning en verspreiding. De veiligheidsreserves staan weergegeven in het normaal lettertype.)

Component	Thermische fase (enkele honderden tot enkele duizenden jaar)	Isolatiefase (< 10000 jaar)	Geologische fase (> 10000 jaar)
Glasmatrix	–	R1	R1
UO₂-matrix	–	R1	R1
Cementmatrix	–	–	–
Bitumenmatrix	–	–	–
Primaire verpakking	C1	R2	–
Verpakking (en/of mantel)	C1	R2	–
Bergingsbuis	C1	R2	–
Opvulling	C2	R2	R2
Afdichting	C2	R2	R2
Bekleding galerijen	–	–	–
Bekleding schachten	–	–	–
Gastformatie	C2	R2	R2
Watervoerende lagen	–	D, R2	D, R2
Biosfeer	–	D	D

6.1.2 Relatief belang van de resterende onzekerheden

De evaluatie van het relatieve belang van de resterende onzekerheden vormt een andere waardevolle verworvenheid van het programma 1990–2000. Deze evaluatie steunt hoofdzakelijk op

- de kennis van de processen en de karakteristieken die de werking en de evolutie van het bergingssysteem bepalen;
- de analyse van de manier waarop het bergingssysteem en zijn omgeving de langetermijn veiligheidsfuncties verzekeren;
- de resultaten van de verschillende reeds uitgevoerde veiligheidsevaluaties.

De resterende onzekerheden die de radiologische langetermijn veiligheid het meest beïnvloeden, worden hieronder behandeld in dalende volgorde van belangrijkheid van de componenten van het bergingssysteem en de omgeving, namelijk:

- de natuurlijke geologische barrière (functie R2);
- de verpakking (en/of mantel) (functie C1);
- de afvalmatrices (functie R1);
- de watervoerende lagen (functie D);
- de biosfeer (functie D).

De onzekerheden die rechtstreeks verband houden met de realisatie van de referentie-architectuur, ontbreken op deze lijst, behalve die onzekerheden die van belang zijn voor de insluitingsfunctie tijdens de thermische fase. Zij zijn daarom niet minder belangrijk, maar aangezien zij worden beschouwd als zijnde van strikt technologische aard, zouden zij voldoende moeten kunnen worden verminderd door toepassing van beproefde ingenieursbenaderingen en door uitvoering van een demonstratie-experiment van het PRACLAY-type.

In de bespreking van de onzekerheden wordt een onderscheid gemaakt tussen de onzekerheden op het vlak van de scenario's, de onzekerheden op het vlak van de modellen (processen die meespelen, conceptuele modellen en numerieke codes) en de onzekerheden op het vlak van de parameters die worden gebruikt voor de veiligheids-evaluaties. Een globale beoordeling van deze resterende onzekerheden wordt uitgevoerd bij de evaluatie van het huidige vertrouwen in de bestudeerde oplossing (sectie 6.3).

De natuurlijke geologische barrière – Boomse Klei

Aangezien de Boomse Klei de belangrijkste barrière vormt wanneer de fysische insluiting eenmaal niet langer is verzekerd, zijn de onzekerheden over haar performantie van essentieel belang.

De onzekerheden betreffende de scenario's hebben betrekking op de evolutie of de mogelijke verstoring van de kleibarrière als gevolg van externe gebeurtenissen (seismische activiteit, klimaatsveranderingen, geochemische wijzigingen enzovoort) of als gevolg van processen die eigen zijn aan het bergingssysteem (gasproductie, temperatuurstijging, vorming van een alkalisch front, het uitgraven).

Het belang van de onzekerheden als gevolg van *externe gebeurtenissen*, verschilt naargelang de radionucliden worden vertraagd of niet. Deze onzekerheden zijn slechts van weinig belang voor de niet-vertraagde radionucliden, omdat hun migratie plaatsvindt tijdens de isolatiefase (ongeveer 10 000 jaar), waarin de gastformatie nauwelijks wijzigingen zal ondergaan die hun migratie significant kunnen beïnvloeden. Genoemde onzekerheden zijn belangrijker voor de vertraagde radionucliden, omdat hun migratie plaatsvindt over een veel langere tijdspanne (ongeveer 100 000 jaar tot één miljoen jaar). De mogelijke verstoringen van de Boomse Klei zullen grotendeels bepaald worden door de omgevingswijzigingen tijdens de geologische fase, met name door de klimaatsveranderingen. Deze verstoringen en de bijbehorende onzekerheden konden nog niet voldoende in kaart worden gebracht. De capaciteit van de Boomse Klei om weerstand te bieden aan de chemische, mineralogische, hydraulische of mechanische wijzigingen is ongetwijfeld aanzienlijk, maar zal moeten worden bevestigd. Wel zullen de externe verstoringen de radiologische veiligheid mettertijd steeds minder sterk

beïnvloeden, als gevolg van de aanzienlijke vermindering van de radiotoxiciteit van het afval, dankzij radioactief verval, in de loop van de thermische fase en de isolatiefase.

Wat betreft de versturende processen die *eigen zijn aan het bergingssysteem*, zal de temperatuurstijging in de Boomse Klei altijd kunnen worden beperkt tot een waarde die geen noemenswaardige veranderingen zal veroorzaken, door de bergingsarchitectuur adequaat te wijzigen. De onzekerheden in verband met de volgende verstoringen verdienen daarentegen verdere aandacht:

- de productie van gassen door corrosie, en dit hoofdzakelijk voor het afval van categorie B;
- de migratie van een alkalisch front als gevolg van de degradatie van het aanwezige beton;
- de mogelijke zwelling van het afval met bitumenmatrix (hoofdzakelijk het Eurobitumafval) of het vrijkomen van aanzienlijke hoeveelheden natriumnitraten van ditzelfde afval;
- de vorming van scheuren tijdens het uitgraven.

De onzekerheid betreffende de modellen is zeer gering wat betreft de *niet-vertraagde* radionucliden, aangezien de fysico-chemische processen die hun migratie bepalen, goed gekend zijn en de rekenmodellen uitgebreid zijn getest (migratie-experimenten op verschillende schalen, vergelijkingsoefeningen, numerieke codes die op internationaal niveau worden gebruikt, enzovoort). Wat echter de *vertraagde* radionucliden betreft, is het nodig een onderscheid te maken tussen retentie door sorptie en door precipitatie met het oog op het inzicht in de geochemie van de elementen en op de modellering van de experimentele resultaten. De studie van het gedrag van de radionucliden die van nature aanwezig zijn in de Boomse Klei, zal ongetwijfeld veel bijkomende informatie opleveren. De complex-vorming met de mobiele organische molecules lijkt geen belangrijke bron van onzekerheid te zijn, maar dat blijft voor bepaalde radionucliden nog verder te bevestigen. Ten slotte zal de mogelijkheid van advectieve waterbewegingen binnen de gastformatie zelf (banden die meer doorlatend zijn) moeten worden opgehelderd, maar zij vormt wellicht evenmin een belangrijke bron van onzekerheid.

De onzekerheid betreffende de parameters houdt voor de *vertraagde* radionucliden rechtstreeks verband met de vertragingmechanismen (sorptie, precipitatie enzovoort) en bijgevolg met de bovenvermelde onzekerheid betreffende de modellen. De verticale homogeniteit van de gastformatie wat betreft de migratie-eigenschappen voor deze radionucliden, moet nog worden geverifieerd. De kennis van de migratieparameters van de *niet-vertraagde* kritische radionucliden daarentegen is toereikend.

De verpakking (en/of mantel)

De onzekerheden met betrekking tot de metalen mantel die is voorzien voor het verglaasde afval, en met betrekking tot de waterdichte metalen verpakking voor de bestraalde splijtstoffen, lijken minder bepalend voor de veiligheid dan de onzekerheden betreffende de kleibarrière, en dit om de volgende redenen.

De onzekerheid betreffende de scenario's, die in de eerste plaats moet worden behandeld, betreft het scenario van voortijdig falen van de fysische insluiting tijdens de thermische fase. Hiermee zal in de toekomst rekening moeten worden gehouden in de veiligheidsevaluaties. Deze onzekerheid kan worden gereduceerd door correcte keuzes inzake materialen en uitvoeringstechnieken (bijvoorbeeld lastechnieken), door een kwaliteitsborgingsprogramma en door een ontwerpbenadering van de bergingsarchitectuur die corrosiepreventie bevordert.

Er blijven bovendien aanzienlijke onzekerheden bestaan aangaande de evolutie van de geochemie van het nabije veld (in het bijzonder die van het opvulmateriaal tijdens de thermische fase en tijdens de herverzadiging) en aangaande de invloed hiervan op de corrosiesnelheden en -types.

De onzekerheid betreffende de modellen heeft betrekking op de modellering van het of de corrosieproces(sen) die de levensduur van de verpakkingen (en/of mantels) zal/zullen bepalen. Aangezien het huidige programma het nog niet heeft mogelijk gemaakt bepaalde nadelige corrosietypes, zoals spanningscorrosie, intergranulaire corrosie en microbiologische corrosie, uit te sluiten, blijft deze onzekerheid belangrijk en zou zij kunnen leiden tot een herziening van de materiaalkeuze voor de verpakking (en/of mantel). Het verminderen van deze onzekerheid vormt één van de sleutelementen voor de volgende fase van het programma, om een reeks argumenten te leveren ter ondersteuning van de garantie van de functie fysische insluiting (materiaalkeuze, geochemische omstandigheden van het nabije veld, corrosiepreventie, technisch-industriële haalbaarheid).

De onzekerheid betreffende de parameters heeft volgens de veiligheidsevaluaties tamelijk weinig belang, omdat de radiologische impact na de thermische fase ongevoelig is voor de levensduur van de verpakking (en/of mantel). Deze onzekerheid wordt volledig overschaduwd door de performantie van de kleibarrière en door de onzekerheid over het scenario van voortijdig falen van de verpakking (en/of mantel).

De afvalmatrices

De onzekerheden met betrekking tot de afvalmatrices kunnen om verschillende redenen belangrijk zijn. Voor verglaasd afval en bestraalde splijtstoffen kan de matrix vanwege haar levensduur doeltreffend bijdragen tot de veiligheidsfunctie vertraging en gespreid vrijkomen: deze bijdrage komt bij die van de Boomse Klei. De afvalmatrices kunnen echter het gedrag van de andere barrières, en met name de Boomse Klei, verstoren. Hoewel een aanzienlijke verstoring van de Boomse Klei door het verglaasde afval en de bestraalde splijtstof nagenoeg uitgesloten is (weinig chemische invloeden, mogelijkheid om de thermische impact te verminderen, bescherming tegen het effect van de rechtstreekse bestralingen in de klei door de aanwezigheid van het opvulmateriaal, weinig gasproductie, geen zwellen), vormt de chemische en fysische verenigbaarheid van de bitumen- en cementmatrices met het bergingssysteem nog een algemene onzekerheid die moet worden weggenomen. Het vervolg van de tekst behandelt bijgevolg enkel de matrices van het verglaasde afval en de bestraalde splijtstof in de hoedanigheid van barrières. De

kennis van de inventaris van de kritische radionucliden in de matrices ten slotte moet adequaat zijn.

De onzekerheid betreffende de scenario's is onbeduidend, want ze zit volledig vervat in de twee andere vormen van onzekerheid.

De onzekerheid betreffende de modellen houdt verband met de degradatiemechanismen die beslissend zijn voor de levensduur van de matrix en voor het vrijkomen van de radionucliden. Hoewel de kennis van de degradatiemechanismen van het verglaasde afval een vergevorderd stadium heeft bereikt, is zij nog ontoereikend voor bestraalde splijtstoffen. Deze onzekerheid wordt in de veiligheidsevaluaties opgevangen door de toepassing van twee degradatiemodellen, die in verschillende levensduren van de matrix resulteren. De onzekerheid betreffende de duurzaamheid van deze matrices is echter weinig belangrijk omdat de radiologische langetermijn veiligheid er ongevoelig voor is. De bijdrage van de matrices tot de veiligheidsfunctie vertraging en gespreid vrijkomen wordt immers ruimschoots overschaduwd door de bijdrage van de Boomse Klei.

Een bijkomende onzekerheid voor de bestraalde splijtstoffen ligt in de manier waarop moet worden gekomen tot de beargumenteerde vereenvoudiging van de bronterm (voorstelling van de heterogeniteit van de splijtstofelementen) die wordt gebruikt in de veiligheidsevaluaties.

Wat betreft de **onzekerheden betreffende de parameters**, heeft de snelheid van vrijkomen van de radionucliden van de afvalmatrices slechts een beperkte invloed op de radiologische impact, hetgeen aansluit bij de conclusie over de boven vermelde onzekerheden betreffende de modellen. De onzekerheden over de inventarissen van de kritische radionucliden hebben niet echt invloed op de radiologische langetermijn veiligheid, gezien de marges die er bestaan tussen de resultaten van deze evaluaties en de van toepassing zijnde beschermingsnormen. Toch zullen deze inventarissen moeten worden bevestigd (alsook de inventarissen van potentieel chemotoxische elementen) voor het effectief te bergen afval.

De watervoerende lagen

De watervoerende lagen vormen geen barrière stricto sensu, maar dragen natuurlijk bij tot de verdunning van de radionuclidenfluxen die de Boomse Klei verlaten. De onzekerheden op het vlak van de watervoerende lagen hebben dus onrechtstreeks betrekking op de evaluatie van de performantie van het systeem indien deze evaluatie de dosis als veiligheidsindicator gebruikt. De (hydrodynamische en/of hydrogeochemische) veranderingen binnen de watervoerende lagen kunnen bovendien eventueel de gastformatie verstoren.

Twee van de onzekerheden op het vlak van de watervoerende lagen betreffen de *lokale schaal* en verdienen meer aandacht: het gaat om het lokale karakter van de afvoerpunten van de ondergrondse waterstromingen en de thermische impact op de waterstromingen

alsook op de chemie en biologie van het water. De andere onzekerheden betreffen de *regionale schaal*. Het gaat om

- **de onzekerheden betreffende de scenario's**, die de natuurlijke en geïnduceerde toekomstige evoluties betreffen (klimaatsveranderingen, waterwinningen enzovoort);
- **de onzekerheden betreffende de modellen**, die de in aanmerking te nemen geometrie en de randvoorwaarden van het hydrogeologische systeem betreffen;
- **de onzekerheden betreffende de parameters**, die enerzijds de afmetingen en de hydraulische geleidbaarheid van de verschillende watervoerende lagen betreffen (in het bijzonder van de diepe watervoerende lagen), en anderzijds de resterende onzekerheid over de hydraulische geleidbaarheid van de Boomse Klei op grote schaal (aanwezigheid van hydraulisch actieve breuken), die een invloed heeft op het resultaat van de regionale hydrogeologische modellering.

De onzekerheden betreffende de scenario's worden behandeld op het niveau van de natuurlijke barrière, omdat de weerstand van die laatste tegen omgevingsveranderingen een belangrijke factor vormt (bijvoorbeeld in geval van omkering van de hydraulische gradiënt). De andere onzekerheden vormen in de veiligheidsevaluaties uiteindelijk een parameteronzekerheid, met name de onzekerheid over de verdunningscapaciteit. De maximale radionuclidenfluxen die het bergingssysteem kunnen verlaten en in de watervoerende lagen kunnen terechtkomen, moeten dus voldoende gering zijn opdat de onzekerheid over de verdunningsfactor onbeduidend wordt.

De biosfeer

Net als de watervoerende lagen vormt de biosfeer geen barrière. De onzekerheden op het vlak van de biosfeer beïnvloeden de geëvalueerde performanties van het bergingssysteem dus slechts onrechtstreeks, en voor zover de dosis is gebruikt als veiligheidsindicator.

Bij de onzekerheden op het vlak van de biosfeer komen de onzekerheden over de activiteiten die plaatshebben in de biosfeer en in het bijzonder de onzekerheden die verband houden met de menselijke indringingen. De verstoring van het bergingssysteem door menselijke indringing wordt hoofdzakelijk behandeld als een onzekerheid op het vlak van de natuurlijke barrière en de bergingsinstallatie: wat is de residuele performantie van het systeem in geval van bijvoorbeeld een boring tot in het afval? In de toekomst zal dit aspect behandeld worden in scenario's die specifiek zijn voor menselijke indringingen.

6.2 Elementen voor het toekomstige methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma

Momenteel beschikt NIRAS nog niet over alle nodige basiselementen voor de precieze en concrete definitie van de volgende fase van haar methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma. Het SAFIR 2-rapport zal met name op verzoek van de Regering worden voorgelegd aan het NEA (*Nuclear Energy Agency*) van de OESO met het oog op een internationaal onderzoek. De conclusies van dit onderzoek en de beslissingen die de

voogdijoverheid van NIRAS zal nemen over het gevolg dat aan het SAFIR 2-rapport moet worden gegeven, zouden eind 2002 of in de loop van 2003 beschikbaar moeten zijn. Op basis van de belangrijkste verworvenheden, de reeds geïdentificeerde perspectieven en de evaluatie van de resterende onzekerheden is het echter mogelijk reeds een aantal wetenschappelijke en technische elementen voor te stellen die in beschouwing dienen genomen te worden voor het vervolg van het methodologisch onderzoek. Deze voorstellen lopen geenszins vooruit op de beslissingen die elders zullen worden genomen, met name in het kader van het voorziene maatschappelijk overleg over het langetermijn beheer van het radioactieve afval (zie hieromtrent het NIRAS-document *Naar een duurzaam beheer van radioactief afval*, dat het SAFIR 2-rapport vergezelt). Evenmin lopen ze vooruit op eventuele aanvullende vereisten, zoals inzake terugneembaarheid van het afval.

Het is belangrijk op te merken dat dergelijk programma niet noodzakelijk alle resterende onzekerheden moet wegnemen; de onzekerheden moeten daarentegen voldoende en adequaat worden verminderd rekening houdend met de verschillende beslissingen die zullen moeten worden genomen.

De wetenschappelijke en technische elementen die beschouwd dienen te worden voor het vervolg van de methodologische werkzaamheden, zijn gestructureerd rond zes krachtlijnen, zes leidraden volgens welke NIRAS zo spoedig mogelijk bevredigende antwoorden zal uitwerken op de essentiële vragen die nog open zijn. Tevens zal de samenhang tussen de verschillende aspecten van het bergingssysteem verbeterd moeten worden, om aldus de overgang van de derde methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsfase naar de voorontwerpfase voor te bereiden, en dit meer bepaald met behulp van het PRACLAY-experiment.

6.2.1 De krachtlijnen

Integratie Het programma zal tot doel hebben alle aspecten op een coherente wijze te integreren volgens een gestructureerde (systematische en systemische) benadering. Dit zal een verbetering noodzaken van het beheer van de raakvlakken tussen het onderzoek en ontwikkeling (inzicht) enerzijds en de werkzaamheden inzake ontwerp van de bergingsinstallatie en de veiligheidsevaluaties anderzijds. De systematische analyse van de FEPS (*Features, Events, and Processes*) met het oog op de definitie van geloofwaardige evolutiescenario's, net als de uitbreiding van de benadering op basis van veiligheidsfuncties tot de aspecten van operationele veiligheid, zullen de verschillende disciplines samenbrengen.

Robuustheid Het programma zal systematisch bestuderen welke de mogelijke impact van alle voorgestelde keuzen, in het bijzonder inzake architectuur, is op de robuustheid van het bergingssysteem, dit is op de ongevoeligheid van zijn werking voor de resterende onzekerheden. Het zal aandacht besteden aan de concrete verwezenlijking van de voorgestelde oplossingen, aan het vertrouwen door de demonstratie van de verwachte performanties voor de verschillende componenten van het bergingssysteem, aan het belang van de rol en de performantie van elke component van het bergingssysteem in de algemene performantie van het systeem (analyse van de redundantie en van de

functionele onafhankelijkheid van de barrières) en aan de identificatie van de eventuele elementen van broosheid. Hiertoe zullen robuustheidsindicatoren worden ontwikkeld en toegepast.

Veiligheid Het programma zal zich tot taak stellen de veiligheidsevaluaties te verfijnen opdat ze de integratie- en robuustheidsaspecten optimaal testen, met name door de identificatie en de beheersing van de onzekerheden en het gebruik van verschillende veiligheidsindicatoren. Dit zal moeten gebeuren in nauwe samenwerking met de veiligheidsautoriteiten.

Demonstratie Het programma zal zich concentreren op de aspecten die rechtstreeks verband houden met de concrete realisatie van de bergingsarchitectuur, en zal bijgevolg het accent leggen op de haalbaarheid en de demonstratie, evenwichtig omkaderd door een wetenschappelijke verificatie van de gebruikte modellen. Zo zal het PRACLAY demonstratie-experiment op ware grootte worden voortgezet, dat tegelijk fundamenteel is als haalbaarheidstest, als middel tot verificatie van de modellen en om redenen van visibiliteit.

Overdraagbaarheid Het programma zal systematisch evalueren in welke mate en met welke doeltreffendheid de methodologische, technische en wetenschappelijke verworven kennis over de Boomse Klei in Mol–Dessel kan worden overgedragen op andere gastformaties (in het bijzonder op de Ieperiaan-kleien) of op andere sites. Het gaat hier niet alleen om een bekommernis om de resultaten en het beheer van de onderzoeken te optimaliseren, maar ook om een analyse van de flexibiliteit van de bestudeerde oplossing.

Naspeurbaarheid Gezien de tijd die de ontwikkeling en de verwezenlijking van een bergingssysteem in beslag nemen, gezien het bij uitstek multidisciplinaire karakter van de ondernomen studies en gezien de enorme hoeveelheid verzamelde resultaten, zal het programma zich erop toeleggen een systeem van naspeurbaarheid van de informatie in te voeren dat de duurzaamheid, de toegankelijkheid, de transparantie en de beschikbaarheid van de verworven kennis moet waarborgen. Dit systeem zal de uitvoerige en systematische inventaris moeten verzekeren van alle resultaten, gegevens, modellen, hypothesen, beslissingen, interpretaties enzovoort en zal ze moeten rationaliseren om de evaluatie van hun kwaliteit en van hun relevantie alsook hun doeltreffende verspreiding binnen het programma en naar andere betrokken partijen te vergemakkelijken, en dit over meerdere generaties.

6.2.2 De elementen waarmee rekening dient gehouden

De elementen waarmee rekening dient gehouden bij het definiëren van de derde fase van het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma slaan op alle bergingsaspecten en betreffen hoofdzakelijk, om budgettaire redenen en om redenen van prioriteitstelling, de referentieoptie, dit is de Boomse Klei in Mol–Dessel. Deze elementen kunnen schematisch worden weergegeven volgens het stramien gebruikt in sectie 6.1.1.

Inventaris en kennis van het te bergen afval

- *Invoeren van een globaal kwaliteitssysteem* dat de kwaliteit van de informatie inzake inventaris en karakterisering van het afval met het oog op hun diepe berging moet garanderen en dat de naspeurbaarheid en de transparantie van deze informatie (productiescenario's, rekencodes, controlemetingen enzovoort) moet verbeteren.
- *Bevestigen en onderhouden van de inventaris* (volumes, gehalten aan kritische radionucliden voor de veiligheid op korte en op lange termijn) voor alle afvalklassen buiten verglaasd afval en bestraalde UO₂-splijtstof. Bevestiging van de fysische en chemische eigenschappen voor alle afvalklassen.
- *Opstellen van scenario's voor afvalproductieprognose die meer rekening houden met eventuele toekomstige evoluties* inzake energieproductie en globaal beheer van de splijtstofcyclus.
- *Opstellen van de ontbrekende acceptatiecriteria.*

Evaluatie van de gastformatie als natuurlijke barrière en kennis van de omgeving van het bergingssysteem

- *Integreren, tot samenhang brengen en systematische verwerken* (oorsprong, lokalisering en kwaliteit) van alle aardwetenschappelijke gegevens om het vertrouwen te versterken in de barrièrekwaliteiten van de gastformatie en in het vermogen om de gastformatie te karakteriseren en haar gedrag te begrijpen.
- *Verfijning van de kennis van de lithologische heterogeniteiten en structurele discontinuïteiten van de Boomse Klei en van hun gevolgen* voor de waterstromingen (ruimtelijke variabiliteit van de hydraulische geleidbaarheid en extrapolatie op verschillende schalen) en de migratie van de radionucliden.
- *Voortzetting van de radiochemische karakterisering* om bij te dragen tot de evaluatie van de homogeniteit van de formatie, om het langetermijn gedrag van het uranium en het thorium alsook de wisselwerkingen tussen de klei en de bovenliggende watervoerende laag te bestuderen en om een vergelijkingspunt te maken voor de veiligheidsindicatoren zoals de radionuclidenfluxen en -concentraties.
- *Verfijning van het regionale hydrogeologische model* om expliciet rekening te houden met de semi-watervoerende lagen en om de verticale en horizontale heterogeniteiten inzake hydraulische geleidbaarheid binnen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan na te gaan, en aldus de vastgestelde incoherentie tussen de lokaal gemeten en de op regionale schaal berekende waarden van de hydraulische geleidbaarheid van de Boomse Klei weg te nemen of te verklaren.
- *Ontwikkeling van een geïntegreerde benadering van de hydrogeologische modellen op de verschillende schalen* (harmonisering van de rekencodes en van de randvoorwaarden).
- *Bevestiging van het lokale karakter van de afvoerpunten van de waterstromingen.*
- *Evaluatie van de gevoeligheid van het geologische, hydrogeologische en hydro-geochemische systeem* (inclusief de migratie-eigenschappen) voor de natuurlijke of geïnduceerde verstoringen (waterwinningen, seismische activiteit, veranderingen van

de klimaats- en milieuomstandigheden enzovoort) als één van de grondslagen voor de analyse van de scenario's voor de langetermijn veiligheidsevaluaties.

- *Gebruik van hydrogeochemische analyses ter verificatie van de resultaten van de hydrogeologische modellen.*
- *Verfijning van het inzicht in de retentieprocessen die werkzaam zijn in de Boomse Klei om het vertrouwen in de geselecteerde migratieparameterwaarden voor de kritische radionucliden te onderbouwen.*
- *Voltooiing van de studie van de invloed van de organische stof op de radionuclidenmigratie binnen de Boomse Klei.*
- *Analyse van de specifieke kenmerken van de leperiaan-kleien ten aanzien van een diepe berging en ten aanzien van de verworven kennis voor de Boomse Klei: aanwezigheid van zout poriënwater, geringe mechanische weerstand, geringe warmtegeleidbaarheid, aanwezigheid en rol van preferentiële wegen voor de migratie van vloeistoffen.*

Ontwerp en bouw van de bergingsinstallatie

- *Definitie van de technische criteria betreffende de algemene bergingsarchitectuur en haar verschillende componenten en analyse van de mogelijke keuzes, hetgeen eenduidige limieten noodzaakt voor de maximaal toegestane temperatuurstijgingen voor de verschillende componenten van het bergingssysteem en zijn omgeving en eventueel ook eenduidige voorschriften voor de terugneembaarheid van het afval gedurende een welbepaalde periode.*
- *Rekening houdend met de vereisten met betrekking tot de radiologische en operationele veiligheid en tot de technische en economische haalbaarheid, herziening van de ontwerpbasis van de bergingsinstallatie volgens een systematische benadering die de bergingsinstallatie en de gastformatie als een geheel beschouwt en tevens voldoende aandacht heeft voor de mogelijke wisselwerkingen tussen haar diverse componenten en voor hun complementariteit.* Het toekomstige programma zal zich vervolgens tot taak stellen de bergingsarchitecturen te herdefiniëren, meer bepaald de referentiearchitectuur voor het verglaasde afval en de bestraalde splijtstoffen, en de architectuur te preciseren voor een representatieve afvalklasse van categorie B. Het zal zich vervolgens tot taak stellen de verschillende uitgewerkte architecturen te integreren binnen één samenhangend, technisch bevredigend, duidelijk gespecificeerd, verantwoord bergingssysteem waarvan het bewijs kan worden geleverd dat het beantwoordt aan alle beginvereisten, inclusief de vereisten in verband met de in situ realisatie.
- *Demonstratie op ware grootte, dankzij het PRACLAY-experiment, van de haalbaarheid van de herziene referentiebergingsarchitectuur.*
- *Grondiger studie en optimalisering van de keuze van de materialen voor de verschillende componenten van het bergingssysteem.* Voor de verpakkingen (en/of mantels) zal het toekomstige programma een geïntegreerde benadering volgen die rekening houdt met alle parameters die van invloed kunnen zijn op de corrosie. Het zal zich concentreren op een beter begrip van de evolutie in de tijd van de geochemie van

het milieu en op een benadering van corrosiepreventie. Het zal de problematiek van het lassen onderzoeken met betrekking tot haalbaarheid en corrosiegedrag. Het zal ook de samenstelling van de opvulmaterialen en de afdichtingsmaterialen bestuderen naar gelang van hun rol, de van hen verwachte performanties en hun wijze van plaatsing.

- *Evaluatie van de mogelijkheden voor afvoer van de corrosiegassen* die worden gevormd door het afval van categorie B, zonder afbreuk te doen aan de performantie van de natuurlijke barrière.
- *Herevaluatie van de thermische impact* op alle componenten van het bergingssysteem en zijn omgeving en eventueel wijziging van de geometrie van de installaties.
- *Identificatie en evaluatie van de elementen van technische flexibiliteit van de bergingsarchitectuur, in het bijzonder die welke belangrijk zijn voor de terugneembaarheid* van het afval, waarbij de periode van terugneembaarheid nog bepaald moet worden.
- *Uitwerking van de modaliteiten voor de exploitatie van de bergingsinstallatie*. Het gehele exploitatiesysteem zal rechtstreeks worden bepaald door het feit of de installatie al dan niet zal moeten worden beschouwd als een mogelijk besmette zone.
- *Evaluatie van de modaliteiten voor de sluiting van de bergingsinstallatie en voor de bijbehorende monitoring*. Deze evaluatie zal tegelijk de aspecten die verband houden met de voorschriften inzake *safeguards*, de impact op de korte- en langetermijn veiligheid en de nog te bepalen voorschriften inzake terugneembaarheid van het afval moeten beschouwen.

Inzicht in de werking van de bergingsinstallatie na haar sluiting en in de verstoringen die de bergingsinstallatie teweegbrengt in de Boomse Klei

- *Bevestiging van de barrière-eigenschappen van het glas in representatieve bergingsomstandigheden*. Aangezien de duurzaamheid van het verglaasde opwerkingsafval geen significante impact heeft op de radionuclidenflux op het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende lagen, zal het toekomstige programma de toelaatbare onzekerheden voor deze parameter moeten beoordelen. Dit kan met name door het ultraconservatieve karakter van de momenteel gehanteerde waarde aan te tonen. Het toekomstige programma zal aldus de eraan verbonden veiligheidsreserve moeten ramen. Het programma zal eveneens de studie van het uitlooggedrag uitbreiden naar andere radionucliden die als kritisch of mogelijk kritisch worden beschouwd.
- *Evaluatie van de verstoringen die de verschillende kunstmatige componenten van het bergingssysteem teweegbrengen in de gastformatie*. Het toekomstige programma zal moeten aantonen dat de gunstige geochemie van de gastformatie, waarvan de handhaving op lange termijn fundamenteel is voor de veiligheid van het bergingssysteem, niet onaanvaardbaar dreigt te worden verstoord door de aanwezigheid van de bergingsinstallatie. Het programma zal met name de impact van de verstoringen die voortvloeien uit de vorming van chemische fronten (inclusief een oxidatiefront als gevolg van de uitgraving en de exploitatie van de bergingsinstallatie) op de retentie-eigenschappen van de klei bestuderen.

- *Evaluatie van de modaliteiten voor de bouw van de bergingsinstallatie.* Het toekomstige programma zal voorrang geven aan een verbetering van het inzicht in en van de modellering van het momentane hydromechanische gedrag van de Boomse Klei bij het uitgraven, met name door de dimensies van de door de uitgraving verstoorde zone en haar impact op de migratie te ramen. Het zal de studie verdiepen van het uitgestelde gedrag van de klei, in het bijzonder de studie van de evolutie in de tijd van de door de uitgraving veroorzaakte scheuren (bevestiging van het zelfhelingscapaciteit van de klei) en de studie van de spanningen die door de formatie worden veroorzaakt in de bekledingen, en van de vervormingen van deze bekledingen.
- *Studie van de gasvorming* door anaërobe corrosie, in het bijzonder van de verpakkingen van het afval van categorie B, en door bacteriologische activiteit in functie van de tijd, en studie van het verband tussen deze corrosie en de geochemie. Deze studie zal moeten worden aangevuld met de analyse van de migratie van deze gassen binnen de klei (fracturatie, verbetering van de precisie van de diffusiecoëfficiënten van de waterstof en het methaan) alsook met de analyse van de mogelijkheden om de geproduceerde gassen op gecontroleerde wijze af te voeren zonder de insluiting van het afval in gevaar te brengen.
- *Studie van het gedrag van de bestraalde splijtstoffen in representatieve bergingsomstandigheden.*
- *Verdieping van de studie van het gedrag van de afvalklassen waarvan de verenigbaarheid met de klei onzeker is, en met name van het gedrag van het gebitumineerde afval.*

Evaluatie van de operationele veiligheid en van de langetermijn veiligheid

- *Diepgaande bespreking van de algemene methodologie van de langetermijn veiligheidsevaluaties met de veiligheidsautoriteiten.*
- *Verfijning van deze methodologie*, met in het bijzonder een verbetering van de methodologie van scenario-ontwikkeling, een herziening van de te beschouwen FEPS en een betere definitie van de tijdschalen waarin de verschillende elementen van het bergingssysteem en zijn omgeving als robuust kunnen worden beschouwd.
- *Verfijning van de modellen die worden gebruikt voor de evaluatie van de langetermijn veiligheid*, in het bijzonder wat betreft de aspecten abstractie en vereenvoudiging van het bergingssysteem en wat betreft de modellering van de biosfeer in het normale-evolutiescenario.
- *Integratie van de impact van de heterogeniteiten in de Boomse Klei en de door de uitgraving verstoorde zone op de radionuclidenmigratie.*
- *Systematisering van de definitie, de selectie en de evaluatie van de gewijzigde-evolutiescenario's* en in het bijzonder studie van de gevolgen van de mogelijke klimaatsveranderingen (opwarming, glaciaties enzovoort) voor de klei en voor de hydrogeologische omgeving van het bergingsinstallatie.
- *Verfijning van de definitie en van de interpretatie die moet worden gegeven aan de verschillende veiligheids- en milieubeschermingsindicatoren*, in het bijzonder voor de verschillende beschouwde tijdschalen.

- *Identificatie van de verschillende types van resterende onzekerheden en van de middelen die in voorkomend geval nodig zijn om ze te verminderen, en verfijning van de methodes nodig voor de behandeling van deze resterende onzekerheden.*
- *Veiligheidsevaluatie voor de afvalklassen geconditioneerd in bitumen en in cement.*
- *Samenbrengen van alle kwalitatieve en kwantitatieve argumenten die de veiligheids-evaluaties onrechtstreeks ondersteunen.*
- *Herevaluatie van de chemotoxiciteit van het bergingssysteem op basis van een geactualiseerde afvalinventaris en geactualiseerde migratieparameters.*
- *Definitie van de evaluatiebasis van de nucleaire en conventionele operationele veiligheid en evaluatie van die laatste en van de naleving van de milieubeschermingsvoorschriften, volgens een door de veiligheidsautoriteiten goedgekeurde methodologie.*
- *Bepalen van de basis van de radiologische optimalisering (ALARA-principe).*

Globale evaluatie van het bergingssysteem en zijn omgeving

- *Definitie van de methodes voor evaluatie van de robuustheid van het bergingssysteem en identificatie en kwantificering van de elementen die tot deze robuustheid bijdragen.*
- *Verruiming van de benadering met veiligheidsfuncties tot de operationele veiligheid.*

Evaluatie van de Ieperiaan-kleien

- *Voortzetting van de preliminaire studies betreffende de Ieperiaan-kleien onder de nucleaire zone van Doel, door zich te concentreren op hun specifieke eigenschappen, zoals de aanwezigheid van zout water (invloed op de corrosie van de metalen en op de insluiting, de speciatie en de migratie van de radionucliden), hun geringe mechanische weerstand (invloed op de bouw mogelijkheden), hun geringe warmtegeleidbaarheid en de aanwezigheid van preferentiële migratiewegen. (Het te bereiken kennisniveau is uiteraard minder hoog dan voor de Boomse Klei, aangezien het gaat om een eerste evaluatie van het potentieel van deze klei als gasformatie.)*

Evaluatie van de kosten en financiering

- *Verfijning van de procedure voor raming van de marges betreffende de technologische en project-onzekerheden en toepassing op de verschillende afvalklassen van de geologische groep naarmate de bergingsarchitectuur voor elk van deze klassen voldoende betrouwbaar wordt, en vervolgens herziening van de evaluaties op geregelde tijdstippen of volgens de behoeften.*

Kwaliteitsborging

- *Certificering volgens de ISO 9001–2000-norm van de activiteiten inzake beheer van het onderzoek en de ontwikkeling, na er de aanbevelingen van het IAEA in te hebben verwerkt.*

6.2.3 De volgende etappes

De diepe berging van het radioactieve afval van categorieën B en C in weinig verharde klei vormt een project dat in vele opzichten innovatief is. Het moet bijgevolg alle karakteristieke etappes van een dergelijk project doorlopen: fundamenteel onderzoek, methodologisch onderzoek, toegepast onderzoek, demonstratie-experiment, voorontwerpstudies, vergunningsaanvragen, piloot-fase, uitvoering enzovoort. Het huidige programma moet dusdanig worden voortgezet dat de verschillende aspecten ervan — inzicht, ontwerp en evaluatie — coherent worden gemaakt en tot een passend maturiteitsniveau worden gebracht, om geleidelijk te kunnen overgaan van de fase van het methodologische onderzoek en ontwikkeling naar de voorontwerpfase. Het PRACLAY demonstratie-experiment zal als scharnier tussen deze twee fases fungeren (fig. 6.2). PRACLAY (1995–2015), dat zich toespitst op de directe demonstratie van de haalbaarheid, en niet op de evaluatie van de langetermijn veiligheid, die sowieso indirect is, heeft twee fundamentele doelstellingen:

- het mogelijk maken zich met vertrouwen uit te spreken over de technische haalbaarheid van de gekozen architectuuropties, in de stand van de huidige technologieën (rol van *vertrouwen* in de haalbaarheid). Het installeren van het experiment in situ zal een niet te verwaarlozen deel van de haalbaarheid van de voorgestelde architectuur bevestigen.
- de resultaten bevestigen die zijn bereikt door de onderzoeks- en ontwikkelingswerkzaamheden (rol van *onderbouwen* van het vertrouwen in de modellen, hun basishypothesen en hun voorspellingen). De eindresultaten van dit experiment zullen dus dienen om het functioneren van de verschillende componenten van het bergingssysteem nauwkeuriger af te bakenen. Ze zullen kostbare informatie leveren voor de optimalisering van de architecturen, die het voorwerp zal uitmaken van de voorontwerpfase.

Na het installeren in situ van het PRACLAY-experiment en de waarneming van de eerste jaren van werking, zou het vertrouwen in de haalbaarheid van de bestudeerde oplossing voldoende groot moeten zijn om tegen 2010 een eerste *Veiligheids- en haalbaarheidsdossier* over de berging van het afval van categorieën B en C in weinig verharde klei op te stellen. In tegenstelling tot de rapporten van het SAFIR-type, die een willekeurig afgebakende periode bestrijken en zich plaatsen in een methodologisch onderzoeks- en ontwikkelingsproces, zal dit dossier volledig autonoom zijn. Het zal de basis vormen van opeenvolgende iteraties inzake haalbaarheid en veiligheid, en zal het resultaat zijn van een wetenschappelijk en technisch overleg met de Belgische autoriteiten die bevoegd zijn voor nucleaire veiligheid. Dit overleg zal reeds starten op basis van het SAFIR 2-rapport. Naast de aanbevelingen over de nog te voltooien werkzaamheden inzake methodologische onderzoek en ontwikkeling en over de voorbereiding van de fase van voorontwerp, zal dit eerste dossier zich uitspreken over de volgende aspecten:

voor de Boomse Klei in Mol–Dessel:

- de argumenten die enerzijds een adequaat inzicht in de bergingssite en in het bergingssysteem ondersteunen en die anderzijds de evaluatie van de veiligheid onderbouwen;

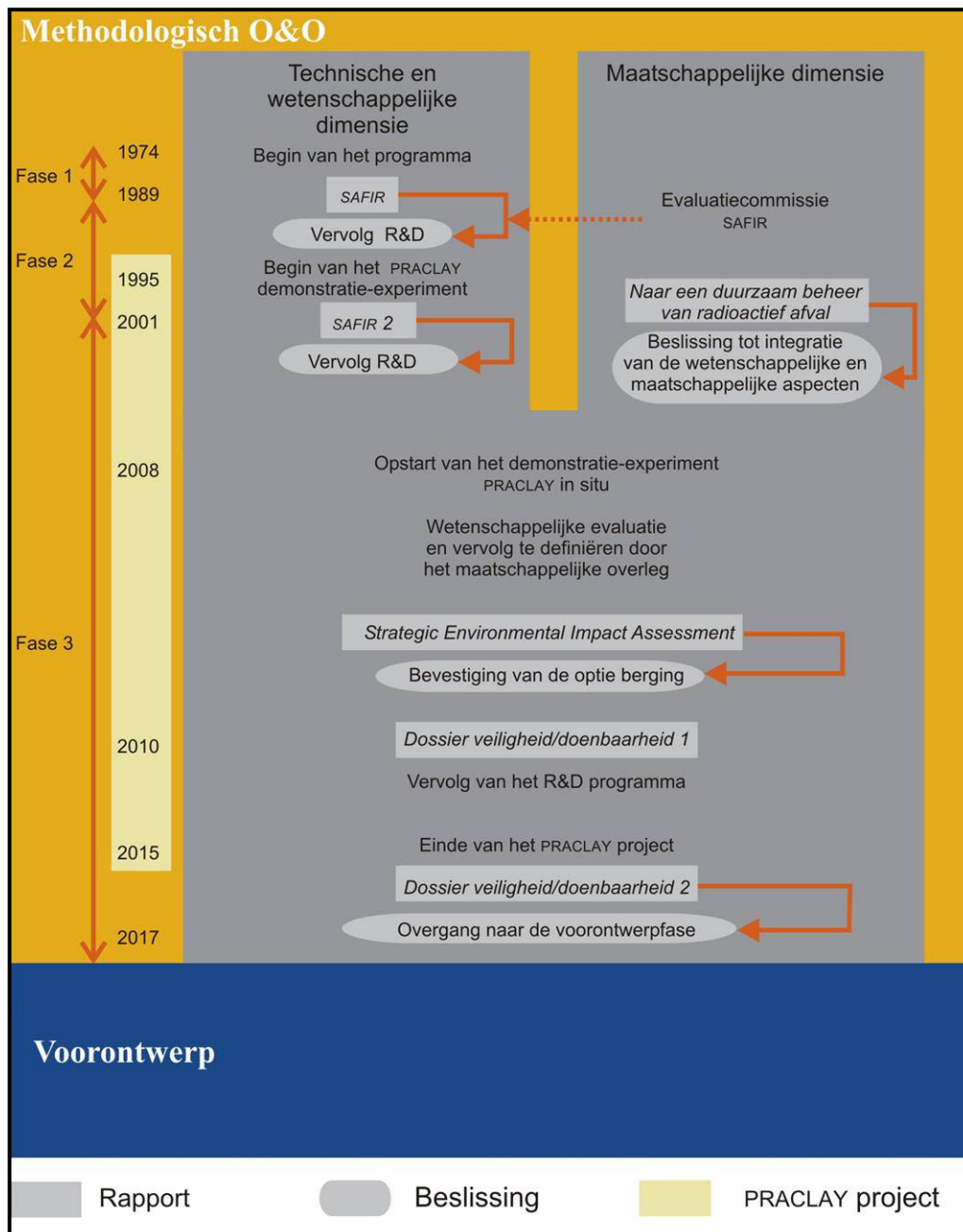
- de haalbaarheid van de bergingsarchitectuur, met inbegrip van de mogelijkheden tot terugname van het afval en tot controle;
- de conventionele en radiologische veiligheid alsook de milieubescherming tijdens de verschillende fases van de bergingsinstallatie;

voor de Ieperiaan-kleien in Doel:

- het haalbaarheids- en veiligheidspotentieel van de Ieperiaan-kleien;
- de overdraagbaarheid van de kennis van de Boomse Klei;
- het nut en de doelstellingen van een ondergrondse karakteriseringsinstallatie die eventueel zou kunnen worden gebouwd en geëxploiteerd na de methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsfase.

Na afloop van het demonstratie-experiment PRACLAY zal een tweede *Veiligheids- en haalbaarheidsdossier* omstreeks 2017 de balans opmaken van alle verkregen resultaten, en in het bijzonder van de aspecten die het vertrouwen in de modellen en in hun voorspellingen versterken. Op dit tweede dossier zou de beslissing om de methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsfase te beëindigen en om de voorontwerpfase aan te vangen, kunnen steunen. Die laatste fase zal met name tot doel hebben het voorgestelde bergingssysteem te kwalificeren voor al het te bergen afval, en dit voor een specifieke gastformatie en een te definiëren specifieke site. Deze fase zal een algemene beschrijving en een verantwoording van de verschillende elementen van de bergingsarchitectuur omvatten (kenmerken, geometrie, bouwtechnieken, exploitatietechnieken, kwalificatiemethoden enzovoort), welke beschrijving en verantwoording noodzakelijkerwijze zullen steunen op de resultaten van een voorafgaande technische, economische en radiologische optimalisering (ALARA). Een dergelijke voorontwerpfase (alsook de uitvoeringsfases van de bergingsinstallatie) zal moeten worden ondersteund door een reeks aanvullende onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten. Het betreft met name een bevestiging van de gemaakte prognoses en een aanpassing aan de reële situaties die ondergronds worden aangetroffen, en aan het werkelijk te bergen afval. Het betreft met andere woorden de verzekering van de flexibiliteit die nodig is voor de realisatie van een dergelijk project.

Aangezien het evident is dat de problematiek van het langetermijn beheer van het radioactieve afval moet worden beschouwd in een breder dan strikt technisch-wetenschappelijk kader, zal het in het toekomstige programma van NIRAS nodig zijn de maatschappelijke en economische aspecten beter te integreren met de technisch-wetenschappelijke aspecten. Een dergelijk interdisciplinair programma, waar zuivere, toegepaste en menswetenschappen samenkomen, zal moeten worden gestructureerd om het beslissingsproces inzake langetermijn beheer van het radioactieve afval op een zo ruim mogelijke basis te ondersteunen. Het programma vormt het voorwerp van het NIRAS-document *Naar een duurzaam beheer van radioactief afval* dat het SAFIR 2-rapport vergezelt. Ter ondersteuning van deze door haar gewenste integratie heeft NIRAS de intentie een document van het type *Strategic Environmental Impact Assessment* op te stellen om bij te dragen tot de evaluatie van de alternatieven inzake langetermijn beheer, rekening houdend met hun respectieve milieu-effecten.



Figuur 6.2 Principeschema van de verschillende etappes van het programma inzake diepe berging in de Boomse Klei zoals voorgesteld door NIRAS (zonder vooruit te lopen op de beslissingen die metterdaad zullen worden genomen terzake).

6.3 De evaluatie van het vertrouwen

Het vertrouwen resulteert uit een positief oordeel dat hoofdzakelijk steunt op kwalitatieve argumenten aangaande het verworven inzicht in en de verworven kennis van de FEPs die de werking en de evolutie van een gegeven systeem bepalen. Het vertrouwen heeft een

uiterst betrekkelijk karakter, aangezien het te bereiken niveau van vertrouwen afhangt van de beslissingen die moeten worden genomen. In het onderhavige geval is het evident dat het vertrouwensniveau dat moet worden bereikt om een beslissing tot voortzetting van de methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten te bekomen, minder hoog moet zijn dan het niveau dat zal moeten worden bereikt voor een aanvraag van een exploitatievergunning voor een bergingsinstallatie.

Inzake berging berust het vertrouwen in de veiligheid en haalbaarheid op drie types van overwegingen:

- de identificatie van de verworvenheden en van de open vragen;
- de evaluatie van het relatieve belang van de resterende onzekerheden;
- de definitie en de beschrijving van de te leveren inspanningen om de onzekerheden die het meest invloed hebben op de veiligheid, voldoende te kunnen verminderen.

De gedetailleerde analyse van alle verworven technische en wetenschappelijke kennis, van de resterende onzekerheden en hun invloed op het vertrouwen dat kan worden gesteld in de goede werking van het bestudeerde bergingssysteem, alsook de analyse van de nodige middelen om de overblijvende lacunes weg te nemen, stellen NIRAS in staat te bevestigen dat de optie diepe berging in een weinig verharde klei op dit ogenblik en voor het afval dat wordt beschouwd in het SAFIR 2-rapport, een volstrekt te overwegen optie blijft. De volgende (derde) fase van het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma, die wordt verruimd door de integratie van het sociale en het economische aspect, zal het mogelijk moeten maken het verworven vertrouwen nog meer te versterken, door zich toe te spitsen op de open vragen en de resterende onzekerheden. Deze algemene beoordeling van het vertrouwensniveau vloeit voort uit de antwoorden op de volgende zes vragen.

Is men in staat een bergingssysteem te ontwerpen en te realiseren voor het afval van categorieën B en C?

Er zijn belangrijke vorderingen geboekt inzake het algemeen ontwerp van een diepe-bergingssysteem en aanzienlijke verworvenheden verzameld wat betreft de uitgraving, de bouw en de exploitatie van ondergrondse installaties in een weinig verharde klei op een diepte van om en bij de 220 meter. Daarnaast hebben het synthesewerk dat is uitgevoerd in het kader van de voorbereiding van het SAFIR 2-rapport enerzijds, en de voorbereiding van het PRACLAY demonstratie-experiment (en in het bijzonder de realisatie van de OPHELIE-maquette) anderzijds het mogelijk gemaakt de resterende onzekerheden en de mogelijke moeilijkheden die verbonden zijn aan de concrete realisatie van de referentie-bergingsarchitectuur duidelijk in kaart te brengen.

Het vertrouwen dat deze onzekerheden en moeilijkheden in de volgende fase van het programma een afdoende antwoord vinden steunt op de volgende elementen:

- een systematische en systemische ontwerpmethodologie, die NIRAS heeft ontwikkeld in overleg met buitenlandse afvalbeheerders en die steunt op de veiligheidsfuncties die het bergingssysteem moet vervullen;

- de reeds verworven kennis inzake het gedrag van de materialen van de bergingsinstallatie en de huidige industriële beschikbaarheid van een ruim gamma van materialen, wat een aanzienlijke flexibiliteit in de materiaalkeuzen mogelijk maakt (voornamelijk inzake materialen voor de verpakking (en/of mantel) en inzake opvulmaterialen);
- de versterking, in het kader van het toekomstige programma, van de studie van de interfaces en wisselwerkingen tussen de verschillende componenten van het bergingssysteem;
- de fundamentele rol die het demonstratie-experiment PRACLAY zal spelen, en dit zowel op het vlak van bevestiging van de haalbaarheid en het onderbouwen van de modellen, als op het vlak van de overgang naar een voorontwerpfase;
- de technische en wetenschappelijke kennis die reeds is opgebouwd in de bergingsprogramma's in andere landen;
- de technologische ontwikkelingen en de verworvenheden van de jongste twintig jaar inzake bouw van ondergrondse installaties in weinig verharde klei, die de mogelijkheid van toekomstige verbeteringen laten uitschijnen.

Is men in staat het beschouwde bergingssysteem te karakteriseren en begrijpt men het gedrag ervan?

Het algemene inzicht in de werking van het bergingssysteem, op basis van de verworven kennis, op basis van de bepaling en toepassing van de veiligheidsfuncties en op basis van de resultaten van de langetermijn veiligheidsevaluaties, is op bevredigende wijze gevorderd. Het cruciale belang van de veiligheidsfunctie vertraging en gespreid vrijkomen, die hoofdzakelijk wordt verzekerd door de natuurlijke barrière (de Boomse Klei), werd duidelijk bevestigd. Vandaar de centrale rol die wordt toegekend aan de karakterisering van de gastformatie en aan de evaluatie van alle wijzigingen en verstoringen van die laatste (zie ook kader aan het einde van deze sectie).

In dit verband is de karakterisering van de kleibarrière sterk gevorderd als gevolg van de aanpassing van beproefde methodes voor geologische, hydrogeologische, geomechanische en geochemische karakterisering aan de specifieke behoeften van het verkennen van een weinig verharde kleiformatie.

De kennis van de fenomenen en processen die de migratie van de kritische radionucliden in de gastformatie bepalen, is goed gevorderd, als gevolg van een veelzijdig onderzoeksprogramma (diverse experimentele benaderingen, zowel in het laboratorium als in situ, studie van de natuurlijke radionucliden in de Boomse Klei, gebruik van verschillende conceptuele migratiemodellen, brede internationale samenwerking op experimenteel en conceptueel vlak, alsook de opstelling van betrouwbare databases). De resterende onzekerheden, namelijk die betreffende de retentieprocessen van enkele kritische radionucliden, lijken met de beschikbare onderzoeksmethoden opgelost te kunnen worden.

De impact van een mechanische en chemische verstoring van de Boomse Klei als gevolg van de uitgraving en de bouw van de ondergrondse installaties, blijft één van de cruciale

punten van het toekomstige programma. De directe demonstratie van de mogelijkheid om industriële graaftechnieken te gebruiken die de verstoringen tot een minimum beperken, alsook de karakterisering en het inzicht in de evolutie in de tijd van deze verstoringen, vormen in dit opzicht de centrale vragen.

Bovendien is het vertrouwen in de mogelijkheid tot karakterisering van de verschijnselen in verband met de vorming, de accumulatie en de migratie van gassen binnen een bergingsstelsel in een weinig doorlatende klei, hoog, want dit aspect werd ontwikkeld in een internationaal kader. Het is bovendien mogelijk de architectuur van de bergingsinstallaties te wijzigen om lokale gasoverdruk te voorkomen.

De correcte invulling van de veiligheidsfunctie fysische insluiting door een corrosiebestendige metalen verpakking (en/of mantel) lijkt een bereikbaar doel, te meer daar er een belangrijke marge bestaat wat betreft de corrosiepreventie. Deze preventie zou kunnen gebeuren door te opteren voor edeler legeringen dan het huidige referentiemateriaal en/of door gunstige geochemische omstandigheden te verzekeren in het bergingsmilieu. Het toekomstige programma zal versterkt moeten worden door een systematisch onderzoek van alle corrosietypes voor de beschouwde metalen materialen. Bovendien is nog geen rekening gehouden met de radionuclidenretentie op de corrosieproducten van de metalen materialen (ijzeroxiden en -hydroxiden), die bekendstaan om hun sterke sorptiecapaciteit; deze radionuclidenretentie zou het vrijkomen uit het nabije veld kunnen verminderen, ook bijvoorbeeld in geval van voortijdig falen van de fysische insluiting door de verpakking (en/of mantel).

Is men in staat de parameterwaarden van het bergingsstelsel te extrapoleren in tijd en ruimte?

De problematiek van de extrapolatie in tijd en ruimte van de parameters van de natuurlijke barrière en van de kunstmatige barrières staat centraal en zal altijd centraal staan in elke evaluatie van de langetermijn veiligheid van een bergingsstelsel. Om deze problematiek te kunnen beoordelen, moet vooreerst nagegaan worden welke processen cruciaal zijn voor het gedrag en de evolutie van de barrières, en welke factoren deze processen kunnen verstoren.

Migratie van de radionucliden doorheen de natuurlijke barrière heen Aangezien deze migratie wordt beheerst door diffusie, vormt alleen de extrapolatie in de tijd een wezenlijk probleem. De ruimtelijke extrapolatie kan immers worden aangepakt door een representatieve bemonstering van de Boomse Klei. Zo zal de geochemische en fysische stabiliteit van de gastformatie over lange periodes moeten kunnen worden aangetoond. Verschillende argumenten pleiten voor een dergelijke stabiliteit (capaciteit tot zelfheling en chemische bufferwerking, het feit dat na de sedimentatie snel de geochemische omstandigheden tot stand kwamen die nu worden aangetroffen, enzovoort). De bevestiging van deze en eventueel andere argumenten lijkt binnen handbereik te liggen, met name via geoprospectieve studies en via de voortzetting van de karakterisering van het gedrag van de natuurlijke radionucliden in de Boomse Klei. Bovendien zou de conclusie over de afwezigheid van significante advectieve beweging binnen de Boomse Klei moeten

worden versterkt door de studie van de hydraulische geleidbaarheid op grote schaal (via breuken op regionale schaal) van de klei en van de mogelijke stromingen in de banden met grovere korrelgrootteverdeling. Dit zou ook een extrapolatie van de verworven gegevens op de centimeter-, meter- en decameterschalen mogelijk maken, die coherente waarden voor de hydraulische geleidbaarheid aangeven.

Duurzaamheid van de verpakking (en/of mantel) De extrapolatie in de tijd is ook hier uiterst belangrijk, aangezien de waterdichtheid van deze barrière moet worden verzekerd over perioden van meerdere honderden tot meerdere duizenden jaren. Hiertoe zullen veiligheidsmarges moeten worden gehanteerd die toereikend zijn ten aanzien van de corrosiescenario's, bijvoorbeeld door de verpakking (en/of mantel) te overdimensioneren (dikte, kwaliteit) in functie van de corrosieve omgevingen en de verwachte corrosieverschijnselen.

Duurzaamheid van de afvalmatrices De extrapolatie in de tijd is ook hier uiterst belangrijk. Een dergelijke extrapolatie is mogelijk omdat de degradatiemechanismen van de glasmatrix in een klei-omgeving goed gekend zijn. De geringe hydraulische geleidbaarheid van de klei maakt het mogelijk het systeem te beschouwen als een statisch systeem waarin de diffusieprocessen de uitlogingssnelheden controleren. Bovendien blijkt uit de langetermijn veiligheidsevaluaties dat de invloed van de duurzaamheid van de matrices grotendeels overschaduw wordt door de performantie van de Boomse Klei. Een stabiele glasmatrix vormt dus een veiligheidsreserve. Een verbetering van de kennis van de degradatiemechanismen van de bestraalde splijtstoffen is niettemin nodig, maar zal kunnen steunen op de aanzienlijke kennis en ervaring die terzake is opgedaan in het buitenland.

Haalbaarheid Wat betreft de ruimtelijke extrapolatie van het aspect technische haalbaarheid, zal het PRACLAY demonstratie-experiment een zeer belangrijke bijdrage leveren tot de bevestiging van de kennis en van het huidige vertrouwen in de karakteristieken van de diverse componenten van het bergingssysteem.

De **natuurlijke analogieën** zijn tot nog toe slechts weinig gebruikt, hoewel een synthese is gemaakt van hun toepassingen voor een berging in weinig verharde klei. In het algemeen maken zij het mogelijk het vertrouwen in de intrinsieke eigenschappen van de klei als natuurlijke barrière te versterken, zoals met name wordt geïllustreerd door de resultaten van de volgende studies van natuurlijke analogieën:

- *fysische insluiting* De klei heeft materialen met een hoge biologische afbreekbaarheid zoals het quartaire fossiele hout van Dunarobba of het fossiele hout uit het Mioceen in de streek tussen Samber en Maas, beschermd tegen afbraak. Er zijn bovendien fragmenten vulkanisch glas uit het Oligoceen aangetroffen in de Boomse Klei. Ze vertonen geen sporen van aantasting, hoewel ze al bijna 30 miljoen jaar in de klei zitten. De duurzaamheid van dit vulkanisch glas in de Boomse Klei levert een aanvullende aanwijzing voor de stabiliteit van een glasmatrix in het bergingsmilieu.
- *retentie* Klei is in het algemeen goed in staat radionucliden chemisch te fixeren. Dit wordt aangetoond door natuurlijke analogieën zoals die van Alligator Rivers of de oplossingsholten in de streek tussen Samber en Maas. Deze natuurlijke analogieën benadrukken vooral de capaciteit van de klei om doeltreffend secundaire mineralen te

fixeren die rijk zijn aan verontreinigende stoffen en die nieuw gevormd worden op het grensvlak vloeistof / vaste stof. Deze fixeringscapaciteit is karakteristiek voor vele natuurlijke materialen die worden gekenmerkt door een hoog specifiek oppervlak.

- *weerstand tegen geochemische veranderingen* De Boomse Klei bevat carbonaten en pyriet/sideriet die de zuurtegraad en het oxiderende karakter van eventuele doorsijpelende vloeistoffen kunnen bufferen. De studie van verschillende Belgische kleien die zure aantastingen of een aanzienlijke oxidatie hebben ondergaan, toont aan dat de resulterende minerale verbindingen een hoog specifiek oppervlak en dus een grote retentiecapaciteit vertonen.

Is men in staat de veiligheid van een bergingssysteem te evalueren?

De ganse methodologie voor evaluatie van de langetermijn veiligheid steunt op een brede internationale consensus. De opeenvolgende veiligheidsevaluaties die tijdens de periode 1985–2000 zijn uitgevoerd in het Belgische programma, geven een coherent beeld van de karakteristieken of processen die de veiligheid van het bestudeerde bergingssysteem bepalen, van het relatieve belang van de verschillende onzekerheden en van het aandeel van de kritische radionucliden in de totale radiologische impact. Dit ondanks het gebruik van sterk verschillende conceptuele en numerieke modellen in de loop van de tijd.

Het vertrouwen in deze methodologie kan in de toekomst nog worden vergroot door de ondersteunende wetenschappelijke basis te versterken (bijvoorbeeld door internationale onderzoeken en intensere interacties met de academische wereld) en door de transparantie en naspeurbaarheid ervan te verbeteren, voornamelijk door de coherentie van de modellen, hypothesen, gegevens en randvoorwaarden in de methodologie te versterken en door de nodige elementen van kwaliteitsborging en kennisbeheer in te brengen.

Het gebruik van andere veiligheidsindicatoren dan de dosis en het risico lijkt waardevol, maar het zal nodig zijn de vergelijkings- en beoordelingspunten nader uit te werken.

Is het bestudeerde bergingssysteem veilig?

Alle berekeningen die zijn uitgevoerd voor het normale-evolutiescenario wijzen erop dat het bestudeerde bergingssysteem radiologisch veilig is. De berekende radiologische impact voor een individu van de referentiegroep is immers systematisch en beduidend lager dan de dosisbeperking. De eerste resultaten van de kwantitatieve of kwalitatieve evaluaties die zijn uitgevoerd voor de gewijzigde-evolutiescenario's tonen de robuustheid van het beschouwde bergingssysteem aan: ondanks de belangrijke verstoringen van het systeem die in elk gewijzigde-evolutiescenario worden verondersteld, blijft de algemene performantie van het systeem ruimschoots intact. Het vertrouwen in de resultaten van de veiligheidsevaluaties is relatief groot, en dit om meerdere redenen:

- *systematisch gebruik van conservatieve hypothesen*, en dus vorming van veiligheidsreserves (fig. 2.6 en tabel 6.1). Immers, de veiligheidsevaluaties

- onderschatten wellicht sterk de levensduur van de kunstmatige barrières en vooral van de glasmatrix;
 - verwaarlozen in ruime mate de rol van de andere kunstmatige barrières dan de verpakking (en/of mantel);
 - verwaarlozen het feit dat de sorptie van de radionucliden op de corrosieproducten van de verpakking (en/of mantel) en van de andere metalen materialen de migratie sterk kan vertragen;
 - gebruiken een referentiegroep waarvan de veronderstelde levenswijze zeer ongunstig is voor de evaluatie van de radiologische impact.
- *aanwezigheid van talrijke robuustheidselementen* in het bergingssysteem:
 - hoge redundantie in de veiligheidsfuncties en in de rollen die zijn toegekend aan de verschillende barrières;
 - elementen in verband met de klei: zelfhelende eigenschappen, relatieve eenvoud van de migratie van de radionucliden en vooral van de migratie van de niet-vertraagde radionucliden;
 - elementen in verband met de kunstmatige barrières: op eenvoud gericht ontwerp van de bergingsinstallaties, wat met name een gemakkelijker modellering van het nabije veld toelaat; gebruik van een verpakking (en/of mantel), hetgeen vermijdt dat rekening moet worden gehouden met thermische complicaties bij de uitloging en de migratie van de radionucliden; kunstmatige barrières die de klei beschermen tegen de radiolyseverschijnselen;
 - hoge ongevoeligheid van de geëvalueerde performanties van het systeem aan de modellen die de degradatie van de afvalmatrices in rekening brengen;
 - beperking van de actinidenflux op het grensvlak nabije veld / verre veld als gevolg van hun geringe oplosbaarheid, waardoor de radiologische impact onafhankelijk wordt van hun inventaris en de onzekerheden met betrekking tot deze inventaris.
 - *gebruik van verschillende types van veiligheidsindicatoren*, hetgeen de mogelijkheid biedt de radiologische impact te evalueren volgens verschillende en complementaire benaderingen. De radionuclidenfluxen en -concentraties doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende lagen zijn vergelijkbaar met de alfa-activiteit die van nature aanwezig is (U, Ra en Th) zowel in de Boomse Klei als in de bovenliggende watervoerende lagen.
 - *coherentie van de resultaten die werden verkregen sinds het begin van het programma*, dit ondanks de belangrijke evoluties aangaande de gebruikte gegevens, concepten, modellen en codes.

Begrijpt men goed het relatieve belang van de verschillende types van onzekerheid in de veiligheidsevaluaties?

Het relatieve belang van de verschillende soorten van onzekerheid in de evaluaties van de langetermijn veiligheid wordt vandaag veel beter afgebakend dankzij het wetenschappelijke onderzoeksprogramma, dankzij de veiligheidsevaluaties, maar vooral doordat het bergingssysteem in zijn totaliteit wordt beschouwd. Om het vertrouwen in dit aspect te verbeteren, wordt een versterkte wisselwerking met de academische en wetenschappelijke wereld in ruime zin beoogd.

Voornaamste kenmerken en belangrijkste open vragen betreffende de Boomse Klei als gastformatie onder de nucleaire zone van Mol-Dessel

Eenvoud, homogeniteit, uniformiteit

- Recent, weinig getektoniseerd sedimentair bekken, met nagenoeg horizontale lagen.
- Zeer goede laterale continuïteit.
- Goede verticale homogeniteit wat betreft de migratieparameters (radionucliden die weinig of niet worden vertraagd).
- Afwezigheid van preferentiële migratiewegen.

Geometrie

- Voldoende uitgestrektheid om een bergingsinstallatie te bouwen buiten de breukzones.
- Diepte die de risico's van menselijke indringing in de bergingsinstallatie niet uitsluit. De architectuur van de bergingsinstallatie vertoont echter een goede robuustheid in geval van indringing.
- Beperkte dikte die het noodzakelijk maakt de verticale uitgestrektheid van de bergingsinstallatie en de veroorzaakte verstoringen tot een minimum te beperken, om de dikte van de natuurlijke barrière te maximaliseren.

Mechanische stabiliteit

- Streek die als weinig seismisch wordt beschouwd. *Een herevaluatie van het seismische risico is bezig vanwege de aanwezigheid aan de oostelijke rand van een belangrijke actieve tektonische structuur, de Roerdalslenk.*
- Mechanische buffercapaciteit (plasticiteit) in geval van aardbeving.
- Geothermische activiteit op grote diepte, niet representatief voor een vulkanische of magmatische activiteit.
- Voldoende diepte om geen rekening te moeten houden met erosieverschijnselen.
- Capaciteit tot zelfheling op lange termijn (*te bevestigen*) van de scheuren veroorzaakt door uitgraving of door gasoverdruk.
- *Het detailinzicht in het thermisch-hydro-mechanische gedrag moet worden verbeterd.*

Bouwmogelijkheid

- Mogelijkheid tot bouwen van schachten en galerijen aangetoond door de bouw van het ondergrondse laboratorium HADES. *De demonstratie van een industriële methode voor het uitgraven van galerijen is gepland (PRACLAY).*
- Noodzaak van een snelle ondersteuning van de uitgravingen om de veroorzaakte verstoringen te beperken en noodzaak van galerijen met cirkelvormige doorsnede.
- Scheurvorming bij het graven (tweede schacht). *De oorsprong en het gedrag van deze scheuren worden grondig bestudeerd.*
- Gedrag van de galerijen onbekend over lange operationele periodes (terugneembaarheid).
- Vrij geringe warmtegeleidbaarheid, wat een risico van aanzienlijke temperatuurstijging in het bergingssysteem en zijn omgeving met zich meebrengt.

Hydrogeologie

- Zeer geringe hydraulische geleidbaarheid.
- Geringe en neerwaartse hydraulische gradiënt doorheen de Boomse Klei.
- Advectie verwaarloosbaar. *De mogelijkheid van advectieve stroming binnen de siltige dubbelband of in de op regionale schaal aanwezige breuken moet nog worden geëvalueerd.*
- Gering vermogen tot dissipatie van de gassen die mogelijk worden geproduceerd in de bergingsinstallatie.

.../...

Geochemie en hydrogeochemie

- Door diffusie gecontroleerde migratie van de elementen in oplossing.
- Licht alkalische en sterk reducerende omstandigheden die de oplosbaarheid en de mobiliteit van tal van radionucliden beperken.
- Hoge radionuclidenretentiecapaciteit. De retentiemechanismen van sommige radionucliden worden echter nog niet volledig begrepen.
- Het van nature aanwezige uranium en thorium zijn nagenoeg immobiel gebleven over geologische tijdspannen.
- Aanzienlijk gehalte aan organische stof, die hoofdzakelijk immobiel is want verbonden met de kleimineralen, en die leidt tot een sterke retentie door sorptie van de trivalente actiniden en lanthaniden.
- *De mogelijke impact van de mobiele organische stof in oplossing op de migratie van de radionucliden wordt momenteel bestudeerd. De invloed van deze potentiële mobiliteitsverhoging op de radiologische impact is waarschijnlijk beperkt.*
- Geen migratie van de radionucliden onder colloïdale vorm (ultrafiltratie).
- Goede homogeniteit van een groot deel van de Formatie van Boom wat betreft de migratie-eigenschappen van de niet- of weinig vertraagde radionucliden.
- Geochemisch systeem in evenwicht, met een aanzienlijke pH- en redoxbuffercapaciteit, zodat de aanwezigheid van een bergingsinstallatie slechts weinig geochemische wijzigingen zou mogen veroorzaken. *De natuurlijke en geïnduceerde geochemische langetermijn evolutie van de klei moet echter nog worden bestudeerd.*
- Gunstige voorwaarden voor een zeer lage uniforme anaërobe corrosie voor klassieke roestvaste stalen.
- Mogelijkheid tot vorming van thiosulfaten en sulfaten door radiolyse of door oxidatie (verhoogd risico van putcorrosie van het staal) en weinig geochemische (en mineralogische) wijzigingen als gevolg van aanzienlijke bestraling en langdurige opwarming.
- Aanwezigheid van pyriet kan als gevolg van zijn oxidatie plaatselijk nadelige geochemische omstandigheden creëren voor de corrosie van de metalen.
- Aanwezigheid van methanogene bacteriën, maar de huidige microbiële activiteit in de klei in natuurlijke in situ omstandigheden is beperkt. *De invloed van een door contaminatie veroorzaakte microbiologische activiteit op de kunstmatige barrières moet nog worden bestudeerd.*

Omgeving en risico van menselijke indringing

- Aanwezigheid van watervoerende lagen (met name de watervoerende laag van het Neogeen, die een zeer omvangrijke drinkwaterreserve vormt) houdt een significante beperking in. *De gevolgen van de thermische impact op de watervoerende lagen moeten in meer detail worden geëvalueerd.*
- Sterke verdunningscapaciteit van de watervoerende laag van het Neogeen.
- Aanwezigheid van glauconiet in de bovenliggende zanden (potentieel sorberend).
- *De gevoeligheid van de huidige hydrogeologische en hydrogeochemische omstandigheden voor klimaatsveranderingen moet worden geanalyseerd.*
- Afwezigheid van risico van exploitatie van de klei, in de mate dat die in grote hoeveelheid aan het oppervlak beschikbaar is.
- Gering risico van indringing met het oog op een exploitatie van de watervoerende laag onder de Boomse klei, omdat deze watervoerende laag weinig productief en erg zout is.
- Natuurlijke rijkdommen in de ondergrond op schaal van de Kempen (geothermie en recuperatie van mijngas).

Modellering

- Modellering wordt vergemakkelijkt door de relatieve eenvoud van de geometrie en de homogeniteit van de geologische lagen.
- Mogelijkheid tot modelleren van de migratie aan de hand van een beperkt aantal parameters.
- Geochemisch homogeen midden.

Nawoord

Met de publicatie van het SAFIR 2-rapport, heeft NIRAS een document ter beschikking gesteld van haar voogdijminister en de verschillende betrokken actoren op basis waarvan zij de vooruitgang kunnen evalueren die in de loop van de periode 1990–2000 is geboekt op het vlak van de haalbaarheid en de veiligheid van een mogelijke oplossing voor het langetermijn beheer van het radioactieve afval van categorieën B en C, namelijk hun diepe berging in een weinig verharde kleilaag in België. De werkzaamheden die in de loop van deze periode werden uitgevoerd, kaderden in de tweede fase van het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma en betroffen hoofdzakelijk de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol–Dessel als referentiegastformatie en -site en, in veel mindere mate, de leperiaan-kleien onder de nucleaire zone van Doel als alternatieve gastformatie en site. Deze werkzaamheden van methodologische aard betekenen geenszins dat een beslissing is genomen over de lokatie voor de verwezenlijking van de bestudeerde oplossing. De werken profiteren van de resultaten die zijn verworven in het kader van de bouw en de exploitatie van het ondergrondse onderzoekslaboratorium HADES in Mol.

Het onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS heeft rekening gehouden met de meeste aanbevelingen van de commissie die was opgericht om het SAFIR-rapport te evalueren (1990). NIRAS heeft daarentegen slechts gedeeltelijk rekening kunnen houden met de aanbevelingen van deze commissie in verband met de globale verenigbaarheid van het afval met het bergingssysteem en in verband met de verwerving van het vereiste kennisniveau van de afvalinventaris met het oog op de effectieve berging van dit afval.

Het geheel van verworvenheden van het onderzoek brengt momenteel geen enkel onoverkomelijk probleem aan het licht betreffende de berging in de Boomse Klei van het hoogactieve en langlevende verglaasde afval, hetgeen het vertrouwen in de bestudeerde oplossing versterkt. Dit bevestigt dat de diepe berging in een weinig verharde klei voor het in het SAFIR 2-rapport beschouwde afval een volstrekt te overwegen optie blijft. De uitgevoerde werkzaamheden hebben het hoofdzakelijk mogelijk gemaakt een aanzienlijk vertrouwen te vestigen in de kwaliteiten van de Boomse Klei als natuurlijke barrière, in de duurzaamheid van het glas als conditioneringsmatrix, in de mogelijkheid om de nodige ondergrondse installaties uit te graven en in de methodologie voor evaluatie van de radiologische langetermijn veiligheid. Deze werkzaamheden bevestigen ook de gunstige resultaten van de evaluaties, in het bijzonder wat betreft de cruciale rol van de gastformatie voor de langetermijn veiligheid. Ze onderlijnen dus hoe belangrijk het is de in de gastformatie veroorzaakte verstoringen te kennen en te beheersen, en bevestigen het belang van de niet of weinig vertraagde radionucliden (^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{126}Sn , ^{14}C) in de radiologische impact. Voor deze radionucliden kan de kennis van de migratie binnen de klei in het algemeen als adequaat worden beschouwd, maar de kennis voor selenium en tin moet toch nog gepreciseerd worden. Bovendien hebben deze werkzaamheden het mogelijk gemaakt tijdens de voorbereiding van het PRACLAY demonstratie-experiment de aandacht te vestigen op de praktische moeilijkheden die verbonden zijn aan de uitvoering van de referentiearchitectuur voor de bergingsinstallatie, en aan de goede beheersing van de wisselwerkingen tussen de verschillende componenten ervan.

Toch blijven er, zonder de basiskeuze voor de Boomse Klei in vraag te stellen, heden nog te veel vragen open opdat men zich nu reeds eenduidig zou kunnen uitspreken over de technische haalbaarheid van een bergingsinstallatie in deze gastformatie, over de operationele en langetermijn veiligheid van een dergelijke berging en over de naleving van de milieunormen door deze berging. Hetzelfde geldt a fortiori voor de Ieperiaan-kleien. Wat de Boomse Klei betreft, zou de derde fase van het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS de volgende prioriteiten moeten behandelen:

- demonstratie van de haalbaarheid van de realisatie van de bergingsinstallaties;
- verfijning van het inzicht in de radionuclidenretentieprocessen die werkzaam zijn in de Boomse Klei, en in de evolutie van de retentie-eigenschappen van deze formatie;
- analyse van de heterogeniteiten en de discontinuïteiten van de Boomse Klei en hun gevolgen voor de waterstromingen en voor de radionuclidenmigratie;
- analyse van de invloed, op de waterstromingen binnen de Boomse Klei, van wijzigingen van de regionale hydrogeologie in de boven- en onderliggende water-voerende lagen;
- grondiger studie van de aspecten van chemische, biologische en fysische verenigbaarheid van al de materialen die in de gastformatie worden ingebracht, en van de verschillende verstoringen die worden veroorzaakt door de verschillende afvalklassen;
- herziening van de keuze van het materiaal voor de verpakking (en/of mantel) en ontwikkeling van een geïntegreerde benadering voor het bepalen van de kunstmatige barrières op basis van de corrosiepreventie van de verpakking (en/of mantel);
- systematisering en systeembenadering van het ontwerp van de bergingsinstallaties voor alle afvalklassen en in het bijzonder voor de afvalklassen die de strengste vereisten stellen;
- analyse van de gevolgen van de gasvorming door het afval (vooral het afval van categorie B) op de bergingsinstallatie, de gastformatie en de veiligheid, en analyse van de conceptuele antwoorden die daarop gegeven kunnen worden;
- studie en demonstratie van de methoden om het afval te karakteriseren en de samenstelling en warmteafgifte van het afval te verifiëren en te bevestigen; de aard en de omvang van deze activiteiten moet evenredig zijn met de vereisten inzake kennis van het afval met het oog op de diepe berging ervan;
- verbetering van de methodologie voor evaluatie van de langetermijn veiligheid, met name wat betreft de identificatie en de behandeling van de onzekerheden, de alternatieve veiligheids- en performantie-indicatoren, en de definitie van robuustheids-indicatoren;
- bepaling en ontwikkeling van een systeem voor het beheer en de overdracht op lange termijn van de kennis, in het bijzonder om de naspeurbaarheid van de genomen beslissingen en de gemaakte technische keuzes mogelijk te maken, en om de multidisciplinaire informatie te kunnen overbrengen, integreren en synthetiseren.

De conclusie van deze toekomstige werken enerzijds en de gegevens met betrekking tot de haalbaarheid van de bergingsarchitectuur die bekomen zullen worden bij het installeren

in situ van het PRACLAY demonstratie-experiment anderzijds zullen het mogelijk maken tegen 2010 een eerste iteratie van een *Veiligheids- en haalbaarheidsdossier* te realiseren over de berging van afval van categorieën B en C in een weinig verharde klei. Na afloop van het PRACLAY-experiment zal een tweede iteratie van het *Veiligheids- en haalbaarheidsdossier* nodig zijn om alle bekomen resultaten te benutten, en meer specifiek de aspecten die het vertrouwen in de modellen en hun voorspellingen onderbouwen. Deze tweede iteratie, die gepland is tegen 2017, zou het draagvlak bieden voor de beslissing om de fase van methodologisch onderzoek en ontwikkeling te beëindigen en de voorontwerpfase aan te vatten. Deze fase is specifiek voor een nog aan te duiden gastformatie en site.

Aangezien echter de problematiek van het langetermijn beheer van het radioactieve afval moet worden bekeken in een breder dan strikt technisch-wetenschappelijk kader, zullen in het toekomstige programma van NIRAS ook de maatschappelijke en economische aspecten dienen te worden opgenomen, en dit om een beslissingsproces terzake te ondersteunen. Een dergelijk proces impliceert dat alternatieven inzake het langetermijn beheer moeten beschouwd worden, net als de volledige milieu-impact van de voorgestelde oplossing. Daarom stelt NIRAS voor documenten van het type *Strategic Environmental Impact Assessment* en van het type *Milieu-effectenbeoordeling voor een gegeven installatie of project* op te stellen. In dit kader is de voortzetting van de werkzaamheden op de Ieperiaan-kleien als alternatieve gastformatie aanbevolen, maar het kennisniveau dat voor de Ieperiaan-kleien moet worden bereikt, hoeft momenteel niet het voor de Boomse Klei bereikte kennisniveau te evenaren. Het te bereiken kennisniveau moet het niettemin mogelijk maken vast te stellen of de Ieperiaan-kleien een realistische optie als dusdanig zijn, of een aanvulling kunnen zijn van de referentieoptie.

Het opstellen van een interdisciplinair onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma dat de fundamentele, toegepaste en menswetenschappelijke aspecten integreert, in overeenstemming met de bovenvermelde prioriteiten, zal het mogelijk maken het verworven vertrouwen in de bestudeerde oplossing verder te versterken, met name door het overwegen van de beheersalternatieven, de concrete ontwikkeling van bergingsarchitecturen, het verminderen van de onzekerheden, het in aanmerking nemen van de niet-radiologische impact en van de maatschappelijke aspecten.

