



NIRAS

Nationale instelling voor radioactief afval
en verrijkte splijtstoffen

rapport

Technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport

(Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2)

Versie bestemd voor de Raad van Bestuur van NIRAS van 7 december 2001 (vertaling van de Franse versie)

NIROND 2001-05

December 2001

1696



Technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport

(Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2)

NIROND 2001- 05

December 2001

Dit document werd opgesteld door Brigitte Cornélis, zelfstandig wetenschappelijk redactrice, met uitzondering van enkele delen die werden opgesteld met de hulp van een aantal directe medewerkers aan het NIRAS-programma voor de diepe berging van het afval van de categorieën B en C : de secties 3.2 (Laurent Wouters, Wim Cool en Philippe Lalieux), 3.4.1 (Robert Gens), 3.5 (Robert Gens en Philippe Lalieux) en 3.8 (Laurent Wouters en Philippe Lalieux), een gedeelte van sectie 3.6 (Philippe Lalieux en Robert Gens) en een gedeelte van hoofdstuk 6 (Philippe Lalieux en Peter De Preter).

De herlezing van dit overzicht werd toevertrouwd aan de volgende personen :

- voor het SCK-CEN, afdeling Afval en berging : Jan Marivoet en Isabelle Wemaere ;
- voor het ESV EURIDICE : Frédéric Bernier ;
- voor NIRAS : Johan Bel, Emiel Biesemans, Jean-Paul Boyazis, Wim Cool, Christian Cosemans, Freddy Decamps, Peter De Preter, Anne De Smedt, Ann Dierckx, Ludovic Froment, Robert Gens, Evelyn Hooft, Philippe Lalieux, Joris Lenssens, Pierre Manfroy, Jeroen Mertens, Jean-Paul Minon en Laurent Wouters.

De algemene coördinatie, ten slotte, werd verzorgd door Peter De Preter, Philippe Lalieux en Wim Cool.

Herkomst van de illustraties De meeste illustraties zijn direct afkomstig van de werkzaamheden van NIRAS en haar rechtstreekse partners, het SCK-CEN en het ESV EURIDICE. De figuren 3.32, 3.33 en 3.36 werden gerealiseerd naar, respectievelijk, L. Bourcier, ANL-94/17, 1994, B. Grambow et al., EUR 19140 EN, 2000 en W. Hummel, NEA/OESO, 1995.

Illustraties Bailleul Ontwerpbureau

Vertaling Bowne Global Solutions (voordien Mendez). De herlezing van de vertaling werd toevertrouwd aan de bovenvermelde personen, en aan Brigitte Cornélis, Luc Timperman (NIRAS), Karel Lemmens (SCK-CEN) en Elie Valcke (SCK-CEN).

Dit document is eveneens beschikbaar in het Frans onder de titel *Aperçu technique du rapport SAFIR 2* en in het Engels onder de titel *Technical overview of the SAFIR 2 report*.

Voorwoord en dankbetuigingen

Dit document vormt het technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport, dat de technische en wetenschappelijke kennis samenvat die werd verworven in de loop van de tweede fase (1990–2000) van het door NIRAS ontwikkelde methodologisch onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma voor de berging van radioactief afval van de categorieën B en C in een weinig verharde kleiformatie. NIRAS zal het SAFIR 2-rapport begin 2002 voorleggen aan haar voogdijminister, na goedkeuring van zijn publicatie door de Raad van bestuur van de instelling, zodat de minister kennis kan nemen van de vooruitgang die geboekt werd op het vlak van de technische haalbaarheid en de evaluatie van de radiologische langetermijnveiligheid van deze oplossing.

Het document geeft een zo volledig mogelijk overzicht van de talrijke aspecten van het Belgisch programma, en legt daarbij de nadruk op de sleutelementen en op de kwalitatieve argumenten die de basis vormen van de evaluaties van de radiologische langetermijnveiligheid en de haalbaarheid van de bestudeerde oplossing. In vergelijking met de structuur van het SAFIR 2-rapport, dat integraal beschikbaar is op de bijgevoegde cd-rom, werd de structuur van het technisch overzicht aangepast om de lectuur ervan te vergemakkelijken. Om diezelfde reden worden ook de onderaannemers van NIRAS niet vermeld, met uitzondering van het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK•CEN) in Mol, de belangrijkste partner van NIRAS inzake onderzoek en ontwikkeling.

Zonder ze hier allemaal bij naam te kunnen noemen – ze zijn immers te talrijk – staat NIRAS er evenwel op al haar Belgische en buitenlandse partners en onderaannemers te danken voor hun medewerking aan haar werkprogramma voor de berging van het afval van de categorieën B en C : het SCK•CEN, verschillende universiteiten, studiebureaus, andere agentschappen voor het beheer van radioactief afval, privéondernemingen en openbare diensten. Zij dankt in het bijzonder de Europese commissie voor de financiële steun die zij sinds jaar en dag verleent via haar onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma's. Ook kan ze niet genoeg de essentiële inbreng onderstrepen van de verschillende internationale forums (IAEA, NEA, enzovoort) waaraan zij deelneemt : deze denk- en vergelijkingsplatforms, die deskundigen uit talrijke landen bijeenbrengen, vormen immers een belangrijk werktuig in de permanente verbetering van de kwaliteit van haar eigen werkzaamheden. NIRAS dankt de leden van het comité van Belgische deskundigen dat is opgericht op initiatief van haar Raad van bestuur om de afwerking van het SAFIR 2-rapport te begeleiden en aanbevelingen te formuleren voor het vervolg van haar werkprogramma. Ten slotte wenst NIRAS Brigitte Cornélis te danken voor de synthese-inspanningen die zij geleverd heeft met het oog op het opstellen van dit document.

Inhoudstafel

Hoofdstuk 1 Inleiding	1.1
1.1 De eerste fase van het methodologische o&o-programma en het SAFIR-rapport (1974–1989)	1.3
1.2 De tweede fase van het methodologische o&o-programma en het SAFIR 2-rapport (1990–2000)	1.4
1.3 Het technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport	1.8
Hoofdstuk 2 De veiligheid en de haalbaarheid verzekeren: basisprincipes van de ontwikkeling van een diepe berging	2.1
2.1 Doelstellingen van een diepe berging	2.5
2.2 Algemene vereisten	2.6
2.2.1 Radiologische veiligheid op lange termijn	2.7
2.2.2 Robuustheid	2.13
2.2.3 Operationele veiligheid	2.13
2.2.4 Subkritikaliteit en naleving van de <i>safeguards</i>	2.14
2.2.5 Milieubescherming	2.14
2.2.6 Flexibiliteit	2.14
2.2.7 Haalbaarheid	2.15
2.2.8 Terugneembaarheid	2.15
2.3 Specifieke vereisten voor de Boomse Klei	2.16
2.4 Kwaliteitsbeheer en kwaliteitsborging	2.18
Hoofdstuk 3 Kennis genereren en organiseren : de verworven wetenschappelijke en technische kennis	3.1
3.1 Het geconditioneerde afval	3.4
3.1.1 De classificatie van het geconditioneerde radioactieve afval	3.4
3.1.2 De inventaris van het voor diepe berging bestemde geconditioneerde afval	3.8
3.1.3 De algemene regels en de acceptatiecriteria	3.10
3.2 De gastformatie en de omgeving van het bergingssysteem	3.13
3.2.1 De selectie en het statuut van de in België bestudeerde gastformaties	3.13
3.2.2 De Boomse Klei als gastformatie	3.15
3.2.2.1 Stratigrafische en lithologische karakterisering	3.16

3.2.2.2	Tektonische en seismische karakterisering	3.24
3.2.2.3	Geïntegreerde interpretatie	3.26
3.2.3	De hydrogeologie van de Boomse Klei en haar omgeving	3.27
3.2.3.1	Definitie van de hydrogeologische eenheden	3.27
3.2.3.2	Piëzometrische evoluties	3.30
3.2.3.3	Hydrogeochemie van de watervoerende lagen	3.32
3.2.3.4	Hydrodynamische karakterisering	3.33
3.2.3.5	Perspectieven	3.34
3.2.4	De hydrogeologische modellering	3.35
3.2.4.1	Mathematische modellen, resolutiemethoden en rekencodes	3.37
3.2.4.2	Regionaal model	3.37
3.2.4.3	Subregionaal model	3.44
3.2.4.4	Lokaal model	3.47
3.2.4.5	Perspectieven en aanbevelingen	3.48
3.3	De bergingsinstallatie voor diepe berging	3.49
3.3.1	De referentiearchitectuur	3.49
3.3.2	De verschillende operationele etappes van een installatie van diepe berging	3.57
3.3.2.1	Bouw	3.58
3.3.2.2	Exploitatie	3.67
3.3.2.3	Sluiting	3.69
3.3.2.4	Institutionele controle	3.70
3.3.3	Het PRACLAY-demonstratieproject	3.71
3.3.4	Vooruitzichten	3.73
3.4	Het gedrag van het afval en de materialen in bergingsomstandigheden	3.75
3.4.1	Het gedrag van het geconditioneerde afval	3.75
3.4.1.1	Verglaasd afval	3.75
3.4.1.2	Bestraalde splijtstoffen	3.80
3.4.1.3	Hulzen en eindstukken	3.81
3.4.1.4	Gebitumineerd afval	3.82
3.4.1.5	Gecementeerd afval	3.84
3.4.1.6	Geselecteerde gegevens voor de modellering van het nabije veld	3.84
3.4.2	Het gedrag van de materialen in de bergingsinstallatie	3.84
3.4.2.1	Verpakkings- en mantelmaterialen	3.85
3.4.2.2	Opvul- en afdichtingsmaterialen	3.87
3.5	Het gedrag van de radionucliden in de Boomse Klei	3.89
3.5.1	De kenmerken van de Boomse Klei bepalend voor migratie	3.90
3.5.1.1	Overzicht van diffusie	3.91
3.5.1.2	Goechemische kenmerken	3.93
3.5.1.3	Interactie tussen de klei en de oplossing	3.94
3.5.1.4	Aanwezigheid van organische stof	3.94

3.5.2	Het gedrag van de radionucliden in de Boomse Klei	3.95
3.5.3	De migratieparameters	3.98
3.5.4	De rol van de organische stof	3.99
3.5.4.1	Ultrafiltratiecapaciteit van de Boomse Klei	3.99
3.5.4.2	Gedrag van americium	3.100
3.5.4.3	Gedrag van uranium, neptunium en plutonium	3.101
3.5.5	De variabiliteit van de migratieparameters over de kleidikte	3.101
3.5.6	De gegevens gebruikt voor de evaluaties van de langetermijn veiligheid	3.102
3.5.7	Vooruitzichten	3.104
3.6	De verstoringen teweeggebracht in de Boomse Klei en haar omgeving	3.106
3.6.1	De thermische verstoringen	3.106
3.6.1.1	Experimentele studies	3.106
3.6.1.2	Implicaties voor het ontwerp van de bergingsinstallaties	3.108
3.6.1.3	Thermische impact van het bergingssysteem	3.108
3.6.2	De verstoringen veroorzaakt door de uitgraving	3.111
3.6.2.1	Karakterisering en geomechanische modellering	3.111
3.6.2.2	Door de uitgraving verstoorde zone	3.113
3.6.3	De verstoringen teweeggebracht door de gassen	3.114
3.6.3.1	Generatie van gassen	3.114
3.6.3.2	Gastransport	3.115
3.6.3.3	Impact op de Boomse Klei	3.117
3.6.4	De verstoringen teweeggebracht door de straling	3.117
3.6.5	De geochemische verstoringen	3.118
3.6.5.1	Migratie van de chemotoxische stoffen	3.119
3.6.5.2	Migratie van de chemische fronten	3.120
3.7	De modellering van de biosfeer	3.122
3.8	De leperiaan-kleien als alternatieve gastformatie	3.125
3.8.1	Inleiding	3.125
3.8.2	Het geografische en geologische karakter	3.126
3.8.3	De kenmerken van de leperiaan-kleien in Doel	3.128
3.8.4	Vooruitzichten	3.129

Hoofdstuk 4 Evalueren van de radiologische veiligheid op lange termijn: normale-evolutiescenario en gewijzigde-evolutiescenario's

4.1	De methodologie van de evaluaties van de langetermijn veiligheid	4.4
4.1.1	Scenario-ontwikkeling	4.5
4.1.2	Evaluatie van de scenario's	4.6
4.2	De ontwikkeling van de scenario's	4.9

4.2.1	Identificatie van de scenario's	4.9
4.2.2	Beschrijving van de scenario's	4.11
4.2.2.1	Normale-evolutiescenario	4.11
4.2.2.2	Gewijzigde-evolutiescenario's	4.16
4.3	De evaluatie van de scenario's	4.17
4.3.1	Kwantitatieve en kwalitatieve argumenten	4.18
4.3.1.1	Klassieke veiligheidsindicatoren	4.18
4.3.1.2	Alternatieve veiligheids- en prestatie-indicatoren	4.19
4.3.1.3	Kwalitatieve argumenten	4.20
4.3.2	Evaluatie van het normale-evolutiescenario	4.21
4.3.2.1	Dosisberekeningen	4.21
4.3.2.2	Berekeningen van alternatieve veiligheids- en prestatie-indicatoren	4.36
4.3.3	Evaluatie van de gewijzigde-evolutiescenario's	4.38
4.3.4	Aanvullende resultaten en beschouwingen	4.40
4.4	Vermijden van kritikaliteit	4.45
4.5	Perspectieven	4.45
Hoofdstuk 5	Evaluatie van de kosten: een analytische, parametrische en flexibele methodologie	5.1
Hoofdstuk 6	Conclusies en evaluatie van het verworven vertrouwen	6.1
6.1	De belangrijkste verworvenheden	6.3
6.1.1	Verworven kennis en open vragen	6.3
6.1.2	Relatief belang van de resterende onzekerheden	6.10
6.2	Elementen voor het toekomstige methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma	6.16
6.2.1	De krachtlijnen	6.16
6.2.2	De elementen waarmee rekening dient gehouden	6.18
6.2.3	De volgende etappes	6.23
6.3	De evaluatie van het vertrouwen	6.26
Nawoord		N.1
Bijlagen		
B.1	Figuren, tabellen en kaders	B.1
B.2	Afkortingen en eigennamen	B.2
B.3	Aanvullende lectuur	B.4

B.4	Overeenstemmingstabel met het SAFIR 2-rapport	B.6
B.5	Eindadvies van het leescomité van het SAFIR 2-rapport	B.7

1 Inleiding

In België is het beheer van radioactief afval, ongeacht of dit afkomstig is van elektronucleaire productie, industriële toepassingen van ioniserende stralingen, medische activiteiten of onderzoek, reeds lang het voorwerp van grondige studies. In 1974 al vatte het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK-CEN) te Mol een onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma aan over het langetermijn beheer van hoogactief en/of langlevend afval, anders gezegd afval van categorieën B en C. Al gauw spitte het SCK-CEN zich toe op de oplossing die op internationaal niveau werd voorgestaan om deze afvalstoffen te isoleren van de mens en het milieu, namelijk het bergen van dit afval in een stabiele geologische formatie met geschikte kenmerken. Vervolgens besliste het SCK-CEN zijn werkzaamheden te concentreren op de studie, onder zijn site, van de Boomse Klei als potentiële gastformatie. Zowel op nationaal als op internationaal vlak ontbrak de ervaring om ondergrondse installaties in een klei van dit type, met name een weinig geconsolideerde, weinig verharde klei, op ongeveer 200 meter diepte uit te graven. Daarom was één van de hoofddoelstellingen van het eerste onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van het SCK-CEN de haalbaarheid van een dergelijke onderneming te evalueren en aan te tonen. Daarom ook werd heel vroeg in het Belgische programma het ondergrondse onderzoekslaboratorium HADES (*High-Activity Disposal Experimental Site*) gebouwd.

Met de oprichting van NIRAS, de Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Splijtstoffen, bij de wet van 8 augustus 1980, besliste de Belgische overheid het beheer van radioactief afval toe te vertrouwen aan *één instelling onder openbare controle om te waarborgen dat het algemeen belang doorslaggevend zou zijn bij alle beslissingen die ter zake moeten worden genomen*. De opdrachten en werkingsmodaliteiten van NIRAS werden vastgesteld bij het koninklijk besluit van 30 maart 1981, zoals gewijzigd en aangevuld door het koninklijk besluit van 16 oktober 1991, genomen ter uitvoering van de wet van 11 januari 1991, die op haar beurt werd gewijzigd en aangevuld door de wet van 12 december 1997. De wet van 1991 veranderde ook de naam van NIRAS in Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Splijtstoffen.

Concreet moet NIRAS een coherent en veilig beheersbeleid uitwerken voor alle radioactief afval op het Belgische grondgebied. Dit beheer omvat de kwantitatieve en kwalitatieve inventaris, de ophaling en het vervoer, de verwerking en conditionering, de opslag, alsook het langetermijn beheer van het radioactieve afval. Bij deze hoofdplicht komen opdrachten betreffende de ontmanteling van de buiten gebruik gestelde nucleaire installaties, de sanering van de nucleaire passiva en het beheer van de verrijkte splijtstoffen. Ten slotte moet NIRAS de financiering van haar opdrachten op lange termijn verzekeren. De kosten van al haar prestaties, inclusief de kosten van het beheer op korte en op lange termijn, worden tegen kostprijs gedragen door de afvalproducenten.

Kort na haar oprichting legde NIRAS de basis voor een gecoördineerd beheer van het radioactieve afval en nam geleidelijk het beheer van het onderzoeksprogramma over dat het SCK-CEN was begonnen om zowel veilige als technisch en economisch haalbare oplossingen

Afval van categorieën B en C

Radioactief afval van categorie C, dat matig tot zeer warmteafgevend is, heeft een hoge activiteit en is voor het merendeel langlevend. Afval van categorie B, dat weinig warmteafgevend is, is langlevend. Al deze afvalstoffen dienen diep geborgen te worden (zie ook sectie 3.1).

In het vervolg van de tekst betekent de term "afval" geconditioneerd radioactief afval; de uitdrukking "bestraalde splijtstof" duidt alle types van bestraalde splijtstof aan die afkomstig zijn van Belgische commerciële kerncentrales (ZAGALS-afval) en de uitdrukking "verglaasd afval" duidt het verglaasde afval aan dat afkomstig is van de opwerking van die bestraalde splijtstoffen (ZAGALC-afval) (zie ook sectie 3.1).

te vinden voor het langetermijn beheer van dit radioactieve afval. Vandaag is het dagelijks beheer van het radioactieve afval goed onder controle; het langetermijn beheer daarentegen bevindt zich nog steeds in het onderzoeks- en ontwikkelingsstadium. (Dit programma is niettemin verder gevorderd voor afval van categorie A, dat het voorwerp vormt van een apart programma waarin de keuze van het bergingstype — oppervlakteberging of diepe berging — nog open is.)

De door NIRAS bestudeerde oplossing voor het beheer op lange termijn van radioactief afval van categorieën B en C is berging in een geschikte geologische formatie. Deze oplossing berust op het principe van de concentratie en de insluiting van de radionucliden die zich in het afval bevinden. Zij houdt in dat tussen het afval en de biosfeer een reeks barrières worden geplaatst om de mens en het milieu zo lang als nodig te beschermen tegen de risico's die dit afval vormt.

Uiteraard moeten het ontwerp, de bouw, de exploitatie en de sluiting van een dergelijke bergingsinstallatie voldoen aan de bepalingen van de nationale en internationale wet- en regelgeving betreffende dit type van installatie, met name een ondergrondse nucleaire installatie. Die bepalingen kunnen fundamenteel worden ingedeeld in vijf types van vereisten:

- vereisten inzake radiologische veiligheid op korte en lange termijn,
- vereisten in verband met de niet-radiologische bescherming van de mens en het milieu,
- vereisten op het vlak van nucleaire veiligheid,
- vereisten op het vlak van conventionele veiligheid, met inbegrip van de vereisten in verband met de bouw en de exploitatie van ondergrondse installaties,
- vereisten op het vlak van burgerlijke aansprakelijkheid.

Tot op heden heeft het onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma hoofdzakelijk betrekking gehad op de radiologische veiligheid op lange termijn.

In de Belgische reglementering wordt een installatie voor diepe berging beschouwd als een conventionele nucleaire installatie.

Dit inleidende hoofdstuk beschrijft in grote lijnen het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS betreffende het langetermijn beheer van afval van categorieën B en C, en plaatst het SAFIR 2-rapport en dit *technisch overzicht* ervan in dat kader. Het SAFIR 2-rapport rondt meer bepaald de tweede fase van het werkprogramma van NIRAS af, waarvan het einde op tamelijk willekeurige wijze was vastgesteld op eind 2000. Het volgt op het SAFIR-rapport (1989), dat de eerste fase van dit programma (1974–1989) afsloot.

1.1	De eerste fase van het methodologische o&o-programma en het SAFIR-rapport (1974–1989)	1.3
1.2	De tweede fase van het methodologische o&o-programma en het SAFIR 2-rapport (1990–2000)	1.4
1.3	Het technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport	1.8

1.1 De eerste fase van het methodologische O&O-programma en het SAFIR-rapport (1974-1989)

Vanuit de bekommernis om de ervaring en de positieve resultaten die het SCK·CEN reeds had bereikt op het vlak van het langetermijn beheer van afval van categorieën B en C optimaal te gebruiken, besliste NIRAS in het begin van de jaren tachtig de lopende studies uit te diepen. Zij maakte van het SCK·CEN aldus haar bevoorrechte partner voor alle ondersteunende onderzoeks- en ontwikkelingsaspecten van haar werkprogramma, te meer daar het SCK·CEN een onderzoeksinstrument bezat dat uniek was ter wereld: het ondergrondse laboratorium HADES.

Conform de aanbevelingen van de Evaluatiecommissie voor kernenergie die in 1975 werd opgericht door minister André Oleffe, besliste NIRAS in 1984 een synthesesedocument op te stellen dat de resultaten van alle werkzaamheden over diepe berging die van 1974 tot 1989 in België waren verricht, alsook de resultaten van de op die basis gemaakte evaluaties van de radiologische veiligheid op lange termijn, systematisch zou voorstellen en analyseren. Genoemde aanbevelingen preciseerden immers in het bijzonder dat *de hoogactieve afvalstoffen moeten toegankelijk blijven en onder toezicht zolang er geen definitieve of voldoende veilige oplossing voor is gevonden. Elke tien jaar zou een beoordeling van dit risico moeten worden verricht, alvorens men verder gaat met kernenergie.* De commissie was bovendien van oordeel dat kernenergie onder bepaalde voorwaarden kan worden gebruikt: *in de huidige stand van onze kennis is het van belang om de tien jaar over te gaan tot een nieuwe beoordeling van de problematiek inzake het gebruik van de kernenergie, vooraleer verder te gaan met de toepassing van de kernenergie, onder meer, zolang er geen definitieve of althans voldoende zekerheid biedende oplossing is gevonden voor hoogactieve afvalstoffen en voor de controle van tritium, edele gassen, koolstof 14 en jodium 129.*

In mei 1989 overhandigde NIRAS aan haar voorgedijminister, de staatssecretaris voor Energie, het veiligheids- en haalbaarheidsrapport SAFIR (*Safety Assessment and Feasibility Interim Report*), dat zij hoofdzakelijk had opgesteld in samenwerking met het SCK·CEN en Belgatom. Dit rapport moest de toenmalige autoriteiten in staat stellen om een eerste advies uit te brengen over de eigenschappen van de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel als potentiële gastformatie voor de berging van afval van categorieën B en C. Het moest hen ook in staat stellen om in voorkomend geval toestemming te geven tot de voortzetting van het desbetreffende onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma.

De commissie van Belgische en buitenlandse experts die in 1989 werd opgericht door de staatssecretaris voor Energie om het SAFIR-rapport te evalueren, bevestigde de conclusies van het rapport, met name dat weinig verharde kleien, en in het bijzonder de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel, in aanmerking kunnen komen voor de berging van het afval van categorieën B en C, omdat zij een doeltreffende bescherming kunnen bieden op zeer lange termijn. Deze weinig verharde klei bleek immers een heel weinig waterdoorlatend gesteente te zijn, met een plastisch karakter en een zelfhelend vermogen, en met bovendien een sterk retentievermogen voor radionucliden, waardoor hun migratie naar de biosfeer belemmerd of vertraagd wordt. De Evaluatiecommissie-SAFIR was ook van oordeel dat het

Berging Plaatsing van radioactief afval in een bergingsinstallatie zonder dat het de bedoeling is het afval terug te nemen.

Bergingsinstallatie Installatie die dient om het radioactieve afval te ontvangen in een optiek van passief beheer op lange termijn.

Bergingssysteem Het geheel dat wordt gevormd door de bergingsinstallatie en de gastformatie. Dit systeem bevindt zich in een omgeving die op haar beurt wordt gevormd door de watervoerende lagen die zich aan weerszijden van de gastformatie bevinden, en de biosfeer (zie ook sectie 2.2.1).

onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma dat NIRAS in samenwerking met het SCK-CEN voorstelde voor de periode 1989–1994, coherent was en, middels enkele aanpassingen, een logisch vervolg vormde op de inspanningen die sinds 1974 waren geleverd. Ten slotte beval zij aan de inspanningen betreffende bepaalde thema's in verband met de veiligheid op lange termijn en de geologie van de gastformatie snel uit te breiden en andere gastformaties en locaties in het onderzoeksprogramma op te nemen, en meer bepaald de leperiaan-kleien onder de nucleaire zone van Doel te bestuderen als alternatieve formatie.

1.2 De tweede fase van het methodologische O&O-programma en het SAFIR 2-rapport (1990–2000)

Na de goedkeuring om haar werkzaamheden inzake diepe berging van afval van categorieën B en C voort te zetten, herevalueerde NIRAS in 1990 haar onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma om het in overeenstemming te brengen met de aanbevelingen van de Evaluatiecommissie-SAFIR. Dit programma was — en is overigens nog altijd — een *methodologisch* programma: het moest uitmaken of het zowel technisch als economisch haalbaar is een veilige oplossing voor diepe berging van het afval van categorieën B en C te ontwerpen en vervolgens te realiseren, zonder evenwel reeds vooruit te lopen op de plaats waar deze oplossing in voorkomend geval zou worden verwezenlijkt. Dit programma is zowel noodzakelijkerwijze multidisciplinair als sterk iteratief of stapsgewijs (fig. 1.1).

Het werkprogramma van NIRAS was gezien zijn methodologische karakter opgebouwd rond de karakterisering van kleiformaties en *werksites*. Meer bepaald hadden de twee bestudeerde formaties en sites de volgende status (die zij nog altijd hebben):

- *de Boomse Klei en de nucleaire zone van Mol-Dessel*: referentie-gastformatie en referentiesite;
- *de leperiaan-kleien en de nucleaire zone van Doel*: alternatieve gastformatie en alternatieve site.

(Aangezien België op heden geen bergingssite heeft gekozen, bevat de term "site" geen enkele notie van bergingssite.) Het programma van NIRAS, dat dus gericht is op de studie van de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel, gaf bovendien voorrang aan het bestuderen van oplossingen voor het afval waarvan werd geoordeeld dat het op radiologisch en thermisch vlak de zwaarste eisen met zich meebracht.

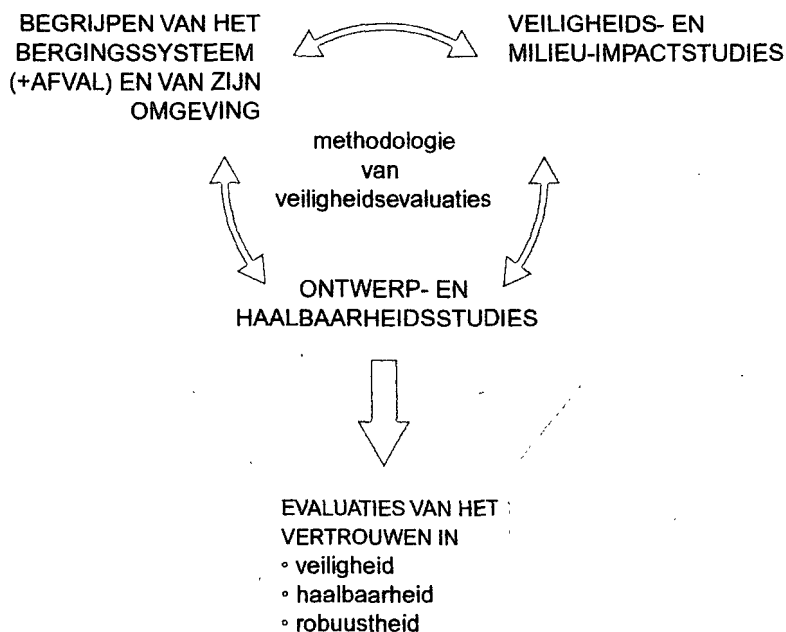
Bergingsarchitectuur

Term gebruikt voor het aanduiden van de geometrie van een bergingsinstallatie en de materialen die worden gebruikt voor de bouw ervan. De term "bergingsarchitectuur" vervangt de tot dusver gebruikte term "concept".

Concreet moest het methodologisch onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS haar in staat stellen alle methodes te ontwikkelen en alle kennis te verwerven die nodig waren voor een grondige evaluatie van de veiligheid en de doenbaarheid van de diepe berging van afval van categorieën B en C in weinig verharde klei: karakterisering van het te bergen afval, karakterisering en evaluatie van gastformaties en hun omgeving, ontwikkeling van een bergingsarchitectuur, inzicht in de interacties binnen de bergingsinstallatie, ontwikkeling van een methodologie ter evaluatie van de performanties en de radiologische veiligheid op lange termijn van een dergelijke bergingsinstallatie, ontwikkeling van een methodologie voor de evaluatie van de kosten die verbonden zijn aan de realisatie ervan, en voorbereiding van een

demonstratie-experiment op ware grootte van de technische haalbaarheid. De studie van de eigenlijke afvalbergingsverrichtingen en de studie van de exploitatieveiligheid daarentegen werden in het programma slechts aangeroerd, omdat dergelijke studies een nauwkeurige definitie vereisen van de kenmerken van de installaties waarop ze betrekking hebben. (Zie kader voor een nadere beschrijving van de hoofddoelstellingen van het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS.)

n^e iteratie



(n+1)^e iteratie

Figuur 1.1 Algemene benadering in het Belgische methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma voor diepe berging (zie ook fig. 2.2).

Met de publicatie door NIRAS van het *SAFIR 2-rapport* in december 2001 wordt de tweede fase van het methodologisch onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma afgesloten (1990–2000), zonder dat dit evenwel het einde van dit programma aanduidt. Het *SAFIR 2-rapport* beperkt zich strikt tot de technische en wetenschappelijke vorderingen (met uitsluiting van de

maatschappelijke aspecten) van dit programma en evalueert het vertrouwen in de veiligheid, de haalbaarheid en de robuustheid van het bestudeerde systeem. Het geeft bovendien de technische en wetenschappelijke aanzet tot het vervolg dat NIRAS aan dit programma beoogt te geven. Het SAFIR 2-rapport is geëvalueerd door een comité van Belgische experts, opgericht op initiatief van de Raad van bestuur van NIRAS om de afwerking van het rapport te begeleiden en aanbevelingen te formuleren voor de volgende fase van het werkprogramma van NIRAS inzake diepe berging. Het rapport zal in 2002 op internationaal niveau worden onderzocht door het *Nuclear Energy Agency* (NEA, Agentschap voor Kernenergie) van de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO).

Het SAFIR 2-rapport heeft drie doelstellingen:

- de overheid en alle andere betrokken partijen een gestructureerd overzicht bezorgen van alle relevante beschikbare technische en wetenschappelijke informatie over de berging van afval van categorieën B en C binnen een weinig verharde kleifformatie, om hen aldus in staat te stellen de geboekte vooruitgang te evalueren op het vlak van technische haalbaarheid en van de evaluatie van de radiologische veiligheid op lange termijn;
- een intenser overleg mogelijk maken met de voor nucleaire veiligheid bevoegde autoriteiten (Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle of FANC), om enerzijds betere overeenstemming te bereiken over de nog te leveren onderzoeksinspanningen en over de principes van de veiligheidsevaluatie en om anderzijds te preciseren op welke wijze de geldende reglementen in het specifieke geval van een diepe berging moeten toegepast worden;
- één van de technische en wetenschappelijke ondersteuningenvormen voor een brede dialoog met alle partijen die betrokken zijn bij het langetermijn beheer van radioactief afval.

SAFIR 2 is geen veiligheidsrapport *stricto sensu*: het begeleidt immers geen vergunningsaanvraag.

Hoofddoelstellingen van de tweede fase van het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS (1990–2000), die rekening houden met de belangrijkste aanbevelingen van de Evaluatiecommissie-SAFIR (1990).

inzake karakterisering van het te bergen afval,

- ☐ de kwalitatieve en kwantitatieve inventaris preciseren van het te bergen afval en rekening houden met het scenario van niet-opwerking van de bestraalde splijtstoffen naast het reeds beschouwde scenario van volledige opwerking;
- ☐ de acceptatiecriteria opstellen voor het voor diepe berging bestemde afval op basis van de algemene regels, die door de bevoegde overheid werden goedgekeurd;

inzake evaluatie van de gastformaties en hun omgeving,

- ☐ de structurele discontinuïteiten (zoals breuken) en de lithologische heterogeniteiten van de Boomse Klei identificeren en karakteriseren en hun impact op de migratie van de radionucliden bestuderen;
- ☐ het thermisch-hydrologisch-mechanische gedrag van de Boomse Klei bestuderen;
- ☐ het inzicht in en de modellering van de regionale en lokale hydrogeologie van de nucleaire zone van Mol-Dessel verfijnen;
- ☐ de leperiaan-kleien onder de nucleaire zone van Doel preliminair karakteriseren;

inzake ontwikkeling van een bergingsarchitectuur,

- ☐ de bergingsinstallatie dusdanig ontwerpen dat de laag niet-verstoorde klei een maximale dikte heeft en dat de verschillende afvalklassen fysiek van elkaar worden gescheiden;
- ☐ het ontwerp van het deel van de bergingsinstallatie dat bestemd is voor hoog warmteafgevend afval, diepgaand onderzoeken en de prestaties van de componenten ervan evalueren;
- ☐ de mogelijkheid aantonen om met beproefde industriële technieken galerijen met gepaste afmetingen uit te graven in de Boomse Klei;
- ☐ de mogelijkheid bestuderen om ondergrondse bergingsinstallaties af te dichten;
- ☐ een demonstratie op ware grootte voorbereiden van de mogelijkheid om de uitgewerkte bergingsarchitectuur te verwezenlijken en hoog warmteafgevend verglaasd afval te bergen (PRACLAY-experiment);

inzake inzicht in de interacties binnen de bergingsinstallatie,

- ☐ de gevolgen van de vorming, de accumulatie en de migratie van gassen binnen de bergingsinstallatie begrijpen en kwantificeren;
- ☐ bestuderen van het gedrag, in bergingsomstandigheden, van de verschillende afvalmatrices en van de voorziene bijkomende verpakking rond zeer warmteafgevend afval alsook hun verenigbaarheid met Boomse Klei;

inzake evaluatie van de veiligheid op lange termijn,

- ☐ analyseren van de gevolgen van de migratie in de klei van bepaalde niet-vertraagde radionucliden;
- ☐ voortzetten van de studie van het gedrag van de kritische radionucliden in de Boomse Klei en in het bijzonder bestuderen van de invloed van de organische stof en van de chemische fronten die worden gegenereerd door de kunstmatige barrières;
- ☐ bijwerken van de evaluaties van de radiologische gevolgen van een bergingsinstallatie voor afval van categorieën B en C en een eerste raming maken van de radiologische gevolgen van een berging van bestraalde splijtstoffen;
- ☐ definiëren en toepassen van alternatieve veiligheidsindicatoren, naast de dosis en het risico;
- ☐ een eerste chemotoxiciteitsstudie van het afval uitvoeren;

inzake kostenevaluatie,

- ☐ ontwikkelen van een methode voor het evalueren van de bergingskosten.

Bij het SAFIR 2-rapport zelf horen drie wezenlijke documenten:

- dit document zelf dat een *technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport* vormt en ook in bijlage het eindadvies bevat van het Leescomité van het SAFIR 2-rapport;
- een *brochure* die de kernboodschappen van het SAFIR 2-rapport samenvat voor een breder publiek;
- het document *Naar een duurzaam beheer van radioactief afval*, dat de integratie behandelt van de technische en maatschappelijke dimensie van het langetermijn beheer van radioactief afval.

1.3 Het technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport

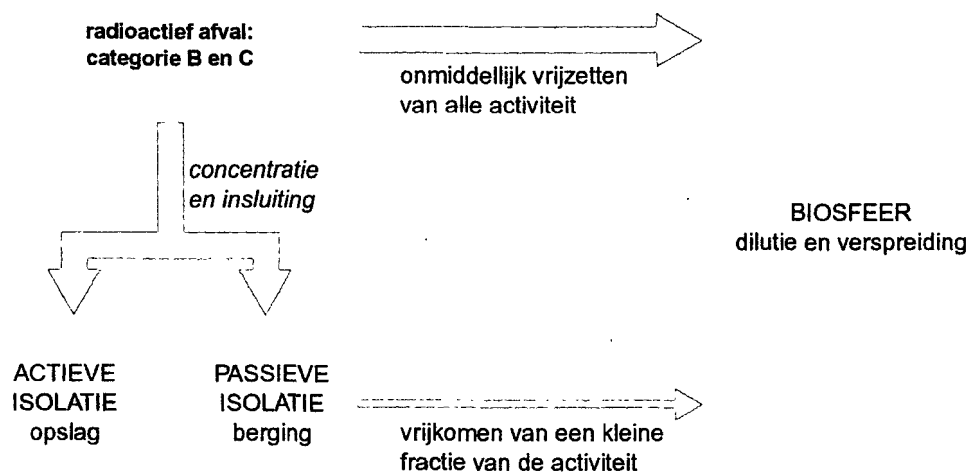
Dit document is het technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport, dat integraal beschikbaar is op de bijgevoegde CD-ROM. De doelstellingen en de draagwijdte van dit document zijn dus identiek aan die van het SAFIR 2-rapport. De structuur werd echter aangepast met het oog op een vlottere lectuur en spitst zich toe op de sleutelementen van het Belgische programma, op de verworvenheden en op de kwalitatieve argumenten die de evaluaties van de radiologische veiligheid op lange termijn ondersteunen. Hoofdstukken 2 en 3 hebben als doel een antwoord te geven op de vraag *hoe het radioactieve afval in de praktijk op een veilige manier te isoleren van de biosfeer*. Hoofdstuk 2 is hoofdzakelijk gewijd aan het geheel van vereisten waarop het ontwerp van een diepe bergingsinstallatie moet steunen. Die vereisten zijn fundamenteel terug te brengen tot een veiligheidsvereiste, een haalbaarheidsvereiste en een robuustheidsvereiste. Hoofdstuk 3 behandelt eerst het te bergen afval en vervolgens de wetenschappelijke en methodologische verworvenheden van het programma, dat voornamelijk gericht is op de studie van de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel; de verworvenheden uit de veiligheidsevaluaties worden elders behandeld. In dit hoofdstuk wordt de huidige kennis samengevat over het gedrag van het afval in bergingsomstandigheden en over de karakterisering en het gedrag van de referentie-gastformatie en van de omgeving van het bergingssysteem. Het beschrijft voorts de referentiearchitectuur die NIRAS momenteel beschouwt voor de bergingsinstallatie, en de wijze waarop die zou kunnen worden gebouwd en geëxploiteerd. Het presenteert ten slotte heel beknopt de huidige kennis over de leperiaan-kleien, die momenteel worden bestudeerd als alternatieve gastformatie. Hoofdstuk 4 is volledig gewijd aan de evaluaties van de radiologische veiligheid op lange termijn. De radiologische veiligheid op lange termijn van een bergingsinstallatie kan niet aangetoond worden op grond van directe industriële ervaring, maar het is wel mogelijk indirect te evalueren of de beoogde wijze van isolatie en insluiting van het radioactieve afval veilig kan zijn op lange termijn. Deze drie hoofdstukken worden gevolgd door een kort hoofdstuk 5 dat gewijd is aan de evaluatie van de kosten van een diepe berging, en door een laatste hoofdstuk met conclusies dat de belangrijkste tot dusver verzamelde resultaten bijeenbrengt, de grote lijnen van een toekomstig programma voorstelt en het huidige vertrouwen in de bestudeerde bergingsoplossing evalueert. Dit technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport eindigt met een nawoord. Vijf bijlagen vervolledigen het document: een lijst van figuren, tabellen en kaders, een lijst met de meest voorkomende afkortingen, een lijst met aanvullende lectuur, een gedetailleerde overeenstemmingstabel om

de lezer vlotter de gewenste aanvullende informatie te helpen terugvinden in het SAFIR 2-rapport zelf, en het eindadvies van het Leescomité van het SAFIR 2-rapport. Het bevat geen bibliografie, in zoverre het zowel moeilijk als delicaat was geweest een selectie te maken uit de zeer vele mogelijke referenties. De geïnteresseerde lezer vindt wel een bibliografie per hoofdstuk op de bijgevoegde CD-ROM.

2 De veiligheid en de haalbaarheid verzekeren: basis-principes van de ontwikkeling van een diepe berging

Er kunnen a priori twee opties worden beoogd om het langetermijn beheer van het radioactieve afval te verzekeren: enerzijds de optie onmiddellijke *verdunning en verspreiding* in de biosfeer van de activiteit die in het afval zit (deze optie wordt, binnen strikte reglementaire limieten, toegepast op vloeibare en gasvormige lozingen); anderzijds de optie *concentratie en insluiting*, die erin bestaat het afval voldoende lang te isoleren van de biosfeer om een voldoende radioactief verval van de radionucliden in het afval mogelijk te maken voordat deze radionucliden op lange termijn onvermijdelijk in de biosfeer terechtkomen. Daar zullen ze dan verder worden verdund en verspreid (fig. 2.1).

Voor het afval van categorieën B en C wordt op internationaal niveau alleen de optie concentratie en insluiting als verantwoord beschouwd. Ze kan worden verwezenlijkt door het afval in speciaal ontworpen bovengrondse gebouwen op te slaan of door het te bergen in een geschikte ondergrondse installatie. Terwijl de eerste oplossing de toekomstige generaties gedurende een lange tijd actieve onderhouds- en opvolgingsmaatregelen zou opleggen, kan de tweede oplossing a priori dusdanig worden ontworpen dat ze passief veilig is en daardoor op korte noch op lange termijn enig ingrijpen vergt. Net als de meeste landen die worden geconfronteerd met het vraagstuk van het beheer van afval van de categorieën B en C, heeft NIRAS altijd deze optie prioritair als referentieoplossing bestudeerd.



Figuur 2.1 De opties die kunnen beschouwd worden voor het langetermijn beheer van radioactief afval. De door NIRAS bestudeerde referentie-optie voor het beheer van afval van categorieën B en C is concentratie en insluiting door berging.

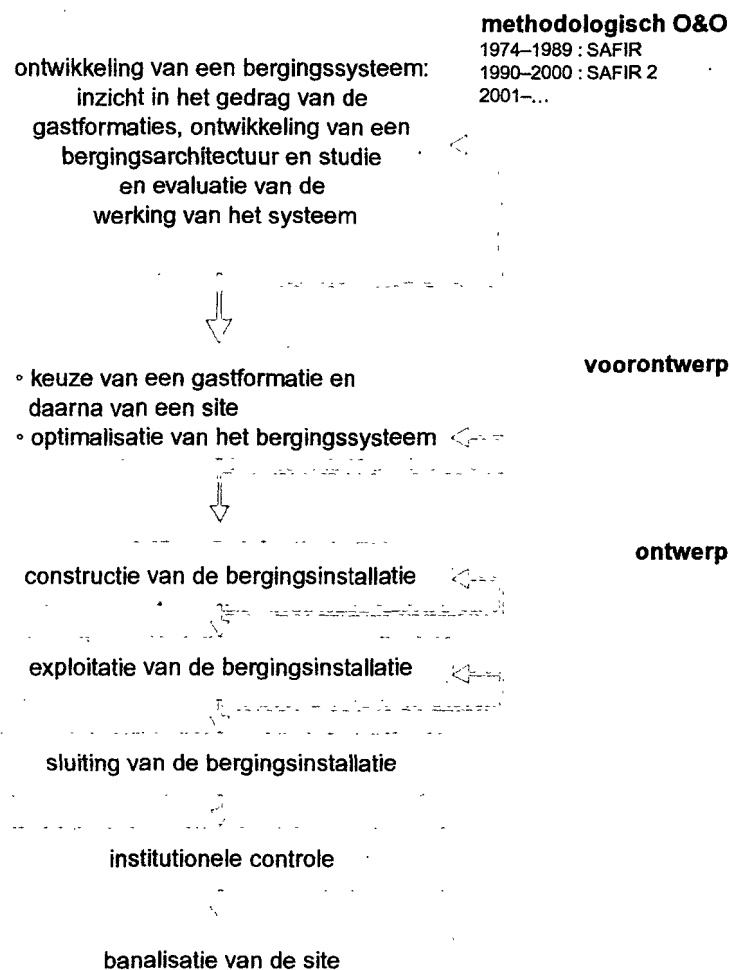
Veiligheids-

evaluatie Uitvoerig onderzoek van de gevolgen en de risico's die verbonden zijn aan een eventuele nieuwe handeling. Deze evaluatie gebeurt op basis van vergelijkingen tussen de verkregen resultaten en nationaal of internationaal aanvaarde criteria en normen, alsook op basis van kwalitatieve argumenten. De evaluatie gebeurt iteratief, parallel aan de onderzoeks- en ontwikkelingswerkzaamheden.

Het ontwerpen en uitvoeren van een diepe berging voor het langetermijn beheer van afval van categorieën B en C is een complex en langdurig proces. Hoewel de algemene doelstelling gemakkelijk te formuleren is — mens en milieu beschermen tegen de potentiële nefaste gevolgen van radioactief afval, op korte zowel als op lange termijn — is deze oplossing veel minder gemakkelijk te ontwerpen. Ze moet immers veilig blijven gedurende tijdschalen die de gebruikelijke tijdschalen in onze maatschappij ver overtreffen. Dit impliceert dat de oplossing nauwelijks kan steunen op de ervaring van andere soortgelijke realisaties. Er komen noodzakelijkerwijze ook vele wetenschappelijke disciplines bij kijken, zoals geologie en hydrogeologie, burgerlijke bouwkunde en mijnbouwkunde, geochemie, scheikunde van de radionucliden, materiaalkunde, alsook statistieken en numerieke analyse. De realisatie ervan, vanaf het begin van de methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsfase tot de sluiting van de bergingsinstallatie en de daaropvolgende periode van institutionele controle, vergt bovendien vele tientallen jaren en gebeurt noodzakelijkerwijze in stappen of fasen.

Concreet bestaat de methode die wordt gevolgd om te komen tot een technisch en economisch haalbare en veilige bergingsoplossing, erin *iteratief* te werk te gaan, in het kader van een *geleidelijk, flexibel en stapsgewijs proces* (fig. 2.2). Dit proces is erop gericht de resultaten van de onderzoeks- en ontwikkelingswerkzaamheden op alle betrokken technische en wetenschappelijke gebieden alsook de evoluties van de wetgeving en regelgeving op coherente wijze bijeen te brengen. Op die manier wordt de kennis en het ontwerp van het bergingssysteem voortdurend verbeterd en de veiligheidsevaluaties verfijnd. De proces omvat dus de aspecten inzicht, ontwerp, bouw, exploitatie en sluiting, om te gepasten tijde de elementen die verder uitgediept moeten worden te identificeren. Zo heeft bijvoorbeeld de bergingsarchitectuur een rechtstreekse invloed op de wijze van het plaatsen van het afval en vice versa. De conclusies van de veiligheidsevaluaties, die telkens de overgang naar de volgende realisatiefase bepalen, en de evolutie van de bergingsarchitectuur geven op hun beurt aanleiding tot nieuwe onderzoekswerken, enzovoort. De referentiebergingsarchitectuur evolueert aldus geleidelijk naar de eindarchitectuur. Hetzelfde geldt voor de veiligheidsevaluaties.

Dit tweede hoofdstuk preciseert na een herhaling van de doelstellingen van diepe berging de twee categorieën van vereisten die daar rechtstreeks uit voortvloeien en waaraan het ontwerp van een dergelijk bergingssysteem moet voldoen. Enerzijds algemene vereisten: een veiligheidsvereiste, zowel gedurende de exploitatie van de bergingsinstallatie als na de sluiting ervan, een robuustheidsvereiste, opdat de radiologische veiligheid op lange termijn overtuigend kan worden geëvalueerd, en een haalbaarheidsvereiste. Anderzijds vereisten die specifiek zijn voor berging in de Boomse Klei en die moeten vermijden dat de intrinsieke kenmerken van het te bergen afval, het materiaal dat wordt gebruikt om de bergingsinstallatie te bouwen, en de eigenlijke bouw van de bergingsinstallatie de veiligheid van de bestudeerde oplossing op onaanvaardbare wijze zouden aantasten. Dit hoofdstuk eindigt met de aspecten kwaliteitsbeheer en kwaliteitsborging, die op termijn betrekking zullen hebben op alle uitvoeringsfasen van het bergingssysteem.



Figuur 2.2 De belangrijkste fasen van de stapsgewijze realisatie van een bergingssysteem. Deze realisatie gebeurt flexibel en iteratief, waarbij de iteraties kunnen leiden tot aanpassingen en eventueel tot stappen terug binnen één zelfde fase of naar een vroegere fase (zie ook fig. 1.1). Opeenvolgende veiligheidsevaluaties dragen bij tot het inzicht in de werking van het bergingssysteem en vergroten beetje bij beetje het nodige vertrouwen om van de ene fase naar de volgende over te gaan.

2.4

2.1	Doelstellingen van een diepe berging	2.5
2.2	Algemene vereisten	2.6
2.2.1	Radiologische veiligheid op lange termijn	2.7
2.2.2	Robuustheid	2.13
2.2.3	Operationele veiligheid	2.13
2.2.4	Subkritikaliteit en naleving van de <i>safeguards</i>	2.14
2.2.5	Milieubescherming	2.14
2.2.6	Flexibiliteit	2.14
2.2.7	Haalbaarheid	2.15
2.2.8	Terugneembaarheid	2.15
2.3	Specifieke vereisten voor de Boomse Klei	2.16
2.4	Kwaliteitsbeheer en kwaliteitsborging	2.18

2.1 Doelstellingen van een diepe berging

Het langetermijn beheer van radioactief afval in België past zich in een kader van *radiologische veiligheid* dat twee reeksen basisprincipes omvat: een reeks principes inzake beheer van radioactief afval, opgesteld door het *International Atomic Energy Agency* (IAEA, Internationaal Agentschap voor Atoomenergie), en een reeks principes inzake stralingsbescherming (zie kader hieronder), opgesteld door de *International Commission on Radiological Protection* (ICRP, Internationale Commissie voor Stralingsbescherming). Deze principes vormen de leidraad voor de verwezenlijking van elke bergingsoplossing, vanaf het ontwerp, de bouw en de exploitatie tot en met de sluiting. Het eerste van de drie stralingsbeschermingsprincipes, het principe van de rechtvaardiging van de handelingen, wordt in feite meteen al verondersteld. Het beheer en in het bijzonder de berging van radioactief afval kunnen immers niet worden gezien als op zichzelf staande handelingen die een eigen rechtvaardiging nodig hebben. Zij moeten integendeel worden beschouwd als deel uitmakend van veel ruimere handelingen, zoals kernenergieproductie of medische diagnose, die gerechtvaardigd worden geacht.

De principes inzake beheer van radioactief afval die zijn opgesteld door het IAEA, vertalen zich in een dubbele doelstelling voor berging.

- *Beschermen van mens en milieu* Het bergen moet de mens en het milieu beschermen tegen de risico's die het radioactieve afval kan vormen, door dit afval zolang als nodig te concentreren en in te sluiten.
- *Beperken van de overdracht van de lasten op toekomstige generaties* Het bergen moet een passieve bescherming bieden, anders gezegd een bescherming die op termijn geen enkele ingreep van de toekomstige generaties meer zal noodzaken.

De eerste doelstelling, de beschermingsdoelstelling, omvat tegelijk een aspect stralingsbescherming en een aspect niet-radiologische bescherming van mens en milieu; beide aspecten liggen in de lijn van de nationale en internationale wet- en regelgeving. De Belgische regelgeving betreffende stralingsbescherming volgt de Europese richtlijnen terzake, die zelf op de drie basisprincipes van de stralingsbescherming steunen, namelijk Europese richtlijn 96/29/EURATOM tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming van de gezondheid der bevolking en der werkers tegen de aan ioniserende straling verbonden gevaren, en Europese richtlijn 97/43/EURATOM betreffende de bescherming van personen tegen de gevaren van ioniserende straling in verband met medische blootstelling. De effectieve dosislimieten die richtlijn 96/29/EURATOM oplegt, hebben betrekking op de totale blootstelling als gevolg van alle controleerbare handelingen en bronnen waarmee een gegeven individu wordt geconfronteerd. Deze limiet bedraagt 1 mSv per jaar voor het publiek. De ICRP beveelt overigens aan dat de maximaal toegestane dosis voor een diepebergingsinstallatie, dit is de dosisbeperking van een bergingsinstallatie, beperkt wordt tot 0.3 mSv per jaar (zie ook sectie 4.3.1). Ter vergelijking, de gemiddelde blootstelling aan ioniserende stralingen in België bedraagt 3.6 mSv per jaar, en is vooral van natuurlijke oorsprong (fig. 2.3). Op het vlak van niet-radiologische milieubescherming is de Europese richtlijn 97/11/EG betreffende de milieu-effectbeoordeling van bepaalde openbare en particuliere projecten een fundamentele richtlijn die van toepassing is op Belgisch niveau.

Effectieve dosis

Som van de gewogen equivalente dosissen over alle organen en weefsels. De wegingscoëfficiënt houdt rekening met de stralingsgevoeligheid van de organen. De effectieve dosis wordt uitgedrukt in sievert (Sv). Ter vereenvoudiging wordt de term "dosis" vaak gehanteerd in plaats van "effectieve dosis".

Equivalente dosis

Product van de geabsorbeerde dosis met een wegingscoëfficiënt die afhangt van de aard van de straling en haar biologische impact op een weefsel of orgaan weergeeft. De equivalente dosis wordt uitgedrukt in sievert (Sv).

Geabsorbeerde dosis

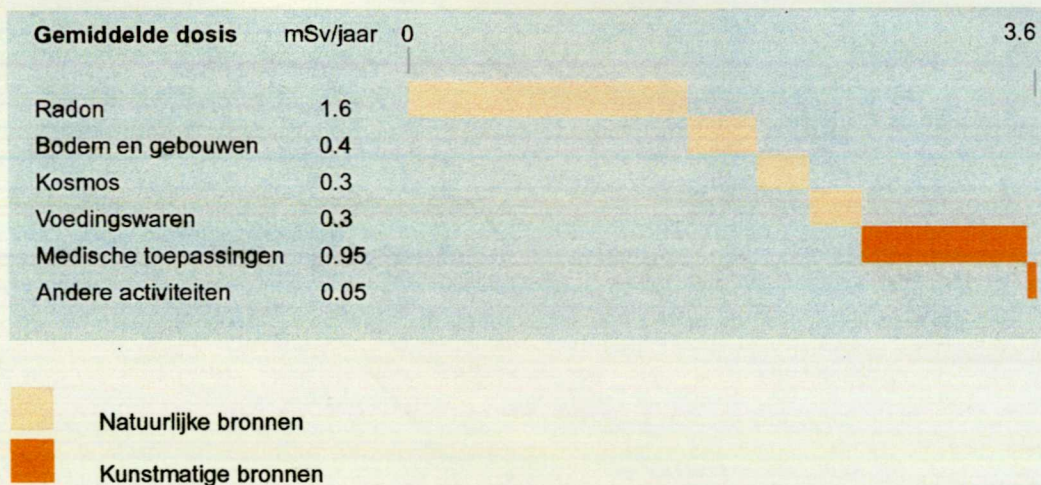
Energie die door de straling afgegeven wordt per massaeenheid. De geabsorbeerde dosis wordt uitgedrukt in gray (Gy).

Dosislimiet

Maximale waarde van de dosis die beroepsmatig blootgestelde werknemers en leden van het publiek mogen oplopen tijdens een gegeven periode. Deze limieten houden geen rekening met natuurlijke bronnen, evenmin als met medische blootstelling. Er bestaat een dosislimiet voor werknemers en een dosislimiet voor leden van het publiek (zie ook fig. 2.3).

Dosisbeperking

Een beperking ten aanzien van de individuele dosis die één bepaalde bron, handeling of taak kan veroorzaken, om te waarborgen dat de dosislimiet niet wordt overschreden. De dosisbeperking wordt gebruikt om de bescherming tegen ioniserende stralingen te optimaliseren.



Figuur 2.3 Gemiddelde jaarlijkse blootstelling aan ioniserende stralingen in België. Natuurlijke bronnen zijn de oorzaak van 72 % van de gemiddelde blootstelling van 3.6 mSv per jaar en medische kunstmatige bronnen zijn verantwoordelijk voor 26 % van die blootstelling.

De drie basisprincipes van de stralingsbescherming

principe van rechtvaardiging van de handelingen: elke handeling die blootstelling aan ioniserende stralingen met zich meebrengt, moet meer voordelen dan nadelen bieden, zonder dat deze voordelen daarom ten goede moeten komen aan degenen die de nadelen ondervinden.

principe van optimalisering van de bescherming, ook ALARA-principe genoemd (*As Low As Reasonably Achievable*): de beschermingsmiddelen moeten zodanig worden gekozen dat de individuele doses en het aantal blootgestelde personen zo laag worden gehouden als redelijkerwijze mogelijk is, rekening houdende met economische en sociale factoren.

principe van de individuele dosislimieten: de stralingsdosis die beroepsmatig blootgestelde werknemers en de bevolking ontvangen, moet lager blijven dan de opgelegde limietwaarden.

2.2 Algemene vereisten

De dubbele doelstelling van een diepe berging kan worden vertaald in een reeks concrete vereisten. Meer bepaald moet een bergingssysteem dusdanig worden ontworpen dat

- het veilig is zowel tijdens de exploitatie als na de sluiting ervan;
- het robuust is, opdat zijn radiologische veiligheid op lange termijn afdoend kan worden geëvalueerd;
- het rekening houdt met de kritikaliteitsrisico's;
- de niet-radiologische milieu-impact lager is dan de geldende normen;
- het op flexibele wijze wordt ontwikkeld en gerealiseerd;

- het haalbaar is;
- het afval eventueel gedurende bepaalde tijd teruggenomen kan worden.

Tot op heden is het de vereiste van radiologische veiligheid op lange termijn die het grondigst bestudeerd is geworden in het Belgische programma.

2.2.1 Radiologische veiligheid op lange termijn

Elk bergingssysteem moet vier *functies van veiligheid op lange termijn* vervullen die samen het niveau van radiologische veiligheid op lange termijn bepalen (zie ook hoofdstuk 4). Deze functies zijn de volgende:

- fysische insluiting,
- vertraging en gespreid vrijkomen,
- verdunning en verspreiding,
- beperkte toegankelijkheid.

Deze functies worden hier voorgesteld als basisprincipes bij het ontwerp van een diepebergingsinstallatie. Ze zijn vooral ook een belangrijk hulpmiddel gebleken om de werking van het bergingssysteem te begrijpen, om de veiligheid ervan te evalueren, en om te communiceren. Op basis van het methodologisch onderzoek en ontwikkeling gedurende de periode 1990–2000 kon de kennis van het systeem en zijn omgeving immers worden gestructureerd door nauwkeurig verbanden te leggen tussen de verschillende componenten van het systeem en de omgeving, de opeenvolgende fases in de evolutie van het systeem en de veiligheidsfuncties.

Op de derde veiligheidsfunctie na, die wordt uitgeoefend door de omgeving van het bergingssysteem, wordt elke overige functie vervuld door één of meer componenten van het bergingssysteem, die dan *barrières* worden genoemd (figuren 2.4 en 3.23; tabel 3.7). Deze opeenvolgende, elkaar omhullende barrières zijn van diverse aard. Sommige barrières zijn "kunstmatig": het zijn de *waterdichte verpakkingen* rond het afval van categorie C dat radiologisch en thermisch de zwaarste eisen stelt, en de componenten van de bergingsinstallatie die de radionuclidenmigratie moeten belemmeren, zoals de *opvulmaterialen* en afdichtingsmaterialen van de bergingsgalerijen. Eén van de barrières is van natuurlijke aard: de geologische *gastformatie* die de kunstmatige barrières omgeeft. (De *watervoerende lagen* boven en onder de gastformatie en de *biosfeer* spelen geen barrièrerol. Ze kunnen daarenboven in de loop van de tijd drastische wijzigingen ondergaan. Ze maken geen deel uit van het bergingssysteem, maar wel van de *omgeving* van het bergingssysteem.) Alle componenten van de bergingsinstallatie, met inbegrip van het afval, en het *deel* van de gastformatie *dat wordt verstoord door de uitgraving*, vormen het *nabije veld*; de geologische barrière en de watervoerende lagen vormen de *geosfeer*, ook het *verre veld* genoemd (zie sectie 3.3 voor een volledig beschrijving van de bestudeerde bergingsinstallatie).

Niet het aantal barrières vormt echter de beste veiligheidsgarantie van een bergingssysteem, maar wel de aanvullende vereisten die aan de barrières worden opgelegd zodat er ongeacht de mogelijke verstoringen altijd meerdere mechanismen zullen zijn om te verhinderen dat het systeem een onaanvaardbaar risico vormt. Deze aanvullende vereisten zijn drie in getal:

Barrière Geologische gastformatie of component van de bergingsinstallatie die belemmert dat het water naar het geborgen radioactieve afval stroomt en dat de radionucliden in dit afval migreren naar de biosfeer.

Omgeving van het bergingssysteem

Geheel gevormd door de watervoerende lagen boven en onder de gastformatie en door de biosfeer.

Biosfeer Deel van de aarde waar de mensen, de dieren en de planten leven en zich ontwikkelen en waar zij kunnen worden blootgesteld aan de radioactieve stoffen die kunnen vrijkomen uit een bergingsinstallatie.

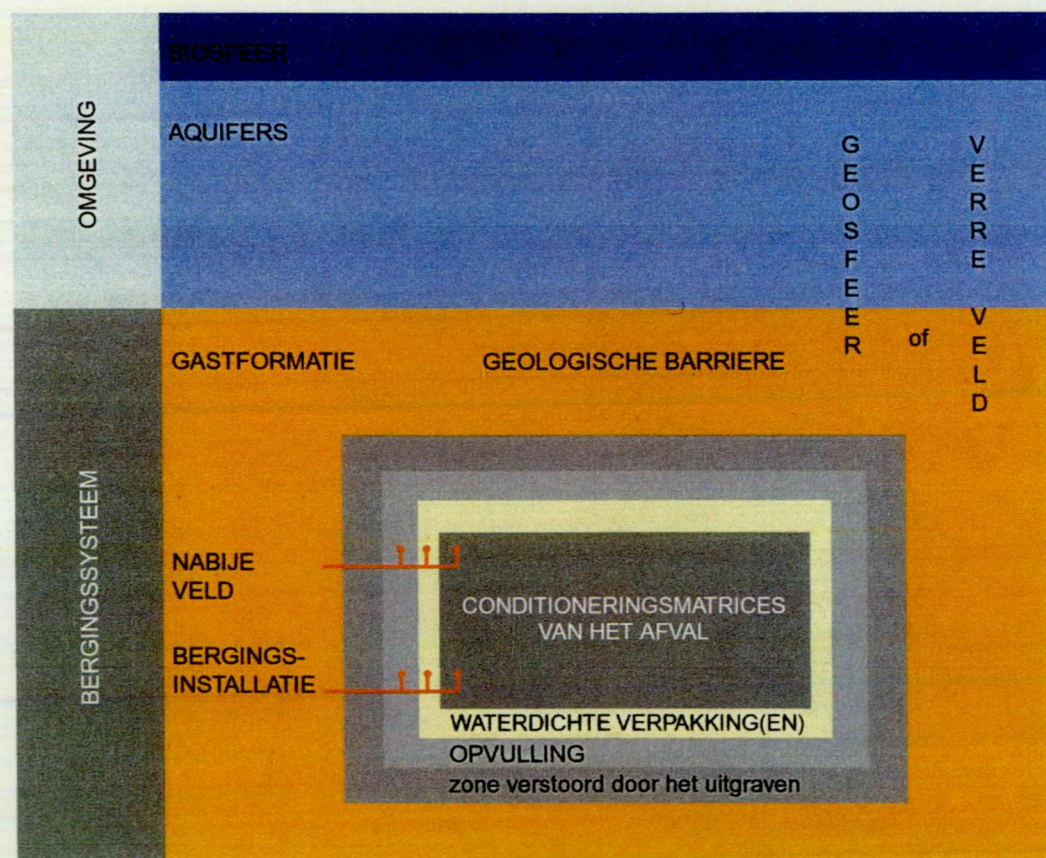
Nabije veld

Geheel dat wordt gevormd door de componenten van de bergingsinstallatie, inclusief het radioactieve afval, en het door de uitgraving verstoorde deel van de gastformatie.

Verre veld of geosfeer

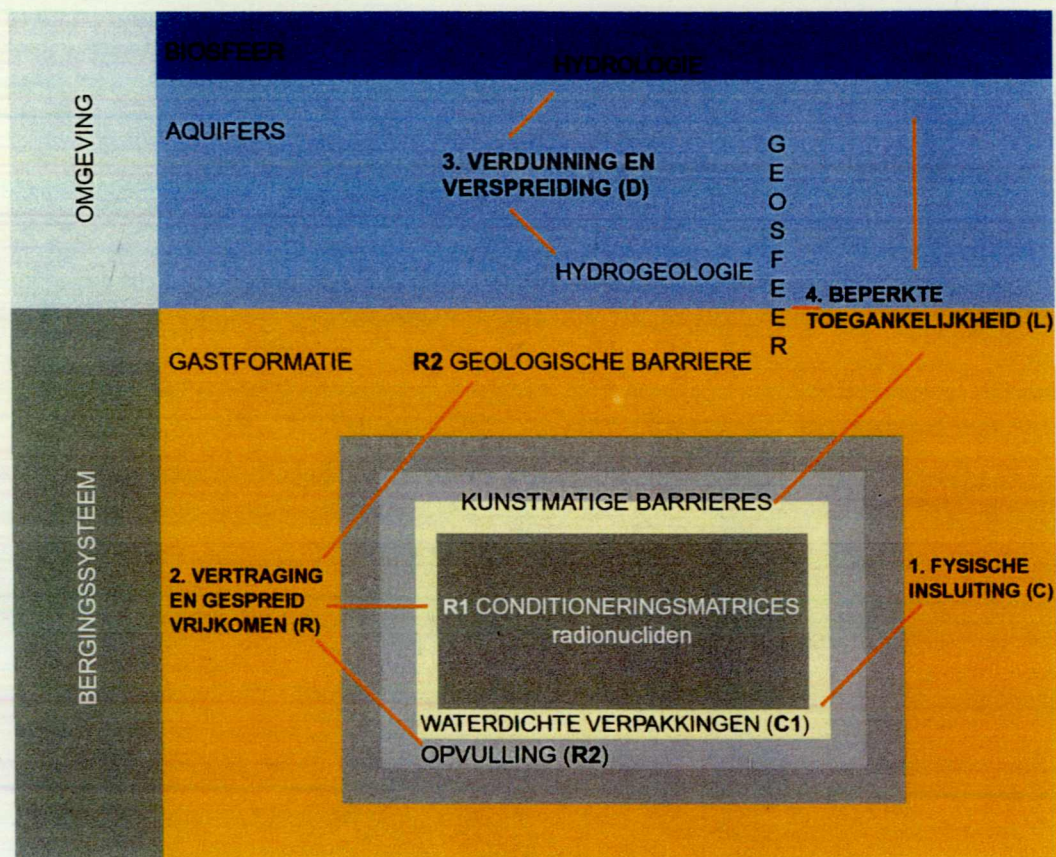
Geheel dat wordt gevormd door de gastformatie en de watervoerende lagen die de gastformatie omgeven.

- *diversiteit van de werkingsmechanismen*: de werking van de verschillende barrières moet gebaseerd zijn op verschillende fysische en chemische mechanismen, opdat ze niet onderhevig zouden zijn aan dezelfde types van falen;
- *gedeeltelijke redundantie*: elk falen van een barrière moet voldoende kunnen worden gecompenseerd door een deel of de totaliteit van de andere barrières;
- *maximale functionele onafhankelijkheid*: het falen of de werking van een barrière moet een zo gering mogelijk effect hebben op de werking van de andere barrières.



Figuur 2.4 Principeschema van een diepebergingsinstallatie en bijbehorende terminologie.

De eerste veiligheidsfunctie, de *fysische insluiting (C)*, heeft tot doel de radionucliden te isoleren van hun directe omgeving en in het bijzonder van het water, de oorzaak van verspreiding bij uitsteking, om elk significant vrijkomen van radionucliden te voorkomen. Deze functie moet het mogelijk maken maximaal te profiteren van het radioactieve verval voordat de andere veiligheidsfuncties worden aangesproken. Dit radioactieve verval is immers een intrinsiek veiligheidselement, aangezien het een onvermijdelijke vermindering van de radiotoxiciteit en dus van het totale risico met zich meebrengt, die des te meer uitgesproken is naarmate de radionucliden later vrijkomen in de biosfeer.



Figuur 2.5 De functies van langetermijn veiligheid van het bestudeerde diepebergingsstelsel zoals in aanmerking genomen bij de veiligheidsevaluaties op lange termijn voor het normale-evolutiescenario. De verschillende componenten van het stelsel kunnen andere veiligheidsfuncties vervullen die niet in aanmerking worden genomen in de evaluaties (zie ook sectie 3.3 en tabel 3.7).

De fysische insluiting wordt bereikt dankzij het aanbrengen van kunstmatige omhulsels rond het afval, waarvan er ten minste één waterdicht moet blijven gedurende een minimale tijd (fig. 2.5). Deze fysische insluiting is in feite vooral onontbeerlijk voor zeer warmteafgevend afval, dat tevens het afval is dat de hoogste activiteit aan kritische radionucliden bevat. Dit afval wordt dus voorzien van een waterdichte verpakking of mantel die de interacties tussen het water en de radionucliden op zijn minst tijdens de "thermische" fase van het bergingsstelsel moet voorkomen, dit is gedurende de periode waarin de aanwezigheid van het afval in de bergingsinstallatie de temperatuur in en rond de bergingsinstallatie aanzienlijk doet toenemen (fig. 2.6). (Deze waterdichte verpakking is bovendien een robuustheidselement, want zij vereenvoudigt de veiligheidsevaluaties omdat er geen rekening moet worden gehouden met de complexe fenomenen van de radionuclidenmigratie onder een temperatuurgradiënt — zie sectie 2.2.2.) De functie fysische insluiting kan worden onderverdeeld in twee subfuncties:

- de subfunctie *waterdichtheid (C1)*, die gekoppeld is aan de kunstmatige barrières, en meer bepaald aan de waterdichte verpakking, die tot doel heeft te *beletten* dat het water in contact komt met het afval;
- de subfunctie *beperking van de watertoevoer (C2)*, die hoofdzakelijk berust op de natuurlijke barrière, maar ook op het waterabsorberend vermogen van bepaalde kunstmatige barrières, en die tot doel heeft het ogenblik te *vertragen* waarop de barrières die een waterdichtheidsfunctie vervullen, en vervolgens de radionucliden, in contact zullen komen met het geïnfiltreerde water.

Omdat het niet mogelijk is een perfecte fysische insluiting van de radionucliden te garanderen totdat het activiteitsniveau binnen de bergingsinstallatie ongevaarlijk wordt, moet een tweede veiligheidsfunctie worden verzekerd wanneer de fysische insluiting eenmaal begeeft: dat is de functie *vertraging en gespreid vrijkomen (R)*, die de migratie van de radionucliden naar de biosfeer zoveel mogelijk moet vertragen, om aldus een maximaal verval van hun radioactiviteit binnen het eigenlijke bergingssysteem mogelijk te maken. Deze functie moet ervoor zorgen dat de radionucliden, vooral de langlevende, op geen enkel ogenblik in onaanvaardbare hoeveelheden uit het bergingssysteem vrijkomen en in de biosfeer terechtkomen. Ook deze functie kan in twee subfuncties worden opgesplitst:

- de subfunctie *weerstand tegen uitloging (R1)*, die resulteert in de spreiding in de tijd van het vrijkomen van de radionucliden dankzij de fysico-chemische stabiliteit van de conditioneringsmatrices;
- de subfunctie *diffusie en retentie (R2)* van de radionucliden wanneer die eenmaal zijn vrijgekomen uit de matrices. In het geval van de bestudeerde bergingsinstallatie wordt deze tweede subfunctie vervuld door het opvulmateriaal, dat met name wordt gekozen omwille van zijn geschiktheid om de radionuclidenmigratie te vertragen door sorptieprocessen of door de vorming van weinig oplosbare neerslagen. Ze wordt ook vervuld door de afdichtingen van de bergingsgalerijen en door de geologische barrière (fig. 2.5). Een kleiformatie zoals de Boomse Klei bezit immers het vermogen om de radionuclidenmigratie te vertragen en een zelfhelend vermogen dat de vorming van preferentiële migratiewegen beperkt.

Voor de berging van afval van categorieën B en C in klei is de functie vertraging en gespreid vrijkomen normaliter de doorslaggevende functie voor de radiologische veiligheid op lange termijn. Ze wordt vóór alles vervuld door de gastformatie.

De radionuclidenfluxen die ondanks alles de biosfeer kunnen bereiken, zullen een des te zwakker effect hebben op de mens en het milieu naarmate zij meer *verdund en verspreid (D)* worden door de waterstromingen in de watervoerende lagen, of door de bovengrondse stromingen in de biosfeer (fig. 2.5). Deze derde veiligheidsfunctie, die wordt uitgeoefend door de omgeving van het bergingssysteem, kan echter in vergelijking met de andere veiligheidsfuncties niet van groot gewicht zijn, omdat anders de beschermingsdoelstelling van berging, die steunt op het principe van concentratie en insluiting, in het gedrang gebracht wordt. Bovendien zijn de componenten van de omgeving van het bergingssysteem die deze derde functie vervullen, weinig robuust, in die zin dat hun werking op lange termijn moeilijk te evalueren is. Deze componenten zijn immers sterk onderhevig aan evolutie, bijvoorbeeld als gevolg van klimaatwijzigingen of menselijke activiteiten.

Ten slotte moet het bergingssysteem het afval dusdanig isoleren dat de waarschijnlijkheid en de gevolgen van opzettelijke of onopzettelijke menselijke indringing beperkt blijven. Dat is de functie *beperkte toegankelijkheid (L)*, die wordt vervuld door de kunstmatige barrières en de natuurlijke barrière, door de controle- en toezichtsperiode die volgt op de sluiting van de bergingsinstallatie en door de maatregelen die worden genomen om de herinnering aan de aanwezigheid van de berging intact te houden (fig. 2.5). (Onder andere impliceert deze functie dat de bergingsinstallatie gebouwd wordt op een plaats waar zich geen ontginbare natuurlijke rijkdommen bevinden.) De gevolgen van een eventuele indringing zullen des te beperkter blijven indien de berging beschikt over een hoge intrinsieke weerstand, met andere woorden indien de eerste twee veiligheidsfuncties weinig worden beïnvloed door menselijke indringing.

Veiligheidsfunctie Werking of rol die het bergingssysteem of zijn omgeving moet verzekeren om te beletten dat de radionucliden die in het geborgen afval zitten een onaanvaardbaar risico zouden kunnen vormen voor de mens of voor het milieu.

Er zijn vier veiligheidsfuncties.

De functie *fysische insluiting C* heeft tot doel de radionucliden te isoleren van hun directe omgeving om elk significant vrijkomen van radioactiviteit te verhinderen.

- De subfunctie *waterdichtheid C1* belet dat het water in contact komt met het afval.
- De subfunctie *beperking van de watertoevoer C2* vertraagt het ogenblik waarop de barrières die een waterdichtheidsfunctie vervullen, en vervolgens de radionucliden, in contact komen met het infiltrerende water.

De functie *vertraging en gespreid vrijkomen R* heeft tot doel de migratie van de radionucliden naar de biosfeer zoveel mogelijk te vertragen om een maximaal verval van hun radioactiviteit binnen het bergingssysteem te bekomen.

- De subfunctie *weerstand tegen uitloging R1* spreidt het vrijkomen van de radionucliden uit de afvalmatrix in de tijd.
- De subfunctie *diffusie en retentie R2* vertraagt en spreidt het vrijkomen van de radionucliden in de biosfeer.

De functie *verduunning en verspreiding D* heeft tot gevolg dat de concentratie van radionucliden die de biosfeer kunnen bereiken, verlaagd wordt, en beperkt aldus het potentieel effect op de mens en op het milieu.

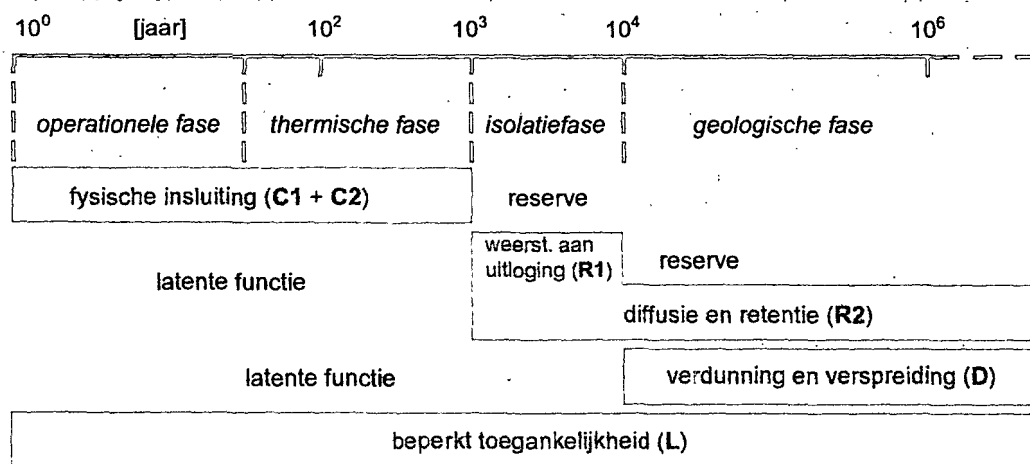
De functie *beperkte toegankelijkheid L* heeft tot doel het afval dusdanig te isoleren dat de waarschijnlijkheid en de gevolgen van menselijke indringing beperkt blijven.

De eerste twee veiligheidsfuncties worden vervuld door het bergingssysteem in zijn geheel of door één of meer componenten ervan, de derde wordt verzekerd door de omgeving van het bergingssysteem en de vierde wordt tegelijk verzekerd door het bergingssysteem, de omgeving ervan en maatregelen van institutionele aard.

Veiligheids-

reserve Verschil tussen de werkelijke tijdsduur gedurende welke de veiligheidsfunctie wordt uitgeoefend, en de tijdsduur waarmee rekening is gehouden in de veiligheidsevaluaties, voor zover deze laatste korter is.

De eerste drie veiligheidsfuncties volgen elkaar op in de globale evolutie van het bergingssysteem, zonder elkaar daarom wederzijds uit te sluiten (fig. 2.6). Die evolutie werd opgesplitst in vier fasen, die de kenmerkende perioden in de werking van het systeem weergeven zoals die aan het licht werden gebracht in de veiligheidsevaluaties voor het normale-evolutiescenario: de operationele fase, de thermische fase, de isolatiefase en de geologische fase. De functie fysische insluiting moet worden verzekerd tijdens de *operationele fase* van de berging, die zich uitstrekt vanaf het inbrengen van het afval tot de sluiting van de bergingsinstallatie en enkele tientallen jaren in beslag neemt, alsook tijdens de *thermische fase* die erop volgt en die naar gelang van het afval enkele honderden tot enkele duizenden jaren omvat. De functie fysische insluiting blijft aanzienlijk tijdens de derde fase van het bergingssysteem, de *islatiefase*, maar de doorslaggevende functies zijn dan enerzijds de weerstand tegen uitloging en anderzijds de diffusie en retentie door de gastformatie. Deze fase duurt ongeveer 10 000 jaar en kenmerkt zich door een radiologische impact op de omgeving van het bergingssysteem die nagenoeg nul is. De functie diffusie en retentie en de functie verdunning en verspreiding zijn de hoofdfuncties tijdens de daaropvolgende *geologische fase*, die zich uitstrekt over meer dan één miljoen jaar. Deze fase kenmerkt zich door een geringe radiologische impact op de omgeving. De vierde veiligheidsfunctie ten slotte, de functie beperkte toegankelijkheid, moet permanent actief zijn. De vier genoemde functies zijn trouwens niet beperkt in de tijd. De tweede en de derde functie kunnen vervroegd geactiveerd worden in geval van falen van de barrière(s) die de eerste functie moet(en) verzekeren, want zij zijn in feite latent aanwezig. De eerste en de tweede functie kunnen bovendien langer worden vervuld dan de duur waarmee rekening is gehouden in de veiligheidsevaluaties; het verschil vormt dan de veiligheidsreserve.



Figuur 2.6 De vier fasen van de normale evolutie van een bergingssysteem voor het afval van categorie C die vanuit radiologisch en thermisch oogpunt de hoogste vereisten stellen, zijnde verglaasd afval en bestraalde splijtstofelementen (zie sectie 3.1), en de overeenkomstige veiligheidsfuncties op lange termijn.

2.2.2 Robuustheid

De radiologische langetermijn veiligheid van een bergingssysteem kan niet rechtstreeks op grond van industriële ervaring bewezen worden. Men moet bijgevolg het vertrouwen in deze veiligheid kunnen vestigen door die veiligheid op overtuigende wijze indirect te evalueren (zie hoofdstuk 4). De betrouwbaarheid van de veiligheidsevaluaties hangt sterk af van de kwaliteit en meer bepaald van de robuustheid van het bergingssysteem, dat wil zeggen de mate waarin de reële werking van het bergingssysteem onafhankelijk is van de onzekerheden die niet kunnen worden weggenomen. Deze robuustheid kan resulteren uit twee complementaire types van benadering. De eerste benadering bestaat erin de technische performantie van het systeem te verhogen, bijvoorbeeld door meerdere kunstmatige barrières te gebruiken in plaats van één enkele, door de barrières te overdimensioneren of door ervoor te zorgen dat ze onafhankelijk zijn van elkaar. De tweede benadering bestaat erin de resterende onzekerheden weg te werken of op zijn minst te reduceren, bijvoorbeeld door te opteren voor een eenvoudige bergingsarchitectuur en voor materialen waarvan de degradatiemechanismen goed gekend zijn, of door te kiezen voor het installeren van de bergingsinstallatie in een hydrogeologische omgeving die gemakkelijk te modelleren is. Dit kan bijvoorbeeld ook gebeuren door het afval van categorie C dat op radiologisch vlak de strengste vereisten stelt, te omgeven met een waterdichte mantel, om elk vrijkomen van radionucliden tijdens de thermische fase van de berging te voorkomen en zo de complexe en slecht gekende fenomenen van migratie onder een thermische gradiënt niet te moeten modelleren. Het feit dat een bergingssysteem robuust is, vergemakkelijkt de modellering ervan, omdat het met name de nodige vereenvoudigingen toelaat.

Robuustheid

Mate van onafhankelijkheid van de reële werking van een bergingssysteem ten aanzien van de onzekerheden die niet konden worden weggenomen.

2.2.3 Operationele veiligheid

Elke bergingsinstallatie moet niet alleen op lange termijn radiologisch veilig zijn, maar ook tijdens haar operationele fase, en dit zowel voor de werknemers als voor het publiek. De kenmerken van het ontwerp en de wijze van bouw, uitbating en sluiting van de bergingsinstallatie zullen dus verenigbaar moeten zijn met de bepalingen van de wet- en regelgeving die van toepassing zijn op een gemengde nucleaire en ondergrondse installatie. Uiteraard zal de operationele veiligheid afdoend moeten zijn aangetoond voordat overgegaan kan worden van de huidige fase van methodologisch onderzoek en ontwikkeling naar de voorontwerpfase. De gedetailleerde evaluatie van de operationele veiligheid is niettemin slechts mogelijk wanneer de bergingsarchitectuur voldoende ver ontwikkeld is. Deze evaluatie zal dan eveneens kunnen steunen op de praktische ervaring opgedaan tijdens de exploitatie van het ondergrondse laboratorium HADES alsook op de kennis die zal bekomen worden uit het PRACLAY-demonstratie-experiment dat momenteel in voorbereiding is (zie sectie 3.3.3).

Een kernpunt in de evaluatie van de operationele veiligheid is de hypothese van een verwaarloosbaar contaminatierisico van de bergingsinstallatie tijdens de exploitatie. Er zal moeten geverifieerd worden of het toepassen van strikte kwaliteits- en controlemaatregelen op de colli met radioactief afval, inclusief de waterdichte verpakkingen, dit kan bewerkstelligen. Daardoor zou de installatie tijdens de operationele fase niet als een op contaminatie gecontroleerde zone hoeven te worden beschouwd. Een dergelijke beslissing zou immers een

aanzienlijke impact hebben op de exploitatiewijze; deze impact zou zich kunnen uitstrekken tot het ontwerp, namelijk met de mogelijke toename van de toegangswegen tot de bergingsinstallatie, en vandaar tot de radiologische veiligheid op lange termijn.

2.2.4 Subkritikaliteit en naleving van de *safeguards*

Elke diepebergingsinstallatie moet zo worden ontworpen en geëxploiteerd dat de risico's verbonden met de aanwezigheid van splijtstoffen, drastisch worden beperkt. Het eerste risico is het kritikaliteitsrisico of risico van een spontane en aanhoudende nucleaire ketenreactie. Een kritikaliteitssituatie tijdens de berging van het afval of tijdens de latere evolutie van het systeem zou de eigenschappen van het nabije en het verre veld immers kunnen wijzigen en met name de prestatie van de barrières kunnen verminderen, in het bijzonder wegens de periodieke productie van warmtepulsen. Ook kan de inventaris van de aanwezige radionucliden gewijzigd worden. Het tweede risico is het risico van ontvreemding van splijtstoffen. De exploitatievoorwaarden van de bergingsinstallatie zullen dus moeten voldoen aan de vereisten van de internationale non-proliferatieverdragen (*safeguards*). Zij zullen met name moeten voorzien in een nauwkeurige boekhouding en naspeurbaarheid van de splijtstoffen, die onderworpen zullen worden aan internationale controles. De subkritikaliteitsaspecten zijn preliminair geëvalueerd, terwijl de naleving van de *safeguards* nog niet in aanmerking is genomen in de studies.

2.2.5 Milieubescherming

Elke bergingsinstallatie moet zo worden ontworpen en geëxploiteerd dat haar niet-radiologische impact op het milieu onder de geldende normen blijft. Zo mogen de chemotoxische stoffen in het afval of in de componenten van de bergingsinstallatie geen aanleiding geven tot een verontreiniging van de omgeving van de bergingsinstallatie, en mag het gehalte aan die chemotoxische stoffen in de drinkwaterreserves in geen geval de opgelegde grenswaarden overschrijden. Ook mag de onvermijdelijke temperatuurstijging rondom een bergingsinstallatie voor afval van categorie C het grondwater niet dermate opwarmen dat de chemische en bacteriologische samenstelling ervan nadelig wordt gewijzigd; daardoor zou het grondwater immers minder geschikt kunnen worden voor consumptie of irrigatie. Deze temperatuurverhoging mag evenmin de fauna en de flora verstoren. De studies terzake, die op dit ogenblik nog preliminair zijn, moeten passen in een eenduidig wettelijk kader — kader dat vandaag onvolledig is, in elk geval voor wat betreft de maximaal toegestane temperatuurstijgingen in de watervoerende lagen.

2.2.6 Flexibiliteit

De ontwikkeling en de realisatie van een bergingsinstallatie, met inbegrip van de exploitatie, de controle en de sluiting ervan, moeten op flexibele wijze gebeuren. Deze flexibiliteit moet een goede aanpassing mogelijk maken aan eventuele nieuwe types van afval of aan eventuele nieuwe conditioneringen, alsook aan de reële omstandigheden in de ondergrond.

Deze flexibiliteit moet het voorts mogelijk maken om op eerder genomen beslissingen terug te komen, of beslissingen voorlopig uit te stellen, en dit zowel voor strategische, beheers- of technische beslissingen. Het bergingsproces is immers een stapsgewijs proces dat verschillende tientallen jaren in beslag zal nemen en waarvan het goede verloop zal afhangen van juiste beslissingen op het einde van verschillende scharnietappes (fig. 2.2). Concreet zullen de verschillende opties qua gastformatie en bergingssite dus lang genoeg open moeten blijven en zullen de verschillende aspecten van de installatie, zoals de architectuur en de keuze van de samenstellende materialen, moeten kunnen evolueren met de kennis. Een dergelijke flexibele benadering is echter slechts gerechtvaardigd indien deze periode wordt benut om het bergingssysteem te optimaliseren en om de eraan verbonden risico's beter te evalueren en zo nodig verder te verminderen.

2.2.7 Haalbaarheid

De bestudeerde bergingsinstallatie moet natuurlijk zowel technisch als economisch haalbaar zijn. De technische haalbaarheid wordt rechtstreeks bepaald door de vereisten op het vlak van mijnveiligheid en operationele radiologische veiligheid, alsook door bepaalde vereisten die specifiek zijn voor Boomse Klei (zie sectie 2.3). Het ontwerp, de bouw, de exploitatie en de sluiting van de bergingsinstallatie moeten bovendien zoveel mogelijk gebaseerd zijn op de volgende elementen:

- gangbare en beproefde ingenieursmethoden en -technieken;
- een kwaliteitsborgingsprogramma dat moet garanderen dat de bergingsinstallatie zal worden gebouwd, geëxploiteerd en gesloten zoals gepland;
- herhaalde evaluaties van de veiligheid die rekening houden met de wetenschappelijke en technologische ontwikkelingen;
- mechanismen van terugkoppeling tussen de resultaten van de veiligheidsevaluaties enerzijds en het ontwerp, de bouw, de exploitatie en de sluiting van de bergingsinstallatie anderzijds.

De evaluatie van de technische haalbaarheid steunt in ruime mate op de praktische ervaring die is opgedaan tijdens de bouw van het ondergrondse laboratorium HADES. Het PRACLAY-experiment, dat als demonstratie op ware grootte noodzakelijkerwijze uitvoeringsaspecten insluit (zie sectie 3.3.3), zal dit verder versterken. Het kostenaspect van zijn kant zal moeten worden geëvalueerd in het raam van de optimalisering van de bergingsinstallatie. Deze evaluatie zal de verschillende denkbare oplossingen voor het verhogen van de veiligheid van de bergingsinstallatie afwegen tegen de kostenverhogingen die ze met zich mee zouden brengen.

2.2.8 Terugneembaarheid

Hoewel berging per definitie inhoudt dat er geen intentie is om het afval terug te nemen, is het mogelijk een bergingsinstallatie dusdanig te ontwerpen en uit te voeren dat het gedurende een bepaalde tijd voor de toekomstige generaties mogelijk blijft om het geborgen afval terug te nemen. Aangezien het belang van de terugneembaarheid de jongste jaren op internationaal

Terugneembaarheid

Mogelijkheid, gedurende een bepaalde periode, om het geborgen afval veilig terug te nemen met middelen identiek aan of vergelijkbaar met deze die werden gebruikt voor de berging ervan. De terugneembaarheid is dus één van de mogelijke gevolgen van flexibiliteit.

niveau sterk beklemtoond is geworden, is het mogelijk dat terugneembaarheid op termijn een wettelijke vereiste wordt in België, zoals dat reeds het geval is voor de berging van het afval van categorie A. Tot dusver is bij het ontwerp van de bergingsinstallatie niet uitdrukkelijk rekening gehouden met de terugneembaarheid. Toch zijn sommige om veiligheidsredenen ingevoerde elementen van de referentiearchitectuur in feite ook elementen van terugneembaarheid, zoals de mantel voor het verglaasde afval (zie sectie 3.3.1). De terugneembaarheid zal eveneens kunnen worden vergemakkelijkt door de toegang tot de bergingsgalerijen een bepaalde tijd open te houden na het einde van de berging van het afval. Zodra de toegangen eenmaal zijn opgevuld en afgedicht, zal het daarentegen veel moeilijker worden het afval terug te nemen, te meer daar de ondergrondse installatie, en in het bijzonder de bekleding van de toegangswegen, waarschijnlijk gedeeltelijk zullen zijn ontmanteld.

De eventuele vereiste van terugneembaarheid mag uiteraard in geen geval de langetermijn veiligheid van het bergingssysteem in het gedrang brengen. Daarom zal de duur van de operationele fase, dit is de periode vanaf het einde van de bouw tot de sluiting van het bergingssysteem en waarin de toegang tot het afval vrij gemakkelijk zal zijn, het resultaat moeten zijn van een compromis tussen de dwingende vereiste van veiligheid enerzijds en de vereiste van terugneembaarheid anderzijds.

2.3 Specifieke vereisten voor de Boomse Klei

Voor het specifieke geval van berging in Boomse Klei, waarvoor de barrièrefunctie van de gastformatie in het geval van een normale evolutie van de bergingsinstallatie duidelijk domineert in vergelijking met die van de kunstmatige barrières (zie hoofdstuk 4), moet elke bergingsinstallatie ook twee wezenlijke voorwaarden vervullen.

- Zij moet in haar verticale dimensie zo weinig mogelijk uitgestrekt zijn en moet zich zoveel mogelijk middenin de gastformatie bevinden, om de dikte van de kleilaag optimaal te gebruiken als barrière.
- Zij mag de eigenschappen van de omgevende klei zo weinig mogelijk verstoren, om de algemene performantie van het systeem niet te ondermijnen.

De thermische, chemische, mechanische of hydraulische verstoringen die in de gastformatie worden teweeggebracht door de aanwezigheid van een bergingsinstallatie, hebben hoofdzakelijk twee oorzaken. Het geborgen afval, waaronder afval dat grote hoeveelheden warmte en straling afgeeft, kan aan de basis liggen van de productie van gas of kan de karakteristieken van het nabije veld wijzigen. Bovendien kan de eigenlijke bouw van de bergingsinstallatie leiden tot mechanische en geochemische verstoringen. Om deze verschillende verstoringen tot een minimum te beperken, is dus een goed inzicht vereist in de verenigbaarheid van de verschillende ingebrachte materialen en in de verschillende betrokken fenomenen, vooral die welke een impact hebben op de radionuclidenmigratie in de klei.

- *warmte* Het ontwerp van de bergingsarchitectuur moet zo zijn dat de temperatuurstijging in het nabije en het verre veld als gevolg van de warmte afgegeven door het afval van categorie C, het insluitingsvermogen van het bergingssysteem niet in het gedrang brengt.

De warmteproductie zal immers alle componenten van de bergingsinstallatie doen uitzetten, met als gevolg het ontstaan van vervormingsspanningen en zelfs het breken van componenten die niet vrij kunnen uitzetten. De warmteproductie zou ook de eigenschappen van verschillende kunstmatige componenten van de bergingsinstallatie, met name van het opvulmateriaal, kunnen wijzigen. Bovendien zouden de barrière-eigenschappen van de Boomse Klei kunnen aangetast worden (zie sectie 3.6).

- *stralingen* Het ontwerp van de bergingsarchitectuur moet ook het risico van radiolyse van het water in de Boomse Klei als gevolg van de bestraling door de afvalcolli, beperken. Deze invloed zal gering zijn wegens de aanwezigheid van de materialen van het nabije veld, meer bepaald het opvulmateriaal. Bovendien zal de hoeveelheid waterstof die wordt geproduceerd door de radiolyse van het water in het opvulmateriaal en in de Boomse Klei, verwaarloosbaar zijn, zeker in vergelijking met de hoeveelheden gas die kunnen worden geproduceerd door corrosie en biodegradatie. De impact van de stralingen op het ontwerp van de installatie zal zich dus hoofdzakelijk uiten in vereisten op niveau van de operationele veiligheid (zie sectie 3.6).
- *gassen* Het ontwerp van de bergingsarchitectuur moet ook rekening houden met de productie van gassen als gevolg van de corrosie van de metalen aanwezig in het afval en in de verpakkingen, en als gevolg van de corrosie van de eventuele metalen in de bouwmaterialen van de bergingsinstallatie. Als deze gasproductie te omvangrijk is om het gas weg te laten diffunderen door de klei, zal zij de vorming van een gasvormige fase tot gevolg hebben en leiden tot lokale overdruk die de klei kan verstoren en de migratie van de radionucliden beïnvloeden (zie sectie 3.6).
- *geochemie* Behalve dat het ontwerp van de bergingsinstallatie de radiolyse van het poriënwater tot een minimum moet helpen beperken, moet het er ook voor zorgen dat de geochemische kenmerken van het bergingsmidden zo weinig mogelijk worden verstoord. Het ontwerp zal dus in het bijzonder de vorming van chemische fronten moeten beperken, zoals een alkalische pluim als gevolg van het gebruik van conditioneringsmatrices of bouwmaterialen op basis van cement, of zoals een natriumnitraatfront als gevolg van de uitloging van bepaald gebitumineerd afval. Bij de bouw en de exploitatie van de bergingsinstallatie zal er bovendien op moeten worden gelet dat de oxidatie van het pyriet en van de organische stof in de Boomse Klei, tot een minimum wordt beperkt, aangezien die oxidatie de retentiecapaciteit van de Boomse Klei zou kunnen verminderen (zie sectie 3.6).
- *uitgraving* Ten slotte zullen de uitgraaftechnieken zo moeten worden gekozen dat ze de kleiformatie zo weinig mogelijk verstoren. Zij zullen het met name mogelijk moeten maken overvloedige uitgraving te beperken en de uitgraafsnelheid boven een kritieke drempel te houden. De waarden van de uitgegraven ruimte zullen bovendien snel moeten worden bekleed, zodat de sterke convergentie van de formatie, die is waargenomen bij de bouw van de bestaande ondergrondse installatie, verhinderd wordt. De stabiliteit ervan moet verzekerd kunnen worden tot na de exploitatieperiode en in voorkomend geval tot na de gewenste periode van terugneembaarheid (zie secties 3.3.2.1 en 3.6).

2.4 Kwaliteitsbeheer en kwaliteitsborging

Opdat een bergingsoplossing op korte en op lange termijn veilig zou zijn en uit sociaal-economisch oogpunt aanvaardbaar moeten de verschillende aspecten ervan, vanaf het te bergen afval over het ontwerp, de bouw en de exploitatie tot en met de sluiting van de bergingsinstallatie, de vereiste eigenschappen bezitten en voldoen aan vooraf bepaalde vereisten. NIRAS is daarom begonnen met het ontwikkelen van een systeem voor kwaliteitsbeheer en -borging dat op termijn een omvattend kwaliteitssysteem voor alle aspecten van het bergingsprogramma zal worden. Eén van de belangrijkste uitdagingen waarvoor dit programma staat, is het garanderen van de kwaliteit en de naspeurbaarheid van de gegevens, modellen, beslissingen en hypothesen tot minstens het einde van de periode van institutionele controle; dit noodzaakt een systematische centrale archivering. Momenteel heeft dit programma betrekking op bepaalde onderzoeks- en ontwikkelingsaspecten, zoals de veiligheidsevaluaties, het ontwerp, en de beheersfases die voorafgaan aan de berging, met name de afvalverwerking en -conditionering en de aanvaarding van het afval (zie hoofdstuk 3). Het programma definieert de na te leven normen, de middelen en procedures die moeten worden aangewend opdat aan de normen wordt voldaan, en de uit te voeren controles.

Het iteratieve proces van het ontwerpen van de bergingsinstallatie berust op een voortdurende wisselwerking tussen de theoretische en de experimentele aspecten van het onderzoek en de ontwikkeling. Dit proces voorziet aan het einde van elke scharnieretappe in kwaliteitsevaluaties, dat wil zeggen kritische, systematische en gedocumenteerde formele beoordelingen van de resultaten in het algemeen en van de resultaten van de veiligheidsevaluaties in het bijzonder. Die laatste spelen immers een centrale rol in het ontwerp, want ze helpen de onderzoeks- en ontwikkelingsprioriteiten te bepalen en het werkprogramma te oriënteren. De kwaliteit van de veiligheidsevaluaties berust hoofdzakelijk op de volgende twee elementen:

- de *kwaliteit van de informatie* betreffende de bergingssite, de architectuur en de kunstmatige barrières (met inbegrip van het afval); deze kwaliteit hangt direct af van het proces waarbinnen de onderzoeksdoelstellingen bepaald worden, van de gebruikte methodes om de gegevens te verzamelen en van de documentatie van de verzamelde gegevens;
- de *kwaliteit van de methodes en modellen* die worden gebruikt om de veiligheid op basis van die informatie te evalueren. Deze kwaliteit wordt over het algemeen bepaald door de geldigheid van de simulaties, die op haar beurt afhangt van de kwaliteit van de conceptuele modellen, de kwaliteit van de mathematische modellen (die de numerieke uitwerking vormen van de conceptuele modellen) en de kwaliteit of de nauwkeurigheid van de gebruikte parameterwaarden.

Het waarborgen van de kwaliteit van het onderzoek en ontwikkeling berust met name op de volgende middelen:

- het systematische gebruik van *data collection forms* als schakel tussen onderzoek en ontwikkeling enerzijds en de evaluaties van de langetermijn veiligheid anderzijds; deze

formulieren synthetiseren voor elke gebruikte parameter zijn definitie, de beste raming van zijn waarde en zijn statistische verdeling;

- het systeem van *kennisbeheer* en *naspeurbaarheid* dat geleidelijk zal worden ontwikkeld en dat het voortbestaan van de verworven wetenschappelijke en technische kennis zal moeten waarborgen door een uitvoerige en systematische inventaris mogelijk te maken van alle verzamelde resultaten, en dat ook de naspeurbaarheid van de hypothesen, keuzes en beslissingen zal moeten waarborgen;
- de geleidelijke *Beltest-accreditering* van onderzoeks- en ontwikkelingslaboratoria van het SCK-CEN, die met name waarborgt dat de werken die in die laboratoria worden uitgevoerd, in overeenstemming zijn met de criteria van de Europese norm NBN-EN-45001;
- de *internationale samenwerkingen*, die de mogelijkheid bieden om tot een gemeenschappelijk inzicht te komen in de ondervonden moeilijkheden, een consensus tot stand te brengen over de toe te passen principes en methodes en vergelijkingsoefeningen te maken, met name van codes en databanken;
- het gebruik van modellen en codes die op brede schaal worden gebruikt, getest en geverifieerd op internationaal niveau, waardoor het vertrouwen in de geldigheid van de verkregen resultaten versterkt wordt;
- *regelmatige kritische onderzoeken door externe specialisten*, die het mogelijk maken zich te vergewissen van de kwaliteit van de resultaten en interpretaties.

Voor de fases die na onderzoeks- en ontwikkelingsfase komen, zijn momenteel alleen de grote principes van het programma voor kwaliteitsbeheer en -borging vastgesteld, in overeenstemming met de internationale aanbevelingen terzake, zowel algemene (ISO-normen) als specifieke (aanbevelingen van het IAEA).

3 Kennis genereren en organiseren: de verworven wetenschappelijke en technische kennis

Het huidige methodologisch onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS omvat twee grote luiken: enerzijds, het onderzoeksluik dat tot doel heeft al de nodige wetenschappelijke en technische kennis te genereren en te organiseren om een bergingsoplossing te *ontwerpen* en te *realiseren* die het radioactieve afval in alle veiligheid van de biosfeer kan isoleren (het onderwerp van dit hoofdstuk); anderzijds, het luik dat erin bestaat de radiologische langetermijn veiligheid van de uitgewerkte oplossing indirect te *evalueren* (het onderwerp van hoofdstuk 4). Ter herinnering: het werkprogramma van NIRAS spitst zich toe op de studie van een referentiegastformatie en een referentiesite (de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel) en heeft tot dusver enkel op een verkennende wijze een alternatieve gastformatie bestudeerd (de Ieperiaan-kleien onder de nucleaire zone van Doel).

Hoofdstuk 3 vat de wetenschappelijke en technische kennis die verworven werd tijdens de tweede fase van het methodologisch onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS (1990–2000) samen in acht secties. Deze secties bieden een antwoord op acht van de vragen die het ontwerp van een diepebergingsinstallatie doet rijzen.

- *Welk afval is bestemd voor een diepe berging en om welke volumes gaat het? (sectie 3.1)*
- *Wat zijn de geologische en hydrogeologische kenmerken van de referentiegastformatie en hoe verlopen de waterstromingen doorheen en rondom deze formatie? (sectie 3.2 — De grondmechanische kenmerken van de Boomse Klei worden behandeld in sectie 3.6.)*
- *Hoe ziet de bestudeerde bergingsinstallatie eruit en hoe overweegt NIRAS deze installatie te bouwen, te exploiteren en vervolgens te sluiten? (sectie 3.3)*
- *Welk gedrag kan men verwachten van het geborgen afval en van de samenstellende materialen van de installatie in bergingsomstandigheden? (sectie 3.4)*
- *Door welke mechanismen kunnen de radionucliden die zich in het geborgen afval bevinden, migreren doorheen de klei? (sectie 3.5)*
- *Welke verstoringen kunnen de bouw van de installatie en het geborgen afval met zich meebrengen in de gastformatie en in welke mate moeten deze worden beperkt? (sectie 3.6 — Deze sectie omvat ook de nog verkennende studie van de migratie van de chemotoxiciteit van het geborgen afval.)*
- *Hoe moeten de transfers in de biosfeer van de radionucliden die uit het geborgen afval vrijkomen, worden behandeld? (sectie 3.7)*
- *Wat zijn de belangrijkste kenmerken van de alternatieve gastformatie? (sectie 3.8)*

		3.2
3.1	Het geconditioneerde afval	3.4
3.1.1	De classificatie van het geconditioneerde radioactieve afval	3.4
3.1.2	De inventaris van het voor diepe berging bestemde geconditioneerde afval	3.8
3.1.3	De algemene regels en de acceptatiecriteria	3.10
3.2	De gastformatie en de omgeving van het bergingssysteem	3.13
3.2.1	De selectie en het statuut van de in België bestudeerde gastformaties	3.13
3.2.2	De Boomse Klei als gastformatie	3.15
3.2.2.1	Stratigrafische en lithologische karakterisering	3.16
3.2.2.2	Tektonische en seismische karakterisering	3.24
3.2.2.3	Geïntegreerde interpretatie	3.26
3.2.3	De hydrogeologie van de Boomse Klei en haar omgeving	3.27
3.2.3.1	Definitie van de hydrogeologische eenheden	3.27
3.2.3.2	Piëzometrische evoluties	3.30
3.2.3.3	Hydrogeochemie van de watervoerende lagen	3.32
3.2.3.4	Hydrodynamische karakterisering	3.33
3.2.3.5	Perspectieven	3.34
3.2.4	De hydrogeologische modellering	3.35
3.2.4.1	Mathematische modellen, resolutiemethoden en rekencodes	3.37
3.2.4.2	Regionaal model	3.37
3.2.4.3	Subregionaal model	3.44
3.2.4.4	Lokaal model	3.47
3.2.4.5	Perspectieven en aanbevelingen	3.48
3.3	De bergingsinstallatie voor diepe berging	3.49
3.3.1	De referentiearchitectuur	3.49
3.3.2	De verschillende operationele etappes van een installatie van diepe berging	3.57
3.3.2.1	Bouw	3.58
3.3.2.2	Exploitatie	3.67
3.3.2.3	Sluiting	3.69
3.3.2.4	Institutionele contrôle	3.70
3.3.3	Het PRACLAY-demonstratieproject	3.71
3.3.4	Vooruitzichten	3.73
3.4	Het gedrag van het afval en de materialen in bergingsomstandigheden	3.75
3.4.1	Het gedrag van het geconditioneerde afval	3.75
3.4.1.1	Verglaasd afval	3.75
3.4.1.2	Bestraalde splijtstoffen	3.80
3.4.1.3	Hulzen en eindstukken	3.81
3.4.1.4	Gebitumineerd afval	3.82
3.4.1.5	Gecementeerd afval	3.84
3.4.1.6	Geselecteerde gegevens voor de modellering van het nabije veld	3.84

3.4.2	Het gedrag van de materialen in de bergingsinstallatie	3.84
3.4.2.1	Verpakkings- en mantelmaterialen	3.85
3.4.2.2	Opvul- en afdichtingsmaterialen	3.87
3.5	Het gedrag van de radionucliden in de Boomse Klei	3.89
3.5.1	De kenmerken van de Boomse Klei bepalend voor migratie	3.90
3.5.1.1	Overwicht van diffusie	3.91
3.5.1.2	Goechemische kenmerken	3.93
3.5.1.3	Interactie tussen de klei en de oplossing	3.94
3.5.1.4	Aanwezigheid van organische stof	3.94
3.5.2	Het gedrag van de radionucliden in de Boomse Klei	3.95
3.5.3	De migratieparameters	3.98
3.5.4	De rol van de organische stof	3.99
3.5.4.1	Ultrafiltratiecapaciteit van de Boomse Klei	3.99
3.5.4.2	Gedrag van americium	3.100
3.5.4.3	Gedrag van uranium, neptunium en plutonium	3.101
3.5.5	De variabiliteit van de migratieparameters over de kleidikte	3.101
3.5.6	De gegevens gebruikt voor de evaluaties van de langetermijn veiligheid	3.102
3.5.7	Vooruitzichten	3.104
3.6	De verstoringen teweeggebracht in de Boomse Klei en haar omgeving	3.106
3.6.1	De thermische verstoringen	3.106
3.6.1.1	Experimentele studies	3.106
3.6.1.2	Implicaties voor het ontwerp van de bergingsinstallaties	3.108
3.6.1.3	Thermische impact van het bergingssysteem	3.108
3.6.2	De verstoringen veroorzaakt door de uitgraving	3.111
3.6.2.1	Karakterisering en geomechanische modellering	3.111
3.6.2.2	Door de uitgraving verstoorde zone	3.113
3.6.3	De verstoringen teweeggebracht door de gassen	3.114
3.6.3.1	Generatie van gassen	3.114
3.6.3.2	Gastransport	3.115
3.6.3.3	Impact op de Boomse Klei	3.117
3.6.4	De verstoringen teweeggebracht door de straling	3.117
3.6.5	De geochemische verstoringen	3.118
3.6.5.1	Migratie van de chemotoxische stoffen	3.119
3.6.5.2	Migratie van de chemische fronten	3.120
3.7	De modellering van de biosfeer	3.122
3.8	De leperiaan-kleien als alternatieve gastformatie	3.125
3.8.1	Inleiding	3.125
3.8.2	Het geografische en geologische karakter	3.126
3.8.3	De kenmerken van de leperiaan-kleien in Doel	3.128
3.8.4	Vooruitzichten	3.129

3.1 Het geconditioneerde afval

Om in aanmerking te kunnen komen voor een langetermijn beheer, moet alle radioactief afval voldoen aan verschillende basisvereisten. Samenvattend kan gesteld worden dat het radioactieve afval moet voldoen aan volgende vereisten:

- chemisch inert en manipuleerbaar zijn, en dus in vaste vorm geconditioneerd zijn;
- vanuit radiologisch oogpunt voldoende goed gekend zijn, opdat de radiologische veiligheid van de bergingsinstallatie waarin het zal worden ondergebracht, geëvalueerd kan worden;
- vervuld zijn van verschillende kwaliteitscriteria die moeten waarborgen dat het radioactieve afval de goede werking van het bergingssysteem niet in gevaar zal brengen;
- het voorwerp zijn geweest van voldoende studies betreffende zijn degradatiewijze in bergingsomstandigheden.

Uiteraard heeft de verscheidenheid van de radiologische kenmerken van het afval de uitwerking van een passend classificatiesysteem noodzakelijk gemaakt.

3.1.1 De classificatie van het geconditioneerde radioactieve afval

Om het veilige korte- en langetermijn beheer van het radioactieve afval te vergemakkelijken, wordt het zeer heterogene radioactieve afval op grond van de onderlinge gelijkenissen gegroepeerd in verschillende gehelen. De internationaal gebruikte classificatiesystemen van het IAEA en van de Europese Unie maken geen onderscheid tussen geconditioneerd en niet-geconditioneerd radioactief afval. Zij tellen twee niveaus: het niveau van de groepen en dat van de categorieën, dat het afval indeelt naar activiteitsniveau en levensduur (tabel 3.1).

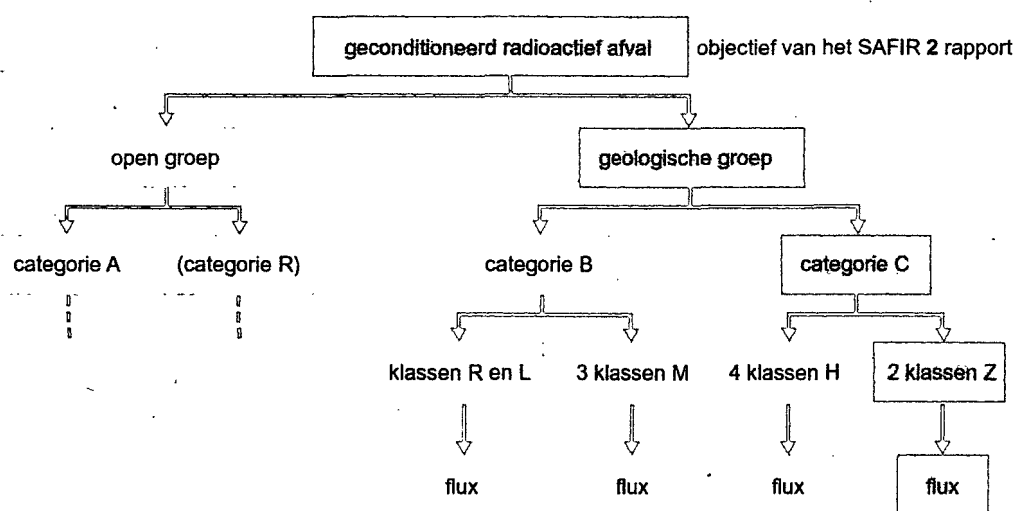
Tabel 3.1 De kenmerken van de drie categorieën radioactief afval volgens de internationale classificatie.

	Laagactief	Middelactief	Hoogactief
Kortlevend (30 jaar of minder)	A	A	C
Langlevend (meer dan 30 jaar)	B	B	C

De landen die geconfronteerd werden met het beheer van radioactief afval, hebben evenwel hun eigen classificatie ontwikkeld, die gedetailleerder is en aangepast is aan hun beheerswijze. In België heeft NIRAS aldus in 1997 voor geconditioneerd radioactief afval een piramidale classificatie in vier niveaus ingevoerd die verenigbaar is met de grote internationale classificaties en die in voorkomend geval geschikt is om te worden aangepast aan de evoluties die het beheer van dit afval zou kunnen meemaken. Deze classificatie baseert zich op de kenmerken van het afval op het ogenblik van zijn conditionering en vormt een belangrijke verworvenheid sinds de opstelling van het SAFIR-rapport. Bovendien levert dit een belangrijke bijdrage tot het technische, administratieve en financiële beheer van het geconditioneerde radioactieve afval (fig. 3.1).

De twee **groepen** geconditioneerd radioactief afval worden gedefinieerd op basis van de mogelijke bergingsoplossingen voor het afval in kwestie.

- De *geologische* groep, waaraan het SAFIR 2-rapport is gewijd, omvat het geconditioneerde radioactieve afval waarin radionucliden met dergelijke activiteitsconcentraties en levensduur aanwezig zijn, dat het absoluut noodzakelijk is dit afval permanent af te zonderen van de biosfeer. Een permanente afzondering is dus de enige aangewezen oplossing voor het langetermijn beheer van dit afval. Dit wordt momenteel uitvoerbaar geacht via berging in diepe en stabiele geologische lagen.
- De *open* groep, die buiten beschouwing blijft in het SAFIR 2-rapport, omvat het geconditioneerde radioactieve afval waarvan de radiologische kenmerken voldoende geringe waarden hebben opdat alternatieven voor geologische afzondering kunnen worden overwogen. Hun activiteitsniveau zal immers door natuurlijk verval een onbeduidende waarde bereiken binnen een tijdsbestek dat verenigbaar is met de controle mogelijkheden, wat concreet een periode van maximaal 200 tot 300 jaar inhoudt.



Figuur 3.1 De classificatie van geconditioneerd radioactief afval in België. Het SAFIR 2-rapport behandelt alle afval van de geologische groep, maar werkt meer specifiek de vraag uit van het langetermijn beheer van hoogactief verglaasd afval en van niet-opgewerkte bestraalde splijtstof, dit is het afval van respectievelijk de klassen ZAGALC en ZAGALS, die uit radiologisch en thermisch oogpunt de meest belastende klassen zijn.

De drie belangrijkste **categorieën** van geconditioneerd radioactief afval worden gedefinieerd door een radiologisch criterium en een criterium inzake thermisch vermogen. Categorie A behoort tot de open groep en categorieën B en C tot de geologische groep. Meer recent werd hieraan de categorie R toegevoegd, die geen equivalent heeft op internationaal niveau. Deze categorie wordt voorlopig ondergebracht bij de open groep.

- Het afval van *categorie A* is het afval waarin de radionucliden een voldoende geringe soortelijke activiteit en halveringstijd hebben om in oppervlakteberging te kunnen worden geplaatst, namelijk maximaal 400 tot 4 000 Bq.g⁻¹ alfa-activiteit volgens de algemene aanbevelingen van het IAEA en van de Europese Unie.
- Het afval van *categorie B* is het afval dat niet voldoet aan het criterium om tot categorie A te behoren, maar te weinig warmte genereert om tot categorie C te behoren.
- Het afval van *categorie C* bevat zeer grote hoeveelheden alfa- en bètastralers en genereert een thermisch vermogen hoger dan 20 W.m⁻³. Deze waarde geeft de grens aan tussen de categorieën B en C in het geval van een bergingsoplossing in klei. Het afval van categorie C moet bijgevolg afkoelen gedurende een zekere opslagperiode. Het residuele thermische vermogen bij aanvang van berging legt beperkingen op aan de bergingsarchitectuur: ofwel wordt het aantal colli per strekkende meter bergingsgalerij beperkt ofwel wordt meer ruimte gelaten tussen de galerijen.
- Het afval van *categorie R* ten slotte groepeerst het licht radiumbesmette afval dat is opgeslagen op de site van de voormalige raffinaderij van Union Minière in Olen waarvan het lot op het ogenblik niet vaststaat.

De twintig afvalklassen worden gedefinieerd op basis van het type van opslag, het type van berging, en soms ook op basis van hun herkomst en hun technische kenmerken. Het voor diepe berging bestemde radioactieve afval, dat voor het merendeel afkomstig is van activiteiten die verband houden met de splijtstofcyclus, is ingedeeld in 11 klassen (tabel 3.2).

- Het afval van *klasse Z* (categorie C, zeer hoogactief, zeer warmteafgevend) is afkomstig van de splijtstofcyclus. De ZAGALC-klasse bestaat uit hoogactief *verglaasd afval* dat resulteert uit de opwerking van de bestraalde commerciële splijtstofelementen door de Franse onderneming COGEMA (fissie- en activeringsproducten en lichtere actiniden, vloeibare effluenten). De ZAGALS-klasse zal verschijnen indien België de optie opwerking verlaat, en zal bestaan uit *bestraalde splijtstofelementen*. Aanvankelijk zal een grote hoeveelheid warmte geproduceerd worden, die hoofdzakelijk wordt veroorzaakt door het radioactieve verval van ⁹⁰Sr en ¹³⁷Cs in het geval van de ZAGALC-klasse, en door het radioactieve verval van ²⁴¹Pu en ²⁴¹Am in het geval van de ZAGALS-klasse. Voor een diepe berging in klei maakt deze warmteafgifte het noodzakelijk het afval eerst bovengronds te laten afkoelen, om het insluitingsvermogen van de klei niet aan te tasten. Het lineaire calorische vermogen van het afval van de ZAGALC-klasse bedraagt 378 W.m⁻¹ na de momenteel in aanmerking genomen opslagperiode van 50 jaar na ontlading uit de reactor. Deze opslagperiode zou eventueel tot 60 jaar kunnen verlengd worden.
- Het afval van *klasse H* (categorie C, hoogactief, matig warmteafgevend) is afkomstig van de opwerking van bestraalde splijtstof. De HAGALC2-klasse wordt enerzijds gevormd door de structuurmaterialen (*hulzen, eindstukken, veren enzovoort*) van de bestraalde splijtstofelementen die worden opgewerkt door COGEMA en anderzijds door het zogenoemd "technologisch" afval, wat hoofdzakelijk bestaat uit uitrustingsonderdelen en laboratoriuminstrumenten. Al dit afval wordt samengeperst. De drie HAGALP-klassen resulteren uit verglazing en, voor een gering deel ervan, cementering van opwerkingsafval dat tussen 1966 en 1974 is geproduceerd door Eurochemic. Deze verglazing en/of cementering werd door Belgoprocess in de PAMELA-installatie uitgevoerd.

Tabel 3.2 Inventaris van het radioactieve afval dat bestemd is voor diepe berging. De cijfers in de kolom "Aantal verwachte colli" beantwoorden aan het scenario van volledige opwerking en moeten voor het scenario van directe berging worden vervangen door de *cursieve* cijfers (ramingen van 1999). De opgegeven activiteits-, dosis- en vermogenswaarden zijn die op het ogenblik van de conditionering.

Categorie en activiteit	Klasse	Belangrijkste afvalfluxen	Matrix	Aantal ver- wachte colli	Ext. vol. / collo [m³]	Act ⁱ [Bq·collo ⁻¹]		Contactdosis [Sv·h ⁻¹]	Vermogen [W·collo ⁻¹]
						α	βγ		
C zeer hoogactief	ZAGALC	Opwerkingsafval	glas	3915 / 420	0.180	1.3·10 ¹⁴	9.1·10 ¹⁵	> 10 ⁴	602
	ZAGALS	Bestraalde splijtstof: UO ₂ (Doel 1 en 2)	UO ₂ *	1669	0.326	1.7·10 ¹⁴	1.5·10 ¹⁵	~10 ³	188
		UO ₂ (Tihange 1 en 2 / Doel 3)	UO ₂ *	4780	0.444				
		UO ₂ (Tihange 3 / Doel 4)	UO ₂ *	3266	0.517				
		MOX: UO ₂ / PuO ₂ (Tihange 2 / Doel 3)	UO ₂ /PuO ₂ *	144	0.444	9.9·10 ¹⁴	2.3·10 ¹⁵	~10 ³	905
C hoogactief	HAGALC2	Samengeperst structuurafval en technologisch afval	—	6410 / 820	0.180	7.9·10 ¹¹	1.7·10 ¹⁴	> 2	20
	HAGALP1	Vloeibaar opwerkingsafval van ex-Eurochemic	glas	1501**	0.070	8.2·10 ¹¹	1.3·10 ¹⁴	> 2	5
	HAGALP2	Vloeibaar opwerkingsafval van ex-Eurochemic	glas	700**	0.195	2.6·10 ¹¹	7.1·10 ¹³		2
	HAGALP3	Vast opwerkingsafval van ex-Eurochemic	cement	160**	0.195	6.0·10 ¹¹	3.6·10 ¹³		3
	Totale afval van categorie C				12686 / 13460	2132 / 4642 m³			
B middelactief	MAGALC	Opwerkingsafval (coprecipitatieslib)	bitumen	480**	0.238	1.8·10 ¹⁰	2.6·10 ¹²	0.750 à 2	0.1
	MAGALE	Vloeibaar en vast afval van ex-Eurochemic	bitumen	13406	0.245	2.0·10 ¹⁰	2.6·10 ¹²	0.005 à 2	0.1
	MAGAL	Secundair afval van PAMELA en van de ontmanteling ervan	cement	186	0.245	8.6·10 ⁹	2.2·10 ¹²	0.005 à 2	0.2
		Afval van het HRA/Solarium	cement	1200	0.500	pm	pm		n.v.
		Afval van het HRA/Solarium	cement	142	2.500	pm	pm		n.v.
		Ontmantelingsafval van de industriële reactoren	cement	2075	0.500	pm	1.1·10 ¹⁵		176
		Ontmantelingsafval van de reactoren van het SCK·CEN	cement	67	0.500	5.1·10 ⁵	2.6·10 ¹³		2
	B laagactief	LAGAL	Courant geproduceerd MOX-afval	cement	1459	0.500	4.6·10 ¹¹	1.0·10 ¹³	< 0.005
		Ontmantelingsafval van de MOX-installaties	cement	1901	2.7·10 ¹⁰		2.7·10 ¹¹	0.02	
		Ontmantelingsafval van ex-Eurochemic	cement	642	3.5·10 ¹¹		1.2·10 ⁹	0.3	
		Divers afval van het ex-departement Waste	cement	170	1.7·10 ¹¹		3.3·10 ¹²	0.2	
		RAGAL	Radiumbesmet afval	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	0.005 à 2
Totale afval van categorie B				21728	7556 m³				

*: het materiaal dat wordt gebruikt om de waterdichte verpakkingen op te vullen, is zand; **: productie beëindigd; n.v.: niet vermeld

- Het afval van *klasse M* (categorie B, middelactief, weinig warmteafgevend) is van meer uiteenlopende origine dan het afval van klassen Z en H. De MAGALC-klasse bestaat uit gebitumineerd slib afkomstig van de opwerking van bestraalde splijtstof door COGEMA. De MAGALE-klasse wordt gevormd door gebitumineerd divers afval, vooral vloeibaar opwerkingsafval van Eurochemic (Eurobitum-afval). De generieke klasse MAGAL ten slotte wordt gevormd door colli waarop het contactdosistempo hoger is dan $5 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. Zij groepeerd hoofdzakelijk afval afkomstig van het onderzoek dat het SCK-CEN vóór 1989 heeft verricht, en ontmantelingsafval, beide gecementeerd in de PAMELA-installatie.
- Het afval van de generieke klassen *L* en *R* (categorie B, laagactief, weinig warmteafgevend, langlevend) heeft een contactdosistempo dat lager is dan of gelijk is aan $5 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. De LAGAL-klasse groepeerd hoofdzakelijk gecementeerd afval dat afkomstig is van de gangbare productie van MOX-splijtstof, van de nucleaire passiva, en van ontmanteling. Het ontmantelingsafval dat tot de LAGAL-klasse behoort bevat grote hoeveelheden alfastralers. De RAGAL-klasse ten slotte groepeerd alle radiumbesmette afval dat indirect afkomstig is van de radiumproductieactiviteiten van de voormalige fabriek te Olen en van het actiniumprogramma dat op het SCK-CEN werd uitgevoerd. (Dit afval omvat dus niet het afval van categorie R.)

De (meer dan honderd) fluxen verdelen het afval in groepen colli met homogene fysische, chemische en radiologische kenmerken die resulteren uit een welbepaald conditioneringsprocédé van gelijkaardig ruw afval.

3.1.2 De inventaris van het voor diepe berging bestemde geconditioneerde afval

De belangrijkste realisaties inzake inventaris kunnen als volgt samengevat worden: enerzijds werden productievoorspellingen voor afval uitgewerkt; anderzijds werden een grote hoeveelheid gegevens over dit afval verkregen, die vervolgens gesystematiseerd en op coherente wijze gegroepeerd werden. Deze gegevens betreffen de aard en de specifieke activiteit van de verschillende radionucliden (tabellen 3.2 en 3.3).

In tegenstelling tot de inventaris in het SAFIR-rapport, die de opwerking van alle bestraalde splijtstof veronderstelde, houdt de uit 1999 daterende inventaris in het SAFIR 2-rapport rekening met twee afzonderlijke scenario's: een scenario van volledige opwerking van alle bestraalde splijtstof, en een scenario van directe berging van de niet-opgewerkte bestraalde splijtstof. Deze twee scenario's steunen op identieke hypothesen wat betreft de bestraalde of nog te bestralen splijtstof:

- de zeven Belgische commerciële kernreactoren met totaal vermogen van 5.7 GWe, zullen stilgelegd worden na een exploitatieperiode van 40 jaar;
- de initiële verrijking aan ^{235}U van de uraniumsplijtstof bedraagt 4.0 % en de initiële verrijking aan $^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ van de splijtstof van gemengde oxiden (MOX) bedraagt 4.93 %;
- de splijtstof wordt gedurende 1450 dagen bestraald en haar referentie-afbrand bedraagt $45 \text{ GWd}\cdot\text{tHM}^{-1}$, dit is $45\cdot 10^9$ wattdagen per ton zwaar metaal (uranium of MOX).

Deze hypothesen laten toe het totale verbruik aan conventionele uraniumsplijtstof en MOX-splijtstof te ramen op respectievelijk 4 860 tHM en 70 tHM. De totale inventarissen die beantwoorden aan de twee scenario's, zijn de volgende:

- *Scenario van volledige opwerking*: integrale opwerking van de 4 860 tU. Dit scenario resulteert in 3 920 containers hoogactief verglaasd afval (afval van de ZAGALC-klasse), 6 410 containers afval met structurelementen van bestraalde splijtstofelementen (afval van de HAGALC2-klasse) en ongeveer 70 tHM bestaande MOX.
- *Scenario van directe berging*: stopzetting van de opwerking na de opwerking van de 630 tU die beantwoorden aan de bestaande contracten. Dit scenario resulteert in 420 containers hoogactief verglaasd afval, 820 containers afval met structurelementen van bestraalde splijtstofelementen, ongeveer 4 230 niet opgewerkte tU en ongeveer 70 tHM bestaande MOX.

Op basis van de twee scenario's en van de informatie over de andere afvalfluxen geven de afvalproductievoorspellingen en sterke daling aan van het voor diepe berging bestemde afvalvolume. Terwijl dit volume in het SAFIR-rapport ongeveer 27 000 m³ bedroeg, bedraagt het nog slechts ongeveer 10 000 m³ voor het scenario volledige opwerking en ongeveer 12 500 m³ voor het scenario directe berging. In vergelijking met het SAFIR-rapport, houdt het SAFIR 2-rapport rekening met nieuwe afvaltypen en ziet er andere verdwijnen, wegens evolutie van de conditioneringsprocédés.

Hoewel de radiologische langetermijn veiligheidsevaluaties van het bergingssysteem wijzen op een adequaat veiligheidsniveau dat weinig gevoelig is voor de gebruikte inventarissen (zie sectie 4.3.2), moeten deze resultaten nog worden bevestigd door betere kennis van het te bergen afval. Bijgevolg zijn de volgende acties noodzakelijk:

- op basis van beschikbare informatie bij de producenten preciseren van de inventaris aan kritische radionucliden in de verschillende afvalklassen, van de fysische eigenschappen van dit afval (in het bijzonder de warmteontwikkeling) alsook van de chemische kenmerken (met name de aanwezigheid van zware metalen en andere chemotoxische elementen);
- in het kader van een transparant systeem voor kwaliteitsbeheer en -borging de documentatie van de kennis betreffende de afvalinventaris verbeteren, opdat de gebruikte hypothesen en rekencodes of de uitgevoerde metingen gemakkelijker terug te vinden zijn (zie sectie 2.4);
- de afvalproductiescenario's verfijnen op basis van een gedetailleerdere beschrijving van de splijtstofcyclus en van de verschillende mogelijke evoluties hierin;
- de mogelijkheden bestuderen om de fundamentele kenmerken van het afval te verifiëren vóór zijn berging.

Tabel 3.3 Inventaris van de radionucliden, in becquerel per collo, waarmee rekening wordt gehouden in de evaluaties van de langetermijn veiligheid voor het afval dat op radiologisch en thermisch vlak de zwaarste eisen met zich meebrengt (zie ook sectie 4.3.2.1). (Voor de veiligheidsevaluaties werd de ^{36}Cl -inventaris geraamd op basis van buitenlandse gegevens. Bovendien is ^{59}Ni , ondanks zijn halveringstijd die a priori gebiedt dit radionuclide in aanmerking te nemen in de veiligheidsevaluaties, wegens zijn zeer geringe intrinsieke radiotoxiciteit toch een niet-kritisch radionuclide. Ook ^{94}Nb en ^{147}Sm hebben een lange halveringstijd, maar blijken een te verwaarlozen radiologische impact te hebben. Deze radionucliden worden niet beschouwd in onderstaande tabel.)

	^{14}C	^{79}Se	^{93}Zr	^{99}Tc	^{107}Pd	^{126}Sn	^{129}I	^{135}Cs
Verglaasd afval	–	$1.7 \cdot 10^{10}$	$9.1 \cdot 10^{10}$	$7.1 \cdot 10^{11}$	$5.2 \cdot 10^9$	$2.9 \cdot 10^{10}$	$1.5 \cdot 10^8$	$2.3 \cdot 10^{10}$
uox-splijtstof	$8.9 \cdot 10^9$	$9.4 \cdot 10^9$	$4.5 \cdot 10^{10}$	$2.9 \cdot 10^{11}$	$2.9 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^{10}$	$7.4 \cdot 10^8$	$1.0 \cdot 10^{10}$
MOX-splijtstof	$4.3 \cdot 10^9$	$8.0 \cdot 10^9$	$3.3 \cdot 10^{10}$	$2.8 \cdot 10^{11}$	$5.9 \cdot 10^9$	$2.5 \cdot 10^{10}$	$9.2 \cdot 10^8$	$9.4 \cdot 10^9$
Hulzen en eindstukken	$5.0 \cdot 10^7$	$3.9 \cdot 10^7$	$5.6 \cdot 10^9$	$4.0 \cdot 10^9$	–	–	$5.6 \cdot 10^7$	$2.0 \cdot 10^8$
	^{226}Ra	^{229}Th	^{230}Th	^{231}Pa	^{232}Th	^{233}U	^{234}U	^{235}U
Verglaasd afval	–	$1.8 \cdot 10^3$	$3.8 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^5$	$3.1 \cdot 10^0$	$8.6 \cdot 10^1$	$6.3 \cdot 10^5$	$3.9 \cdot 10^5$
uox-splijtstof	$4.9 \cdot 10^5$	$3.1 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^6$	$8.4 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^1$	$1.9 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^{10}$	$2.6 \cdot 10^8$
MOX-splijtstof	$1.0 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^7$	$2.2 \cdot 10^5$	$9.3 \cdot 10^5$	$4.4 \cdot 10^{10}$	$4.4 \cdot 10^{10}$	$4.1 \cdot 10^7$
Hulzen en eindstukken	–	–	–	–	–	–	–	–
	^{236}U	^{237}Np	^{238}U	^{242}Pu	^{244}Pu	^{248}Cm		
Verglaasd afval	$4.7 \cdot 10^8$	$1.5 \cdot 10^{10}$	$5.5 \cdot 10^6$	$8.0 \cdot 10^7$	$4.3 \cdot 10^0$	$3.7 \cdot 10^4$		
uox-splijtstof	$5.6 \cdot 10^9$	$9.1 \cdot 10^9$	$5.4 \cdot 10^9$	$5.1 \cdot 10^{10}$	$1.2 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^4$		
MOX-splijtstof	$3.9 \cdot 10^8$	$7.3 \cdot 10^9$	$5.2 \cdot 10^9$	$2.4 \cdot 10^{11}$	$7.8 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^5$		
Hulzen en eindstukken	–	$5.0 \cdot 10^6$	–	$5.3 \cdot 10^{10}$	–	–		

3.1.3 De algemene regels en de acceptatiecriteria

Om een veilig korte- en langetermijn beheer van het haar toevertrouwde radioactieve afval te kunnen verzekeren, moet NIRAS er voldoende zeker van zijn dat de intrinsieke kenmerken van dit afval de veiligheid van één of meer etappes van het beheer van dit afval niet in gevaar dreigen te brengen. Bijgevolg moet NIRAS dus de verzekering krijgen dat deze intrinsieke kenmerken in overeenstemming zijn met verschillende criteria die zij vooraf heeft opgesteld. Conform de bepalingen van het koninklijk besluit van 30 maart 1981, zoals gewijzigd door de bepalingen van het koninklijk besluit van 16 oktober 1991, heeft NIRAS dus de algemene regels opgesteld die als referentiekader moeten dienen voor het uitwerken van de criteria die moeten worden vervuld door de colli met radioactief afval waarvan zij accepteert de zorg op zich te nemen, alvorens de eigenlijke acceptatiecriteria op te stellen. De algemene regels en de acceptatiecriteria kunnen, op initiatief van NIRAS of van de bevoegde overheid, worden gewijzigd in functie van de evolutie van de bergingsarchitecturen, van de wetgeving en de nationale en internationale aanbevelingen, alsook van de verwerkings- en conditioneringstechnieken. Deze twee realisaties vormen één van de opmerkelijkste stappen voorwaarts op het vlak van het kwaliteitsbeheer en kwaliteitsborging van het radioactieve afval

(zie ook sectie 2.4). Uiteraard moet elk collo met radioactief afval dat door NIRAS wordt geaccepteerd, ook voldoen aan de voorschriften van de toepasselijke wetgeving en regelgeving, met inbegrip van de bepalingen in de exploitatievergunningen van de betrokken nucleaire installaties. Bovendien moet het transport ervan voldoen aan de internationale transportvoorschriften.

De *algemene regels*, die zijn goedgekeurd door de bevoegde overheid en van kracht zijn geworden op 10 februari 1999, gaan alle aspecten na (vooral mechanische, fysische, chemische, radiologische en biologische aspecten) die het voorwerp moeten uitmaken van acceptatiecriteria. Vervolgens preciseren zij verschillende administratieve vereisten, zoals de verplichting om alle colli afzonderlijk te documenteren en éénduidig te identificeren, de procedure voor acceptatie van de colli, de verplichtingen opgelegd aan de nucleaire exploitanten die afval conditioneren om de overeenstemming van hun colli met de acceptatiecriteria te bewijzen, de alternatieven die kunnen worden overwogen in geval van niet-conformiteit van de colli, de technische en administratieve uitvoeringsbepalingen voor een opvolging van hun kenmerken in de tijd, en de herziening van de acceptatiecriteria.

De *acceptatiecriteria*, die momenteel het grootste deel van de producties van geconditioneerd radioactief afval bestrijken, worden afzonderlijk opgesteld voor elke afvalklasse en worden alle gedocumenteerd en systematisch gerechtvaardigd. Naast bepaalde administratieve specificaties, specificeren ze de — hoofdzakelijk technische — minimale kwaliteitseisen waaraan de colli moeten voldoen om door NIRAS te kunnen worden geaccepteerd. Elk primair collo moet voldoen aan verschillende vereisten in verband met zijn mechanische weerstand, het maximale percentage onge vulde ruimte dat het kan bevatten, zijn stralingsweerstand, zijn oppervlaktebesmettingsniveau en zijn inhoud aan gevaarlijke stoffen, in het bijzonder zijn radiologische kenmerken en zijn inhoud aan kritische radionucliden. In het collo mogen geen chemische reacties plaatsvinden die de veiligheid van het beheer in het gedrang zouden kunnen brengen. Het geconditioneerde afval zelf moet bovendien een compact, chemisch stabiel, niet verspreidbaar en weinig voor barsten vatbaar vast geheel zonder vrije vloeistoffen vormen, en moet voldoen aan uiteenlopende criteria naargelang het type van immobilisatiematrix. Het collo mag geen bederfelijke materialen bevatten. Bovendien mogen geen complexerende bestanddelen aanwezig zijn in dusdanige hoeveelheden dat het gedrag van de radionucliden in de buurt van het bergingssysteem in belangrijke mate ongunstig zou beïnvloed worden. Er mag geen risico bestaan dat de gasontwikkeling binnenin het collo de verpakking van het collo zou kunnen beschadigen of al te zeer vervormen. Ten slotte moet de verpakking voldoen aan vereisten qua geometrie, mechanische weerstand, corrosievastheid en behoud van haar integriteit.

De naleving van de acceptatiecriteria wordt het sterkst beïnvloed door de verwerkings- en conditioneringsetappe, omdat hierbij de fysische kwaliteit van het afval grotendeels bepaald wordt. De verwerkings- en conditioneringsinstallaties alsook de procédés die er toegepast worden, moeten dus erkend worden door NIRAS. Deze *erkenning* gebeurt in vier stappen. De exploitant die het afval verwerkt en conditioneert (de producent of een onderaannemer van NIRAS), legt NIRAS een technisch erkenningsdossier voor dat de werking van de installatie beschrijft en alle maatregelen formaliseert en rechtvaardigt die genomen zijn om te

garanderen dat zijn colli met geconditioneerd afval voldoen aan de toepasbare acceptatiecriteria. Door er periodiek technische audits uit te voeren, verifieert NIRAS dan, eventueel bijgestaan door een erkende instelling, of de betrokken installatie wel degelijk aan de voorwaarden van het erkenningsdossier voldoet. Vervolgens verifieert NIRAS, bijgestaan door een erkende instelling, de procédés en de installaties die de exploitant gebruikt voor het karakteriseren van de radiologische samenstelling van het afval dat is geconditioneerd in de te erkennen installatie. Zij verifieert ten slotte de documentatie die aantoont dat het toegepaste procédé in overeenstemming is met de gegevens van het erkenningsdossier van de betrokken installatie. Als alle verificaties afdoend zijn, besluit NIRAS tot erkenning van enerzijds het procédé en installatie voor verwerking en conditionering, alsook van de karakteriseringsmethode en -installatie. Deze erkenning geldt voor een vastgelegde periode.

De *procedure voor acceptatie* van de colli met geconditioneerd radioactief afval is het administratieve proces waarbij NIRAS zich er via zowel administratieve als technische controles van vergewist dat het begeleidend conformiteitsdossier bij het afval waarvan de exploitant haar vraagt de zorg op haar te nemen, correct is opgesteld en het afval conform het dossier en dus conform de toepasbare acceptatiecriteria is. Aangezien deze procedure zowel technische, veiligheids- als financiële implicaties heeft, moet elke fase ervan gedocumenteerd worden volgens vooraf uitgewerkte regels. In de praktijk is het — vereenvoudigend gesteld — zo dat NIRAS, telkens zij een verzoek tot ophaling van geconditioneerd afval ontvangt, begint met het controleren van het productiedossier waarvan het afval vergezeld gaat. Dit dossier bevat namelijk de resultaten van berekeningen voor de radiologische en fysisch-chemische karakterisering die de exploitant heeft uitgevoerd om te verifiëren of het afval in overeenstemming is met de acceptatiecriteria van kracht op het ogenblik van de productie van het afval. Vervolgens worden punctuele fysische controles uitgevoerd op de betrokken colli, om te verifiëren of ze daadwerkelijk in overeenstemming zijn met de aanwijzingen uit het dossier. Er wordt dan een proces-verbaal van receptie voor ophaling opgesteld, waarin de resultaten van deze controles en het eventuele voorbehoud vermeld staan. NIRAS plant vervolgens het transport van de colli en stelt het proces-verbaal van acceptatie op, dat akte neemt van de conformiteit van het afval met de criteria of melding maakt van de voorwaarden waaronder het afval is aanvaard, alsook het proces-verbaal van overdracht. De colli worden dan overgebracht naar de door NIRAS aangewezen opslaginstallatie, waar NIRAS het afval fysisch controleert om vervolgens het proces-verbaal van receptie voor opslag op te stellen. Overeenkomstig de wettelijke bepalingen die voorschrijven dat degene die het afval heeft geconditioneerd, gedurende 50 jaar aansprakelijk blijft voor de verborgen gebreken die in het afval aan het licht zouden kunnen komen, ontwikkelt NIRAS momenteel een plan om periodiek het behoud van conformiteit van de colli met de acceptatiecriteria te controleren tijdens hun opslag en op deze manier dus hun verenigbaarheid met de referentiebergingsna te gaan. Als een collo niet meer verenigbaar is met zijn eindbestemming, moet het worden onderworpen aan corrigerende maatregelen, bijvoorbeeld herconditionering in het meest extreme geval.

3.2 De gastformatie en de omgeving van het bergingssysteem

Aangezien de overheersende rol van de natuurlijke barrière in de prestaties van een diepebergingssysteem in de Boomse Klei steeds weer is beklemtoond door de evaluaties van de radiologische langetermijn veiligheid (zie hoofdstuk 4), heeft NIRAS in de loop van de periode 1990–2000 haar werkzaamheden inzake karakterisering van en inzicht in de Boomse Klei onder en in de onmiddellijke omgeving van de nucleaire zone van Mol–Dessel geïntensifieerd. Overeenkomstig de aanbevelingen van de Evaluatiecommissie-SAFIR (1990) heeft haar methodologisch onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma zich toegespitst op:

- het karakteriseren van de lithologische heterogeniteiten van de Boomse Klei;
- het in het licht stellen van de structurele discontinuïteiten (breuken enzovoort) in deze klei;
- het verbeteren van het inzicht in en de modellering van de regionale en lokale hydrogeologie en dit voor zowel de boven als de onder de Boomse Klei gelegen watervoerende lagen.

Deze punten worden vervolledigd met studies betreffende het vaststellen van de achtergrondstraling van de klei en van het gedrag van de radionucliden die er van nature in aanwezig zijn.

(Het geomechanische gedrag van de Boomse Klei wordt behandeld in sectie 3.6 over de verstoringen. Gezien bovendien het preliminaire karakter van de verkenningen betreffende de leperiaan-kleien en de sterk verschillende vorderingsstaat van de ontwikkeling van een diepebergingsinstallatie voor de referentieoptie en de alternatieve optie, wordt de gezamenlijke informatie betreffende de leperiaan-kleien, volledig apart behandeld van die betreffende de Boomse Klei, in sectie 3.8.)

3.2.1 De selectie en het statuut van de in België bestudeerde gastformaties

In het algemeen merken we een zeer duidelijke evolutie in de benaderingen die op internationaal niveau worden voorgesteld voor de selectie van geologische formaties of sites die geschikt zijn voor diepe berging. Men is immers overgeschakeld van de toepassing van uitsluitingscriteria in verband met de gastformatie, naar een algemene benadering van evaluatie en optimalisering van de prestaties en de veiligheid van het bergingssysteem in zijn geheel. Deze geïntegreerde en systematische benadering van de selectie van de gastformaties en van de ontwikkeling en de evaluatie van het bergingssysteem zet echter geenszins het fundamentele belang van de geologische barrière voor het waarborgen van de radiologische langetermijn veiligheid op losse schroeven.

In België werden de studies betreffende de diepe berging van het afval van categorieën B en C in het midden van de jaren zeventig aangevangen door het SCK·CEN, met behulp van de Geologische Dienst van België. De voortzetting van het onderzoek over de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol–Dessel (fig. 3.2) werd aangemoedigd door de Evaluatiecommissie voor kernenergie, die in haar eindrapport van maart 1976 opmerkt dat de diepe kleilagen voor

België de beste oplossing lijken voor de diepe berging van dit afval. Datzelfde jaar begon de Europese Commissie op bibliografische basis een Europese inventaris op te maken van de geologische formaties die mogelijk gunstige kenmerken vertonen voor de diepe berging van het afval van categorieën B en C. Om praktische redenen die met name verband houden met de schaal van de studie, is deze selectie alleen gebeurd door toepassing van uitsluitingscriteria die verband houden met de lithologie (klei, zout of graniet), de diepte en de dikte. In België konden in het kader van deze studie alleen kleiformaties in aanmerking worden genomen. Zij worden onderverdeeld in twee grote groepen:

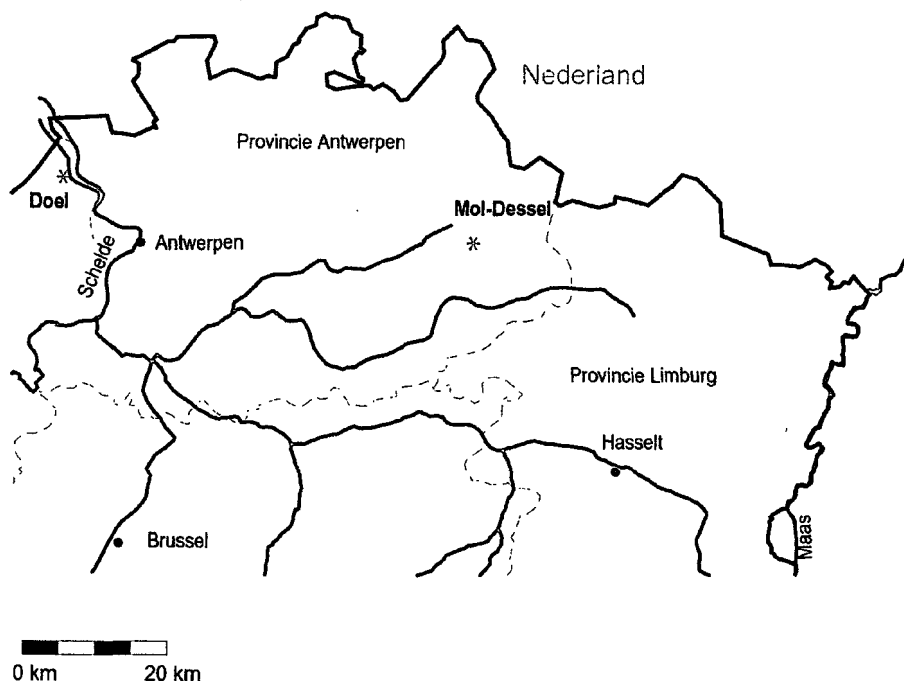
- de formaties bestaande uit harde gesteenten (kleisteen) die behoren tot het Paleozoïcum (bijvoorbeeld de Cambro-Silurische massieven van Brabant en de Ardennen);
- de formaties bestaande uit plastische, weinig verharde gesteenten die behoren tot het Cenozoïcum (leperiaan-kleien en Boomse Klei).

Wat de harde gesteenten betreft, was er toen weinig relevante informatie beschikbaar over hun kenmerken in de diepte, informatie noodzakelijk voor diepe berging. De zeer bemoedigende preliminaire resultaten betreffende de lithologie en het insluitingsvermogen van de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel brachten het SCK-CEN en vervolgens NIRAS er dus toe hun onderzoeksinspanningen over deze formatie en over die zone uit te breiden. Deze keuze werd gesterkt door een reeks praktische overwegingen, zoals het voordeel van de aanwezigheid van een goed ontwikkelde multidisciplinaire wetenschappelijke infrastructuur boven de beschouwde formatie en de toegangsgaranties geboden door de benaming "nucleaire zone" op de gewestplannen van ruimtelijke ordening.

Een vijftiental jaar later concludeerde de Evaluatiecommissie-SAFIR (1990) dat de keuze om de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel te bestuderen gegrond was, maar dat het nuttig zou zijn andere locaties te onderzoeken, zoals de nucleaire zone van Doel (fig. 3.2), waaronder zich de leperiaan-kleien bevinden. NIRAS voegde zich naar deze conclusies en ondernam in het begin van de jaren negentig een onderzoeksprogramma over deze klei in Doel.

NIRAS evalueert momenteel het *veiligheids- en haalbaarheidspotentieel* van twee gastformaties op basis van studies die worden uitgevoerd op twee sites voor methodologisch onderzoek. De keuze van deze gastformaties, die alle twee bestaan uit weinig verharde klei, steunt op technische motieven, terwijl de keuze van de twee onderzoeksites het resultaat is van historische, institutionele en praktische overwegingen. Om preciezer te zijn, beschouwt NIRAS:

- de Boomse Klei als de *referentiegastformatie* voor het onderzoek en de evaluatie van een diepebergingsoplossing voor het afval van categorieën B en C in België, waarbij de doelstelling is aan te tonen dat er een veilige oplossing bestaat voor het langetermijn beheer van dit afval en dat die oplossing tot stand kan worden gebracht, zonder vooruit te lopen op de plaats waar deze totstandbrenging in voorkomend geval zal gebeuren;
- de nucleaire zone van Mol-Dessel als *referentiesite* voor het methodologisch onderzoek betreffende de Boomse Klei;



Figuur 3.2 Lokalisatie van de nucleaire zones van Mol-Dessel en van Doel, die respectievelijk de referentiesite en de alternatieve site zijn voor methodologisch onderzoek inzake diepe berging van afval van categorieën B en C.

- de leperiaan-kleien als een *alternatieve gastformatie* voor het onderzoek en de evaluatie van een diepebergingsoplossing in België;
- de nucleaire zone van Doel als een *alternatieve site* voor het methodologisch onderzoek betreffende de leperiaan-kleien.

Uit technisch oogpunt maakt de aanwijzing van een alternatief het mogelijk enerzijds te beschikken over een reserveoplossing ingeval zou worden aangetoond dat het referentiebergingssysteem niet in staat is zijn veiligheidsfuncties te vervullen of niet kan worden gerealiseerd, en anderzijds het inzicht in de twee bestudeerde systemen te verbeteren, met name door de analyse van de overdraagbaarheid van de kennis van de ene formatie of site naar de andere.

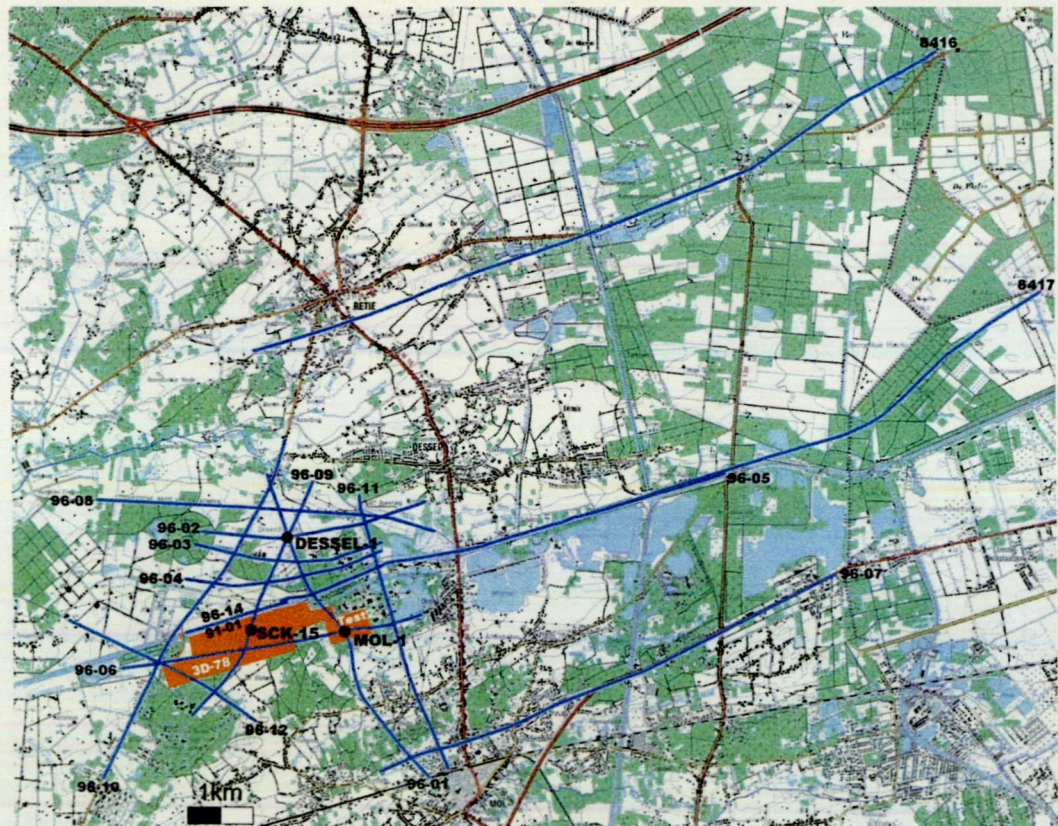
3.2.2 De Boomse Klei als gastformatie

Aangezien de overheersende rol van de natuurlijke barrière steeds weer werd beklemtoond door de evaluaties van de radiologische langetermijn veiligheid, heeft NIRAS in de loop van de periode 1990–2000 haar werkzaamheden inzake karakterisering van en inzicht in de Boomse Klei onder en in de onmiddellijke omgeving van de nucleaire zone van Mol-Dessel.

De lithologische en structurele heterogeniteiten van de Boomse Klei en haar bovenliggende en onderliggende formaties werden hoofdzakelijk bestudeerd met geofysische methoden die

werden toegepast óf in boringen (boorgatmetingen), óf met bovengrondse technieken (seismische reflectie), waaraan zich laboratoriumtests op boorkernen voegen (fig. 3.3).

De Boomse Klei ten slotte vormt eveneens het voorwerp van intens fundamenteel en toegepast onderzoek buiten het kader van het diepebergingsprogramma, ongeacht of dit gebeurt in het ontsluitingsgebied (kleigroeven van de streek van de Rupel en het Waasland) of tijdens het graven van tunnels (premetro van Antwerpen, Rupeltunnel).

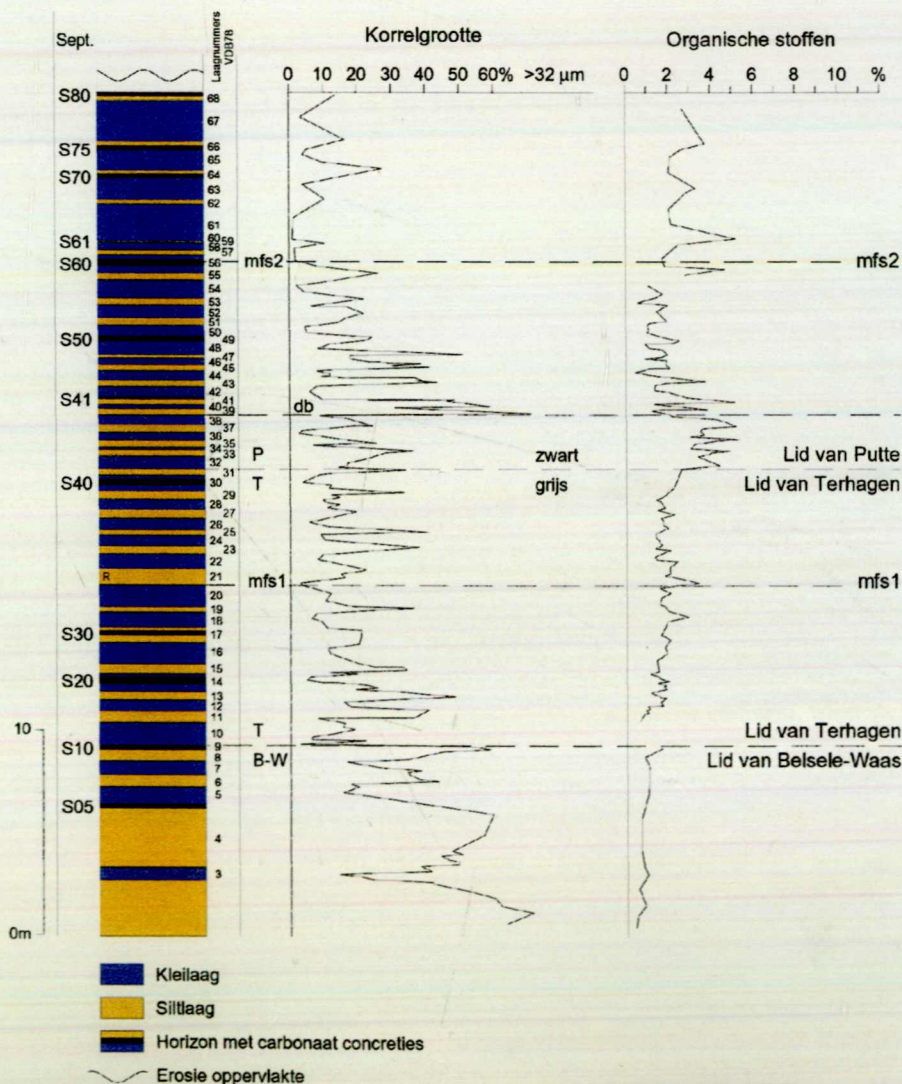


Figuur 3.3 Locatie van de belangrijkste boringen en geofysische verkenningscampagnes op en rond de nucleaire zone van Mol-Dessel.

3.2.2.1 Stratigrafische en lithologische karakterisering

De streek waar de Boomse Klei aanwezig is, beantwoordt bij benadering aan de Kempen, dit is het noordoosten van België. De Boomse Klei, of Formatie van Boom, behoort tot het Rupeliaan, de geologische periode van het Tertiair tussen 36 en 30 miljoen jaar geleden. De Boomse Klei is van beneden naar boven onderverdeeld in drie leden: Belsele-Waas, Terhagen en Putte.

De Boomse Klei is een siltige klei of een kleihoudend silt met een aanzienlijk pyriet- en glauconietgehalte in haar meest siltige lagen. Een van haar opmerkelijkste kenmerken is precies deze structuur in banden van enkele tientallen centimeter dik, die vooral de uiting is van cyclische schommelingen in granulometrie (silt- en kleigehalte) als gevolg van de fluctuaties van de werking van de golven op het sedimentatiemidden, maar ook van schommelingen van het gehalte aan carbonaten en aan organische stof (figuren 3.4 en 3.5). Zeer donkere stroken, die rijk zijn aan organische stof, kenmerken het Lid van Putte, terwijl over de hele dikte van de formatie mergelachtige, grijswitte stroken verschijnen. In die laatste worden typische kalkconcreties aangetroffen, septaria's genoemd (fig. 3.6). De basis (Lid van Belsele-Waas) en de top (bovenste deel van het Lid van Putte) van de Boomse Klei zijn duidelijk siltiger. Er is in feite een granulometrische overgang vast te stellen tussen de "zuivere" klei (onderste deel van het Lid van Putte en Lid van Terhagen) en de bovenliggende zandige lagen.



Figuur 3.4 Lithostratigrafisch profiel van de Boomse Klei en lithologische variaties.

De klastische sedimenten (dat wil zeggen deze welke zijn afgezet door bezinking van vaste deeltjes in water, ijs of in de lucht) worden ingedeeld naar gelang de grootte van de korrels waaruit ze zijn samengesteld. Deze grootte is indicatief voor de energie die nodig is voor het transport van de deeltjes, en dus voor het midden waarin het sediment werd afgezet. Zo kunnen zeer fijne deeltjes slechts bezinken in zeer rustig water.

De granulometrische schaal is ingedeeld in verschillende fracties:

klei

Ø deeltjes < 0.002 mm.

silt 0.002 mm < Ø deeltjes < 0.062 mm.

zand 0.062 mm < Ø deeltjes < 2 mm.

grint

Ø deeltjes > 2 mm.

De sedimenten bestaande uit klei, silt of heel fijn zand hebben een geringe hydraulische geleidbaarheid ($< 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$) en een hoge porositeit (vaak meer dan 40 %). Zand en grint vormen goede watervoerende lagen.

Septaria

Broodvormige kalkconcretie die tot 30 cm hoog kan zijn en tot een meter diameter kan hebben, en die gekenmerkt wordt door ontwateringsbarsten of septae. Deze barsten zijn vaak bedekt met een film van calciet- of pyrietkristallen. De septaria's hebben zich gevormd in de met kalk aangerijkte lagen onder invloed van diagenetische processen : door precipitatie rond organismen in ontbinding (basische micro-omgeving) van carbonaat in oplossing ontstonden de nodullen. De septariabanken maken het onder andere mogelijk de verschillende kleigroeven alsook de diepe boringen stratigrafisch te verbinden.

Figuur 3.5 Algemeen beeld van een kleigroeve waar de karakteristieke strooksgewijze structuur van de Boomse Klei te zien is.



Figuur 3.6 Beeld van een septaria.



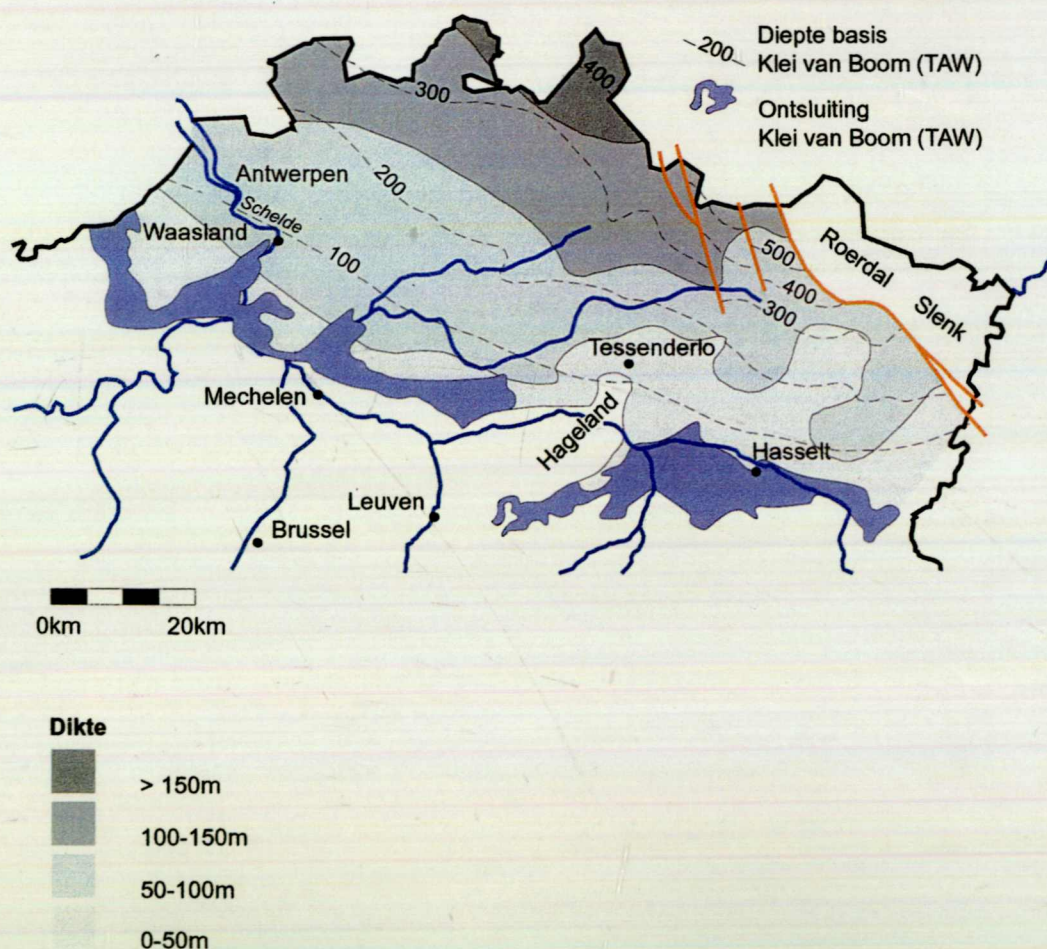
De Boomse Klei dagzoomt ten noorden van de Durme, de Rupel en de Dijle, alsook ten noorden van de lijn Leuven-Tongeren. Dit dagzoomgebied vormt een gordel van 5 tot 15 km breed, die in het Hageland wordt onderbroken door een diepe erosiegeul, die is opgevuld door de Zanden van Diest. Niettemin is niet de volledige stratigrafische sequentie van de formatie terug te vinden in het dagzoomgebied; de lagen van de top werden geërodeerd gedurende een continentale fase (sedimentatieonderbreking) van ongeveer 9 miljoen jaar na hun afzetting. Op basis van geometrische reconstructie kan worden geraamd dat enkele tientallen meter klei werden geërodeerd in het grootste deel van de Antwerpse Kempen. In het dagzoomgebied varieert de dikte van de Boomse Klei tussen 30 en 50 m. Zij haalt 75 m ten noorden van Antwerpen en komt in de buurt van de 100 m in de Noordelijke Kempen (fig. 3.7). De dikte van het strikt kleihoudende deel van de formatie vermindert evenwel in oostelijke richting.

De Formatie van Boom vertoont een helling van 1 tot 2% naar het noordoosten en wordt dikker in deze richting. Haar basis, die zich op meer dan 400 m diepte bevindt (fig. 3.7) in het noorden van de Provincie Antwerpen, dicht bij de Nederlandse grens, bevindt zich op

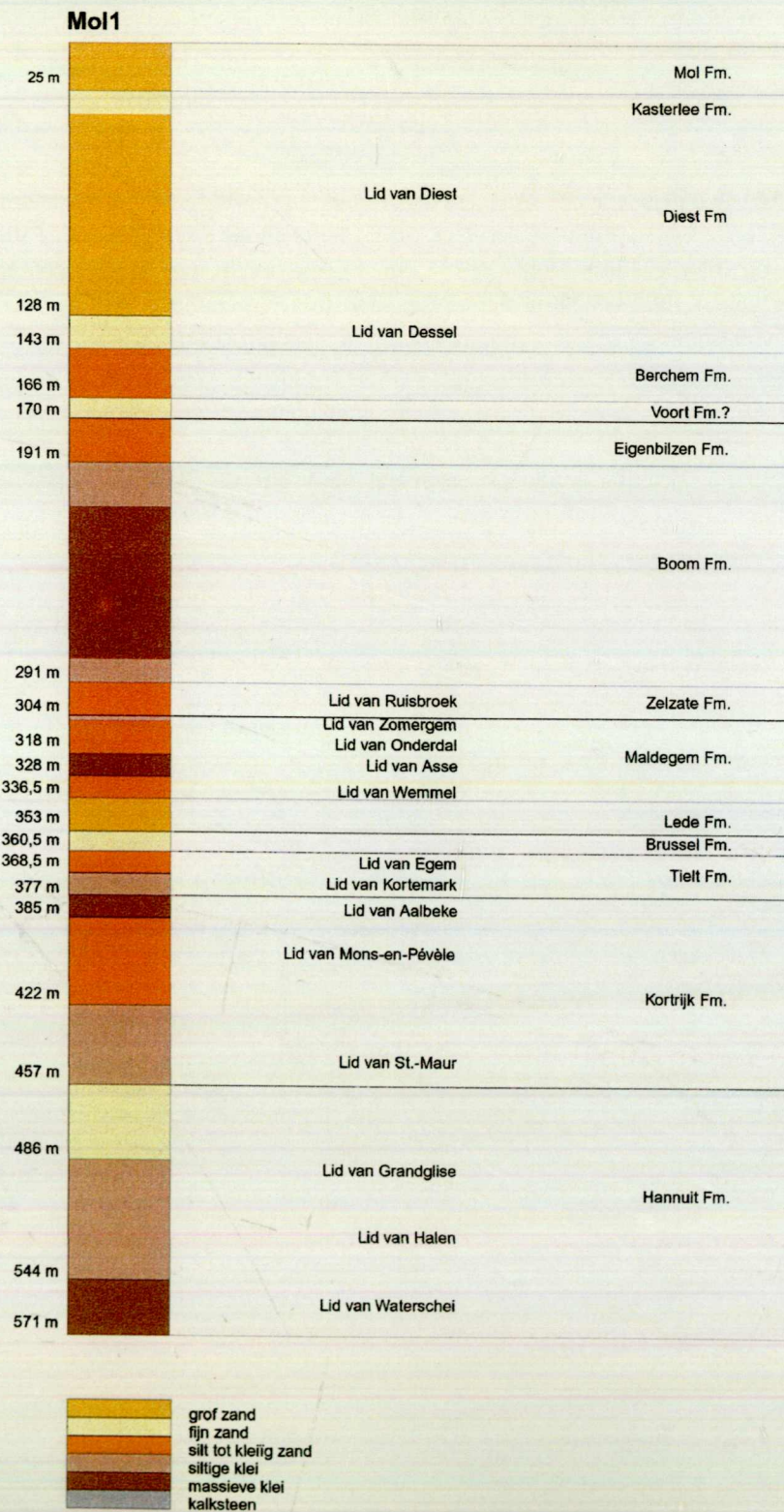
sommige plaatsen in de Roerdalslenk, als gevolg van breukwerking, zelfs op meer dan 1000 m diepte. Waarschijnlijk komt de maximale begravingdiepte van de Boomse Klei in de regio van Mol-Dessel overeen met de huidige diepte ervan, dit is tussen ongeveer 190 en 290 m diepte.

In de loop van de jaren negentig werden twee boringen uitgevoerd die bijna het volledige Tertiair verkend hebben. De eerste boring (Dessel-1, 1993) bereikte een diepte van 613 m, terwijl de tweede boring (Mol-1, 1996) stopte op 572 m. Bij die laatste werden eveneens boorkernen genomen tussen 150 en 332 m diepte, om monsters te verkrijgen van de hele dikte van de Formatie van Boom en van de aangrenzende formaties (fig. 3.8).

Er werd gebruikgemaakt van een reeks geofysische boorgatmetingen met een hoge verticale resolutie (enkele centimeter tot enkele decimeter) en/of die heel recent ontworpen waren (microresistiviteitsmetingen, nucleaire magnetische resonantie) om de fijne lithologische variaties binnen de Boomse Klei in het licht te stellen. Een preliminaire interpretatie van de



Figuur 3.7 Diepte van de basis en dikte van de Formatie van Boom.



Figuur 3.8 Geologische doorsnede in de boring Mol-1.

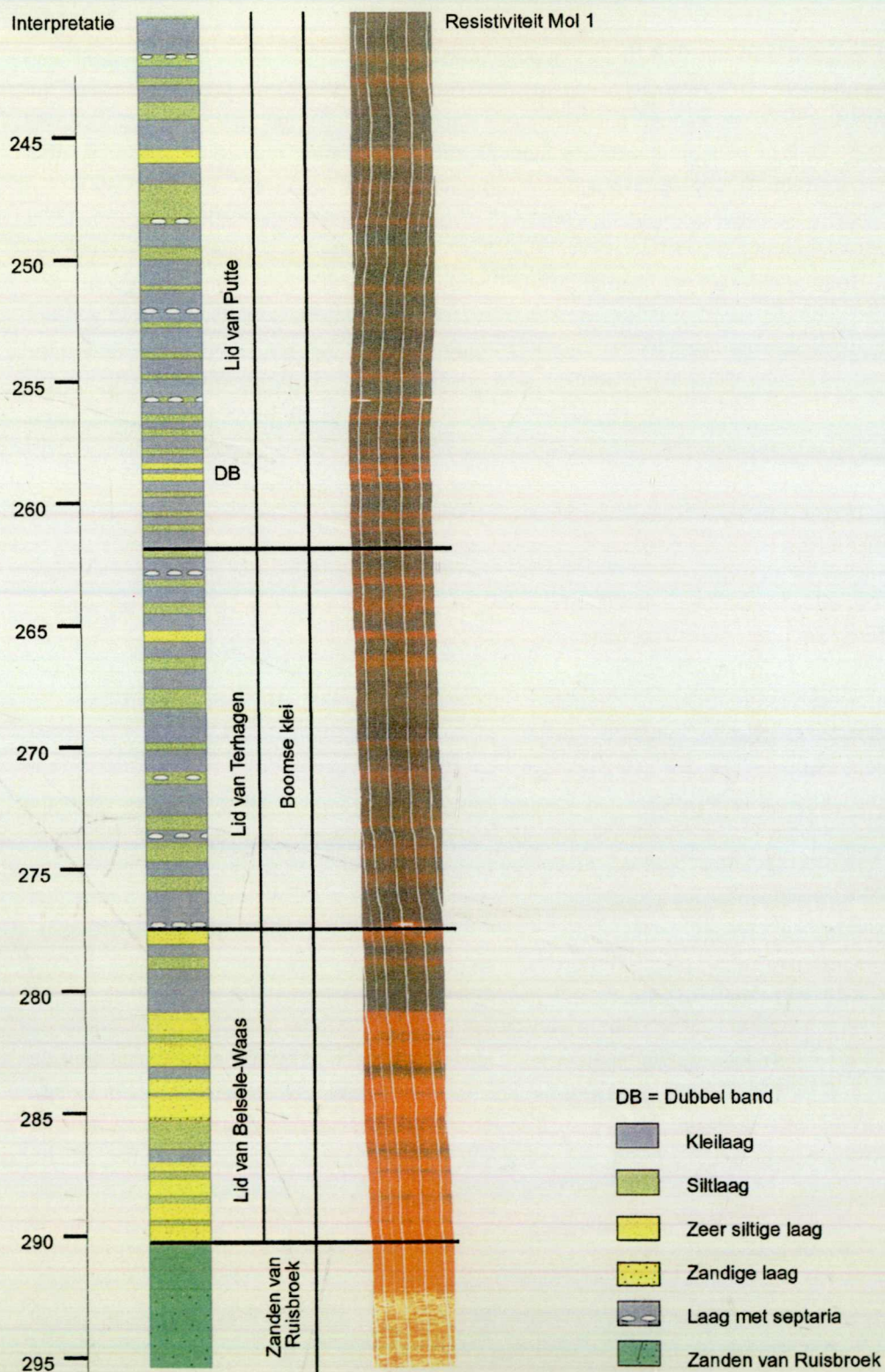
resultaten geeft aan dat met deze instrumenten, en speciaal die welke een beeldvorming mogelijk maken die gebaseerd is op microresistiviteitsmetingen, de lithologische en granulometrische afwisselingen (klei/silt) en de typische septariabanken van de Boomse Klei perfect in het licht kunnen worden gesteld. Deze afwisselingen kunnen bovendien perfect worden gecorreleerd met de in de kleigroeven gedefinieerde sequentie, op meer dan 50 km van de nucleaire zone, hetgeen de opmerkelijke laterale continuïteit van deze klei aantoonst (fig. 3.9). Alleen het Lid van Belsele-Waas en het meest aan de top gelegen gedeelte van het Lid van Putte (top van de overgangszone) vertonen geofysische kenmerken die ronduit verschillen van die van de rest van de klei, wat pleit voor een relatieve homogeniteit van het grootste deel van de klei. In het bijzonder de resultaten die zijn bereikt met nucleaire-magnetische-resonantiemeting wijzen op een vrij homogene verdeling van de hydraulische geleidbaarheid (permeabiliteit) en van de porositeit, behalve in bovenvermeld basis- en topgedeelte.

Samenstelling

Verschillende analyses (X-stralendiffractometrie, *Fourier Transform InfraRed analyse*) werden uitgevoerd om de zowel kwantitatieve als kwalitatieve verschillen in *mineralogische samenstelling* die in het SAFIR-rapport in het licht waren gesteld, te verkleinen. De resultaten van de verschillende analyses stemmen overeen wat betreft de verhoudingen van de verschillende aanwezige minerale fracties; zij lopen daarentegen uiteen wat betreft de mineralogie van de klei. De grote variatie van het kleimineraalgehalte (fyllosyllicaten), die schommelt tussen 30 en 70%, met een gemiddelde van 55%, is toe te schrijven aan de verticale lithologische heterogeniteit van de Boomse Klei (tabel 3.4). De niet-kleihoudende fractie van het sediment bestaat, in dalende volgorde van belang, uit kwarts, veldspaat, carbonaten en pyriet. De gedetailleerde kwantificering van de verschillende aanwezige kleimineralen blijft echter onzeker.

Hoewel men een continu beeld van de mineralogie van de formatie kan krijgen door een model te gebruiken dat de resultaten van de verschillende geofysische boorgatmetingen en van kalibraties door laboratoriumanalyses combineert, leidt een dergelijke modellering voor de Boomse Klei tot een overschatting van het kleimineralengehalte. Niettemin is het van belang deze karakterisering verder te zetten, met name met het oog op modelleringen van de geochemische interacties of van de verschijnselen inzake radionuclidenretentie op de minerale fases, of om de effecten te bestuderen van de verstoringen die door de bergingsinstallatie worden teweeggebracht (aanwezigheid van een alkalisch front, thermische impact enzovoort; zie sectie 3.6).

De totale porositeit van de Boomse Klei komt in de buurt van 30 tot 40% in volume, net als het totale *watergehalte*, dat is afgeleid uit analyses op boorkernen. De modellering, die is gebeurd door combinatie van de resultaten van de boorgatmetingen, levert een verticale distributie op betreffende de totale watergehalten en wijst op een verhoging daar waar de formatie het



Figuur 3.9 Microresistiviteitsmeting in de boring Mol-1 en zijn interpretatie (vergelijk met figuren 3.4 en 3.5).

kleirijkst is. Dit bevestigt dat het grootste deel van het water in een kleisediment niet vrij is, maar wel degelijk gebonden is aan de kleimineralen. Er verschijnt slechts vrij water in het lid van Belsele-Waas en in het topgedeelte van de overgangszone.

De Boomse Klei ten slotte bevat om en nabij 1 tot 3 gewicht% aan *organisch materiaal*, die een fundamentele rol speelt in de radionuclidenmigratie (zie sectie 3.5).

Tabel 3.4 Belangrijkste mineralogische kenmerken van de Boomse Klei.

Kenmerk	Waarde
Mineralogische samenstelling [droog vol %]	
☐ Kleimineralen	30 tot 70 (gemiddeld 55)
– Illiet	50
– Smectiet	30
– Kaoliniet	10
– Chloriet	≈ 5
– Glauconiet	≈ 3
☐ Kwarts	20
☐ Veldspaat	5 tot 10
☐ Carbonaten	1 tot 5
☐ Pyriet	1 tot 5
Gehalte aan organische stof [droog gewicht%]	1 tot 3
Watergehalte [% vol.]	30 tot 40

Geochemie

Het project ARCHIMEDE-ARGILE, uitgevoerd onder de hoede van de Europese Commissie met als doel het inzicht in de *geochemie* van het poriënwater in kleien en de evolutie ervan te verbeteren, heeft met name geleid tot de belangrijke conclusie dat de Boomse Klei in geochemisch evenwicht lijkt te zijn geweest sinds het einde van haar sedimentatie, hetgeen haar goede capaciteiten als chemische buffer lijkt te bevestigen. Bovendien werd de aanwezigheid van sulfaatreducerende en methanogene bacteriën in de klei aangetoond, hetgeen erop lijkt te wijzen dat dergelijke micro-organismen, die 35 miljoen jaar geleden in de klei werden gevangen tijdens haar sedimentatie, er nog altijd latent aanwezig zijn. Nieuwe studies zullen deze waarnemingen moeten bevestigen, die belangrijke gevolgen zou kunnen hebben voor de migratie van de gasen binnen de Boomse Klei, de geochemie van het nabije veld en de duurzaamheid van de kunstmatige barrières.

Een studie over het behoud van de huidige geochemische omstandigheden van de Boomse Klei ($E_h = -0.250$ mV/SHE, reducerend; pH = 8.2, licht alkalisch; zie ook sectie 3.5) over lange periodes, die erg bevorderlijk zijn voor het vertragen van de radionucliden, zal worden gestart ten einde de scenario's van normale en gewijzigde geologische en hydrogeologische

evolutie van de gastformatie en haar omgeving te definiëren in het kader van de evaluaties van de radiologische langetermijn veiligheid.

Er is begonnen met een *radiochemische* karakterisering van de vaste fase om de achtergrondstraling van de gastformatie vast te stellen, de evaluaties van de radiologische langetermijn veiligheid te ondersteunen door het bestuderen van de concentraties en het gedrag van de radionucliden die van nature in de gastformatie aanwezig zijn, en bij te dragen tot de evaluatie van haar verticale homogeniteit. De preliminaire conclusies van deze studie zijn de volgende.

- De thorium- en uraniumisotopen bevinden zich in het algemeen in radioactief evenwicht, wat wijst op een beperkte mobiliteit over periodes in de orde van grootte van een miljoen jaar.
- De mobiliteit van het radium is variabelere dan die van het thorium en het uranium en is duidelijk gecorreleerd met de lithologie; het radium is mobieler in de siltlagen.
- Een isotopenfractionering, die getuigt van een uitloging van het uranium en het radium, is aangetoond op een monster genomen in de "dubbelband", een laag die wordt gekenmerkt door een grovere granulometrie, en dus door een hogere porositeit en hydraulische geleidbaarheid dan in de aangrenzende klei.

Het toekomstig onderzoek inzake radiochemische karakterisering zou het mogelijk moeten maken de geringe mobiliteit van de radionucliden die van nature aanwezig zijn in de Boomse Klei, te bevestigen. Zij zal betrekking hebben op de vloeibare fase, op de fractionering die wordt waargenomen binnen de dubbelband, en op de invloed van de bovenliggende watervoerende zanden.

3.2.2.2 Tektonische en seismische karakterisering

Het Bekken van de Kempen is een sedimentair bekken, dat in de regel weinig getektoniseerd is en dat nagenoeg horizontale lagen vertoont, die aan het dalen zijn (verlaging van het gemiddelde niveau). Het noordoostelijke gedeelte van het bekken is verstoord door een complex systeem van breuken met een algemene NNW-ZZO-oriëntatie: de Roerdalslenk, een slenk die nog actief is en die met name ook de Boomse Klei verstoort. (Het centrale deel van de slenk is de laatste 2 miljoen jaren met 0.25 tot 0.5 mm per jaar verzakt.) De breuken van Poppel en van Rauw, die respectievelijk op 5 en 7 km ten oosten van de nucleaire zone van Mol-Dessel liggen, zijn de meest westelijke tekenen van deze tektonische eenheid.

De diktevariaties van de Boomse Klei tonen aan dat de Roerdalslenk actief was op het ogenblik van de afzetting van de klei. De belangrijkste aardbeving van de afgelopen 200 jaar was die van Roermond in april 1992. Zij haalde rond het epicentrum een magnitude van 5.8 op de schaal van Richter en een intensiteit VII op de MSK-schaal. Men is van oordeel dat haar oorsprong zich op een diepte van 17 km bevond en dat de westelijke randbreuk van de Roerdalslenk, de breuk van Peel, gewerkt heeft over een afstand van 4 km waarlangs de twee blokken aan weerszijden van de breuk verplaatst zijn over een hoogte van 10 tot 20 cm. De

breuk van Rauw was nog actief in het recent geologisch verleden, met een gemiddelde verplaatsing van één meter par 100 000 jaar.

Lopende onderzoeken over de Roerdalslenk, met name onder de hoede van de Europese Commissie, betreffende de frequentie van grote aardbevingen in regio's met een geringe seismische activiteit, suggereren dat er aardbevingen met een grotere magnitude en intensiteit te verwachten zijn, en dit met een hogere frequentie dan wat momenteel in aanmerking wordt genomen. Op deze basis is NIRAS in het kader van de definitie van de mogelijke geologische langetermijn evoluties voor de zone van Mol-Dessel en de Boomse Klei (geoprospectieve benadering) het seismische risico beginnen te herevalueren voor het noordoosten van België. Op een meer lokale schaal heeft NIRAS de detailstudie gestart van de recente bewegingen van de breuken die het dichtst bij Mol-Dessel liggen, de breuken van Poppel en Rauw. Daarbij komt, voor de eigenlijke Boomse Klei, een studie van de oorsprong van de verschillende natuurlijke of door uitgraving teweeggebrachte structurele discontinuïteiten (breuken, diaklazen, enzovoort) (zie sectie 3.6).

In 1996 heeft NIRAS een tweedimensionele seismische reflectiecampagne (96-ON) gevoerd op en rond de nucleaire zone van Mol-Dessel, met als hoofddoelstelling de eventuele aanwezigheid van breuken of flexuren (vervormingen zonder breuk) in de Boomse Klei en de boven- en onderliggende geologische formaties aan te tonen. Er werden vooraf tests uitgevoerd om de campagne te optimaliseren en de hogeresolutiemethoden die gewoonlijk worden gebruikt bij petroleumexploratie, aan te passen aan de omstandigheden die specifiek zijn voor de Boomse Klei (beperkte diepte, weinig verharde formatie enzovoort). De seismische campagne totaliseert ongeveer 65 km acquisitieprofielen, waarvan de meerderheid west-oost georiënteerd is, om de overwegend NNW-ZZE georiënteerde breuken te kunnen detecteren, waaronder de breuken van Poppel en Rauw. Daar waar het mogelijk was, werden kleine hoeveelheden springstof gebruikt als trillingsbron; in verstedelijkte gebieden waren vibrerende vrachtwagens nodig. Er werden verticale seismische profielen uitgevoerd in de boringen Dessel-1 en Mol-1 om de seismische gegevens, die uitgedrukt worden in tijd, te kunnen omzetten in een diepte. De seismische campagne ging gepaard met een herbehandeling en herinterpretatie van oudere seismische gegevens, die meer bepaald afkomstig zijn van de driedimensionele seismische campagne die in 1978 is uitgevoerd in het zuidelijke deel van de nucleaire zone.

De interpretatie van de gezamenlijke gegevens van de seismische campagne 96-ON is nog aan de gang, maar zij heeft reeds geleid tot de volgende vaststellingen.

- De verkregen profielen hebben een zowel verticale als horizontale resolutie in de orde van grootte van enkele meters, hetgeen de mogelijkheid zou moeten bieden elke breuk met een spronghoogte van meer dan 5 m op het spoor te komen.
- Onder en in de onmiddellijke omgeving van de nucleaire zone van Mol-Dessel verstoort geen enkele breuk met meer dan 5 m verticale spronghoogte de Boomse Klei.
- Tal van flexuren verschijnen op regionale schaal in het Tertiair en verraden in het algemeen diepere en dus oudere breuken.

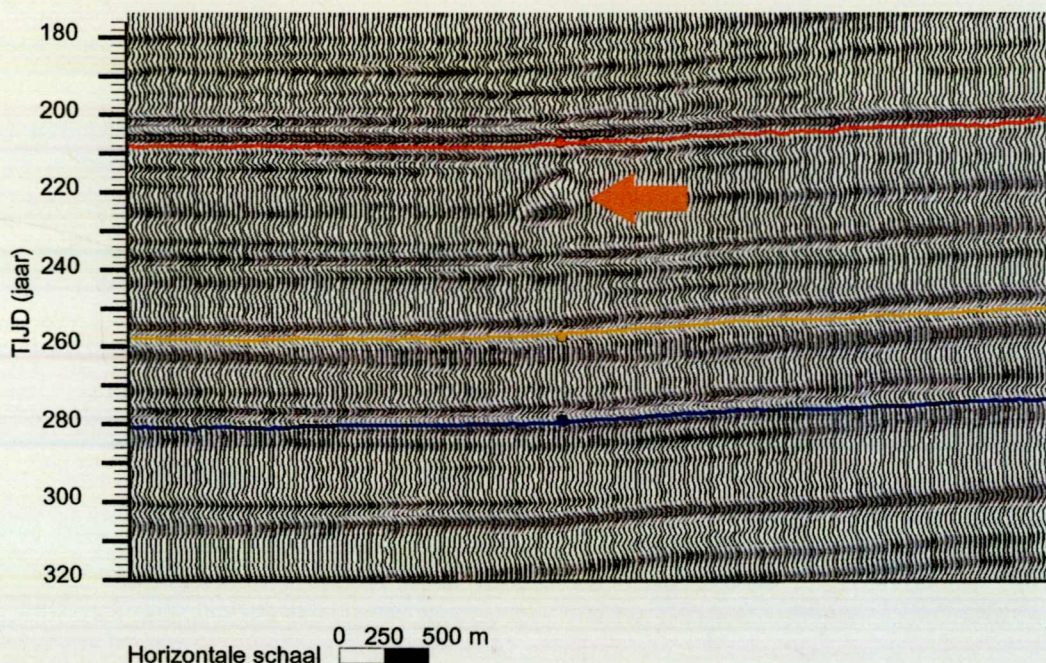
Magnitude

Logaritmische maat voor de omvang van een aardbeving (een stijging met één eenheid op de schaal van Richter komt overeen met een 10 keer grotere omvang). De aardbeving van Chili in 1960 is met een magnitude van 8.5 de sterkste aardbeving ooit geregistreerd.

Intensiteit Maat, gebaseerd op een beschrijving van de schade aan bouwwerken en aan het landschap als gevolg van een aardbeving. De MSK-schaal gaat van I tot XII.

- Het is mogelijk een reeks reflectoren te definiëren die samenvallen met specifieke horizonten in de Boomse Klei (fig. 3.10).
- Door het graduele karakter van de overgang tussen het basis- en het topdeel van de gastformatie (bestaande uit zeer siltige lagen) en de boven- en onderliggende zandige formaties, zijn geen duidelijke reflecties aanwezig die de Boomse Klei duidelijk afbakenen.

Hoewel er ten slotte op regionale schaal een geothermisch potentieel bestaat binnen bepaalde formaties van het Carboon, het Krijt en het Trias, is het niet het gevolg van vulkanische activiteit in het Bekken van de Kempen.



Figuur 3.10 Detail van het signaal dat door seismische reflectie wordt verkregen in de Boomse Klei (in het rood de basis van de overgangszone; in het geel de dubbele strook; in het blauw de basis van het Lid van Terhagen; in het oranje de reflecties gegenereerd door het ondergrondse laboratorium HADES).

3.2.2.3 Geïntegreerde interpretatie

In de toekomst zullen de resultaten van alle geofysische gegevens die zowel door boringen als met bovengrondse technieken zijn verkregen, dusdanig gecombineerd worden dat ze een geïntegreerd en coherent beeld geven van de geologie in zijn meest ruime zin, van de Boomse Klei onder en in de omgeving van de nucleaire zone van Mol-Dessel. Aan de hand van geschikte seismische behandelingen (inversie, petro-akoestische modellering) en kalibraties uitgevoerd in laboratorium zou ook een ruimtelijke verdeling van bepaalde petrofysische eigenschappen, zoals de porositeit, het zand-/kleigehalte en de verzadiging aan vloeistoffen, langs de bestaande seismische profielen moeten kunnen worden verkregen.

Voorts zal de lokalisatie van de monsters ten opzichte van de lithologische kolom van de Boomse Klei systematisch worden geanalyseerd, om enerzijds de interpretatie van de gegevens inzake homogeniteit of heterogeniteit van de Boomse Klei op verschillende schalen te verfijnen en anderzijds de opspoorbaarheid van de informatie te garanderen.

Het geïntegreerde en coherente inzicht (dat wil zeggen waarbij de resultaten van de verkenningen die eigen zijn aan elke discipline van de aardwetenschappen, onderling zullen worden getest) dat zal resulteren uit deze studies, zal bijdragen tot het preciseren van de werkelijke dikte en de homogeniteit van de gastformatie ten opzichte van de kenmerken en parameters die de radionuclidenmigratie in de gastformatie controleren.

3.2.3 De hydrogeologie van de Boomse Klei en haar omgeving

De hydrogeologische karakterisering van de Boomse Klei en van de omgevende watervoerende lagen is belangrijk, in zoverre de hydrogeologie de onontkoombare interface vormt tussen de gastformatie en de biosfeer, een interface waar de radiologische gevolgen van het vrijkomen van radionucliden vanuit het bergingssysteem worden geëvalueerd. De studiezone bestrijkt het hele noordoosten van België — dit is de Kempen — en betreft 5 grote hydrogeologische eenheden die de Boomse Klei omvatten tot een diepte van om en bij de 600 m.

3.2.3.1 Definitie van de hydrogeologische eenheden

Vanuit hydrografisch oogpunt behoort de Kempen zowel tot het Maasbekken als tot het Scheldebekken. De streek rond de nucleaire zone van Mol-Dessel wordt in het noordoosten gedraineerd door de Molse Nete, de Kleine Nete en zijn zijrivieren de Desselse Nete en de Witte Nete, de Wamp en de Aa, en in het noordwesten door de Mark en de Grote Beek. Al deze waterlopen behoren tot het Scheldebekken.

De dikke sedimentaire deklaag van het Tertiair en het Quartair ten noordoosten van België wordt gevormd door een superpositie van zand- en kleilagen die rusten op het licht noordoostwaarts hellende Krijt. Men kan zich dus gemakkelijk een geheel van watervoerende lagen indenken die worden afgebakend door semi-watervoerende lagen die worden gevormd door de kleiformaties wanneer die voldoende ontwikkeld zijn. Deze watervoerende lagen, die naar het noorden toe dieper worden, staan daar dus onder spanning, terwijl ze in het zuiden in het dagzoomgebied door een vrije watertafel gekenmerkt worden. Hun hydraulische kenmerken zijn typisch voor een poreus midden.

Figuur 3.11 schematiseert de opeenvolging van watervoerende lagen en semi-watervoerende lagen van het Tertiair en het Quartair van het Bekken van de Kempen. Het middengedeelte van de figuur laat zien hoe deze eenheden opgebouwd zijn met het oog op de regionale hydrogeologische modellering (zie sectie 3.2.4.2). De watervoerende laag van het Neogeen, die alle op de Boomse Klei rustende zanden schematisch groepeerd, is de belangrijkste watervoerende laag van de streek. Dankzij haar dikte, die meestal meer dan 100 m bedraagt,

Watervoerende laag Verzadigde doorlatende geologische eenheid die een bepaalde hoeveelheid winbaar water bevat.

Semi-watervoerende laag Geologische eenheid die voldoende doorlatend is om de doorgang van aanzienlijke hoeveelheden water mogelijk te maken, maar anders dan bij de watervoerende lagen gebeurt deze doorgang over uitgestrekte zones en over heel lange periodes. Wegens hun beperkte hydraulische geleidbaarheid zijn semi-watervoerende lagen niet exploiteerbaar.

haar hoge hydraulische geleidbaarheid en haar geringe saliniteit is zij een watervoerende laag die intensief voor drinkwaterproductie ontgonnen wordt. Het is in dit opzicht overigens de tweede belangrijkste watervoerende laag voor België en de belangrijkste voor het noordoosten van het land. Zij bestaat in feite uit een reeks van drie subeenheden die in mindere of meerdere mate doorlatend zijn.

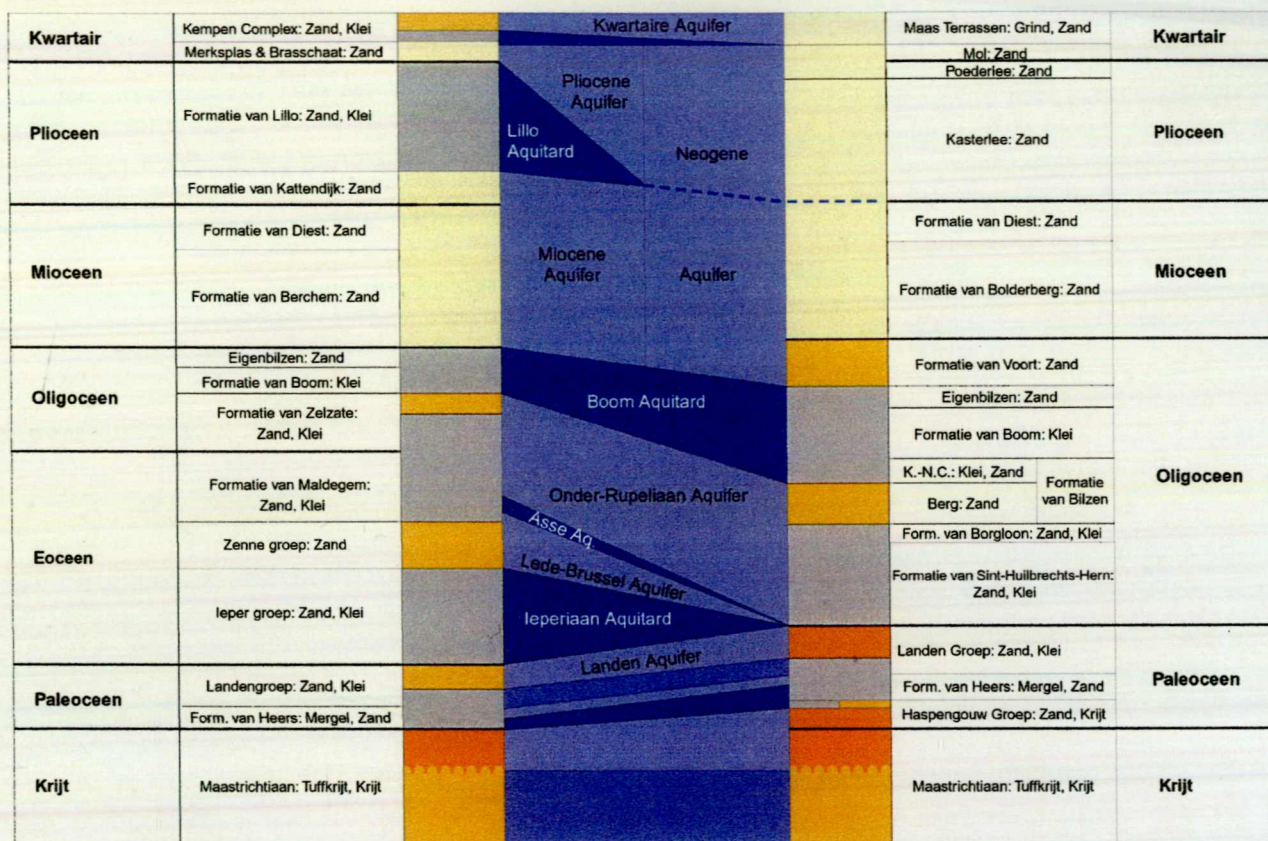
- De eerste subeenheid groepeerd een geheel van hangende watertafels, die bestaan uit sedimenten van het Quartair en in meerdere of mindere mate afgezonderd zijn door kleiafzettingen (watervoerende laag van de Kempen, terrassen van de Maas, alluviale afzettingen van de Maasvallei).
- De tweede subeenheid wordt gevormd door zandige fluviatiele en estuariene Rijnaafzettingen: de Zanden van Mol, Brasschaat en Merksplas. Aan de basis van die subeenheid zijn een deel van de Zanden van Poederlee en de Zanden van de Formatie van Kasterlee toe te voegen. Gezien het overwicht van de afzettingen van het Pliocene wordt deze subeenheid vaak watervoerende laag van het Pliocene genoemd. De watervoerende laag van het Pliocene is min of meer afgezonderd van de onderste watervoerende laag door de aanwezigheid van klei in lagen of lenzen (midden in de Formaties van Lillo en van Kattendijk in het westen en de Formatie van Kasterlee in het oosten). Dit halfdoorlatende geheel, de semi-watervoerende laag van Lillo-Kasterlee, draagt bij tot een lichte differentiëring van de hydraulische regimes van de boven- en de onderliggende watervoerende lagen, zonder een langzame wisselwerking tussen de twee te beletten.
- De derde subeenheid is de belangrijkste van de streek. Het gaat om de watervoerende laag van het Mioceen, soms watervoerende laag van het Diestiaan genoemd, die de Zanden van Kasterlee, Kattendijk, Diest, Dessel, Berchem en Bolderberg omvat. Soms worden daaraan de Zanden van Voort en eventueel van Eigenbilzen toegevoegd, die een duidelijk lagere hydraulische geleidbaarheid vertonen dan bovenvernoemde formaties, maar desalniettemin met deze in zeer goed hydraulisch contact staan.

De Boomse Klei speelt een doorslaggevende rol in het regionale hydrogeologische systeem door de watervoerende laag van het Neogeen te scheiden van de onderliggende watervoerende lagen. Deze watervoerende lagen staan evenwel in rechtstreekse verbinding in de streek van Diest en Averbode waar de Boomse Klei zelfs volledig is weggeërodeerd als gevolg van geulerosie (erosiegeul van Diest). In het noordoosten zouden de satellietbreuken van de Roerdalslenk die de Boomse Klei beïnvloeden, eveneens het hydraulische gedrag van de bovenliggende watervoerende lagen kunnen beïnvloeden, maar hun effect is slecht gekend. Deze zone valt ook samen met de waterscheidingslijn van het Maas- en het Scheldebekken.

Onder de Boomse Klei bevindt zich de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan, vaak watervoerende laag van Ruisbroek-Berg genoemd, die voor drinkwaterproductie minder geschikt is wegens haar geringe rendement, veroorzaakt door een geringe hydraulische geleidbaarheid, haar heterogeniteit en haar hoge saliniteit (die evenwel nog binnen de normen ligt die in Vlaanderen zijn goedgekeurd voor drinkwater). De watervoerende laag van het

W

O



- Watervoerende laag
- Watervoerende laag met grote doorlatendheid
- Halfdoorlatende en ondoorlatende lagen
- Watervoerende laag met secundaire porositeit

- Aquifer
- Aquifer van slechte kwaliteit
- Aquitard

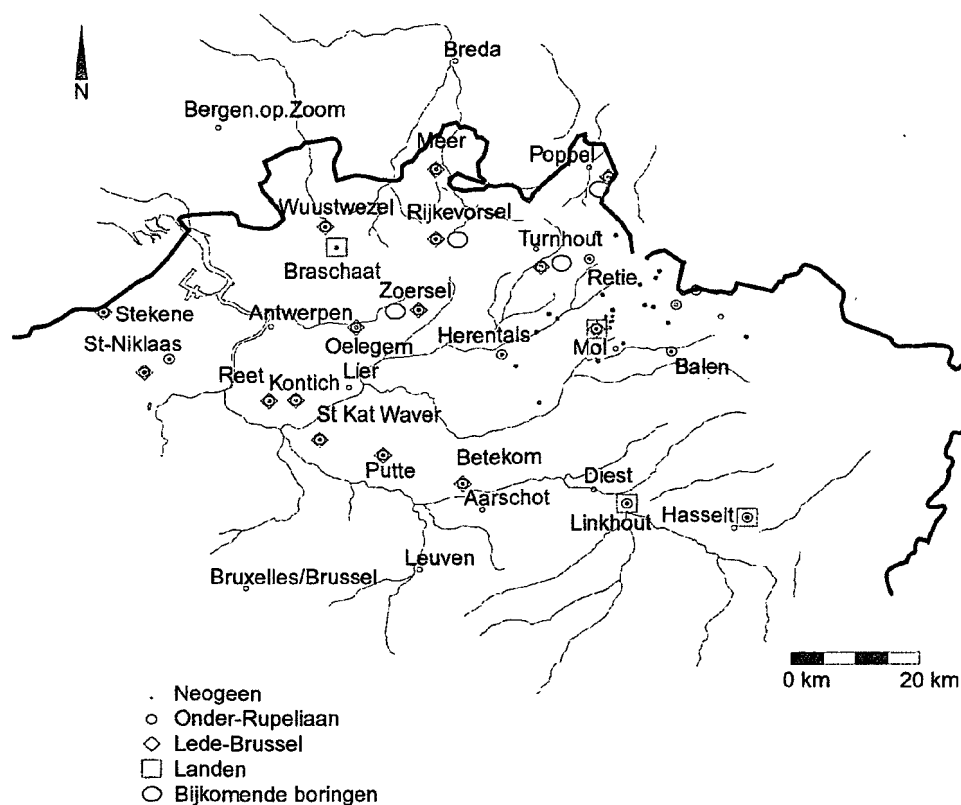
K.-N.C.: Kerniel, Nucula Compta

Figuur 3.11 Schematische voorstelling van de opeenvolging van de watervoerende lagen en semi-watervoerende lagen van het Tertiair en het Quartair van het Bekken van de Kempen.

Onder-Rupeliaan wordt afgescheiden van de diepere watervoerende lagen door de Klei van Ussel en van Asse, althans in het westelijke gedeelte van het gemodelleerd gebied (zie verder). Vervolgens komt de watervoerende laag van het Ledo-Brusseliaan, die, net als die van het Onder-Rupeliaan, weinig wordt gebruikt voor drinkwatervoorziening in de bestudeerde streek, wegens haar hoge saliniteit en haar geringe hydraulische geleidbaarheid. De watervoerende laag van het Ledo-Brusseliaan is op haar beurt aan haar basis afgesloten door de kleiformaties van de Ieper-Groep, die een goede hydraulische barrière vormen. De fijne zandlagen van het Landeniaan ten slotte omsluiten een beperkte watervoerende laag, die nagenoeg niet wordt ontgonnen vanwege haar geringe rendement en haar te hoge saliniteit. De watervoerende lagen onder die van het Landeniaan zijn in dit stadium maar van beperkt belang. Alleen het Maastrichtiaan lijkt nog plaatselijk te worden geëxploiteerd, ondanks de sterke mineralisatie van het water.

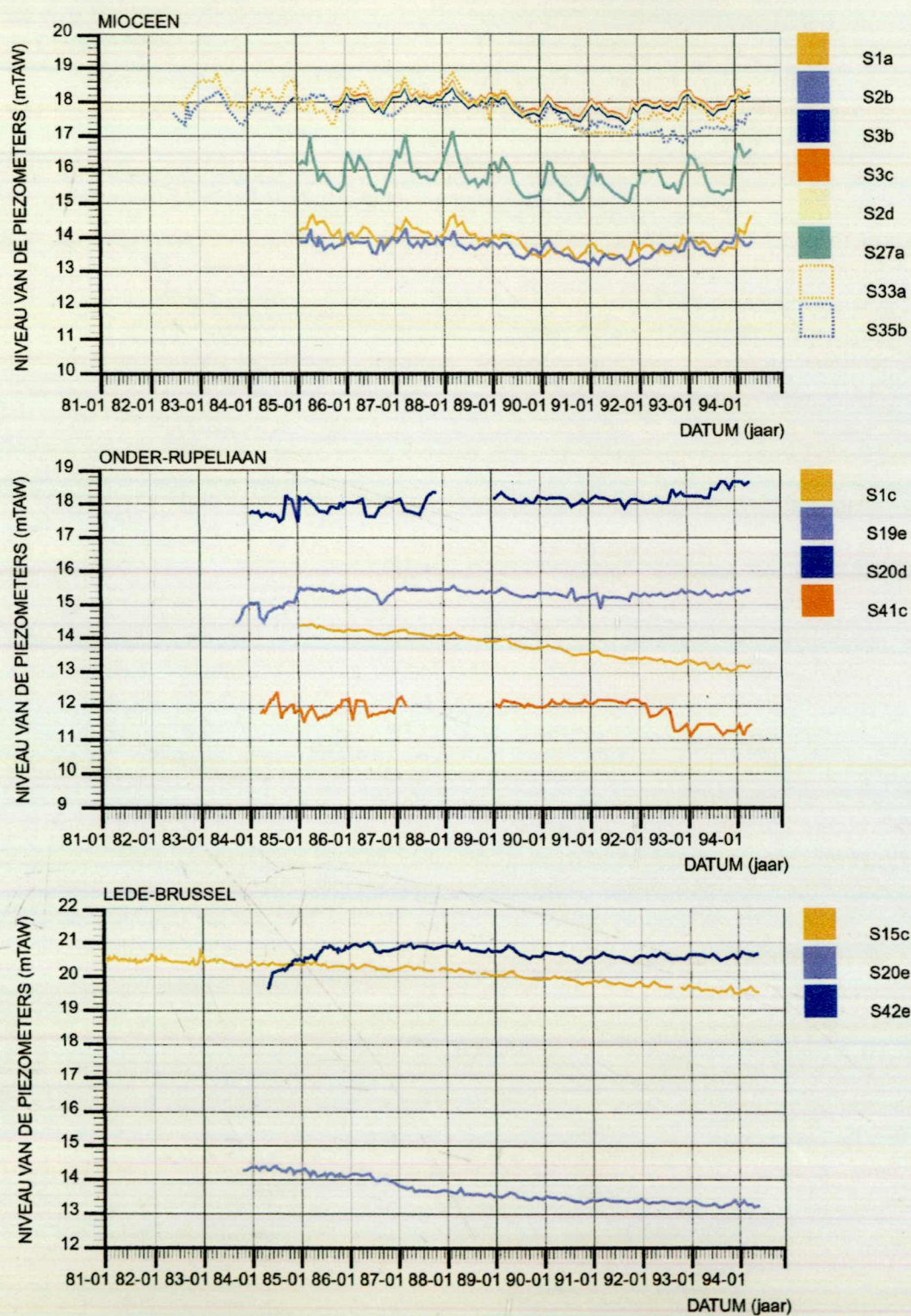
3.2.3.2 Piëzometrische evoluties

Sinds het begin van het Belgische programma zijn in totaal 130 piëzometers geïnstalleerd op 40 afzonderlijke locaties, hoofdzakelijk in de watervoerende laag van het Neogeen, met als doel de grondwaterpeilen en hun fluctuaties in de tijd te meten en aldus de hydraulische gradiënten en de stroomrichtingen van het grondwater vast te stellen (fig. 3.12). Deze metingen maken het ook mogelijk de hydrogeologische modellen te kalibreren (zie sectie 3.2.4).



Figuur 3.12 Lokalisatie van de piëzometers, met inbegrip van de vier boringen van de laatste hydrogeologische campagne (zie sectie 3.2.3.4).

De evolutie van de piëzometrische niveaus van de watervoerende laag van het Neogeen (fig. 3.13) laat seizoengebonden schommelingen zien die typisch zijn voor freatische waterlagen. De laagste peilen worden waargenomen tussen april en november, met een minimum in juli en augustus; de hoogste peilen worden waargenomen tussen november en april en bereiken nagenoeg het maaiveld. De omvang van deze schommelingen bedraagt om en bij de twee tot drie meter, maar kan in de diepte verkleinen, vooral bij plaatselijke aanwezigheid van fijnere sedimenten. De watervoerende lagen van het Onder-Rupeliaan en van het Ledo-Brusseliaan staan onder spanning en vertonen bijgevolg nagenoeg geen seizoengebonden schommelingen. Zij kunnen daarentegen gevoeliger zijn voor andere vormen van storingen, zoals bijvoorbeeld door overexploitatie. Figuur 3.13 wijst op een lichte, maar constante vermindering van de peilen mettertijd, die een tekort in voeding ten opzichte van de onttrekkingen in de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan aangeeft.



Figuur 3.13 Evolutie van de niveaus van enkele piëzometers die representatief zijn voor (a) de watervoerende laag van het Neogeen (Zanden van Diest), (b) de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan en (c) de watervoerende laag van het Ledo-Brusseliaan.

Drainering

Langzame water-verplaatsing, hoofdzakelijk in verticale richting van de ene watervoerende laag naar de andere via een halfdoorlatende laag (semi-watervoerende laag). Deze verplaatsing hangt enerzijds af van de drukgradiënt tussen de twee watervoerende lagen en anderzijds van de hydraulische parameters en de dikte van de semi-watervoerende laag.

De waterstromingen binnen de watervoerende laag van het Neogeen worden wegens het freatisch regime bepaald door de topografie en het hydrografische netwerk, dat wil zeggen door de waterscheiding van het Scheldebekken en het Maasbekken. De stromingen zijn hoofdzakelijk van oost naar west georiënteerd, in de afwateringsrichting van het Scheldebekken. Voor de diepe watervoerende lagen is diezelfde algemene tendens van westwaartse stroming terug te vinden, zonder dat die stroming daarom wordt beïnvloed door de topografie. De verticale drainering binnen de semi-watervoerende lagen is meestal naar beneden gericht. Een opwaartse drainering dwars door de Boomse Klei is evenwel waar te nemen in Oelegem (ten oosten van Antwerpen) en volgens de resultaten van de modellering eveneens aan de rand van de dagzoomlijn (zie sectie 3.2.4). De verticale gradiënt dwars door de Boomse Klei, dat wil zeggen het verschil in waterdruk tussen de watervoerende laag van het Neogeen en die van het Onder-Rupeliaan, bedraagt meestal 2 m voor 100 m klei. Het verschil is meer uitgesproken in het oosten, in de streek van de randbreuken van de Roerdalslenk, wat een waterverlies via de breuken doet vermoeden. De potentiële invloed van deze breuken op de piëzometrie is bestudeerd aan de hand van varianten van het hydrogeologische model (zie sectie 3.2.4.2).

3.2.3.3 Hydrogeochemie van de watervoerende lagen

De geochemische analyses van het water van het Neogeen tonen aan dat dit water in het bovenste deel ervan van het calciumcarbonaattype is, dat wil zeggen met een duidelijk overwicht aan de HCO_3^- en CO_3^{2-} -anionen en van het Ca^{++} -kation, en dat het geleidelijk evolueert naar het natriumcarbonaattype in de diepte (verrijking met Na^+ en K^+ ten nadele van het Ca^{++}), terwijl het toch een zuur en weinig alkalisch karakter behoudt. In het algemeen stijgen de pH en de saliniteit met de diepte in de watervoerende laag van het Neogeen, terwijl het redoxpotentiaal vermindert. De watervoerende lagen van het Onder-Rupeliaan en van het Ledo-Brusseliaan zijn duidelijk rijker aan chloriden en aan opgeloste zouten. Voor de nucleaire zone van Mol-Dessel wordt een opvallende gelijkenis vastgesteld tussen de chemische samenstelling van het water van de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan en die van het poriënwater van de Boomse Klei (hogere mineralisatie en alkaliniteit in vergelijking met het Neogeen). De hydrogeochemische gegevens suggereren voor de watervoerende lagen van het Onder-Rupeliaan en van het Ledo-Brusseliaan een mengsel met zoeter en recenter water naar het zuidwesten toe en een mengsel met zeewater in het noorden van de bestudeerde streek.

De studie van de chemische evenwichten die de samenstelling van het water beheersen, wijst er bijvoorbeeld op dat het water van het Onder-Rupeliaan en van het Ledo-Brusseliaan over het algemeen in evenwicht is met de minerale fase van de formatie, terwijl het water van de Formatie van Berchem, gelegen aan de basis van de watervoerende laag van het Neogeen, dat niet is.

De ouderdom van de waters waarvan sprake werd berekend op basis van ^{14}C -metingen, en is betrekkelijk recent, steeds minder dan 40000 jaar oud. Het water van het Neogeen is verschillende duizenden jaar oud, tot meer dan 10000 jaar voor de lagen die zich het dichtst bij de basis bevinden. Het grondwater onder de Boomse Klei is het oudst: 15000 tot 37000 jaar

voor de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan, maar slechts 6 000 tot 27 000 jaar voor die van het Ledo-Brusseliaan. Dit verschil moet misschien in verband worden gebracht met de grotere hydraulische geleidbaarheid van die laatste watervoerende laag. Het relatief jonge karakter van het water is bevestigd door een studie betreffende de isotopische onevenwichten binnen de uraniumfamilie.

Het water van het Onder-Rupeliaan en van het Ledo-Brusseliaan vertoont naar het noorden toe een toename van zware zuurstofisotopen, wat erop lijkt te wijzen dat een deel van het aanwezige water in het dagzoomgebied in koudere paleoklimatische omstandigheden zou zijn geïnfiltreerd.

3.2.3.4 Hydrodynamische karakterisering

Om de geometrische en hydrodynamische karakterisering van de watervoerende lagen onder de gastformatie te verfijnen — die één van de aanzienlijkste onzekerheden vormen van de hydrogeologische modellering — werd tussen 1996 en 1998 een reeks hydraulische injectietests en boorgatmetingen uitgevoerd in vier specifieke boringen (Zoersel, Rijkvorsel, Turnhout en Weelde), aangevuld met laboratoriumproeven op boorkernen die bij twee van deze boringen werden genomen. Bovendien werden hydraulische proeven uitgevoerd in de voor geofysische metingen bestemde boringen (Dessel-1 en Mol-1; zie sectie 3.2.2.2).

Er werd een bijzondere inspanning gedaan om de waarde van de hydraulische geleidbaarheid van de Boomse Klei die was verkregen op basis van metingen op boorkernen (centimeterschaal) te bevestigen aan de hand van in situ tests (injectietests of packertests) in boringen (meterschaal) en door gebruik te maken van de kleine schacht van het ondergrondse laboratorium HADES als permeabiliteitsmeter op grote schaal (decameterschaal — zie fig. 3.25), alsook om de anisotropie inzake hydraulische geleidbaarheid binnen de formatie te evalueren. In het kader van de evaluatie van de verticale variabiliteit van de parameters die de radionuclidenmigratie beheersen, werd op basis van boorkernen van boring Mol-1, een profiel opgemaakt van de hydraulische geleidbaarheid over de volledige dikte van de Boomse Klei. Uit dergelijk profiel wordt duidelijk dat het Lid van Belsele-Waas verschillend is van de andere leden van de Formatie van Boom (fig. 3.39). De nucleaire-magnetische-resonantieboorgatmeting uitgevoerd in boring Mol-1, en die een onrechtstreeks continu kwalitatief profiel geeft van de hydraulische geleidbaarheid, bevestigt de vorige conclusie.

Deze gezamenlijke metingen geven coherente hydraulische-geleidbaarheidswaarden van om en bij de $10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ voor het meest kleiige gedeelte van de formatie. Tabel 3.5 geeft in detail de hydraulische-geleidbaarheidswaarden voor de verschillende leden van de Formatie van Boom weer. De verhouding tussen de horizontale en de verticale hydraulische geleidbaarheid, vastgesteld op basis van laboratoriummetingen in een permeabiliteitscel, bedraagt ongeveer 2 voor de Leden van Putte en Terhagen. Die verhouding is erg veranderlijk in het Lid van Belsele-Waas. De totale porositeit van de Boomse Klei bedraagt tussen 30 en 40 %.

Tabel 3.5 Beste raming en betrouwbaarheidsinterval voor de horizontale en verticale hydraulische geleidbaarheid van de Boomse Klei.

	Horizontale hydraulische geleidbaarheid K_h [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]		Verticale hydraulische geleidbaarheid K_v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	
Overgangszone	10^{-11}	10^{-12} tot 10^{-10}	$6\cdot 10^{-12}$	10^{-12} tot 10^{-10}
Lid van Putte en lid van Terhagen	$6\cdot 10^{-12}$	$3\cdot 10^{-12}$ tot 10^{-11}	$3\cdot 10^{-12}$	$7\cdot 10^{-13}$ tot $7\cdot 10^{-12}$
Lid van Belsele-Waas	10^{-10}	10^{-12} tot 10^{-9}	$6\cdot 10^{-11}$	10^{-12} tot 10^{-9}

De beste ramingen voor de hydraulische geleidbaarheid van de andere eenheden die deel uitmaken van het model bedragen respectievelijk 2 à $3\cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ voor de watervoerende laag van het Neogeen, $7\cdot 10^{-13}$ tot $3\cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (K_v) en $2\cdot 10^{-12}$ tot $2\cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (K_h) voor de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan, 10^{-13} tot $10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ voor de semi-watervoerende laag van Asse en $5\cdot 10^{-11}$ tot $5\cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ voor de watervoerende laag van het Ledo-Brusseliaan.

3.2.3.5 Perspectieven

Het vervolg van het onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma inzake karakterisering van de hydrogeologische eenheden zal gedefinieerd worden op basis van de vereisten van de modellering en de gevoeligheidsanalyses. Naast het onderhoud van en de metingen op het regionale piëzometrische netwerk zal bijzondere aandacht moeten besteed worden aan de hydraulische geleidbaarheid op grote schaal van de Boomse Klei en met name de invloed van de zones die sterk worden verstoord door de aanwezigheid van breuken (westelijke rand van de Roerdalslenk) alsook aan de — zelfs heel beperkte — mogelijkheid van advectieve stroming in de Boomse Klei zelf, hoofdzakelijk binnen de dubbelband. Daarbij komen de volgende cruciale punten in aanmerking:

- verbetering van de kennis van de geometrie en van de hydraulische eigenschappen van de formaties die zich onder de Boomse Klei bevinden;
- evaluatie van de rol van de halfdoorlatende lagen of lenzen binnen de watervoerende laag van het Neogeen;
- verfijning van de oorsprong, de ouderdom en de evolutie van het grondwater en dit enerzijds om het inzicht in het systeem te verbeteren en anderzijds om zoveel mogelijk de resultaten van de hydrodynamische modellering te bevestigen.

3.2.4 De hydrogeologische modellering

De hydrogeologische modellering heeft tot doel een goed inzicht te verwerven in het ondergronds hydraulisch regime binnen en rond de Boomse Klei in de omgeving van de nucleaire zone van Mol-Dessel. De modellering bestaat erin te pogen om de waarnemingen afkomstig van de hydrogeologische karakterisering (en met name de piëzometrische niveaus en de hydraulische geleidbaarheidswaarden) te reproduceren met behulp van mathematische modellen, om zowel aanwijzingen te krijgen voor de ondergrondse stromingen binnen de verschillende geologische formaties als eveneens voor de hydraulische evenwichten tussen deze eenheden. De modellering gebeurt in nauwe, permanente en iteratieve samenhang met de (hydro)geologische karakterisering.

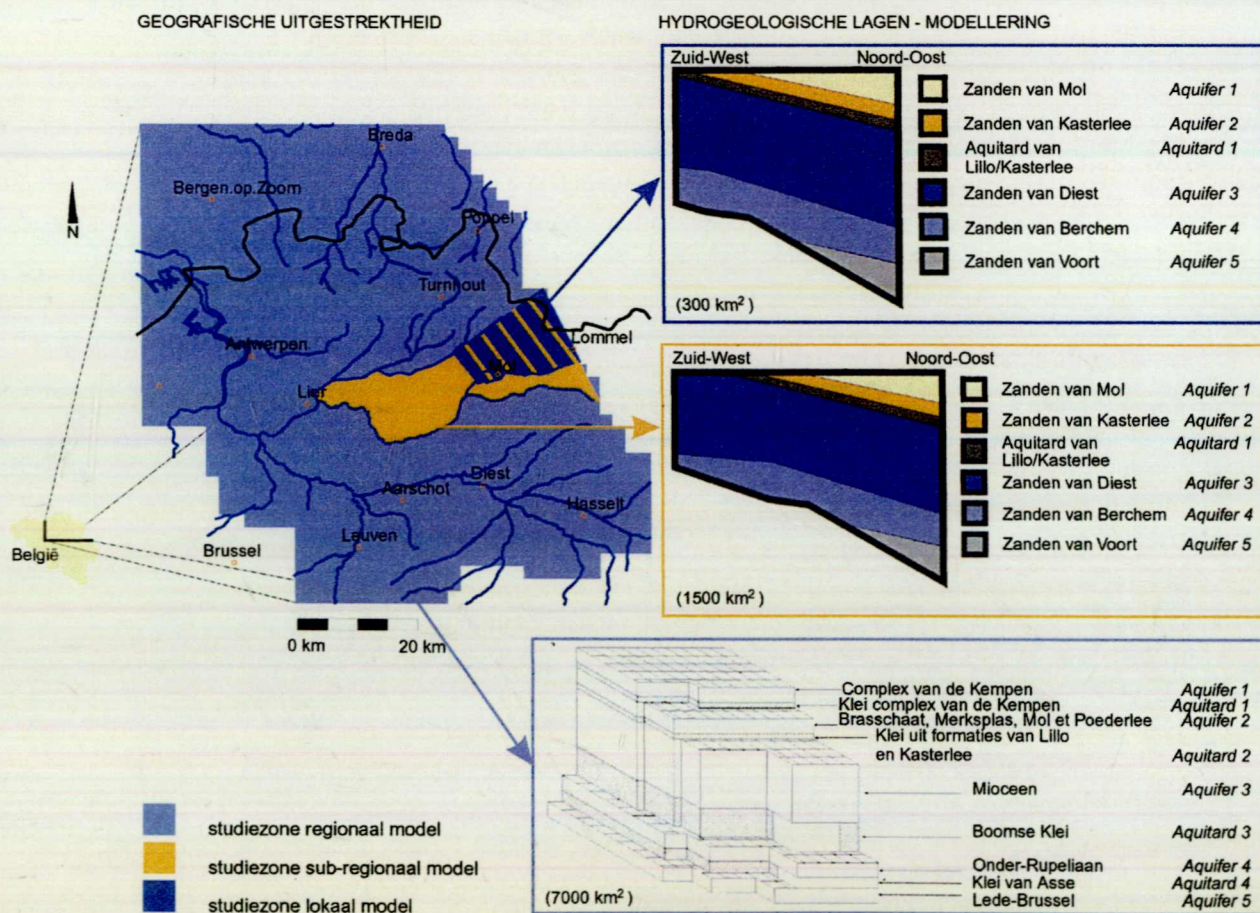
De doelstellingen van de hydrogeologische modellering werden vastgelegd in de loop van de periode die wordt bestreken door het SAFIR 2-rapport. De resultaten van de studies over de hydrodynamische en migratiekenmerken van de Boomse Klei hebben duidelijk doen blijken dat de advectieve component (beweging volgens de waterdrukgradiënten) van de migratie van de elementen in oplossing door deze formatie heen verwaarloosbaar is ten opzichte van de diffusieve component (beweging te wijten aan chemische gradiënten) (zie sectie 3.5). De advectieve component is daarentegen fundamenteel in de watervoerende lagen die de Boomse Klei omgeven en die, ter herinnering, geen deel uitmaken van het bergingssysteem, maar instaan voor de langetermijn veiligheidsfunctie verdunning en verspreiding. Het aantonen van het lokale karakter van de afvoerpunten van de radionuclidenmigratie vanuit het bergingssysteem heeft het mogelijk gemaakt zich voor de migratie toe te spitsen op de hydrogeologie van de onmiddellijke omgeving van de nucleaire zone van Mol-Dessel (lokaal model). Het regionale model is bijgevolg hoofdzakelijk gebruikt om het complete hydrogeologische systeem te helpen begrijpen en om aanwijzingen te geven betreffende de waarschijnlijke evoluties van dit systeem en hun gevolgen, met name als gevolg van natuurlijke of antropogene wijzigingen van de klimaatomstandigheden (opwarming of afkoeling) of ingevolge de verhoging van de pompdebieten.

Op het vlak van de gebruikte technieken is enerzijds een nieuwe rekencode ingevoerd (MODFLOW) en is anderzijds het aanvankelijke regionale model onderverdeeld in drie modellen die steeds kleinere ruimtelijke en geologische schalen in aanmerking nemen, om de invloed van de hydraulische en hydrogeologische omstandigheden die eigen zijn aan de zone van Mol-Dessel, te verfijnen.

Het regionale model bestrijkt ongeveer het hele noordoosten van België, over een oppervlakte van 7 000 km², en simuleert de totaliteit van de hydrogeologische eenheden (watervoerende lagen en semi-watervoerende lagen) die zich over het geheel genomen bevinden tussen de zandige top van de leper-Groep en de watervoerende laag van het Quartair (fig. 3.14). Dankzij zijn geografische omvang maakt dit model het mogelijk expliciet rekening te houden met bepaalde omstandigheden aan de natuurlijke grenzen (randvoorwaarden), zoals bijvoorbeeld de omvang van de watervoerende lagen en hun voeding (heraanvoer van meteorisch water) in de dagzoomgebieden. Het model dient trouwens als basis om de randvoorwaarden van de twee andere modellen af te leiden. Door rekening te houden met de natuurlijke grenzen, is het

regionaal model het beste van de drie omdat het aangepast is om de wijzigingen van de klimatische en geologische omstandigheden te modelleren.

Het subregionale model bestrijkt een totale oppervlakte van ongeveer 1500 km² en het lokale model een oppervlakte van 300 km², geconcentreerd op en rond de nucleaire zone van Mol-Dessel (fig. 3.14). Deze twee modellen hebben allereerst tot doel de stromingen in de watervoerende laag van het Neogeen meer in detail te bestuderen, omdat deze watervoerende laag de interface vormt tussen de geologische barrière en de biosfeer. Doordat ze het mogelijk maken de preferentiële migratiewegen van de radionucliden naar de biosfeer nauwkeuriger te ramen, hebben deze modellen de aandacht helpen vestigen op het lokale karakter van de afvoerpunten van de grondwaterstromingen. Het is dus het lokale model dat rechtstreeks wordt gebruikt voor de evaluaties van de radionuclidenmigratie in het kader van de veiligheidsevaluaties (zie sectie 4.3).



Figuur 3.14 Geografische en geologische afbakening van de drie hydrogeologische modellen.

3.2.4.1 Mathematische modellen, resolutiemethoden en rekencodes

Alle mathematische modellen die worden gebruikt voor de hydrogeologische modelleringen houden rekening met stationaire omstandigheden, dat wil zeggen dat de gesimuleerde ondergrondse stromingen niet expliciet veranderen met de tijd. De aanzienlijke evoluties van de richting en snelheden van de stromingen die zouden kunnen volgen uit bijvoorbeeld klimatologische en geologische wijzigingen, worden om die reden geëvalueerd met simulaties (varianten) waarvoor men de omstandigheden en de waarde van de parameters van de modellen heeft veranderd. Dit maakt het mogelijk zich een beeld te vormen van de effecten die dergelijke veranderingen teweeg kunnen brengen. Dezelfde filosofie wordt trouwens toegepast in de evaluatie van de radiologische langetermijn veiligheid, die dus niet als doel heeft een nauwkeurige toekomstvoorspelling van het bergingssysteem en zijn omgeving te maken.

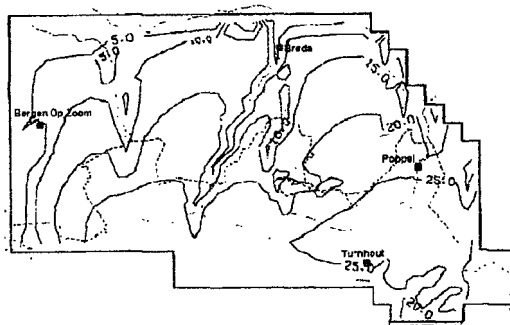
De gebruikte code voor het regionale model is NEWSAM. De MODFLOW-code is eveneens gebruikt voor de recentere oefeningen, en in het bijzonder voor de ontwikkeling van het subregionale en het lokale model. Deze twee codes, die zijn ontwikkeld door de academische wereld en geverifieerd door tal van gebruikers, doen een beroep op een digitale methode die gebaseerd is op eindige verschillen om de stromingen in een grootschalig meerlagig hydrogeologisch systeem te simuleren. Zij veronderstellen hoofdzakelijk tweedimensionale stromingen, die horizontaal lopen in de watervoerende lagen, en een verbinding tussen die stromingen door de semi-watervoerende lagen heen via een verticale drainering in stationaire omstandigheden. In het kader van de subregionale en lokale modellering werd een nagenoeg driedimensionale simulatie verkregen van het stromingspatroon van de watervoerende laag van het Neogeen door deze onder te verdelen in een reeks vertikaal gekoppelde onderlagen (watervoerende lagen en semi-watervoerende lagen).

3.2.4.2 Regionaal model

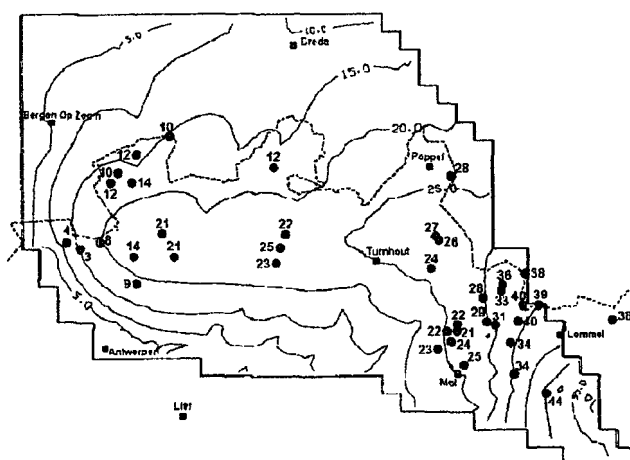
Het vertrekpunt van de studies die de jongste tien jaar zijn gewijd aan het regionaal hydrogeologisch systeem, is het model dat is opgesteld met behulp van de NEWSAM-code, die uitgewerkt werd in 1984. De thans gebruikte versie van dit model is die van 1994 (fig. 3.14), opgebouwd met behulp van dezelfde code. In deze laatste versie is de watervoerende laag van het Neogeen onderverdeeld in drie afzonderlijke subeenheden (respectievelijk de watervoerende lagen van het Quartair, van het Pliocene en van het Mioceen), die gescheiden worden door twee kleilagen van geringe dikte waarvan de stromingsweerstand betrekkelijk gering is, hetgeen een hydraulisch contact mogelijk maakt tussen de verschillende bovenvermelde watervoerende eenheden.

Er werden verschillende simulaties van het hydrogeologische systeem uitgevoerd met behulp van het nieuwe regionale model (versie 1994), om een goede weergave te verkrijgen van de piëzometrische niveaus binnen de watervoerende laag van het Neogeen (fig. 3.15). Het is deze versie die als referentie werd gebruikt voor de volgende simulaties.

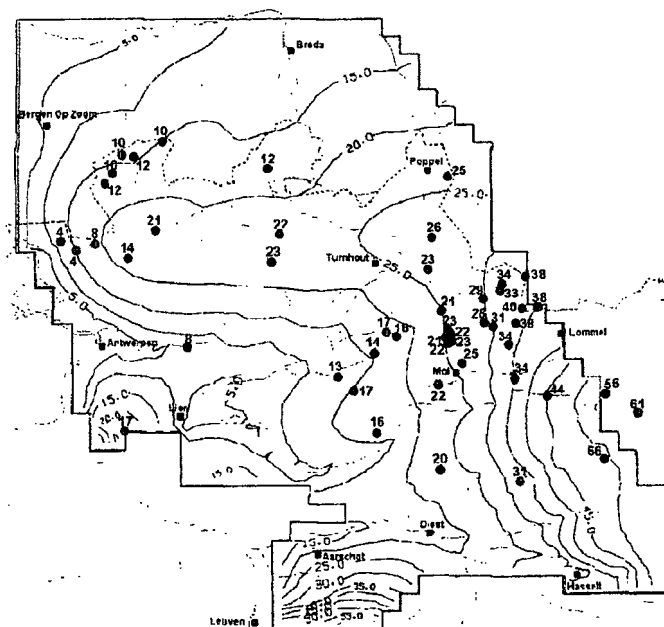
KWARTAIR



PLIOCEEN



MIOCEEN



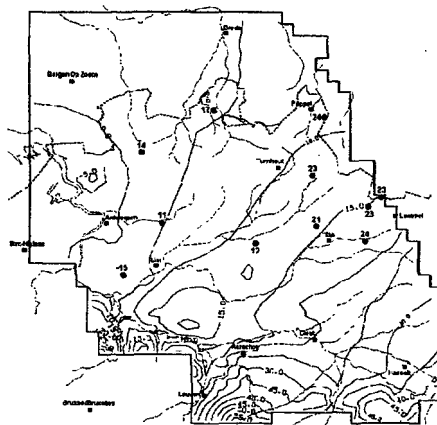
● Gemeten potentiaal

Figuur 3.15 Piëzometrie van de watervoerende lagen van het Neogeen, berekend met de referentieversie van het regionale model (op precieze punten gemeten potentialen kunnen worden vergeleken met de berekende isopotentiallijnen).

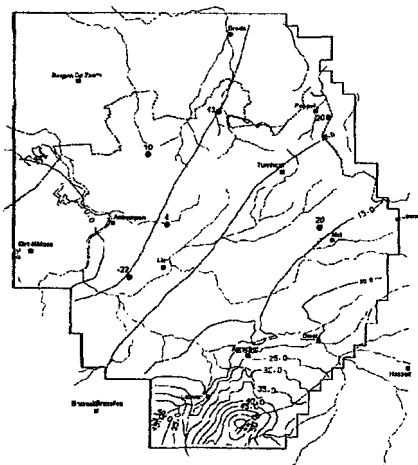
Aangezien de continuïteit van de kleilaag die de semi-watervoerende laag van Lillo-Kasterlee vormt in het oostelijke deel van de bestudeerde regio onbekend is, zijn verschillende varianten van het referentiemodel getest om de impact van de scheiding van de watervoerende lagen van het Pliocene en van het Mioceen te analyseren. Ze hebben aangetoond dat een daling van het isolerende karakter van de semi-watervoerende laag geen belangrijk effect heeft op de piëzometrie van de watervoerende lagen in kwestie op regionale schaal.

De resultaten van de modellering tonen aan dat de stroming in de watervoerende lagen van het Onder-Rupeliaan en van het Ledo-Brusseliaan, waarvan de voeding hoofdzakelijk in het zuiden plaatsvindt, zwenkt in westelijke richting, zodat de mogelijkheid bestaat van een bijkomende voeding. De benadering op basis van de analyse van varianten van het regionale referentiemodel werd toegepast om de modellering van de watervoerende lagen onder de Boomse Klei te verbeteren, omdat de piëzometrie, berekend met de referentieversie van het model, niet naar behoren strookte met de veldwaarnemingen (fig. 3.16).

ONDER-RUPELIAAN



LEDE-BRUSSEL



● Gemeten potentiaal

Figuur 3.16 Piëzometrie van de watervoerende lagen van het Onder-Rupeliaan en van het Ledo-Brusseliaan, berekend met de referentieversie van het regionale model (op precieze punten gemeten potentialen kunnen vergeleken worden met de berekende isopotentiallijnen).

Voor deze watervoerende lagen werden dus verschillende types van varianten bestudeerd waarin een bijkomende wateraanvoer mogelijk gemaakt wordt. De belangrijkste wijzigingen die hiervoor in het model werden ingevoerd, zijn:

- de verhoging van de algemene hydraulische geleidbaarheid van de Boomse Klei;
- een plaatselijk hydraulisch contact tussen de watervoerende lagen van het Mioceen en van het Onder-Rupeliaan via breuken die in het oostelijk deel van het gebied gelegen zijn. Deze breuken zijn gemodelleerd als zones die plaatselijk een grotere hydraulische geleidbaarheid vertonen (hoewel de in deze zones gemeten piëzometrie wijst op een hogere hydraulische gradiënt over de dikte van de Boomse Klei).

De resultaten die met deze varianten werden verkregen, onderschatten nog de piëzometrie van de watervoerende lagen van het Onder-Rupeliaan en van het Ledo-Brusseliaan. De beste overeenstemming tussen modelleringsresultaten en waarnemingen werd verkregen door aan de hydraulische geleidbaarheid van de Boomse Klei een waarde van $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ op te leggen. Dit is een duidelijk hogere hydraulische geleidbaarheid dan die welke is gemeten op en in de omgeving van de nucleaire zone van Mol-Dessel.

Bovendien kon aan de hand van gevoeligheidsstudies worden aangetoond dat geringe wijzigingen van de hydraulische-geleidbaarheidswaarde van de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan een significante invloed heeft op de berekende piëzometrie. In dit stadium van de studie was het dus duidelijk dat door de onzekerheden betreffende de geometrie en de hydraulische eigenschappen van de diepere watervoerende lagen het onmogelijk was de modellerings- en in het bijzonder de kalibratieoefening verder te zetten zonder een bijkomende inspanning te doen inzake de karakterisering van deze watervoerende lagen. Deze vaststelling leidde tot de uitvoering van de vier boringen te Zoersel, Rijkevorsel, Turnhout en Weelde (zie sectie 3.2.3.4). De resultaten van deze hydrogeologische verkenningscampagne zullen worden gebruikt voor een nieuwe versie van de regionale modellering, die gepland is voor 2002.

Gezien de tijdschalen waarmee rekening wordt gehouden in de veiligheidsevaluaties van een project van diepe berging van radioactief afval, is het van belang de mogelijke evoluties over lange periode van het bergingssysteem en zijn omgeving en met name evoluties van de waterstromingen in aanmerking te nemen. De invloed van de diverse mogelijke evoluties op de hydraulische gradiënt dwars door de Boomse Klei en op de gemiddelde stromingssnelheid binnen de watervoerende laag van het Neogeen, is geanalyseerd met behulp van de modellen van 1984 en 1994. De bestudeerde evoluties (tabel 3.6) houden meer bepaald rekening met de variaties van het hydrogeologische systeem in antwoord op natuurlijke klimaatschommelingen en houden in het bijzonder rekening met de wijzigingen van de infiltratie en van de zeespiegels, alsook met de insnijding van de rivieren die daaruit voortvloeit. De resultaten van deze studies zijn nog niet volledig verwerkt in de scenario-analyses die nodig zijn voor de evaluaties van de radiologische langetermijn veiligheid (zie hoofdstuk 4).

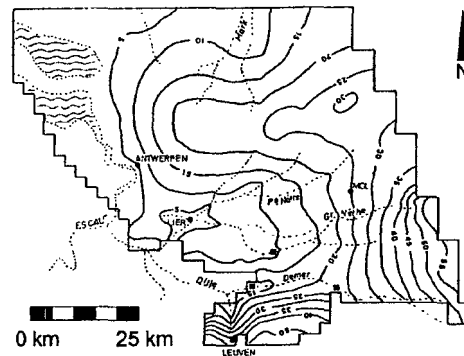
Tabel 3.6 Overzicht van de in aanmerking genomen mogelijke hydrogeologische evoluties.

Evoluties	Wijziging opgelegd aan het hydrogeologische systeem
Klimaat	Toename van de neerslag en van de resulterende infiltratie Afname van de meteorische neerslag (droogte)
Eustatische schommelingen	Stijging van de zeespiegel
Onderzeese erosie	Erosiegeul die de Boomse Klei bereikt
Denudatie	Algemene daling van de topografie
Fluviatiele erosie	Insijding van de rivieren
Diapirisme	Decompactie van de Boomse Klei

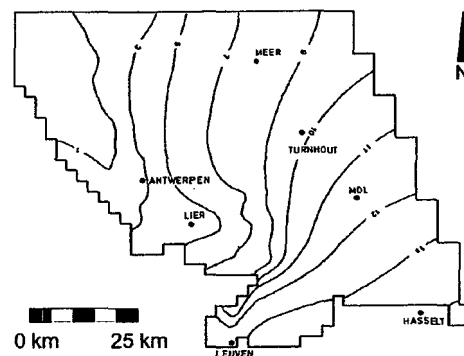
De simulaties gebeurden met behoud van een stationaire toestand en met inachtneming van het huidige hydrografische netwerk, omdat de invoering van wijzigingen van dit netwerk in het model, te arbitrair zou zijn geweest. Deze simulaties geven aan dat de scenario's droogte en fluviatiele erosie de grootste stromingswijzigingen teweegbrengen.

- In geval van droogte dalen de piëzometrische niveaus sterk met verschillende waarden over de bestudeerde streek. Dit resulteert in kleinere gradiënten binnen de watervoerende laag van het Neogeen (fig. 3.17). Voor het Onder-Rupeliaan worden geringere dalingen geconstateerd. In het algemeen worden de watervoerende lagen nog slechts gedraineerd over een zeer beperkte sectie van hun dagzoomgebied, stroomafwaarts van de rivieren, dicht bij hun samenvloeiing met de Schelde (dit is ten westen). De drainering door de Boomse Klei heen is verminderd, zelfs omgekeerd; zo worden in de regio van Mol-Dessel opstijgende bewegingen waargenomen.
- In het geval van een fluviatiele erosie, veroorzaakt door een daling van de zeespiegel, wordt de stroming sterk beïnvloed door lokale depressies als gevolg van de insijding van de rivieren (fig. 3.18).
- De fenomenen die de Boomse Klei plaatselijk meer doorlatend maken, zoals de aanwezigheid van een onderzeese erosiegeul of een decompactie van de klei door diapirisme, hebben slechts een lokaal effect op de stroming.

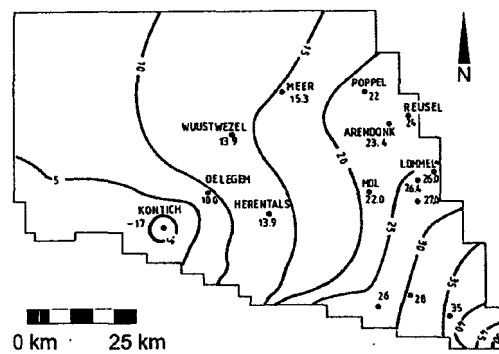
NEOGEEN (REFERENTIE)



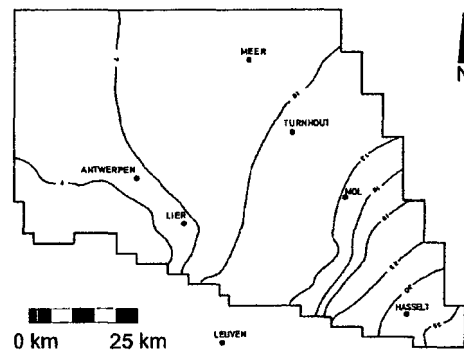
NEOGEEN (WIJZIGING)



ONDER-RUPELIAAN (REFERENTIE)

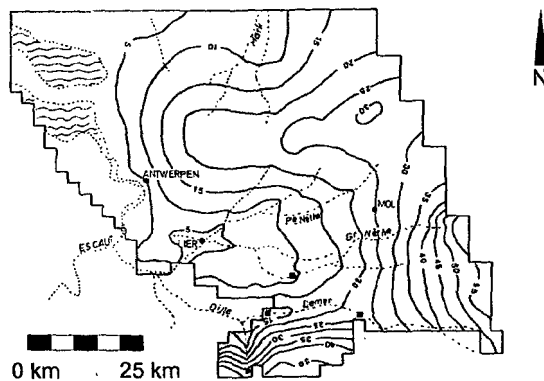


ONDER-RUPELIAAN (WIJZIGING)

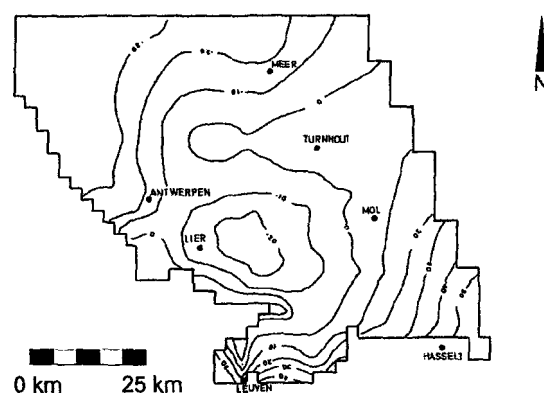


Figuur 3.17 Impact van een vermindering van de infiltratie met factor 3 (droogte) op de piëzometrie van het Neogeen (a: referentiesituatie; b: wijziging) en van het Onder-Rupeliaan (c: referentiesituatie; d: wijziging).

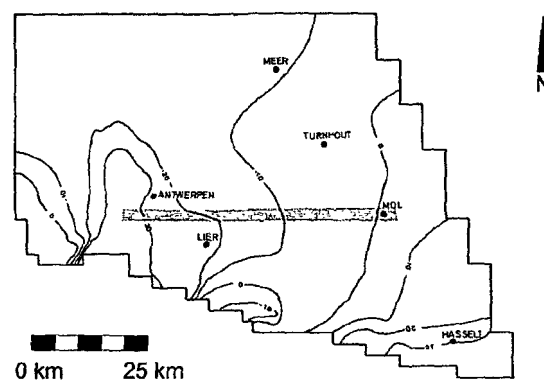
NEOGEEN (REFERENTIE)



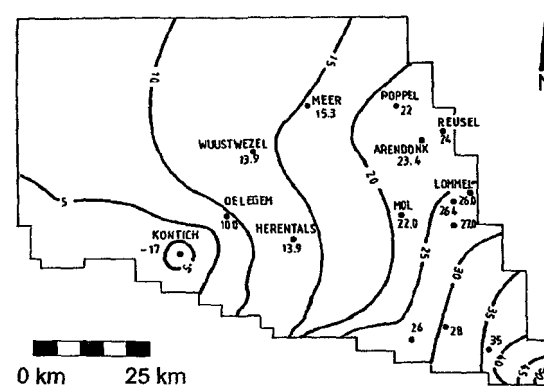
NEOGEEN (WIJZIGING)



ONDER-RUPELIAAN (REFERENTIE)



ONDER-RUPELIAAN (WIJZIGING)



Figuur 3.18 Impact van een fluviatiele erosie, veroorzaakt door een daling van de zeespiegel, op de piëzometrie van het Neogeen (a: referentiesituatie; b: wijziging) en van het Onder-Rupeliaan (c: referentiesituatie; d: wijziging).

De waarschijnlijke natuurlijke klimaatevolutie voor de volgende 125000 jaar, vertaald in significante infiltratieschommelingen, resulteert in een inversie van de verticale hydraulische gradiënt in de Boomse Klei met een identieke of verdubbelde waarde afhankelijk van de strengheid van het klimaat, en van de vertraging van de stromingen in de watervoerende lagen.

Een meer gedetailleerde beschouwing van deze klimatologische fenomenen en een evaluatie van hun impact op het hydrogeologische systeem konden nog niet plaatsvinden. Een dergelijke oefening impliceert namelijk:

- een nieuw concept van het hydrogeologische systeem waarvan de grenzen worden verlegd om het te modelleren gebied te vergroten ten opzichte van het bestaande regionale model;
- een te arbitraire aanpassing van de geometrie van de lagen en van het hydrografische netwerk. Dat is het geval voor het scenario van een glaciatie met ofwel de aanwezigheid van permanent bevroren grond (permafrost), die de infiltraties zou wijzigen, ofwel een uitbreiding van de ijskap tot in het noorden van België. Hoewel dit laatste scenario a priori minder waarschijnlijk is, zou het een aanzienlijke subglaciale erosie tot gevolg kunnen hebben, die, gecombineerd met de andere klimatologische gevolgen, het landschap en de hydrogeologie sterk zou wijzigen. Ook het in aanmerking nemen van een verzakking of van een continentale opheffing zou een herdefinitie van het hydrografische netwerk noodzakelijk maken.

3.2.4.3 Subregionaal model

Om de watervoerende laag van het Neogeen nader te bestuderen, heeft men aan het regionale model een model ontleend dat beperkter is in oppervlakte (1500 km^2) en in aantal geologische lagen: het subregionale model. De watervoerende laag van het Neogeen is in dat model opgesplitst in vijf watervoerende lagen, die in goed hydraulisch contact staan met elkaar (fig. 3.14). De benedengrens van het subregionale model wordt gevormd door de semi-watervoerende laag van Boom.

In tegenstelling tot de simulaties van het regionale model hebben de simulaties van het subregionale model de nieuwe code MODFLOW gebruikt. Aangezien het subregionale model meer watervoerende lagen in het Neogeen in aanmerking neemt dan het regionale model en de modellering van die watervoerende lagen nagenoeg driedimensionaal is, was het niet mogelijk de randvoorwaarden van het regionale model te gebruiken. Als randvoorwaarden werd dus zoveel mogelijk gebruikgemaakt van de scheidingslijnen van de waterlopen, zoals de Grote Nete en de Kleine Nete, alsook van de scheidingslijn tussen het Scheldebekken en het Maasbekken.

Het subregionale model is enerzijds gebruikt om de piëzometrie binnen de watervoerende laag van het Neogeen te berekenen (fig. 3.19) en te vergelijken met de metingen, en anderzijds om aan de hand van een gevoeligheidsstudie de drie volgende types van onzekerheden over deze watervoerende laag te bestuderen:

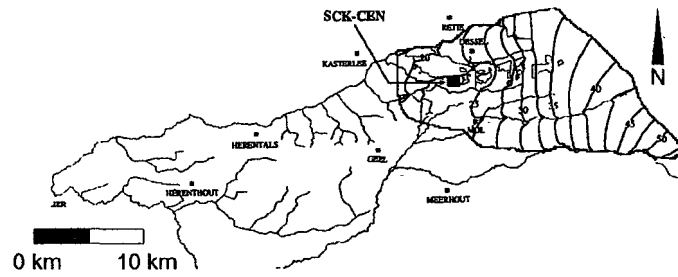
- de rol van de semi-watervoerende laag van Lillo–Kasterlee (zie ook het regionale model);
- de aan- of afwezigheid van afzettingen van het Quartair (onrechtstreeks bestudeerd door de eigenschappen van de Zanden van Mol te wijzigen);
- de invloed van de rivieren op de piëzometrie.

De twee belangrijkste conclusies van deze studies zijn enerzijds dat de piëzometrie voornamelijk wordt beïnvloed door het hydraulische contact tussen de rivieren en het grondwater, en anderzijds dat het al dan niet voorkomen van de kleilaag van Lillo–Kasterlee tussen de Zanden van Diest en van Kasterlee het stromingspatroon sterk beïnvloedt.

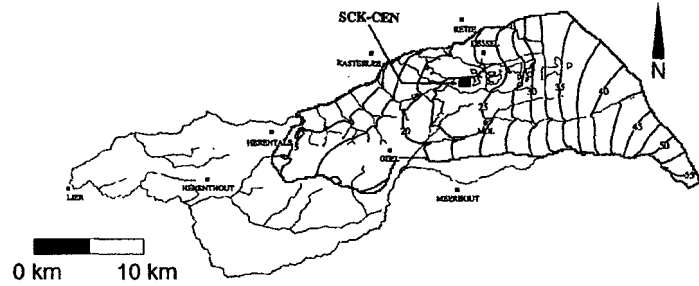
Het subregionale model heeft het bovendien mogelijk gemaakt een eerste resultaat te geven van het traject van de waterdeeltjes (*particle tracking*) die de Boomse Klei verlaten ter hoogte van een bergingsinstallatie die zich onder de nucleaire zone van Mol–Dessel bevindt. De resultaten geven aan dat alle stromingsbanen in de richting van de Witte Nete en de Kleine Nete gaan; zij blijven dus vrij goed in de omgeving van de referentiesite gelokaliseerd. (Deze resultaten zijn volledig analoog aan die van de trajectenbepaling die is uitgevoerd met het lokale model (fig. 3.20).) De aanwezigheid van de kleilaag van Lillo–Kasterlee brengt een vertraging van de stromingen met zich mee en wijzigt de verticale trajecten, maar met behoud van dezelfde afvoerpunten.

PIEZOMETRISCHE NIVEAUS [mTAW]

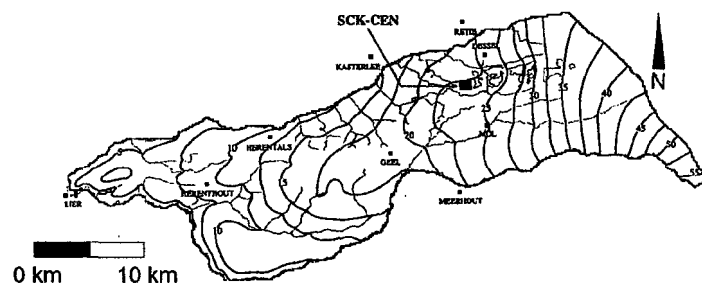
LAAG 1



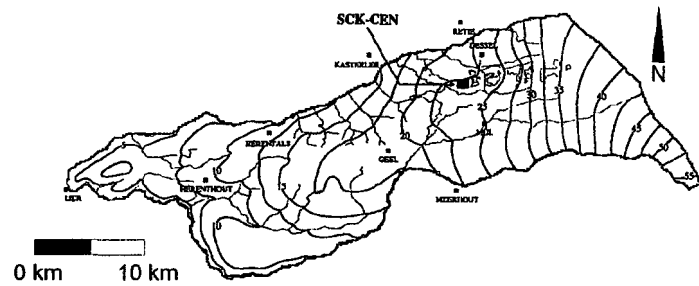
LAAG 2



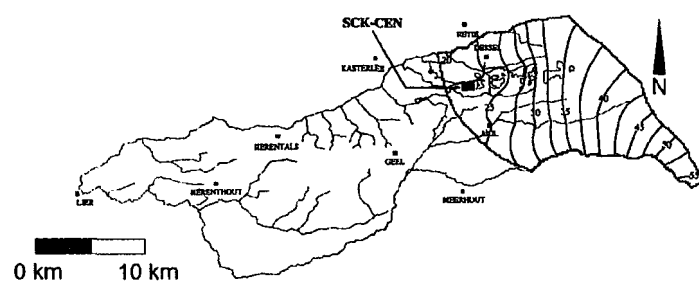
LAAG 3



LAAG 4

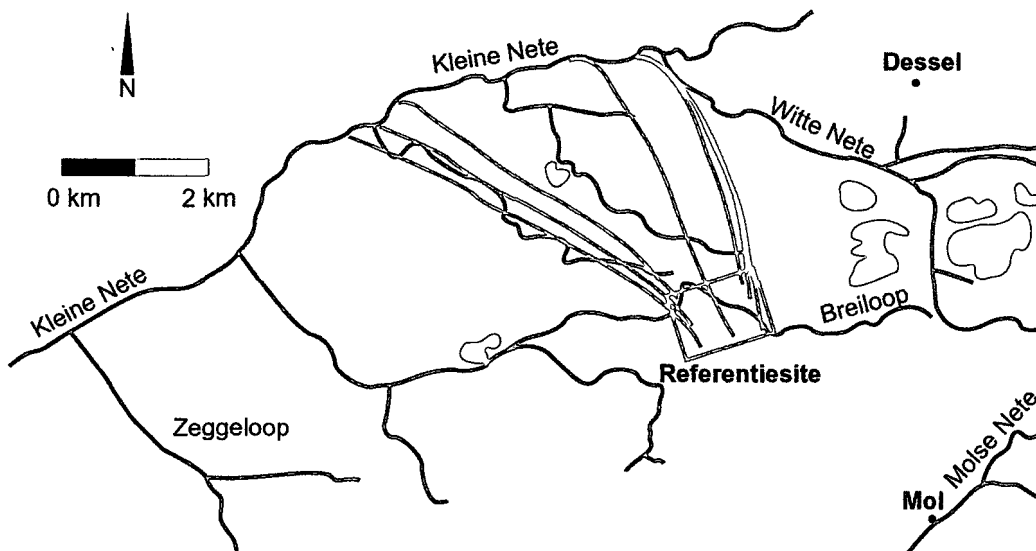


LAAG 5

**Figuur 3.19** Piëzometrie verkregen met het subregionale model.

3.2.4.4 Lokaal model

De conclusies betreffende het lokale karakter van de afvoerpunten die worden verkregen met het subregionale model, hebben geleid tot de ontwikkeling van een lokaal model, dat een fijnere discretisering mogelijk maakt en tevens bruikbaar is voor de migratieberekeningen die nodig zijn voor de evaluaties van de radiologische langetermijn veiligheid (zie sectie 4.3.2). Dit model gebruikt dezelfde rekencode als het subregionale model en houdt rekening met hetzelfde aantal geologische lagen en dezelfde randvoorwaarden. De trajecten van de waterdeeltjes vanaf de referentiesite onder de nucleaire zone van Mol-Dessel bevestigen het lokale karakter van de mogelijke afvoerpunten (fig. 3.20). Dit is een van de belangrijke verworvenheden van het onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma 1990–2000 inzake hydrogeologie.



Figuur 3.20 Vaststelling, dankzij het lokale model, van de trajecten van de waterdeeltjes die de referentiesite langs boven verlaten.

3.2.4.5 Perspectieven en aanbevelingen

Om te trachten de vastgestelde incoherentie tussen de plaatselijk gemeten hydraulische geleidbaarheidswaarden van de Boomse Klei ($10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) en de hydraulische geleidbaarheidswaarden van de Boomse Klei die afkomstig zijn van één van de varianten van de regionale hydrogeologische modellering ($10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; zie sectie 3.2.4.2) op te lossen, en om het eventuele vervolg van het programma voor geologische en hydrogeologische karakterisering van de gastformatie en haar omgeving te kunnen definiëren, is prioriteit gegeven aan de voortzetting van de oefeningen inzake hydrogeologische modellering, en in het bijzonder:

- aan de ontwikkeling van een nieuwe versie van het regionale hydrogeologische model. Dit om met enerzijds rekening te houden met de semi-watervoerende lagen en om anderszijds rekening te houden met de verticale en horizontale heterogeniteiten inzake hydraulische geleidbaarheid binnen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan. Een nieuwe evaluatie zal noodzakelijk zijn om de mogelijkheden na te gaan van een ruimtelijke uitbreiding en van de invloed van de schaal waarop de verschillende hydraulische geleidbaarheidsmetingen werden verricht;
- aan de verbetering van de kalibratie van het regionale model via een betere evaluatie van de watertoevoer en -afvoer (voeding, oppomping van grondwater, rechtstreekse contacten via breuken), hetgeen ook de mogelijkheid zou moeten bieden om de gevoeligheid van het hydrogeologische systeem voor verstoringen teweeggebracht door grondwaterexploitatie te analyseren;
- aan de versterking van de integratie van de drie hydrogeologische modellen, met name door een harmonisering van de rekencodes en van de randvoorwaarden;
- aan het bevestigen van de invloed van de rivieren op de waterstromingen in de gehele watervoerende laag van het Neogeen alsook van het lokale karakter van de afvoerpunten van de stromingen tussen de Boomse Klei en de biosfeer.

Hydrogeochemische studies zouden bovendien de resultaten van de hydrogeologische modellen kunnen helpen verifiëren. Op termijn kan een koppeling tussen grondwaterstromingen en hydrogeochemie worden overwogen.

Ten slotte moet een verdere analyse worden gemaakt van de veranderingen in de grondwaterstroming en de hydrogeochemie van de Boomse Klei en haar bovenliggende en onderliggende formaties welke zouden kunnen voortvloeien uit gewijzigde milieu-omstandigheden — zoals klimaatwijzigingen die kunnen leiden tot glaciale of periglaciale omstandigheden (permafrost) of integendeel tot een opwarming en aldus een verhoging van de zeespiegel. Dit is namelijk één van de grondslagen van de analyse van de langetermijn evolutiescenario's van het bergingssysteem en zijn omgeving, analyse die nodig is voor de veiligheidsevaluaties (zie hoofdstuk 4).

3.3 De bergingsinstallatie voor diepe berging

De in België ontwikkelde referentiearchitectuur van de bergingsinstallatie voor diepe berging, dat wil zeggen de geometrie van de installatie en de voor haar bouw gebruikte materialen, is aangepast op basis van de aanbevelingen van de Evaluatiecommissie-SAFIR (1990). De belangrijkste conceptuele grondslagen zijn het voldoen aan alle veiligheidsvereisten en in het bijzonder de langetermijn veiligheidsfuncties (zie sectie 2.2), alsook het voldoen aan de vereisten die eigen zijn aan de gastformatie op de beoogde diepte, in casu de Boomse Klei onder de nucleaire zone in Mol-Dessel (zie sectie 2.3); deze site is tot op heden geen bergingssite, maar wel een referentiesite voor de methodologisch onderzoek en ontwikkeling (zie sectie 3.2.1). De referentiearchitectuur, evolueert voortdurend, en betrof aanvankelijk alleen het verglaasde afval, aangezien tot het SAFIR-rapport, de overheersende werkhypothese de volledige opwerking van alle bestraalde splijtstof was. Hierdoor was het verglaasde afval de klasse die op radiologisch en thermisch vlak de zwaarste eisen met zich meebracht. Voor dit afval verkeert de referentiearchitectuur zich bijgevolg in het verst gevorderde ontwikkelingsstadium. Sommige aspecten ervan zijn nadien weliswaar nog op preliminaire wijze gewijzigd, om rekening te houden met de specifieke kenmerken van de bestraalde splijtstof. De uitbreiding van de bergingsarchitectuur naar de andere klassen of groepen van klassen van afval van de geologische groep ten slotte is gepland voor een latere fase. Op termijn zal de gehele bergingsarchitectuur de oplossingen groeperen die zijn ontwikkeld voor elke afvalklasse of coherente groep van afvalklassen, binnen een mogelijk uniek bergingssysteem.

Het ontwerp van de installatie van diepe berging steunt zoveel mogelijk op het gebruik van gekende materialen en gangbare en voldoende beproefde technieken; dit houdt geen enkel vooroordeel in over de ontwikkeling van nieuwe technologieën of de verbetering van diegene die momenteel beschikbaar zijn. Het ontwerp steunt eveneens op de ervaring die stap voor stap is verzameld met de bouw van het ondergrondse laboratorium HADES in de Boomse Klei in Mol, en zal speciaal voordeel trekken uit het PRACLAY demonstratie-experiment op ware grootte, dat momenteel in voorbereiding is. Uiteraard zijn bergingsarchitectuur en exploitatie van de bergingsinstallatie eveneens nauw met elkaar verbonden.

3.3.1 De referentiearchitectuur

De in België ontwikkelde referentiearchitectuur voor de installatie van diepe berging kan voorgesteld worden als een netwerk van rechtlijnige galerijen dat in het mediaanvlak van de laag Boomse Klei ligt, op ongeveer 240 meter onder de grond. Twee schachten van ongeveer 6 meter nuttige diameter, die aan hun basis verbonden zijn door een verbindingsgalerij van 400 meter lang en 2 meter nuttige diameter die eveneens als noodgalerij dient, geven toegang tot twee hoofdgalerijen van 3,5 meter nuttige diameter die loodrecht staan op de verbindingsgalerij. Op deze H-vormige ruggegraat zijn bergingsgalerijen voorzien, waarin het radioactieve afval moet komen: aan de ene kant van de verbindingsgalerij de bergingsgalerijen voor het verglaasde afval en de bestraalde splijtstoffen, en aan de andere kant die voor het andere afval van de geologische groep. Het vlak van de bergingsinstallatie

volgt de helling van de kleilaag, die 1 tot 2 % bedraagt, hetgeen mogelijk is door de hoofdgalerijen (respectievelijk de bergingsgalerijen) te richten volgens deze helling en de bergingsgalerijen (respectievelijk de hoofdgalerijen) horizontaal te richten in het mediaanvlak van de kleilaag, of door deze twee mogelijkheden zelfs te combineren. De keuze van de diameters van de galerijen en de schachten is het resultaat van zowel praktische, technische, economische als veiligheidsoverwegingen: ze moeten groot genoeg zijn opdat de bouw- en opvulmaterialen en de afvalcolli in het gewenste tempo kunnen worden aangevoerd, zonder daarom overgedimensioneerd te zijn, wat de door de uitgraving verstoorte kleizone onnodig zou vergroten en de bouw- en opvulkosten zou verhogen.

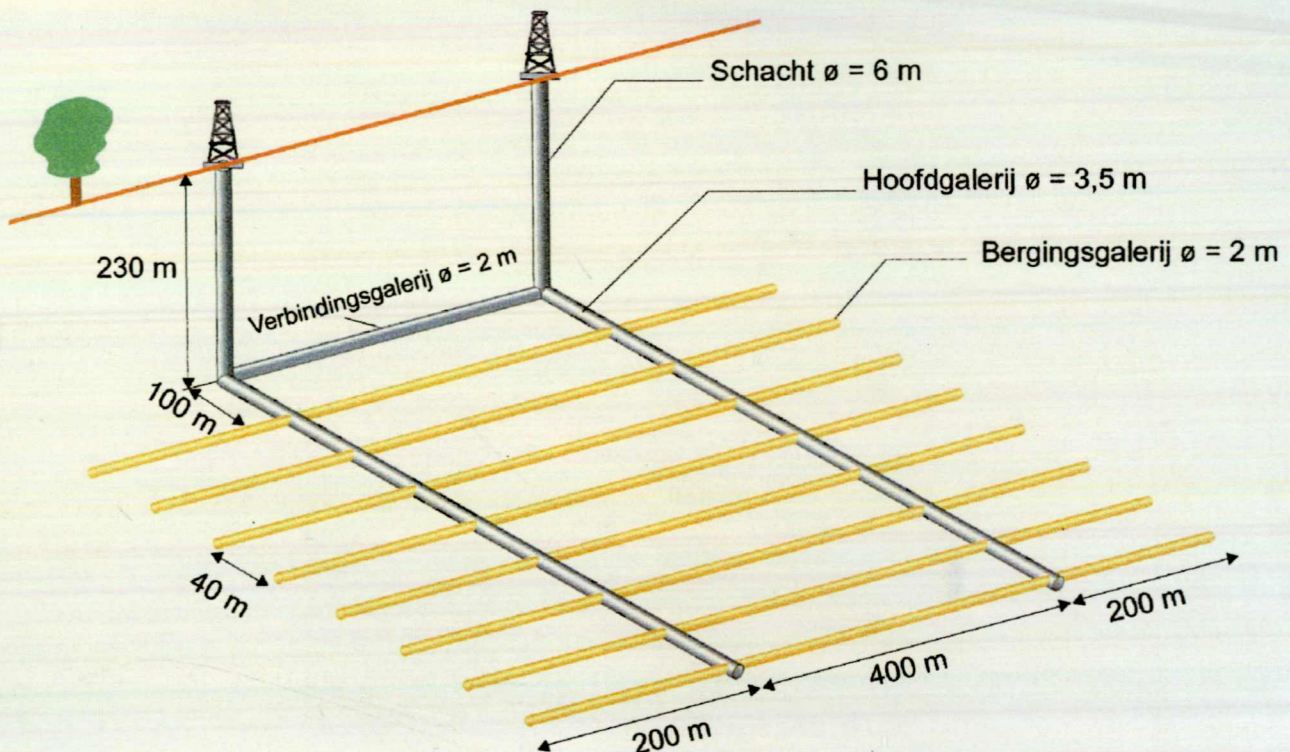
De huidige referentiearchitectuur vertoont enkele fundamentele conceptuele verschillen met de bergingsarchitectuur die werd voorgesteld in het SAFIR-rapport:

- de *scheiding* van het verglaasde afval en de bestraalde splijtstoffen van het andere afval van de geologische groep, om fysico-chemische interacties die nadelig zouden kunnen zijn voor de langetermijn veiligheid, te voorkomen (verhoging van de robuustheid), om de thermische berekeningen te vergemakkelijken en in het algemeen om meer overtuigende veiligheidsevaluaties mogelijk te maken;
- het gebruik van voldoende corrosievaste *waterdichte verpakkingen* voor de primaire colli met verglaasd afval (de mantels, fig. 3.21) en voor de bestraalde splijtstoffen, om de functie fysische insluiting van de radionucliden ten minste tijdens de thermische fase van het bergingssysteem te verzekeren, en aldus te vermijden dat rekening moet worden gehouden met de complexe fenomenen van interacties tussen componenten en van radionuclidenmigratie onder een temperatuurgradiënt (verhoging van de robuustheid). De thermische fase, dat wil zeggen de periode gedurende welke de aanwezigheid van het afval een thermische gradiënt van ruim tiental graden in vergelijking met de temperatuur van de niet-verstoorde klei oplegt in het nabije veld (ongeveer 16°C), bedraagt ongeveer 300 jaar voor het verglaasde afval en ongeveer 2000 jaar voor bestraalde splijtstof van het UO₂-type.
- het gebruik van waterdichte en voldoende corrosievaste *bergingsbuizen*, om de plaatsing van het verglaasde afval en de bestraalde splijtstof in de bergingsgalerijen te vergemakkelijken.



Figuur 3.21 De mantel
gebruikt voor de demonstraties
in de PRACLAY-hal.

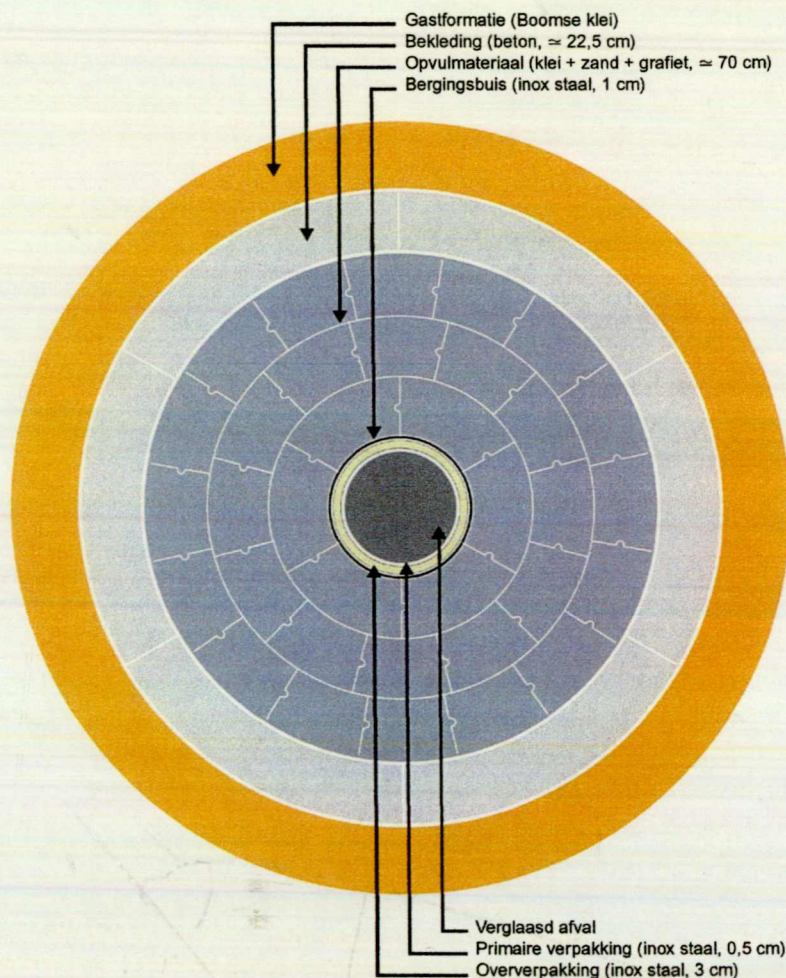
De referentiearchitectuur voor het *verglaasde afval* (fig. 3.22) gaat uit van de hypothese van een totaal van 3915 te bergen colli, dit is 420 colli die beantwoorden aan de bestaande opwerkingscontracten en 3495 colli die zouden resulteren uit eventuele nieuwe contracten. (Als België de opwerkingsoptie definitief afwijst, zal het bestaande verglaasde afval worden opgenomen in de bergingsoplossing die wordt ontwikkeld voor de bestraalde splijtstof). In het geval van verglaasd afval vormen de twee hoofdgalerijen een rechte hoek met de acht bergingsgalerijen van 800 meter lang en 2 meter nuttige diameter. Deze bergingsgalerijen zijn verdeeld in drie segmenten: twee segmenten van 200 meter aan de buitenkant van de hoofdgalerijen en één van 400 meter tussen de hoofdgalerijen in. De eerste bergingsgalerij bevindt zich op 100 meter van de verbindingsgalerij; de volgende hebben een tussenruimte van 40 meter, opdat de gemiddelde temperatuurverhoging in de watervoerende laag van het Neogeen, die NIRAS bij gebrek aan wettelijke norm op 6°C heeft vastgesteld, zou worden gerespecteerd. De installatie die bestemd is voor de berging van het verglaasde afval, zou dus een oppervlakte van 0.224 km² beslaan.



Figuur 3.22 De referentie-bergingsarchitectuur voor diepe berging van verglaasd afval.

Overeenkomstig het multibarrière principe voorziet het ontwerp van de bergingsgalerijen in een opeenvolging van concentrische omhulsels — de kunstmatige barrières — rond de afvalcolli (fig. 3.23). Concreet wordt het primaire collo met verglaasd afval, omgeven door zijn mantel, in een buis van roestvast staal geduwd, de "bergingsbuis" genoemd, die gecenterd is op de as van de galerij. De mantels zijn aan elk uiteinde voorzien van vier wielen die onder een hoek van 90° zijn gemonteerd en voorzien zijn van permanente remmen om elke ongewenste verplaatsing van de colli te vermijden, alsook van een grijpkop die axiaal gemonteerd is op één van de uiteinden. Elke bergingsbuis bestaat uit stukken die waterdicht aan elkaar zijn gelast ter voorkoming van contact tussen het water en het afval, wat damp en diverse geochemische fenomenen zou kunnen genereren. De ruimte tussen de buis en de galerijbekleding is vooraf opgevuld met een opvulmateriaal dat van nature of indien nodig kunstmatig is gehydrateerd vóór de berging van het afval, om ervoor te zorgen dat het opvulmateriaal opzwellt en aldus de interstitiële holten opvult. Dit materiaal is gemaakt van blokken die geprefabriceerd zijn uit een mengsel van klei van het bentoniettype (FoCa-klei, een natuurlijk product dat voor 80 % bestaat uit zwellende klei), zand en grafiet om de warmtegeleidbaarheid van het mengsel te verhogen en aldus beter de warmte af te voeren die door het afval wordt gegenereerd. Elke buis wordt aan de kant van de hoofdgalerij gesloten door een voorlopige afschermdende stop om de operatoren te beschermen tegen de ioniserende straling die worden uitgezonden door de reeds geborgen colli. Deze stop kan vervangen worden door een permanent systeem wanneer de buis volledig gevuld is.

Bovendien wordt elke gevulde bergingsgalerij gesloten met een stop op basis van zwellende FoCa-klei en door een andere stop die de zweldruk moet weerstaan. De wanden van de galerijen ten slotte alsook de wanden van de toegangsschachten zijn bekleed met geprefabriceerde betonblokken.



Figuur 3.23 Dwarsdoorsnede van een bergingsgalerij voor verglaasd afval waarop het principe van de meervoudige barrières te zien is.

De referentiearchitectuur voor de berging van de *bestraalde splijtstoffen* (fig. 3.24) resulteert uit een extrapolatie van de voor verglaasd afval ontwikkelde architectuur naar langere colli (5 meter in plaats van 1.6 meter) die minder snel afkoelen. De belangrijkste verschillen zijn de volgende:

- om het transport van langere colli te vergemakkelijken wordt de hoek tussen hoofdgalerijen en bergingsgalerijen van 90° naar 45° verminderd;
- om te vermijden dat de gemiddelde temperatuur in de watervoerende laag van het Neogeen met meer dan 6°C stijgt, wordt een tussenruimte gelaten tussen de galerijen (110 meter in plaats van 40 meter);

- om te vermijden dat de gemiddelde temperatuur in de watervoerende laag van het Neogeen met meer dan 6°C stijgt, wordt het aantal colli aangepast aan het calorische vermogen dat wordt aanvaard per lopende meter galerij (vier bergingsbuizen per galerij voor UO₂-splijtstof, die in een vierkant rond de as van de galerij worden geplaatst; één enkele bergingsbuis in het geval van MOX-splijtstof, gecentreerd op de as van de galerij).

Het netwerk van galerijen zou 800 meter galerijen omvatten voor de 420 mantels met verglaasd afval en 10.8 km galerijen voor de 9859 verwachte bestraalde-splijtstofelementen. Het zou dus een oppervlakte van ongeveer 1.3 km² innemen.

De verschillende componenten van de bergingsinstallatie vervullen elk één of meer functies (tabel 3.7 en fig. 2.5). Sommige componenten verzekeren de veiligheidsfuncties fysische insluiting, en vertraging en gespreid vrijkomen, en worden in aanmerking genomen in de evaluaties van de radiologische langetermijn veiligheid, dit is de radiologische veiligheid na sluiting van de berging (zie hoofdstuk 4). Deze componenten zijn de conditioneringsmatrices (glas en UO₂) omwille van hun vertragende invloed op de uitloging (functie R1), de mantel omwille van zijn waterdichtheid (functie C1), alsook het afdichtingsmateriaal van de galerijen en schachten, dat de radionucliden tegenhoudt (functie R2). Andere componenten, zoals de primaire verpakking en de bergingsbuis, spelen een veiligheidsrol op korte termijn, en potentieel op langere termijn. Hun — reële — bijdrage tot de veiligheid wordt niet in aanmerking genomen in de veiligheidsevaluaties, maar vertegenwoordigt in zekere zin een veiligheidsreserve. Sommige componenten ten slotte zijn noodzakelijk om de mechanische stabiliteit van de bergingsinstallatie en bijgevolg van de gastformatie te verzekeren (zoals de bekleding van de galerijen en van de schachten en het opvulmateriaal), om de berging van het afval mogelijk te maken (zoals de bergingsbuis), of om de operationele veiligheid te verzekeren (zoals het afsluitings- en afschermingssysteem van de bergingsbuis). Geen enkele van deze componenten mag de prestaties van de andere componenten en in het bijzonder de prestaties van de componenten die de langetermijn veiligheidsfuncties vervullen, negatief beïnvloeden. Elke component moet bijvoorbeeld chemisch en mechanisch compatibel zijn met de andere componenten, met andere woorden mag de corrosie ervan niet bevorderen en mag geen aanzienlijke mechanische verstoringen erin teweegbrengen. Ten slotte mag geen enkele component door zijn aanwezigheid de migratie van de radionucliden naar de biosfeer bevorderen.

Het andere afval van categorie C ten slotte, dat minder warmteafgevend is, en het afval van categorie B zouden per klasse worden gestapeld in galerijen van 3 tot 6 meter nuttige diameter en de onge vulde ruimten tussen de vaten zouden worden gevuld met beton of een gelijkaardig materiaal. Het aantal vaten dat is toegestaan per galerijsectie, zal onder meer afhangen van de noodzaak om de gemiddelde temperatuurstijging in de watervoerende laag van het Neogeen te beperken tot 6°C alsook van het totale percentage onge vulde ruimte in het afval. Dit totale percentage onge vulde ruimte zou niet meer mogen bedragen dan 20 %, om het risico op het samendrukken van de verpakkingen en van het opvulmateriaal onder druk van de gastformatie, en dus haar uitgestelde ontspanning, die synoniem is met verstoring, zoveel mogelijk te beperken.

Tabel 3.7 Belangrijkste kenmerken van de bergingsarchitectuur die wordt overwogen voor het verglaasde afval, functies verzekerd de radiologische langetermijn veiligheid voor het normale-evolutescenario (**C1** = waterdichtheid; **R1** = weerstand aan uitloging;

Componenten	Kenmerken	Veiligheidsfuncties tijdens de vlg. fases:				Andere Functies
		operationele	therm.	isolat.	geolog.	
Matrix	Borosilicaatglas	immobilisatie	–	R1	R1	terugneembaarheid
Primaire verpakking (gelaste cilindervormige container)	roestvast staal AISI 309 hoogte: 1.34 m buiten Ø: 43 cm dikte: 5 mm gemiddeld vol gewicht: 492 kg	mechanische weerstand	C1	R2	–	behandeling, terugneembaarheid
Mantel (gelaste cilindervormige container uitgerust met 2 x 4 wieltjes op 90°)	roestvast staal AISI 316L hMo hoogte: 1.58 m binnen Ø: 46 cm dikte: 30 mm gemiddeld vol gewicht: 1 000 kg	radiologische bescherming	C1	R2	–	behandeling, vermindering van het lineaire warmte- vermogen, terugneembaarheid
Bergingsbuis	roestvast staal AISI 316L hMo binnen Ø: 55 cm dikte: 10 mm lengte stukken: 3 à 4 m lengte segmenten: 200 of 400 m	–	C1	R2	–	berging, terugneembaarheid
Opvulmateriaal van de bergingsgalerijen	geprefabriceerde blokken bestaande uit een mengsel van zwellende FoCa-klei van het bentoniettype (60 %), zand (35 %) en grafiet (5 %)	ondersteuning	C2	R2	R2	warmteafvoer
Bekleding van de bergingsgalerijen	geprefabriceerde betonblokken minimumdikte: 22.5 cm	ondersteuning	–	–	–	terugneembaarheid
Galerijen	binnenØ tot lengte tussenruimte					
bergingsgalerijen	2 8 x 800 [m] 40 [m]	–	–	–	–	berging
hoofdgalerijen	3.5 380 400	–	–	–	–	aanvoer
verbindingsgalerij	2 400 –	–	–	–	–	verbinding
Toegangsschacht	binnen Ø: 6 m	–	–	–	–	aanvoer
Bekleding van de toegangsschachten	beton en asfalt	ondersteuning waterdichtheid	–	–	–	terugneembaarheid
Opvulmateriaal van de rest van de installatie	mengsel van zwellende FoCa-klei en zand	ondersteuning	C2	R2	R2	–
Afdichtingsmateriaal van de galerijen en schachten	enerzijds mengsel van zwellende FoCa-klei en zand anderzijds beton	radiologische bescherming mechanische weerstand	C2	R2	R2	–

door de hoofdcomponenten van het systeem en zijn omgeving en, **met vet**, functies in aanmerking genomen in de evaluaties van **R2** =diffusie en retentie. De beperking van de toegankelijkheid L is niet opgenomen.)

Belangrijkste studies die nog nodig zijn om de referentiearchitectuur te bevestigen

bevestigen dat de duurzaamheid van de glasmatrix duidelijk hoger is dan 10000 jaar

bevestigen van de keuze van het materiaal en bepalen van zijn minimumdikte

bepalen van de fabricagemethode, de plaats en methode van het vullen, alsook van de methode voor het dichtlassen

uitmaken of er tussen de primaire verpakking en de mantel een vulmateriaal, zoals glasfrit, moet worden geïnjecteerd om de

warmteafvoer te verbeteren en de mechanische weerstand te verhogen én tevens de degradatie van de glasmatrix te verminderen

bepalen of het gebruik van mantels het mogelijk maakt het bergingssysteem te verklaren voor "zone niet gecontroleerd op radiologische besmetting"

bevestigen van de keuze van het materiaal en van de dimensionele kenmerken van de vakken en vaststellen van de spellingen

bestuderen hoe de stukken te plaatsen en dan in een perfecte uitlijning te lassen en hoe de buis te sluiten aan haar uiteinde

nagaan of de buis tot het einde van de eventuele terugneembaarheidsperiode waterdicht blijft en niet vervormt en een voldoende effen en

proper binnenoppervlak behoudt om het mogelijk te maken een mantel te duwen of te trekken over 200 m

bepalen van de ruimte die tussen twee mantels moet worden gelaten opdat zij vrij kunnen uitzetten onder invloed van de warmte

bestuderen van het gedrag van de buis onder invloed van de thermische belasting en van een niet-homogene zwellingsdruk

bepalen of een vulmateriaal (glasfrit) tussen de mantel en de buis moet worden geïnjecteerd

bevestigen van de keuze van het opvulmateriaal en optimaliseren van de samenstelling ervan, met name om een voldoende thermische

geleidbaarheid en een homogene zwellingsdruk te verkrijgen die de klei niet verstoort en de buis niet samendrukt

bepalen in welke vorm (blokken, korrels enzovoort) het opvulmateriaal aan te voeren in de galerijen en hoe het te plaatsen

het risico bestuderen dat de gevulde buis zich onder haar eigen gewicht in het opvulmateriaal boort

de natuurlijke hydratatiekinetica en eventueel gebruik van kunstmatige hydratatie bestuderen om de gewenste zwellingsdruk te bereiken

de keuze van het materiaal bevestigen, zijn samenstelling optimaliseren en de afmetingen van de blokken bepalen

de maximale afstand tussen de blokken en het werkfront alsook de overuitgraving bepalen

een evacuatieplan opstellen in geval van ramp

de kenmerken bepalen die moeten worden gegeven aan de verbindingsskamers tussen de bergingsgalerijen en de hoofdgalerijen

de minimumafstand bevestigen tussen de verbindingsgalerij en de eerste bergingsgalerij

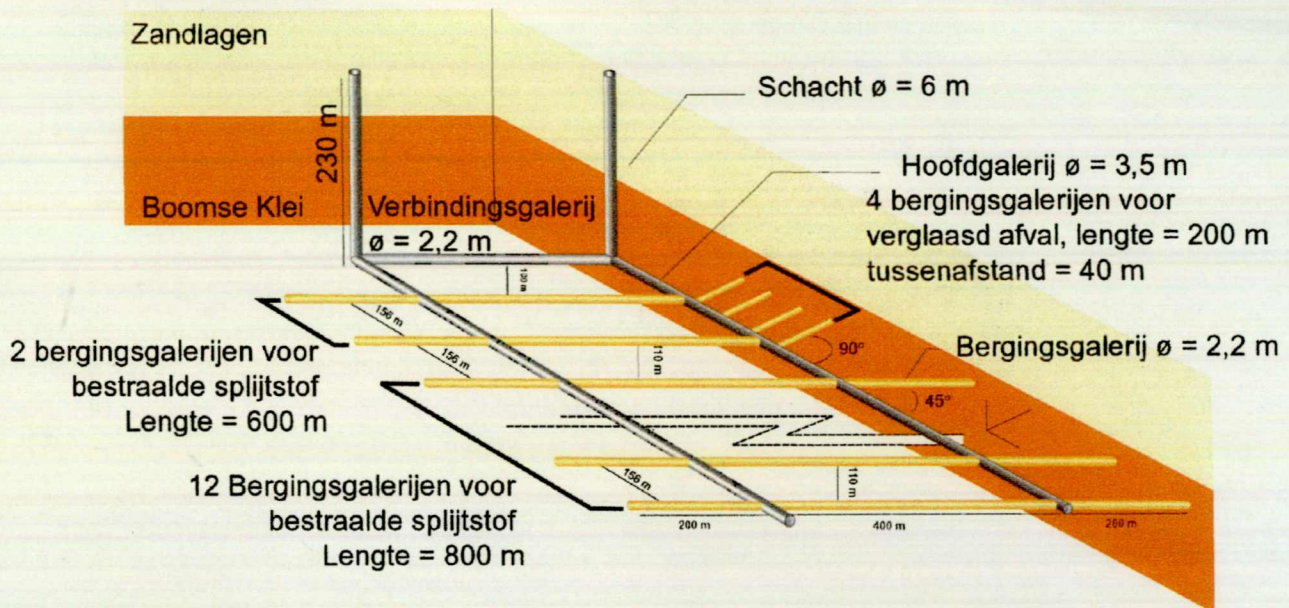
de diameter bevestigen

—

—

de opvulmateriaalkeuze bevestigen, de samenstelling ervan optimaliseren en de plaatsingswijze preciseren

de architectuur en de samenstelling van de stoppen van de galerijen en van de schachten bestuderen



Figuur 3.24 De referentie-diepebergingsarchitectuur voor bestraalde splijtstof.

3.3.2 De verschillende operationele etappes van een installatie van diepe berging

De operationele fase van een installatie van diepe berging kan worden opgedeeld in vier hoofdetappes: de bouw, de exploitatie (dat wil zeggen de berging van het afval, eventueel gevolgd door een wachtperiode vóór de sluiting), de sluiting en de institutionele controle. Deze operationele fase moet van nabij worden gevolgd: dat is de *monitoring*, ook toezicht genoemd, van het bergingssysteem.

De monitoring van het bergingssysteem bestaat in het observeren en meten, permanent of discreet, bovengronds en in de diepte, van de parameters die een evaluatie mogelijk maken van het gedrag van sommige van zijn componenten en van de impact van de installatie en naar exploitatie op de omgeving. Het bergingssysteem mag uiteraard de werking van de bergingsbarrières niet verstoren en moet het risico van menselijke indringingen zo goed mogelijk verhinderen. De monitoring begint vóór de bouw van de bergingsinstallatie en gaat door tot het einde van de institutionele-controlefase. Hij beoogt de vier volgende doelstellingen:

- vóór de bouw van de bergingsinstallatie, de parameters en de natuurlijke processen die de bergingssite en zijn omgeving karakteriseren, bepalen. Deze karakterisering moet het mogelijk maken zowel later de aandacht te vestigen op de wijzigingen ten opzichte van de beginsituatie die zijn veroorzaakt door de aanwezigheid en de exploitatie van de bergingsinstallatie, als de nodige informatie te verstrekken voor de verdere ontwikkeling van de bergingsarchitectuur en de veiligheidsevaluaties.

Safeguards

Vereisten vastgesteld door de internationale non-proliferatie-verdragen inzake splijtstoffen die de wederrechtelijke toe-eigening van splijtstoffen voor om het even welk doel beogen te verhinderen. Deze vereisten omvatten met name de boekhouding en de opspoorbaarheid van de geborgen splijtstoffen (zie ook sectie 2.2.4).

- vanaf het begin van de bouwfase tot het einde van de fase van institutionele controle, de impact evalueren van de bergingsinstallatie op het exploitatiepersoneel, het publiek en de omgeving om *zich te vergewissen van de naleving van de geldende normen* en in voorkomend geval de nodige aanpassingen aan te brengen, alsook *het gedrag van de diverse componenten van het bergingssysteem vergelijken met het gedrag dat werd verondersteld* in de uitgevoerde evaluaties.
- na enkele jaren of enkele tientallen jaren exploitatie *een beslissingsbasis bieden* die steunt op de ervaring, en die toelaat de aspecten van de architectuur met nog zekere aanpassingsmogelijkheden te optimaliseren, en die aan alle betrokken partijen concrete en overtuigende argumenten voorlegt telkens als er belangrijke beslissingen moeten worden genomen, waaronder in het bijzonder de beslissing tot sluiting van het bergingssysteem.
- in het geval van een bergingsinstallatie die grote hoeveelheden splijtstoffen bevat, *zich overeenkomstig de vereisten van het IAEA inzake safeguards vergewissen van de afwezigheid van wederrechtelijke toeëigening van deze splijtstoffen*.

3.3.2.1 Bouw

De oorsprong van de bouw van het ondergrondse laboratorium HADES, dat zich onder de site van het SCK-CEN in Mol bevindt, gaat terug tot de jaren zeventig. De studie van deze bouw paste immers in het kader van het eerste onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma (1975–1979) van het SCK-CEN betreffende de berging van afval van categorieën B en C. Dit programma had ondermeer tot doel te evalueren in welke mate het mogelijk was op een diepte van om en bij de 220 meter in de laag Boomse Klei in Mol een netwerk van hoofdgalerijen te bouwen van waaruit het mogelijk zou zijn de afvalcolli definitief te bergen opdat deze colli de mens en het milieu niet zouden dreigen bloot te stellen aan hogere stralingsdoses dan die welke redelijkerwijze aanvaardbaar zijn. Daarnaast moest HADES het mogelijk maken een reeks experimenten in situ te realiseren ter aanvulling van de bovengrondse experimenten op boorkernen die waren genomen bij de proefboringen.

Overeenkomstig haar opdracht op het vlak van langetermijn beheer van het radioactieve afval, heeft NIRAS vanaf 1985 deelgenomen aan het project van het SCK-CEN en heeft zij de Boomse Klei onder de site in Mol gehandhaafd als referentieformatie voor haar onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma inzake berging en dus in het bijzonder voor de evaluatie van nieuwe bouwtechnieken. De uitgevoerde uitbreidingswerken aan de ondergrondse installatie HADES zijn nog altijd bezig. Ze hebben aangetoond dat het mogelijk is in alle veiligheid schachten in de watervoerende lagen te graven na die te hebben bevroren, en de nodige ondergrondse installaties voor berging in de Boomse Klei te graven zonder de Boomse Klei te bevriezen. In combinatie met de resultaten van de evaluaties van de langetermijn veiligheid hebben zij ook het belang onderstreept van het beperken van de verstoringen die de uitgraafwerken veroorzaken in de klei, aangezien de klei de belangrijkste barrière vormt ten aanzien van de migratie van de radionucliden. Thans verkeren de werken in het stadium van de technische en economische optimalisering, wat wil zeggen dat ze moeten uitmonden in de selectie van een graaftechniek en een bekledingstechniek die gemakkelijk uitvoerbaar, veilig en economisch zijn, naast het feit dat de graaftechniek de verstoringen in de kleiformatie zoveel mogelijk moet

beperken. Deze optimalisering zal althans gedeeltelijk gebeuren bij het graven van de nodige galerijen voor het PRACLAY demonstratie-experiment (zie sectie 3.3.3).

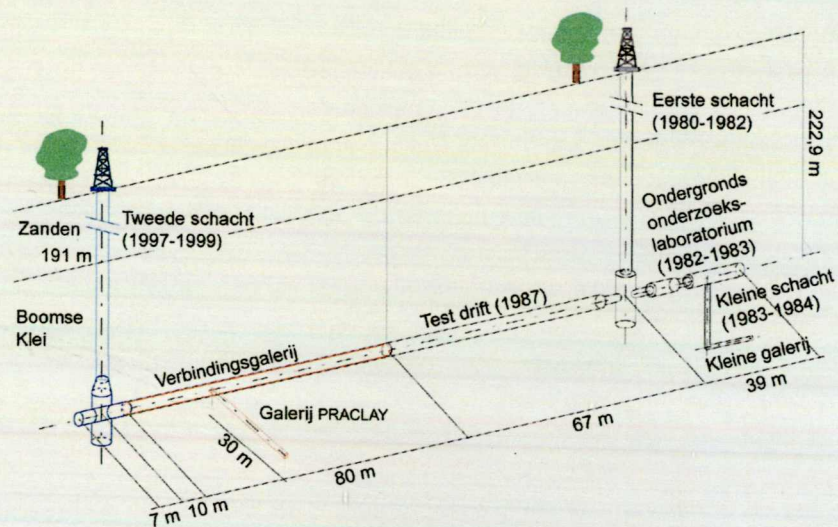
Evolutie van de graaf- en ondersteuningstechnieken

Het ondergrondse laboratorium HADES heeft sinds 1982 vijf ontwikkelingsfases doorgemaakt (figuren 3.25 en 3.26), die hoofdzakelijk worden gekenmerkt door de vereenvoudiging van de graaftechnieken en de evolutie van de bekledingstypes dankzij de verbetering van de kennis over het geomechanische gedrag van de klei. Deze gehele installatie is uitgerust met druk- en vervormingsmeetinstrumenten die in de klei zijn ingeplant geweest vóór het plaatsen van de bekleding en is verder uitgerust met instrumenten die op de bekleding zijn geplaatst om de vervorming ervan te meten. De verschillende bekledingstypes zijn overigens voorzien van openingen met diverse afmetingen, die toegang geven tot de klei om er experimenten uit te voeren. Ten slotte bevindt de onderzoeksinstallatie zich niet in het midden van de laag Boomse Klei, maar in het bovenste deel ervan, op 223 meter diepte, vanwege de geometrische kenmerken die ten tijde van de aanvang van de bouw werden beoogd voor de bergingsarchitectuur.

Het SCK-CEN liet de *eerste schacht* die toegang bood tot de kleiformatie, bouwen met een maximum aan voorzorgsmaatregelen. Deze schacht werd gegraven tussen 1980 en 1982, met breekhamer en schop, in grondlagen die vooraf waren bevroren op een temperatuur tussen -10 en -15°C dankzij 2×16 koelbuizen die gelijkmatig waren verdeeld in twee concentrische cirkels. Deze algemeen gebruikte techniek om door watervoerende lagen te gaan moest het mogelijk maken enerzijds de schacht hydraulisch te scheiden van de watervoerende laag totdat de waterdichte bekleding was geplaatst (een polyethyleenfolie ingeklemd tussen twee gegoten betonlagen van elk 40 centimeter dik) en anderzijds de geomechanische stabiliteit van de uitgraving in het zand en in de Boomse Klei te verzekeren tot de waterdichte bekleding was geplaatst. De te graven diameter werd vastgesteld op 4.3 meter, om een nuttige diameter op te leveren van minimaal 2.65 meter. De eerste schacht, die 214.7 meter diep is, mondt uit op een verbindingskamer van 13 meter hoog en 4 meter binnendiameter.

De *experimentele galerij HADES* werd gebouwd in 1982–1983, eveneens na beevriezing van de kleiformatie. Zij heeft over een groot deel van haar lengte een nuttige diameter van 3.5 meter en meet 39 meter lang vanaf de buitenzijde van de verbindingskamer tot en met de 2 meter dikke stop in gewapend beton die het uiteinde van de galerij afsluit. Om de bekleding van de experimentele galerij te berekenen, verkoos het SCK-CEN de “tunnelbenadering” boven de “mijnbenadering”. Terwijl de bekleding in de mijnbenadering alléén tot doel heeft de formatie op korte en op middellange termijn te stabiliseren middels eventuele rectificatie van de diameter van de galerijen, wat in de exploitatiefase niet erg praktisch is, is de bekleding in de tunnelbenadering ontworpen om de spanningen over te nemen die op lange termijn zullen worden uitgeoefend. Deze benadering is bovendien veiliger voor het personeel en beperkt de verstoringen die worden veroorzaakt in de formatie. De gebruikte parameters voor het berekenen van de bekledingen waren de lithostatische druk (4.5 MPa), een neutraal gronddrukcoëfficiënt van het terrein in rust K_0 (verhouding tussen de horizontale druk en de

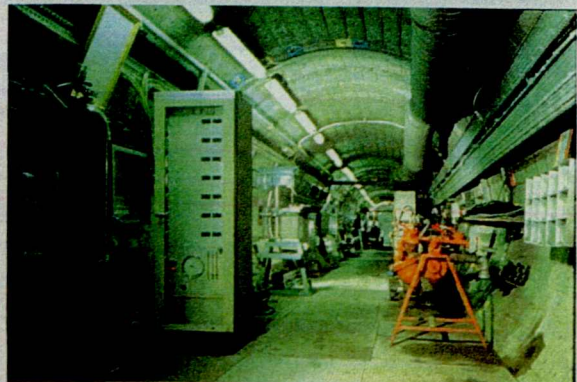
verticale druk) van 0.6 en de klassieke veiligheidscoëfficiënten. De spanningen en belangrijke momenten die resulteerden uit deze voorzichtige hypothesen, rechtvaardigden het gebruik van een zeer weerstandbiedende bekleding: uiterst stijve bekledingssegmenten in gegalvaniseerd nodulair gietijzer (fig. 3.27a).

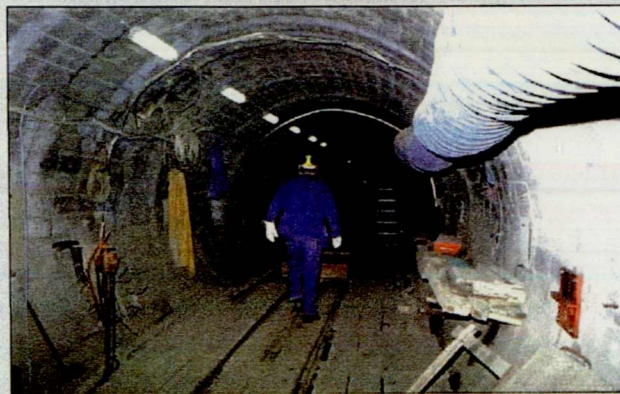


Figuur 3.25 Het ondergrondse onderzoekslaboratorium HADES.



Figuur 3.26 Algemeen zicht op het ondergrondse onderzoekslaboratorium HADES.





Figuur 3.27 De drie bekledingstypes die tot nog toe werden gebruikt in de ondergrondse galerijen:
 (a) bekledingssegmenten in nodulair gietijzer (experimentele galerij HADES);
 (b) betonnen gewelfstenen (kleine galerij en Test Drift);
 (c) metalen glijprofielen (Test Drift, deel ANDRA).

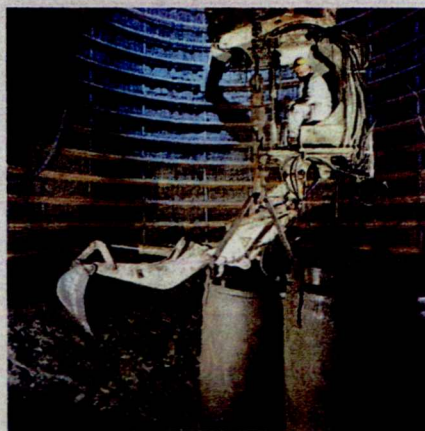
Aangezien de bevrozingstechniek en het gebruik van bekledingssegmenten in nodulair gietijzer economisch gesproken erg weinig realistisch lijken voor een echte bergingsinstallatie, besliste het SCK·CEN dan de mogelijkheid te evalueren om galerijen in de klei te graven zonder voorafgaande bevrozing van de klei, en gebruik te maken van een goedkopere bekleding. Zo begon het SCK·CEN in 1983 met de bouw van de *kleine schacht*, op 2.5 meter van het uiteinde van de HADES-galerij. Deze kleine schacht werd met de hand gegraven in een klei die steeds

minder werd bevroren naarmate het werk vorderde. Zij is 23 meter diep, heeft een nuttige diameter van 1.4 meter en werd bekleed met betonnen gewelfstenen van 30 centimeter dik die werden gescheiden door houten tussenlagen om de stijfheid ervan te verminderen. De *kleine galerij* waarop de kleine schacht uitkomt en die dezelfde diameter heeft, maar slechts 7 meter lang is, werd uitgegraven in 1984 en werd op dezelfde manier bekleed (fig. 3.27b). Het kleifront aan het uiteinde van die kleine galerij werd vrij gelaten om de bewegingen van de formatie in de tijd beter te kunnen volgen.

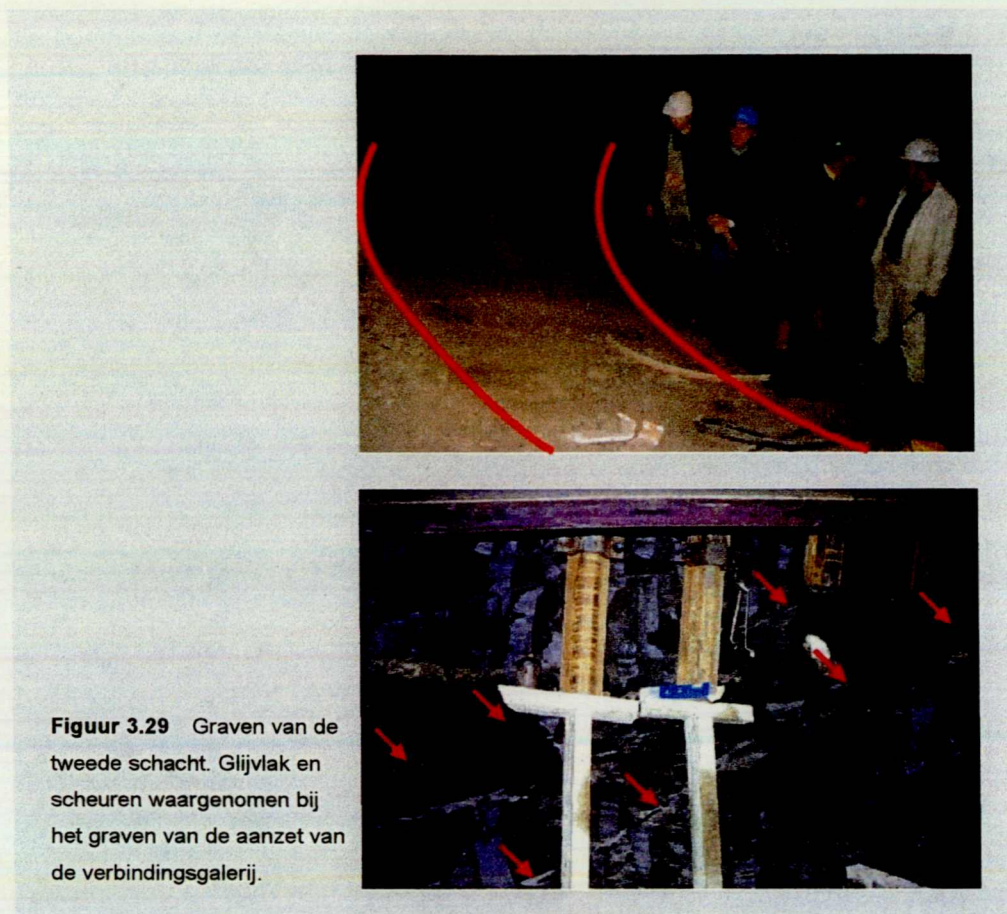
Aangezien de bouw van de kleine schacht en van de kleine galerij had aangetoond dat het mogelijk was de Boomse Klei uit te graven zonder de klei te bevriezen, beslisten NIRAS en het SCK-CEN dan na te gaan of het mogelijk was een galerij te bouwen van een diameter die vergelijkbaar was met die van de galerijen waarin moest worden voorzien voor een echte bergingsinstallatie, zonder de klei te bevriezen en nog steeds met een bekleding van betonnen gewelfstenen. Vanuit deze galerij zou het eveneens mogelijk zijn experimenten uit te voeren in de niet door bevriezing verstoorde klei. De hypothesen voor berekening van de bekledingen hielden dit keer rekening met de lithostatische druk (4.5 MPa), een K_0 van 0.7 in plaats van 0.6 en lagere veiligheidscoëfficiënten dan voorheen. De *Test Drift*, die 3.5 meter diameter heeft en 67 meter lang is, werd gegraven in 1987 met de breekhamer. Hij is bekleed met twee types van steunmaterialen: betonnen gewelfstenen van 60 centimeter dik en, op een kort stuk dat wordt geëxploiteerd door ANDRA (*Agence nationale française pour la gestion des déchets radioactifs*), metalen glijprofielen (TH) (fig. 3.27c) die weinig stijf zijn en dus een zekere convergentie van de formatie mogelijk maken.

De *tweede schacht* ten slotte werd gegraven tussen 1997 en 1999, om te voldoen aan de mijnreglementering die voorschreef dat de bestaande ondergrondse installaties moesten worden voorzien van een bijkomende toegang alvorens te beginnen met het graven van de galerij die nieuwe experimenten mogelijk moest maken, en met name het PRACLAY-experiment. Zij werd gegraven op 90 meter van het uiteinde van de Test Drift, waarmee zij zal verbonden zijn via deze zogenoemde "verbindingsgalerij", met behulp van een pneumatische breekhamer die was gemonteerd op een hydraulische arm, en van manuele pneumatische breekhamers, waarbij alleen de watervoerende zanden en de eerste meters klei werden bevroren. Net als de eerste schacht heeft de tweede schacht een constante nuttige diameter (3 meter), is zij in de watervoerende zanden bekleed met een meerlagige bekleding en komt zij uit op een grotere verbindingskamer. De bekleding van de tweede schacht werd echter bestudeerd om een betere waterdichtheid te bieden dan die van de eerste schacht, een betere spanningsverdeling mogelijk te maken in haar inwendige deel en deze los te koppelen van de spanningen die worden uitgeoefend in haar uitwendige deel. De buitenbekleding in spuitbeton, waarvan de dikte geleidelijk oploopt van 0.2 tot 0.4 meter, werd dan ook door asfalt gescheiden van de binnenbekleding, die bestond uit geprefabriceerde holle betonnen cilinders van 0.3 meter dik, die waren omgeven met een waterdichte staalplaat. Het asfalt, dat op lange termijn een vloeibaar gedrag vertoont, oefent op de binnenbekleding een druk uit die gelijkwaardig is aan haar hydrostatische druk en brengt er isotrope spanningen in teweeg. Het ontkoppelt bovendien het gedrag van de binnenbekleding van dat van de buitenbekleding, waarop de lithostatische druk en de hydrostatische druk van de doorboorde formaties worden uitgeoefend.

Bij het graven van het onderste deel van de tweede schacht, de verbindingkamer en de aanzet van de verbindingsgalerij (fig. 3.28a) werd optimaal rekening gehouden met de toenmalige recentste kennis over het gedrag van de niet-bevroren Boomse Klei, namelijk dat deze laatste een elastisch-visceus-plastisch gedrag vertoont en dat haar convergentie hoog kan zijn (zie sectie 3.6). Er moest dus, zowel om veiligheidsredenen als om te vermijden dat de formatie te veel ontspannen werd, zo snel mogelijk na het graven een ondersteuning worden geplaatst die in staat was deze convergentie te beperken. Er werd dus ten spoedigste een voorlopige bekleding in metalen glijprofielen geplaatst (fig. 3.28b); de definitieve bekleding, van beton dat ter plaatse werd gestort op metalen wapeningen, werd pas geplaatst na voltooiing van de uitgraving. Er verschenen echter glijvlakken en scheuren van verschillende meter lang en op sommige plaatsen verschillende millimeter breed open in het bovenste deel van de aanzet van de verbindingsgalerij, doordat de zone namelijk al ontspannen was door het graven van de schacht en door vertragingen in de uitvoering van de werken (fig. 3.29). Het karakteriseringsprogramma dat sindsdien is gestart, zou een antwoord moeten geven op de vragen over de oorsprong van deze fenomenen (nieuw gevormde scheuren, die dus strikt veroorzaakt zijn door het graven, of natuurlijke barsten die zijn gereactiveerd door het graven), over hun omvang, over hun impact op de hydraulische geleidbaarheid van de formatie, over hun langetermijn gedrag (zelfheling) alsook over hun impact op zowel de operationele als de langetermijn veiligheid.



Figuur 3.28 Graven van de tweede schacht: (a) graven van de aanzet van de verbindingsgalerij; (b) hydraulische arm en glijprofielen.



Figuur 3.29 Graven van de tweede schacht. Glijvlak en scheuren waargenomen bij het graven van de aanzet van de verbindingsgalerij.

De basis van de tweede schacht zal in 2002 met de bestaande installatie worden verbonden via een verbindingsgalerij; tijdens het graven zullen het hydromechanische gedrag van de kleiformatie en het voorste deel van het werkfront worden gevolgd met sensoren die zullen zijn geïnstalleerd vanaf het front van de Test Drift (CLIPLEX-project); de installatie van de sensoren moet voldoende tijd vooraf gebeuren om een stabilisatie van de instrumentatie en het massief mogelijk te maken. De verbindingsgalerij, die volgens de *wedge-block*-techniek zal worden bekleed met een uitzetbaar systeem van betonnen gewelfstenen om de convergentie van het massief zoveel mogelijk te beperken (zie onder), moet het met name mogelijk maken in 2006 de PRACLAY-galerij te graven (zie sectie 3.3.3).

Beperking van de verstoringen rond de uitgravingen

Eén van de huidige verworvenheden is dat het mogelijk is galerijen van een grote diameter te bouwen in de niet-bevroren Boomse Klei. Niettemin is het nodig dat de gebruikte technieken de eigenschappen van de formatie zo weinig mogelijk verstoren, binnen de limieten van wat technisch en economisch realistisch is (zie sectie 3.6). De optimalisering van de keuze van

geschikte uitgraaf- en ondersteuningstechnieken voor de bouw van de bergingsinstallatie heeft tot doel de geomechanische en hydraulische verstoringen rond de uitgravingen te beperken door de convergentie tijdens het graven minimaal te houden. Naast het feit dat deze verstoringen uiteraard afhangen van de uitgegraven diameter, zijn zij bij constante uitgegraven diameter immers des te geringer naarmate:

- de graafsnelheid hoog is;
- de tijd tussen het uitgraven en het plaatsen van de bekleding kort is;
- de overuitgraving klein is;
- het contact tussen de bekleding en het uitgegraven profiel goed is;
- de bekleding stijf is.

(Een derde type van fenomeen dat de door de uitgraving verstoorde zone in de klei treft, is de wijziging van de geochemische eigenschappen van het midden als gevolg van de oxidatie van de klei, en met name van het pyriet, die kan leiden tot het vrijkomen van sulfaten en tot de verzuring van het midden.)

Volgens de huidige kennis lijkt de techniek van de tunnelboormachine, die in de burgerlijke bouwkunde vaak wordt gebruikt om lange tunnels te graven, inclusief in grondlagen met een gelijkaardig gedrag als Boomse Klei maar op geringere diepte, gecombineerd met een betonnen *wedge-block*-bekleding, te beantwoorden aan de vereiste van minimalisering van de verstoringen. (Hoewel vaak gebruikt op geringe diepte, wordt de microtunnelboormachine-methode, gekoppeld aan de zogenoemde buisdoorpersingstechniek (*pipe jacking*), die als mogelijk alternatief wordt beschouwd voor de klassieke graaftechnieken om galerijen van 200 meter lang maar slechts 60 cm diameter te graven, momenteel moeilijk uitvoerbaar geacht op de diepte die wordt beoogd voor de bergingsinstallatie, althans bij gebruik van een klassieke microtunnelboormachine, vanwege de snelle convergentie van de klei en van de hoge wrijvingskrachten die eruit voortvloeien en het blokkeringsrisico verhogen.)

De gemechaniseerde tunnelboormachines bieden verschillende types van voordelen.

- Zij maken een cirkelvormige uitgraafdoorsnede mogelijk, wat mechanisch de stabielste configuratie is.
- Zij kunnen een graafsnelheid van ten minste tien meter per dag halen, dit is hoger dan de kritieke snelheid. Boven deze kritieke snelheid blijft de axiale convergentiesnelheid aan de kop van het werkfront laag, en wordt de formatie dus minder verstoord. (Voor galerijen van 2 meter nuttige diameter werd deze kritieke graafsnelheid geraamd op 2 meter per dag.)
- Zij kunnen uitgerust worden met een cilindrisch schild dat het terrein kan ondersteunen tot — zo snel mogelijk — de definitieve bekleding is geplaatst achter de machine.
- Ze zijn veilig, moduleerbaar en demonteerbaar, en hun gebruik is uit kosten oogpunt des te interessanter naarmate de te graven galerij langer is.

De moeilijkheid van de tunnelboormachinetechniek bestaat in het vinden van het beste compromis wat de overuitgraving betreft: deze moet zo gering mogelijk zijn in vergelijking met de nominale diameter van de bekleding om de verstoringen in de formatie tot een minimum te beperken, en moet toch toereikend zijn om te vermijden dat de tunnelboormachine blokkeert

als gevolg van de convergentie van de klei en als gevolg van de hoge lithostatische druk op deze diepte. De waarde van de totale convergentie — dat wil zeggen de totale beweging van het massief aan de rand van een galerij ten opzichte van het massief vóór uitgraving, inclusief de convergentie aan de voorkant van het werkfront — wordt thans geraamd op een waarde tussen 4 en 9 cm over een uitgraafstraal van om en bij de 2.5 meter.

Ook het gebruik van een betonnen *wedge-block*-bekleding biedt verschillende voordelen.

- Deze bekleding is intrinsiek stabiel doordat, net als de sluitstenen, de trapezoïdale sluitsteen of sluitstenen (waaraan de techniek haar naam dankt), die met kracht door hoekeffect worden ingevoegd tussen de betonnen gewelfstenen die de ring van de bekleding vormen, deze in naspanning rechtstreeks in contact brengen met de klei. (De bekledingsringen worden onmiddellijk achter de tunnelboormachine geassembleerd, waarbij de betonnen gewelfstenen worden vastgehouden door een speciaal daarvoor voorzien systeem, tot de sluitste(e)n(en) geplaatst is/zijn.)
- Beton is een materiaal dat zich zeer goed gedraagt in druk, de belangrijkste belastingswijze die wordt teweeggebracht in een cirkelvormige bekleding die onderworpen is aan nagenoeg isotrope uitwendige spanningen ($K_0 \approx 0.9$; zie sectie 3.6).
- Beton is een economisch materiaal.

Een dergelijke bekleding is evenwel niet waterdicht, hetgeen in de operationele fase geen nadeel vormt omdat het waterdebiet dat naar de galerijen zal doorsijpelen, wegens de geringe hydraulische geleidbaarheid van de Boomse Klei onbeduidend zal zijn en dit water volledig zal verdampen en afgevoerd worden door de ventilatie.

De *wedge-block*-techniek is echter niet bruikbaar ingeval een galerij kruist met andere ondergrondse structuren. Daarom zullen de hoofdgaleries, die zullen uitkomen op de bergingsgaleries, bekleed worden met een bijkomende bekleding of met een andere bekleding die ontworpen is om het supplement aan spanningen dat zich zal voordoen bij het bouwen van de kruisingen tussen galerijen over te nemen, de resulterende verstoringen in de klei tot een minimum te beperken en bijgevolg de bruikbare lengte in de bergingsgaleries te maximaliseren. Overigens zal de bouw van de verbindingskamers tussen de schachten en de galerijen, die moeilijk te mechaniseren is, onvermijdelijk meer uitgesproken grondontspanning in de nabije formatie teweegbrengen, waarmee in de finale bergingsinstallatie rekening zal worden gehouden door een minimumafstand op te leggen tussen de schachten en de eerste bergingsgalerij.

Het graven, in 2002, van de galerij die de tweede schachten moet verbinden met de Test Drift, die 84 meter lang zal zijn en een nuttige diameter van 4 meter zal hebben, zou het mogelijk moeten maken aan te tonen dat de tunnelboormachinetechniek bruikbaar is op de diepte van de bergingsinstallatie en dat zij, gecombineerd met de *wedge-block*-techniek, voldoet aan de vereisten op het vlak van kortetermijn veiligheid en tegelijk de verstoringen tot een minimum beperkt. Het zal bovendien mogelijk maken de waarde te bestuderen die aan de overuitgraving moet worden toegekend. De graafsnelheid, die ten minste 2 meter per dag zal moeten bedragen, zal waarschijnlijk beperkt worden door de capaciteit van de tweede schacht

wat betreft afvoer van uitgegraven grond en transport van de gewelfstenen. De hypothesen voor de berekening van de bekleding voor de secties zonder openingen en die niet blootstaan aan thermische spanningen, zijn $P_v = 3.5 \text{ MPa}$ en $P_h = K_o P_v$, met $K_o = 0.9$.

3.3.2.2 Exploitatie

Hoewel de exploitatie van de finale installatie van diepe berging tot nog toe het voorwerp is geweest van betrekkelijk weinig studies, vormt de ervaring die is opgedaan door de dagelijkse exploitatie van het ondergrondse laboratorium HADES en door het uitvoeren van de talrijke experimenten die er worden uitgevoerd, waarvan sommige gebruikmaakten of -maken van radioactieve bronnen, een niet te verwaarlozen hoeveelheid kennis inzake exploitatie.

Concreet zal de exploitatie van de finale installatie van diepe berging *conventionele ondergrondse operaties* omvatten zoals de ventilatie, de exploitatie van de hefsystemen waarmee de toegangsschachten zijn uitgerust, de transporten, de verlichting en de controle en het onderhoud van de uitrusting, alsook de *handelingen betreffende de berging* van het eigenlijke radioactieve afval. De studie van voornoemde operaties, die in parallel met de ontwikkeling van de bergingsarchitectuur en de verwerving van de nieuwe kennis vordert, heeft zich tot dusver beperkt tot verglaasd afval en bestraalde splijtstof en is voor het overige niet verder gekomen dan het stadium van haalbaarheidsstudie. De bergingsoperaties voor deze twee afvalklassen zouden tamelijk gelijk moeten zijn; de belangrijkste verschillen vloeien voort uit de lengte van de verpakkingen, die tot 5 meter kunnen gaan in het geval van bestraalde splijtstof. Zij zullen volledig gemechaniseerd worden uitgevoerd door op afstand bestuurde robots en zullen gepaard gaan met maatregelen die de radiologische bescherming van het exploitatiepersoneel moeten waarborgen.

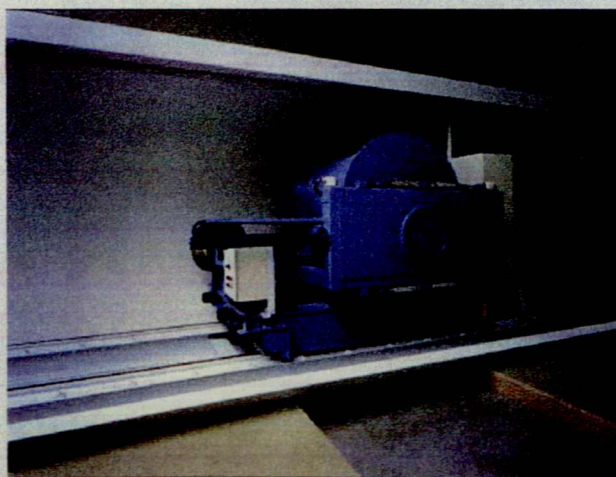
In de huidige referentiearchitectuur wordt het *verglaasde afval* in ontvangst genomen in een bovengrondse installatie van de bergingssite, waar de colli uit de transportverpakkingen worden gehaald en in een transferwagen worden geplaatst, die hen tot hun eindbestemming zal brengen. Deze wagen draagt een afgeschermd laadtrommel met vier holtes die elk een overpakte collo kunnen bevatten; de laadtrommel bevindt zich loodrecht ten opzichte van de rails waarop de wagen rijdt. Hij rijdt dan voor tot een van de toegangsschachten om naar beneden te worden gebracht tot op het niveau van de ondergrondse galerijen, waar hij tot de ingang van de vastgestelde bergingsgalerij rijdt. Daar gaat zijn beweegbaar frame omhoog tot het niveau van de bergingsbuis, en dan vervolgens voorwaarts om de afsluiter van de trommel in de afsluiter van de bergingsgalerij te laten grijpen, om de continuïteit van de radiologische afscherming te verzekeren. De afsluiters worden samengekoppeld met vijzels en worden dan geopend, en de trommel draait totdat een eerste holte vlak voor de buisopening komt. Een machine die in een behuizing op de wagen is geïnstalleerd, de zogenaamde "duwrobot", duwt dan de eerste mantel tot zijn definitieve positie in de bergingsbuis. Na de sequentie op zijn plaats te hebben gezet, keert de duwrobot leeg naar zijn behuizing terug. De reeks wordt drie keer herhaald, waarna de twee afsluiters opnieuw worden gesloten, de vijzels teruggetrokken worden en het frame naar beneden wordt gebracht. De transferwagen keert vervolgens naar

de schacht terug om weer boven de grond te worden gebracht en met vier andere mantels te worden geladen.

De transferwagen en de duwrobot verkeren al in een gevorderd ontwikkelingsstadium: een prototype van elke machine, nagenoeg op reële schaal, staat ter demonstratie in de expositiehal HADES-PRACLAY in Mol (fig. 3.30). In werkelijkheid zal, volgens de inplanting van de bergingsinstallatie in de kleilaag, ofwel de transferwagen ofwel de duwrobot een helling van 2% aan moeten kunnen. De duwrobot moet bovendien in staat zijn colli van ongeveer 1000 kg te duwen over een afstand van ongeveer 200 meter en moet een positioneringsprecisie van om en bij de centimeter hebben, zodat hij een kleine ruimte tussen twee opeenvolgende mantels kan laten om hun thermische uitzetting mogelijk te maken. De gripper waarmee hij is uitgerust, zal hem in staat stellen de kop van de mantel vast te grijpen om hem in voorkomend geval terug te nemen. De overtuigende tests die over een goede tien meter zijn uitgevoerd met overpakte colli met ballast, moeten nog worden bevestigd met tests over 200 meter en het effect van de temperatuur en de stralingen op de elektronische en mechanische componenten moet grondiger worden bestudeerd.

De berging van de colli met *bestraalde splijtstof* zou een variant zijn op de berging van de mantels met verglaasd afval. Omdat de colli met bestraalde splijtstof wegens hun lengte niet horizontaal omlaag zullen kunnen worden gebracht in de bergingsinstallatie, zouden ze in een afgeschermd transfercontainer worden geplaatst die verticaal langs de toegangsschacht zou worden neergelaten en dan onder in de schacht horizontaal zou worden gekanteld en op een wagen zou worden gelegd die de collo tot de gewenste bergingsgalerij moet voeren. Net als de transferwagen voor verglaasd afval, zou deze wagen het mogelijk maken de afgeschermd container vlak vóór de geplande bergingsbuis te positioneren en zou hij uitgerust zijn met een duwrobot. Het gebruik van transfercontainers met vier plaatsen zoals de trommel van de transferwagens zou het gezien hun afmetingen echter noodzakelijk maken de hoofdgalerijen ter hoogte van de bergingsgalerijen te verbreden tot een diameter van 6 meter, wat ingewikkeld en duur zou zijn. Een alternatieve oplossing zou zijn gebruik te maken van transfercontainers met één plaats.

Figuur 3.30 Foto van de installatie voor de manutentie van de mantel met verglaasd afval in de expositiehal HADES-PRACLAY.



3.3.2.3 Sluiting

Volgens de referentiekalender zal de sluiting van de finale bergingsinstallatie, die de ontmanteling van de bovengrondse installaties en de definitieve afzondering van de toegangswegen naar het afval zal noodzaken, ten laatste enkele jaren na het einde van de bergingsactiviteiten plaatsvinden. Tot deze sluiting zal pas worden beslist voor zover enerzijds de monitoring van de installaties tijdens de exploitatie de goede werking van het systeem heeft bevestigd, en anderzijds de bevoegde autoriteiten en alle andere betrokken partijen er grondig van overtuigd zijn dat het systeem robuust is en een toereikend niveau van passieve veiligheid biedt. Conceptueel zouden de hoofdgalerijen en de schachten evenwel langer open kunnen worden gehouden, hetgeen een aanzienlijke mate van flexibiliteit in het beslissingsproces zou introduceren, maar deze beslissing zou dan zorgvuldig moeten worden gerechtvaardigd, met name op basis van een uitgebreide analyse van haar mogelijke negatieve effecten op de veiligheid. Deze open fase zou ongetwijfeld niet langer mogen duren dan ongeveer een honderdtal jaar, zo niet zou haar impact op de operationele veiligheid en op de langetermijn veiligheid aanzienlijk zijn. In dit geval zouden immers aanzienlijke onderhouds- en renovatiewerken nodig zijn en zouden verschillende types van verstoringen het insluitingsvermogen en de robuustheid van het bergingssysteem kunnen verminderen. Bovendien zouden evoluties in conjunctuur het beslissingsproces kunnen beïnvloeden, wat ertoe zou kunnen leiden dat de open bergingsinstallatie wordt verwaarloosd en op termijn zelfs onbewaakt wordt achtergelaten.

Behalve dat de sluiting van de bergingsinstallatie de overgang betekent van een systeem van actieve bewaking van het afval naar een systeem van passieve insluiting, is deze sluiting onontbeerlijk om de langetermijn veiligheid van de bergingsinstallatie te waarborgen. Zij moet immers:

- de geomechanische stabiliteit van de gastformatie verzekeren om de geleidelijke instorting van de bergingsgalerijen te voorkomen, wat zou dreigen te leiden tot het samendrukken van de afvalcolli en tot de uitbreiding van de verstoorde regio van de formatie (opvulling);
- elke preferentiële migratie van de radionucliden via de galerijen en schachten voorkomen (afdichting);
- de waarschijnlijkheid en de gevolgen van een eventuele menselijke indringing op de site, bovengronds of in de diepte, verminderen (afdichting en opvulling).

De goede uitvoering van de sluiting draagt dus in grote mate bij tot de toekomstige prestatie van het bergingssysteem, zodat de praktische uitvoering, in het bijzonder wat de keuze van de materialen en de plaatsingstechnieken betreft, zorgvuldig moet bestudeerd worden (zie sectie 3.4.2.2).

Concreet zal de sluiting van de bergingsinstallatie er hoofdzakelijk in bestaan de hoofdgalerijen, de verbindingsgalerij en de toegangsschachten *op te vullen* met een materiaal op basis van zand gemengd met zwellende klei, en vervolgens *waterdicht te maken* om de vorming van preferentiële migratiewegen voor de radionucliden te vermijden. (De bergingsgalerijen zullen geleidelijk zijn opgevuld vóór of tijdens de afvalbergingsfase en zullen

vervolgens, wanneer ze eenmaal gevuld zijn met afval, afgedicht worden). Hoewel de bekleding van de galerijen en de schachten een hogere hydraulische geleidbaarheid heeft dan de Boomse Klei en dus een preferentiële migratieweg kan vormen voor de radionucliden, zal zij overal worden bewaard, behalve ter hoogte van de afsluiting van de hoofdgalerijen, waar ze zal worden weggenomen, samen met de klei verstoord door de uitgraving. De aldus gevormde holle ruimte zal dan worden gevuld met een zwellende klei van hetzelfde type als het voor de bergingsgalerijen gebruikte opvulmateriaal, die dus een zekere druk op de kleiformatie zal uitoefenen en zelf zal zijn geklemd tussen twee betonnen verankeringsstoppen. Elke hoofdgalerij zal worden afgedicht met ten minste twee serieel geplaatste waterdichte stoppen van dit type, die een hydraulische geleidbaarheid moeten bezitten die ten minste even laag is als die van de gastformatie, die weerstand moeten bieden aan de lithostatische druk en die de initiële geomechanische en geochemische kenmerken van de gastformatie zo weinig mogelijk mogen verstoren.

De sluitingsfase van de bergingsinstallatie zal worden beëindigd met twee allerlaatste stappen: het markeren van de site en de archivering, voor een onbepaalde periode, van alle gegevens die het bergingssysteem en het geborgen afval kenmerken. De duidelijke *markering van de site* door meerdere types van merktekens, bovengronds en in de diepte, zal voornamelijk de waarschijnlijkheid van menselijke indringing moeten beperken. De *gegevensarchivering* aan de andere kant zal gedurende zekere tijd de eventuele recuperatie van het afval vergemakkelijken, zal het mogelijk maken elke menselijke indringing op middellange en op lange termijn langs administratieve weg te voorkomen en zal het in voorkomend geval op middellange termijn mogelijk maken pertinente beslissingen te nemen naar aanleiding van een eventuele menselijke indringing. Deze gegevens zouden op verschillende dragers kunnen worden geplaatst en zouden in meerdere exemplaren kunnen worden neergelegd bij een of meer instellingen, inclusief eventueel bij een buitenlandse instelling of een internationale organisatie. Idealiter zal periodiek vóór het verloren gaan van elke gebruikte drager een reservekopie van de gegevens worden genomen. Ten slotte zou de plaats van de bergingsinstallatie moeten worden aangegeven op alle nationale en regionale topografische documenten die de bergingssite omvatten.

3.3.2.4 Institutionele controle

Hoewel de periode van institutionele controle na de sluiting van de installatie van diepe berging in geen geval de veiligheid ervan kan waarborgen, zou een monitoringprogramma, dat naar keus van de toekomstige generaties enkele decennia tot enkele eeuwen zou duren, er op nuttige wijze toe kunnen bijdragen dat het publiek en de andere betrokken partijen hun vertrouwen in de werkelijke veiligheid van het bergingssysteem handhaven. Naast de inspectie- en monitoringactiviteiten, die uiteraard de passieve langetermijn veiligheid van de bergingsinstallatie niet in gevaar zullen mogen brengen, zou deze controle maatregelen omvatten die het ongecontroleerde gebruik van de site moeten voorkomen, en zou de controle ervoor moeten zorgen dat de kennis betreffende de site wordt bewaard. Deze actieve monitoring zou vervolgens geleidelijk verdwijnen ten gunste van een periode van eenvoudige administratieve controles, waarna de site uiteindelijk zou worden gebanaliseerd. De kennis

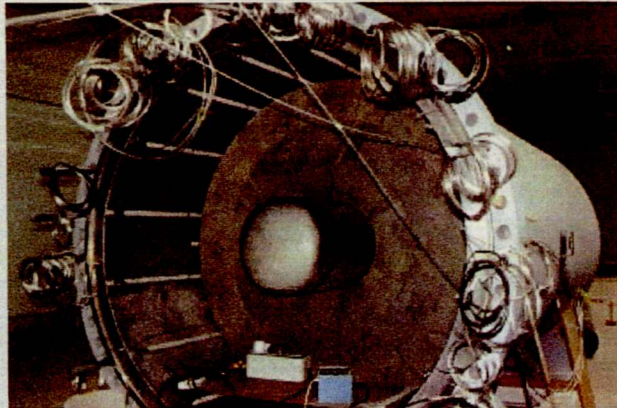
betreffende de bergingsinstallatie zou dan beetje bij beetje verdwijnen. Er zou in elk geval op moeten worden toegezien dat de herinnering aan de plaats van de bergingsinstallatie wordt bewaard.

3.3.3 Het PRACLAY-demonstratieproject

Het in 1995 aangevangen demonstratieproject PRACLAY (*Preliminary Demonstration Test for Clay Disposal*) heeft als hoofddoelstelling tegen ongeveer 2015 door rechtstreekse experimenten aan te tonen dat het technisch en economisch mogelijk is verglaasd afval te bergen in de Boomse Klei met inachtneming van de vereisten die voortvloeien uit de veiligheidsstudies. Dit sleutelproject, dat openstaat voor internationale samenwerking, bestaat erin in situ op ware grootte een stuk bergingsgalerij te bouwen dat in alle opzichten vergelijkbaar is met de galerijen die zijn gepland in de referentiearchitectuur, waarbij zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van de industriële graaftechnieken en van de materialen die momenteel zijn gepland in deze architectuur, en dat stuk bergingsgalerij dan te vullen, door het afval te simuleren met elektrische verwarmingselementen, maar zonder radioactieve bronnen te gebruiken (fig. 3.25). Het beoogt ook een beter inzicht in het bergingssysteem en in de interacties tussen zijn verschillende componenten mogelijk te maken, om de resultaten die na afloop van de methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsfase zullen zijn verkregen, te bevestigen ("verbeteren van het vertrouwen" in de modellen, hun basishypothesen en hun voorspellingen) en vervolgens de referentiearchitectuur en haar samenstellende elementen te optimaliseren. Ten slotte zal het het mogelijk maken de kruising tussen een hoofdgalerij en een bergingsgalerij te bestuderen en te realiseren. Dit project wordt beheerd door het economisch samenwerkingsverband EURIDICE (*European Underground Research Infrastructure for Disposal of Nuclear Waste in a Clay Environment*). EURIDICE vervangt sinds eind 2000 de ESV PRACLAY die in 1995 was opgericht door SCK-CEN en NIRAS. De ESV PRACLAY heeft haar activiteiten uitgebreid tot alle exploitatie en de valorisatie van de ondergrondse laboratorium HADES.

Om het experiment in situ voor te bereiden, werd bovengronds een met meetinstrumenten gebouwd uitgeruste maquette op ware grootte van de ondergrondse galerij (fig. 3.31). De OPHELIE-maquette (*On Surface Preliminary Heating Simulation Experimenting Later Instruments and Equipment*) heeft een driedubbele doelstelling:

- aantonen dat het mogelijk is het opvulmateriaal te plaatsen en het gedrag ervan te bestuderen in temperatuur-, druk- en hydratatieomstandigheden die representatief zijn voor de reële omstandigheden;
- nagaan of de plaatsing van het instrumentatiesysteem op de bergingsbuis, in het opvulmateriaal en op de bekleding geen aanzienlijke verstoringen dreigt te veroorzaken in de klei;
- de weerstand en de betrouwbaarheid van de instrumenten en van het meetmateriaal nagaan in strenge proefomstandigheden die representatief zijn voor de omstandigheden in situ, vóór hun ondergrondse gebruik.



Figuur 3.31 De OPHÉLIE-maquette.

De resultaten en de definitieve conclusies betreffende de uitgevoerde proeven zullen beschikbaar zijn na de ontmanteling van de maquette, dit is in 2002. Het is echter nu reeds duidelijk dat tal van instrumentatiesystemen niet geschikt zijn om de strenge omstandigheden van een bergingssysteem te weerstaan gedurende de nodige tijdsduur, wat overigens ook is gebleken uit de experimenten in situ in het ondergrondse laboratorium HADES. Overigens zal de aanwezigheid van chloriden in de maquette moeten worden geanalyseerd, zowel op hun oorsprong als op hun mogelijke gevolgen op de duurzaamheid van de metalen materialen en op het gedrag van de radionucliden. Ten slotte hebben de realisatie van de OPHÉLIE-maquette en de voorbereiding van het PRACLAY-experiment het nu al mogelijk gemaakt een reeks open vragen onder de aandacht te brengen of te preciseren in verband met de praktische tenuitvoerlegging van de referentiearchitectuur (tabel 3.7).

Het eigenlijke PRACLAY-experiment, dat van 2008 tot ongeveer 2013 zal lopen, zal het thermo-hydro-mechanische gedrag van de Boomse Klei in het nabije veld, van de bekleding, het opvulmateriaal en de bergingsbuis bestuderen wanneer zij worden blootgesteld aan een temperatuursverhoging. Het zal ook de geochemie van het poriënwater en de interacties tussen de verschillende componenten van het systeem bestuderen tijdens de hydratatie- en verwarmingsfasen. De gegevens betreffende hun gedrag zullen dus moeten worden verzameld in omstandigheden die zo dicht mogelijk aansluiten bij die van een echte bergingsinstallatie. Aangezien de meeste metingen in de kleiformatie moeten worden uitgevoerd vanaf het begin van de uitgraafwerken en gedurende het hele experiment voort moeten gaan, zal de instrumentatie rond de toekomstige PRACLAY-galerij dus worden geïnstalleerd bij de aanvang van het uitvoeren van het project, tegen 2005. Ze zal in tweevoud worden geplaatst om het verkrijgen van gegevens tot het einde van het experiment te verzekeren.

Hoewel het gaat om een demonstratie-experiment, vertoont het PRACLAY-experiment bepaalde intrinsieke beperkingen:

- de duur ervan (een tiental jaar) is noodgedwongen op zich onvoldoende om beslissende vaststellingen te doen inzake keuze en gedrag van de materialen en meetsystemen op lange termijn, tenzij een keuze natuurlijk werkelijk ongelukkig blijkt;
- het experiment maakt het niet mogelijk de langetermijn veiligheid te bewijzen; de demonstratie van de langetermijn veiligheid kan slechts onrechtstreeks zijn;
- het experiment gebeurt in afwezigheid van een stralingsveld.

Volgens het huidige tijdschema zal de PRACLAY-galerij, die 30 meter lang wordt, in 2006 worden gegraven vanaf de verbindingsgalerij en zullen de verschillende elementen van de architectuur (bergingsbuis, hydratatiesysteem van het opvulmateriaal, opvulmateriaal, afdichting enzovoort) alsook de instrumentatie geplaatst worden in 2007. De proefopstelling zal dan gedurende vijf jaar worden verwarmd, zal in het daaropvolgende jaar afkoelen en vervolgens worden ontmanteld, waarna de gegevens die gedurende het hele experiment zullen zijn verzameld, geanalyseerd zullen worden.

3.3.4 Vooruitzichten

Hoewel de referentiebergingsarchitectuur zich in een vrij gevorderd conceptueel ontwikkelingsstadium bevindt voor het verglaasde afval en de bestraalde splijtstoffen, maken de talrijke zeer concrete vragen die zijn gerezen naar aanleiding van de voorbereiding van de OPHELIE-maquette en het PRACLAY-experiment alsook tijdens de redactie van het SAFIR 2-rapport, het verantwoord dat deze grondig wordt geherevalueerd en tegelijk wordt uitgebreid naar de andere afvalklassen van de geologische groep. Deze ontwikkeling, die iteratief blijft, moet op systematische en systemische wijze gebeuren, en moet steunen op het fundamentele analyse-instrument dat wordt gevormd door de veiligheidsfuncties. Meer precies zal het toekomstige programma vooral voor moeten streven om:

- eenduidige technische criteria te definiëren betreffende de algemene bergingsarchitectuur, haar componenten en haar omgeving, met name op het vlak van toelaatbare temperaturen en terugneembaarheid;
- alle ontwerpgrondslagen van de bergingsinstallatie te herzien in het licht van deze criteria, in functie van de radiologische langetermijn veiligheid en de noodzaken van de operationele veiligheid;
- een globale bergingsarchitectuur te ontwikkelen die de oplossingen omvat die zijn uitgewerkt voor elke afvalklasse of homogene groep afvalklassen, en dus in het bijzonder de bergingsarchitectuur bestemd voor bestraalde splijtstoffen te verfijnen en een bergingsarchitectuur uit te werken voor een klasse afval van categorie B dat bijzonder veeleisend wordt geacht;
- de gehele bergingsarchitectuur te optimaliseren, dit is de geometrie van haar verschillende delen en de keuze van alle gebruikte materialen (tabel 3.7), rekening houdend met alle interacties tussen die laatste;
- de inspanningen betreffende de praktische aspecten van het graven van de ondergrondse installaties voort te zetten;

- de exploitatieaspecten te preciseren, zowel op het vlak van conventionele ondergrondse handelingen zoals de ventilatie en de maatregelen tegen brand, als op het vlak van bergingshandelingen;
- de sluitingsaspecten te preciseren;
- zich te verzekeren van de representativiteit van het PRACLAY demonstratie-experiment door het bevestigen van de belangrijkste kenmerken van de bergingsarchitectuur die bestemd is voor verglaasd afval;
- de rol van de monitoring van het bergingssysteem en het verband met de terugneembaarheid en de veiligheid te preciseren en op basis van eventuele toekomstige wettelijke voorschriften terzake, bijvoorbeeld inzake *safeguards*, te definiëren welke aspecten representatief zijn zowel voor de huidige toestand als de evolutie van het bergingssysteem
- de economische aspecten van het bouwen en exploiteren van de bergingsinstallatie te evalueren.

3.4 Het gedrag van het afval en de materialen in bergingsomstandigheden

De studie van het gedrag van het geconditioneerde afval en van de beschouwde materialen voor de bouw van de bergingsinstallatie, omvat twee aspecten: ten eerste de studie van de wijze waarop ze elk evolueren in bergingsomstandigheden, dat wil zeggen de studie van hun individuele performanties, en met name van hun duurzaamheid; ten tweede de studie van hun verenigbaarheid, dat wil zeggen de studie van hun invloed op de performanties van de andere componenten van het bergingssysteem. Zo mogen de afvalconditioneringsmatrices geen te uitgesproken negatieve invloed hebben op de eigenschappen van het nabije veld (zie sectie 3.6). Ook het opvulmateriaal mag geen nadelig effect hebben op de corrosie van de mantels.

Verenigbaarheid

Feit dat het geborgen geconditioneerd afval of het materiaal dat wordt gebruikt voor de eigenlijke bouw van de installatie, geen negatieve invloed heeft op het verwachte gedrag van de andere componenten van het bergingssysteem en in het bijzonder op dat van de Boomse Klei.

3.4.1 Het gedrag van het geconditioneerde afval

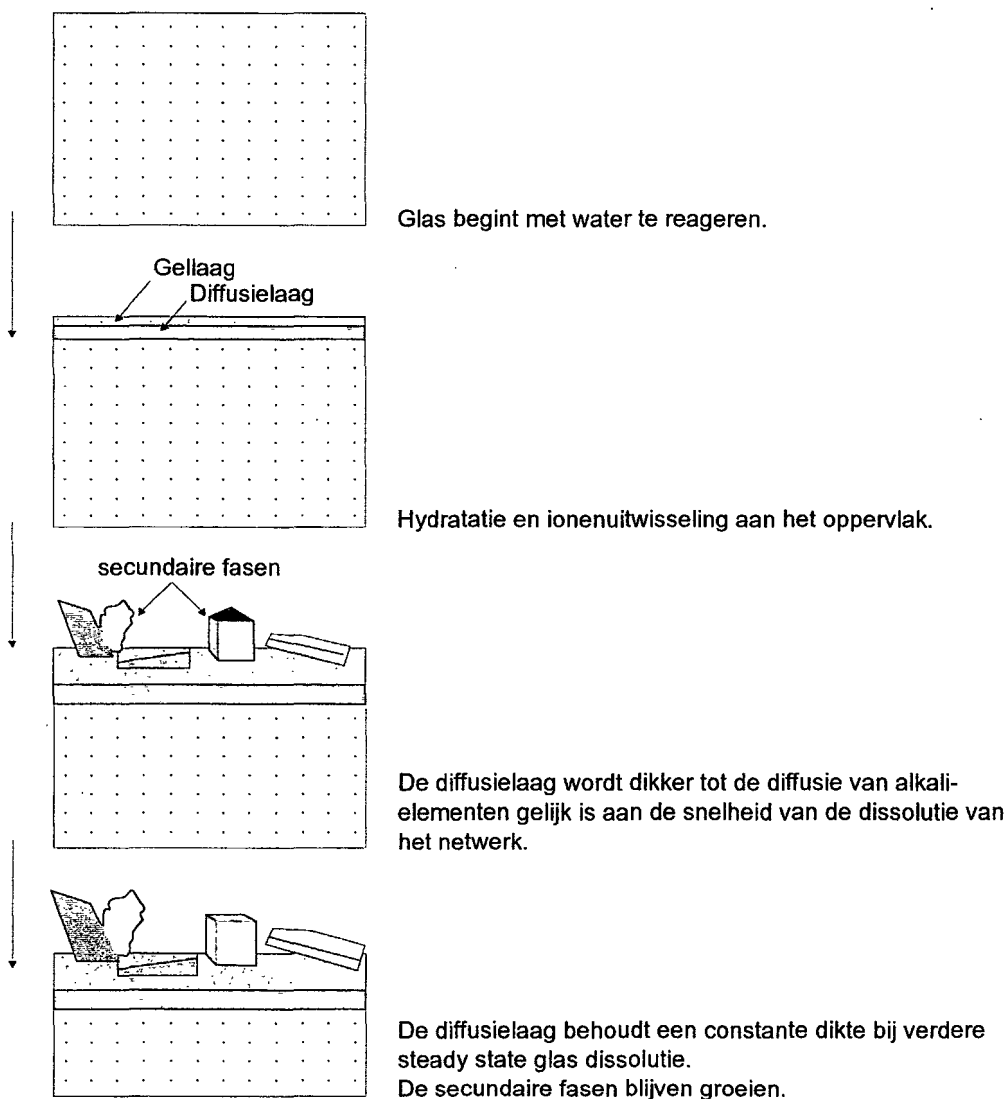
De studies van het gedrag in de Boomse Klei van het geconditioneerde afval beogen, naast het verkrijgen van de onontbeerlijke basisgegevens voor de evaluaties van de radiologische langetermijn veiligheid (zie hoofdstuk 4), ook het valideren van bepaalde vereenvoudigende hypothesen in deze evaluaties. Deze studies worden uitgevoerd door het SCK-CEN en hadden tot dusver hoofdzakelijk betrekking op het verglaasde en het gebitumineerde afval (zie tabel 3.2 voor de inventaris van het afval van de geologische groep).

3.4.1.1 Verglaasd afval

Een specifiek kenmerk van de studies van het gedrag van het glas die in het kader van het Belgische bergingsprogramma zijn uitgevoerd, is de realisatie van zowel experimenten in het bovengrondse laboratorium, als in situ in het ondergrondse laboratorium, met inactieve glasmonsters en met glasmonsters die in geringe mate zijn gedopeerd (^{134}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu) en waarvan is aangetoond dat zij een gedrag vertonen dat representatief is voor dat van het actieve glas. Zo heeft het SCK-CEN sinds eind jaren tachtig experimenten van lange duur gestart in het ondergrondse laboratorium HADES. Deze studies in situ plaatsten de bestudeerde materialen (glas, afvalmatrices, beton en metalen verpakking- en mantelmaterialen) in drie types van situaties die toen representatief werden geacht voor de bergingsomstandigheden, op 16, 90 en 170°C, en voor perioden van 2 tot meer dan 7 jaar. De drie types van proefopstellingen die in de klei werden geplaatst vanuit de HADES-galerij, waren buizen van roestvast staal die de monsters bevatten en die langer waren (meer dan 5 meter) dan de door de uitgraving verstoorde zone. Specifieker nog is het voorbeeld van het in situ experiment CERBERUS, waarin ook een gammastralingsveld werd aangebracht dat representatief is voor het verglaasde afval (zie sectie 3.6). Deze verschillende studies passen in een internationale context, met name via de deelneming aan verschillende Europese programma's. Zij profiteren bovendien van de talrijke studies in kleimidden die zijn verricht in Frankrijk.

De studies die de afgelopen tien jaar zijn verricht, hebben het mogelijk gemaakt de basisprocessen te identificeren die werkzaam kunnen zijn bij de oplossing van het glas. Het gaat om de volgende processen: interdiffusie, oplossing van het silicium, condensatie van de silicaten in de gel die wordt gevormd aan de oppervlakte van het glas, precipitatie/diffusie/sorptie in het bergingsmilieu, en vorming van secundaire fases. Schematisch voorgesteld, gebeurt deze oplossing in drie stappen (fig. 3.32):

- interdiffusie, wat zich uit in de vorming van een gehydrateerde zone die armer is aan alkalische elementen (ionenuitwisseling met de alkalische bestanddelen van het glas);
- hydrolyse van de verbindingen tussen de elementen die het glasnetwerk vormen;
- condensatie en/of precipitatie van de gehydrolyseerde elementen, wat zich uit in de vorming van een amorphe gellaag.



Figuur 3.32 Belangrijkste etappes van de oplossing van het verglaasde afval.

Voor de meeste bestudeerde glazen tonen de proefondervindelijke resultaten aan dat de oplossingsnelheid mettertijd verschillende grootteorden daalt, om zeer lage waarden te bereiken in zogenoemde verzadigingsomstandigheden, die afhankelijk zijn van het beschouwde systeem (dynamisch evenwicht). Over de interpretatie van deze drastische vermindering van de oplossingsnelheid (ofwel oplossingswet gebaseerd op de notie chemische affiniteit ofwel vorming van een beschermende gel) en over de interpretatie van het aanhouden van een zeer geringe oplossingsnelheid in verzadigingsomstandigheden, bestaat nog geen eensgezindheid.

De verschillende experimenten die zijn uitgevoerd of nog lopende zijn in het bovengrondse laboratorium of in situ, bestrijken een zeer breed gamma van experimentele omstandigheden; ze hebben het met name mogelijk gemaakt het effect van de volgende parameters op het oplossen van het glas te preciseren:

- *effect van de temperatuur* De glasoplossingsnelheid verhoogt sterk met de temperatuur (stijging met twee tot drie grootteorden tussen 16°C en 90°C). Het glas zal dus in ieder geval moeten worden afgezonderd van het poriënwater gedurende de thermische fase van de berging, die voor het verglaasde afval ongeveer 300 jaar bedraagt. Deze functie van fysische insluiting zal worden vervuld door de mantel.
- *effect van de kunstmatige barrières* De glasoplossingsnelheid wordt niet aanzienlijk beïnvloed door de aanwezigheid van de kunstmatige barrières. De talrijke uitgevoerde experimenten hebben zeer duidelijk aangetoond dat het opvulmateriaal (FoCa-klei) een impact op de oplossing van het glas heeft die vergelijkbaar is met die van de Boomse Klei. Daarom werd die laatste als referentiemilieu genomen om de duurzaamheid van het verglaasde afval in bergingsomstandigheden te evalueren, te meer daar het de Boomse Klei is die de fysico-chemische omstandigheden in het nabije veld zal opleggen op langere of minder lange termijn.
- *effect van de straling* Het oplossen van het glas wordt niet aanzienlijk beïnvloed door de zelfbestraling van de matrix en door de bestraling van het bergingsmilieu.
- *effect van de ontglazing en van de fracturatie* De ontglazing kenmerkt zich door een uiterst langzame kinetica, zodat de omvang ervan zeer beperkt zal blijven over de verwachte levensduur voor dit type van matrix. Experimenten op gedeeltelijk ontglaasd glas tonen aan dat de ontglazing het oplossingsgedrag niet wijzigt. In de literatuur vermelde modelleringsresultaten betreffende de fracturatie van het glas tonen bovendien aan dat ook de fracturatie niet beslissend is voor de globale duurzaamheid van het glas. Franse studies geven overigens zeer duidelijk aan dat de duurzaamheid van het glas in bergingsomstandigheden aanzienlijk zou kunnen worden verhoogd door de toevoeging van siliciumderivaten aan het opvulmateriaal en/of in de ringvormige ruimte tussen de container met verglaasd afval en zijn mantel (voorverzadiging van het milieu vóór het oplossen van het verglaasde afval).

De retentie van de radionucliden in de gellaag aan de oppervlakte van het glas hangt af van de aard van het beschouwde element, de pH en de aan- of afwezigheid van vaste fasen zoals de Boomse Klei of de FoCa-klei (competitie tussen het glas en de kleimineralen). Aangezien dit proces in de omstandigheden van een reële berging niet aanzienlijk lijkt bij te dragen tot de

radionuclidenretentie, wordt in de veiligheidsevaluaties aangenomen dat de uitloging van de radionucliden door de glasoplossingssnelheid wordt bepaald (vertragsingsfactor gelijk aan 1). De geringe oplosbaarheid en/of de sorptie van de radionucliden door de vaste fasen hebben echter als gevolg dat de mobiele fracties voor de meeste bestudeerde radionucliden gering zijn ten opzichte van de uitgeloopte hoeveelheden. Ze lijken af te hangen, althans in een eerste fase, van de samenstelling van het glas, van de graad van vordering van de reactie en van de aanvankelijke radionuclidenconcentratie in het glas. Over lange tijdspannen stabiliseren de concentraties in oplossing zich echter meestal.

De modelleringsstudies van de oplossing van het glas hebben betrekking op twee afzonderlijke aspecten:

- de *geochemische modellering* heeft tot doel de secundaire fasen te identificeren die kunnen gevormd worden en de concentratie controleren van sleutelementen, zoals silicium en kritische of mogelijk kritische radionucliden die zijn vrijgekomen in het milieu bij de oplossing van het glas;
- de *eigenlijke modellering van het oplossen van het glas (kinetisch model)* heeft tot doel een analytisch model te ontwikkelen dat de wet van het oplossen van het glas en de fenomenen diffusie en sorptie van de silicaten in het bergingsmilieu aan elkaar koppelt. Deze modellering heeft aanzienlijke vooruitgang geboekt en profiteert van de inbreng van een erg beloftevolle, originele techniek die recent werd ontwikkeld door het SCK-CEN om de oplossingsmechanismen (waaronder de vorming van de gellaag) op microscopische schaal te bestuderen en aldus bepaalde hypothesen te verifiëren die in aanmerking werden genomen in het kader van de uitwerking van een analytisch model.

De resultaten van de geochemische modellering van het glas–water–kleisysteem wijzen erop dat de Boomse Klei zou kunnen werken als een silicapomp: het midden zou theoretisch in omstandigheden van niet-verzadiging kunnen blijven ten opzichte van het glas. Binnen de grenzen van de geselecteerde thermodynamische gegevens voorspelt het model geen enkele vorming van secundaire fasen. De dynamiek van de glasoplossingsprocessen zou evenwel stationaire omstandigheden kunnen opleggen die verschillen van een thermodynamisch evenwicht.

Wat de kinetische modellering betreft, blijft men de oplossingswet zoals die aanvankelijk is voorgesteld door Grambow, voorlopig gebruiken, vanwege haar conservatieve karakter en het ontbreken van alternatieve voorstellen die kunnen worden behandeld in de bestaande analytische modellen. Zij zal wel parallel moeten worden herzien en/of aangepast.

Als gevolg van de aanzienlijke toename van rekenkracht van de computers in de afgelopen tien jaar, konden nieuwe modelleringsmethoden worden ontwikkeld, waaronder de zogenoemde Monte-Carlomethode en moleculaire-dynamicamethode. De Monte-Carlomethode steunt op waarschijnlijkheden toegekend aan de betrokken processen en maakt het mogelijk de studie van de oplossingsmechanismen op microscopische schaal aan te pakken en tegelijk een goed compromis te bewaren tussen eenvoud en rekentijd. Dit is één van de onderzoekswegen die recentelijk aanbevolen werden inzake modellering. Deze methode pretendeert echter niet in de plaats te treden van de analytische modellen, die

momenteel de basisinstrumenten blijven om de duurzaamheid van het glas in bergingsomstandigheden te evalueren. De moleculaire-dynamicamethode van haar kant heeft betrekking op de interactiepotentiaal die wordt berekend op basis van de wet van Newton ($F = m \cdot a$). Zij is preciezer, maar heeft het nadeel dat zij slechts heel kleine berekeningsstappen toelaat ($t < 10^{-10}$ s).

Rekening houdend met de resterende onzekerheden over de duurzaamheid van het glas in de Boomse Klei, wordt in de evaluaties van de langetermijn veiligheid conservatief aangenomen dat het glas–water–kleisysteem niet evolueert naar saturatieomstandigheden. Niettegenstaande deze hypothese bedraagt de duurzaamheid van het glas in dergelijke omstandigheden van een bergingssysteem verschillende tienduizenden jaren; de minimale duurzaamheid berekend op basis van de maximaal theoretisch mogelijke oplossingsnelheid (beginsnelheid V_0 beantwoordend aan een nulconcentratie van kiezelzuur in oplossing) bedraagt ongeveer 10 000 jaar. De veiligheidsevaluaties tonen aan dat deze duurzaamheid geen aanzienlijke impact heeft op de radionuclidenflux aan het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende lagen. Het inzetten van aanzienlijke middelen om de onzekerheden rond deze duurzaamheid te verminderen, is bijgevolg niet gerechtvaardigd omwille van de geringe mogelijke gevolgen op de langetermijn veiligheid van een dergelijke vermindering.

De toekomstige onderzoeksprogramma's betreffende het glas zullen het conservatieve karakter van de benedengrens voor de duurzaamheid die in aanmerking wordt genomen in de modellering van het nabije veld, moeten aantonen, maar niet een absolute waarde van duurzaamheid. Zij zullen tot doel hebben overtuigende kwalitatieve of semi-kwantitatieve argumenten aan te reiken die aantonen dat de duurzaamheid van het glas hoogstwaarschijnlijk verschillende honderdduizenden jaar zal bedragen. Dit is ten minste een grootteorde hoger dan de conservatieve hypothese. Op die manier kan ook de veiligheidsreserve die verbonden is met deze duurzaamheid geraamd worden. Zij zullen eveneens tot doel hebben aan te tonen dat de toevoeging van glasfrit in het nabije veld de duurzaamheid zou verbeteren. De volgende studies worden voorzien:

- interpretatie van de waargenomen fenomenen in verzadigingsomstandigheden;
- identificatie van de mechanismen die het oplossen van het glas op lange termijn bepalen;
- uitbreiding van de studie over het uitlooggedrag van de radionucliden tot andere elementen die als kritisch of mogelijk kritisch worden beschouwd (^{79}Se , ^{126}Sn , ^{107}Pd en ^{93}Zr);
- uitwerking van een geochemisch model en een analytisch model;
- evaluatie van de modellen via drie aanvullende benaderingswijzen: simulatie van de oplossingsmechanismen op microscopische schaal met de Monte-Carломethode, langlopende demonstratie-experimenten in situ (reeds begonnen) en studie van natuurlijke analogieën in omstandigheden die representatief zijn voor de niet-verstoorde Boomse Klei. (Er is in de Boomse Klei basaltachtig vulkanisch glas aangetroffen waarvan is aangetoond dat het gedrag representatief is voor dat van nucleair glas. Het aangetroffen glas vertoont het zeer interessante kenmerk dat geen sporen van aantasting aanwezig zijn.)

3.4.1.2 Bestraalde splijtstoffen

Een eerste studie betreffende de oplosbaarheid van UO_2 in de Boomse Klei in functie van sleutelparameters zoals de concentraties van carbonaat en opgeloste organische stof, toont aan dat de organische stof geen significante invloed heeft op de oplosbaarheid van het uranium, die erg laag is in een reducerend milieu (ongeveer $10^{-8} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$). De invloed van de carbonaten komt slechts tot uiting voor minder uitgesproken redoxomstandigheden (complexering van het hexavalente uranium dat dan aanwezig is in oplossing). De UO_2 -matrix zou, volgens de in de literatuur vermelde gegevens, eveneens worden gekenmerkt door een uitgesproken duurzaamheid ten opzichte van de tijdschalen waarmee rekening wordt gehouden in de veiligheidsevaluaties.

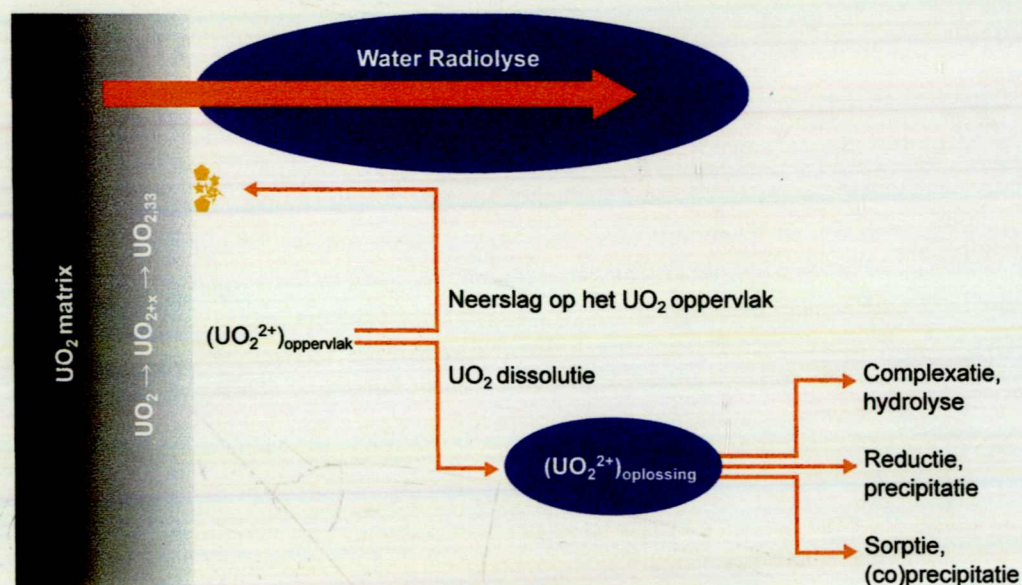
Niettegenstaande het belang van de bestraalde splijtstoffen bestaan er momenteel weinig gegevens in de literatuur over hun gedrag in kleimilieu. De recente eerste veiligheidsevaluatie van de berging van bestraalde splijtstoffen in de Boomse Klei heeft voor de definitie van de bronterm de gegevens voor een berging in graniet geëxtrapoleerd naar de berging in klei. De studie van het gedrag van de bestraalde splijtstoffen wordt bovendien bemoeilijkt door het feit dat rekening moet worden gehouden met verschillende componenten; iedere component wordt gekenmerkt door een snelheid van vrijkomen en een specifieke radionuclideninventaris, hetgeen vereenvoudigingen noodzaakt voor de veiligheidsevaluaties. De studie heeft prioritair betrekking op de UO_2 -matrix, die natuurlijk de grootste hoeveelheid radioactiviteit bevat.

Op basis van een kritische literatuurstudie kon recentelijk een eerste onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma naar het gedrag van de UO_2 -splijtstof in de Boomse Klei worden gedefinieerd. Dit programma heeft tot doel de bronterm die wordt gebruikt in de veiligheidsevaluaties, te valideren, er de eventueel nodige aanpassingen in aan te brengen, hetgeen kennis vergt van de oplossingsmechanismen die werkzaam zullen zijn (fig. 3.33), en de aspecten te bestuderen die verband houden met de rechtvaardiging van de nodige vereenvoudigingen in de veiligheidsevaluaties. In een eerste periode zullen de studies geen betrekking hebben op bestraalde splijtstof maar wel op uraniumoxide en op met alfastralers gedopeerd uraniumoxide om de chemische samenstelling te simuleren van een UO_2 -bestraalde splijtstof met een hoge afbrand (SIMFUEL). De experimentele condities zullen representatief zijn voor die van een diepe berging. Dit programma, dat past in een internationale context via de deelname aan de kaderprogramma's van de Europese Commissie, omhelst de volgende taken:

- kritische doorlichting van de beschikbare gegevens over de karakterisering van de bestraalde UO_2 -splijtstoffen en de bestraalde MOX-splijtstoffen;
- bepaling van de oplossingssnelheid van SIMFUEL in de omstandigheden die zullen heersen in zes opeenvolgende periodes van de evolutie van het bergingssysteem, over een periode van 500 tot meer dan 100 000 jaar, en bepaling van de relatie tussen de alfa-activiteit van SIMFUEL en zijn oplossingssnelheid in de Boomse Klei;
- bepaling van de invloed van de kleimineralen op de oplossingssnelheid van SIMFUEL (mogelijkheid van verhoging van de oplossingssnelheid door adsorptie van de elementen U(VI) of U(IV) die worden vrijgezet in het milieu);

- studie van de verenigbaarheid van de verschillende materialen die worden voorzien voor de kunstmatige barrières met SIMFUEL;
- geochemische en kinetische modellering, waarbij de kinetische modellering allereerst een kritische doorlichting en een selectie van bestaande modellen noodzaakt; daarna zal overgegaan worden tot een eerste duurzaamheidsberekening van de bestraalde splijststoffen, rekening houdend met de parameters die specifiek zijn voor de Boomse Klei.

Op middellange termijn zouden geïntegreerde experimenten in het bovengronds laboratorium met reële bestraalde splijststof alsook experimenten in situ met SIMFUEL moeten worden ondernomen, op voorwaarde dat de vereiste toelatingen worden verkregen. Ook de mogelijke inbreng van de natuurlijke analogieën zal moeten worden onderzocht.



Figuur 3.33 Voorstelling van de oplossingsmechanismen van de UO_2 -matrix.

3.4.1.3 Hulzen en eindstukken

Er is tot op heden geen enkele studie aangevat over het gedrag van de hulzen en eindstukken en van het technologisch opwerkingsafval in de Boomse Klei. Dit afval zal niet worden geïmmobiliseerd in een cementmatrix, maar zal worden samengeperst en in een identieke primaire verpakking worden geplaatst als die gebruikt voor verglaasd afval. De afwezigheid van een mantel en een conditioneringsmatrix voor deze afvalklasse leidt in de veiligheidsevaluaties dus tot de conservatieve hypothese van een onmiddellijk vrijkomen van de radionucliden, hypothese die in feite een veiligheidsreserve inhoudt. Gezien zijn aard zou dit afval overigens geen problemen van verenigbaarheid met het bergingsmilieu mogen

stellen. Zo zal bijvoorbeeld het gehalte aan organische derivaten marginaal zijn. De opportuniteit van het uitvoeren van verenigbaarheidsstudies zal echter opnieuw worden onderzocht zodra de acceptatiecriteria betreffende dit afval gedefinieerd zullen zijn en hun conditioneringsprocédé gekwalificeerd.

3.4.1.4 Gebitumineerd afval

De twee belangrijkste types van gebitumineerd afval in een diepe berging zijn enerzijds het afval van de MAGALC-klasse, dat bestaat uit coprecipitateslib geconditioneerd in een matrix van gedistilleerde bitumen (*soft bitumen*), en dat afkomstig is van de opwerking van bestraalde splijtstoffen door COGEMA, en anderzijds dat van de MAGALE-klasse, dat bestaat uit oplossingen met een hoog natriumnitraatgehalte die geconditioneerd zijn in een matrix van geblazen bitumen of *hard bitumen*, dat afkomstig is van de vroegere EUROCHEMIC-installatie. Het gebitumineerde afval bekleedt een belangrijke plaats wegens zijn organische aard en de volumes, ongeveer 3400 m³. Gezien het kleine aantal afvalcolli van de MAGALC-klasse (480) in vergelijking met het aantal afvalcolli van de MAGALE-klasse (ongeveer 13400), worden deze laatste prioritair bestudeerd.

Met uitzondering van de gegevens betreffende de vorming van degradatieproducten door radiolyse, zijn in de literatuur weinig gegevens beschikbaar over de impact die de fenomenen die het gedrag van het gebitumineerde afval in bergingsomstandigheden beheersen, hebben op de performantie van het bergingssysteem. Dit omwille van de belangrijke resterende onzekerheden, of omwille van de tegenstrijdige informatie. Deze lacunes zijn te verklaren door de zeer langzame kinetiek van de betrokken processen (met uitzondering van de uitloging van de nitraten), door de moeilijkheid om experimenten uit te voeren op actieve colli in omstandigheden die representatief zijn voor een bergingssysteem, en door de wisselwerkingen tussen de verschillende fenomenen. Ten slotte lijkt er geen ander voorbeeld te bestaan dat vergelijkbaar is met het afval van de MAGALE-klasse.

De uitgevoerde bibliografische studies wijzen er niettemin op dat het gedrag van gebitumineerd afval in bergingsomstandigheden hoofdzakelijk door vijf fenomenen zal worden bepaald.

- De *uitloging* van ongeveer 750 ton natriumnitraat in de Boomse Klei op middellange termijn zal de geochemie van de Boomse Klei in de buurt van het nabije veld kunnen wijzigen en zal de migratie van de radionucliden, in het bijzonder de redox-gevoelige radionucliden, kunnen beïnvloeden.
- De *veroudering* van de afvalmatrix, met name de evolutie van de intrinsieke kenmerken (hardheid, viscositeit, verwekingspunt, dichtheid, enzovoort) in de loop van de tijd onder invloed van verschillende factoren. Dit proces beïnvloedt de aard en de omvang van de andere processen die het gedrag van de matrices in bergingsomstandigheden bepalen.
- De *zwellen* van de afvalmatrix als gevolg van de diffusie van water en het optreden van een hoge osmotische druk kunnen de performanties van de kunstmatige barrières beïnvloeden.

- De *biodegradatie* en de *radiolyse* brengen de productie van gas en oplosbare organische verbindingen met zich mee, die voor het merendeel een zeker complexeringsvermogen hebben en in voorkomend geval de speciatie van de radionucliden en dus hun migratiegedrag in de Boomse Klei zouden kunnen wijzigen.

Het onderzoek naar de fysico-chemische karakterisering en het uitlooggedrag van de inactieve zouten en van de radionucliden van het gebitumineerde afval in diverse omstandigheden, is ondernomen vanaf het einde van de jaren tachtig en gedurende het begin van de jaren negentig. De studies over veroudering, zwellen en biodegradatie waren eveneens in deze programma's opgenomen, maar vormden daarin een minder belangrijk luik.

De kennis die tot op heden is verworven over het afval van de MAGALE-klasse, in het bijzonder over de snelheid van vrijkomen van inactieve oplosbare zouten, wijst erop dat deze colli weinig zullen bijdragen tot de insluiting van de radionucliden in het beschouwde bergingssysteem. De veiligheidsevaluaties kennen dus geen enkele barrièrerol toe aan de bitumen-matrix en er is momenteel geen enkele nieuwe studie gepland over dit onderwerp. Deze kwestie zal evenwel in voorkomend geval worden herbekeken in het licht van de resultaten van de desbetreffende veiligheidsevaluaties.

Belangrijker dan de duurzaamheid van het gebitumineerde afval zijn de aspecten van de verenigbaarheid met het bergingsmilieu. De verschijnselen die als het meest kritiek worden beschouwd, zijn de complexe verschijnselen van veroudering en zwellen. Ze zullen centraal staan in de toekomstige programma's, aangezien de tot op heden verworven gegevens niet toelaten het gedrag van een reël colloïd in de omstandigheden van een diepebergingssysteem te evalueren. De biologische en radiolytische degradatieprocessen van hun kant uit zich in de productie van gas en oplosbare organische verbindingen. Wat betreft de gasproductie, komen de ramingen uit op een bovengrens van om en bij de 1 m³ per colli over een periode van 1000 jaar. Het gaat om een conservatieve waarde, die wordt berekend in standaardtemperatuur- en -drukomstandigheden, waarbij de initiële biologische degradatiesnelheid constant wordt gehouden, terwijl deze drastisch zou moeten afnemen met de tijd. (De bijdrage van de radiolyse is weinig significant.) Bovendien is oxalaat het belangrijkste complexerende agens dat hier wordt gegenereerd door radiolyse van het bitumen. Oxalaat heeft echter geen significante invloed op het gedrag van de radionucliden in het beschouwde nabije veld, namelijk een opvulmateriaal op basis van cement. De beschikbare resultaten wijzen er tevens op dat de radiolytische degradatieproducten van het afval van de MAGALE-klasse geen significante invloed hebben op het gedrag van plutonium en americium in de Boomse Klei. Deze studies zullen worden voortgezet en uitgediept. Dit geldt ook voor de studies van de biologische degradatieproducten, met name op het vlak van gasproductie, van de invloed van de fysico-chemische evolutie in het nabije veld en van de identificatie van de populaties micro-organismen die zich het meest waarschijnlijk ontwikkelen.

Sommige resultaten in verband met de fenomenen die betrekkelijk onafhankelijk zijn van het matrixtype, zoals radiolyse en in zekere mate biologische degradatie, die bekomen werden voor het afval van de MAGALE-klasse, zullen kunnen worden geëxtrapoleerd naar het afval van de MAGALC-klasse. Andere processen, zoals de zwellen en in voorkomend geval de definitie

van de bronterm, zullen het voorwerp moeten uitmaken van specifieke studies, evenals de vraag naar de invloed van de fluïditeit van de matrices van het afval van de MAGALC-klasse op hun gedrag in bergingsomstandigheden. (De studie van de mogelijke invloed van de migratie van een natriumnitraatfront op de retentie-eigenschappen van de klei werd in 1999 aangevangen in het kader van het radionuclidenmigratie-programma in de Boomse Klei.)

3.4.1.5 Gecementeerd afval

De duurzaamheid van het gecementeerde afval wordt momenteel niet bestudeerd, in de mate dat de veiligheidsevaluaties op conservatieve wijze de bijdrage van de cementmatrix tot de insluiting van de radionucliden verwaarlozen. Net als voor het gebitumineerde afval houden de belangrijkste vragen die de berging van het gecementeerde afval doen rijzen, verband met de verenigbaarheid van dit gecementeerde afval met de Boomse Klei. Het gecementeerde afval kan immers een alkalisch front veroorzaken, en bepaalde fluxen van gecementeerd afval bevatten cellulosederivaten waarvan de degradatieproducten in anaëroob en alkalisch midden een impact zouden kunnen hebben op de oplosbaarheid en de sorptie van de radionucliden. De tot dusver verkregen resultaten van de oplosbaarheidsmetingen en van de sorptie-experimenten met plutonium en americium in de klei in aanwezigheid van isosacharinezuur en andere degradatieproducten van cellulose, wijzen er echter op dat deze producten, en in het bijzonder isosacharinezuur, slechts weinig invloed hebben op het gedrag van de radionucliden in de Boomse Klei. De bijdrage van de afvalmatrices tot de vorming van een alkalisch front in de klei is evenwel nog niet geëvalueerd.

3.4.1.6 Geselecteerde gegevens voor de modellering van het nabije veld

De vereiste parameters voor de modellering van het nabije veld in de veiligheidsevaluaties werden kritisch doorgelicht en werden gecompileerd in synthesesdocumenten: de *data collection forms*. Deze parameters zijn: de oplosbaarheid van de radionucliden in het nabije veld (opvulmateriaal en klei), de fractuatiegraad van de glasmatrix en hun gemiddelde oplossingsnelheid.

3.4.2 Het gedrag van de materialen in de bergingsinstallatie

De samenstellende materialen van de belangrijkste componenten van een diepebergingsinstallatie, moeten dusdanig worden gekozen dat deze componenten de hen toegekende functies kunnen vervullen, en dat ze verenigbaar zijn met de andere componenten, of met andere woorden dat ze geen ongunstige invloed uitoefenen op hun performanties. Deze materialen zijn hoofdzakelijk de metalen verpakkings- en mantelmaterialen en de opvul- en afdichtingsmaterialen op basis van klei.

3.4.2.1 Verpakkings- en mantelmaterialen

Aangezien de vrije enthalpie van de corrosiereactie in anaëroob milieu $x M + y H_2O \Rightarrow M_xO_y + y H_2$ in het algemeen negatief is voor de gebruikelijke metalen, is de degradatie van de metalen die aanwezig zijn in een diepe berging op termijn onvermijdelijk. Deze degradatie bekleedt in twee opzichten een belangrijke plaats en de onderliggende mechanismen moeten dus goed worden begrepen. Aangezien de corrosie de geleidelijke aantasting van de verpakkingen en mantels met zich meebrengt, moeten een goed begrip en correcte evaluatie van de corrosiemechanismen en -kinetica het mogelijk maken de gepaste keuzen te maken zodat de fysische insluiting van de radionucliden in het verglaasde afval en in de bestraalde splijtstoffen kan verzekerd worden gedurende de thermische fase van de berging, dit is gedurende respectievelijk enkele honderden tot enkele duizenden jaren. Aangezien deze corrosie ook gepaard gaat met de vorming van waterstof, dat de gasformatie kan verstoren, moet zij worden bestudeerd met het oog op het ontwikkelen van een bergingsarchitectuur die deze verstoring op aanvaardbare niveaus kan houden (zie sectie 3.6), met name door de waterstofproductie te beperken of door het afvoeren van gas te vergemakkelijken.

De resultaten van in situ corrosieproeven verschillen sterk naar gelang het type bestudeerd materiaal: de roestvaste stalen waaruit de bestaande afvalvaten vervaardigd zijn, en de legeringen die op Europees niveau worden bestudeerd als mantelmateriaal (koolstofstaal, roestvaste stalen, zuiver titaan, titaan- en nikkellegeringen), die zich telkens in vijf verschillende beginstaten bevonden. De monsters van *roestvaste stalen* en *speciale legeringen* vertonen geen enkel spoor van corrosie tengevolge interactie met het bergingsmilieu, en dit ongeacht de omstandigheden van de proefneming. (Deze waarneming lijkt bevestigd door het feit dat de talrijke piëzometers in roestvast staal AISI 316 die gebruikt zijn in direct contact met de Boomse Klei in het kader van ander onderzoek, blijkbaar niet onderhevig waren aan corrosie. Dit is evenwel niet het voorwerp geweest van specifiek onderzoek in die zin.) Alle geteste *koolstofstaalmonsters* daarentegen vertonen opmerkelijke sporen van uniforme corrosie en putcorrosie. De diepte van de putjes en de dikte van de gecorrodeerde laag hangen af van de temperatuur en van de blootstellingsduur. Terwijl de gepolijste monsters veel minder vatbaar zijn voor putcorrosie dan de niet-gepolijste monsters, doordat ze initieel minder oppervlaktegebreken vertonen, vertonen de niet-gepolijste monsters een continue putvorming, met samensmelting van de putjes. Deze morfologie wordt verklaard door de opeenvolging van twee mechanismen. Tijdens een eerste fase, de zogenaamde *aërobe fase*, brengt de zuurstof die in het poriënwater wordt opgelost bij het uitboren in de klei en het plaatsen van de buizen met de monsters, een corrosie teweeg die zich hoofdzakelijk zoniet uitsluitend in putjes manifesteert. Nadat binnen enkele maanden de aanvankelijke, reducerende omstandigheden zijn hersteld, gaat een uniform corrosiemechanisme overwegen, dat in zekere zin de neiging vertoont de blootgestelde oppervlakte glad te maken. (In realiteit zal de aërobe periode als gevolg van de bouw van de bergingsinstallatie veel langer zijn, aangezien de klei chemisch sterker zal zijn verstoord. De diepte van de putjes zou bijgevolg aanzienlijk kunnen toenemen.)

De ongunstige kinetica van putcorrosie en uniforme corrosie van koolstofstaal maken het ongeschikt als mantelmateriaal. De werkzaamheden hebben zich vervolgens toegespitst op

de laboratoriumstudie van twee andere courante materialen en die verenigbaar zijn met het staal van de afvalverpakking: de austenitische roestvaste stalen AISI 316L hMo (beschouwd als referentie en variant van AISI 316, dat reeds in situ werd getest) en UHB 904L, dat hoger gelegen is en reeds in situ is getest. Deze parametrische studie, die twee types van experimenten omvat, onderzoekt systematisch de invloed van het omgevende materiaal (Boomse Klei of opvullingsmengsel FoCa-klei-zand-grafiet), van de temperatuur (van 16 tot 140°C), en van de representatieve gehalten aan zuurstof, chloriden, thiosulfaten en sulfaten; die twee laatste verbindingen kunnen worden gevormd bij de oxidatie van het pyriet bij de uitgraving van de Boomse Klei. De elektrochemische experimenten hebben tot doel de verschillende potentiële karakteristieken van de putcorrosie te bepalen, om de waarschijnlijkheid ervan te kunnen evalueren. De immersie-experimenten bestaan erin monsters AISI 316L hMo die verschillende types van voorbehandeling hebben ondergaan, in contact te plaatsen met het opvulmateriaal. Dit gebeurt in hermetische containers met oplossingen van verschillende samenstellingen die representatief zijn voor de evolutie in de tijd van de verwachte condities in het nabije veld (evolutie van de aërobe naar anaërobe omstandigheden, geleidelijke vermindering van de invloed van de FoCa-klei op de chemie van het poriënwater ten gunste van een groeiende invloed van de Boomse Klei en daling van de temperatuur). Ook de spleetcorrosie en de eventuele galvanische corrosie die wordt bevorderd door de aanwezigheid van grafiet in het opvulmateriaal, worden onderzocht. De duur van deze experimenten bedraagt maximaal twee jaar, met tussentijdse staalnames.

De meeste tot dusver verkregen resultaten zijn resultaten van elektrochemische experimenten in geoxideerd milieu. De meest markante zijn de experimenten met AISI 316L hMo op 90°C:

- de stijging van het chloridegehalte bevordert de putcorrosie;
- omgekeerd vermindert een stijging van het sulfaatgehalte de putcorrosie;
- thiosulfaten lijken de putcorrosie pas significant te bevorderen vanaf 50 ppm.

Dezelfde proeven bij 16°C geven alleen aanleiding tot putvorming bij chloridegehalten van 10000 ppm, dit is het duizendvoud van het chloridgehalte van het poriënwater van de Boomse Klei en het tienvoud van dat van de leperiaan-kleien. Het UHB 904L staal ten slotte vertoont systematisch een betere putcorrosie-bestendigheid dan AISI 316L hMo in de geteste milieus. (De eerste monsters van de immersie-proeven wijzen op geen enkel corrosiefenomeen.)

Naast de voortzetting van de lopende studies zal het toekomstige programma de optimalisering van de keuze van het mantelmateriaal beogen. Hiertoe zullen enerzijds grondiger de verschillende types van corrosie die kunnen plaatsvinden, worden bestudeerd, en dit om de meest waarschijnlijke en nadelige aantastingswijze te definiëren. Anderzijds zullen de aspecten van de praktische uitvoerbaarheid en met name de lasbaarheid worden bestudeerd. Deze optimalisering zal gebeuren in het kader van een geïntegreerde benadering die rekening houdt met alle parameters die van invloed kunnen zijn op de corrosie en noodzaakt in het bijzonder een beter begrip van de evolutie van de geochemie van het milieu in de loop van de tijd.

3.4.2.2 Opvul- en afdichtingsmaterialen

Het principe van een robuuste architectuur veronderstelt dat de aanwezigheid van het opvulmateriaal niet alleen bijdraagt tot de geomechanische stabiliteit van het bergingssysteem en tot de warmteafvoer, maar ook, zo mogelijk, tot de algemene veiligheid (zie ook sectie 3.3.1 en tabel 3.7). Een oordeelkundige keuze van de samenstelling van dit materiaal kan immers de prestatie van de kunstmatige barrières en bijgevolg van het hele bergingssysteem aanzienlijk verbeteren. Zo kan het opvulmateriaal:

- bijdragen tot het creëren van een geochemisch gunstig milieu voor een beperking van de corrosie van de mantels;
- bijdragen tot het creëren van een geochemisch gunstig milieu voor de beperking van de uitloging van de afvalmatrices;
- de afvoer bevorderen van de gasen die worden geproduceerd door anaërobe corrosie, door radiolyse en eventueel door biodegradatie van de organische bestanddelen;
- bijdragen tot de insluiting en de retentie van de radionucliden in het nabije veld.

De aard van het beoogde opvulmateriaal loopt uiteen naar gelang van het op te vullen type galerij en van het in te sluiten afvaltype.

- Voor de bergingsgalerijen met verglaasd afval en bestraalde splijtstoffen zal het opvulmateriaal een voldoende warmtegeleidbaarheid moeten bezitten om een doeltreffende afvoer van de warmte mogelijk te maken. Op die manier kan een te grote temperatuurstijging van de afvalverpakking en het afval zelf voorkomen worden. Het momenteel bestudeerde materiaal is een mengsel op basis van zwellende FoCa-klei, een klei van het bentoniettype die wordt ontgonnen in de regio van Fourges-Cahaignes, in het Parijse bekken. Deze klei is chemisch verenigbaar met de Boomse Klei en kan naar gelang van de compactiedichtheid gemakkelijk een zwellingsdruk tussen 4 en 5 MPa bereiken, dit is de orde van grootte van de lithostatische druk. Dit mengsel, dat tevens zal worden gebruikt in de PRACLAY demonstratie-experiment, bestaat uit 60 gewichtspersent aan zwellende klei, 35 % zand en 5 % grafiet. De toevoeging van zand maakt het mogelijk de totale zwelling te beperken om een te hoge samendrukking van de omgevende zone te vermijden. Dankzij de toevoeging van grafiet kan de warmtegeleidbaarheid van het mengsel worden verhoogd van 1.5 tot $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. De eventuele toevoeging van glasfrit ten slotte zou het oplossen van de glasmatrix kunnen vertragen.
- Voor de bergingsgalerijen met het andere afval waarvan de matrix van cement is, wordt gedacht aan het gebruik van een opvulmateriaal dat vergelijkbaar is met de afvalmatrix, dat wil zeggen op basis van hydraulisch bindmiddel. Dit heeft het voordeel dat vele radionucliden in het afval, in het bijzonder de actiniden, weinig oplosbaar zijn in alkalisch milieu. Dit opvulmateriaal zou echter een wijziging van de retentie-eigenschappen van de omgevende klei met zich mee kunnen brengen als gevolg van de diffusie van een alkalisch front vanuit de bergingsinstallatie. Het vertoont ook een mechanisch gedrag dat potentieel minder goed is dan dat van de mengsels op basis van zwellende klei.
- Voor de verbindingsgalerij, de hoofdgalerijen en de toegangsschachten ten slotte moet het opvulmateriaal een reologisch gedrag hebben dat geschikt is om de mechanische

stabiliteit te verzekeren, alsook een optimale chemische verenigbaarheid met de omgevende kleiformatie. Dit zou een mengsel van zand en FoCa-klei kunnen zijn.

Het *afdichtingsmateriaal* moet een belangrijke rol spelen in de veiligheidsfunctie vertraging en gespreid vrijkomen. Het afdichtingsmateriaal dat momenteel wordt bestudeerd, is een mengsel van tabletten en poeder op basis van zwellende FoCa-klei. Naast een uitstekend zwellingsvermogen bezit deze klei uitstekende reologische eigenschappen, waaronder het vermogen tot zelfafdichting door plastisch gedrag in geval van scheurvorming. De radionuclidenretentie-eigenschappen en de diffusie-eigenschappen van deze klei zijn vergelijkbaar met die van de Boomse Klei. Voor het beschouwde mengsel kan gemakkelijk een hydraulische geleidbaarheid van $10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ worden bereikt (dit is de typische grootteorde voor de Boomse Klei).

Hoewel er nog geen detailstudies bestaan over de opvulling en de afdichting van de hoofdgalerijen en de schachten, zijn reeds verschillende opvul- en afdichtingsproeven gerealiseerd in het ondergrondse laboratorium HADES. De recentste, het Europese experiment RESEAL, dat gestart is in 1996, had in een eerste periode tot doel de algemene vereisten voor het afdichten van een toegangsschacht theoretisch te bepalen. De experimentele fase ervan, die nog altijd bezig is, heeft hoofdzakelijk tot doel aan te tonen dat het mogelijk is een galerij van een representatieve diameter, namelijk de kleine schacht, te dichten met een materiaal bestaande uit een mengsel van tabletten en poeder van zwellende FoCa-klei, dat een voldoende geringe hydraulische geleidbaarheid vertoont om de preferentiële migratie van water en gassen langs de wanden van de schacht of de verstoorde zone te vermijden, en dat in staat is om zijn mechanische stabiliteit te behouden in geval van accidentele overdruk als gevolg van bijvoorbeeld de productie van gassen binnen het bergingssysteem. De hydraulische geleidbaarheid die in de praktijk wordt bereikt door de afdichting, bedraagt om en bij de $10^{-13} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ten slotte zullen de *opvul- en afdichtingsmaterialen* gezien het aanzienlijke volume van de uitgravingen op industriële schaal gefabriceerd en geïnstalleerd moeten kunnen worden tegen een aanvaardbare kostprijs. Ook zullen de uitvoeringstechnieken oordeelkundig moeten worden gekozen en correct moeten worden toegepast om de geomechanische verstoringen van de omgevende formatie niet significant te verhogen.

De werken betreffende de opvul- en afdichtingsmaterialen profiteren van de internationale studies inzake het gedrag van bentoniet, die in de meeste buitenlandse programma's in aanmerking worden genomen. Het toekomstige programma heeft tot doel de keuze van de opvul- en afdichtingsmaterialen te optimaliseren in het licht van de verschillende functies die zij moeten verzekeren in het bergingssysteem. Voor het opvulmateriaal zal deze optimalisering heel speciaal rekening houden met de noodzaak een omgeving tot stand te brengen die de corrosie van de mantels kan voorkomen. Zij zal rechtstreeks kunnen steunen op de gegevens afkomstig van de realisatie van de OPHELIE-maquette.

3.5 Het gedrag van de radionucliden in de Boomse Klei

De theoretische en experimentele studie alsook het inzicht in en de modellering van de radionuclidenmigratie binnen de Boomse Klei, en in het bijzonder de retentieverschijnselen, bekleden een cruciale plaats in het onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS over de diepe berging en dit sinds hun aanvang. Zoals langetermijn veiligheidsevaluaties steeds hebben aangetoond (zie hoofdstuk 4), vormt de Boomse Klei immers de belangrijkste barrière ten aanzien van de migratie van de radionucliden vanuit het geborgen afval tot in de biosfeer. De noodzaak aan een beter inzicht in de migratiemechanismen drong zich evenwel op als gevolg van de vaststelling dat het onmogelijk was de migratietests afdoende te interpreteren en het gedrag van bepaalde klassen van elementen in de Boomse Klei te beschrijven met de bestaande modellen. Deze gingen onder meer uit van een omkeerbare sorptie en een thermodynamisch evenwicht zonder oplosbaarheidslimiet en zij hadden geleid tot een verkeerde evaluatie van de migratieparameters, vooral van de vertragsingsfactor R . De twee belangrijkste doelstellingen van het onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma 1990–2000 inzake migratie waren dus het begrijpen en het voorspellen van het gedrag van de radionucliden in de Boomse Klei, en in het bijzonder:

- het identificeren van de basismechanismen die de migratie bepalen;
- het herevalueren van de migratieparameters die nodig zijn voor de langetermijn veiligheidsevaluaties.

Twee types van klassieke tests maken het mogelijk de migratie van de radionucliden in de klei te bestuderen en de waarden van hun migratieparameters, met name de diffusie toegankelijke porositeit η , de vertragsingsfactor R en de schijnbare diffusiecoëfficiënt D_{app} , te bepalen. Dit zijn de diffusietests, waarin de drijvende kracht voor de migratie een concentratiegradiënt is, en de percolatietests, waarin de drijvende kracht voor de migratie een opgelegde hydraulische drukgradiënt is. Een nieuwe techniek, de elektromigratietechniek, is momenteel in ontwikkeling en de toepasbaarheid ervan is al met succes getest in een aantal gevallen. Dit is de techniek van versnelde migratie door de aanwezigheid van een elektrisch veld, die ook informatie oplevert over de speciatie van de diffunderende elementen in oplossing. Deze nieuwe techniek vult de klassieke tests aan, doordat ze het mogelijk maakt de migratieparameters te verkrijgen via een methode die op een geheel andere aanpak berust, en aldus door deze complementariteit het risico van experimenteel artefact beperkt.

Het onderzoek over de migratie wordt parallel uitgevoerd in de bovengrondse laboratoria en in het ondergrondse laboratorium HADES. De tests in het ondergrondse laboratorium hebben als doelstellingen:

- de toepasbaarheid van de migratieparameters die in het bovengrondse laboratorium zijn vastgesteld, te verifiëren voor zowel de weinig of niet-gesorbeerde elementen als voor de sterk geïmmobiliseerde elementen;
- de migratiemodellen te testen op grote schaal (lineaire verhoging van de schaal met een factor 50 tussen de tests in het bovengrondse laboratorium op kleikernen en de tests in situ in het ondergrondse laboratorium). Dit deel van het programma betreft alleen de weinig of niet-gesorbeerde elementen (getritieerd water of HTO, I^- , HCO_3^- , mobiele

Species Zeer algemene term die de in een omgeving aanwezige deeltjes, atomen, verbindingen, ionen of moleculen kan aanduiden.

Speciatie Beschrijving van de hoeveelheden en soorten aanwezige elementen, vormen en chemische fases.

Oplosbaarheid Maximale in oplossing gemeten concentratie van een element voor een beschouwd systeem, in welbepaalde fysico-chemische omstandigheden. De concentratie in oplossing van de ionen die deel uitmaken van de fase die de oplosbaarheid controleert, wordt bepaald door de evenwichtsconstante voor het oplossen van de fase (oplosbaarheidsproduct) en de evenwichtsconstanten voor vorming van alle andere species (complexatieconstanten).

Sorptie Term gebruikt voor oppervlakteverschijnselen, die onafhankelijk is van de betrokken mechanismen, en die absorptie- of adsorptieprocessen kan omvatten, of een combinatie van beide.

Vertragsingsfactor

Term die de verschijnselen fysisorptie en oppervlaktecomplexatie op functionele groepen van de klei; de omkeerbare en niet-omkeerbare lineaire sorptie, de ionenuitwisselingen en de liganduitwisselingen, in rekening brengt.

Voor diffusie toegankelijke porositeit

De beschikbare fractie van de totale waterverzadigde porositeit, die voor een beschouwd element toegankelijk is voor migratie door diffusie.

organische stof); het gebruik van sterk geïmmobiliseerde elementen is onmogelijk gezien de zeer lange tijd die zij nodig hebben voor migratie.

Het onderzoek naar de migratie wordt enerzijds ondersteund door conceptuele en numerieke modellering en anderzijds door deelname aan internationale initiatieven die tot doel hebben de gebruikte modellen te testen en te vergelijken en kwaliteitsdatabanken samen te stellen. Geochemische modellering draagt eveneens bij tot de interpretatie van de migratietests (bepaling van de speciatie en van de oplosbaarheid van de elementen in de klei).

De te beschouwen radionucliden voor de migratie-experimenten, worden in de eerste plaats bepaald door de resultaten van de langetermijn veiligheidsevaluaties. Zij zijn verdeeld in twee categorieën, die er in het begin van de jaren negentig als volgt uitzagen:

- *de kritische radionucliden*, dit zijn de radionucliden die de maximale radiologische impact met zich meebrengen: ^{14}C , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{135}Cs en ^{237}Np .
- *de mogelijke kritische radionucliden*: ^{79}Se , ^{93}Zr en ^{107}Pd , alsook de isotopen van uranium, plutonium, americium en curium.

Vervolgens zijn radium (^{226}Ra) en protactinium (^{231}Pa) in het programma opgenomen overeenkomstig de conclusies van een eerste evaluatie van de directe berging van de bestraalde splijtstof in de Boomse Klei; uranium, dat er al deel van uitmaakte, kreeg een heel bijzondere betekenis.

Gezien de mogelijke invloed van de organische stof op de migratie van de radionucliden en in het bijzonder op de migratie van de actiniden, bekleedt de studie van de organische stof een even belangrijke plaats als de studie van de kritische radionucliden. Aldus werd in 1995 een studie gestart die specifiek betrekking heeft op de rol van de organische stof in de migratie van de actiniden. Deze studie omvat migratietests met organische stof die is gemerkt met ^{14}C en in contact is gebracht met een actinide.

Dit gezegd zijnde, hebben de migratie-experimenten ook betrekking op andere radionucliden:

- de elementen waarvan de studie een beter begrip oplevert van de migratiemechanismen die werkzaam zijn in de klei: dat is het geval met de weinig of niet gesorbeerde elementen zoals getritieerd water, strontium (Sr^{2+}), calcium (Ca^{2+}), halogene anionen (Br^- , Cl^-) en met ^{14}C gemerkte organische moleculen (sucrose, lactose enzovoort);
- de elementen die als analogieën worden gebruikt: europium, dat wordt gebruikt als analogie voor de trivalente actiniden, en kleine organische moleculen, die gebruikt worden als analogieën voor de mobiele organische stof.

3.5.1 De kenmerken van de Boomse Klei bepalend voor migratie

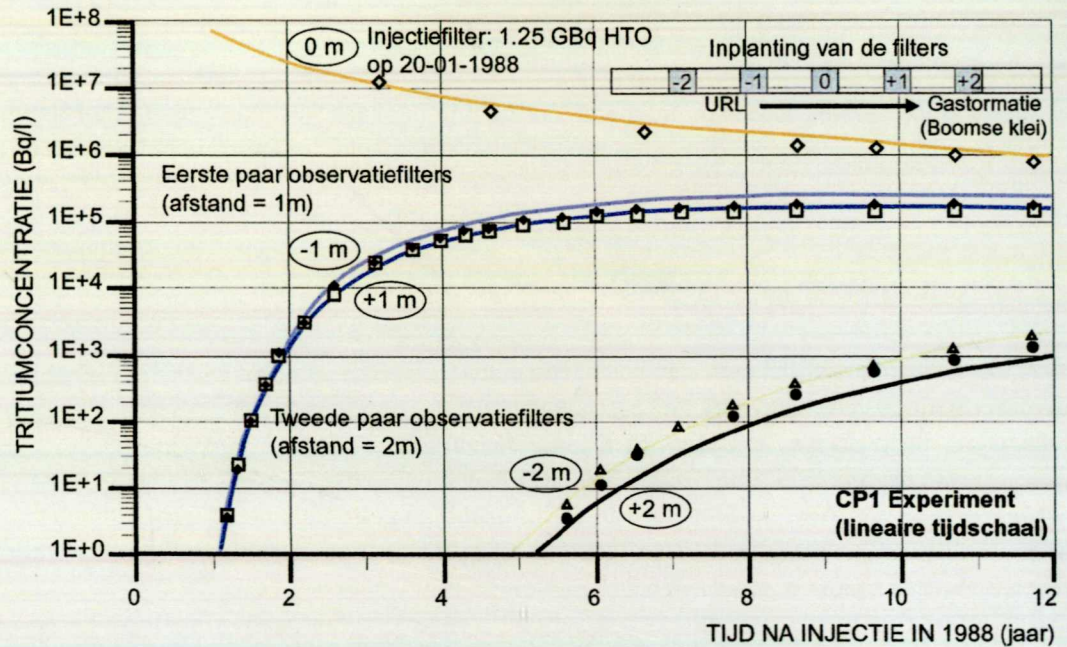
Behalve dat de migratie van de radionucliden in de Boomse Klei hoofdzakelijk door diffusie gebeurt, dat wil zeggen dat zij wordt gecontroleerd door concentratiegradiënten en dus zeer traag is, heeft de Boomse Klei een reeks geochemische en fysico-chemische kenmerken die zeer gunstig zijn voor de retentie van de radionucliden:

- *reducerend en licht alkalisch milieu* dat de reductie van redoxgevoelige species, tot weinig oplosbare species bevordert;
- *hoge ionenuitwisselingscapaciteit*;
- *ultrafiltratie van de colloïden*, en vooral van de organische colloïden waaraan bepaalde radionucliden gedeeltelijk gebonden zijn, zodanig dat de mobiliteit van de radionucliden beperkt wordt.

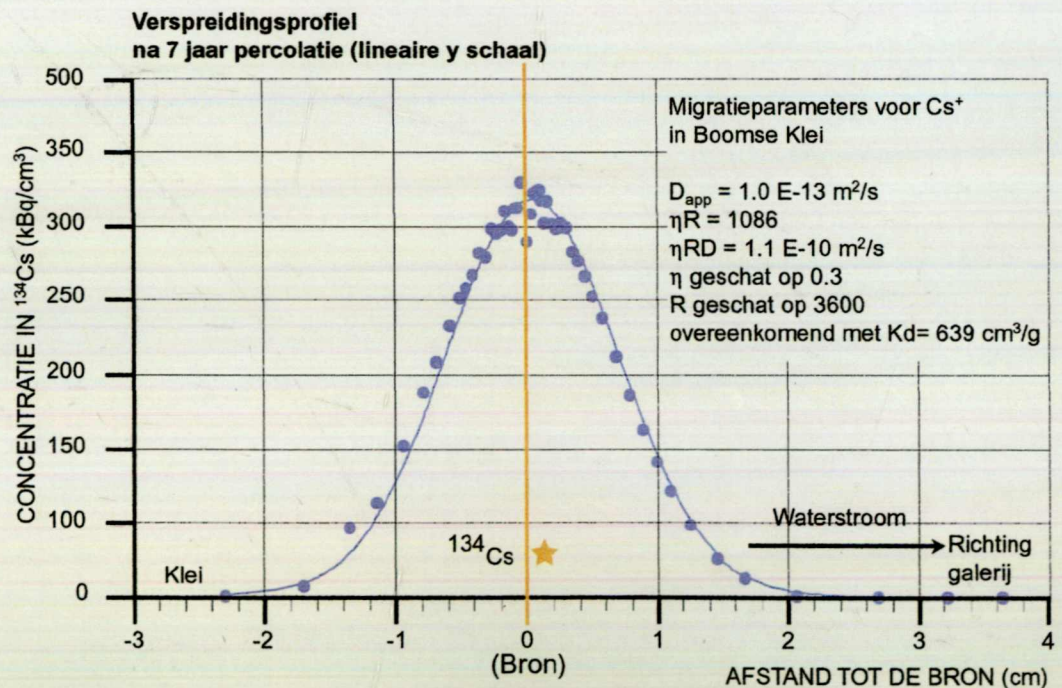
3.5.1.1 Overzicht van diffusie

Aangezien de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel gekenmerkt wordt door een zeer geringe verticale hydraulische geleidbaarheid ($K_v \approx 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) en een zeer geringe natuurlijke hydraulische gradiënt (2 m waterkolom op 100 m kleidikte), wordt de radionuclidenmigratie in de Boomse Klei vooral beheerst door diffusie; advectie speelt slechts een secundaire rol. Twee tests die in situ zijn uitgevoerd in het ondergrondse laboratorium, illustreren deze eigenschap zeer goed; één van beide tests, die met getritieerd water, werkt met aanzienlijke ruimte- en tijdschalen.

- Een in 1988 begonnen migratietest op meterschaal toont ondubbelzinnig aan dat de migratie van getritieerd water een diffusief proces is. De tot dusver verkregen experimentele resultaten stemmen inderdaad zeer goed overeen met de theoretische voorspellingen die waren berekend op basis van een strikt diffusief model dat gebruikmaakte van de parameters die waren bepaald uit tests in het bovengrondse laboratorium (fig. 3.34). Momenteel wordt een activiteit gemeten in de filters die zich op 1 m en 2 m aan weerszijden van de injectiefilter bevinden; er wordt daarentegen geen enkele activiteit gemeten in de filters die op 3 en 4 m van de injectiefilter zijn geplaatst.
- Een percolatietest met ^{134}Cs onder een zeer hoge hydraulische gradiënt (600 tot 1 300, terwijl de natuurlijke gradiënt 0.02 bedraagt) die gedurende 7 jaar werd opgevolgd, wijst op een onbeduidend percolatie-effect (activiteitsprofiel in de kleikern nagenoeg symmetrisch ten opzichte van de aanvankelijke positie van de bron), en toont aldus aan dat de migratie van cesium zelfs in deze extreme omstandigheden hoofdzakelijk bepaald blijft door diffusie (fig. 3.35).



Figuur 3.34 Vergelijking tussen experimentele resultaten en theoretische curves voor de in situ migratietest met getritieerd water.



Figuur 3.35 Profiel van de activiteit van ^{134}Cs in de kleikern voor de in situ percolatietest.

3.5.1.2 Geochemische kenmerken

De Boomse Klei is een reducerend en licht alkalisch milieu, dat de reductie van de redoxgevoelige species tot weinig oplosbare species bevordert. Zij bezit aanzienlijke buffercapaciteiten wat betreft pH en E_h vanwege de aanwezigheid van mineralen zoals calciet, sideriet en pyriet in een gehalte van 1 tot 5 gewichtsprocent (tabel 3.8). Het poriënwater is sinds zeer lang in evenwicht met de mineralen van de vaste fase (evenwicht ontbinding / precipitatie), hoewel het momenteel onmogelijk is nauwkeurig een tijdschaal te preciseren. De redoxevenwichten stelden zich in aan het begin van de sedimentatie dankzij de activiteit van de sulfaatreducerende en methanogene bacteriën die eerst pyriet en vervolgens methaan hebben geproduceerd.

Tabel 3.8 Kenmerken van het poriënwater van de Boomse Klei.

Anionen (mol·l⁻¹)	
HCO ₃ ⁻	1.36·10 ⁻²
Cl ⁻	7.61·10 ⁻⁴
F ⁻	1.89·10 ⁻⁴
HPO ₄ ²⁻	3.96·10 ⁻⁶
Br ⁻	6.13·10 ⁻⁶
SO ₄ ²⁻	2.08·10 ⁻⁶
Kationen (mol·l⁻¹)	
Na ⁺	1.77·10 ⁻²
K ⁺	2.81·10 ⁻⁴
Mg ²⁺	1.19·10 ⁻⁴
Ca ²⁺	9.98·10 ⁻⁶
Fe (II/III)	1.61·10 ⁻⁵
Al (III)	2.96·10 ⁻⁶
Neutrale elementen (mol·l⁻¹)	
B(OH) ₃	6.93·10 ⁻⁴
Si(OH) ₄	1.78·10 ⁻⁴
Organische koolstof in oplossing (DOC) (mg C·l⁻¹)	41.3 à 144
Fysico-chemische parameters	
pH*	8.2 ± 0.05
E_h (mV/SHE**)	- 0.250
Ionengeleidbaarheid (mS·cm ⁻¹)	1.8
Totale hoeveelheid droge stof (mg·l ⁻¹)	≈ 1500
Kationenuitwisselingscapaciteit (CEC) voor strontium (meq per 100 g klei)	24 ± 3
Kationenuitwisselingscapaciteit (CEC) voor calcium (meq per 100 g klei)	23 ± 3
Redoxcapaciteit (meq·g ⁻¹)	2

*: in situ meting zonder CO₂-verlies met behulp van een optode

**: redoxpotential ten opzichte van de standaard waterstofelektrode

De Boomse Klei is echter zeer gevoelig voor oxidatie (oxidatie van pyriet dat gepaard gaat met het vrijkomen van sulfaat en met, naar gelang van het calciëgehalte van de omgeving, een verzuring van het milieu). Dit fenomeen, dat met name is waargenomen tijdens het graven van de ondergrondse installaties, uit zich in een wijziging van de geochemische kenmerken van de Boomse Klei, welke zou kunnen leiden tot veranderingen van speciatie en oplosbaarheid van de radionucliden en het gedrag van de organische stof. In de meeste gevallen wordt de geoxideerde vorm van de redoxgevoelige radionucliden (Se, Sn, Tc, U, Np, Pu), gekenmerkt door een aanzienlijk hogere oplosbaarheid. De oxidatie van het pyriet uit zich ook in de vorming van gehydrateerde ijzeroxiden, die een zeer grote sorptiecapaciteit hebben. De migratie van de species in de klei zou moeten worden geherevalueerd indien de dikte van de geochemisch verstoorde zone aanzienlijk zou zijn.

3.5.1.3 Interactie tussen de klei en de oplossing

De mineralen aanwezig in de Boomse Klei, hebben aan de oppervlakte een permanente negatieve elektrische lading, wat leidt tot een elektrostatische repulsie van de anionen en een sorptie van de kationen. De voor diffusie toegankelijke porositeit van de kationen en van de neutrale elementen ($\eta \approx 0.30$), zoals het getritieerde water of opgeloste silica ($\text{Si}(\text{OH})_4$), is dus hoger dan die van de niet-gesorbeerde anionen zoals het jodide-ion (I^- , $\eta \approx 0.12$). De sorptie van de kationen hangt af van hun affiniteit met de liganden aan de oppervlakte, maar ook van hun gehydrateerde straal en hun netto elektrische lading. De radionucliden van kationische aard, namelijk Cs (I), Pd (II), Eu (III), Am (III), Cm (III) en Zr (IV), alsook de redoxgevoelige elementen die gemakkelijk worden gereduceerd tot weinig oplosbare elementen (Se, Tc, U, Np, Pu), worden sterk geïmmobiliseerd op de vaste fase. Wat de anionen betreft waarvoor een sorptieproces wordt waargenomen (door liganduitwisseling), postuleert men een diffusie toegankelijke porositeit van 0.30.

3.5.1.4 Aanwezigheid van organische stof

De Boomse Klei bevat ongeveer 1 tot 3 gewichtsprocent aan organische stof, waarvan een zeer gering aandeel in oplossing is en als mobiel wordt beschouwd ($\approx 0.05\%$). Deze organische stof in oplossing bestaat voor 70 % uit humuszuren en 30 % uit fulvuszuren en andere moleculen van kleine afmetingen en wordt voor ongeveer de helft gekenmerkt door een moleculegewicht lager dan 1 000.

Terwijl de vorming van humuscomplexen (radionucliden-humuszuren) zich kan uiten in een verhoging van de oplosbaarheid van sommige radionucliden, kan zij ook een daling van hun mobiele concentratie met zich meebrengen. De Boomse Klei, waarvan de poriën een gemiddelde diameter hebben die in de buurt komt van 5 nm, werkt immers als een ultrafilter ten aanzien van de organische colloïden waaraan gecomplexeerde radionucliden gedeeltelijk gebonden zijn, en beperkt aldus hun mobiliteit. De organische stof gesorbeerd aan de oppervlakte van de mineralen en geïmmobiliseerd onder invloed van de filtratie door de klei, bezit een hoge sorptiecapaciteit ten aanzien van de actiniden. Aangezien deze

sorptiecapaciteit het hoogst lijkt te zijn voor de fracties met het hoogste moleculegewicht, zou de sorptie van de radionucliden op de immobiele component moeten worden begunstigd. De organische stof aan de oppervlakte van de mineralen in de vorm van klei-humuscomplexen, zou in zekere zin fungeren als een film die de metaalkationen sterk complexeert. Diverse processen dragen bij tot de vorming van deze klei-humuscomplexen: de liganduitwisselingen, de hydrofobe interacties, de kationenbruggen of nog de ultrafiltratie door de klei.

3.5.2 Het gedrag van de radionucliden in de Boomse Klei

De retentiecapaciteit van de Boomse Klei voor de radionucliden tijdens hun migratie door diffusie en door advectie, hangt af van de aard van de dominerende retentieprocessen en van de capaciteit van de natuurlijke materialen om de radionucliden te fixeren; sorptie is gewoonlijk de eerste etappe van de immobilisatie (tabel 3.9). Als precipitatie het overheersende proces is, is de capaciteit van de natuurlijke barrière om reducerende omstandigheden op te leggen en te handhaven, beslissend voor haar retentie-eigenschappen; als sorptie het belangrijkste proces is, is de totale concentratie van sorptiesites de sleutelfactor; als tenslotte de vorming van vaste oplossing en coprecipitatie de overwegende processen zijn, zijn het calciëtegehalte en andere secundaire minerale fases de sleutelparameters.

Tabel 3.9 Vast-vloeistof interacties die kunnen bijdragen tot de retentie van de radionucliden in de Boomse Klei, gegroepeerd in stijgende orde van reactietijd.

Radionuclidenretentieprocessen

Processen gedurende de migratie

- Anionenuitsluiting
- Ultrafiltratie

Processen resulterend in een reversibele en snelle sorptie

- Fysisorptie van het type van Van der Waals sorptie
- Oppervlaktecomplexatie op functionele groepen van de klei (lineaire en niet-lineaire sorptie, ionenuitwisseling, liganduitwisseling enzovoort)

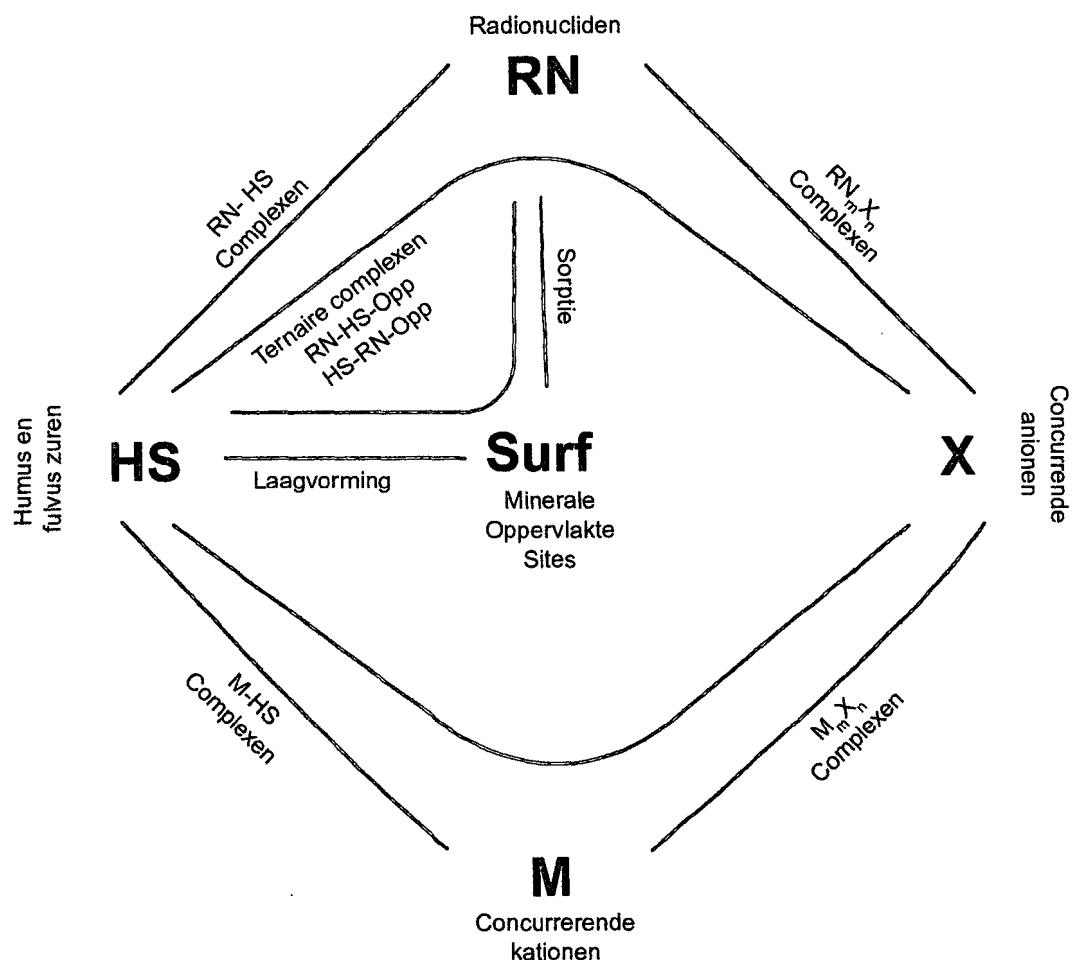
Immobilisatieprocessen (processen waarbij de opgeloste stoffen worden opgenomen in immobiele vaste fases gedurende periodes relevant voor de veiligheidsevaluaties)

- Vorming van vaste oplossing
- Oppervlakteprecipitatie
- Precipitatie
- Fasetransformatie (verouderings- of verweringsproces onder invloed van externe factoren enzovoort)

Processen waarvan de kinetika als zeer traag wordt beschouwd

- Isotopenverdunding enzovoort
-

De organische stof kan gezien haar hoge gehalte in de Boomse Klei ook specifieke interacties teweegbrengen die de migratie van bepaalde radionucliden beïnvloeden (fig. 3.36).

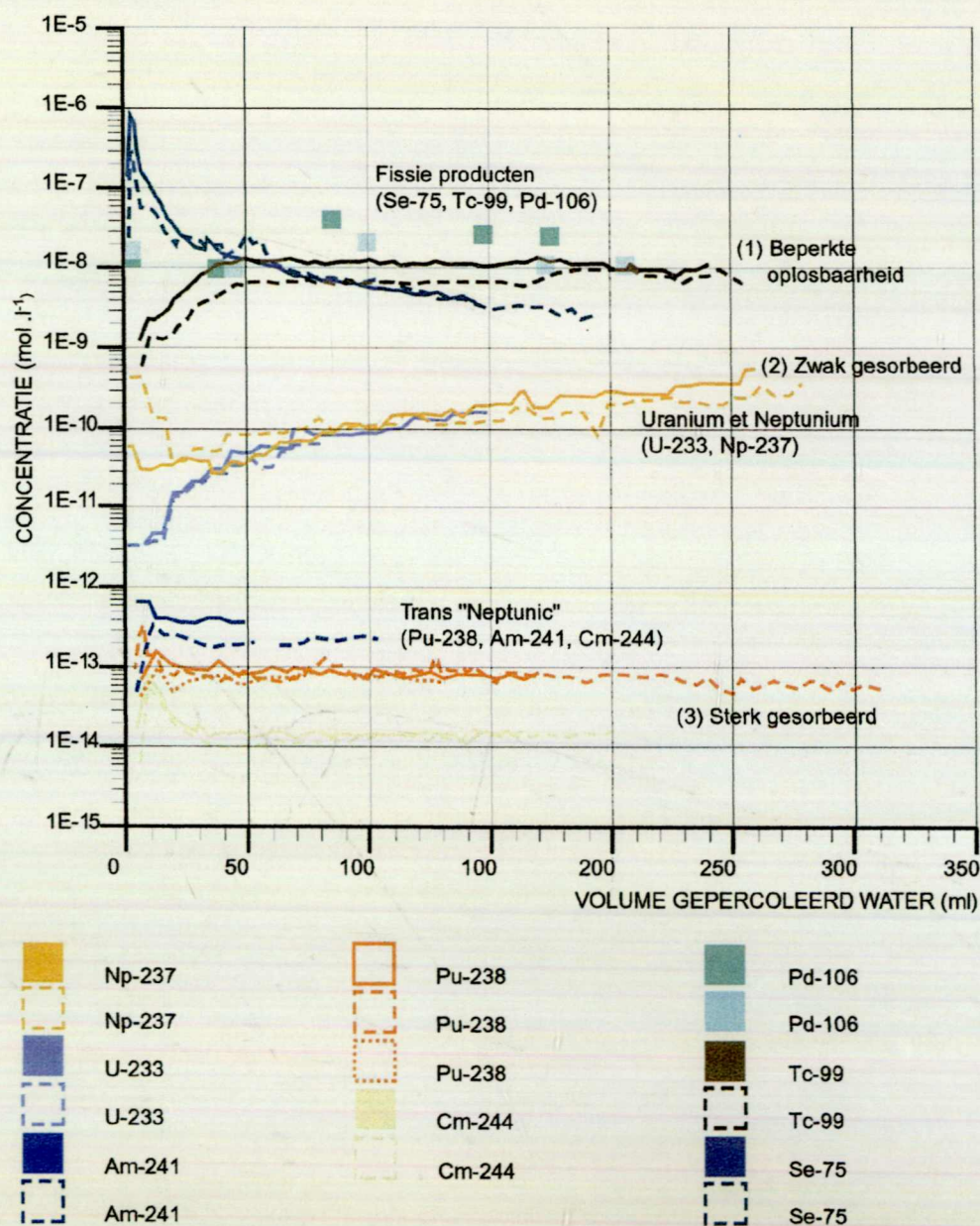


Figuur 3.36 De verschillende mogelijke interacties tussen de radionucliden en de organische stof.

De talrijke percolatietests die in het bovengrondse laboratorium zijn uitgevoerd, maken het mogelijk het gedrag van de radionucliden in de Boomse Klei te differentiëren; de radionucliden lijken verdeeld te zijn in drie groepen (fig. 3.37).

- De *fissieproducten* (Se, Tc en Pd) kenmerken zich schijnbaar door een geringe sorptie. Hun concentratie in oplossing lijkt te beantwoorden aan een oplosbaarheidslimiet in de buurt van $10^{-8} \text{ mol.l}^{-1}$.
- De *actiniden* (An) die in geringe mate worden gesorbeerd (U en Np), zouden in de Boomse Klei aanwezig kunnen zijn in neutrale vorm ($\text{An}(\text{OH})_4$) en/of in de vorm van negatief geladen gecarbonateerde complexen, hetgeen hun geringe sorptie zou verklaren. Hun concentratie in oplossing ligt in de buurt van 10^{-10} tot $10^{-9} \text{ mol.l}^{-1}$.

- De trivalente actiniden (Am en Cm) en het trivalente of tetravalente plutonium die sterk gesorbeerd worden, zien hun gedrag voornamelijk bepaald worden door hun interacties met de organische stof. (In het geval van plutonium gaat het om een hypothese die is afgeleid uit de gelijkenis van het gedrag van de drie actiniden en die nog moet worden bevestigd.) De concentraties in oplossing variëren van 10^{-14} tot 10^{-12} mol.l⁻¹. Met uitzondering van de hydrolyse-reacties laat de chemie van de actiniden in oplossing in de Boomse Klei zich samenvatten als een competitie tussen de complexatie door de carbonaten en door de humus- en fulvuszuren.



Figuur 3.37 Verdeling van de radionucliden volgens hun concentraties in de percolatieoplossingen in functie van de tijd.

Tabel 3.10 synthetiseert voor de bestudeerde radionucliden de factoren en/of processen die hun gedrag in de Boomse Klei bepalen.

Tabel 3.10 Factoren en/of processen die het gedrag van de bestudeerde radionucliden in de Boomse Klei bepalen.

	I	Cs	C (HCO ₃ ⁻)	Se	Tc	Pd	U	Np	Pu	Am	Cm
E_h				+	+		+	+	+		
Organische stof									+(?)	+	+
Anionenuitsluiting	+		+								
Ultrafiltratie									+	+	+
Sorptie		++	+(?)				+	+	++	++	++
Immobilisatie (oplosbaarheidslimieten)				+	+	+	+	+			

? : nog te bevestigen

+ : weinig of matig vertraagd element

++ : sterk vertraagd element

3.5.3 De migratieparameters

Het onzekerheidsniveau dat inherent is aan de bepaling van de sleutelparameters die de migratie van de radionucliden in de Boomse Klei beschrijven (η , R en D_{app}) en waarop met name de langetermijn veiligheidsevaluaties steunen, loopt sterk uiteen naargelang van de aard van de bestudeerde elementen.

De bepaling van de migratieparameters van de *elementen die niet redoxgevoelig zijn* — weinig of niet gesorbeerde (HCO₃⁻, I⁻) en sterk gesorbeerde (Cs⁺) — stelt geen bijzonder probleem, aangezien de adequaatheid van de gebruikte modellen is aangetoond dankzij in situ tests op grote schaal (I⁻, HTO) en percolatietests (Cs⁺) van zeer lange duur (zie sectie 3.5.1.1). Het vertrouwensniveau dat men kan toekennen aan de waarden die zijn geselecteerd voor cesium en jodium, wordt bevredigend geacht. De waarde van de vertragsingsfactor R voor het element HCO₃⁻ blijft evenwel onzeker; zij zou erg gering zijn ($R \approx 1.5$).

De interpretatie van de migratietests voor de *elementen die sterk worden gesorbeerd en/of redoxgevoelig zijn* (Se, Tc, U, Np, Pu, Am, Cm) ondervindt bepaalde moeilijkheden die zullen leiden tot het aanpassen van de migratiemodellen en eventueel van de experimentele procedures voor de voorbereiding en conditionering van de bronnen van radionucliden. De modellen die specifiek zijn ontwikkeld om de producten ηR en de diffusiecoëfficiënten D_{app} te bepalen op basis van de experimentele resultaten houden rekening met de diffusie en de advectie en veronderstellen een lineaire en omkeerbare sorptie. Zij zijn perfect van toepassing op elementen die gekenmerkt worden door een welbepaalde valentietoestand en een hoge

oplosbaarheid in de experimentele omstandigheden. Zij kunnen echter precipitatie van de redoxgevoelige elementen, gereduceerd tot een vorm die meestal veel minder oplosbaar is niet in rekening brengen. Een rigoureuze interpretatie van de experimentele resultaten vereist dat naast de migratiefenomenen rekening wordt gehouden met de redoxprocessen (kinetische aspecten), de precipitatie van onoplosbare fasen en in voorkomend geval een onomkeerbaar sorptieproces. Een aanpassing van de voorbereiding en conditionering van de te testen radionucliden, naar bijna evenwichtscondities, zal de complexiteit van het systeem verminderen, zeker voor redoxgevoelige species, en een betere interpretatie en modellering van de resultaten toelaten. (Tot dusver zijn voor sommige elementen alleen zuivere diffusietests uitgevoerd, tests die de bepaling van het product ηR niet mogelijk maken.)

3.5.4 De rol van de organische stof

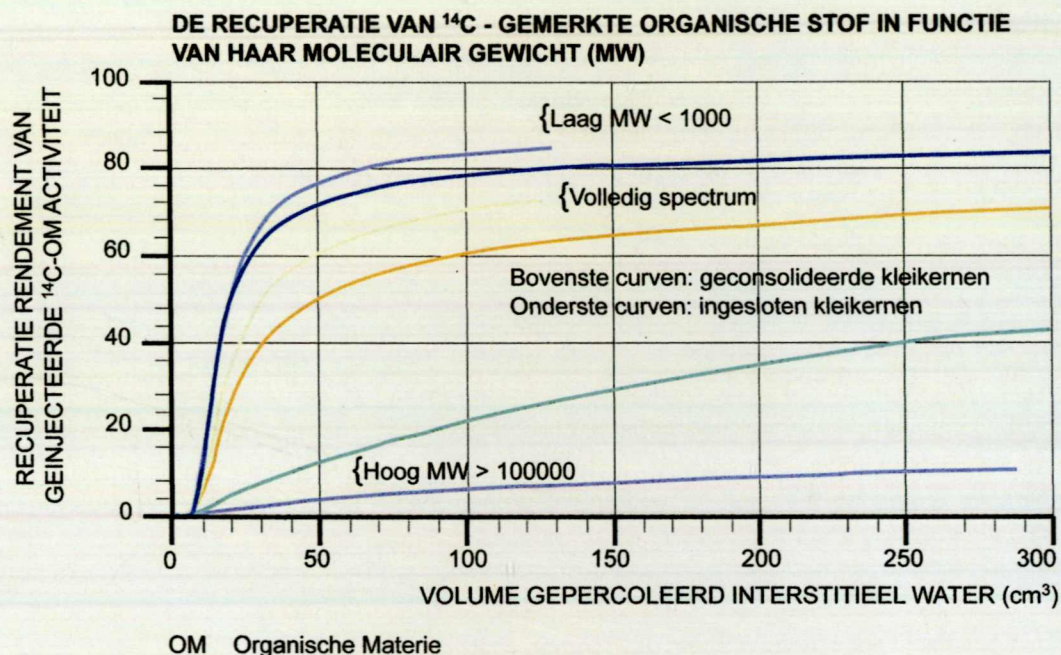
De aanwezigheid van organische stof in de Boomse Klei vormt een potentieel belangrijke factor voor de migratie van de radionucliden, aangezien dat zij een a priori hoge capaciteit bezit tot complexatie van de radionucliden, in het bijzonder van de trivalente actiniden, en dat een zeer geringe fractie van deze stof mobiel is. De studie van het gedrag van de organische stof in de Boomse Klei en van het gedrag van de actiniden-organische stofcomplexen is dus een fundamenteel onderdeel van de migratiestudies geworden.

3.5.4.1 Ultrafiltratiecapaciteit van de Boomse Klei

Er zijn fundamentele lessen getrokken uit de migratietests die in het bovengrondse laboratorium zijn uitgevoerd met organische stof gemerkt met ^{14}C : de Boomse Klei heeft een retentiecapaciteit voor de organische moleculen die stijgt met hun moleculegewicht, anders gezegd met hun afmetingen. De Boomse Klei werkt als een ultrafilter voor moleculen met een moleculegewicht hoger dan 100 000 (fig. 3.38); de hogere waarden van de distributiecoëfficiënt K_d (verhouding tussen de gesorbeerde fractie en de fractie in oplossing) die in dit geval werden vermeld, worden toegeschreven aan hydrofobe interacties met de vaste fase. De percolatie van kleine moleculen tijdens tests met moleculen met een moleculegewicht van meer dan 100 000 kon evenwel nog niet worden verklaard: ofwel waren deze moleculen aanwezig in het aanvankelijk geïnjecteerde staal, ofwel werden ze in het milieu gegenereerd door een continu proces van splitsing van de grotere organische entiteiten.

De resultaten van de migratietests met organische stof, zijn gemodelleerd met het eenvoudige diffusie–advectie model, zonder rekening te houden met de colloïdale aspecten. De verkregen waarden voor de diffusiecoëfficiënten D_{app} zijn vergelijkbaar ongeacht de beschouwde organische fractie en stemmen overeen met die welke voorheen werden gemeld ($D_{\text{app}} \approx 3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), hetgeen zou kunnen betekenen dat zij alle toe te schrijven zijn aan dezelfde fractie moleculen: die met kleine afmetingen. Evenzo werden betrekkelijk constante waarden, tussen 0.38 en 0.71, verkregen voor het product ηR , behalve in het geval van de organische fractie met een moleculegewicht hoger dan 100 000. Een eerste in situ test startte in 1997 (piëzometer parallel aan het sedimentatievlak van de klei) en een tweede in 1998 (piëzometer

loodrecht op het sedimentatievlak van de klei) om de toepasbaarheid van de in het bovengrondse laboratorium bepaalde migratieparameters te verifiëren en de migratiemodellen op grote schaal te testen.



Figuur 3.38 Elutieprofielen verkregen aan de hand van met ^{14}C gemerkte organische stof van verschillend moleculengewicht.

3.5.4.2 Gedrag van americium

De studie van de rol van de organische stof in de migratie van de actiniden in de Boomse Klei heeft zich tot nu toe toegespitst op het gedrag van americium, dat welbekend is om zijn sterke interactie met de organische stof. Deze studie, uitgevoerd met organische stof die met ^{14}C was gemerkt en in contact was gebracht met ^{241}Am , heeft nu al wezenlijke resultaten opgeleverd over het gedrag van americium en heeft het mogelijk gemaakt bepaalde hypothesen te bevestigen.

- Americium, initieel gebonden aan de organische stof in oplossing, verdeelt zich inderdaad tussen de vloeibare en de vaste fase (mobiele en immobiele organische stof).
- De americium-organische stofcomplexen, zijn de belangrijkste vectoren van zijn migratie.
- De complexen die door het americium worden gevormd met organische stof van een hoog moleculengewicht, kenmerken zich door een tragere dissociatiekinetiek dan dezelfde complexen met kleinere afmetingen van organische stof.
- Het molecuulspectrum van de organische stof beïnvloedt de migratie van het americium; de verschillende fracties leveren verschillende bijdragen.

Er zijn evenwel aanvullende studies nodig om het verschil te verklaren dat is waargenomen tussen de tests met dubbele tracer ($^{14}\text{C} + ^{241}\text{Am}$) en de percolatietests, en dit om een adequate selectie mogelijk te maken van de waarden van de migratieparameters voor de veiligheidsevaluaties. De americiumconcentratie gemeten in de oplossingen aan de uitgang van de kolommen na een eerste snelle doorbraak, varieert immers van 10^{-12} tot $5 \cdot 10^{-12} \text{ mol.l}^{-1}$, afhankelijk van de organische fracties, voor de tests met dubbele tracer, waarbij het americium wordt geïntroduceerd in de vorm van een vloeibaar complex met de organische stof. De verkregen waarden voor de percolatietests, die gebruikmaken van een met americium geïmpregneerde filter die tussen twee kleikernen wordt geplaatst, bedragen ongeveer 10^{-14} tot $10^{-13} \text{ mol.l}^{-1}$.

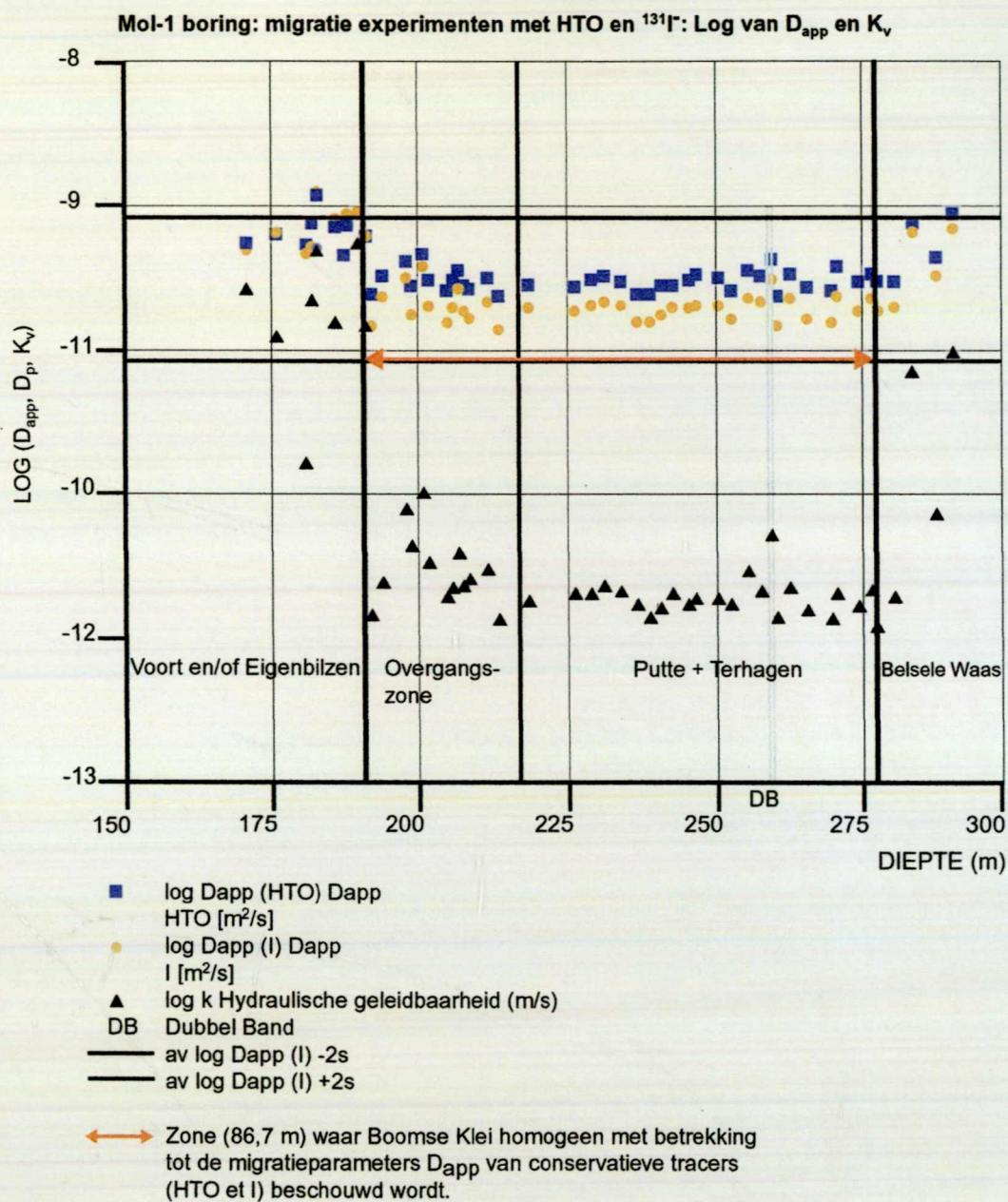
De concentratieverschillen waargenomen tussen de resultaten van de twee types van tests, zijn waarschijnlijk te wijten aan kineticaverschillen toe te schrijven aan de gebruikte bron. Er zal moeten worden aangetoond dat in alle gevallen een stationair regime zal zijn bereikt binnen de tijd waarin het americium de eerste meters door de klei zal hebben afgelegd, en dat de mobiele concentratie van het americium inderdaad tussen 10^{-14} en $10^{-13} \text{ mol.l}^{-1}$ zal liggen.

3.5.4.3 Gedrag van uranium, neptunium en plutonium

Hoewel algemeen wordt verwacht dat de complexatie van de actiniden door de organische stof en/of de carbonaten een verhoging van hun oplosbaarheid met zich meebrengt, tonen de tot dusver verkregen resultaten aan dat de organische stof in oplossing weinig effect heeft op de oplosbaarheid van plutonium en van UO_2 , en wijzen preliminaire studies erop dat de carbonaten geen aanzienlijke invloed hebben op de oplosbaarheid van neptunium en plutonium in de in situ omstandigheden van de Boomse Klei.

3.5.5 De variabiliteit van de migratieparameters over de kleidikte

Een eerste studie om de verticale homogeniteit van de Boomse Klei te evalueren op haar migratie-eigenschappen, heeft reeds geleid tot de conclusie van verticale homogeniteit voor de migratie van niet-vertraagde elementen (fig. 3.39); het geval van de vertraagde elementen moet nog worden bestudeerd. Concreet zijn migratietests met niet of weinig vertraagde elementen gerealiseerd op monsters die over de gehele dikte van de formatie zijn genomen bij de boringscampagne Mol-1 (zie sectie 3.2.2.2). Een vijftigtal tests met HTO en $^{131}\text{I}^-$ en een twaalfstal tests met $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ (dit is ongeveer één meting om de twee meter in het eerste geval en één meting om de tien meter in het tweede geval) hebben waarden opgeleverd die binnen het interval van de minimum- en maximumwaarden liggen, beschouwd in de langetermijn veiligheidsevaluaties.



Figuur 3.39 Variabiliteit van de migratieparameters voor de elementen HTO en I^- en van de hydraulische geleidbaarheid over de dikte van de Boomse Klei op de plaats van de boring Mol-1.

3.5.6 De gegevens gebruikt voor de evaluaties van de langetermijn veiligheid

De enorme vooruitgang die de jongste tien jaar is geboekt betreffende inzicht in de chemie van de elementen in de Boomse Klei, heeft geleid tot een aanzienlijke herziening van de waarden van de migratieparameters van een aantal van die elementen. De verworven kennis

heeft het immers mogelijk gemaakt de verschillende processen die het gedrag van de elementen in de klei bepalen, beter te vatten en beter rekenschap te geven van hun specifieke bijdrage. Voor elementen die worden gekenmerkt door een complexe chemie, met name elementen die redoxgevoelig zijn, brengt het gebruik van een bron niet in evenwicht met het milieu in de migratietests, aldus verschillende reacties teweeg vóór het bereiken van een stationair regime. De interpretatie van de experimentele resultaten met behulp van de bestaande modellen heeft dus in een zeker aantal gevallen geleid tot verkeerde waarden.

De belangrijkste vorderingen die een aanzienlijke herziening (in bepaalde gevallen verschillende grootteorden) rechtvaardigden, zijn de volgende.

- *Onderscheid tussen immobilisatieprocessen (precipitatie) en sorptieprocessen*
Verwarring tussen deze twee fenomenen heeft aanvankelijk geleid tot de mening dat de elementen Se, Tc, U, Np sterk gesorbeerd worden. Nu blijkt echter dat de beperkte oplosbaarheid van seleen en technetium zeer waarschijnlijk verantwoordelijk is voor de retentie die wordt waargenomen in de Boomse Klei. Wat uranium en neptunium betreft, blijft het proces van immobilisatie door precipitatie doorslaggevend, maar er lijkt zich toch ook een matige sorptie voor te doen ($R = 40$).
- *Invloed van de organische stof* Het begrip operationele oplosbaarheid werd ingevoerd om de migratie van een geringe mobiele fractie te simuleren voor de trivalente elementen (Sm, Ac, Am, Cm) en voor tetravalent of trivalent plutonium, die zonder zichtbare vertraging migreren. De operationele oplosbaarheid wordt afgeleid uit de concentratiewaarden die worden gemeten in de percolatieoplossingen aan de uitgang van de kolommen en wordt verondersteld de niet-vertraagde mobiele fractie van het beschouwde element te vertegenwoordigen. Om de migratie van deze elementen in de Boomse Klei te berekenen, wordt enerzijds een concentratie in oplossing gepostuleerd die gelijk is aan de operationele oplosbaarheid, en anderzijds een vertragsingsfactor R die gelijk is aan 1. Voor uranium en neptunium werden de waarden van de oplosbaarheid en van de vertragsingsfactor R berekend via de modellering van de elutieprofielen van de percolatietests (*gefitted parameters*). Hoewel het gaat om een verschillend geval ($R \neq 1$), aangezien deze waarden onrechtstreeks zijn afgeleid, wordt voor deze twee elementen bij uitbreiding ook de term operationele oplosbaarheid gebruikt.

De geldigheid van de benadering die steunt op het begrip operationele oplosbaarheid, werd nog niet gerechtvaardigd voor alle beschouwde elementen. Zij lijkt realistisch voor de trivalente actiniden en lanthaniden (Sm, Ac, Am, Cm), en houdt zelfs een aanzienlijke veiligheidsmarge in. Het merendeel van deze elementen wordt immers sterk gesorbeerd aan de oppervlakte van de klei (sorptie door oppervlaktecomplexatie op de organische stof gebonden aan het kleiskelet en geïmmobiliseerd door ultrafiltratie), hetgeen hun concentratie in oplossing aanzienlijk vermindert; alleen een geringe fractie is mobiel. Uit conservatisme worden de mobiele elementen die worden gemaskeerd door de organische stof, verondersteld slechts moeilijk te kunnen interageren met de immobiele organische component. Tegenover de benadering op basis van het begrip operationele oplosbaarheid is daarentegen voorbehoud geboden wat betreft plutonium, waarvan het gedrag nog te weinig gekend is, en voor uranium en neptunium is die benadering nog onzekerder. Conservatief worden voor de elementen Sm, Ac, Am, Cm en Pu moleculaire-diffusiecoëfficiënten D_{app} toegekend die gelijk

zijn aan die van de organische stof, en voor de elementen U en Np moleculaire-diffusiecoëfficiënten die gelijk zijn aan die van getritieerd water.

Ondanks de geboekte vooruitgang wat betreft het inzicht in de mechanismen die het gedrag van de radionucliden in de klei bepalen, lijkt het momenteel te vroeg een databank met unieke referentiegegevens uit te werken voor de belangrijkste migratieparameters, gezien de onzekerheden die er nog bestaan voor sommige klassen van elementen. In de veiligheidsevaluaties werden dan ook drie *sets* van gegevens gebruikt die de evolutie weergeven inzake inzicht in de chemie van de elementen in de klei:

- *set 1*: er wordt een sterke sorptie in aanmerking genomen voor de elementen Se, Tc, U en Np alsook voor de trivalente actiniden en lanthaniden (met de mobiele fractie wordt geen rekening gehouden);
- *set 2*: R wordt gelijk verondersteld aan 1 voor de elementen Se en Tc (en er wordt rekening gehouden met een oplosbaarheidslimiet);
- *set 2'*: het begrip operationele oplosbaarheid wordt toegepast voor de elementen Ac, Pu, Am, Cm en Sm ($R = 1$) en er wordt rekening gehouden met een oplosbaarheidslimiet en een matige sorptie voor de elementen U en Np ($R = 40$).

De databank die voor de verschillende betrokken elementen in de vorm van *data collection forms* is opgesteld op basis van een diepgaand kritisch onderzoek dat zowel betrekking had op de resultaten verkregen in het kader van de door het SCK-CEN gerealiseerde programma's als op de waarden die waren geëxtrapoleerd vanuit in de literatuur gemelde gegevens, wordt evenwel permanent geactualiseerd in het licht van nieuwe verkregen resultaten.

3.5.7 Vooruitzichten

De toekomstige migratieprogramma's zullen in het verlengde liggen van de reeds ondernomen studies en zullen tot doel hebben het inzicht in de chemie van de elementen in de klei te verbeteren met het oog op een betere selectie van de waarden van de migratieparameters, een betere interpretatie van de tests en een betere aanpassing van de desbetreffende modellen. Zij zullen met name betrekking hebben op:

- het bepalen van de valentietoestand van Pu en U;
- de studie van de invloed van de organische stof op de migratie van Pu, U, Np, Am, Cm, Se, Tc, Pd en Zr;
- het wettigen van het conservatisme in het begrip operationele oplosbaarheid voor Pu, Am en Cm;
- het bepalen van de mechanismen verantwoordelijk voor de vertraging van U, Pd en Zr;
- de studie van de speciatie van U, Np, Pd, Zr, Se en Tc;
- het bepalen van de oplosbaarheid van Se en Tc;
- het bepalen van het gedrag en van de migratieparameters van elementen die eveneens in aanmerking worden genomen als gevolg van de resultaten van de veiligheidsevaluaties, zoals Sn en Pa; van dat laatste is bekend dat het zeer sterk wordt gesorbeerd op tal van materialen;

- het bevestigen of ontkrachten van de gering veronderstelde vertraging van het bicarbonaation en de identificatie, in voorkomend geval, van het mechanisme dat deze vertraging veroorzaakt;
- de studie van de invloed van de migratie van chemische fronten en/of complexerende elementen die worden gecreëerd door het nabije veld, op de retentie-eigenschappen van de klei;
- het verminderen van de onzekerheden op de parameters pH en E_h ;
- de voortzetting van de studie van de verticale homogeniteit van de Boomse Klei met betrekking tot haar migratie-eigenschappen voor elementen representatief voor verschillende klassen van radionucliden, en ook vertraagde elementen (die redoxgevoelig zijn en/of gevoelig voor de aanwezigheid van organische stof en/of die sterk gesorbeerd worden);
- de karakterisering van de organische stof, hoofdzakelijk wat betreft haar mobiliteit in oplossing, de uitwisselingen tussen mobiele en immobiele fase, en de ondergane diagenese. Op termijn moet de karakterisering van de organische stof het mogelijk maken een antwoord te geven op de fundamentele vraag of zij continu in oplossing wordt vrijgezet vanuit de immobiele fase dan wel of de opgeloste organische stof immobiel is.

De migratieparameters zullen eveneens worden bepaald via de elektromigratietechniek als alternatief en controle die losstaat van de huidige methodes. Ten slotte zullen de migratietests met de sterk vertraagde elementen (langdurige tests) worden voortgezet.

3.6 De verstoringen teweeggebracht in de Boomse Klei en haar omgeving

3.6.1 De thermische verstoringen

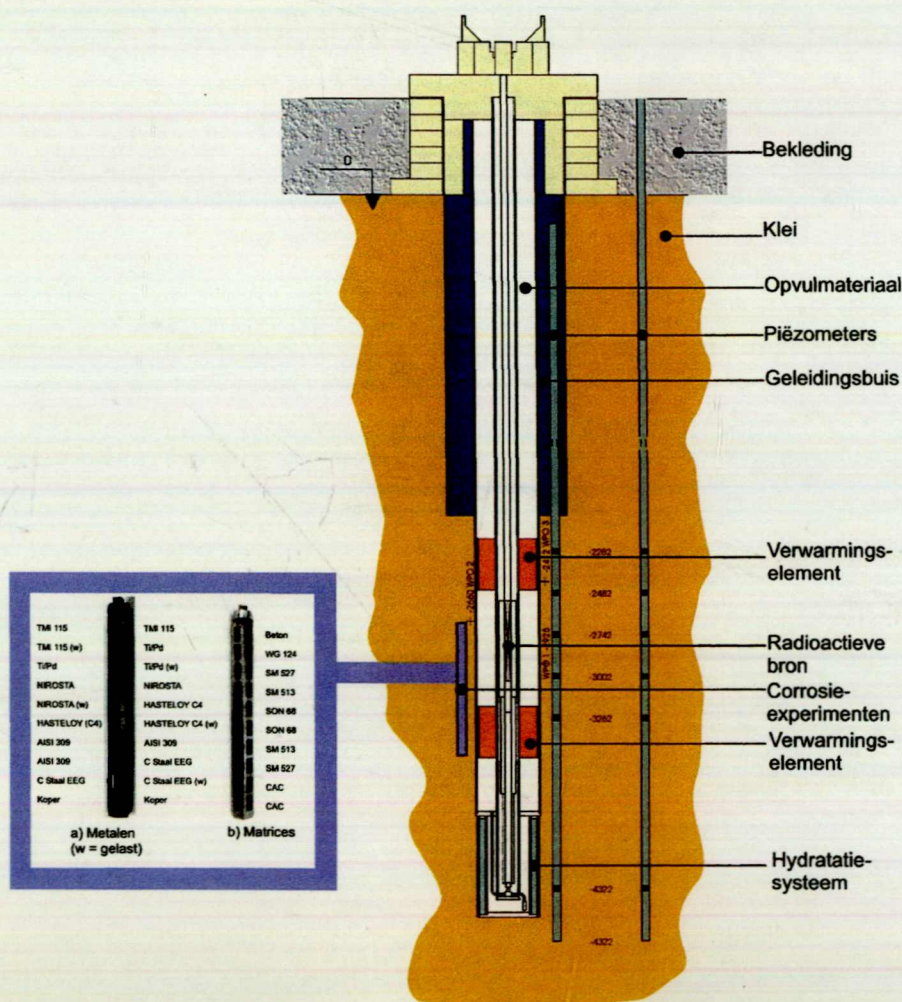
De thermische effecten van het warmteafgevend afval, dit is hoofdzakelijk het verglaasde afval en de bestraalde splijtstoffen, zijn de afgelopen tien jaar het voorwerp geweest van zowel experimentele als theoretische studies. Na de periode van afkoeling vóór de berging van dit afval, die momenteel is vastgesteld op 50 jaar, maar op 60 jaar zou kunnen worden gebracht, zal dit afval nog verschillende honderden tot verschillende duizenden jaren een aanzienlijk thermisch vermogen blijven genereren. De daaruit voortvloeiende temperatuurstijging zal tegelijk een impact hebben op het nabije veld en op het verre veld. Deze impact, die zal afhangen van de omvang en van de duur van de opwarming, kan gevolgen hebben voor de hele bergingsarchitectuur indien hij voortijdig de integriteit van de kunstmatige barrières of van de natuurlijke barrière aantast. De huidige kennis omtrent de opwarming als gevolg van de aanwezigheid van het warmteafgevend afval, zet evenwel de haalbaarheid van de bergingsarchitectuur niet op de helling, en geeft aan dat de opwarming verenigbaar is met de geplande dimensionering voor de bergingsinstallaties en met de geselecteerde materialen. Bovendien zal een wijziging van de geometrie van de bergingsinstallaties het mogelijk maken de thermische impact van het afval op het verre veld te beperken indien dit nodig blijkt. Het PRACLAY demonstratie-experiment zou zeer relevante bijkomende informatie hierover moeten opleveren.

3.6.1.1 Experimentele studies

Het bepalen van de thermische eigenschappen van de gastformatie is van wezenlijk belang voor de evaluatie van de verstoringen die eventueel worden veroorzaakt door de aanwezigheid van warmteafgevend afval. Op basis van experimenten in situ wordt vastgesteld dat de verzadigde Boomse Klei zich kenmerkt door een gering warmtedissipatievermogen. Zo bedraagt de warmtegeleidbaarheid van de Boomse Klei maximaal $1.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (ter vergelijking: koolstofstaal heeft een warmtegeleidbaarheid van ongeveer $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Deze eigenschap vormt één van de belangrijke beperkingen voor het ontwerp van de bergingsinstallaties (zie sectie 3.3).

Het CERBERUS-experiment, dat werd uitgevoerd van 1987 tot 1998, vormt de belangrijkste in situ-studie van de effecten die de berging van een collo verglaasd afval heeft op de Boomse Klei en op verschillende mogelijke materialen voor het nabije veld. Dit collo werd gesimuleerd door enerzijds een geheel van ^{60}Co -bronnen die tot doel hadden een gammastralingsveld te creëren dat representatief was voor een dergelijk collo, en anderzijds door elektrische weerstanden, die de temperatuur in de kleiformatie op sommige plaatsen hebben doen toenemen tot meer dan 100°C (fig. 3.40). (Dit experiment was erg conservatief, aangezien het stralingsveld volgens de referentiearchitectuur zeer sterk zal worden getemperd door de kunstmatige barrières — zie sectie 3.6.4). De belangrijkste resultaten van het CERBERUS-experiment zijn:

- *glas* De corrosiesnelheid van het als matrix gebruikte glas lijkt in een gammastralingsveld te verminderen.
- *verpakkingsmateriaal* De austenitische staalsoorten, de nikkellegering, de titaanlegering en het zuivere titaan vertonen geen tekenen van corrosie, maar de monsters koolstofstaal, dat evenwel niet meer in aanmerking wordt genomen als mantel- of als verpakkingsmateriaal, vertonen tekenen van ernstige corrosie.
- *beton* Het beton, dat zou worden gebruikt als bekledingsmateriaal, vertoont een reactiezone dicht bij de oppervlakte, die met ijzer verrijkt is op het grensvlak monster-klei.
- *Boomse Klei* De mineralogische samenstelling van de Boomse Klei wordt niet significant gewijzigd door de opwarming en de bestraling, de pH van de interstitiële oplossing blijft quasi neutraal en haar elektrochemische potentiaal blijft reducerend. Het poriënwaterdrukregime speelt snel in op de opwarming en de thermische cycli brengen een lichte consolidatie van de klei teweeg.



Figuur 3.40 Schema van het in situ-experiment CERBERUS dat een stralingsveld en een thermisch veld combineert.

3.6.1.2 Implicaties voor het ontwerp van de bergingsinstallaties

De eigenschappen van de materialen die in de bergingsinstallatie zullen voorkomen voor de referentiearchitectuur, en de interpretatie van de beschikbare resultaten van experimenten hebben het mogelijk gemaakt een eerste reeks van kwantitatieve criteria op te stellen die de maximaal toelaatbare temperaturen op diverse plaatsen van het bergingssysteem en zijn omgeving definiëren.

In het *nabije veld* kan de opwarming de fysico-chemische eigenschappen van het afval van het opvulmateriaal en van de structuurmaterialen van de bergingsgalerijen aantasten, alsook de corrosiesnelheid van de verpakkingsmaterialen verhogen. De maximaal toelaatbare temperaturen die in aanmerking worden genomen, zijn:

- voor *verglaasd afval*: 400°C, dit is veiligheidshalve 100°C onder de temperatuur waarboven zich een structurele overgang van de matrix en een aantasting van haar mechanische eigenschappen voordoet;
- voor de *bestraalde splijtstofelementen*: 350°C, ter vermindering van een te hoge stijging van de druk die wordt veroorzaakt door het helium dat aanwezig is in de splijtstofstiften;
- voor het *opvulmateriaal*: 100°C, om elke fysico-chemische aantasting van het materiaal te vermijden en in het bijzonder een aanzienlijke verstoring van het lokale hydraulische regime als gevolg van de stijging van de poriëndruk. Deze beperking op het opvulmateriaal is de meest doorslaggevende voor het nabije veld.

In het *verre veld* kunnen door opwarming de geochemische, geomechanische en hydrogeologische omstandigheden in de klei alsook de mineralogie van de klei gewijzigd worden. Aldus kunnen de insluitings- en retentie-eigenschappen van de klei aangetast worden. De opwarming kan ook het hydrogeologische regime in de watervoerende lagen wijzigen. De maximaal toelaatbare temperaturen die in aanmerking worden genomen, zijn:

- voor de *klei*: 100°C, wat de maximale temperatuur tijdens het CERBERUS-experiment was en waarbij geen enkele significante wijziging van de klei-eigenschappen kon worden aangetoond;
- voor de *watervoerende laag van het Neogeen*: in afwezigheid van reglementering betreffende de maximaal aanvaardbare opwarming voor de ondergrond wordt rekening gehouden met een maximumverhoging van gemiddeld 6°C over de dikte van de watervoerende laag;
- voor de *biosfeer*: er is een maximumverhoging van 0.5°C in aanmerking genomen.

3.6.1.3 Thermische impact van het bergingssysteem

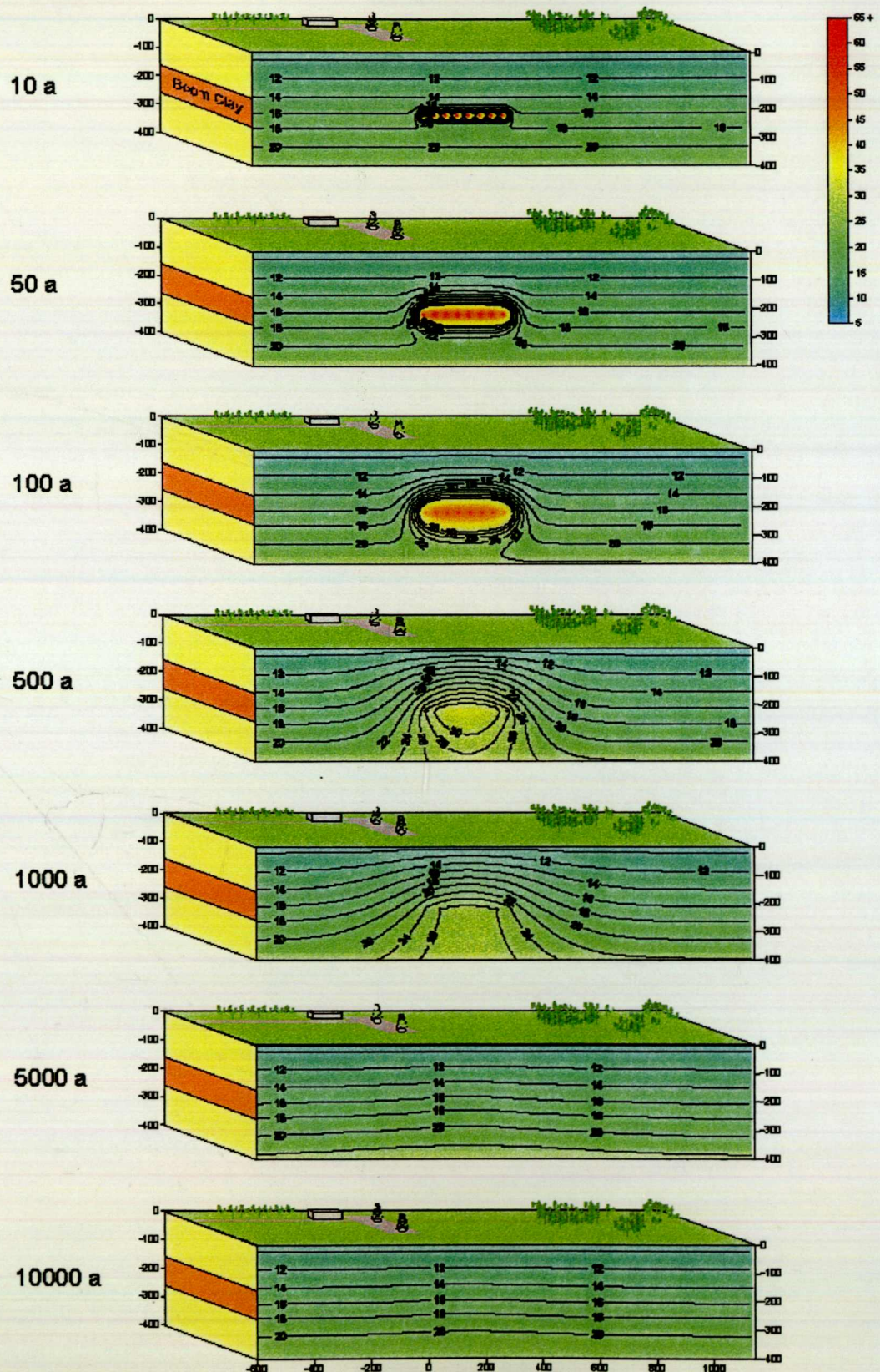
De thermische berekeningen om de maximale temperatuurstijgingen in het hele bergingssysteem en zijn omgeving te kwantificeren, zijn uitgevoerd rekening houdend met drie versplijtingsgraden voor de bestraalde splijtstoffen. (Deze temperatuurstijgingen worden gedefinieerd als het verschil tussen de temperatuur die plaatselijk wordt veroorzaakt door de

aanwezigheid van het afval en de initiële temperatuur van de kleiformatie, die ongeveer 16°C bedraagt).

Voor het verglaasde afval varieert de maximale opwarming binnenin de colli tussen 160 en 200°C na 50 jaar bovengrondse opslag, afhankelijk van de waarde die wordt toegekend aan de warmtegeleidbaarheid van het opvulmateriaal. De opwarming is maximaal na ongeveer drie jaar, en gaat telkens sterk omlaag binnenin van de onge vulde interfaces, dat wil zeggen tussen het primaire collo en de mantel, en dan tussen de mantel en de bergingsbuis, om nog slechts maximaal 80°C op de binnenwand van de bekleding van de galerij te bedragen.

Om het criterium te respecteren dat werd opgelegd ter hoogte van de bovenliggende watervoerende laag, is het nodig een tussenruimte van 40 meter te laten tussen de bergingsgalerijen voor verglaasd afval. Dit leidt tot een maximale temperatuurverhoging van ongeveer 15°C op het grensvlak klei-watervoerende laag (fig. 3.41). Voor de bestraalde spijltstoffen varieert de minimumafstand die tussen de bergingsgalerijen moet worden gerespecteerd, van 80 tot 110 meter, naargelang de versplijtingsgraad.

In de toekomst zullen de studies eerst betrekking hebben op de herdefinitie van de criteria voor een aanvaardbare temperatuurstijging voor de verschillende componenten van het bergingssysteem en zijn omgeving. Voor de kunstmatige barrières zouden deze criteria de materiaalkeuzen betreffende de mantel en opvulling kunnen beïnvloeden. In dit laatste geval zou de mogelijkheid moeten worden bestudeerd van een doeltreffende warmteafvoer door een materiaal dat beter geleidt dan de materialen in de referentiearchitectuur. De definitie van de criteria voor de watervoerende lagen en de biosfeer zou rekening moeten houden met de eventuele reglementaire voorschriften terzake en met een onderzoek naar de chemische, mineralogische en biologische effecten die mogelijk kunnen worden teweeggebracht door een temperatuurstijging. In voorkomend geval zal de geometrie van de bergingsinstallaties (afstand tussen de bergingsgalerijen en tussen het afval binnen deze galerijen) moeten kunnen worden herzien om de thermische impact op de watervoerende lagen en de biosfeer te beperken.



Figuur 3.41 Thermisch veld opgewekt door een bergingsinstallatie voor verglaasd afval.

3.6.2 De verstoringen veroorzaakt door de uitgraving

3.6.2.1 Karakterisering en geomechanische modellering

De bouw van de bestaande ondergrondse installatie ging gepaard met intensieve programma's voor nauwkeurige terreinstudie met het oog op de optimalisering van de graaf- en bekledingstechnieken en van het inzicht in het geomechanische gedrag van de klei, tijdens en na de uitgraving. Terwijl er een goede mate van vertrouwen is bereikt over de kwaliteit van de metingen van verplaatsingen en poriëndruk, blijven de metingen van de totale druk nog moeilijk te realiseren. Deze meetprogramma's zijn het voorwerp geweest van tal van simulaties door modelleringsploegen van verschillende landen. Verschillende experimenten in situ met en zonder thermische belasting, waarvan sommige ook de studie van de kunstmatige barrières omvatten en hun wisselwerkingen met de gástformatie, hebben het eveneens mogelijk gemaakt (thermo)hydromechanische rekencodes te ontwikkelen of te verifiëren.

De laag Boomse Klei onder de site Mol-Dessel kan worden gelijkgesteld met een verzadigd poreus midden bestaande uit een vaste (het kleiskelet) en een vloeibare fase. De mechanica van de continue poreuze middens maakt het mogelijk het globale gedrag ervan te beschrijven op basis van:

- het gedrag van elke afzonderlijk genomen (vaste en vloeibare) fase;
- koppelingsrelaties tussen de fases, dat wil zeggen relaties die de onderlinge effecten van de fases beschrijven.

In tegenstelling tot de aanvankelijke idee, die aan de Boomse Klei eigenschappen toekende die eerder eigen zijn aan "grond", dit wil zeggen niet-geconsolideerd gesteente, bevindt de Boomse Klei zich in een grensgebied tussen grond en gesteente. Op de diepte van de HADES-installaties bedraagt de lithostatische druk 4.5 MPa, terwijl de hydrostatische druk 2.2 MPa bedraagt. Deze laatste waarde werd recentelijk in situ gemeten in het kader van het CLIPLEX-programma in een piëzometer buiten de hydraulische invloedszone van het ondergrondse laboratorium. Zij komt perfect overeen met de druk van een waterkolom voor de diepte van de installaties. Er wordt een lichte anisotropie opgemerkt tussen de verticale en de horizontale effectieve spanning. De gegevens in tabel 3.11 hieronder corresponderen met de niet-gedraineerde geomechanische kenmerken van de Boomse Klei ter hoogte van de bestaande installaties, in de veronderstelling dat het massief een perfect elastoplastisch gedrag vertoont.

De meetinstrumenten die in en rond de Test Drift zijn geïnstalleerd, maken het mogelijk de hydraulische responsie (piëzometers) en mechanische responsie (clinometers) te evalueren tijdens en na het graven. Aan de hand van de aldus verkregen resultaten konden tal van gedragsmodellen voor de Boomse Klei worden gekalibreerd, hetgeen met name het belang aan het licht heeft gebracht van de visceuze effecten, waarmee geen rekening wordt gehouden door de klassieke elastoplastische modellen. Hun resultaten onderschatten namelijk de verplaatsingen en de variaties van poriëndruk in vergelijking met de metingen in situ. Er zijn ook andere, meer geavanceerde modellen gebruikt die een zachtere overgang mogelijk maken tussen de elastische en plastische toestand. De resultaten die met deze modellen werden verkregen, staan dicht bij de waarnemingen, zonder dat ze daarom de

aanzienlijke waarde van de poriëndrukdalingen die zijn geregistreerd bij het graven van de Test Drift kunnen verklaren. Het dient wel opgemerkt dat er, aangezien het graven van de Test Drift op niet-gemechaniseerde wijze en in een vrij laag tempo gebeurde, aanzienlijke moeilijkheden zijn om de uitgraaf- en vooral de overbreedteparameters te bepalen, wat een correcte kalibratie van de modellen belet (superpositie van ogenblikkelijke en uitgestelde effecten in het massief).

Tabel 3.11 Niet-gedraineerde geomechanische kenmerken van de Boomse Klei ter hoogte van de bestaande ondergrondse installaties (223 m diepte), in de veronderstelling dat de klei een perfect elastoplastisch gedrag vertoont.

Young-modulus, raaklijn aan de oorsprong	E	200 à 400 MPa
Coëfficiënt van Poisson	ν	0.4 à 0.45
Wrijvingshoek	φ	4°
Cohesie	c	0.5 à 1 MPa
Uitrolgrens		23 à 29 %
Vloeigrens		55 à 80 %
Plasticiteitsindex		32 à 51 %
Coëfficiënt van neutrale gronddruk		0.9

Het in aanmerking nemen van de tijdsafhankelijkheid van het gedrag van de Boomse Klei werd eveneens uitgewerkt, om rekening te houden met de uitgestelde effecten als gevolg van de dissipatie van de poriëndruk en met de effecten veroorzaakt door het vaste skelet (viscositeit). Door rekening te houden met deze effecten ontstonden grotere poriëndrukvariaties. De identificatie van de parameters voor deze modellen op basis van de resultaten van de bestaande proeven blijft echter zeer moeilijk en zal in de toekomst een aanzienlijke inspanning vergen.

Op basis van deze vaststellingen werd het experimentele programma CLIPLEX gedefinieerd. Dit programma heeft tot doel de hydromechanische responsie, dat wil zeggen de verplaatsingen alsook de variaties van de totale druk en van de poriëndruk, van de formatie te bestuderen tijdens het graven van de verbindingsgalerij (tussen de tweede schacht en de Test Drift; fig. 3.27), door vanuit de Test Drift de zone die zal worden uitgegraven, uit te rusten met meetinstrumenten. In de Boomse Klei zal men dan voor het eerst beschikken over rechtstreekse metingen van de parameters in het massief aan de voorkant van het werkfront, en daarnaast over een rechtstreekse meting van de ogenblikkelijke convergentie tijdens het graven (achter de snij schoen van de tunnelboormachine — zie sectie 3.3.2.1). Het CLIPLEX-programma zal in vergelijking met de vorige metingen kunnen gebruik maken van beter te beheersen graafparameters dankzij het gebruik van een tunnelboormachine en de mogelijkheid om de ogenblikkelijke en de uitgestelde effecten te scheiden. Na afloop van dit programma zou de vergelijking van de experimentele resultaten met de “blinde” voorspellingen van de hydromechanische modellen het mogelijk moeten maken de kennis en

modellering van het gedrag van de Boomse Klei en in het bijzonder haar responsie op een uitgraving te verfijnen.

Op langere termijn zal men de studie van het uitgestelde gedrag uitdiepen, in het bijzonder de evolutie in de tijd van de spanningen die door het massief worden uitgeoefend op de bekledingen, en de vervormingen van de bekledingen. Vanuit hydromechanisch oogpunt zal de verdeling van de spanningen bij de kruising van twee galerijen driedimensionale studies noodzaken. In dit verband zal de informatie die zal kunnen worden verzameld worden bij het graven van de galerij die nodig is voor de installatie van het PRACLAY demonstratie-experiment zeer nuttig zijn. Het spreekt bovendien voor zich dat er, om een dergelijk demonstratie-experiment te begrijpen en te modelleren, naast het hydromechanische gedrag rekening zal moeten worden gehouden met de koppelingen met de thermische velden en met de effecten verbonden aan de verzadigingsgraad van de kunstmatige barrière. Er zal dus een belangrijke inspanning moeten worden geleverd bij het beheersen van het niet-verzadigde gedrag van de materialen die worden ingezet over de verwachte temperatuurbereiken.

3.6.2.2 Door de uitgraving verstoorde zone

Zoals vermeld in sectie 3.3.2.1, zijn tijdens het graven van de aanzetten van de toekomstige galerijen, onder in de tweede schacht, scheuren verschenen die de verschuiving van aanzienlijke stroken klei tot gevolg hadden. Op deze plaats is het massief gedecomprimeerd door het graven van de schacht. Naast de evidente implicaties voor de mijnveiligheid doet deze scheurvorming een reeks vragen rijzen, zowel betreffende het inzicht in het geomechanische gedrag van de Boomse Klei als over haar mogelijke impact op de eigenschappen van de gastformatie en dus op de langetermijn veiligheid van het bergingssysteem.

Zo zou de hypothese van een continu midden in de verstoorde zone mogelijkwijze moeten worden heroverwogen om de aanzienlijke poriëndruk dalingen (10 %) te verklaren die werden geregistreerd bij het graven en die werden waargenomen vanuit de met controle-instrumenten uitgeruste boringen van het CLIPLEX-programma.

In plastische klei hebben de wijzigingen in hydraulische geleidbaarheid die samenhangen met de barsten, de neiging zich te herstellen door een zelfhelingseffect. Zo kon een tiental jaar na het graven van de Test Drift geen enkele significante schommeling van de hydraulische geleidbaarheid worden opgemerkt rond de Test Drift. Bovendien wordt snel na het plaatsen in het kleimassief van de piëzometers voor de migratie-, gasinjectie- en andere experimenten een terugkeer naar de aanvankelijke hydrostatische drukken verkregen (zie ook sectie 3.6.3.2). Deze waarnemingen worden versterkt door de hydraulische geleidbaarheidsmeting die op grote schaal is uitgevoerd rond de kleine schacht in de HADES-installatie (zie sectie 3.2.3.4) en die resultaten geeft die vergelijkbaar zijn met de waarde van de niet-verstoorde klei. Er vindt dus op relatief korte termijn na de uitgraving een verschijnsel van zelfheling van de klei plaats. Teneinde deze waarnemingen te bevestigen, zijn verschillende studies gestart, om:

- de intensiteit en de omvang van de zone te ramen die verstoord wordt door het graven van de tweede schacht en de aanzetten (kernboringen, geofysische metingen);
- zich te vergewissen van het herstel van de beginomstandigheden inzake hydraulische geleidbaarheid in de verstoorde zone (installatie van piëzometers);
- het ontstaan van de barsten vast te stellen (discontinuïteiten die zijn teweeggebracht door de uitgraving, of reactivering van vooraf bestaande natuurlijke discontinuïteiten);
- de hydraulische drukdalingen te interpreteren die zijn waargenomen bij de bouw van de tweede schacht;
- de secundaire verstoringen te evalueren die zijn teweeggebracht door de scheurvorming (oxidatie van de klei en in het bijzonder van het pyriet);
- een fijner inzicht te krijgen in de verschijnselen die aan de basis liggen van de zelfheling van de klei in omstandigheden die representatief zijn voor de omstandigheden rond een diepebergingsinstallatie (theoretische, experimentele en modelleringsstudies van de scheurvormings- en zelfhelingsprocessen).

Ten slotte zal het nodig zijn de impact van deze scheurvorming en van haar langetermijn evolutie op de bergingsarchitectuur en op de veiligheid te evalueren en in het bijzonder criteria voor een aanvaardbare verstoring in de Boomse Klei bij het graven te definiëren, met name op het vlak van radionuclidenmigratieparameters. Het zou noodzakelijk kunnen blijken de dikte van de verstoorde zone te heroverwegen in de veiligheidsevaluaties. Momenteel wordt de zone waar de migratieparameters op lange termijn zouden kunnen zijn verstoord door de bouw en aanwezigheid van de bergingsinstallatie, conservatief op een dikte van 5 m rond de bergingsgalerijen geraamd.

3.6.3 De verstoringen teweeggebracht door de gassen

In de afgelopen tien jaar werd er veel aandacht besteed aan de evaluatie van de verstoringen die mogelijk worden teweeggebracht door de productie, de accumulatie en de migratie van gassen binnen het bergingssysteem, en dit hoofdzakelijk in het kader van internationale samenwerkingen. De verworvenheden van het Belgische programma terzake vormen een aanzienlijk deel van de momenteel beschikbare kennis. Deze ontwikkelingen betreffen vooral de experimentele en modelleringsaspecten van de verschijnselen die meespelen, terwijl de impact op de radiologische langetermijn veiligheid slechts het voorwerp zijn geweest van een relatief vereenvoudigde behandeling via de evaluatie van een gewijzigde-evolutiescenario (zie sectie 4.3.3).

3.6.3.1 Generatie van gassen

Voor afval van categorie C (verglaasd afval en bestraalde splijtstoffen) zijn de anaërobe corrosie en de radiolyse de fundamentele mechanismen die gassen genereren. Zoals we verder zullen zien (zie sectie 3.6.4), zal de radiolyse van de Boomse Klei sterk worden beperkt

door de aanwezigheid van de kunstmatige barrières en de retentie van de alfastralende radionucliden in het opvulmateriaal.

De graad van veralgemeende anaërobe corrosie voor roestvast stalen in aanwezigheid van de Boomse Klei is zeer gering tot nul, zoals zowel aan de hand van specifieke experimenten als in het kader van de dagelijkse exploitatie van de ondergrondse HADES-installaties is vastgesteld. Voor de gasproductie-evaluaties werd deze corrosiesnelheid voorzichtig vastgesteld op $0.05 \mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$. Een dergelijke aanname is conservatief daar voor dergelijke staalsoorten voornamelijk verschijnselen van lokale corrosie optreden (putcorrosie, spanningscorrosie, intergranulaire corrosie enzovoort), die weinig gassen voortbrengen.

Voor het afval van categorie B moet niet alleen rekening worden gehouden met het feit dat de aanwezige staalsoorten van het koolstofstaaltipe zijn, dat veel meer onderhevig is aan veralgemeende anaërobe corrosie, maar moeten bovendien de microbiële afbraak en de radiolyse van de organische stoffen in aanmerking worden genomen als bijkomende mechanismen van gasgeneratie. De waterstofproductie door anaërobe corrosie van de metalen is ook hier het nadeligste fenomeen. De proefnemingen zowel in het laboratorium als in situ tonen aan dat koolstofstaal in aanwezigheid van Boomse Klei een veralgemeende corrosie ondergaat die conservatief op $1 \mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ wordt geraamd. In een eerste analyse kon experimenteel worden aangetoond dat de gasproductie door microbiële afbraak kon worden verwaarloosd, gezien de geringe geproduceerde volumes.

Het gas dat wordt geproduceerd door anaërobe corrosie van de metalen is aanvankelijk waterstof, maar in alle experimenten wordt een snelle omzetting (enkele dagen tot enkele maanden) van waterstof (H_2) in methaan (CH_4) vastgesteld, waarschijnlijk als gevolg van de werking van methanogene bacteriën aanwezig in de Boomse Klei. Deze omzetting deelt de geproduceerde gashoeveelheid door vier, maar uit conservatieve overwegingen wordt hier geen rekening mee gehouden in de veiligheidsevaluaties.

In het toekomstige programma zal aandacht gaan naar de beschikbaarheid van het water in het nabije veld en naar de evolutie in de tijd van de geochemie van dat water, om de kinetika van de gasproductie te evalueren. Bovendien zou de voortzetting van de studies inzake metaalcorrosie, het mogelijk moeten maken af te stappen van de zeer conservatieve corrosiesnelheden voor veralgemeende corrosie voor roestvast staal die tot dusver werden gebruikt. Het zal nodig zijn het belang en de gevolgen van de specifieke verschijnselen inzake gasproductie te preciseren voor het gebitumineerde afval, zoals de microbiële activiteit, de interne radiolyse en in het bijzondere geval van het Eurobitum-afval, de vorming van stikstof vanuit de nitraten in aanwezigheid van denitrificerende bacteriën.

3.6.3.2 Gastransport

Zowel de diffusie als de advectie van de waterstof en het methaan doorheen de Boomse Klei zijn bestudeerd aan de hand van experimenten (in situ en in permeabiliteitsmeter-, oedometer-, isostatische en triaxiale cellen) en van modellen.

De mogelijkheden van transport door diffusie (dat wil zeggen in de vorm van gas dat is opgelost in het poriënwater) in de gastformatie zijn erg beperkt, vooral voor waterstof. (De schijnbare diffusiecoëfficiënt van waterstof ligt dicht bij die van getritieerd water.) De voortdurende omzetting van de waterstof in methaan maakt de interpretatie van de experimentele gegevens erg moeilijk. Vanwege zijn grotere oplosbaarheid vertoont methaan een hogere diffusiecoëfficiënt, die niettemin nog bevestigd moet worden.

De geringe mogelijkheid van diffusie van de geproduceerde gassen, houdt een risico in voor accumulatie in de vorm van een gasfase en dus het risico van een overdruk in het nabije veld. Een dergelijke overdruk kan enerzijds leiden tot het uitdrijven van het poriënwater uit de Boomse Klei en anderzijds tot de creatie van preferentiële migratiewegen in de gastformatie (scheurvorming). Aangezien slechts een geringe fractie van het poriënwater van de Boomse Klei mobiel is, moet hoofdzakelijk rekening worden gehouden met het tweede advectionele mechanisme. De experimenten in situ en in het laboratorium hebben gewezen op de sterke koppeling tussen de verdeling van de geomechanische spanningen in het kleimassief en de druk waarboven het kleimassief zou scheuren onder druk van de gassen. Zo zouden er preferentiële migratiewegen worden gevormd wanneer de gasdruk de minimale totale spanning overschrijdt; het scheurvormingsvlak ligt in een richting die loodrecht staat op deze spanning. De desaturatiegraad van de klei bij de scheurvorming is beperkt tot enkele procenten van de totale porositeit, hetgeen inhoudt dat de eruit voortvloeiende beweging van het poriënwater erg gering is. De aldus gevormde scheuren zijn erg gasdoorlatend, zodat de aanvankelijke overdruk snel vermindert. De experimenten wijzen duidelijk op een fenomeen van zelfheling van de preferentiële wegen zodra de gasinjectie stopt of zodra de overdruk vermindert. Het gas migreert dus schoksgewijs naar gelang van de cycli van opening en sluiting van de preferentiële wegen, welke worden bepaald door de evenwichten tussen de druk van de gassen en de verdeling van de werkelijke spanningen.

Een migratietest met getritieerd water heeft aangetoond dat de klei, na scheurvorming en zelfheling, haar aanvankelijke eigenschappen heeft teruggekregen. Voor dit experiment in situ werd de preferentiële weg die was ontstaan door scheurvorming, gedurende één jaar open gehouden vooral de gasinjectie werd stopgezet en er getritieerd water werd geïnjecteerd.

Voor een beter begrip van de verschijnselen die betrokken zijn bij het transport van de gassen binnen de Boomse Klei op experimentele schaal, werden diverse conceptuele modellen uitgewerkt. De discontinue variatie van de geleidbaarheid van de klei ten aanzien van het gas (vorming van preferentiële wegen) maakt het gebruik van klassieke modellen die steunen op de eenvoudige wetten van bifasisch transport, onmogelijk. Gezien de eerste bemoedigende resultaten is de voortzetting nodig van de geleverde inspanning op het vlak van modellering van de koppeling tussen de geomechanische omstandigheden, die de verspreiding van de gassen bepalen, de scheurvorming en de evolutie van die laatste. In de toekomst zal ook aandacht moeten gaan naar de tijdelijke en ruimtelijke extrapolatie van het of de conceptuele model(len), alsook naar hun vereenvoudiging met het oog op hun opname in de evaluaties van de langetermijn veiligheid. Recentelijk is een initiatief in die zin genomen op Europees niveau.

Bovendien zal het interessant zijn de invloed te analyseren van de door de uitgraving verstoorde zone op de vorming en evolutie van de scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door de gasoverdruk, en de eigenschappen van de preferentiële migratiewegen te bepalen.

Het huidige inzicht in het transport van de gassen binnen de Boomse Klei kan als volgt worden samengevat:

- als de vorming van gassen kleiner is dan het vermogen tot diffusie van de gassen langs de klei, is alleen opgelost gas aanwezig;
- als de gasvorming het diffusievermogen overtreft, zal de partiële druk van het gas stijgen tot ze de plaatselijke poriëndruk (2.2 MPa) overschrijdt; op dat ogenblik wordt een gasfase gevormd. De aldus gevormde gasbellen verplaatsen dan het poriënwater van de klei en dit op erg beperkte wijze (bifasische flux);
- zodra de druk van de gassen plaatselijk de lithostatische druk (4.5 MPa) overtreft, vormt zich een scheur en ontstaat een preferentiële migratieweg.

3.6.3.3 Impact op de Boomse Klei

Voor de referentiearchitectuur voor verglaasd afval is de verwachte gasproductiesnelheid als gevolg van veralgemeende anaërobe corrosie van de staalsoorten van de primaire verpakking, de mantel en de bergingsbuis, gering genoeg opdat de geproduceerde en in methaan omgezette waterstof zou kunnen worden afgevoerd door diffusie door de Boomse Klei heen. Als deze omzetting niet efficiënt is, zou zich een gasfase kunnen vormen, maar de bereikte drukwaarden zouden onder de druk moeten blijven vanaf welke zich scheurvorming van de gastformatie voordoet.

Voor het afval van categorie B zal zowel de vorming van waterstof als die van methaan leiden tot de vorming van een gasfase. Ingeval van niet-omzetting van de waterstof in methaan is de vorming van preferentiële wegen door scheurvorming waarschijnlijk.

Het zelfhelende vermogen van de preferentiële wegen die mogelijk worden gegenereerd door de gasoverdruk en het beperkt zijn van de bifasische stromingen, zouden de algemene impact van de gassen op de gastformatie moeten beperken, ondanks het geringe gasdiffusievermogen binnen de Boomse Klei.

3.6.4 De verstoringen teweeggebracht door de straling

De gammastraling die wordt geproduceerd door het hoog radioactief afval (categorie C), zal grotendeels worden geabsorbeerd door de materialen aanwezig in de kunstmatige barrières: slechts een verwaarloosbare fractie zal de Boomse Klei bereiken. De stralingsniveaus op het grensvlak tussen de bekleding van de galerijen en de Boomse Klei zullen a priori te laag zijn om de geochemie en de mineralogie van het midden significant te wijzigen.

Niettemin zijn de effecten op de Boomse Klei van een intens gammastralingsveld, gecombineerd met een thermisch veld, bestudeerd tijdens het in situ-experiment CERBERUS. Bij dit experiment werden ^{60}Co -bronnen met een totale activiteit die gelijkwaardig was aan die van een collo met verglaasd afval, in situ geïnstalleerd in de onmiddellijke buurt van de klei gedurende een periode van 5 jaar (zie sectie 3.6.1). Met uiterst nadelige dosistempo's ten opzichte van de reële omstandigheden (verschillende grootteorden hoger) wegens het directe contact tussen de bronnen en de klei, heeft dit experiment aangetoond dat de gammastraling geen significant effect heeft op de mineralogie en de geochemie van de Boomse Klei, evenmin als op de migratie van americium (gevoelig voor complexatie met de organische stof) en technetium (gevoelig voor de redoxpotentiaal). Er wordt evenwel een proces van coalescentie van de organische stof opgemerkt, alsook de vorming van oxalaat-, sulfaat- en thiosulfaationen. Aangezien de corrosie van de metalen negatief zou kunnen worden beïnvloed door de aanwezigheid van thiosulfaten, werd de invloed van die laatste bestudeerd (zie sectie 3.4.2.1).

De alfastraling zal onbeduidend zijn in het verre veld en dit om verschillende redenen:

- de actiniden vertonen een zeer geringe oplosbaarheid, wat hun flux op het grensvlak tussen de kunstmatige barrières en de klei beperkt;
- de activiteit van de kortlevende alfastralers, die worden gekenmerkt door een hoge specifieke activiteit, zal ter hoogte van het nabije veld aanzienlijk zijn afgenomen als gevolg van de sorptie op de kunstmatige barrières en hun degradatieproducten.

Er kan dus worden besloten dat de verstoring van radiochemische oorsprong verwaarloosbaar zal zijn voor de gastformatie.

3.6.5 De geochemische verstoringen

De handhaving op lange termijn van de gunstige geochemische omstandigheden van de Boomse Klei, met name inzake radionuclidenretentie, is één van de belangrijke onderwerpen voor de evaluatie van de gastformatie. De betrokken verschijnselen zijn hoofdzakelijk de volgende:

- de oxidatie van het pyriet en van de organische stof door de zuurstof van de lucht van de galerijen;
- de migratie van de chemische fronten die worden gevormd door het nabije veld (alkalische pluim als gevolg van het gebruik van cement of beton, uitloging van het natriumnitraat);
- impact op de oplosbaarheid en de sorptie van de radionucliden van de degradatieproducten van de organische verbindingen en in het bijzonder van de cellulose.

Bij deze verstoringen kunnen we de migratie voegen van de mogelijk chemotoxische elementen.

3.6.5.1 Migratie van de chemotoxische stoffen

Naast het radiologische risico kan het radioactieve afval een gevaar van chemische toxiciteit vormen voor de mens en voor het milieu. Dit aspect is sinds de publicatie van het SAFIR-rapport het voorwerp geweest van een preliminaire analyse die de milieu-impact van de toxische verbindingen in het afval van categorieën B en C moest evalueren door de maximumconcentraties van toxische elementen in de watervoerende lagen te vergelijken met de drinkwaternormen. Deze in 1995 voltooide studie hield enkel rekening met de migratie van de metalen (zuivere chemische elementen) in het normale-evolutiescenario van het bergingssysteem (zie sectie 4.2.2.1). Zij toont aan dat, onder voorbehoud van de aangenomen hypothesen, de chemische toxiciteit van het afval van de geologische groep de veiligheid van de bergingsinstallatie niet in het gedrang brengt. Dit is niet verwonderlijk, omdat de meeste metalen onder kationische vorm in oplossing zitten, en de positief geladen elementen sterk gesorbeerd zijn op de Boomse Klei. De gevolgde methodologie om de chemische toxiciteit van een bergingsinstallatie te evalueren bestond erin:

- de bronterm te karakteriseren, dat wil zeggen de kwantitatieve inventaris te maken van de metalen aanwezig in het afval die op termijn in de watervoerende lagen kunnen terechtkomen;
- in deze inventaris de elementen te selecteren waarmee rekening moet worden gehouden voor de studie van de migratie in de Boomse Klei;
- de migratie van deze elementen in de Boomse Klei te bestuderen.

Het reduceren van de oorspronkelijk 54 geïdentificeerde elementen waarmee rekening moet worden gehouden voor de migratiestudies gebeurde op basis van drie types van criteria (*de vergelijking van de chemische toxiciteit en de radiologische toxiciteit, de gelijkenis van de chemische eigenschappen van de lanthaniden, en de oplosbaarheid*) en maakte het mogelijk ze te herleiden tot 24: B, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Ge, As, Br, Rb, Sr, Y, Mo, Tc, Cd, In, Sb, Cs, Ba, Sm, W, Hg, Pb en U.

De migratie-evaluaties gebeurden in een eerste fase conservatief, en gingen uit van een migratie door diffusie zonder oplosbaarheidsbeperking (de elementen zijn dus volledig oplosbaar in het poriënwater van de Boomse Klei). In een tweede fase, die alleen betrekking had op de elementen waarvan de concentraties op het grensvlak klei-watervoerende laag hoger waren dan één milligram per liter, werden de oplosbaarheidslimieten toegepast, indien deze gekend waren.

De vergelijking van de concentraties op het grensvlak klei-watervoerende laag met de toepasbare normen inzake drinkwater in Vlaanderen (wetgeving van 1992, conform de Europese aanbevelingen) suggereert dat de chemische toxiciteit van het geborgen afval in de Boomse Klei geen veiligheidsbeperkende factor is. De vier elementen waarvan de berekende maximumwaarden in de watervoerende lagen het dichtst bij de maximaal toelaatbare waarden komen en die dus het hoogste chemische toxiciteitspotentieel hebben, namelijk boor, nikkel, molybdeen en uranium, hebben immers concentraties die systematisch ten minste een factor 100 lager zijn dan de geldende normen (Voor de metalen die niet in deze reglementering voorkomen, werd in de mate van het mogelijke gebruik gemaakt van de normen betreffende

elementen met verwante chemische eigenschappen. Wat betreft samarium en uranium, waarvoor toen geen normen bestonden, zijn de maximumconcentraties in de watervoerende lagen, respectievelijk $1.7 \cdot 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ en $2.5 \cdot 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, aanzienlijk lager dan de strengste norm, in casu die van kwik, die $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ bedraagt).

Evenwel is het, rekening houdend met de hoeveelheden metalen die verbonden zijn met het afval, niet uitgesloten dat de sorptiesites van de klei verzadigd zouden worden in de onmiddellijke omgeving van het bergingssysteem, wat een daling van de vertragsingsfactoren en dus een verhoging van de maximumconcentraties in de watervoerende lagen met zich mee zou brengen.

De chemische toxiciteit van het te bergen afval zal opnieuw geëvalueerd moeten worden in het vervolg van het programma, met name op basis van een bevestiging van de aanwezige inventarissen. Bovendien zullen de mogelijkheden en gevolgen van een competitie tussen sorptie van de radionucliden en sorptie van de metalen elementen in het nabije veld en in de Boomse Klei moeten worden geanalyseerd.

3.6.5.2 Migratie van de chemische fronten

Het verschijnsel van oxidatie, bij contact met de lucht, van het pyriet, dat naar rato van 1 à 5 % in de Boomse klei aanwezig is, telt drie stappen: oxidatie van het eigenlijke pyriet met vrijgave van protonen (verzuring), oplossing van het calciet dat aanwezig is in de klei (neutralisatie) en uitwisseling van de calciumionen met de natriumionen van de kleimineralen. Bijgevolg wordt het poriënwater van de Boomse Klei van het natriumsulfaattype. De oxidatie van de klei doet naast sulfaten ook thiosulfaationen ontstaan, waarvan het belang voor putcorrosie van de metalen barrières is aangetoond. Er dient echter te worden onderstreept dat de oxidatie van het pyriet erg gelokaliseerd is en er in het ondergrondse laboratorium nooit enige zure vloeistof werd verzameld ter hoogte van de diverse piëzometers die in werking zijn.

Het zal nodig zijn het verschijnsel van oxidatie van de klei bij luchtcontact en de progressiesnelheid van het oxidatiefront te kwantificeren, om de maximaal toegelaten periodes te definiëren voor de verschillende exploitatiefases van de bergingsinstallaties. Aangezien enerzijds snel een bekleding zal worden geplaatst bij het graven van de galerijen en anderzijds het zuurstoftransport in de klei gecontroleerd zal worden door de diffusie, wordt a priori een beperkt oxidatiefenomeen verwacht. Er is recent een studie begonnen over de oxidatie van de klei langs de barsten die zijn teweeggebracht door de uitgraving van de ondergrondse installaties.

Er zou een alkalisch front kunnen worden voortgebracht door de degradatie van het beton en het cement dat bijvoorbeeld wordt gebruikt als afvalmatrix of opvulmateriaal, of voor de bekleding van de galerijen. Een dergelijke alkalische pluim zou wijzigingen in de geochemie en de mineralogie van de klei (oplossing/precipitatie van de mineralen, kationenuitwisselingen enzovoort) en bijgevolg wijzigingen van haar migratie-eigenschappen en van de speciatie van de radionucliden kunnen veroorzaken.

Een eerste evaluatie op basis van de reactiviteit van de mineralen van de klei (hydrolyse van de aluminosilicaten in alkalisch midden) wijst erop dat de dikte van de gastformatie die mogelijk kan worden verstoord door een alkalisch front, enkele tientallen centimeter zou moeten bedragen. Aanvullend op deze reacties zal de klei bijdragen tot de neutralisering van de alkaliteit van het beton door de permanente toevoer van carbonaten. Voor de galerijen voor afval van categorie B die zijn opgevuld met hydraulische cement, zou de omvang van de alkalische verstoring in de klei groter moeten zijn. Die verstoring is tot op heden echter nog niet gekwantificeerd, evenmin als haar eventuele gevolgen op de migratie van de radionucliden. Deze onderwerpen vormen het voorwerp van diverse recentelijk gestarte onderzoeksprogramma's. Als dat nodig mocht blijken, zou het gebruik van een cement met lage alkaliteit kunnen worden overwogen voor de bekledingen en de opvulling.

Recentelijk is ook een studie gestart over de invloed van de migratie van een natriumnitraatfront; er is ongeveer 750 ton natriumnitraat aanwezig in het gebitumineerde afval dat afkomstig is van Eurobitum.

Organische verbindingen, en in het bijzonder cellulose derivaten, zijn aanwezig in bepaalde afvalfluxen. Gezien de mogelijke impact in anaëroob en alkalisch midden van de degradatieproducten van cellulose op de oplosbaarheid en de sorptie van de radionucliden, is prioriteit verleend aan deze taak. De beschikbare deelresultaten wijzen erop dat de degradatieproducten van de cellulose slechts weinig invloed hebben op de speciatie en de oplosbaarheid van plutonium en americium in de klei.

Referentiegroep

Groep die individuen omvat wier blootstelling aan een bron voldoende uniform is en representatief voor die personen van de bevolking die meer aan deze bron zijn blootgesteld dan de andere leden van de bevolking.

3.7 De modellering van de biosfeer

De modellering van de biosfeer heeft tot doel de evaluatie van de radiologische impact van het vrijkomen van radionucliden in de biosfeer door een bergingssysteem mogelijk te maken. De geraamde individuele radiologische impact beantwoordt aan de jaarlijkse effectieve dosis voor een individu van de referentiegroep (zie ook secties 2.1 en 4.3.1.1).

Sinds de publicatie van het SAFIR-rapport heeft een ruime internationale samenwerking (programma's BIOMOVs en BIOMASS van het IAEA) het mogelijk gemaakt een systematische methodologie uit te werken voor de ontwikkeling van conceptuele en mathematische modellen van de biosfeer. Deze methodologie werd toegepast op de lokale context van de nucleaire zone van Mol-Dessel. Concreet vertrekt het model van de biosfeer van het normale-evolutiescenario, waarin de biosfeer onveranderlijk wordt verondersteld. Het wordt gebruikt in de veiligheidsevaluaties om de doses voor een individu van de referentiegroep te evalueren uitgaande van de radionuclidenfluxen en -concentraties in de watervoerende lagen. Gezien de lange periodes van vrijkomen van de radionucliden, veronderstelt het model dat de verhoudingen van de concentraties in de verschillende compartimenten van de biosfeer constant blijven of beschouwd kunnen worden als een gemiddelde in de tijd voor de parameters die schommelen. Het is dus een model in evenwicht.

De radionucliden die uiteindelijk zullen worden vrijgezet door het bergingssysteem, zullen getransporteerd worden door het grondwater in de watervoerende laag, totdat zij terechtkomen in verschillende types van *receptoren* die voor hen de poort naar de biosfeer zullen openen (fig. 3.42). Voor de nucleaire zone van Mol-Dessel onderstelt men dat de radionucliden in de biosfeer langs de drie volgende receptortypes kunnen binnendringen:

- de *putten* in de watervoerende laag aan de rand en stroomafwaarts van de bergingsinstallatie, waar zich de maximale concentraties voordoen;
- de *waterlopen*, die de besmetting zullen kunnen verspreiden;
- de laag van de *bodem* waarin de wortels van planten doordringen.

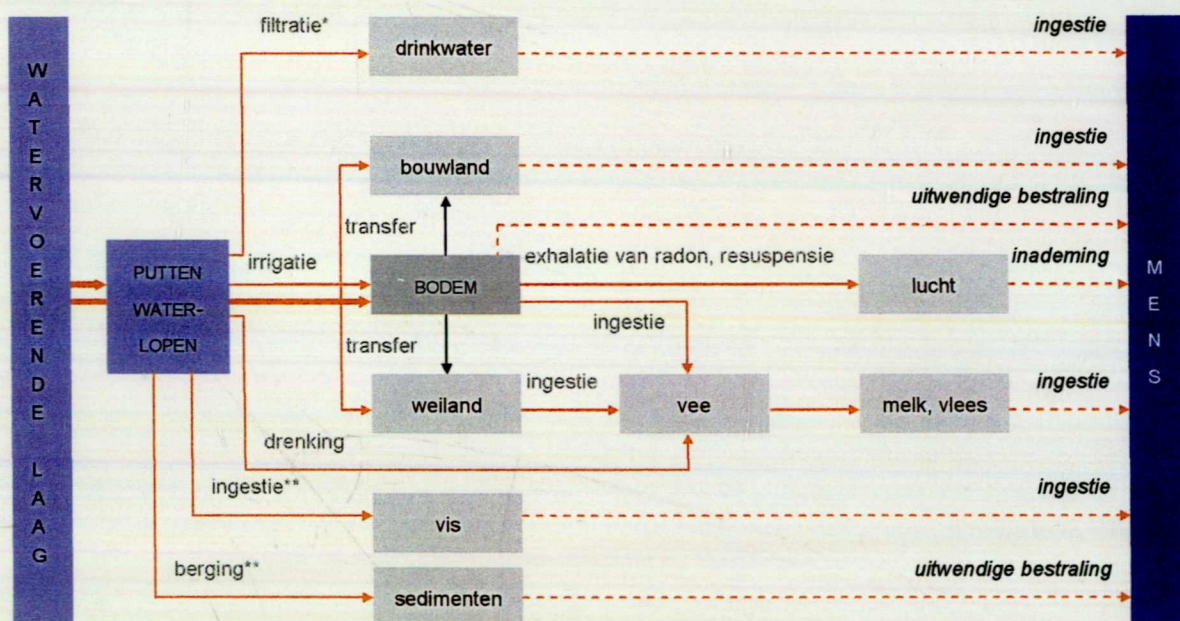
Eénmaal in de receptoren terecht gekomen, zullen de radionucliden zich in de biosfeer blijven verspreiden via *transfer* naar andere dragers, hetzij natuurlijk, hetzij als gevolg van menselijke interventies, en deze dragers zullen dan ook de blootstellingsbronnen voor de mens vormen. De belangrijkste wijzen van overbrenging zijn de volgende:

- Het besmette water van de putten kan dienen voor de bereiding van drinkwater, de irrigatie van land en weiden en ten slotte om het vee te drinken te geven.
- Het besmette water van de waterlopen kan, voor zover ze voldoende groot zijn, worden ingenomen door de vissen of de sedimenten besmetten die zich op de bedding van die rivieren hebben afgezet.
- Ten slotte kunnen de radionucliden in de besmette bodems, ongeacht of dit rechtstreeks gebeurde door het water van de ondergrond dan wel als gevolg van irrigatie met besmet water, worden ingenomen door het vee of opgenomen worden door de wortels van de

planten die er groeien of die er worden geteeld en vervolgens worden ingenomen door het vee of door de mens.

De belangrijkste radiologische-blootstellingswegen te wijten aan het gebruik door de mens van de receptoren en de dragers, of zelfs aan hun eenvoudige aanwezigheid, zijn:

- de *ingestie* van drinkwater en van besmette voedingsmiddelen (fruit, groenten, melk, vlees, vis);
- de *inademing* van stofdeeltjes in de lucht boven de besmette velden, en van uit de bodem geëxhaleerd radon afkomstig van radiumhoudend afval;
- de *uitwendige straling* van de bodem voor individuen die zich op de besmette velden of aan de oevers van de rivieren waarvan de sedimenten zijn besmet, zouden bevinden.



* behalve voor kleine waterlopen

** behalve voor kleine waterlopen en voor putten

Figuur 3.42 Het biosfeermodel. De verschillende blootstellingswegen van de mens aan de ioniserende straling voor de nucleaire zone van Mol-Dessel als gevolg van de transfer van de radionucliden vanuit de watervoerende laag naar de biosfeerreceptoren vervolgens, van hieruit naar de andere dragers van de biosfeer.

De waarden van de radionuclidenconcentraties in de compartimenten van de biosfeer maken het dan mogelijk de resulterende blootstelling en de individuele dosis te berekenen.

Het gebruik van de transferfactoren tussen de verschillende biosfeercompartimenten (bij voorbeeld van de bodem naar het weiland, of van de koe naar de melk) maakt het mogelijk de radionuclidenconcentraties in de blootstellingsdragers in functie van de concentraties in de receptoren te berekenen. Met andere woorden, de concentraties in de verschillende compartimenten worden onderling verbonden.

Bij de bepaling van de verwachte jaarlijkse individuele doses veronderstelt men vervolgens dat alle mogelijke blootstellingswegen, die aanzienlijk kunnen bijdragen tot de blootstelling van individuen van de referentiegroep, in aanmerking worden genomen. De dosisberekening baseert zich dus op de radionuclidenconcentraties in de pertinente biosfeercompartimenten.

De individuele doses voor een lid van de referentiegroep kunnen worden onderverdeeld in drie grote categorieën. Voor de berekening van de doses wordt gebruikgemaakt van de door de ICRP aanbevolen dosiscoëfficiënten.

- De *dosis door ingestie* is het product van de concentraties in het drinkwater en in de voeding met de jaarlijks geconsumeerde hoeveelheden en met de dosiscoëfficiënten voor ingestie.
- De *dosis door inhalatie* wordt alleen in aanmerking genomen voor landbouwers op hun veld. Zij is het product van de concentraties in de lucht met de jaarlijks ingeademde hoeveelheden besmette lucht en met de dosiscoëfficiënten voor inademing.
- De *dosis door externe bestraling* wordt in aanmerking genomen voor landbouwers op hun veld en voor vissers aan de oever van rivieren. Zij is het product van de concentraties in de grond of in de sedimenten met de jaarlijkse blootstellingsduur en met de dosistempocoëfficiënten voor de externe bestraling.

De eindresultaten van de berekeningen worden uitgedrukt in termen van dosisomzettingfactoren, met andere woorden de jaarlijkse maximumdosis voor een gegeven concentratie in de putten, de waterlopen of de bodems.

3.8 De leperiaan-kleien als alternatieve gastformatie

3.8.1 Inleiding

Zoals vermeld in sectie 3.2.1, heeft NIRAS op verzoek van de Evaluatiecommissie-SAFIR (1990) de studie van een alternatieve gastformatie aangevat om over een reserveoplossing te beschikken voor het geval de Boomse Klei één of meerdere negatieve elementen zou vertonen die haar zouden beletten langetermijn veiligheidsfuncties te vervullen, en dit niet zou kunnen verholpen worden met de kunstmatige barrières.

Zoals het geval is voor de Boomse Klei, is het onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma betreffende de leperiaan-kleien van het methodologische type en onderzoekt het een referentiesite — de nucleaire site van Doel — zonder daarom een voorbarig oordeel uit te spreken over de plaats waar de voorgestelde bergingsoplossing zou kunnen worden uitgevoerd. Doelstelling van dit programma is de mogelijkheden van de leperiaan-kleien als gastformatie te evalueren, zowel vanuit het oogpunt van de veiligheid als vanuit dat van de haalbaarheid. Het programma betreft vooral de aardwetenschappen en de studie van de migratie, maar heeft zich tot dusver niet gebogen over de aspecten betreffende de bergingsinstallaties.

De kennis die NIRAS heeft verworven inzake leperiaan-kleien, is enerzijds afkomstig van een inventaris van de kennis over de kleiformaties van de leper-Groep en anderzijds van de resultaten van een reeks boringen die in Doel werden gedaan om:

- niet verstoorde monsters van de klei en van de boven- en onderliggende zanden te verkrijgen met het oog op een algemene karakterisering en de uitvoering van migratietests;
- een omvangrijk programma van geofysische boorgatmetingen met hoge resolutie uit te voeren;
- hydraulische injectietests uit te voeren;
- piëzometers te installeren.

Omdat binnen de leper-Groep de Formatie van Kortrijk de meest gunstige lithologische en geometrische kenmerken vertoont, werd het onderzoek hierop geconcentreerd. Op terminologisch vlak dient opgemerkt dat hetgeen in het kader van het programma van NIRAS "leperiaan-kleien" wordt genoemd, in feite de dikste kleirijke sectie van de leper-Groep omvat, met name de Leden van Saint-Maur, Moen en Aalbeke van de Formatie van Kortrijk en het Lid van Kortemark, dat tot de Formatie van Tielt behoort.

De interpretatie van de resultaten die werden verkregen in de loop van de boringscampagne, is nog altijd bezig, zodat het nog niet mogelijk is geweest de verworven gegevens optimaal te benutten en a fortiori nauwkeurige conclusies te trekken over de mogelijkheden van de leperiaan-kleien als gastformatie.

3.8.2 Het geografische en geologische kader

De nucleaire zone van Doel bevindt zich ten noorden van de stad Antwerpen, op de linkeroever van de Schelde. Het landschap bestaat hoofdzakelijk uit Scheldepolders (fig. 3.2). De topografie is erg vlak: geen enkel punt ligt hoger dan 10 meter boven de zeespiegel. De streek behoort tot de Vlaamse Vallei, een belangrijk systeem van valleien van het Pleistoceen dat is opgevuld met heterogene sedimenten (fluviatiele zanden, turf). Het geheel is bedekt met een laag eolische zanden die zelden dikker zijn dan 5 meter. Deze streek maakt volledig deel uit van het afwateringsgebied van de Schelde en kenmerkt zich door de aanwezigheid van een dicht netwerk van grachten en kanalen die een kunstmatige drainage mogelijk maken.

Lithostratigrafie

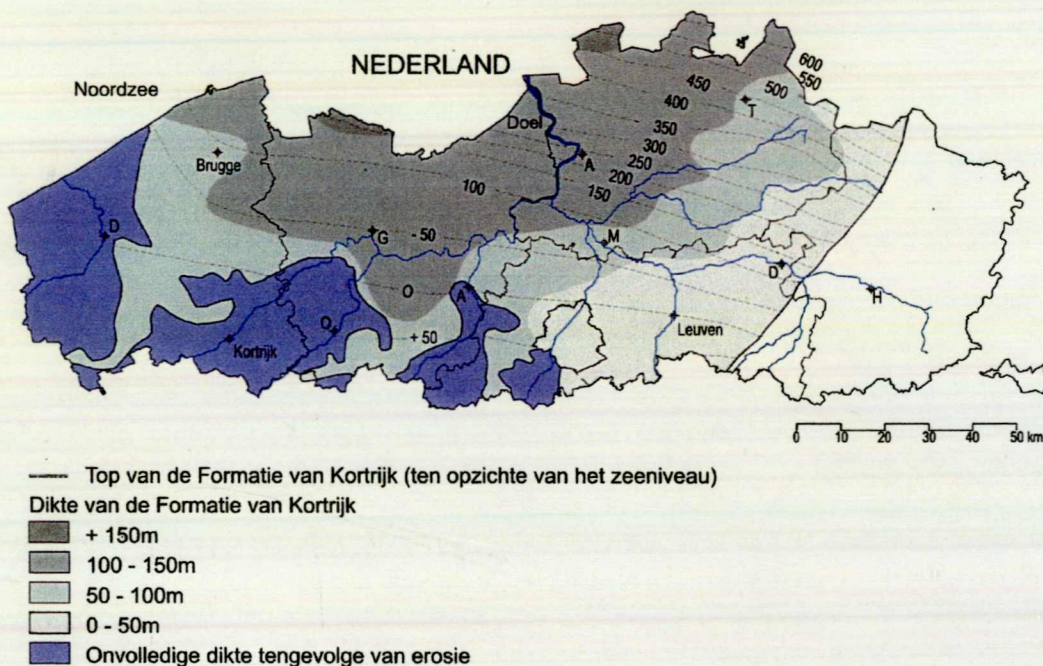
De leperiaan-kleien werden afgezet tijdens het leperiaan, de periode die zich tussen 54 en 49 miljoen jaar geleden uitstrekt, en die deel uitmaakt van het Eoceen. Lithostratigrafisch gesproken, behoren de leperiaan-kleien tot de leper-Groep, en in het bijzonder tot de Formatie van Kortrijk, die verdeeld is in vier leden, met name (van oud naar jong): Mont-Héribu, Saint-Maur, Moen en Aalbeke. Het Lid van Mont-Héribu bestaat uit afwisselingen van siltige klei en zeer fijn zand. Hierop werd de klei van Saint-Maur afgezet. Het Lid van Moen is een heterogeen complex van klei, silt en zeer fijn zand dat verschillende schelpen- en glauconietlagen bevat. Deze wordt bedekt door het Lid van Aalbeke, dat als gevolg van de nagenoeg volledige afwezigheid van zand, de zuiverste mariene kleiafzetting van het Belgische Tertiair is. Het Lid van Kortemark, dat in feite tot de Formatie van Tielt behoort en dat zich boven het Lid van Aalbeke bevindt, is eveneens kleihoudend en bestaat uit compacte, siltrijke klei.

De Formatie van Kortrijk dagzoomt in de gelijknamige streek en wordt dikker in noordelijke en westelijke richting (fig. 3.43). Wegens een lichte noordwaarts gerichte helling bevindt de top van de formatie zich in het noordelijke deel van de Provincie Antwerpen, op diepten van meer dan 400 meter. Het meest homogene Lid van de Formatie van Kortrijk is dat van Saint-Maur. Deze kleilaag is de enige die afgezet is in het volledige sedimentatiebekken; het voorkomen van andere leden is afhankelijk van de beschouwde positie in het bekken.

Tektonische context

De nucleaire zone van Doel behoort tot een regio waarvan de ondergrond wordt gedomineerd door de aanwezigheid van het Massief van Brabant dat opgebouwd is uit Paleozoïsche gesteenten. In tegenstelling tot het Bekken van de Kempen, rust het Krijt hier rechtstreeks op de paleozoïsche sokkel.

Het hele noordwesten van België zakt met ongeveer 0.5 mm per jaar ten opzichte van het referentiepunt te Ukkel. Plaatselijk kan een grotere verzakking plaatsvinden als gevolg van intensief oppompen van grondwater.



Figuur 3.43 Dikte en diepte van de top van de Formatie van Kortrijk.

Het Massief van Brabant wordt gecompartmenteerd door een reeks noord-oost en west-noordwest georiënteerde breuken die gewoonlijk niet doorlopen in het Krijt of het Tertiair. Dit massief is tektonisch actief, zoals bijvoorbeeld is gebleken uit de aardbeving van Oudenaarde van 1938 die in de omgeving van het epicentrum een intensiteit VII haalde. Op de isomacroseismische kaart ligt de streek rond Doel in een intensiteitszone tussen VI en V.

Verkenningen aan de hand van seismisch onderzoek in de Noordzee hebben tal van tektonische vervormingen binnen de eigenlijke Formatie van Kortrijk in het licht gesteld. Deze vervormingen zijn terug te vinden in enkele kleigroeven. Deze breuken vinden waarschijnlijk hun oorsprong in verschijnselen van wateruitdrijving bij de progressieve begraving van de laag. De impact van deze breuken op de huidige grondwaterstromingen is onbekend.

Hydrogeologie

Men vindt watervoerende lagen boven en onder de Formatie van Kortrijk. De grondwaterstormingen binnen deze watervoerende lagen zijn sterk beïnvloed door de intensieve waterpompingen, zodat de resulterende algemene beweging dalend is. Bij niet-pomping zou de algemene beweging stijgend zijn. Dit toont de gevoeligheid van het hydrogeologische systeem voor verstoringen van menselijke oorsprong aan, maar ook voor verstoringen die kunnen worden teweeggebracht door klimaatwijzigingen.

3.8.3 De kenmerken van de leperiaan-kleien in Doel

De hieronder vermelde preliminaire resultaten zijn afkomstig van de interpretatie van de boorgatmetingen van de boringen van Doel, van de hydraulische tests die zowel in situ als in het laboratorium zijn uitgevoerd, en van de laboratoriumtests die zijn verricht op boorkernen. Het is belangrijk op te merken dat wegens de moeilijkheden die werden ondervonden bij het boren, geen optimale wanden en stabiliteitsvoorwaarden konden worden bereikt voor de boorgatmetingen.

Ter hoogte van de nucleaire zone van Doel vertegenwoordigen de leperiaan-kleien, dus de Formatie van Kortrijk en het Lid van Kortemark, een totale dikte van 114 meter.

Mineralogie

Het carbonaatgehalte van de Formatie van Kortrijk is in het algemeen lager dan 2 %, met uitzondering van het centrale deel van het Lid van Moen, waar dit gehalte tot 5 % kan oplopen. De basis van het Lid van Kortemark is ook rijker aan carbonaat. Het gehalte aan organisch materiaal is gering en homogeen verdeeld. De zandige fractie bestaat hoofdzakelijk uit kwarts, veldspaat, zware mineralen en kleine fossiele fragmenten. De siltige fractie laat, voor wat betreft de niet-fyllosyllicaten, een overwicht van veldspaat alsook van kwarts en carbonaten zien. De kleimineralogie van de siltfractie wordt gedomineerd door illiet en kaolinet (de basis van het Lid van Saint-Maur bevat tot 30 % kaolinet).

De zwellende kleimineralen (smectiet) maken voor meer dan de helft deel uit van de kleifractie van de Formatie van Kortrijk; illiet is het andere dominerende kleimineraal. Het Lid van Saint-Maur wordt gekenmerkt door meer dan 75 % kleimineralen en een aanzienlijk kaolinetgehalte. Het smectietgehalte stijgt in het Lid van Moen, ten koste van kaolinet. De Aalbeke Klei bestaat haast uitsluitend (89 %) uit kleimineralen.

Fysische en geomechanische eigenschappen

Het watergehalte (in percentage droog gewicht) vermindert met toenemende diepte: zij schommelt tussen 34 en 16 %, met een gemiddelde waarde van 27 %. De totale porositeit schommelt in dezelfde zin, tussen 48 en 32 %.

De thermische eigenschappen van monsters die representatief zijn voor de verschillende stratigrafische eenheden van de leper-Groep, zijn bepaald. Voor de vochtige monsters is de warmtegeleidbaarheid gering: zij schommelt tussen 0.7 en 1.1 W·m⁻¹·K⁻¹.

Het Lid van Aalbeke laat een heel hoge plasticiteitsindex en zwellingsdruk zien (respectievelijk 150 % en 1.72 MPa), zoals te verwachten was gezien zijn hoog kleigehalte. De moeilijkheden die werden ondervonden om de boorwanden te stabiliseren doen een zwakke mechanische weerstand van deze klei vermoeden. Deze moeilijkheden kunnen eveneens verwacht worden tijdens het uitgraven van ondergrondse installaties.

Hydraulische geleidbaarheid

De leperiaan-kleien worden gekenmerkt door een hydraulische geleidbaarheid die vergelijkbaar is met de waarden die lokaal werden gemeten voor de Boomse Klei (tussen $10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en $10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). De Leden van Saint-Maur en van Aalbeke vertonen de laagste waarden.

De injectietests in situ geven hydraulische-geleidbaarheidswaarden die systematisch groter zijn (een tot twee grootteorden) dan de laboratoriummetingen. Dit zou het gevolg kunnen zijn van een anisotropie van de hydraulische geleidbaarheid, maar dit alleen kan de omvang van de vastgestelde verschillen niet rechtvaardigen; zij worden waarschijnlijk ook veroorzaakt door de meetmethode zelf. Terwijl de tests in situ de gastformatie beïnvloeden over een diameter van enkele meter rond de boring, zijn de laboratoriummetingen beperkt tot enkele kubieke centimeter.

Geochemie en migratie

Het poriënwater van de Formatie van Kortrijk is zout tot brak (tussen 6000 en 13500 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1} \text{ Cl}^-$).

Migratietests met getritieerd water en jodium zijn uitgevoerd op de boorkernen van boring Doel-1a om enerzijds de migratieparameters van de leperiaan-kleien te bepalen voor niet-vertraagde radionucliden en anderzijds de homogeniteit van deze formatie inzake migratie te evalueren. De migratieparameters (ηR en D_{app}) verkregen voor HTO en $^{131}\text{I}^-$ zijn vergelijkbaar met die van de Boomse Klei. Uit een beperkt aantal gegevens blijkt dat de leperiaan-kleien ter hoogte van boring Doel-1a relatief homogeen zijn wat betreft de migratieparameters van de niet-vertraagde radionucliden.

3.8.4 Vooruitzichten

De toekomstige inspanningen inzake karakterisering van de leperiaan-kleien zullen eerst betrekking hebben op de interpretatie en de uitdieping van de gegevens die tot dusver zijn verkregen of die momenteel nog worden verworven. Op deze basis zou een eerste evaluatie van de performanties van de natuurlijke barrière moeten worden gemaakt.

Zelfs al is het evident dat het kennisniveau voor de alternatieve oplossing geenszins vergelijkbaar moet zijn met het bestaande kennispeil van de referentieoplossing, is het belangrijk om in detail de specifieke kenmerken van de leperiaan-kleien te vergelijken met die van de Boomse Klei, en dit met name met het oog op een evaluatie van de mogelijkheden tot overdracht van de verworven kennis tussen de twee gastformaties onderling. Onder de specifieke kenmerken die een rechtstreekse impact kunnen hebben op de haalbaarheid of de veiligheid van een bergingssysteem, kunnen we aanhalen:

- de geringe mechanische weerstand, die vragen oproept aangaande de haalbaarheid van de uitgravingen;
- de aanwezigheid van zout poriënwater, waarvan de invloed op de keuze van de materialen voor de kunstmatige barrières en het ontwerp van de bergingsinstallatie (corrosie van de metalen, gedrag van de zwellende klei enzovoort) zal dienen te worden geanalyseerd. Bovendien dreigen de speciatie en de migratie van bepaalde radionucliden, speciaal die welke gevoelig zijn voor de redoxpotentiaal en voor de aanwezigheid van complexerende agentia, te worden gewijzigd;
- de geringe warmtegeleidbaarheid, die vragen oproept aangaande de dissipatie van de warmte die uitgaat van het warmteafgevend afval;
- de mogelijkheid van de aanwezigheid van preferentiële migratiewegen (breuken) binnen de formatie, waarvan de rol inzake de beweging van vloeistoffen zal moeten worden verhelderd.

Gezien de aanzienlijke laterale variabiliteit van de lithologische kenmerken van de leperiaankleien, zal men zich ook de vraag moeten stellen of de nucleaire zone van Doel representatief is in het licht van de eigenschappen die mogen worden verwacht van deze gastformatie.

4 Evalueren van de radiologische veiligheid op lange termijn: normale-evolutiescenario en gewijzigde-evolutiescenario's

De radiologische evaluaties van de langetermijn veiligheid van een bergingssysteem hebben tot doel op onrechtstreekse, maar overtuigende wijze aan te tonen dat de potentiële radiologische gevolgen onder de aanvaardbaar geachte limietwaarden blijven, ongeacht de beschouwde tijdschaal. Deze evaluaties bestaan dus uit het nagaan van de prestaties van een dergelijk systeem in alle denkbare relevante evolutiescenario's. Hierbij wordt niet alleen gebruik gemaakt van verschillende modellen en rekencodes maar ook van een brede waaier aan kwantitatieve en kwalitatieve argumenten. Om de berekeningen praktisch mogelijk te maken, steunen deze evaluaties op een vereenvoudigd systeem met een vereenvoudigde werking. Bij het afleiden van dit systeem en bij het inschatten van de evolutie in de tijd worden altijd voorzichtige onderstellingen gemaakt zodat in principe een overschatting van de werkelijke toekomstige radiologische impact bekomen wordt. De resultaten van de veiligheidsevaluaties moeten dus als puur indicatief worden beschouwd: het zijn geen voorspellingen.

De langetermijn veiligheidsevaluatie van een bergingssysteem is een iteratief en langdurig proces. Zo steunen de evaluaties die worden voorgesteld in het SAFIR 2-rapport, waarvan het merendeel begin 1997 zijn gestart, op de vijf veiligheidsevaluaties die werden uitgevoerd in het kader van de eerste fase en de eerste helft van de tweede fase van het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS en van het SCK-CEN (1974-1989) (tabel 4.1). Deze evaluaties, op de derde na uitgevoerd in het kader van projecten van de Europese Commissie, waren aanvankelijk sterk vereenvoudigde verkennende evaluaties, maar zijn geleidelijk geëvolueerd naar steeds beter onderbouwde en meer gedetailleerde evaluaties, doordat ze meer en meer gebruik konden maken van nauwkeurige en betrouwbare experimentele gegevens en er steeds krachtigere rekencodes beschikbaar kwamen.

Sinds het SAFIR-rapport heeft men de methodologie van de langetermijn veiligheidsevaluaties, en in het bijzonder de scenario-ontwikkeling, sterk ontwikkeld en gesystematiseerd. Deze evolutie was niet enkel het gevolg van resultaten uit de vroegere studies, maar werd eveneens gedreven door ontwikkelingen op internationaal vlak. Deze methodologie is vandaag een uitstekend middel geworden om zowel de werking van het bergingssysteem als geheel als de werking van de verschillende afzonderlijk beschouwde componenten te testen en te begrijpen. Zij heeft het bijgevolg mogelijk gemaakt de processen en de kenmerken die de veiligheid van het systeem bepalen, alsook de verschillende types van onvermijdelijke onzekerheden beter te identificeren en hun relatieve belang te onderkennen. Met deze onzekerheden, en vooral met het feit dat zij sterk toenemen naarmate het bergingssysteem evolueert in de tijd, wordt nu beter rekening gehouden dankzij de invoering van verschillende redeneringswijzen en rekenmethodes en dankzij het gebruik van verschillende veiligheidsindicatoren voor de verschillende fases van de evolutie van het systeem.

Terwijl het SAFIR-rapport enkel de radiologische langetermijn veiligheid voor verglaasd afval behandelde, heeft men sindsdien de radiologische impact onderzocht van nagenoeg alle

afvalklassen van categorieën B en C die in diepe berging zullen moeten worden geplaatst. Hierbij werd het accent gelegd op de drie afvalklassen met de hoogste specifieke activiteit: verglaasd afval, bestraalde splijtstof, en hulzen en eindstukken. De inventaris van de andere afvalklassen moet immers nog worden gepreciseerd. Bovendien werd de bergingsarchitectuur voor deze afvalklassen nog niet ontwikkeld. Overigens hadden de tot op heden uitgevoerde evaluaties van de langetermijn veiligheid hoofdzakelijk betrekking op het normale-evolutiescenario en zijn de gewijzigde-evolutiescenario's enkel het voorwerp geweest van preliminaire en partiële evaluaties. Gezien het niveauverschil in kennis tussen de Boomse Klei en de Ieperiaan-kleien, hebben deze evaluaties alleen betrekking op een referentiebergingsinstallatie in de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel.

Dit vierde hoofdstuk, dat gewijd is aan de evaluatie van de radiologische langetermijn veiligheid van een bergingssysteem, licht de voor veiligheidsevaluaties en meer specifiek voor scenario-ontwikkeling ontwikkelde methodologie toe, motiveert verder de invoering van nieuwe veiligheidsindicatoren ter aanvulling van de klassieke radiologische veiligheidsindicatoren en stelt de belangrijkste resultaten van de uitgevoerde evaluaties voor: alle uitgevoerde evaluaties voor de verschillende scenario's bevestigen de overheersende rol van de geologische barrière. Ten slotte wordt op het probleem van kritikaliteit voor een diepe berging zeer kort ingegaan.

4.1	De methodologie van de evaluaties van de langetermijn veiligheid	4.4
4.1.1	Scenario-ontwikkeling	4.5
4.1.2	Evaluatie van de scenario's	4.6
4.2	De ontwikkeling van de scenario's	4.9
4.2.1	Identificatie van de scenario's	4.9
4.2.2	Beschrijving van de scenario's	4.11
4.2.2.1	Normale-evolutiescenario	4.11
4.2.2.2	Gewijzigde-evolutiescenario's	4.16
4.3	De evaluatie van de scenario's	4.17
4.3.1	Kwantitatieve en kwalitatieve argumenten	4.18
4.3.1.1	Klassieke veiligheidsindicatoren	4.18
4.3.1.2	Alternatieve veiligheids- en performantie-indicatoren	4.19
4.3.1.3	Kwalitatieve argumenten	4.20
4.3.2	Evaluatie van het normale-evolutiescenario	4.21
4.3.2.1	Dosisberekeningen	4.21
4.3.2.2	Berekeningen van alternatieve veiligheids- en performantie-indicatoren	4.36
4.3.3	Evaluatie van de gewijzigde-evolutiescenario's	4.38
4.3.4	Aanvullende resultaten en beschouwingen	4.40
4.4	Vermijden van kritikaliteit	4.45
4.5	Perspectieven	4.45

Tabel 4.1 Overzicht van de veiligheidsevaluaties betreffende het diepebergingsysteem die vóór 1996 zijn uitgevoerd in het kader van het Belgische programma.

	PAGIS (1988)	PACOMA (1990)	Updating 1990 (1992)	Verbruikte kernbrandstof (1995)	EVEREST (1996)
Doelstellingen	een methodologie voor evaluatie van de veiligheid van een berging ontwikkelen en een 1 ^{ste} evaluatie maken van zijn radiologische impact op lange termijn	de resultaten van PAGIS aanvullen	de resultaten van PAGIS en PACOMA actualiseren op basis van de nieuwe gegevens van het Belgische elektronucleaire programma en van de research	een 1 ^{ste} evaluatie maken van de veiligheid van de directe berging van bestraalde splijstoffen door toepassing van de methodologie van de studie Updating 1990	systematisch en kwantitatief de verschillende bronnen van onzekerheid en hun relatieve belang in een veiligheidsevaluatie vaststellen
Basisgegevens					
bronterm	verglaasd afval	afval van categorie B	verglaasd afval en afval van cat. B	bestraalde splijstoffen	verglaasd afval en afval van cat. B
inventaris	← 8180 tU	→	←	4895 tU	→
indicatoren	← doses en risico's, individuele en collectieve	→	←	individuele dosis	→
scenario's	← 1 normale-evolutiesc., 3 gewijzigde-evolutiesc.	→	←	1 normale-evolutiesc.	→ meerdere, realistischer
berekeningen	←	→	←	→	→
modellen		sterk vereenvoudigd	deterministisch en stochastisch	herzien	Complexer
Belangrijkste resultaten	□ ontwikkeling van een systematische methodologie □ identificatie van de componenten die beslissend zijn voor de veiligheid (vooral de klei) □ aanwijzingen dat de bestudeerde oplossing veilig kan zijn □ de meest kritische RN: ^{237}Np, ^{99}Tc en ^{135}Cs (^{129}I en ^{36}Cl niet bestudeerd)	□ bevestiging van de belangrijkste resultaten van PAGIS □ aanwijzingen dat de bestudeerde oplossing veilig kan zijn □ de meest kritische RN: ^{14}C, ^{129}I, ^{79}Se en ^{99}Tc	□ bevestiging van de resultaten van PAGIS en PACOMA : de max. radiologische impact is duidelijk lager dan de aanvaardbare radiologische impact	□ de max. jaarlijkse dosis is ongeveer 100 x lager dan die welke toe te schrijven is aan de natuurlijke radioactiviteit, en stijgt met de afbrand □ bevestiging van het belang van de migratie en van de oplosbaarheidsgrens van de RN □ de meest kritisch RN: ^{129}I, ^{14}C, ^{237}Np, ^{226}Ra en ^{231}Pa	□ de doses zijn 2 tot 100 x lager dan de doses van de studie Updating 1990 □ benadrukking van het potentiële belang van de Darcy-snelheid in de watervoerende lagen, naast de parameters die de migratie in de klei beschrijven
Aanbevelingen	diepgaand bestuderen van de migratiemechanismen van de belangrijkste RN in de Boomse Klei		de nauwkeurige inventaris opmaken van de kritische RN (vooral ^{129}I), het nabije en het verre veld bestuderen en nauwkeurig de rol van de watervoerende lagen en van de biosfeer evalueren	de degradatie van de splijstofpastilles bestuderen	de definitie van de scenario's systematiseren, de oplosbaarheidsgrens van de kritische RN preciseren en de studie van hun complexvorming en van de effecten van de migratie van de gassen verdiepen

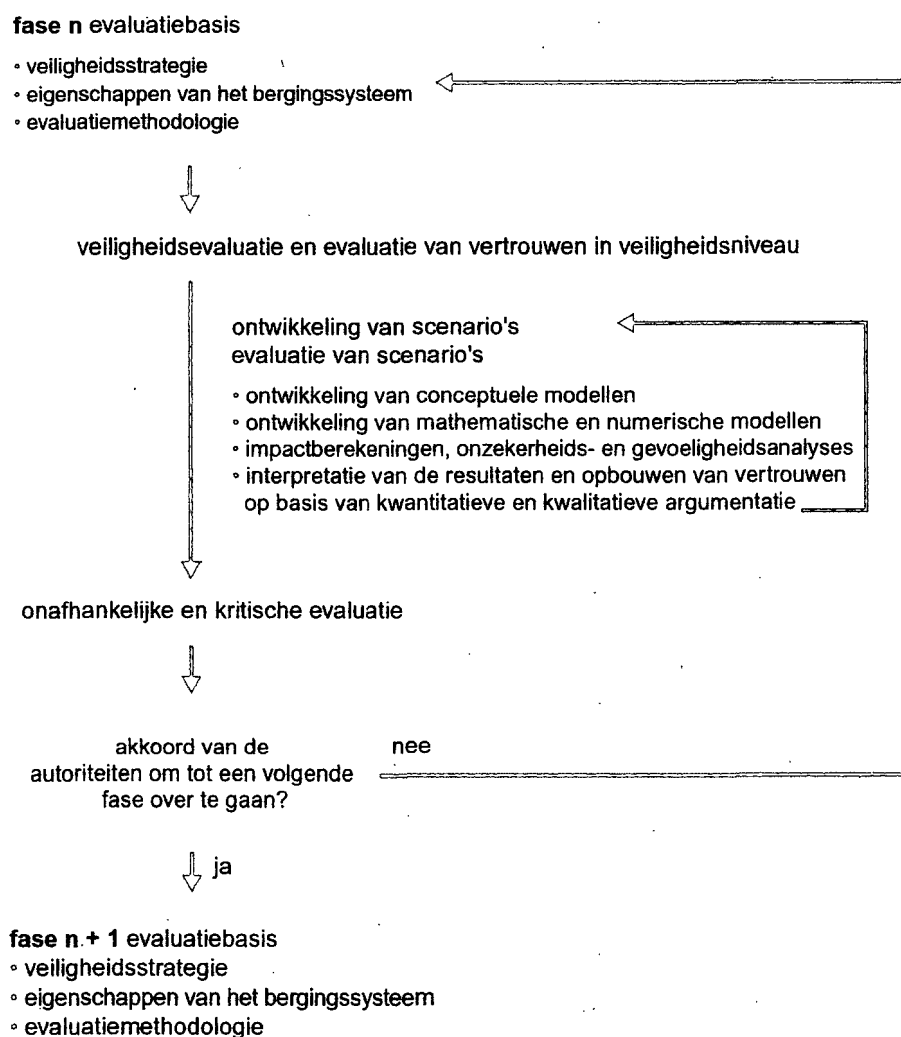
4.1 De methodologie van de evaluaties van de langetermijn veiligheid

De methodologie van de langetermijn veiligheidsevaluaties, die tot doel hebben de performanties van het bergingssysteem te testen, is veel systematischer geworden sinds de publicatie van het SAFIR-rapport. Deze methodologie steunt op een brede consensus op internationaal niveau, met name binnen de Europese Commissie, het IAEA en het NEA. Ze resulteert uit een proces dat zowel progressief als iteratief is (fig. 4.1). *Progressief*, omdat elke uitvoeringsfase van het bergingssysteem onderworpen moet worden aan een tussentijdse veiligheidsevaluatie die aldus bijdraagt tot het definiëren van de toekomstige onderzoeksprioriteiten en tot het identificeren van de eventuele wijzigingen die aan het systeem moeten worden aangebracht om de veiligheid ervan te verbeteren tijdens een latere fase van het project. Dit proces van verschillende tientallen jaren is begonnen met het methodologisch onderzoek en ontwikkeling en zal uiteindelijk resulteren in een beslissing om de bergingssite zonder toezicht te laten, of met andere woorden te banaliseren. *Iteratief*, omdat de verschillende etappes van elke veiligheidsevaluatie telkens opnieuw worden doorlopen tot de nauwkeurigheid van de resultaten met betrekking tot het veiligheidsniveau toereikend wordt geacht. Dit veiligheidsniveau vormt dan het voorwerp van een advies, dat niet alleen gebaseerd is op een vergelijking van de berekende radiologische impact met veiligheidsvereisten of -criteria zoals de dosisbeperking, maar vooral op een evaluatie van de betrouwbaarheid van de resultaten en van de optimaliseringsmarge die blijft bestaan. Dit advies wordt vervolgens onderworpen aan een onafhankelijk kritisch onderzoek, bijvoorbeeld door de autoriteiten die bevoegd zijn voor veiligheid, of door een geschikte commissie, dat resulteert in een beslissing om al of niet toestemming te geven tot de overgang naar de volgende fase van het programma.

Gedurende elk van de fases die leiden tot de realisatie van het bergingssysteem, steunt de veiligheidsevaluatie op drie types van elementen:

- de *veiligheidsstrategie*, die richting geeft aan de gehele benadering die wordt gevolgd om enerzijds een veilige bergingsoplossing te verwezenlijken en anderzijds aan te tonen dat deze oplossing veilig is;
- de *intrinsieke kenmerken van het bergingssysteem* die de veiligheid ervan bepalen, met andere woorden de eigenschappen van het bergingssysteem en hun verwachte bijdrage tot de veiligheidsfuncties, de kwaliteit van het bergingssysteem en de wijze van bouw, exploitatie, sluiting en controle van de bergingsinstallatie;
- de *elementen die een wetenschappelijk correcte en overtuigende evaluatie mogelijk maken van het veiligheidsniveau op lange termijn* dat de bergingsinstallatie biedt, met andere woorden de methodologie van de veiligheidsevaluaties, waarbij de nodige maatregelen inzake kwaliteitsborging en -beheer voorzien zijn.

De methodologie van de veiligheidsevaluaties berust op een benadering in scenario's. Zij gaat in twee grote stappen te werk: de scenario-ontwikkeling en de evaluatie van de scenario's.



Figuur 4.1 Het iteratieve proces van de langetermijn veiligheidsevaluaties dat kadert in de progressieve en flexibele realisatie van het bergingssysteem.

4.1.1 Scenario-ontwikkeling

Het ontwikkelen van de scenario's (zie sectie 4.2), dat bestaat in het uitdenken en beschrijven van de belangrijkste evolutietypes die het bergingssysteem zou kunnen ondergaan, gebeurt in twee stappen. De eerste stap bestaat erin de kenmerken van het bergingssysteem, de gebeurtenissen en de processen (*Features, Events and Processes* of *FEPS*) die de langetermijn evolutie van het bergingssysteem kunnen beïnvloeden, te identificeren en te

groeperen in scenario's, na eliminatie van de FEPS die niet relevant zijn voor de veiligheid. In een tweede stap beschrijft men de scenario's om vervolgens hun evaluatie mogelijk te maken.

De evolutiescenario's weerspiegelen verschillende mogelijke toekomsten van het bergingssysteem die relevant zijn voor de veiligheidsevaluaties, maar zijn geen voorspellingen. Ze zijn verdeeld in twee groepen.

- Het *normale-evolutiescenario*, of referentiescenario, houdt rekening met alle FEPS waarvan men zeker of bijna zeker is dat ze zich zullen voordoen, en beschrijft dus de waarschijnlijke opeenvolging van de gebeurtenissen die worden verwacht na de sluiting van de bergingsinstallatie, gebeurtenissen die onvermijdelijk gepaard zullen gaan met radiologische blootstellingen op zeer lange termijn.
- De *gewijzigde-evolutiescenario's* omvatten de eventuele verstorende gebeurtenissen of processen, die normaal weinig waarschijnlijk zijn, maar die het bergingssysteem niettemin sterk kunnen wijzigen als ze zich voordoen en dus radiologische blootstellingen met zich mee kunnen brengen.

4.1.2 Evaluatie van de scenario's

De evaluatie van de scenario's (zie sectie 4.3) gebeurt in vier stappen: de conceptuele modellering, de mathematische en numerieke modellering, de impactberekeningen, met inbegrip van de onzekerheids- en gevoeligheidsanalyses, en ten slotte de interpretatie van de resultaten en het vaststellen van het vertrouwen (fig. 4.1).

Elk van de verkregen scenario's wordt zo nauwkeurig mogelijk beschreven, uitgaande van vereenvoudigende maar aannemelijke hypothesen betreffende het gedrag en de werking van het bergingssysteem. Wegens de complexiteit van het bergingssysteem is het onmogelijk alle details ervan te simuleren. Deze *conceptuele modellering* kan zich beperken tot het beschrijven van de elementen en processen die een aanmerkelijke invloed kunnen hebben op de werking van het systeem, omdat het systeem robuust is (zie sectie 2.2.2). Hierdoor is deze modellering betrouwbaarder dan de modellering van een complexer systeem. De modellering van het normale-evolutiescenario veronderstelt dat elke barrière haar veiligheidsfunctie vervult. De modellering van de gewijzigde-evolutiescenario's veronderstelt dat één of meer barrières minder goed of volledig niet werken. De verschillende basiselementen van de conceptuele modellen zijn

- de *kenmerken* van het bergingssysteem (dat bestaat uit het afval, de verpakking en/of eventuele mantel van het afval, de andere kunstmatige barrières en de natuurlijke geologische barrière) en de omgeving van het bergingssysteem (de watervoerende lagen en de biosfeer);
- de *talrijke processen* (van fysische, chemische, biologische, radiologische en andere aard) die plaatsgrijpen in de verschillende componenten van het bergingssysteem, in de omgeving van het bergingssysteem en aan de verschillende grensvlakken: enerzijds de processen zoals diffusie en advectie, die bijdragen tot de migratie van de radionucliden naar en in de biosfeer; anderzijds de processen die de staat en de werking van de

componenten van het bergingssysteem beïnvloeden, zoals de corrosie die op termijn zal leiden tot de doorboring van de verpakkingen (en/of mantels), en de processen die zich zullen voordoen in de geosfeer en in de biosfeer en die zich zullen vertalen in een radiologische impact op de mens;

- de *externe gebeurtenissen* (glaciaties, aardbevingen enzovoort) die de kenmerken en de werking van het bergingssysteem en zijn omgeving kunnen wijzigen.

In elk conceptueel model wordt een bepaalde werking van het bergingssysteem ondersteld, die vervolgens vertaald wordt in één of meer *mathematische modellen*, teneinde simulaties te kunnen uitvoeren. Alle geïdentificeerde belangrijke processen worden beschreven aan de hand van wiskundige vergelijkingen, waarvan het meest gebruikte voorbeeld in de veiligheidsevaluaties de transportvergelijking is. De numerieke oplossingen van deze vergelijkingen worden dan in algoritmische vorm omgezet om rekencodes te vormen.

Voor elk van de geïdentificeerde scenario's worden dan simulaties uitgevoerd van het langetermijn gedrag van het bergingssysteem, die *impactberekeningen* worden genoemd. In de praktijk zijn de complexiteit van het bergingssysteem en van de processen waarop moet worden gelet, alsook de ruimte- en tijdschalen doorgaans van die aard dat het bijna onmogelijk is de werking van het bergingssysteem te simuleren met één enkele rekencode. Bijgevolg worden verschillende rekencodes na elkaar gebruikt, die elk het vrijkomen of de migratie van de radionucliden in een component of in een groep componenten van het systeem simuleren. De interpretatie van de resultaten van de impactberekeningen wordt evenwel aanzienlijk gecompliceerd door drie types van onzekerheden, die onvermijdelijk zijn, maar waarvan de invloed op de werking van het systeem moet kunnen worden geëvalueerd:

- de *onzekerheden in de beschrijving van de scenario's*, met andere woorden de onzekerheden betreffende de vraag of wel degelijk rekening is gehouden met alle relevante FEPS en scenario's. Deze onzekerheden kunnen sterk beperkt worden bij de evaluatie van het normale-evolutiescenario, dankzij de aanwezigheid van elementen van robuustheid in het bergingssysteem. Zij kunnen echter bijzonder groot blijven in het geval van de gewijzigde-evolutiescenario's.
- de *onzekerheden in de conceptuele en mathematische modellen*, die de onzekerheden over de processen, over de ruimtelijke definitie van de modellen, over de voorstelling van de natuurlijke omgeving en over de begin- en randvoorwaarden omvatten.
- de *onzekerheden in de waarden van de parameters* van de modellen, die te wijten zijn aan het gebrek aan kennis van de waarden van deze parameters, of aan het statistische karakter van de parameterwaarden, of aan de onzekerheden over de metingen.

De *onzekerheidsanalyses* en de *gevoeligheidsanalyses*, die een vast onderdeel uitmaken van de impactberekeningen, hebben tot doel de vraag te beantwoorden in hoeverre de verkregen resultaten gevoelig zijn voor de onzekerheden die niet konden worden weggenomen. De onzekerheidsanalyses hebben tot doel een bovenlimiet van de berekende impact vast te stellen door de onzekerheid over deze impact te evalueren. De gevoeligheidsanalyses daarentegen bepalen welke processen of componenten de veiligheid van het bergingssysteem het meest beïnvloeden en vormen aldus een belangrijk hulpmiddel bij het

identificeren van de onderzoeksprioriteiten en het definiëren van de componenten die moeten worden versterkt. De gevoeligheidsanalyses betreffende de onzekerheden in de beschrijving van de scenario's en in de conceptuele modellen gebruiken vaak een deterministische benadering, waarin de parameters vaste waarden hebben. De gevoeligheids- en onzekerheidsanalyses betreffende de onzekerheden in de parameterwaarden hanteren vaak een stochastische benadering, waarin de berekeningen worden herhaald door een steekproef te nemen uit de statistische verdelingen, die de onzekerheden over deze waarden weergeven.

Ten slotte berust de *interpretatie van de resultaten* van de veiligheidsevaluaties en het opbouwen van vertrouwen in deze resultaten niet alleen op de vergelijking van verschillende veiligheidsindicatoren met de geldende radiologische normen en referentiewaarden van het bergingssite en haar omgeving, maar ook op een reeks kwalitatieve argumenten, zoals de kwaliteit van de evaluatiemethodologie (scenario-ontwikkelingsmethode, redeneringswijzen, conceptuele modellen, rekencodes enzovoort) en de kwaliteit van alle informatie en basisgegevens betreffende het afval, de bergingssite en de kunstmatige barrières (zie sectie 4.3.1). Dit vertrouwen is een wezenlijk onderdeel van de veiligheidsevaluaties omdat precies dit vertrouwen telkens de overgang naar een volgende etappe van het progressieve realisatieproces van het bergingssysteem bepaalt. De belangrijkste elementen die kunnen bijdragen tot het verhogen van dit vertrouwen, zijn de volgende:

- *behandeling van de onzekerheden in de scenariobeschrijving*: het gebruik van internationaal opgestelde en geverifieerde FEPS-catalogi, een methodiek voor de ontwikkeling van gestructureerde, opspoorbare en door andere experts geverifieerde scenario's, een analyse van het bergingssysteem tijdens de verschillende beschouwde periodes en gebruik van verschillende berekeningstypes, redeneerwijzen en veiligheidsindicatoren voor elk van deze periodes.
- *behandeling van de onzekerheden in de conceptuele en mathematische modellen*:
 - het gebruik van meerdere conceptuele modellen in geval van onzekerheid over de juiste mechanismen die een rol spelen.
 - een verificatie van de gebruikte rekencodes (dit is verifiëren of ze enerzijds wel degelijk correcte mathematische vertalingen zijn van de conceptuele modellen en of ze anderzijds correct rekenen): vergelijking van de resultaten van elke code met die van een code die op volledig onafhankelijke wijze is uitgewerkt, totstandbrenging van een kwaliteitsborgingsprocedure, vergelijkingsoefeningen op internationale schaal en verificaties van de berekeningen door andere experts.
 - het evalueren van het vertrouwen in de modellen (met andere woorden aantonen dat de gebruikte modellen of codes de realiteit met de gewenste nauwkeurigheid weergeven, rekening houdend met het nagestreefde doel): validatie van de modellen die worden gebruikt voor de verschillende componenten van het bergingssysteem, met behulp van experimenten waarvan de resultaten kunnen worden vergeleken met die van de simulaties (een strikte validatie van de modellen is echter vaak onmogelijk, gezien de tijd- en ruimteschalen waarmee in de evaluaties rekening wordt gehouden), beroep doen op natuurlijke analogieën, gebruik van verschillende redeneringswijzen en aantonen dat de uitgevoerde berekeningen op een stevige wetenschappelijke basis steunen.

- *behandeling van de onzekerheden in de parameterwaarden:* uitvoering van de nodige aanvullende metingen en experimenten, bepaling van statistische waarschijnlijkheidsverdelingen voor de waarden van de parameters en uitvoering van stochastische en deterministische berekeningen voor de onzekerheids- en gevoeligheidsanalyses.

4.2 De ontwikkeling van de scenario's

Net zoals de methodologie voor de langetermijn veiligheidsevaluaties werd ook de methodologie voor de scenario-ontwikkeling gesystematiseerd gedurende de periode 1990–2000. Het doel hiervan was het beperken van de kans dat belangrijke gebeurtenissen of processen zouden worden vergeten in de veiligheidsevaluaties. De selectie van de FEPS en van de te analyseren scenario's en varianten gebeurt voortaan bovendien op transparante en opspoorbare wijze. Deze methodologie, waarover een internationale consensus bestaat, werkt in twee stappen: de identificatie van de scenario's en de beschrijving van de scenario's.

4.2.1 Identificatie van de scenario's

De identificatie van de representatieve scenario's van de verschillende mogelijke langetermijn evoluties van het bergingssysteem begint met het identificeren van de FEPS die het systeem a priori zouden kunnen beïnvloeden. De catalogus van de FEPS die een impact kunnen hebben op de langetermijn veiligheid van een bergingssysteem in klei, is opgesteld op basis van de generieke catalogus van het NEA, één van de internationaal uitgewerkte en geregeld herziene catalogi. De Belgische catalogus herleidt de oorspronkelijke 134 FEPS tot 60 FEPS door eliminatie van de FEPS die als niet relevant kunnen worden beschouwd, alsook van de FEPS die alleen betrekking hebben op de biosfeer, omdat deze zijn opgenomen in het biosfeermodel dat apart van deze scenario-ontwikkeling geconstrueerd werd. De catalogus geeft een definitie van elke FEP, bespreekt kort zijn relevantie of zijn mogelijke impact voor het beschouwde bergingssysteem en geeft de redenen waarom hij al dan niet in aanmerking is genomen. Hij is ingedeeld in drie grote categorieën, die zelf zijn onderverdeeld in subcategorieën (tabel 4.2).

De in aanmerking genomen FEPS worden dan systematisch gegroepeerd in scenario's die verschillende, voor de veiligheid relevante mogelijke toekomsten van het bergingssysteem weerspiegelen. Deze groepering gebeurt na het identificeren van de belangrijkste mogelijke toestanden van het systeem, die worden verkregen door te veronderstellen dat elk van de drie hoofdcomponenten ervan — kunstmatige barrières, geologische barrière en watervoerende lagen — ofwel in staat blijft zijn aanvankelijke functie te vervullen (intact blijft), ofwel verstoord wordt en zijn aanvankelijke functie niet meer kan vervullen ("kortgesloten" wordt). Deze benadering leidt tot 8 mogelijke hoofdtoestanden, waarvan er één beantwoordt aan het scenario van normale evolutie van het systeem (tabel 4.3). Het grondwater bekleedt er een centrale plaats in, vanwege zijn rol in de geleidelijke degradatie van de kunstmatige barrières en in de migratie van de radionucliden naar de biosfeer. Alle FEPS die niet zijn opgenomen in

het normale-evolutiescenario, kunnen dan worden verbonden met één of meer van de zeven andere toestanden van het systeem. De FEPS die kunnen leiden tot een zelfde toestand van het systeem, worden in de mate van het mogelijke bijeengebracht in hetzelfde gewijzigde-evolutiescenario, waarbij elk van de acht gewijzigde-evolutiescenario's meerdere varianten kan hebben. (Aangezien de waarschijnlijkheid van voorkomen van twee van deze FEPS — het optreden van een glaciatie en het transport door de gassen — sterk afhangt van hun ernst of omvang, worden ze in twee verschillende gewijzigde-evolutiescenario's behandeld.)

Tabel 4.2 Classificatie van de FEPS.

Categorieën en subcategorieën van FEPS, en voorbeelden

Natuurverschijnselen

- ☐ *van buitenaardse oorsprong*: inslag van meteorieten
- ☐ *van geologische aard*: diagenese, stijging of daling van het bodemniveau, aardbevingsfrequentie, tektoniek
- ☐ *van klimatische aard*: extreme neerslag, smelten van sneeuw en overstromingen, verandering van de zeespiegel
- ☐ *van geomorfologische aard*: erosie, verplaatsing van rivierbeddingen, transport en afzetting van zeesedimenten
- ☐ *van hydrologische aard*: grondwaterinfiltraties, wijzigingen van de kenmerken van de stromingen
- ☐ *van migratiegebonden en geochemische aard*: advectie en dispersie, vorming, oplossing en migratie van colloïden
- ☐ *effecten van de radionucliden op de ecologie*: opname door planten, pedogenese

Menselijke activiteiten

- ☐ *ontwerp en bouw*: materiaalfouten, chemische effecten, effecten van de uitgraving
- ☐ *exploitatie en sluiting*: slechte opvulling, heterogeniteit van het afval, slechte afdichting
- ☐ *intrusie*: exploratieboring, archeologisch onderzoek, oppompen van grondwater
- ☐ *activiteiten na de sluiting*: verlies van informatie over de bergingsinstallatie, irrigatie

Effecten die rechtstreeks te maken hebben met de aanwezigheid van het afval en van de bergingsinstallatie

- ☐ *thermische effecten*: hydrologische wijzigingen, fysico-chemische wijzigingen
 - ☐ *chemische en biologische effecten*: corrosie van de metalen, toevoer van complexerende stoffen
 - ☐ *mechanische effecten*: vervorming van de afvalcolli, wijzigingen van het geomechanisch spanningsveld in situ
 - ☐ *radiologische effecten*: radiolyse, wijzigingen van de eigenschappen van de materialen
-

Tabel 4.3 Classificatie van de FEPs volgens de toestand van het bergingssysteem en zijn omgeving
(1 = component intact; 0 = component "kortgesloten").

Nr. van de toestand van het systeem	Toestand van de barrière of de component			Voorbeelden van FEPs (Deze FEPs zijn de FEPs die hun naam geven aan de acht gewijzigde-evolutiescenario's.)
	Kunstmatige barrières	Geologische barrière	Watervoerende lagen	
1	1	1	1	normale toestand van het systeem
2	1	1	0	exploitatieboring, broeikaseffect
3	1	0	1	activering van een breuk, transport door de gassen, slechte afdichting
4	1	0	0	ernstige glaciatie
5	0	1	1	voortijdig defect van een kunstmatige barrière
6	0	1	0	(geen FEP)
7	0	0	1	activering van een breuk, transport door de gassen
8	0	0	0	ernstige glaciatie, exploratieboring

4.2.2 Beschrijving van de scenario's

Het beschrijven van de evolutiescenario's omvat twee onderdelen: enerzijds een beschrijving van de evolutie in de tijd van het bergingssysteem en zijn omgeving overeenkomstig het beschouwde scenario; anderzijds een beschrijving van de belangrijkste processen die betrokken zijn bij de migratie van de radionucliden naar de biosfeer. Deze beschrijving wordt eenvoudiger in het geval van een robuust bergingssysteem. Uiteraard vormt de evolutie van het bergingssysteem en van zijn omgeving in de tijd één van de belangrijkste bronnen van onzekerheden in de scenariobeschrijving, en dus ook in de conceptuele modellen en de waarden van de parameters. Het is bijgevolg onontbeerlijk verschillende perioden te onderscheiden in de veiligheidsevaluaties en daarnaast de robuustheid te schatten van de verschillende componenten van het bergingssysteem die een veiligheidsfunctie vervullen. De evaluatie van de robuustheid van de verschillende componenten van het bergingssysteem geeft aan in welke mate hun toekomstig gedrag op betrouwbare wijze kan worden geëvalueerd (fig. 4.2).

4.2.2.1 Normale-evolutiescenario

Het normale-evolutiescenario is dat van een geleidelijke en progressieve degradatie van het insluitingsvermogen van het bergingssysteem als gevolg van natuurlijke processen, waarbij de huidige omgeving van het bergingssysteem constant in de tijd wordt ondersteld. Deze onvermijdelijke degradatie maakt het vrijkomen van radionucliden in de biosfeer mogelijk en heeft dus op termijn de radiologische blootstelling van individuen van de referentiegroep tot gevolg.

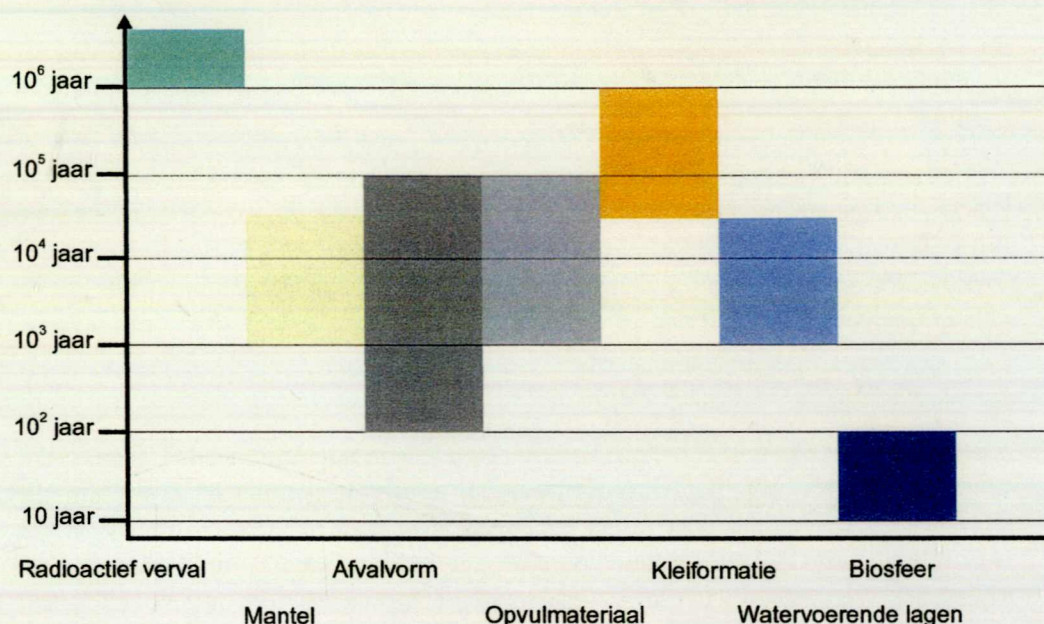
Met name de *afvalcolli* en de *opvulmaterialen* zullen mettertijd onvermijdelijk degraderen. De verwachte levensduur van de conditioneringsmatrices loopt uiteen van een honderdtal jaar (bitumenmatrix en cementmatrix) tot verschillende tien- of zelfs honderdduizenden jaar (respectievelijk glasmatrices en uraniumoxidematrices). De verwachte levensduur van de verpakkingen (en/of mantels) kan uiteenlopen van ongeveer 1000 jaar tot verschillende tienduizenden jaar in het geval van corrosievaste verpakkingen (en/of mantels). Een opvulmateriaal op basis van klei ten slotte kan zijn barrièrefunctie a priori gedurende meerdere duizenden jaar vervullen, voor zover het geen mineralogische of chemische transformaties ondergaat als gevolg van een te hoge temperatuur.

De huidige theorieën voor klimaatwijzigingen, die steunen op de orbitaal theorie van Milankovitsch, voorzien een matige ijstijd na ongeveer 24 000 jaar en een strengere ijstijd na ongeveer 56 000 jaar. Deze periodes zullen aanzienlijke wijzigingen in het bovenste deel van de geosfeer en bijgevolg wijzigingen in de *watervoerende lagen* tweebrengen, zodat de gedetailleerde hydrogeologische modellen die zijn ontwikkeld voor de huidige geografische omstandigheden en klimaat condities, waarschijnlijk niet meer representatief zullen zijn voor de omstandigheden die na 15 000 tot 20 000 jaar zullen heersen. De *geologische barrière* daarentegen zou betrekkelijk onveranderd moeten blijven gedurende ten minste 100 000 jaar. Over 100 000 tot één miljoen jaar zullen ingrijpende topografische veranderingen als gevolg van de afwisseling van ijstijden en interglaciale perioden en als gevolg van de aardkorstbewegingen kunnen leiden tot een wijziging van de diepte van de kleiformatie. Over meer dan één miljoen jaar zullen ook de eigenschappen van de kleilaag kunnen veranderen als gevolg van de bewegingen van de aardkorst en als gevolg van tektonische, metamorfe, diagenetische en geomorfologische processen, zodat het gedrag van de kleilaag zeer onzeker zal worden. Recente berekeningen, die rekening houden met de invloed van het broeikaseffect op het klimaat, wijzen er evenwel op dat de temperatuurdalingen die worden verwacht op basis van de theorie van Milankovitsch, sterk zullen worden beperkt door het broeikaseffect (zie secties 4.2.2.2 en 4.3.3).

Een hele tijd voor dat alles ten slotte, wellicht binnen enkele tientallen jaar, zullen de voortdurende wijzigingen in landbouwpraktijken en in voedingsgewoonten alsook andere toekomstige menselijke activiteiten, die onmogelijk te voorzien zijn, waarschijnlijk belangrijke veranderingen in de *biosfeer* met zich mee hebben gebracht.

Eén van de moeilijkste aspecten van de veiligheidsevaluaties van een bergingssysteem bestaat er dus in uit te maken hoe de berekeningen van de radiologische impact (kwantitatieve berekeningen, semi-kwantitatieve berekeningen of kwalitatieve redeneringen) dienen te worden aangepast aan de tijdschaal waarop ze betrekking hebben opdat ze een maximale significantie zouden hebben. Terwijl een kwantitatieve inschatting van de impact van een bergingssysteem mogelijk lijkt tot enkele duizenden jaar, wordt dit steeds moeilijker voor langere periodes. Het is echter belangrijk dat de veiligheidsevaluaties argumenten leveren zodat men kan aannemen dat de radiologische impact van het bergingssysteem op zeer lange termijn niet aanzienlijk zal stijgen, bijvoorbeeld omdat zijn radiologische inventaris voordien zal zijn uitgeput. De berekeningen worden soms voortgezet tot 100 miljoen jaar.

ROBUUSTHEID



Figuur 4.2 Waarschijnlijke externe gebeurtenissen die de evolutie in de tijd van het bergingssysteem en zijn omgeving kunnen beïnvloeden, robuustheid van de belangrijkste componenten van het systeem en zijn omgeving en evolutie van het type van berekeningen die in de veiligheidsevaluaties worden gemaakt.

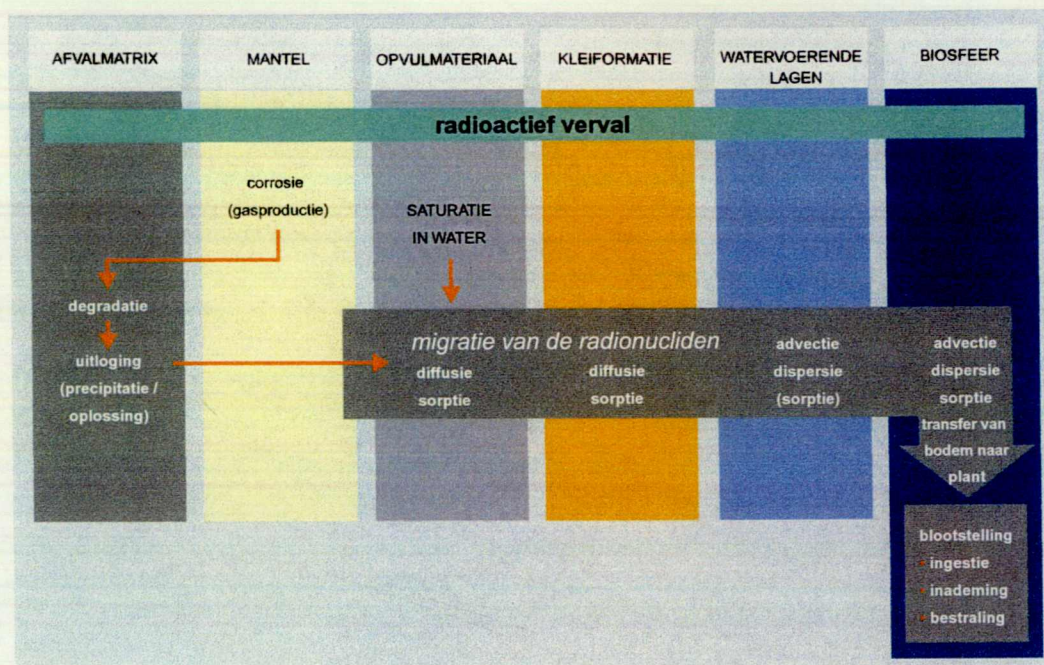
Om het probleem van de onvoorspelbaarheid van de meeste veranderingen in het bergingssysteem te omzeilen, en om de kwantitatieve hypothesen voor de radiologische langetermijn veiligheidsevaluaties te kunnen verantwoorden, moeten de veiligheidsevaluaties een beroep doen op bepaalde kunstgrepen. Meer bepaald maken zij gebruik van een *referentiehydrogeologie*, die overeenstemt met de huidige hydrogeologie en waarvan wordt verondersteld dat ze constant is in de tijd, alsook van één of meer *referentiebiosferen*, die elk worden gedefinieerd door een geheel van hypothesen die gebaseerd zijn op de huidige praktijken en gewoonten, en waarvan eveneens wordt verondersteld dat ze constant zijn in de tijd. De veiligheidsevaluaties gebruiken ook *alternatieve veiligheidsindicatoren*, die geen rekening houden met de minder robuuste componenten van het geheel, dit wil zeggen de omgeving van het bergingssysteem (zie sectie 4.3.1).

Het normale-evolutescenario beschrijft kwalitatief de verwachte werking van het bergingssysteem op basis van de componenten waarmee rekening wordt gehouden in de veiligheidsevaluaties (fig. 4.3).

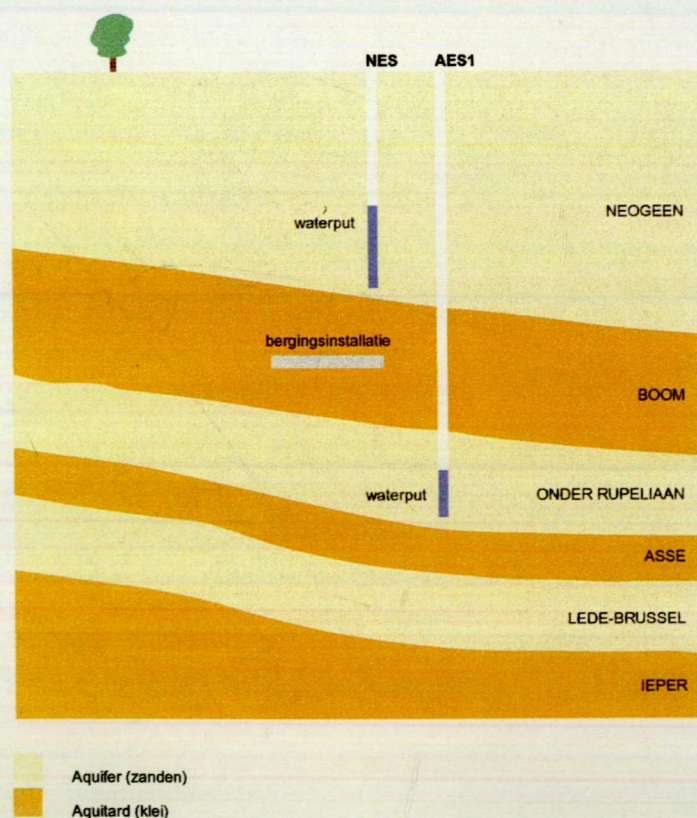
- De enige *afvalmatrices* die een voldoende weerstand tegen uitloging bieden om te worden opgenomen in de veiligheidsevaluaties, zijn de glas-, UO_2 - en $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ -matrices. De cementmatrices kunnen evenwel bepaalde radionucliden sorberen die niet worden gesorbeerd door de klei, en kunnen in bepaalde gevallen dus in aanmerking worden genomen. En ten slotte moet ook rekening worden gehouden met de potentieel

negatieve rol van de zwellen en van de degradatieproducten van de bitumenmatrices op de migratie-eigenschappen van de klei.

- De *waterdichte verpakkingen (en/of mantels)* waarborgen de fysische insluiting van het afval gedurende ten minste 300 jaar voor verglaasd afval en ten minste 2000 jaar voor bestraalde splijtstof.
- Hoewel de bijdrage van het *opvulmateriaal* tot het vertragen en spreiden van het vrijkomen in de meeste impactberekeningen verwaarloosbaar is in vergelijking met die van de Boomse Klei, kan die bijdrage belangrijk zijn in het geval van radionucliden die niet worden gesorbeerd door de klei maar wel door het opvulmateriaal.
- De *door de uitgraving verstoorde zone* wordt in aanmerking genomen in de raming van de werkelijke dikte van de kleibarière.
- De laag *niet-verstoorde klei* is de belangrijkste barrière voor de migratie van de radionucliden in oplossing in het poriënwater. Zij migreren hoofdzakelijk door moleculaire diffusie en slechts zeer beperkt door advectie. Zodoende worden heel wat van die radionucliden gesorbeerd door de kleimineralen of door de organische materialen die aanwezig zijn in de klei. De modellering wordt gecompliceerd, door enerzijds de mogelijke uitwisseling van radionucliden tussen mobiele en onbeweeglijke organische materialen, en anderzijds door de mogelijke complexering van sommige radionucliden op mobiele organische materialen, waardoor hun migratie versneld kan gebeuren. (De problematiek van het transport door de gassen, die vooral betrekking heeft op afval van categorie B, wordt behandeld in het gewijzigde-evolutiescenario omdat de transportmechanismen sterk verschillen van het diffusieproces.)
- Na hun migratie doorheen de Boomse Klei bereiken de radionucliden de *watervoerende lagen*. Deze vervullen geen enkele barrièrerol, maar verdunnen en verspreiden de radionucliden die niet werden tegengehouden door de geologische barrière. De belangrijkste migratiemechanismen zijn hier advectie onder invloed van de waterstromingen en hydrodynamische dispersie, omdat diffusie meestal verwaarloosbaar is. De radionucliden kunnen ook in de watervoerende lagen worden gesorbeerd door de daar aanwezige mineralen.
- Ten slotte kunnen bepaalde radionucliden die de watervoerende lagen hebben bereikt, uiteindelijk de *biosfeer* bereiken via drie mechanismen: drainage van het grondwater naar rivieren of plassen en vijvers, bodemverontreiniging door het grondwater en grondwaterwinning. Dit laatste geval is het enige waarin de radionucliden de biosfeer bereiken als gevolg van het optreden van de mens. Hierbij houdt het normale-evolutiescenario enkel rekening met waterwinning in de watervoerende laag van het Neogeen, omdat waterwinning in de onderliggende watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan in het gewijzigde-scenario van een exploitatieboring opgenomen wordt (zie sectie 4.2.2.2). Het normale-evolutiescenario veronderstelt dat deze waterwinning bijzonder ongunstig gelokaliseerd is, met name diep in de watervoerende laag, aan de rand van de bergingsinstallatie en stroomafwaarts ten opzichte van de natuurlijke stroomrichting (fig. 4.4). Het veronderstelt ook dat het pompdebiet betrekkelijk gering is (5 000 m³ per jaar), zodanig dat het opgepompte water niet wordt verdund door minder verontreinigd water dat gedraineerd is uit de minder diepe lagen.



Figuur 4.3 Belangrijkste componenten van het bergingssysteem en zijn omgeving en belangrijkste processen waarmee rekening wordt gehouden in de beschrijving van het normale-evolutescenario.



Figuur 4.4 Schematische voorstelling van het normale-evolutescenario (water-winning) en het exploitatieboringsscenario.

4.2.2.2 Gewijzigde-evolutiescenario's

De acht gewijzigde-evolutiescenario's waarmee rekening wordt gehouden in de evaluaties van de langetermijn veiligheid, worden beschreven als volgt.

- *Het exploitatieboringsscenario* (toestand 2, tabel 4.3; fig. 4.4) bekijkt de boring van een waterwinningsput in de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan, onder de Boomse Klei, in de onmiddellijke buurt van de bergingsinstallatie, en het gebruik van het opgepompte water voor irrigatie en voor drinkwatertoevoer. Dit scenario wordt niet opgenomen in het normale-evolutiescenario, omdat dit water wegens zijn kwaliteit ongeschikt is voor rechtstreekse consumptie door de mens, en omdat de hydraulische geleidbaarheid van deze watervoerende laag zo gering is dat er onmogelijk grote hoeveelheden water kunnen worden opgepompt. (Het boren van een put in de bovenliggende watervoerende laag van het Neogeen wordt evenwel behandeld in het normale-evolutiescenario.)
- *Het broeikaseffectscenario* (toestand 2, tabel 4.3) beschouwt de veranderingen in de watervoerende laag van het Neogeen als gevolg van de algemene klimaatopwarming die in de komende eeuwen zou kunnen worden teweeggebracht door het broeikaseffect.
- *Het scenario van activering van een breuk* (toestanden 3 en 7, tabel 4.3) beschouwt het verschijnen van een tektonische breuk door de Boomse Klei en de bergingsinstallatie, door de heractivering van een oude breuk als gevolg van een verhoging van de tektonische activiteit. Een dergelijke breuk zou a priori het insluitingsvermogen van de geologische barrière aantasten, want hoewel die laatste dankzij haar hoge plasticiteit niet echt zou breken, zouden de hydraulische eigenschappen in het vlak van de breuk zich kunnen wijzigen ten opzichte van die van de intacte klei.
- *Het scenario van ernstige glaciatie* (toestanden 4 en 8, tabel 4.3) houdt er rekening mee dat, tijdens een toekomstige strengere ijstijd dan de laatste drie ijstijden van het Quartair, de ijskap die zich in Scandinavië zal vormen, zich zal uitstrekken tot de streek van Mol-Dessel, en erosieverschijnselen met zich mee zal brengen die de Boomse Klei en zelfs de kunstmatige barrières kunnen aantasten. (Het optreden van een ijstijd die vergelijkbaar is met de laatste drie ijstijden van het Quartair, behoort tot het normale-evolutiescenario.) In het geval van een bergingsinstallatie op ongeveer 200 meter diepte zouden deze verschijnselen de geologische formatie dermate kunnen aantasten dat geborgen afvalfragmenten aan de oppervlakte zouden kunnen komen, waar zij een directe radiologische impact zouden kunnen hebben op de mens indien die na verloop van tijd weer in de buurt van het bergingssysteem zou gaan wonen.
- *Het scenario van een slechte afdichting* (toestand 3, tabel 4.3) veronderstelt dat de hoofdgalerijen en een toegangsschacht slecht zijn afgedicht en bijgevolg een preferentiële migratieweg kunnen vormen voor de radionucliden. Dit scenario veronderstelt bovendien dat de hydraulische geleidbaarheid in de hoofdgalerijen en de toegangsschacht meerdere grootteorden hoger zou zijn dan die van de Boomse Klei, zodat deze galerijen zich zouden gedragen als enorme filters die het water van de kleiformatie draineren, wat een advectiestroming doorheen de galerijen en de schacht tot gevolg zou kunnen hebben. Om het mogelijke effect van de filtratie nog te versterken, veronderstelt dit scenario ten slotte

een omkering van de hydraulische gradiënt over de Boomse Klei die dan stijgend zou worden.

- *Het scenario van een voortijdig defect van een kunstmatige barrière* (toestand 5, tabel 4.3) heeft meerdere varianten, waarvan de gevolgen sterk beperkt zullen zijn voor zover de kleilaag in grote mate intact blijft. De twee meest ernstige varianten zijn ten eerste een voortijdig defect van de waterdichte verpakkingen (en/of mantels) waardoor de vrijgekomen radionucliden in contact zouden kunnen komen met het grondwater op een ogenblik dat er nog hoge thermische gradiënten zijn in het nabije veld, en ten tweede een snelle degradatie van de conditioneringsmatrix van het verglaasde afval en van de conditioneringsmatrix van de bestraalde splijtstof.
- *Het scenario van transport door de gassen* (toestanden 3 en 7, tabel 4.3) houdt er rekening mee dat zich in bepaalde bergingsgalerijen veel meer gas vormt dan er door diffusie kan afgevoerd worden. Hierdoor zal een gasfaze gevormd worden die mogelijks verontreinigd water uit het nabije veld perst indien de gasdruk stijgt. De gasdruk in het nabije veld zal verder blijven stijgen en aanleiding geven tot het ontstaan van een preferentiële migratieweg in de kleiformatie, waarlangs het gas kan ontsnappen en dus in druk zal zakken. Vervolgens zal de gasdruk opnieuw stijgen, tot er een nieuwe gasontsnapping komt, enzovoort. Dit gas zou gedeeltelijk kunnen bestaan uit radioactieve moleculen en zou het transport van de radionucliden in oplossing door de kleibarrière heen kunnen versnellen. (De effecten van een matige gasproductie worden beschouwd in het normale-evolutiescenario.)
- *Het scenario van een exploratieboring* (toestand 8, tabel 4.3) veronderstelt dat een verkenningsboring op de bergingsite dwars door de bergingsinstallatie gaat. Van dit scenario bestaan er twee hoofdvarianten. De eerste is een geval van drastische indringing en veronderstelt dat boorkernen worden genomen die fragmenten radioactief afval bevatten, en dat die in een bovengronds laboratorium worden onderzocht door personen die niet vermoeden dat de monsters radioactief zijn. De tweede variant veronderstelt dat de dwars door de bergingsinstallatie uitgevoerde boring niet wordt opgevuld en dus zal vollopen met grondwater, dat in contact zal komen met het radioactieve afval en zal leiden tot de uitloging van de radionucliden, die de watervoerende laag zullen kunnen besmetten.

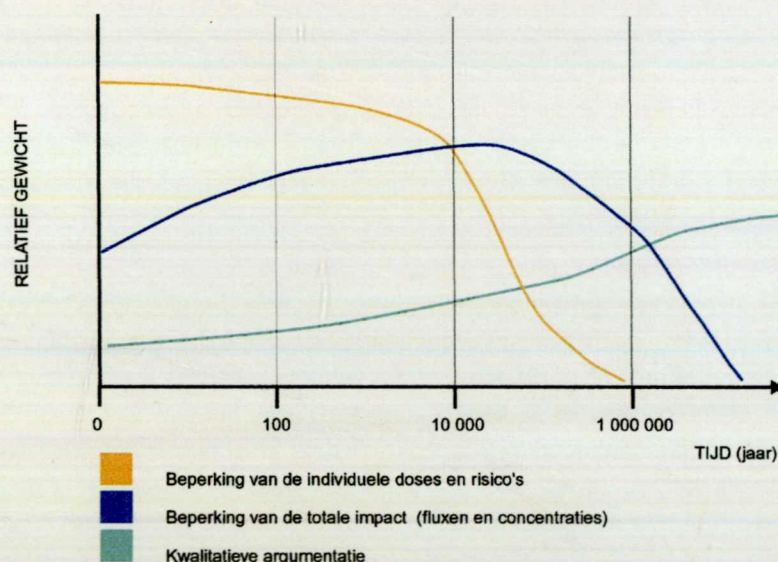
4.3 De evaluatie van de scenario's

De veiligheidsevaluaties waarover wordt gerapporteerd in het SAFIR 2-rapport, zijn erg verfijnd in vergelijking met die waarover het SAFIR-rapport verslag uitbracht. De simulaties die sinds 1997 zijn uitgevoerd, hebben immers de vruchten geplukt van een zeer duidelijke evolutie van de modellen en de rekencodes. Bovendien steunt de interpretatie van de resultaten voortaan op veiligheidsindicatoren die de klassieke indicatoren aanvullen. Terwijl in het SAFIR-rapport hoofdzakelijk sterk vereenvoudigde evaluaties gemaakt werden, die ééndimensionale benaderingen hanteerden, wordt het nu dankzij een tweedimensionaal migratiemodel en nieuwe commerciële rekencodes mogelijk veel beter rekening te houden met de belangrijkste processen die een rol spelen bij de migratie van de radionucliden in de Boomse Klei, in het

bijzonder de oplosbaarheid van de radionucliden. (Er zijn ook driedimensionale simulaties mogelijk geworden, maar die zijn niet nodig.) Uiteraard steunen de berekeningen op een vereenvoudigde beschrijving van het bergingssysteem en zijn werking. Deze vereenvoudiging wordt vergemakkelijkt door het feit dat het bergingssysteem robuust is (zie sectie 2.2.2).

4.3.1 Kwantitatieve en kwalitatieve argumenten

De langetermijn veiligheidsevaluaties van een bergingssysteem moeten niet alleen met kwantitatieve indicatoren, maar ook met kwalitatieve argumenten worden geïnterpreteerd. De interpretatie van de resultaten berust dus zowel op de vergelijking van de waarden van twee groepen indicatoren met de toepasselijke normen of drempelwaarden als op de evaluatie van de kwaliteit van de redenering. De verschillende indicatoren en redeneringswijzen hebben een relatief gewicht ten opzichte van elkaar in functie van de evolutie van het bergingssysteem (fig. 4.5).



Figuur 4.5 Relatief gewicht van de twee groepen veiligheidsindicatoren en van de kwalitatieve argumenten.

4.3.1.1 Klassieke veiligheidsindicatoren

Er zijn drie klassieke veiligheidsindicatoren: de individuele effectieve dosis, het individuele radiologische risico en de collectieve effectieve dosis. Enkel de eerste twee indicatoren echter geven een werkelijke indicatie van de veiligheid op lange termijn van een bergingssysteem. Zij moeten lager zijn dan de geldende dosis- en risicobeperkingen, die rekening houden met het feit dat de individuen van de referentiegroep blootgesteld kunnen worden aan meerdere bronnen of handelingen, en mogen dus slechts een fractie vertegenwoordigen van de individuele dosis- en risicolimieten (zie ook sectie 2.1). De veiligheidsevaluaties in het SAFIR 2-rapport gebruiken de aanbevelingen van de ICRP terzake.

- Voor het normale-evolutiescenario wordt de *individuele effectieve dosis* (in mSv per jaar) voor een lid van de referentiegroep als indicator gebruikt. Deze dosis is het gevolg van het geleidelijk vrijkomen van de radionucliden, en moet lager zijn dan de dosisbeperking, die door de ICRP in het geval van berging van radioactief afval vastgelegd werd op 0.3 mSv per jaar. (De meeste landen leggen voor de individuele effectieve dosis een waarde op tussen 0.1 en 0.3 mSv per jaar.)
- De evaluatie van potentiële blootstellingen gebeurt aan de hand van twee indicatoren, met name de individuele effectieve dosis en de kans op blootstelling aan een gegeven dosis. Samen vormen deze twee indicatoren het *individuele berekende radiologische risico* R_i . Voor gewijzigde-evolutiescenario's wordt dit in plaats van de individuele effectieve dosis gebruikt omdat de mogelijkheid niet kan worden uitgesloten dat deze scenario's ondanks hun geringe waarschijnlijkheid toch aanleiding geven tot een blootstelling die hoger zou zijn dan de dosisbeperking. Het veiligheidsniveau van een bergingssysteem moet bijgevolg dusdanig zijn dat het individueel radiologisch risico tengevolge van dergelijke potentiële blootstellingen, lager is dan de risicobeperking. Het individuele radiologische risico wordt als volgt gedefinieerd:

R_i = waarschijnlijkheid van blootstelling aan een gegeven dosis × waarschijnlijkheid van overlijden als gevolg van deze blootstelling

= waarschijnlijkheid van blootstelling × individuele effectieve dosis × risicofactor

Voor doses lager dan 100 mSv is de ICRP van oordeel dat de waarschijnlijkheid van overlijden evenredig is met de dosis, waarbij de evenredigheidsfactor of risicofactor die zij gebruikt voor de hele bevolking, $5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ bedraagt, en die voor de subgroep van de werknemers $4 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$. Als men eveneens rekening houdt met niet-dodelijke kankers, bedraagt de risicofactor $7 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$.

- De *collectieve effectieve dosis* is een indicator van de totale radiologische impact van een bepaalde handeling op de hele blootgestelde bevolking, vermits er rekening gehouden wordt met zowel het totale aantal blootgestelde personen als met hun gemiddelde opgelopen dosis. Omdat het steeds moeilijker wordt het totale aantal blootgestelde personen te schatten stijgen de onzekerheden voor collectieve doses nog meer in functie van de tijd dan deze voor de individuele doses. Hierdoor heeft de collectieve dosis als veiligheidsindicator weinig nut. Dit wordt overigens bevestigd door de laatste aanbevelingen van de ICRP (ICRP 81). Het gebruik van de collectieve dosis moet worden beperkt tot enkele honderden tot enkele duizenden jaar na de sluiting van de bergingsinstallatie en moet bovendien geïnterpreteerd worden als een relatieve waarde en niet als een absolute indicator van de totale radiologische impact. Het gebruik ervan bij het optimaliseren van de radiologische bescherming, hoofdzakelijk tijdens de exploitatiefase, dient niettemin overwogen te worden.

4.3.1.2 Alternatieve veiligheids- en performantie-indicatoren

Hoewel de klassieke veiligheidsindicatoren "dosis" en "risico" de belangrijkste indicatoren zijn van de radiologische impact van gecontroleerde handelingen op een individu van de referentiegroep, moeten deze aangevuld worden met alternatieve indicatoren om de veiligheid

van een bergingssysteem te evalueren. Er valt immers geen stralingsbeschermingscontrole te verwachten op het ogenblik van de verwachte maximale radiologische impact van het bergingssysteem; anderzijds stijgt de onzekerheid over de geraamde radiologische impact naarmate de impact verondersteld wordt zich later in de tijd voor te doen, met andere woorden, paradoxaal genoeg, naarmate het bergingssysteem doeltreffender is. Deze onzekerheid vloeit hoofdzakelijk voort uit de onbekende factoren betreffende de evolutie van de omgeving van het bergingssysteem, die relatief gezien minder robuust is dan het bergingssysteem zelf omdat ze gevoelig is aan veranderingen die door de mens veroorzaakt worden en aan klimaatwijzigingen die in het bijzonder de hydrogeologie veranderen. Vermits de omgeving bijgevolg geen rechtstreekse bijdrage tot de belangrijkste veiligheidsfuncties levert, moeten de klassieke veiligheidsindicatoren zoveel mogelijk aangevuld worden met complementaire indicatoren van de radiologische impact, waarbij deze complementaire indicatoren bij voorkeur minder gevoelig zijn voor de mettertijd toenemende onzekerheden. Dat is bijvoorbeeld het geval voor veiligheidsindicatoren die betrekking hebben op veiligheidsfuncties die vervuld worden door de barrières van het bergingssysteem (zie sectie 2.2.1).

De belangrijkste veiligheidsindicatoren voor de veiligheidsfuncties hebben betrekking op de functie van vertraging en gespreid vrijkomen. Dit zijn bijvoorbeeld de *dichtheid van de radionuclidenflux* (in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ per jaar) of de *totale radionuclidenflux* (in Bq per jaar) *tussen het bergingssysteem en de omgeving ervan*, en de *daaruit resulterende radionuclidenconcentraties* (in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) *in de watervoerende lagen en in verschillende delen van de biosfeer*. Aangezien ze samenhangen met een veiligheidsfunctie die wordt verzekerd door robuuste barrières, evalueren deze indicatoren de robuustheid van het bergingssysteem. Vervolgens kunnen de numerieke waarden van de indicatoren vergeleken worden met de hoeveelheden radionucliden die van nature aanwezig zijn in de geosfeer, waarbij in het bijzonder kan gerefereerd worden naar de concentraties aan radionucliden die van nature aanwezig zijn in het poriënwater. Twee andere grootheden kunnen eveneens aanwijzingen geven voor de performanties van het bergingssysteem. Het gaat enerzijds om de *insluitingsfactor*, dit is de verhouding tussen de totale geborgen activiteit en de gecumuleerde door het bergingssysteem vrijgezette activiteit, en anderzijds om de *totale inventaris* geborgen uranium, die vergeleken kan worden met de alfa-activiteit die van nature aanwezig is in de buurt van de bergingsinstallatie.

4.3.1.3 Kwalitatieve argumenten

De kwalitatieve argumenten die worden gebruikt om de resultaten van de veiligheidsevaluaties te interpreteren en om het vertrouwen vast te stellen, slaan op de wijze waarop deze evaluaties zijn uitgevoerd (zie ook sectie 4.1.2). Zij hebben meer bepaald betrekking op de kwaliteit van de redeneringen, die logisch en transparant moeten zijn en ter evaluatie moeten zijn voorgelegd aan externe experts, alsook op de kwaliteit van de modellen, die overeen moeten stemmen met de beschikbare wetenschappelijke kennis, en op de kwaliteit van de rekencodes en gebruikte waarden voor de parameters. De kwalitatieve benadering heeft dus tot doel antwoord te geven op een reeks vragen van het type "Werd er

rekening gehouden met alle relevante processen?”, “Werden het bergingssysteem en de werking ervan correct vereenvoudigd?”, of “Zijn de hypothesen voldoende voorzichtig?”.

4.3.2 Evaluatie van het normale-evolutiescenario

De veiligheidsevaluaties van het normale-evolutiescenario leiden enerzijds tot de berekening van de dosis voor een individu van de referentiegroep en anderzijds tot de berekening van alternatieve veiligheids- en performantie-indicatoren, die in feite tussenresultaten zijn van de dosisberekening. Deze evaluaties zijn vooral gebaseerd op deterministische, zogenaemde *best estimate* berekeningen, wat betekent dat ze gebruikmaken van de best mogelijke ramingen van de waarden van de parameters. Ze worden soms aangevuld met stochastische berekeningen, die rekening houden met de onzekerheden in de waarden van de parameters en waarvan de resultaten worden gebruikt om onzekerheids- en gevoeligheidsanalyses te maken.

4.3.2.1 Dosisberekeningen

De doses worden berekend in drie stappen.

- De simulaties van de radionuclidenmigratie in het nabije veld en in de Boomse Klei leiden tot de activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen het nabije veld en de watervoerende laag van het Neogeen. Deze berekeningen zijn gebaseerd op een verschillend brontermmodel voor elk van de drie beschouwde afvalklassen, namelijk verglaasd afval, bestraalde splijtstof en hulzen en eindstukken.
- De simulaties van de radionuclidenmigratie in de watervoerende laag van het Neogeen leiden tot de radionuclidenconcentraties in het water dat wordt gewonnen in een put net boven de bergingsinstallatie, en tot de activiteitsfluxen naar de waterlopen. Deze berekeningen zijn identiek voor de drie beschouwde afvalklassen.
- De berekening van de transfers van de radionucliden in de biosfeer en van de blootstellingen leidt tot de eigenlijke doses.

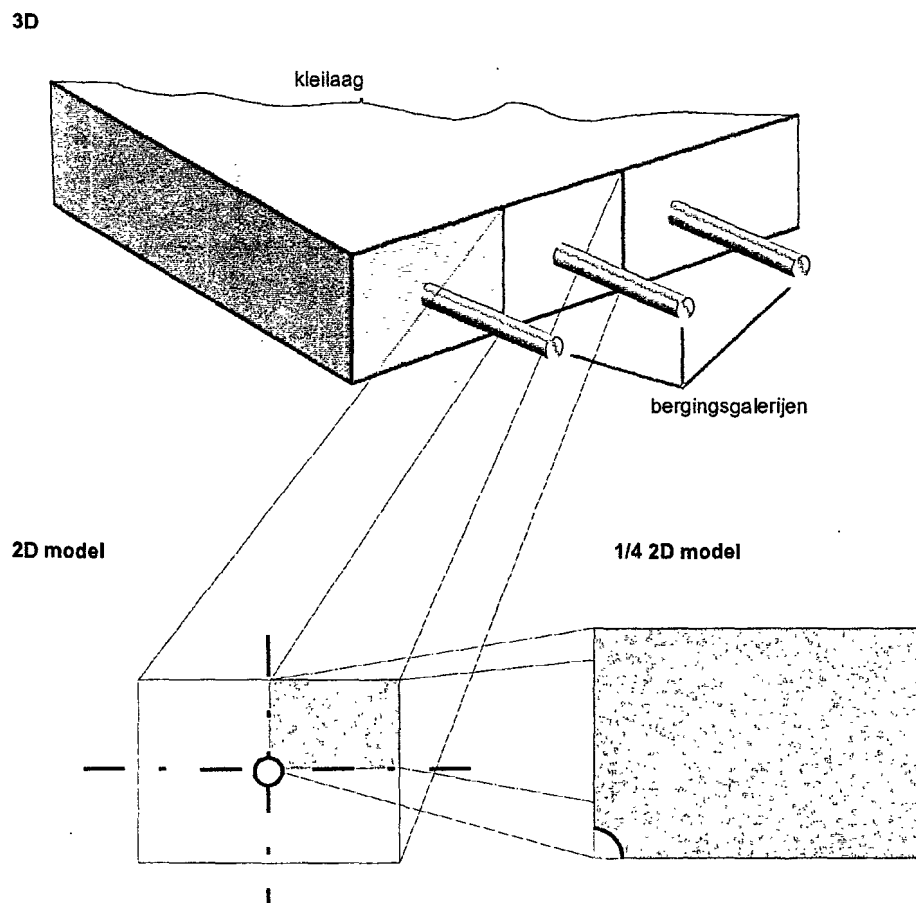
Activiteitsflux in het bergingssysteem en doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen

De basisgegevens en de vereenvoudigende hypothesen die worden gebruikt om de migratie van de radionucliden in het bergingssysteem te berekenen, hebben betrekking op de architectuur van het bergingssysteem, de kenmerken van het nabije veld en van de gastformatie, de belangrijkste migratieprocessen en de waarden van de parameters die deze processen beheersen, de tijdsevolutie van het bergingssysteem en uiteraard de kwantitatieve en kwalitatieve inventaris van het te bergen afval.

De bergingsarchitectuur waarmee rekening wordt gehouden in de veiligheidsevaluaties die

betrekking hebben op verglaasd afval en bestraalde splijtstof, is nagenoeg identiek aan de referentiearchitectuur (zie sectie 3.3.1). Voor de hulzen en eindstukken, die niet expliciet in aanmerking worden genomen in deze referentiearchitectuur, hanteren de veiligheidsevaluaties de hypothese dat ze worden geborgen in één enkele galerij. De totale oppervlakte van de bergingsarchitectuur die in de veiligheidsevaluaties beschouwd werd, bedraagt 0.224 km^2 of 1.17 km^2 , naargelang de optie opwerking wordt behouden of verlaten.

Voor de modellering worden de bergingsgalerijen gelijkgesteld met oneindig lange cilinders omdat ze zeer lang zijn in vergelijking met de dikte van de kleilaag. Dit maakt het mogelijk de berekeningen van de migratie in het nabije veld en in de klei in twee dimensies uit te voeren, in een vlak dat loodrecht staat op dat van de galerijen. Het te modelleren gebied rond elke galerij kan bovendien worden beperkt wegens het bestaan van twee en meestal drie symmetrievlakken (fig. 4.6): ten eerste, het horizontale vlak dat door de as van de galerij gaat omdat de migratie door advectie verwaarloosd kan worden ten opzichte van migratie door diffusie wegens de geringe hydraulische geleidbaarheid van de klei en de beperkte hydraulische gradiënt over de dikte van de kleilaag, ten tweede het verticale vlak dat langs deze as gaat, en ten slotte het verticale vlak dat zich op gelijke afstand van twee identieke bergingsgalerijen bevindt (behalve voor hulzen en eindstukken).



Figuur 4.6 Configuratie en vereenvoudigingen waarmee rekening wordt gehouden voor de migratieberekeningen in het nabije veld en in de kleilaag.

In het robuuste bergingssysteem gebruikt het model voor het simuleren van de migratie van de radionucliden in het nabije veld en in de Boomse Klei de diffusievergelijking, waarbij de migratie door advectie en door hydrodynamische dispersie verwaarloosd wordt. Er wordt bovendien ondersteld dat de Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel over haar volledige dikte (90 meter) homogeen is, waardoor de belangrijkste parameters die een rol spelen in de migratieberekeningen, namelijk de voor diffusie toegankelijke porositeit η , de diffusiecoëfficiënt D_p en de retardatiefactoren R , constant kunnen worden gehouden. De kleidikte die daadwerkelijk kan bijdragen tot het vertragen en spreiden van het vrijkomen van de radionucliden, bedraagt in een eerste benadering 40 meter. Dit is de kleidikte boven of onder de bergingsinstallatie, verminderd met de dikte van de eventueel door de uitgraving verstoorde zone en met een dikte die in aanmerking neemt dat het mediaanvlak van de bergingsinstallatie mogelijkerwijze niet perfect samenvalt met dat van de kleilaag. Men onderstelt dat de materialen voor afdichting van de galerijen en schachten dezelfde migratie-eigenschappen hebben als de Boomse Klei (zie sectie 4.3.3 voor het scenario van een slechte afdichting). Aangezien de migratie van de radionucliden in het nabije veld bepaald wordt door hun oplosbaarheidslimieten en door de traagheid waarmee ze worden getransporteerd in de Boomse Klei, wordt dit meestal samen met de migratie in de klei gemodelleerd.

Hoewel de onzekerheden sterk stijgen op zeer lange termijn, veronderstellen de veiligheidsevaluaties waarvan het SAFIR 2-rapport verslag uitbrengt, dat de geologische barrière ongewijzigd blijft gedurende 100 miljoen jaar, waardoor met de migratieberekeningen kan worden voortgegaan tot de fluxen van de verschillende radionucliden doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen hun maximum hebben bereikt, dat correspondeert met de dosispijken en met het maximale risico. Deze waarden geven uiteraard slechts een aanwijzing voor de grootteorde van de te verwachten fluxen en moeten worden aangevuld met andere veiligheidsindicatoren en andere argumenten.

Ten slotte moeten de migratieberekeningen steunen op precieze gegevens en hypothesen betreffende de betrokken brontermen. Voor elk van de drie beschouwde afvalklassen houden zij rekening met de veronderstelde levensduur van de waterdichte verpakkingen (en/of mantels), de corrosiesnelheid en de levensduur van de afvalmatrices, de oplosbaarheidsgrens van de radionucliden, de migratie-eigenschappen van het opvulmateriaal en natuurlijk de meest ongunstige kwantitatieve inventaris (tabel 4.4). Voor verglaasd afval en voor hulzen en eindstukken is de ongunstigste inventaris die welke beantwoordt aan de voortzetting van de optie opwerking, dit is respectievelijk 3920 en 6410 afvalcontainers. Voor bestraalde splijtstof is dit de inventaris die beantwoordt aan het verlaten van de optie opwerking, of 4 160 tU en ongeveer 70 tHMox. Deze in 1997 opgestelde inventaris die wordt gebruikt voor de veiligheidsevaluaties, is nagenoeg identiek aan de recentste inventaris, die dateert van 1999 (tabel 3.2; tabel 3.3 voor de radiologische inventarissen). Voor de berekeningen van de activiteitsfluxen doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag worden de inventarissen door twee gedeeld, vanwege het bestaan van het horizontale symmetrievlak te wijten aan de diffusie-gedomineerde migratie.

Tabel 4.4 Belangrijkste kenmerken van de brontermen die worden gebruikt in de berekeningen van de migratie in het nabije veld en de Boomse Klei.

	Verglaasd afval	Bestraalde splijtstof	Hulzen en eindstukken
Inventaris	3920 containers, d.i. 420 containers + 3500 indien verdere opwerking	4160 tU en ongeveer 70 tHMMOX, dit is de inventaris bij stopzetting van de opwerking	6410 containers, dit is 820 containers + 5590 indien verdere opwerking
Waterdichte verpakking (en/of mantel): levensduur	300 jaar	2000 jaar	(geen mantel)
Bronterm: modellen	constante oplossingsnelheid van de matrix tijdens haar beschouwde levensduur: referentie = 72000 jaar variant 1 = 20000 jaar (benedenlimiet) variant 2 = 10^8 jaar (bovenlimiet) variant 3 = ogenblikkelijke oplossing van de matrix zodra zij in contact komt met het water	1. onmiddellijke oplossing van een deel van de radionucliden gevolgd door oplossing met constante snelheid van de matrix, gedurende één miljoen jaar, en van de hulzen en eindstukken, gedurende 1000 jaar 2. alfa-auto-oxidatiemodel: zoals 1, maar oplossing van de matrix beïnvloed door oxidatie, als gevolg van de alfa-radiolyse van het uraniumoxide wanneer dit in contact met het water wordt geplaatst in een reducerende omgeving	onmiddellijke oplossing van de radionucliden, die alleen wordt beperkt door hun oplosbaarheid (geen conditioneringsmatrix)
Opvulmateriaal	mengsel van 60 % FoCa-klei, 35 % zand en 5 % grafiet: mogelijke bijdrage tot de insluiting wordt ruimschoots verwaarloosd door op arbitraire, maar conservatieve manier te onderstellen: $D_{p\text{ opvulling}} = 5 \text{ à } 10 \times D_{p\text{ klei}}$, $\eta_{\text{opvulling}} = \eta_{\text{klei}}$, en, voor alle radionucliden, $R_{\text{opvulling}} = R_{\text{klei}}$.		beton: mogelijke bijdrage tot de insluiting verwaarloosd door op zeer conservatieve basis aan te nemen: $D_{p\text{ opvulling}} = 10 \times D_{p\text{ klei}}$, en, voor alle radionucliden, $R = 1$.

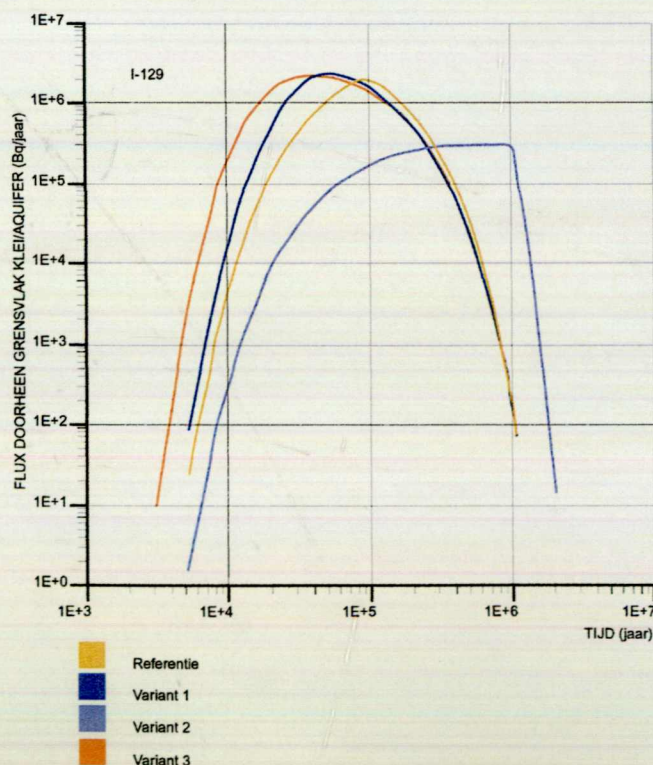
Om geen gedetailleerde migratieberekeningen te hoeven uitvoeren voor alle radionucliden die opgenomen zijn in de radiologische inventarissen, worden alleen de radionucliden beschouwd die een voldoende lange halveringstijd hebben of voldoende snel migreren doorheen de klei zodat zij de watervoerende laag van het Neogeen kunnen bereiken. Voor de simulaties van de migratie van de activerings- en fissieproducten is de lijst van de in aanmerking te nemen radionucliden de volgende: ^{14}C , ^{36}Cl , ^{59}Ni , ^{79}Se , ^{93}Zr , ^{94}Nb , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{129}I , ^{135}Cs en ^{147}Sm . Verder moeten de zwaarste actiniden (Cm, Am en Pu), aangezien zij sterk door de klei vertraagd worden en de meeste van hun isotopen een relatief korte halveringstijd hebben,

meestal niet in aanmerking worden genomen voor de simulaties. De vervalketens waarmee rekening wordt gehouden in de berekeningen, zijn terug te brengen tot de volgende ketens:

- $^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow ^{232}\text{Th}$
- $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$
- $^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra}$
- $^{235}\text{U} \rightarrow ^{231}\text{Pa}$

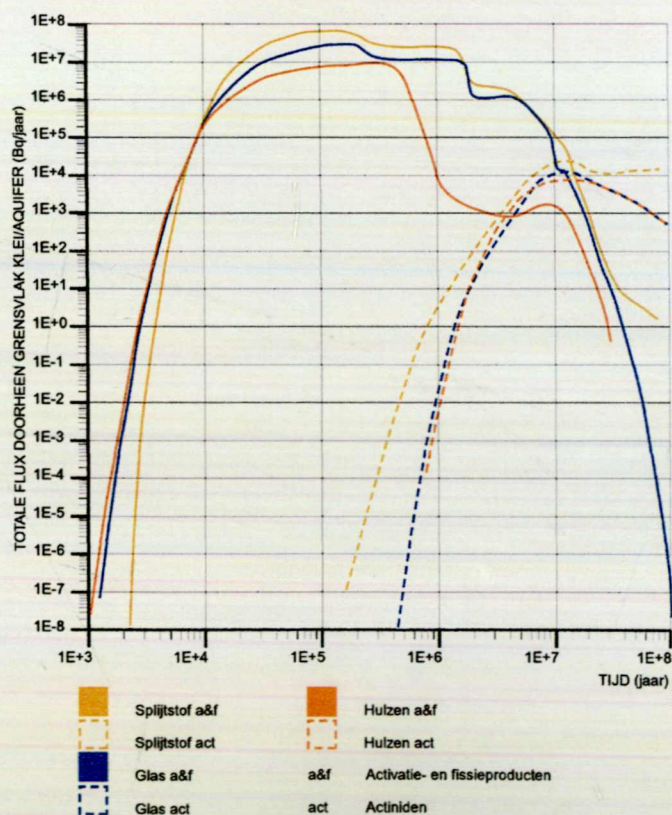
De moederradionucliden waarmee vanuit radiologisch oogpunt geen rekening gehouden wordt, worden echter wel ingebracht bij de berekening van de oplosbaarheid van de radionucliden binnen het nabije veld.

Verglaasd afval De precieze levensduur van de glasmatrices, en dus de eventueel grote onzekerheid erop, heeft nagenoeg geen invloed op de algemene performantie van het bergingssysteem, waardoor dit een belangrijk element van robuustheid vormt. Zo heeft de levensduur van de matrix, indien hij minder dan 100 000 jaar bedraagt, in het geval van ^{129}I , een zeer langlevend radionuclide (16 miljoen jaar) dat niet wordt vertraagd in de Boomse Klei, nagenoeg geen invloed op de maximumwaarde van de radionuclidenflux die de watervoerende laag van het Neogeen bereikt, en beïnvloedt deze levensduur slechts in geringe mate het ogenblik waarop de flux zich voordoet (fig. 4.7). Wat de vertraagde radionucliden betreft (^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd en ^{135}Cs), heeft de levensduur van de matrix geen noemenswaardige invloed op de waarde van de fluxpiek, evenmin als op het moment waarop die zich voordoet.

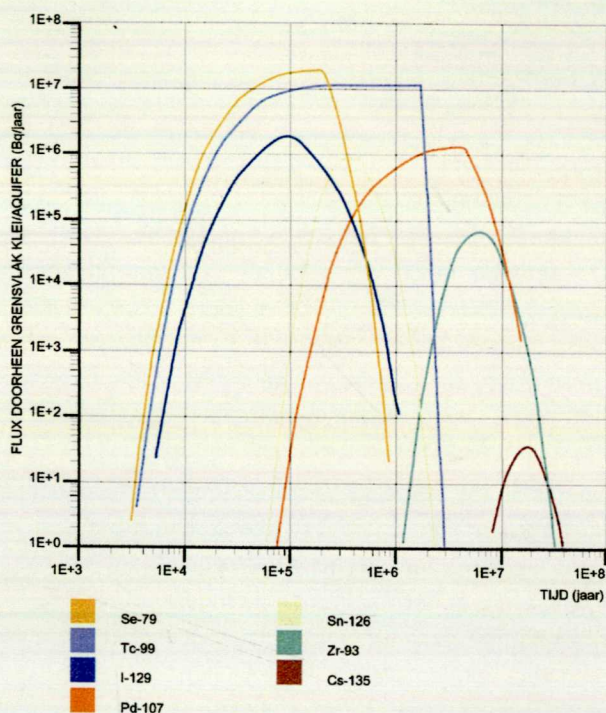


Figuur 4.7 Aan het verglaasde afval toe te schrijven ^{129}I -flux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen.

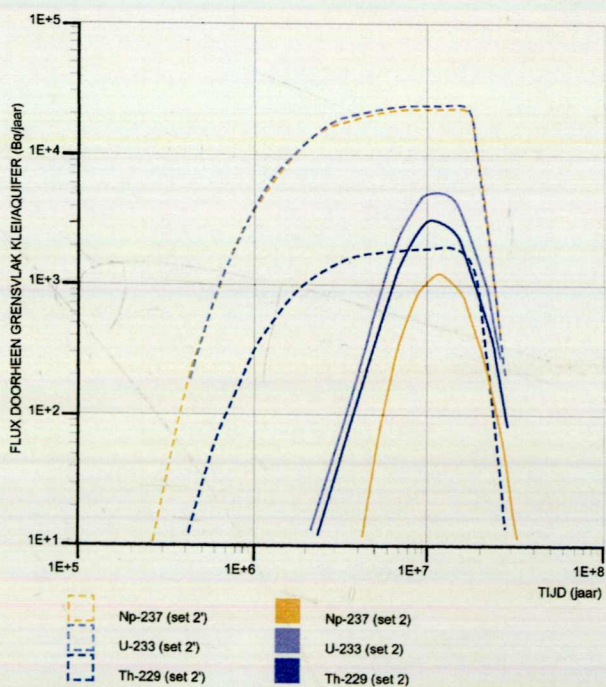
Het totaalbeeld van de verwachte evolutie van de radiologische impact van het verglaasde afval laat twee pieken zien: de eerste, tevens de grootste, wordt gevormd door de activerings- en fissieproducten; de tweede is toe te schrijven aan de actiniden (fig. 4.8). De belangrijkste activerings- en fissieproducten zijn, in dalende volgorde van belang, ^{79}Se , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{107}Pd , ^{126}Sn en ^{93}Zr (fig. 4.9). De evolutie van de ^{99}Tc -flux weerspiegelt duidelijk de invloed van de oplosbaarheidsgrens: de waarde van de fluxpiek doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, die ongeveer 10^7 Bq per jaar bedraagt en zich na ongeveer 200000 jaar voordoet, blijft constant tot 2 miljoen jaar, waarna het ^{99}Tc verdwijnt door radioactief verval. De ^{79}Se -fluxen en de ^{107}Pd -fluxen worden eveneens beïnvloed door de oplosbaarheidsgrenzen van deze elementen. De maximale fluxpiek, die van ^{79}Se , bedraagt ongeveer $2 \cdot 10^7$ Bq per jaar en doet zich voor na 150000 tot 200000 jaar. De bijdrage van de actiniden komt vooral van de keten $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ (fig. 4.10). Alleen voor deze keten doet zich trouwens een aanzienlijke verhoging van de fluxpieken voor ingeval de evaluaties rekening houden met de mobiele organische fractie. In dit geval is de maximumpiek die van ^{233}U , namelijk ongeveer $2 \cdot 10^4$ Bq per jaar, tegenover ongeveer $5 \cdot 10^3$ Bq per jaar in het andere geval. Alle twee verschijnen ze na ongeveer 15 miljoen jaar; de radionucliden beginnen de watervoerende laag van het Neogeen pas te bereiken na ongeveer 100000 jaar in het eerste geval en één miljoen jaar in het tweede geval. De mobiele organische fractie heeft bijgevolg geen enkele significante invloed op de insluitingscapaciteit van de geologische barrière.



Figuur 4.8 Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan verglaasd afval, bestraalde splijtstof en hulzen en eindstukken.

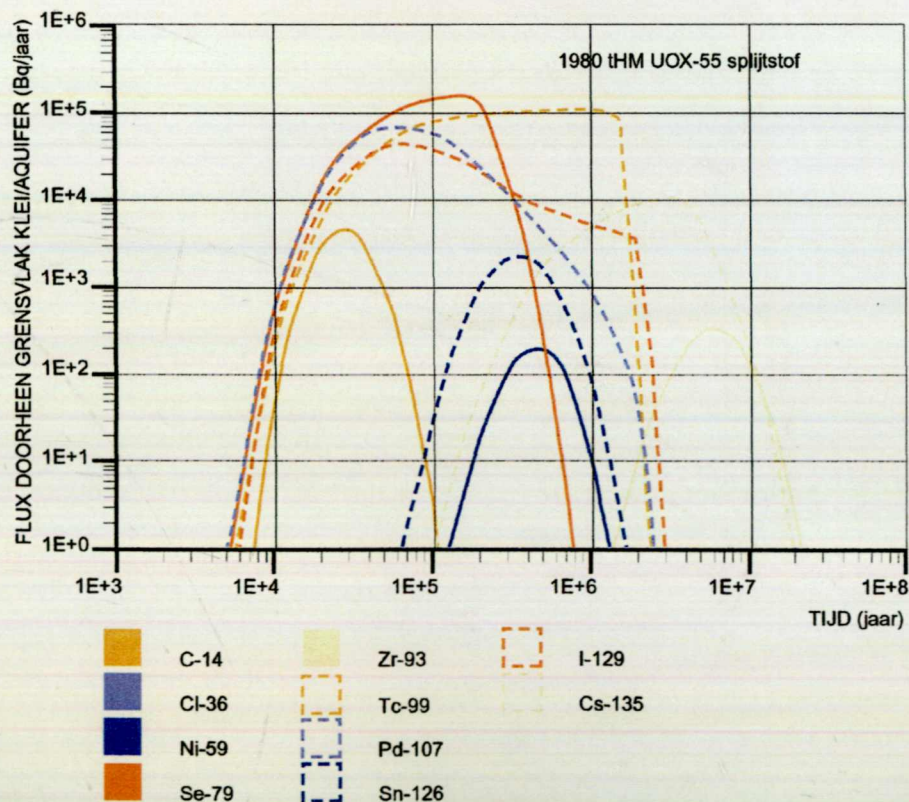


Figuur 4.9 Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan activerings- en fissieproducten in het verglaasde afval.

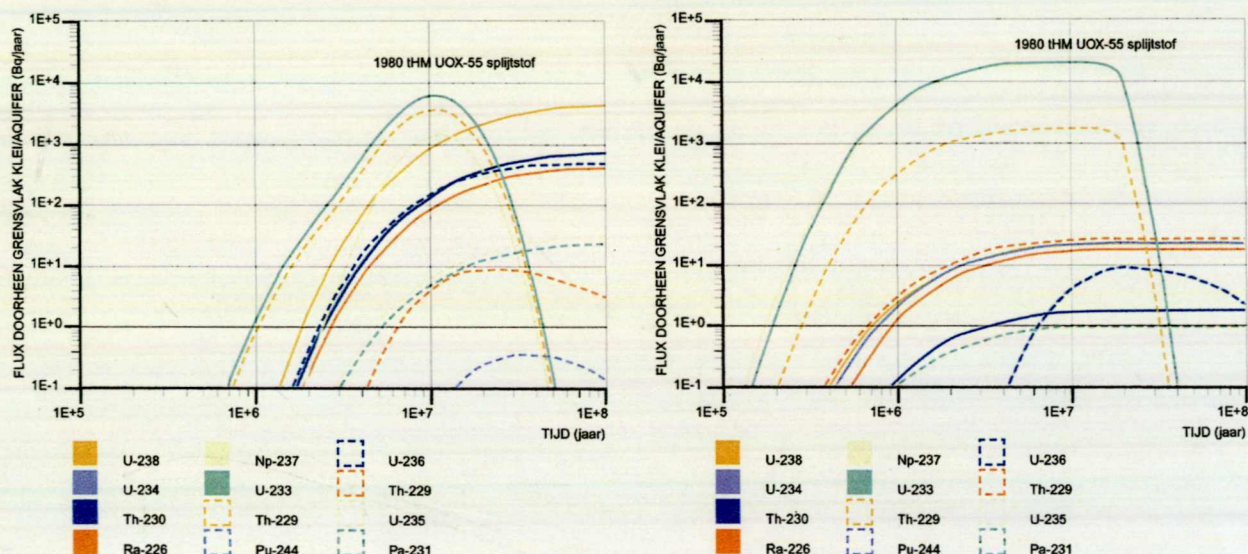


Figuur 4.10 Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan de actiniden van de keten $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ in het verglaasde afval.

Bestraalde splijtstof De migratieberekeningen van de radionucliden die vrijkomen uit bestraalde splijtstoffen, werden hoofdzakelijk uitgevoerd in het kader van het project SPA (*Spent Fuel Performance Assessment*) van de Europese Commissie. De vergelijking van de fluxen activerings- en fissieproducten die zijn berekend met de twee modellen van de bronterm (tabel 4.4), wijst op fluxen die min of meer op hetzelfde ogenblik plaatsgrijpen, maar tot twee à drie keer hoger zijn met het alfa-auto-oxidatiemodel, dat dus het model is dat wordt gebruikt voor de berekeningen. De belangrijkste *activerings-* en *fissieproducten* zijn ^{79}Se , ^{99}Tc , ^{36}Cl , ^{129}I , ^{107}Pd en ^{14}C . In generiek geval van 1980 ton uraniumoxide met een gemiddelde afbrand van 55 GWd.tHM^{-1} (1980 tuox-55), is de maximale fluxpiek die van ^{79}Se . Deze bedraagt ongeveer $2 \cdot 10^7 \text{ Bq}$ per jaar en doet zich voor na 160000 jaar (fig. 4.11). Het effect van de oplosbaarheidsgrens is duidelijk zichtbaar voor ^{99}Tc , ^{79}Se en ^{107}Pd , en zo ook de aanwezigheid van ^{129}I in verschillende componenten van de splijtstof. De belangrijkste bijdrage van de *actiniden* tot de activiteitsflux wordt geleverd door ^{233}U , met een maximumflux van ongeveer $2 \cdot 10^4 \text{ Bq}$ per jaar als rekening wordt gehouden met de mobiele organische fractie, en zo niet $7 \cdot 10^3 \text{ Bq}$ per jaar (fig. 4.12). De twee pieken doen zich voor na ongeveer 10 miljoen jaar; de radionucliden beginnen de watervoerende laag van het Neogeen pas te bereiken na ongeveer 100000 jaar in het eerste geval en na één miljoen jaar in het tweede. De omvang en het ogenblik van de maxima van de activiteitsfluxen zijn vrijwel gelijkwaardig aan die welke zijn berekend voor verglaasd afval (fig. 4.8).

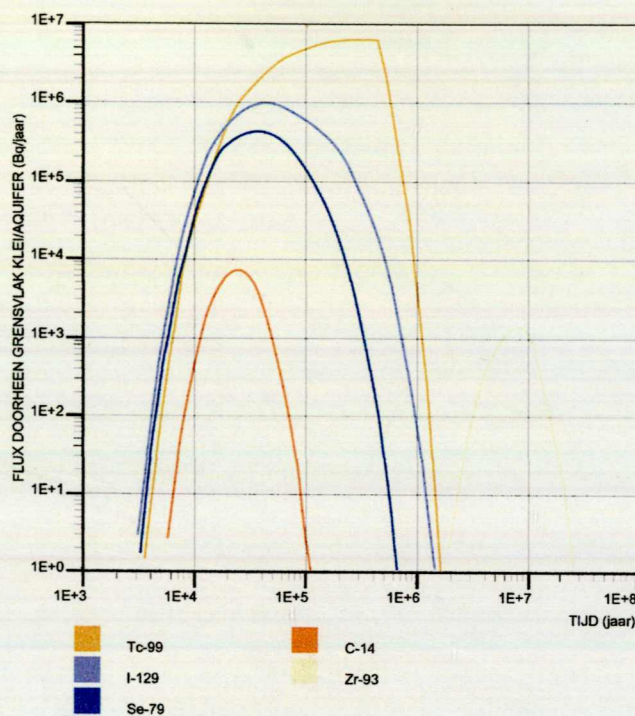


Figuur 4.11 Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan de activerings- en fissieproducten in de bestraalde splijtstof (1980 tuox-55), zoals berekend met het alfa-auto-oxidatiemodel.

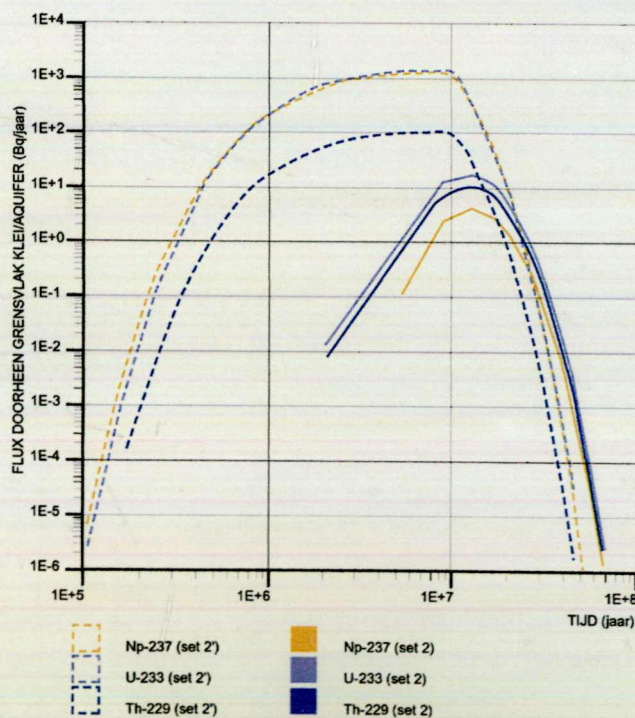


Figuur 4.12 Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan de actiniden van de keten $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ in de bestraalde splijstof (1980 tUOX-55), berekend met het alfa-auto-oxidatiemodel.

Hulzen en eindstukken De belangrijkste *activerings-* en *fissieproducten* van de hulzen en eindstukken zijn ^{99}Tc , ^{129}I , ^{79}Se , ^{14}C en ^{93}Zr . De invloed van de oplosbaarheidsgrens is slechts duidelijk merkbaar voor ^{99}Tc . De ^{99}Tc -fluxpiek heeft een waarde van ongeveer $9 \cdot 10^6$ Bq per jaar en treedt op na 430000 jaar (fig. 4.13). De periode waarna alle ^{99}Tc is opgelost, is aanzienlijk korter dan voor verglaasd afval, namelijk 550000 jaar in plaats van 1.7 miljoen jaar. Als de berekeningen geen rekening houden met de mobiele organische fractie, is de maximale aan *actiniden* toe te schrijven activiteitsflux die van ^{236}U (ongeveer 3000 Bq per jaar na 12 miljoen jaar), en anders die van ^{233}U (ongeveer 2000 Bq per jaar na 3 miljoen jaar). Alleen in het geval van de keten $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ is een aanzienlijke verhoging van de fluxpieken vast te stellen indien de evaluaties rekening houden met de mobiele fractie. De radionucliden beginnen de watervoerende laag van het Neogeen in dit geval te bereiken na ongeveer 100000 jaar, in plaats van ongeveer één miljoen jaar (fig. 4.14). Het globale beeld van de activiteitsflux met de twee pieken is dus vergelijkbaar met dat voor verglaasd afval (fig. 4.8).



Figuur 4.13 Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan de activerings- en fissieproducten in de hulzen en eindstukken.



Figuur 4.14 Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan de actiniden van de keten $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ in de hulzen en eindstukken.

Activiteitsflux in de watervoerende laag van het Neogeen

De belangrijkste bijdrage van de watervoerende lagen tot de werking van het bergingssysteem bestaat erin de radionucliden te verdunnen en te verspreiden voordat ze de biosfeer bereiken: de radiologische impact is immers omgekeerd evenredig met de verdunningsfactor, die wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de activiteitsflux die in de watervoerende laag of in de waterlopen binnenkomt en de maximumconcentratie erin. De migratieberekeningen in de watervoerende laag berekenen de radionuclidenconcentraties in een waterwinningsput en de activiteitsfluxen naar de waterlopen. De belangrijkste kenmerken en parameters van de watervoerende laag in het robuuste bergingssysteem zijn de hydraulische geleidbaarheid van de verschillende sublagen van de watervoerende laag, de Darcy-snelheid, de hydrodynamische-dispersiecoëfficiënten en de dikte van de watervoerende laag.

Tot op heden gaan de meeste simulaties van de migratie in de watervoerende laag van het Neogeen uit van de hypothese dat de plaatselijke hydrogeologie, evenals de Boomse Klei, 100 miljoen jaar ongewijzigd blijft. In werkelijkheid zou zij binnen enkele honderden jaar belangrijke wijzigingen kunnen ondergaan als gevolg van klimaatwijzigingen die tot ongeveer 100000 jaar kunnen in rekening gebracht worden met behulp van de orbitaaltheorie van Milankovitsch. De afwisseling op langere termijn van ijsstijden en interglaciale perioden zal aanzienlijke en onvermijdelijke onzekerheden met zich mee brengen wat betreft het gedrag van de watervoerende laag van het Neogeen.

Terwijl de simulaties die werden gerapporteerd in het SAFIR-rapport, gebruikmaakten van één- of tweedimensionale simulaties, steunen de berekeningen van de migratie van de radionucliden in de watervoerende laag van het Neogeen op het lokaal hydrogeologische model, dat driedimensionaal is (zie sectie 3.2.4.4). Er worden dus parameterwaarden gebruikt die variëren in de ruimte. De mogelijke sorptie van de radionucliden door de aanwezige mineralen werd niet opgenomen in de migratieberekeningen, aangezien het effect van de sorptie hoogstwaarschijnlijk verwaarloosbaar is in vergelijking met de retentie gedurende de migratie in de Boomse Klei. Vermits alle radionucliden bij afwezigheid van sorptie op identieke wijze migreren in de watervoerende laag, zijn de berekeningen bovendien enkel uitgevoerd voor ^{129}I . Hierbij werd een constante eenheidsflux van 1 MBq per jaar vanuit de Boomse Klei verondersteld, die gelijkmatig verdeeld was over de oppervlakte van de bergingsinstallatie. De aldus berekende maximale activiteitsconcentratie in het water van de Zanden van Diest, die het meest voor waterwinning in aanmerking komen vanwege hun hoge hydraulische geleidbaarheid, bedraagt $1.5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Zij beantwoordt aan een schijnbare verdunningsfactor in de watervoerende laag van 670000 m^3 per jaar.

Dosisberekeningen

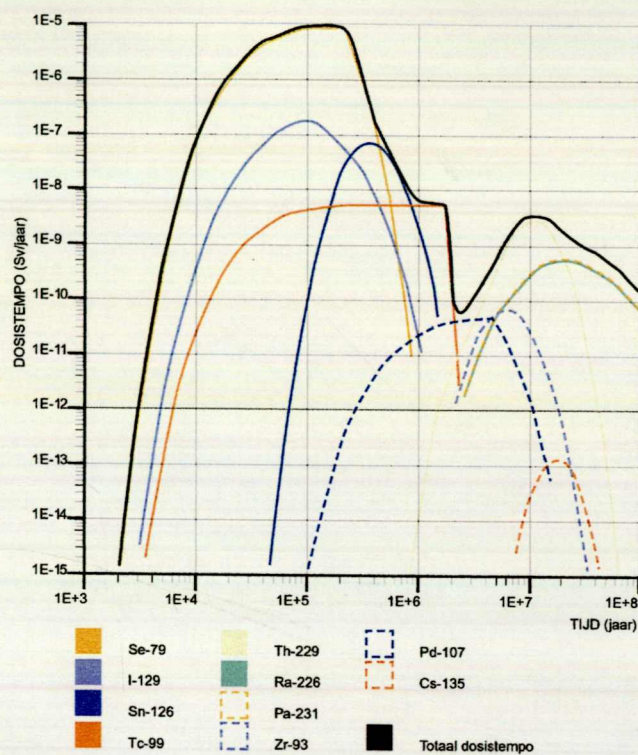
De dosis waaraan een individu van de referentiegroep kan worden blootgesteld via de verschillende receptoren van de biosfeer, wordt verkregen door vermenigvuldiging met de overeenkomstige biosfeerconversiefactoren (zie sectie 3.7) van de radionuclidenconcentratie

in het water uit een put boven de bergingsinstallatie, of van de activiteitsfluxen naar de waterlopen (vooral naar de Kleine Nete). De dosisberekeningen gaan uit van een referentiebiosfeer die gedurende 100 miljoen jaar stabiel is. Zij tonen aan dat alle doses die toe te schrijven zijn aan de Kleine Nete, ongeveer twee grootteorden lager zijn dan de doses die toe te schrijven zijn aan een waterwinning. De doses voor de verschillende afvalklassen worden als volgt samengevat.

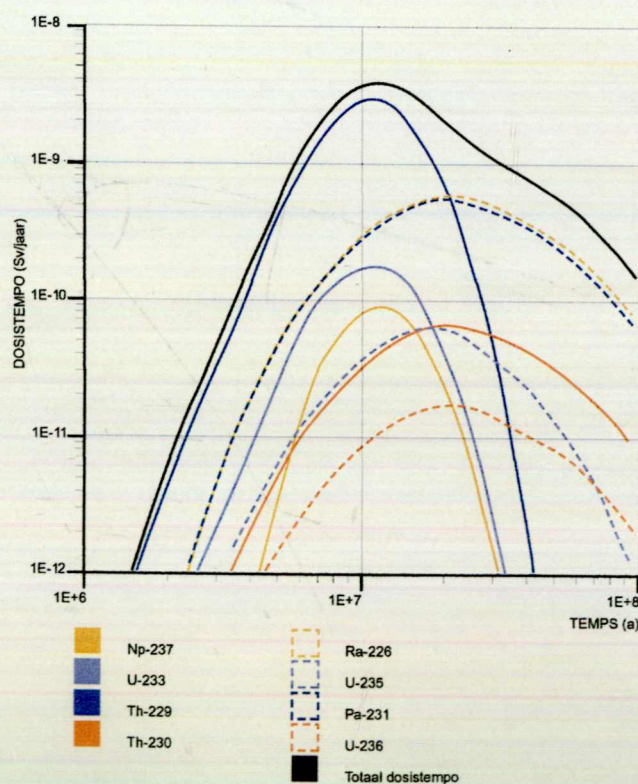
Verglaasd afval De belangrijkste radionucliden zijn in dalende volgorde van belang ^{79}Se , ^{129}I , ^{126}Sn en ^{99}Tc . De hoogste dosis is toe te schrijven aan ^{79}Se : ze doet zich voor na 200 000 jaar en bedraagt ongeveer $10\ \mu\text{Sv}$ per jaar (fig. 4.15). Zij is deels te wijten aan de onzekerheden over zowel het migratiegedrag van ^{79}Se in de Boomse Klei als aan zijn biosfeerconversiefactor. De totale dosis bedraagt meer dan $10^{-2}\ \mu\text{Sv}$ per jaar tussen 7 000 jaar en één miljoen jaar, en meer dan $1\ \mu\text{Sv}$ per jaar tussen 20 000 en 350 000 jaar. De aan de actiniden toe te schrijven maximale dosis bedraagt $3 \cdot 10^{-3}\ \mu\text{Sv}$ per jaar (fig. 4.16). Zij is hoofdzakelijk toe te schrijven aan ^{229}Th en bereikt haar maximum na 13 miljoen jaar. Andere vrij belangrijke actiniden zijn ^{226}Ra en ^{231}Pa . De totale aan actiniden toe te schrijven dosis is hoger dan $10^{-4}\ \mu\text{Sv}$ per jaar tussen 2 en 100 miljoen jaar.

Bestraalde splijtstof (berekeningen uitgevoerd voor 1980 tuox-55) De belangrijkste radionucliden zijn ^{79}Se , ^{129}I , ^{36}Cl , ^{126}Sn en ^{99}Tc . De maximale dosis is toe te schrijven aan ^{79}Se : zij bedraagt $7\ \mu\text{Sv}$ per jaar en doet zich voor na 160 000 jaar (fig. 4.17). De totale dosis bedraagt meer dan $10^{-2}\ \mu\text{Sv}$ per jaar gedurende de periode tussen 9 000 en 2 miljoen jaar. De maximale dosis die berekend is voor de actiniden, is in hoofdzaak afkomstig van ^{229}Th (fig. 4.18). Zij bedraagt $4 \cdot 10^{-3}\ \mu\text{Sv}$ per jaar en treedt op na 10 miljoen jaar. Een ander vrij belangrijk actinide is ^{226}Ra . De dosispiek voor het geheel bestraalde splijtstoffen ten slotte, is eveneens afkomstig van ^{79}Se (fig. 4.19), bedraagt ongeveer $20\ \mu\text{Sv}$ per jaar en doet zich voor na 160 000 jaar. In dit geval bedraagt de totale dosis meer dan $10^{-2}\ \mu\text{Sv}$ per jaar tussen 8 000 jaar en 3 miljoen jaar.

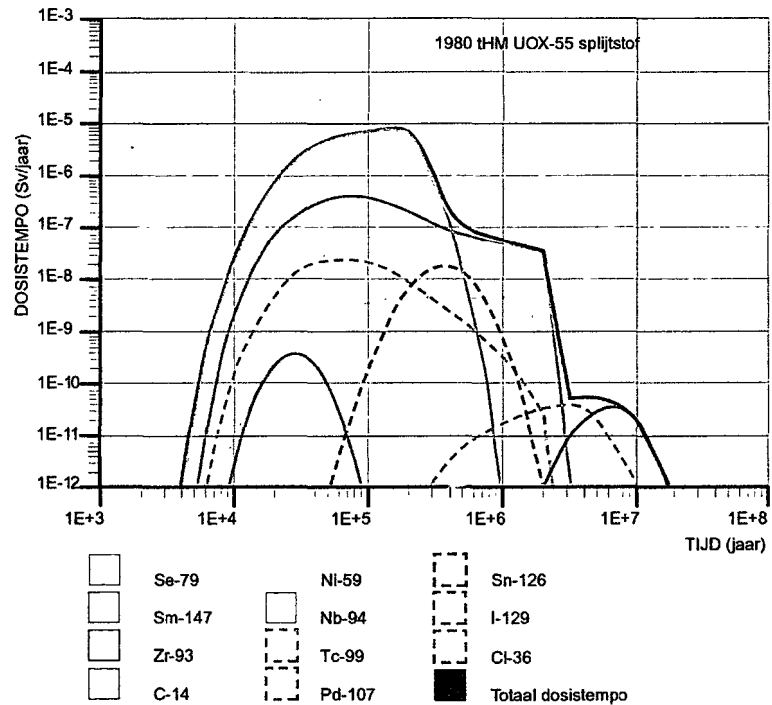
Hulzen en eindstukken De belangrijkste radionucliden zijn ^{79}Se , ^{129}I en ^{99}Tc . De maximale dosis, die toe te schrijven is aan ^{79}Se , bedraagt ongeveer $3 \cdot 10^{-1}\ \mu\text{Sv}$ per jaar en doet zich voor na 36 000 jaar (fig. 4.20). De totale dosis bedraagt meer dan $10^{-2}\ \mu\text{Sv}$ per jaar gedurende de periode tussen 7 000 en 300 000 jaar. De maximale dosis voor hulzen en eindstukken is dus 30 keer kleiner dan voor verglaasd afval, wat hoofdzakelijk te verklaren valt door de lagere hoeveelheid ^{79}Se in de hulzen en eindstukken. De maximale aan actiniden toe te schrijven dosis bedraagt $2 \cdot 10^{-3}\ \mu\text{Sv}$ per jaar en komt hoofdzakelijk van ^{231}Pa en ^{226}Ra . Het maximum doet zich voor na 13 miljoen jaar. Tussen 4 en 100 miljoen jaar leveren de actiniden doses hoger dan $10^{-4}\ \mu\text{Sv}$ per jaar op.



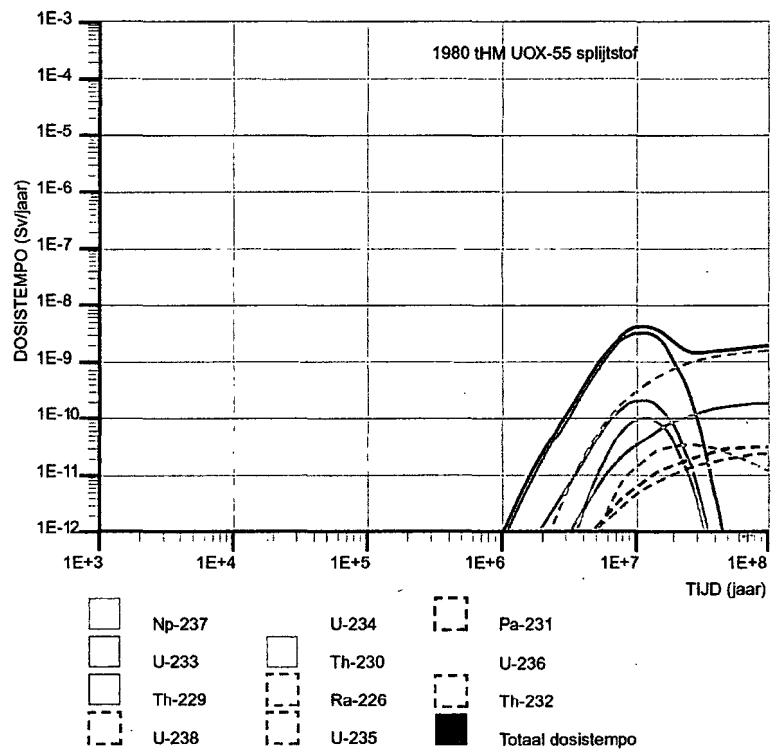
Figuur 4.15 Totaal dosistempo via een waterput van de activerings- en fissieproducten in het verglaasde afval.



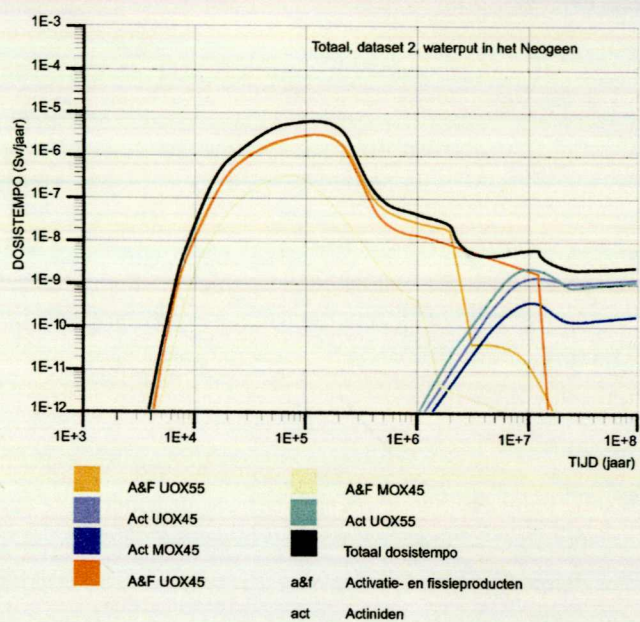
Figuur 4.16 Totaal dosistempo via een waterput van de actiniden in het verglaasde afval.



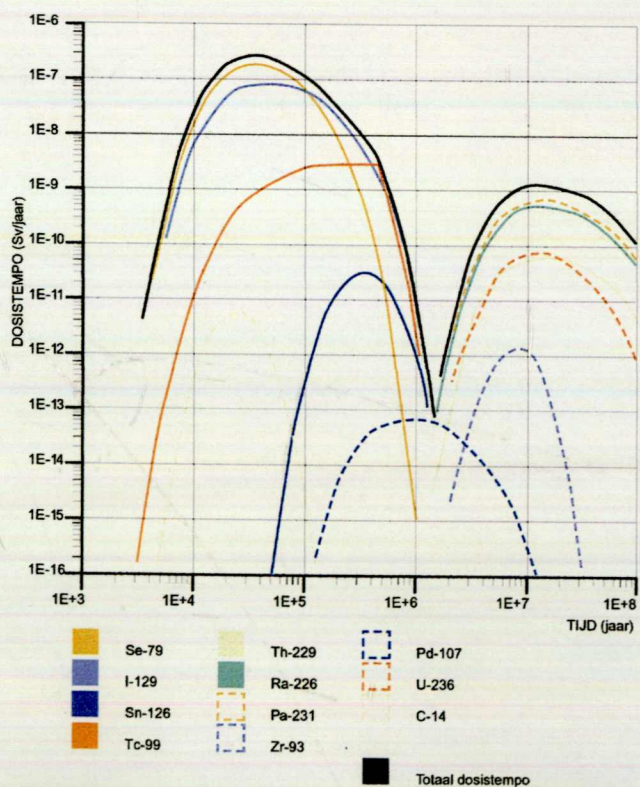
Figuur 4.17 Totaal dosistempo via een waterput van de activerings- en fissieproducten in 1980 tUOX-55.



Figuur 4.18 Totaal dosistempo via een waterput van de actiniden in 1980 tUOX-55.



Figuur 4.19 Totaal dosistempo via een waterput van de activerings- en fissieproducten en actiniden in het geheel van bestraalde splijtstoffen.



Figuur 4.20 Totaal dosistempo via een waterput van de activerings- en fissieproducten in de hulzen en eindstukken.

4.3.2.2 Berekeningen van alternatieve veiligheids- en performantie-indicatoren

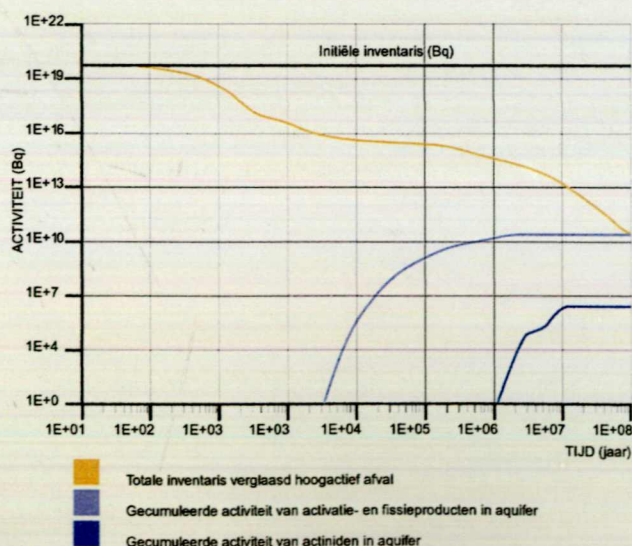
Drie indicatoren waarvan de berekening nagenoeg losstaat van de evolutie van de omgeving van het bergingssysteem, werden gebruikt om de dosisberekeningen aan te vullen.

Vervallen fracties en insluitingsfactoren Door de totale activiteit die de watervoerende laag van het Neogeen in 100 miljoen jaar tijd bereikt, te vergelijken met de hoeveelheid activiteit die aanvankelijk werd geborgen, kan de fractie worden berekend die in het bergingssysteem zelf vervallen is. Dit wil zeggen de verhouding tussen de hoeveelheid radionucliden die verdwijnen door radioactief verval binnen het bergingssysteem, en de initiële geborgen hoeveelheid activiteit. Op basis hiervan kan de performantie van de barrières van het systeem worden geëvalueerd.

In het geval van verglaasd afval bereikt, met uitzondering van enkele zeer langlevende radionucliden zoals ^{129}I en ^{107}Pd en enkele niet-vertraagde radionucliden zoals ^{79}Se en ^{99}Tc , slechts een heel gering deel van de initiële activiteit de watervoerende laag (fig. 4.21):

- ongeveer $2 \cdot 10^{10}$ Bq activerings- en fissieproducten voor een totale initiële activiteit van $7 \cdot 10^{19}$ Bq;
- ongeveer 10^7 Bq actiniden (dit is de gemiddelde inhoud aan actiniden van 0.2 m^3 radioactief afval van categorie A) voor een totale initiële activiteit van ongeveer $5 \cdot 10^{17}$ Bq (hoofdzakelijk ^{241}Am en ^{244}Cm).

Het bergingssysteem vormt met zijn functies fysische insluiting en vertraging en gespreid vrijkomen dus een uiterst doeltreffende filter, aangezien het grootste deel van de aanvankelijk geborgen activiteit verdwijnt voordat het de watervoerende laag heeft kunnen bereiken. De insluitingsfactor (verhouding tussen de geborgen activiteit en de gecumuleerde vrijgezette activiteit in de watervoerende laag) bedraagt $4 \cdot 10^9$ voor de activerings- en fissieproducten en $5 \cdot 10^{10}$ voor de actiniden.



Figuur 4.21 Gecumuleerde activiteit, afkomstig van het verglaasde afval, die de watervoerende laag van het Neogeen bereikt.

Voor de zeer langlevende radionucliden evenwel is de totale fractie die de biosfeer bereikt, hoog: 99 % voor ^{129}I , 94 % voor ^{238}U , 92 % voor ^{235}U enzovoort. De functie vertraging en gespreid vrijkomen zorgt er niettemin voor dat dit vrijkomen erg gespreid wordt in de tijd, in die mate dat een toekomstig individu slechts aan een uiterst minieme fractie van de totale geborgen activiteit zal worden blootgesteld. Zo beantwoordt de jaarlijkse maximale ^{129}I -flux ($2 \cdot 10^6$ Bq per jaar) voor verglaasd afval aan $3 \cdot 10^{-6}$ keer de totale geborgen ^{129}I -activiteit. Voor ^{79}Se beantwoordt de jaarlijkse maximumflux ($2 \cdot 10^7$ Bq per jaar) aan $3 \cdot 10^{-7}$ keer de initiële ^{79}Se -activiteit.

Totale activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen De maximale activiteitsflux die toe te schrijven is aan het verglaasde afval, de bestraalde splijtstof en de hulzen en eindstukken doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, bedraagt ongeveer $2 \cdot 10^7$ Bq per jaar, dit is minder dan $100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ per jaar, rekening houdend met het feit dat de oppervlakte van de in aanmerking genomen bergingsarchitectuur 0.224 km^2 bedraagt voor een bergingsinstallatie die bestemd is voor verglaasd afval, en 1.17 km^2 voor een bergingsinstallatie bestemd voor bestraalde splijtstof.

Deze jaarlijkse flux is heel gering, aangezien hij gelijkstaat met de alfa-activiteit van het uranium, het thorium en het radium die van nature aanwezig zijn in een laag Boomse Klei van slechts ongeveer 0.1 mm dik. De gemiddelde activiteit van deze isotopen bedraagt ongeveer 360 Bq per kilo, dit is $7 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. Bovendien voegt de radionuclidenflux die de Boomse Klei verlaat en terechtkomt in de watervoerende laag van het Neogeen, elk jaar slechts 0.0008 % toe aan de natuurlijke activiteit die reeds aanwezig is in de Zanden van Berchem, een ongeveer 20 meter dikke onderlaag van de watervoerende laag van het Neogeen die zich vlak boven de Boomse Klei bevindt en waarin de natuurlijke activiteit van uranium, thorium en radium hoog is (ongeveer 400 Bq per kilo, dit is ongeveer $6 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$). In het geval van verglaasd afval ten slotte beantwoordt de gecumuleerde totale activiteit over 100 miljoen jaar die de watervoerende laag van het Neogeen bereikt (fig. 4.21), aan de alfa-activiteit die reeds van nature aanwezig is in een laag van ongeveer 10 cm Zanden van Berchem voor de activerings- en fissieproducten en in een laag van ongeveer 0.1 mm voor de actiniden.

Totale uraniumactiviteit De vergelijking van de totale initiële uraniuminventaris in het verglaasde afval en in de bestraalde splijtstof met de hoeveelheid alfa-activiteit die reeds van nature in de Boomse Klei aanwezig is rond de bergingsinstallatie (ongeveer $7 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$), vormt een derde alternatieve indicator van de mogelijke radiologische impact op zeer lange termijn van een dergelijke installatie. Deze impact is toe te schrijven aan de isotopen van uranium en hun dochterisotopen, met name radium, thorium en protactinium. Voor de totale initiële inventaris van ongeveer $5 \cdot 10^{12}$ Bq U in verglaasd afval en ongeveer $2 \cdot 10^{14}$ Bq U in bestraalde splijtstof, benadert de hoeveelheid uraniumisotopen die vanuit de bergingsinstallatie migreren in de Boomse Klei, de hoeveelheid alfa-activiteit die reeds van nature aanwezig is in het kleivolume dat de bergingsinstallatie omgeeft. Zo correspondeert het verglaasde afval met een equivalent kleivolume met een oppervlakte van 0.25 km^2 en een dikte van 80 meter (dit is de effectieve dikte van de laag Boomse Klei). Voor de bestraalde

splijtstoffen beslaat het equivalent kleivolume een oppervlakte van 4 km² voor een dikte van 80 meter.

4.3.3 Evaluatie van de gewijzigde-evolutiescenario's

Anders dan het SAFIR-rapport, dat slechts resultaten gaf voor één enkel gewijzigd-evolutiescenario, namelijk het scenario van activering van een breuk, biedt het SAFIR 2-rapport een eerste, hoofdzakelijk kwalitatieve analyse van de gevolgen van zes gewijzigde-evolutiescenarios die werden geïdentificeerd in de studie van de scenario's (zie sectie 4.2.2.2).

- De waarschijnlijkheid dat het *exploitatieboringsscenario* zich voordoet, is gering, gezien de geringe hydraulische geleidbaarheid van de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan en het feit dat het water in deze laag door zijn chemische samenstelling ongeschikt is voor rechtstreekse consumptie door de mens. Als dit water toch zonder meer wordt gebruikt als drinkwater of voor landbouwdoeleinden, zoals in het geval van het normale-evolutiescenario, kan het leiden tot een dosis van enkele mSv per jaar voor een individu van de referentiegroep. De beperkte waterbewegingen in en de geringe dikte (30 meter) van deze watervoerende laag maken immers slechts een heel geringe verdunning van de radionucliden mogelijk, zodat hun concentraties tot 1000 hoger kunnen zijn dan die in de bovenliggende watervoerende laag van het Neogeen.
- De berekeningen van de gevolgen van het *scenario van activering van een breuk* tonen aan dat de radiologische impact van dit scenario erg gering is en in dezelfde orde van grootte ligt als die van het normale-evolutiescenario, omdat slechts een zeer geringe fractie van de geborgen radionucliden deel kan nemen aan de door de breuk versnelde migratie. Hierbij moesten arbitraire waarden gebruikt worden voor de parameters die de radionuclidenmigratie via de breuk beschrijven, omdat men geen waarden hiervoor heeft. De waarschijnlijkheid dat dit scenario zich voordoet, zou a priori drastisch kunnen worden verminderd door een bergingssite te kiezen waarvan de geologische structuur vrij is van reeds bestaande zwakheden.
- Over het *scenario van een ernstige glaciatie* zijn nog geen kwantitatieve evaluaties gemaakt. Volgens de orbitaaltheorie van Milankovitsch is het echter weinig waarschijnlijk dat dit scenario zich in de eerste tienduizenden jaren voordoet: er zouden geen strengere ijstijden mogen zijn dan de laatste drie ijstijden van het Quartair, waarvan er geen enkele tot gevolg heeft gehad dat de ijskap de regio Mol-Dessel bedekte. Toch blijven er aanzienlijke onzekerheden bestaan in de secundaire mechanismen die het klimaat bepalen op een schaal van enkele honderdduizenden jaren, zoals de CO₂-concentraties in de atmosfeer en de zeestromingen. Zo zou een verplaatsing van de Golfstroom tijdens een ijstijd een veel grotere uitbreiding van de ijskap met zich mee kunnen brengen. Recente berekeningen tonen evenwel aan dat er in de komende 130 000 jaar geen dusdanige ijstijd zou mogen optreden zodat de ijskap zich aanzienlijk zou uitbreiden. De activiteit van het geborgen afval zal daarna sterk verminderd zijn, zodat de impact van een glaciatiescenario waarschijnlijk beperkt zou blijven.

- De tot dusver uitgevoerde impactanalyses van het *scenario van een slechte afdichting* van de hoofdgalerijen en de toegangsschachten tonen aan dat dit scenario geen ernstige gevolgen zou mogen hebben. De migratie door advectie in de slecht afgedichte hoofdgalerijen blijft immers uiterst beperkt, omdat er bijna geen water kan infiltreren vanwege de zeer geringe hydraulische geleidbaarheid van de Boomse Klei. De waarschijnlijkheid dat dit scenario zich voordoet, kan a priori sterk worden beperkt door toepassing van een veiligheidscultuur en een streng kwaliteitsborgingsbeleid tijdens de sluitingsfase van het bergingssysteem.
- Het *scenario van gastransport* bestudeert de koppeling tussen gas- en waterstroming indien een gasfase zich zou vormen, en analyseert zijn invloed op de radiologische impact. De reeds uitgevoerde evaluaties tonen aan dat het verglaasde afval, de bestraalde splijtstoffen en waarschijnlijk ook de hulzen en eindstukken geen enkel noemenswaardig probleem op het vlak van gasproductie geven. Dit is hoofdzakelijk wegens het gebruik van roestvrije stalen voor de verpakkingen. Voor sommige andere afvalklassen daarentegen die een grote hoeveelheid koolstofstaal bevatten, valt het niet uit te sluiten dat een gasfase zal gevormd worden die het water uitdrijft door de klei heen of zelfs aanleiding zal geven tot preferentiële migratiewegen in de klei. Het subscenario van wateruitdrijving uit het nabije veld, heeft beperkte gevolgen, aangezien de maximale radionuclidenflux naar de watervoerende laag in het ongunstigste geval slechts met een factor 10 stijgt. Het weinig realistische subscenario dat rekening houdt met het ontstaan van een migratieweg in de klei waarlangs het water en de gassen kunnen wegstromen, kan voor een bepaald aantal afvalklassen van categorie B leiden tot een stijging met een factor van ongeveer 100 van de migratie in de kleilaag in vergelijking met het normalevolutiescenario. Maar zelfs in dit geval is de radionuclidenflux naar de watervoerende laag kleiner dan die van verglaasd afval en bestraalde splijtstof. Voor het afval van categorie B moet er bijgevolg bij de ontwikkeling van de bergingsarchitectuur gezorgd worden dat de gevormde gassen kunnen ontsnappen zonder de barrières van het bergingssysteem te beschadigen en zonder dat het insluitingsvermogen van het bergingssysteem aanzienlijk wordt verminderd. Overigens moeten alle redelijkerwijze mogelijke inspanningen gedaan worden om de gasbronterm te beperken, zoals bijvoorbeeld het gebruik van koolstofstaal. Ten slotte vergt de evaluatie van het scenario van transport door de gassen een betere kennis van de verschillende betrokken parameters en processen, met name van de diffusiecoëfficiënten van de belangrijkste gevormde gassen en van de hydraulische kenmerken van de migratiewegen in de klei.
- De tweede variant van het *exploratieboringsscenario*, de variant die veronderstelt dat de boring door de bergingsinstallatie niet wordt opgevuld, en die dus de robuustheid van het bergingssysteem in geval van verstoring van de barrières door een indringing evalueert, zal slechts een heel beperkte impact hebben, want het boorgat zal zich geleidelijk weer sluiten door convergentie als gevolg van de plasticiteit van de Boomse Klei. Men kan zich de vraag stellen of de waarschijnlijkheid van het optreden van dit scenario aanzienlijk zou kunnen worden verminderd door de bergingsinstallatie dieper te bouwen.

Twee gewijzigde-evolutiescenario's zijn nog niet bestudeerd.

- Het *broeikaseffectscenario*, dat hoofdzakelijk de biosfeer en in minder mate de hydrogeologie beïnvloedt, zou de temperatuurdalingen die op basis van de orbitaaltheorie van Milankovitsch worden verwacht, aanzienlijk kunnen beperken.
- Het scenario van *voortijdig defect van een kunstmatige barrière*, waarvan de radiologische impact waarschijnlijk minder ernstig zal zijn dan zou kunnen worden gevreesd, omdat de Boomse Klei grotendeels intact blijft, moet toch aandachtig worden geëvalueerd, omdat de migratieprocessen onder een temperatuursgradiënt verschillend zijn van die uit het normale-evolutiescenario.

De eerste variant van het *exploratieboringsscenario* ten slotte, met andere woorden het scenario van menselijke indringing, wordt in de veiligheidsevaluaties buiten beschouwing gelaten, overeenkomstig de internationale consensus over de niet-relevantie ervan. Deze variant is gezien de huidige prospectieprocedures immers erg onwaarschijnlijk. Voorts is het onmogelijk de waarschijnlijkheid ervan te schatten en zijn de gevolgen onafhankelijk van de bergingsarchitectuur en de gekozen site: Het spreekt voor zich dat zones met natuurlijke rijkdommen moeten worden vermeden.

4.3.4 Aanvullende resultaten en beschouwingen

Het geheel van evaluaties van het normale-evolutiescenario en de eerste, hoofdzakelijk kwalitatieve evaluaties van gewijzigde-evolutiescenario's hebben geleid tot bepaalde resultaten en overwegingen die de dosisberekeningen en de berekeningen van alternatieve indicatoren aanvullen.

Opbouwen van het vertrouwen in de migratiemodellen De uitstekende overeenstemming tussen de radionuclidenconcentraties die vooraf waren berekend op basis van de laboratoriumresultaten, en de concentraties die in situ werden gemeten op grote schaal, ondersteunt de validiteit van het migratiemodel in de Boomse Klei dat wordt gebruikt voor de niet-vertraagde radionucliden. De zeer langzame migratie van de vertraagde radionucliden en vooral van de actiniden, die leidt tot migratietijden in de Boomse Klei in de grootteorde van 100 000 tot één miljoen jaar, wordt bevestigd door de vaststelling dat de natuurlijk aanwezige isotopen van thorium en van uranium, nagenoeg immobiel zijn gebleven sinds de klei werd afgezet.

Vergelijking met de resultaten van de vroegere veiligheidsevaluaties

- *Activerings- en fissieproducten* Door hypothesen die veel conservatiever zijn dan in het verleden, hebben de meest recente veiligheidsevaluaties het belang aangetoond van twee radionucliden die niet beschouwd werden of die niet leidden tot belangrijke doses in de vorige veiligheidsevaluaties: enerzijds ³⁶Cl, een activeringsproduct dat afkomstig is van de bestraling van chlooronzuiverheden in splijtstoffen en hulzen en waarvan de inventaris was onderschat; anderzijds ⁷⁹Se, waarvan de migratie in de Boomse Klei nog niet goed genoeg begrepen wordt, zodat men voorzichtigheidshalve de afwezigheid van sorptie

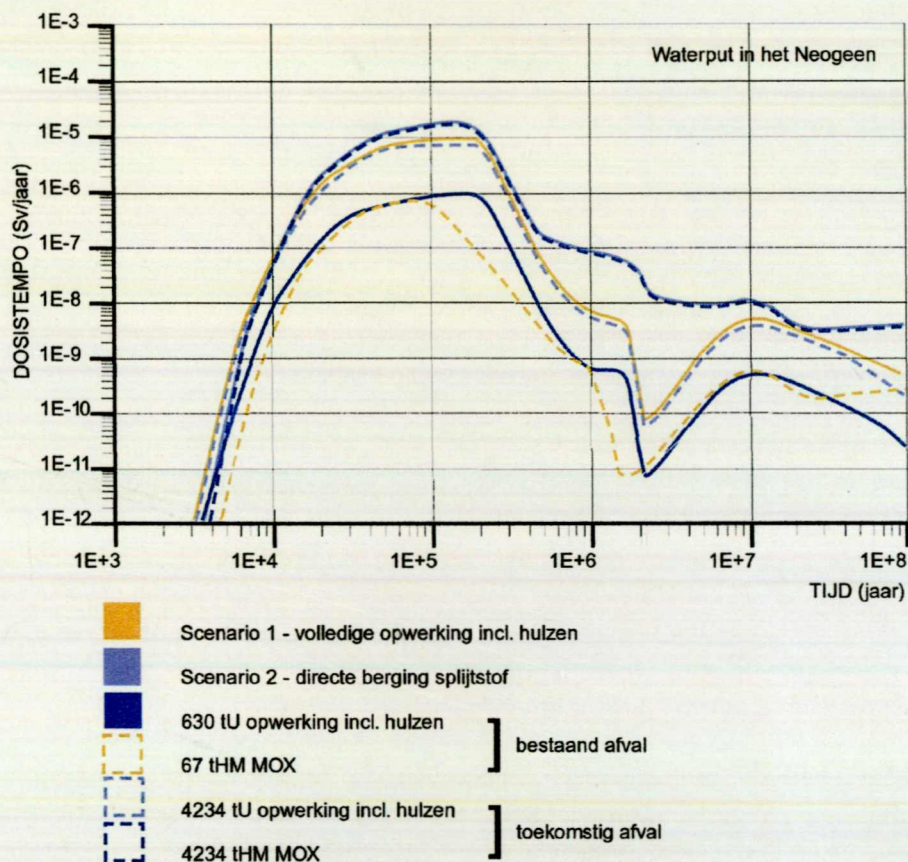
heeft verondersteld, en waarvan de transfercoëfficiënten in de biosfeer vaak conservatief worden geraamd. De oplosbaarheid en de eventuele retentie van ^{79}Se worden bijgevolg parameters die zijn flux naar de watervoerende laag sterk beïnvloeden en dus nauwkeurig gekend moeten zijn, zeker in het geval dat bevestigd wordt dat ^{79}Se niet sorbeert op de Boomse Klei.

- *Actiniden* De hoogste doses blijven toe te schrijven aan de dochterradianucliden van uranium, namelijk ^{229}Th en ^{226}Ra .
- ^{129}I Aangezien gebleken is dat de ^{129}I -activiteit waarmee rekening is gehouden voor verglaasd afval, sterk overschat is, is de radiologische impact van het ^{129}I in verglaasd afval eveneens sterk overschat, in dezelfde verhoudingen.

Invloed van de halveringstijd van ^{79}Se Terwijl de berekeningen die zijn gemaakt in het kader van de Belgische veiligheidsevaluaties werken met een halveringstijd van 65 000 jaar voor ^{79}Se , noemen verschillende buitenlandse bronnen sinds kort veel hogere waarden. Er is dus een eerste evaluatie uitgevoerd van de impact van een veel waarschijnlijker halveringstijd van 650 000 jaar op de berekende doses. Deze evaluatie wijst op een daling met een factor 5 van de maximale doses toe te schrijven aan ^{79}Se . Dit is een maximale dosis van ongeveer 2 μSv per jaar voor het verglaasde afval en van ongeveer 4 μSv per jaar voor de bestraalde splijtstoffen. De duur van blootstelling daarentegen wordt verlengd.

Vergelijking van de radiologische impact van de twee opwerkingsscenario's De maximale doses tengevolge van de twee opwerkingsscenario's, liggen ten minste één grootteorde onder de dosisbeperkingen (0.1 tot 0.3 mSv per jaar): de maximumdoses bedragen 10 μSv per jaar voor het scenario met opwerking en 20 μSv per jaar voor het scenario van directe berging (fig. 4.22). Gedurende de eerste 500 000 jaar zijn de verschillen tussen de berekende totale doses voor de twee scenario's erg gering, ten hoogste een factor 2. In de twee gevallen is de maximale dosis vooral toe te schrijven aan ^{79}Se . Na 500 000 jaar verschijnen de belangrijkste verschillen tussen de berekende doses voor de twee scenario's, maar de doses zijn dan 2 tot 3 grootteorden lager dan de maximale doses. Op zeer lange termijn, na ongeveer 20 miljoen jaar, bedraagt het verschil tussen de berekende doses voor de twee scenario's ongeveer één grootteorde, als gevolg van de aanzienlijk hogere hoeveelheid geborgen actiniden in het scenario van directe berging.

Invloed van de complexering door de mobiele organische stof De uitgevoerde preliminaire evaluaties tonen aan dat de stijging van de maximale flux van radionucliden in het Neogeen, als gevolg van complexering van actiniden door mobiele organische stof verwaarloosbaar is voor de drie beschouwde afvalklassen. Enkele actiniden kunnen de watervoerende laag in zeer kleine hoeveelheden bereiken na ongeveer 10 000 jaar. Dit is sneller dan geraamd op basis van de sorptie waargenomen voor een groot deel van die actiniden. Na 10 000 jaar bereiken echter alleen niet-vertraagde activerings- en fissieproducten zoals ^{129}I en ^{79}Se de watervoerende laag in aanzienlijk grotere hoeveelheden.



Figuur 4.22 Evolutie van de totale dosistempo's voor de twee opwerkings-scenario's in het geval van het normale-evolutiescenario.

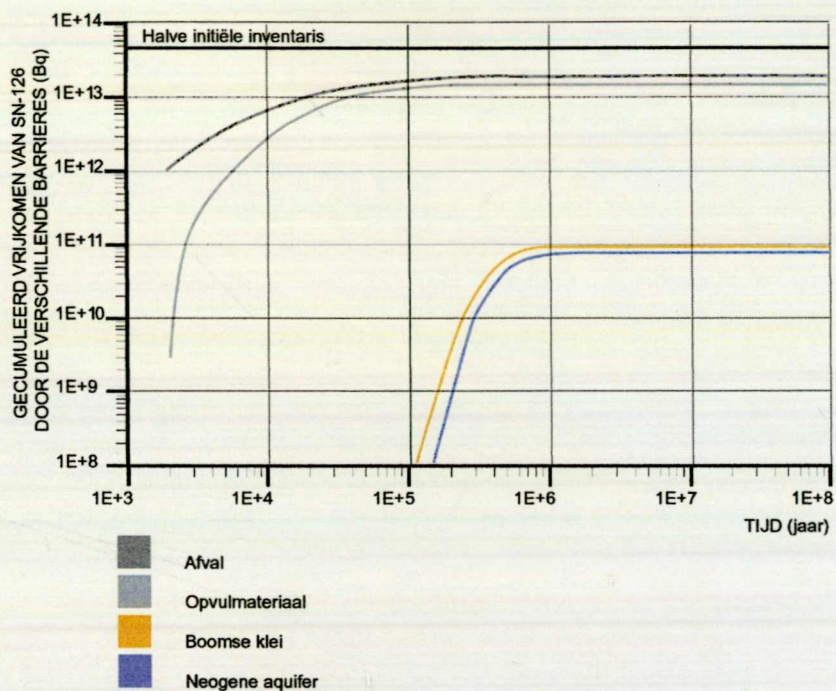
Belang van de onzekerheden op fluxen en doses tengevolge van de onzekerheden in de waarden van de parameters die het robuuste bergingssysteem karakteriseren

- *Onzekerheden over de radionuclideninventarissen* Ondanks het gebruik van conservatieve hypothesen is de radiologische impact van de radionucliden voor de grote meerderheid onder hen verschillende grootteorden kleiner dan de dosisbeperking, zodat de onzekerheden over de inventarissen niet doorslaggevend zijn. Alleen voor de niet-vertraagde radionucliden ^{129}I , ^{36}Cl en ^{79}Se moeten de inventarissen nauwkeurig gekend zijn.
- *Onzekerheden over de levensduur van de waterdichte verpakkingen (en/of mantels)* Deze onzekerheden zijn niet doorslaggevend, voor zover de Boomse Klei haar barrièrerol correct vervult, omdat de verpakkingen (en/of mantels) geen aanzienlijke beperking van de fluxen mogelijk maken, en slechts een aanzienlijke uitstel van de fluxen van niet-vertraagde radionucliden mogelijk maken indien hun levensduur hoger is dan 100 000 jaar. De verpakkingen (en/of mantels) moeten niettemin hun functie van fysische insluiting vervullen tijdens de thermische fase van het bergingssysteem.

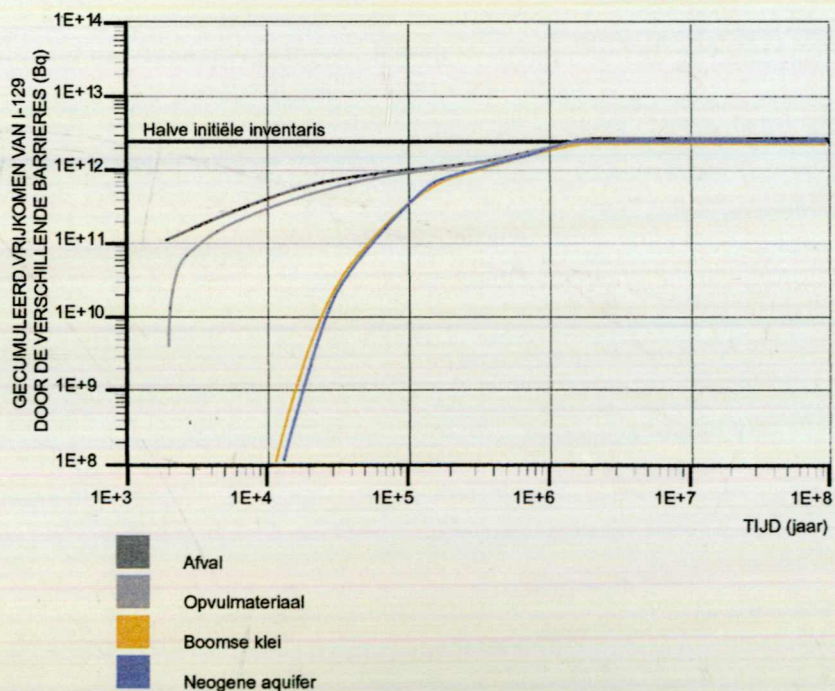
- *Onzekerheden op de degradatiesnelheid van de glas-, UO_2 - en UO_2 - PuO_2 -matrices* Deze onzekerheden hebben geen wezenlijke invloed op de fluxen, wegens de goede prestaties van de kleibarière. Zeker voor langlevende radionucliden, vertraagde radionucliden en radionucliden met een lage oplosbaarheidsgrens is dit het geval. Enkel indien de conditioneringsmatrices een levensduur van meer dan 500 000 jaar bezitten, hebben zij een duidelijke invloed op de flux van niet-vertraagde radionucliden die de kleilaag verlaten. Voor relatief kortlevende en niet-vertraagde radionucliden zoals ^{14}C kunnen ze daarentegen wel een belangrijke bijdrage leveren. Zij dragen niet bij tot de insluiting van de actiniden, omdat de lage oplosbaarheid van de actiniden aan de basis ligt van het zeer trage vrijkomen.
- *Onzekerheden over de migratieparameters* Het belang van deze onzekerheden is voor niet-vertraagde radionucliden zeer beperkt omdat hun belangrijkste parameters de migratieparameters zijn, die men in het geval van ^{36}Cl en ^{129}I nauwkeurig kent of die in het geval van ^{79}Se zeer voorzichtig zijn geraamd. (De waarden van de migratieparameters, en in het bijzonder van de retardatiefactoren, voor vertraagde radionucliden, zijn echter zeer slecht gekend.)
- *Onzekerheden over de werkelijke dikte van de kleibarière* Hoewel de dikte van de kleilaag één van de parameters is die het meest invloed uitoefent op de insluiting, blijft de impact ervan vrij gering. Bijgevolg blijft de impact van de onzekerheid over de exacte waarde van de dikte ook vrij gering. Voor een stijging met 10 % van de dikte van de kleibarière, dit is een stijging met ongeveer 10 meter, daalt de maximale radionuclidenflux naar de watervoerende laag van het Neogeen immers met gemiddeld 18 %.

Rol van de verschillende barrières in de globale werking van het bergingssysteem De bijdrage van de verschillende barrières van de omgeving van het bergingssysteem tot de veiligheid van het globale systeem kunnen worden gevisualiseerd door de gecumuleerde hoeveelheid activiteit die door elke barrière wordt vrijgezet, te berekenen voor representatieve radionucliden. De berekeningen werden uitgevoerd voor ^{126}Sn en ^{129}I , respectievelijk een vertraagd radionuclide met een halveringstijd van 100 000 jaar en een niet-vertraagd radionuclide met een halveringstijd van 16 miljoen jaar. De resultaten wijzen duidelijk op de overheersende rol van de geologische barrière (figuren 4.23 en 4.24).

Evaluatie van de gewijzigde-evolutiescenario's De eerste, hoofdzakelijk kwalitatieve evaluaties van sommige gewijzigde-evolutiescenario's suggereren dat deze scenario's geen drastische verhoging van de radiologische impact tot gevolg hebben. Deze evaluaties moeten echter worden uitgediept en uitgebreid met de nog niet bestudeerde scenario's, om echt overtuigende elementen te verstrekken over de impact van deze scenario's.



Figuur 4.23 Gecumuleerde hoeveelheden ^{126}Sn die door de verschillende barrières van het bergingssysteem en door zijn omgeving worden vrijgezet (1980 tuox-55).



Figuur 4.24 Gecumuleerde hoeveelheden ^{129}I die door de verschillende barrières van het bergingssysteem en door zijn omgeving worden vrijgezet (1980 tuox-55).

4.4 Vermijden van kritikaliteit

De langetermijn veiligheid kan in het gedrang worden gebracht door het optreden van kritikaliteit binnen een bergingssysteem, dit is een spontane en zelfonderhoudende kettingreactie (zie sectie 2.2.4). Tot nog toe heeft men zich beperkt tot het opstarten van eerste studies betreffende het risico op kritikaliteit bij berging van bestraalde splijtstof, omdat deze afvalklasse verreweg de grootste hoeveelheden fissiel materiaal bevat.

Het risico op kritikaliteit moet zowel bestudeerd worden voor een ongewijzigde referentieconfiguratie van de bergingsinstallatie, als voor een gewijzigde configuratie die rekening houdt met wijzigingen in fysische- en chemische samenstelling van de splijtstof en met mechanische vervormingen. Voor een ongewijzigde configuratie waarbij bovendien de zeer conservatieve onderstelling gemaakt wordt dat water binnendringt in de mantel, en vervolgens de opvulling met zand volledig satureert, is men nog steeds zeer ver verwijderd van kritikaliteit, ondanks het feit dat dit water de moderatie van de neutronen zeer sterk verhoogt. Met uitzondering van een eerste onderzoeksprogramma naar de oplossing van UO_2 door interstitieel water (zie sectie 3.4.1.2), werd tot nog toe nog geen systematische studie uitgevoerd naar de risico's op kritikaliteit tengevolge van progressieve en onvermijdelijke wijzigingen die zullen optreden in de referentieconfiguratie.

4.5 Perspectieven

De verbetering van de kwaliteit van de langetermijn veiligheidsevaluaties in de komende jaren zal vooral door volgende punten bewerkstelligd worden.

- *Een discussie ten gronde over de verworvenheden op niveau van de algemene veiligheidsmethodologie met de veiligheidsautoriteiten, teneinde te komen tot een verduidelijking van die aspecten van deze methodologie die in de volgende fasen van het programma versterkt, aangepast of uitgebreid dienen te worden.*
- *Een verfijning van de veiligheidsmethodologie, in het bijzonder een verbetering van de methodologie voor scenario-ontwikkeling, een herziening van de FEPS waarmee rekening moet gehouden worden, en een betere definitie van de tijdsschalen waarbinnen de verschillende elementen van het bergingssysteem en haar omgeving als robuust kunnen beschouwd worden. Door een systematisch gebruik van de veiligheidsfuncties en de FEPS beoogt men een doorgedreven integratie van alle veiligheidsrelevante elementen van de bergingsarchitectuur (met inbegrip van het te bergen afval), van de geologische barrière en van de hydrogeologische omgeving in de veiligheidsevaluaties. Ook de transparantie van de veiligheidsmethodologie zal verhoogd worden door de gebruikte afvalinventarissen, rekenmodellen en beschouwde bergingssystemen in de mate van het mogelijke eenduidiger te maken.*
- *Een verfijning van de gebruikte modellen in de langetermijn veiligheidsevaluaties, en meer specifiek bij de abstractie en vereenvoudiging van het bergingssysteem en bij de biosfeermodellen voor het normale-evolutiescenario. De relatie tussen de gedetailleerde onderzoeksmodellen (bijvoorbeeld voor de degradatie van de afvalmatrix of voor de*

metalen mantel) en de vereenvoudigde modellen of veronderstellingen gebruikt in de veiligheidsevaluaties zal verduidelijkt worden.

- *Een integratie van de impact die de heterogeniteiten van de Boomse Klei en de door de uitgraving verstoorde zone hebben op de migratie van radionucliden.* Vooral de mogelijke impact op de radionuclidenfluxen doorheen het grensvlak tussen Boomse Klei en watervoerende lagen, en dus op de radiologische veiligheid, van de aanwezigheid van meer permeabele sub-lagen in de Boomse Klei verdient hierbij de nodige aandacht.
- *Een systematisatie van de definitie, de selectie en de evaluatie van de gewijzigde-evolutiescenario's,* meer specifiek voor de gevolgen op de klei en de hydrogeologische omgeving van klimaatwijzigingen zoals opwarming en ijstijden. De gewijzigde-evolutiescenario's, waarvan een aantal het voorwerp zijn geweest van een eerste verkennende beschrijving en impactanalyse, zullen opnieuw op een meer transparante en geïntegreerde wijze geëvalueerd worden, in nauw overleg met de veiligheidsautoriteiten. Een versterking van de technisch-wetenschappelijke basis van de scenario-beschrijving en -modellering wordt daarbij nagestreefd, onder andere door een bredere discussie van deze basis met de wetenschappelijke wereld.
- *Een verfijning van de definitie en van de interpretatie van een geheel aan indicatoren die de veiligheid en de bescherming van het leefmilieu demonstreren,* waarbij bijzondere aandacht besteed zal worden aan de verschillende tijdsschalen.
- *Een bepaling van methodes voor het evalueren van de robuustheid van het bergingssysteem en het identificeren en kwantificeren van de elementen die bijdragen tot deze robuustheid.* De relatie tussen het optimaliseren van de radiologische veiligheid en het versterken van de robuustheid van het bergingssysteem zal verduidelijkt worden.
- *Een identificatie van de verschillende types van resterende onzekerheden en indien nodig een bepaling van de nodige middelen voor het verminderen van deze onzekerheden, en een verfijning van de methodes nodig voor hun behandeling.* Naarmate het programma vordert zal meer en meer aandacht moeten uitgaan naar het aantonen dat de resterende onzekerheden op een beproefde wijze weggenomen kunnen worden of geen belangrijke invloed hebben op de technische doenbaarheid enerzijds en de te bieden bescherming van mens en milieu anderzijds.
- *Een preliminaire veiligheidsevaluatie voor de afvalklassen geconditioneerd in bitumen en beton.* In deze evaluaties zullen grotendeels de verenigbaarheidsaspecten met de Boomse Klei nagegaan worden.
- *Het verzamelen van een geheel aan kwalitatieve en kwantitatieve argumenten die op indirecte wijze de veiligheidsevaluaties ondersteunen.* Het betreft hier voornamelijk elementen afkomstig van de karakterisering van de geologische barrière en de hydrogeologische omgeving die de stabiliteit en de insluitingscapaciteit van het bergingssysteem ondersteunen en elementen afkomstig van relevante natuurlijke analogieën.

Aan deze verschillende punten worden uiteraard de conventionele operationele veiligheid en de bescherming van het leefmilieu toegevoegd, waarbij een door de veiligheidsautoriteiten goedgekeurde methodiek zal gevolgd worden. In dit verband zullen ook de aspecten die

verband houden met de radiologische optimalisatie (ALARA principe) uitgewerkt worden, tevens in nauw overleg met de veiligheidsautoriteiten vermits dit een belangrijk aspect zal vormen van dit toekomstig overleg.

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 veiligheidsevaluaties 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 (zie sectie 3.1.2), de gekozen bergingsarchitectuur en de overeenkomstige gedetailleerde meetstaat (zie 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 1 500 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, *langetermijnfonds* 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 langetermijnfonds 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 langetermijnfonds.

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 Ieperiaan-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	6.3
6.1.1	Verworven kennis en open vragen	6.3
6.1.2	Relatief belang van de resterende onzekerheden	6.10
6.2	Elementen voor het toekomstige methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma	6.16
6.2.1	De krachtlijnen	6.16
6.2.2	De elementen waarmee rekening dient gehouden	6.18
6.2.3	De volgende etappes	6.23
6.3	De evaluatie van het vertrouwen	6.26

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*

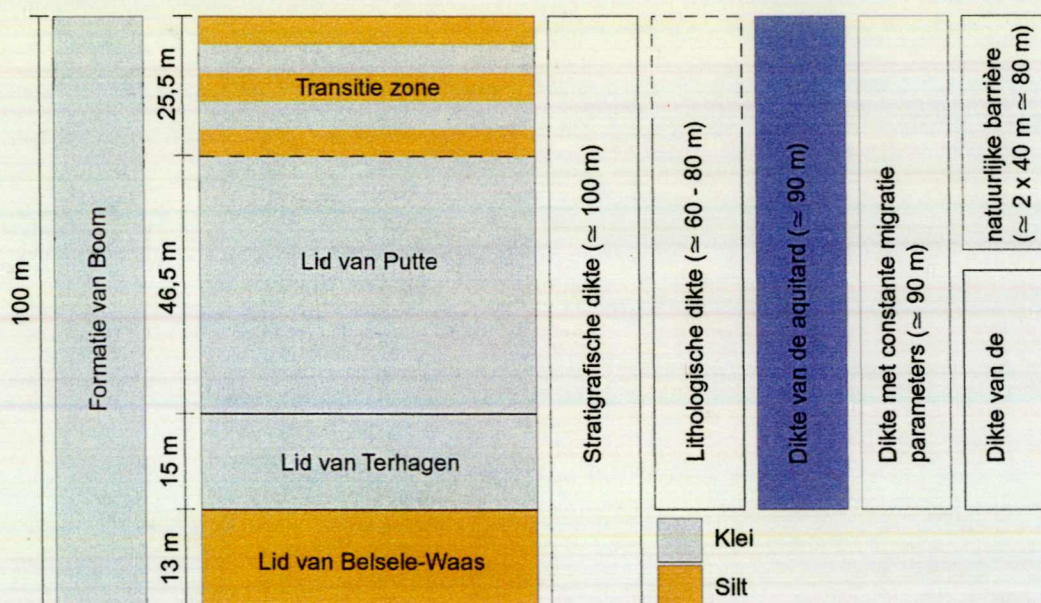
watervoerende laag onder de klei en de mogelijkheid van hydraulische kortsluiting via breuken op regionale schaal zouden verder moeten worden bestudeerd om deze incoherentie op te helderen. De analyse van de oorsprong en de evolutie van de chemische samenstelling van de watervoerende en de semi-watervoerende 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 uitlozing 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 maquette OPHELIE 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 bevrozing 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 10000 jaar afgeleid op basis van de initiële, zeer nadelige corrosiesnelheden. De devitrificatie of ontglazing 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 UO_2 -matrices en van de andere componenten van de bestraalde splijtstoffen en de kennis van de verenigbaarheid van de beton- 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 veiligheidsevaluaties. Bovendien zal de studie van hun verenigbaarheid met het bergingsmilieu rekening moeten houden met verschijnselen zoals de veroudering, de zwelling en de radiolyse van de bitumenmatrix alsook het vrijkomen van natriumnitraten (Eurobitum-afval). 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 OPHELIE-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 splijtstof). 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 splijtstof 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 bergingsgaleries voor het verglaasde afval, zal 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 gecompacteerd 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-evolutiescenario'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 10 000 jaar en wordt gekenmerkt door een radiologische impact op de omgeving die zo goed als onbestaande is.

Geologische fase: periode na 10 000 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 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-evolutiescenario 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 veiligheidsfunctie C2, beperking van de watertoevoer (fysische insluiting), wordt niet in rekening gebracht in de veiligheidsevaluaties.)

Component	Thermische fase (enkele honderden tot enkele duizenden jaar)	Isolatiefase (< 10000 jaar)	Geologische fase (> 10000 jaar)
Glasmatrix	–	R1	R1
UO ₂ -matrix	–	R1	R1
Beton-/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 referentiearchitectuur, 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 veiligheidsevaluaties. Een globale beoordeling van deze resterende onzekerheden wordt uitgevoerd bij de evaluatie van het huidige vertrouwen in de bestudeerde oplossing (zie 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 versturende gebeurtenissen 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 Eurobitum-afval) 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 vertragsingsmechanismen (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 zwelling), vormt de chemische en fysische verenigbaarheid van de bitumen- en betonmatrices 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 splijstof 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 (glas en bestraalde splijstoffen, de enige matrices die als barrière moeten worden beschouwd). Hoewel de kennis van de degradatiemechanismen van het verglaasde afval een vergevorderd stadium heeft bereikt, is zij nog ontoereikend voor bestraalde splijstoffen. 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 splijstoffen ligt in de manier waarop moet worden gekomen tot de beargumenteerde vereenvoudiging van de bronterm (voorstelling van de heterogeniteit van de splijstofelementen) 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 (alook 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 (klimaatveranderingen, 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 veiligheisevaluaties 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 voorgedijoverheid 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 prestaties voor de verschillende componenten van het bergingssysteem, aan het belang van de rol en de prestatie van elke component van het bergingssysteem in de algemene prestatie 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 Mo-Dessel kan worden overgedragen op andere gastformaties (in het bijzonder op de leperiaan-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 hydrogeochemische 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.*
- *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, en de impact op de korte- en langetermijn veiligheid 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 beton.*
- *Samenbrengen van alle kwalitatieve en kwantitatieve argumenten die de veiligheidsevaluaties 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 leperiaan-kleien

- *Voortzetting van de preliminaire studies betreffende de leperiaan-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 gastformatie.)*

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 innoverend 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:

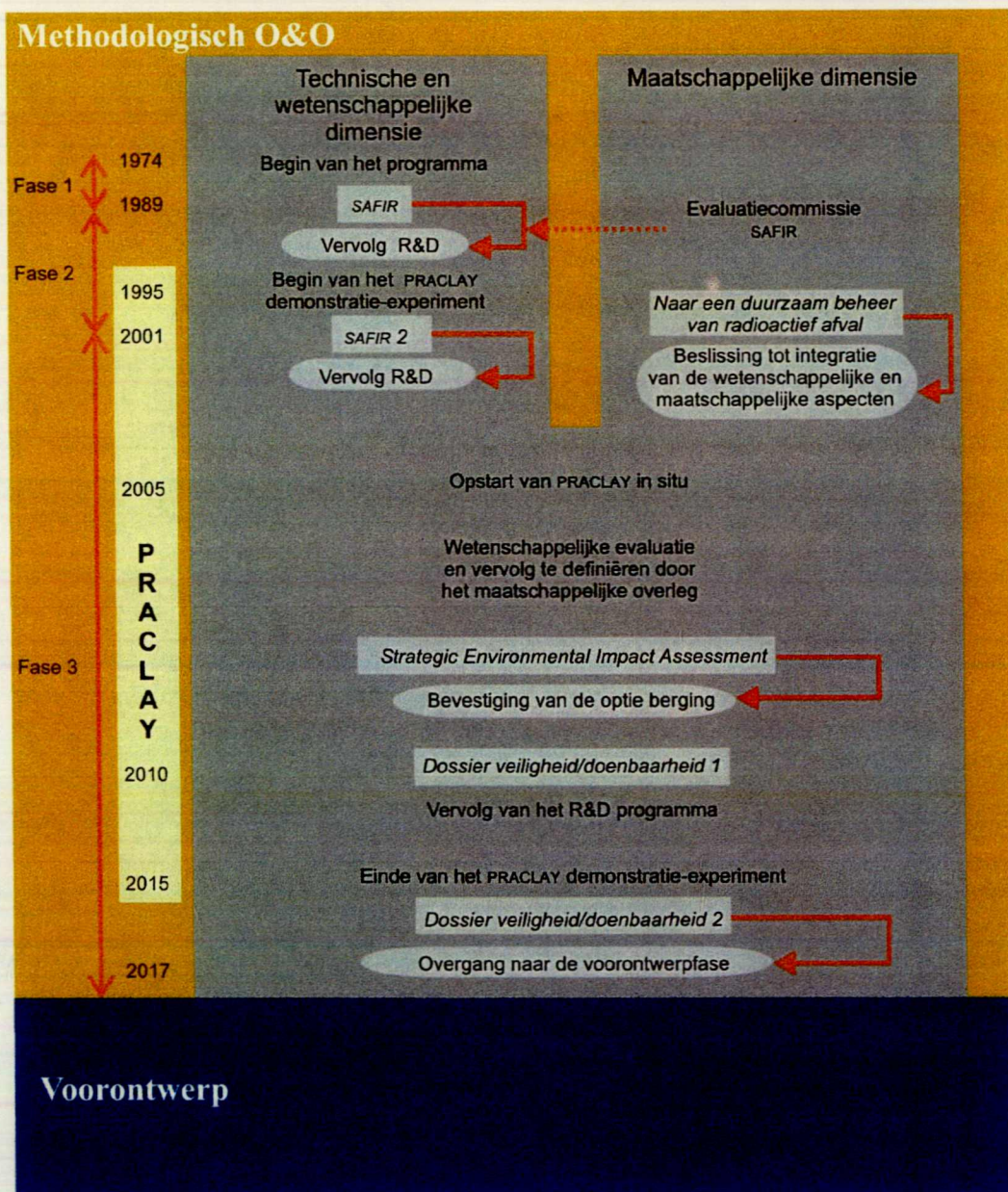
voor de Boomse Klei in Mol-Dessel:

- 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.



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).

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.

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 diepebergingssysteem 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 synthesesewerk 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 referentiebergingsarchitectuur 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 bergingssysteem 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 bergingssysteem 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 bergingssysteem. Om deze problematiek te kunnen beoordelen, moet vooreerst nagegaan worden welke processen cruciaal zijn voor het gedrag en de evolutie van de barrière, 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 overschaduwd 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 quaternaire 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 ontgassing).

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 voorgedijminister 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. 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 leperiaan-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 watervoerende 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 robuustheidsindicatoren;
- 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 leperiaan-kleien als alternatieve gastformatie aanbevolen, maar het kennisniveau dat voor de leperiaan-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 leperiaan-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.

Bijlagen

B.1 Figuren, tabellen en kaders

	page
Figuren	
1.1 Algemene benadering in het Belgische methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma voor diepe berging (zie ook fig. 2.2).	1.5
2.1 De opties die kunnen beschouwd worden voor het langetermijn beheer van radioactief afval. De door NIRAS bestudeerde referentie-optie voor het beheer van afval van categorieën B en C is concentratie en insluiting door berging.	2.1
2.2 De belangrijkste fasen van de stapsgewijze realisatie van een bergingssysteem.	2.3
2.3 Gemiddelde jaarlijkse blootstelling aan ioniserende stralingen in België.	2.6
2.4 Principeschema van een diepebergingsinstallatie en bijbehorende terminologie.	2.8
2.5 De functies van langetermijn veiligheid van het bestudeerde diepebergingssysteem zoals in aanmerking genomen bij de veiligheidsevaluaties op lange termijn voor het normale-evolutiescenario.	2.9
2.6 De vier fases van de normale evolutie van een bergingssysteem voor het afval van categorie C die vanuit radiologisch en thermisch oogpunt de hoogste vereisten stellen.	2.12
3.1 De classificatie van geconditioneerd radioactief afval in België.	3.5
3.2 Lokalisatie van de nucleaire zones van Mol-Dessel en van Doel.	3.15
3.3 Locatie van de belangrijkste boringen en geofysische verkenningscampagnes op en rond de nucleaire zone van Mol-Dessel.	3.16
3.4 Lithostratigrafisch profiel van de Boomse Klei en lithologische variaties.	3.18
3.5 Algemeen beeld van een kleigroeve waar de karakteristieke strooksgewijze structuur van de Boomse Klei te zien is.	3.18
3.6 Beeld van een septaria.	3.18
3.7 Diepte van de basis en dikte van de Formatie van Boom.	3.20
3.8 Geologische doorsnede in de boring Mol-1.	3.21
3.9 Microresistiviteitsmeting in de boring Mol-1 en zijn interpretatie.	3.23
3.10 Detail van het signaal dat door seismische reflectie wordt verkregen in de Boomse Klei.	3.26
3.11 Schematische voorstelling van de opeenvolging van de watervoerende lagen en semi-watervoerende lagen van het Tertiair en het Quartair van het Bekken van de Kempen.	3.29
3.12 Lokalisatie van de piëzometers, met inbegrip van de vier boringen van de laatste hydrogeologische campagne.	3.3
3.13 Evolutie van de niveaus van enkele piëzometers die representatief zijn voor (a) de watervoerende laag van het Neogeen (Zanden van Diest), (b) de watervoerende laag van het Onder-Rupeliaan en (c) de watervoerende laag van het Ledo-Brusseliaan.	3.3
3.14 Geografische en geologische afbakening van de drie hydrogeologische modellen.	3.3
3.15 Piëzometrie van de watervoerende lagen van het Neogeen, berekend met de referentieversie van het regionale model.	3.3

B.2

3.16	Piëzometrie van de watervoerende lagen van het Onder-Rupeliaan en van het Ledo-Brusseliaan, berekend met de referentieversie van het regionale model.	3.4
3.17	Impact van een vermindering van de infiltratie met factor 3 (droogte) op de piëzometrie van het Neogeen en van het Onder-Rupeliaan.	3.4
3.18	Impact van een fluviatiele erosie, veroorzaakt door een daling van de zeespiegel, op de piëzometrie van het Neogeen en van het Onder-Rupeliaan.	3.4
3.19	Piëzometrie verkregen met het subregionale model.	3.4
3.20	Vaststelling, dankzij het lokale model, van de trajecten van de waterdeeltjes die de referentiesite langs boven verlaten.	3.4
3.21	De mantel gebruikt voor de demonstraties in de PRACLAY-hal.	3.5
3.22	De referentie-bergingsarchitectuur voor diepe berging van verglaasd afval.	3.5
3.23	Dwarsdoorsnede van een bergingsgalerij voor verglaasd afval waarop het principe van de meervoudige barrières te zien is.	3.5
3.24	De referentie-diepebergingsarchitectuur voor bestraalde splijtstof.	3.5
3.25	Het ondergrondse onderzoekslaboratorium HADES.	3.6
3.26	Algemeen zicht op het ondergrondse onderzoekslaboratorium HADES.	3.6
3.27	De drie bekledingstypes die tot nog toe werden gebruikt in de ondergrondse galerijen.	3.6
3.28	Graven van de tweede schacht.	3.6
3.29	Graven van de tweede schacht. Glijvlak en scheuren waargenomen bij het graven van de aanzet van de verbindingsgalerij.	3.6
3.30	Foto van de installatie voor de manutentie van de mantel met verglaasd afval in de expositiehal HADES-PRACLAY.	3.6
3.31	De OPHELIE-maquette.	3.7
3.32	Belangrijkste etappes van de oplossing van het verglaasde afval.	3.76
3.33	Voorstelling van de oplossingsmechanismen van de UO_2 -matrix.	3.81
3.34	Vergelijking tussen experimentele resultaten en theoretische curves voor de in situ migratietest met getritieerd water.	3.92
3.35	Profiel van de activiteit van ^{134}Cs in de kleikern voor de in situ percolatietest.	3.92
3.36	De verschillende mogelijke interacties tussen de radionucliden en de organische stof.	3.96
3.37	Verdeling van de radionucliden volgens hun concentraties in de percolatieoplossingen in functie van de tijd.	3.97
3.38	Elutieprofielen verkregen aan de hand van met ^{14}C gemerkte organische stof van verschillend moleculegewicht.	3.100
3.39	Variabiliteit van de migratieparameters voor de elementen HTO en I^- en van de hydraulische geleidbaarheid over de dikte van de Boomse Klei op de plaats van de boring Mol-1.	3.102
3.40	Schema van het in situ-experiment CERBERUS dat een stralingsveld en een thermisch veld combineert.	3.107
3.41	Thermisch veld opgewekt door een bergingsinstallatie voor verglaasd afval.	3.110
3.42	Het biosfeermodel.	3.123
3.43	Dikte en diepte van de top van de Formatie van Kortrijk.	3.127
4.1	Het iteratieve proces van de langetermijn veiligheidsevaluaties dat kadert in de progressieve en flexibele realisatie van het bergingssysteem.	4.5

4.2	Waarschijnlijke externe gebeurtenissen die de evolutie in de tijd van het bergingssysteem en zijn omgeving kunnen beïnvloeden, robuustheid van de belangrijkste componenten van het systeem en zijn omgeving en evolutie van het type van berekeningen die in de veiligheidsevaluaties worden gemaakt.	4.13
4.3	Belangrijkste componenten van het bergingssysteem en zijn omgeving en belangrijkste processen waarmee rekening wordt gehouden in de beschrijving van het normale-evolutiescenario.	4.15
4.4	Schematische voorstelling van het normale-evolutiescenario (water-winning) en het exploitatieboringsscenario.	4.15
4.5	Relatief gewicht van de twee groepen veiligheidsindicatoren en van de kwalitatieve argumenten.	4.18
4.6	Configuratie en vereenvoudigingen waarmee rekening wordt gehouden voor de migratieberekeningen in het nabije veld en in de kleilaag.	4.22
4.7	Aan het verglaasde afval toe te schrijven ^{129}I -flux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen.	4.25
4.8	Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan verglaasd afval, bestraalde splijtstof en hulzen en eindstukken.	4.26
4.9	Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan activerings- en fissieproducten in het verglaasde afval.	4.27
4.10	Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan de actiniden van de keten $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ in het verglaasde afval.	4.27
4.11	Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan de activerings- en fissieproducten in de bestraalde splijtstof (1980 tuOX-55), zoals berekend met het alfa-auto-oxidatiemodel.	4.28
4.12	Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan de actiniden van de keten $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ in de bestraalde splijtstof (1980 tuOX-55), berekend met het alfa-auto-oxidatiemodel.	4.29
4.13	Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan de activerings- en fissieproducten in de hulzen en eindstukken.	4.30
4.14	Activiteitsflux doorheen het grensvlak tussen de Boomse Klei en de watervoerende laag van het Neogeen, toe te schrijven aan de actiniden van de keten $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ in de hulzen en eindstukken.	4.30
4.15	Totaal dosistempo via een waterput van de activerings- en fissieproducten in het verglaasde afval.	4.33
4.16	Totaal dosistempo via een waterput van de actiniden in het verglaasde afval.	4.33
4.17	Totaal dosistempo via een waterput van de activerings- en fissieproducten in 1980 tuOX-55.	4.34
4.18	Totaal dosistempo via een waterput van de actiniden in 1980 tuOX-55.	4.34
4.19	Totaal dosistempo via een waterput van de activerings- en fissieproducten en actiniden in het geheel van bestraalde splijtstoffen.	4.35

B.4

4.20	Totaal dosistempo via een waterput van de activerings- en fissieproducten in de hulzen en eindstukken.	4.35
4.21	Gecumuleerde activiteit, afkomstig van het verglaasde afval, die de watervoerende laag van het Neogeen bereikt.	4.36
4.22	Evolutie van de totale dosistempo's voor de twee opwerkings-scenario's in het geval van het normale-evolutiescenario.	4.42
4.23	Gecumuleerde hoeveelheden ^{126}Sn die door de verschillende barrières van het bergingssysteem en door zijn omgeving worden vrijgezet (1 980 tUOX-55).	4.44
4.24	Gecumuleerde hoeveelheden ^{129}I die door de verschillende barrières van het bergingssysteem en door zijn omgeving worden vrijgezet (1 980 tUOX-55).	4.44
6.1	De verschillende dikten van de laag Boomse Klei onder de nucleaire zone van Mol-Dessel.	6.5
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).	6.25

Tabellen

3.1	De kenmerken van de drie categorieën radioactief afval volgens de internationale classificatie.	3.4
3.2	Inventaris van het radioactieve afval dat bestemd is voor diepe berging.	3.7
3.3	Inventaris van de radionucliden waarmee rekening wordt gehouden in de evaluaties van de langetermijn veiligheid voor het afval dat op radiologisch en thermisch vlak de zwaarste eisen met zich meebrengt.	3.10
3.4	Belangrijkste mineralogische kenmerken van de Boomse Klei	3.23
3.5	Beste raming en betrouwbaarheidsinterval voor de horizontale en verticale hydraulische geleidbaarheid van de Boomse Klei.	3.34
3.6	Overzicht van de in aanmerking genomen mogelijke hydrogeologische evoluties.	3.41
3.7	Belangrijkste kenmerken van de bergingsarchitectuur die wordt overwogen voor het verglaasde afval, functies verzekerd door de hoofdcomponenten van het systeem en zijn omgeving en, met vet, functies in aanmerking genomen in de evaluaties van radiologische langetermijn veiligheid voor het normale-evolutiescenario.	3.55 3.93
3.8	Kenmerken van het poriënwater van de Boomse Klei.	
3.9	Vast-vloeistof interacties die kunnen bijdragen tot de retentie van de radionucliden in de Boomse Klei, gegroepeerd in stijgende orde van reactietijd.	3.95
3.10	Factoren en/of processen die het gedrag van de bestudeerde radionucliden in de Boomse Klei bepalen.	3.98
3.11	Niet-gedraineerde geomechanische kenmerken van de Boomse Klei ter hoogte van de bestaande ondergrondse installaties (223 m diepte), in de veronderstelling dat de klei een perfect elastoplastisch gedrag vertoont.	3.112
4.1	Overzicht van de veiligheidsevaluaties betreffende het diepebergingssysteem die vóór	4.3

	1996 zijn uitgevoerd in het kader van het Belgische programma.	4.10
4.2	Classificatie van de FEPs.	
4.3	Classificatie van de FEPs volgens de toestand van het bergingssysteem en zijn omgeving (1 = component intact; 0 = component "kortgesloten").	4.11
4.4	Belangrijkste kenmerken van de brontermen die worden gebruikt in de berekeningen van de migratie in het nabije veld en de Boomse Klei.	4.24
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 10 ⁶ EUR van 2000].	5.2
6.1	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.	6.10

Kaders

Afval van categorieën B en C	1.1
Berging	1.3
Bergingsinstallatie	1.3
Bergingssysteem	1.3
Bergingsarchitectuur	1.4
Hoofddoelstellingen van de tweede fase van het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS	1.7
Veiligheidsevaluatie	2.2
Effectieve dosis	2.5
Equivalente dosis	2.5
Geabsorbeerde dosis	2.5
Dosislimiet	2.6
Dosisbeperking	2.6
De drie basisprincipes van de stralingsbescherming	2.6
Barrière	2.7
Omgeving van het bergingssysteem	2.8
Biosfeer	2.8
Nabije veld	2.8
Verre veld	2.8
Geosfeer	2.8
Veiligheidsfunctie	2.11
Veiligheidsreserve	2.12
Robuustheid	2.13
Terugneembaarheid	2.16

B.6

Granulometrie	3.17
Septaria	3.18
Magnitude	3.25
Intensiteit	3.25
Watervoerende laag	3.27
Semi-watervoerende laag	3.27
Drainering	3.32
Safeguards	3.58
Verenigbaarheid	3.75
Species	3.89
Speciatie	3.89
Oplosbaarheid	3.89
Sorptie	3.90
Vertragsingsfactor	3.90
Voor diffusie toegankelijke porositeit	3.90
Referentiegroep	3.122
Voornaamste kenmerken en belangrijkste open vragen betreffende de Boomse Klei als gastformatie onder de nucleaire zone van Mol-Dessel	6.33

B.2 Afkortingen en eigennamen

ALARA	As Low As Reasonably Achievable (Het ALARA-principe, het tweede van de drie basisprincipes van stralingsbescherming, wil bewerkstellingen dat elke dosis opgelopen ten gevolge van een blootstelling aan ioniserende straling zo klein als redelijkerwijs mogelijk is, rekening houdend met de economische en sociale factoren.)
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (nationale agentschap voor het beheer van radioactief afval) (Châtenay-Malabry, Frankrijk)
BELGOPROCESS	Dochtermaatschappij van NIRAS met als opdracht het uitvoeren van de meerderheid van de activiteiten in verband met het kortetermijn beheer van radioactief afval (Dessel, België)
COGEMA	Compagnie générale des matières nucléaires (Frans bedrijf dat in La Hague een fabriek voor de opwerking van bestraalde splijtstoffen exploiteert)
EDZ	Excavation Disturbed Zone (door uitgraving verstoorde zone)
EPRI	Electric Power Research Institute (Palo Alto, Californië, Verenigde Staten)
ESV EURIDICE	Europees Samenwerkingsverband EURIDICE (Mol, België)
EURIDICE	European Underground Research Infrastructure for Disposal of Nuclear Waste in a Clay Environment
EUROCHEMIC	Société européenne pour le traitement chimique des combustibles irradiés (europeese maatschappij voor de chemische verwerking van bestraalde splijtstoffen) (nu Belgoprocess)
EVEREST	Evaluation of Elements Responsible for the Effective Engaged Dose Rates Associated with the Final Storage of Radioactive Waste
FANC	Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (Brussel, België)
FEP	Features, Events, and Processes
HADES	High-Activity Disposal Experimental Site (ondergronds laboratorium van het SCK·CEN gelegen in de Boomse Klei)
IAEA	International Atomic Energy Agency / Internationaal Agentschap voor Atoomenergie (Wenen, Oostenrijk)
ICRP	International Commission on Radiological Protection / Internationale Commissie voor Stralingsbescherming
MOX	Mixed-Oxide Fuel (splijtstof bestaande uit een mengsel van uraniumoxide en plutoniumoxide)
NEA	Nuclear Energy Agency (OECD) / Agentschap voor Kernenergie (OESO) (Parijs, Frankrijk)
NIRAS	Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Splijtstoffen (Brussel, België)
OESO	Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (Parijs, Frankrijk)
OPHELIE	On Surface Preliminary Heating Simulation Experimenting Later Instruments and Equipment (bovengrondse geïnstrumenteerde maquette van de PRACLAY galerij)

PACOMA	Performance Assessment of Geological Disposal of Medium-Level and Alpha Waste in a Clay Formation in Belgium
PAGIS	Performance Assessment of Geological Isolation Systems (programma van de Europese Unie voor de evaluatie van de veiligheid van ondergrondse bergingsinstallaties)
PAMELA	Pilotanlage Mol zur Erzeugung Lagerfähiger Abfälle (proefinstallatie voor conditionering, gelegen te Belgoprocess)
PRACLAY	Preliminary Demonstration Test for Clay Disposal (voorbereidende in situ-demonstratie-experiment op ware schaal)
SAFIR	Safety Assessment and Feasibility Interim Report
SCK-CEN	Studiecentrum voor Kernenergie (Mol, België)
SPA	Spent Fuel Performance Assessment
SYNATOM	Société belge des combustibles nucléaires (Belgische maatschappij voor splijtstoffen (Brussel, België) (dochtermaatschappij van Electrabel en Tractebel die belast is met het voorzien van de Belgische kerncentrales aan verrijkt uranium en tevens met het beheer van de uit de reactoren ontladen splijtstofelementen tot wanneer het geconditioneerde opwerkingsafval of de gebruikte splijtstoffen zelf door NIRAS overgenomen worden)

B.3 Aanvullende lectuur

1. International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, 1990.
2. Nuclear Energy Agency, Disposal of Radioactive Waste : Can Long-Term Safety Be Evaluated ? An International Collective Opinion of the NEA, IAEA and CEC, 1991.
3. International Commission on Radiological Protection, Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework. Publication 64, Volume 23, No. 1, 1993.
4. International Atomic Energy Agency, Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories, First report of the INWAC Subgroup on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal, 1994.
5. International Atomic Energy Agency, Siting of Geological Disposal Facilities, Safety Series N° 111-G-4.1, 1994.
6. De Putter Th. en Charlet J.-M., Natuurlijke analogieën in klei, Een bibliografische synthese, NIROND 94-14, 1994.
7. Wouters L. en Vandenberghe N., Geologie van de Kempen, Een synthese, NIROND 94-11, 1994.
8. Nuclear Energy Agency, The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal. A Collective Opinion of the NEA Radioactive Waste Management Committee, 1995.
9. International Atomic Energy Agency, The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F, 1995.
10. Savage D. (Ed.), The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste, Wiley, 1995.
11. Baekelandt L. et al, Building the Safety Case for a Hypothetical Underground Repository in Clay, Final Report, DS/95/20 (Volume 2), 1996.
12. Vanmarcke H., Bagniet-Mahieu L., Culot J.P., Govaerts P., Holmstock L., Ioniserende straling – Effecten van lage dosissen, NIROND 96-03, 1996.
13. International Atomic Energy Agency, Collection sécurité, Principes de gestion des déchets radioactifs, Collection sécurité N° 111-F, 1996.
14. International Atomic Energy Agency, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series N° 115, 1996.
15. European Commission, First Performance Assessment of the Disposal of Spent Fuel in a Clay Layer. EUR 16752 EN, 1996.
16. Nuclear Energy Agency, Water, Gas and Solute Movement through Argillaceous Media, Report CC-96/1, 1996.
17. European Commission, Evaluation of Elements Responsible for the Effective Engaged Dose Rates Associated with the Final Storage of Radioactive Waste : Everest project, EUR 17122EN, 1996.
18. Eisenbud M., Gesell Th., Environmental Radioactivity - from Natural, Industrial and Military Sources, Academic Press, 1997.
19. Nuclear Energy Agency, Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies, 1997.

20. Nuclear Energy Agency, Consejo de Seguridad Nuclear, Empresa Nacional de Residuos, Regulating the Long-Term Safety of Radioactive Waste Disposal, Proceedings of a Workshop, Cordoba, Spain, 20-23 January 1997, 1997.
21. Nuclear Energy Agency, Fluid Flow through Faults and Fractures in Argillaceous Formations, Proceedings of a Joint NEA/EC Workshop, Berne, Switzerland, 10-12 June, 1996, 1998.
22. Nuclear Energy Agency, Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories. Its development and Communication. 1999.
23. UK House of Lords Select Committee on Science and Technology, Management of Nuclear Waste, HL Paper 41, March 1999.
24. Posiva Oy, The Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel, Environmental Impact Assessment Report, 1999.
25. SKB, Deep Repository for Spent Nuclear Fuel, SR97 – Post-Closure Safety, Main Report Summary, TR-99-06, 1999.
26. Nuclear Energy Agency, Progress Towards Geologic Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? An International Assessment, 1999.
27. Japan Nuclear Cycle Development Institute, H12 : Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, 2000.
28. Nuclear Energy Agency, Porewater Extraction from Argillaceous Rocks for Geochemical Characterisation, Methods and Interpretations, 2000.
29. International Atomic Energy Agency, Safety of Radioactive Waste Management, Proceedings of an International Conference, Cordoba, Spain, 13-17 March 2000, 2000.
30. Nuclear Energy Agency, Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options. A Comparative study, 2000.
31. European Commission, Spent Fuel disposal Performance Assessment (SPA project), EUR 19132 EN, 2000.
32. Nuclear Energy Agency, Regulatory Reviews of Assessments of Deep Geologic Repositories, Lessons learnt, 2000.
33. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources. Volume II: Effects, 2000.
34. Miller, W., et al., Geological Disposal of Radioactive Wastes and Natural Analogues – Lessons from Nature and Archaeology, Pergamon, 2000
35. National Academy of Sciences - National Research Council. Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel. The Continuing Societal and Technical Challenges. National Academy Press, 2001.

B.4 Overeenstemmingstabel met het SAFIR 2-rapport

[te vervolledigen]

B.12

B.5 Eindadvies van het leescomité van het SAFIR 2-rapport

[toe te voegen]

NIRAS

Nationale instelling voor radioactief afval

en verrijkte splijtstoffen

Kunstlaan 14

1210 Brussel

tel. +32 2 212 10 11

fax +32 2 218 51 65

info@nirond.be