

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 Spleijstoffen, 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 Spleijstoffen*.

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 hoofdpdracht komen opdrachten betreffende de ontmanteling van de buiten gebruik gestelde nucleaire installaties, de sanering van de nucleaire passiva en het beheer van de verrijkte spleijstoffen. 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 te vinden voor het langetermijn beheer van dit radioactieve afval. Vandaag is het dagelijks beheer van het radioactieve afval goed onder controle; het langetermijn

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 spleijstof" duidt alle types van bestraalde spleijstof 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 spleijstoffen (ZAGALC-afval) (zie ook sectie 3.1).

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 — oppervlakte-berging 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)	3
1.2	De tweede fase van het methodologische O&O-programma en het SAFIR 2-rapport (1990–2000)	4
1.3	Het technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport	7

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 synthesesdocument 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 onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma dat NIRAS in samenwerking

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).

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 Ieperiaan-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):

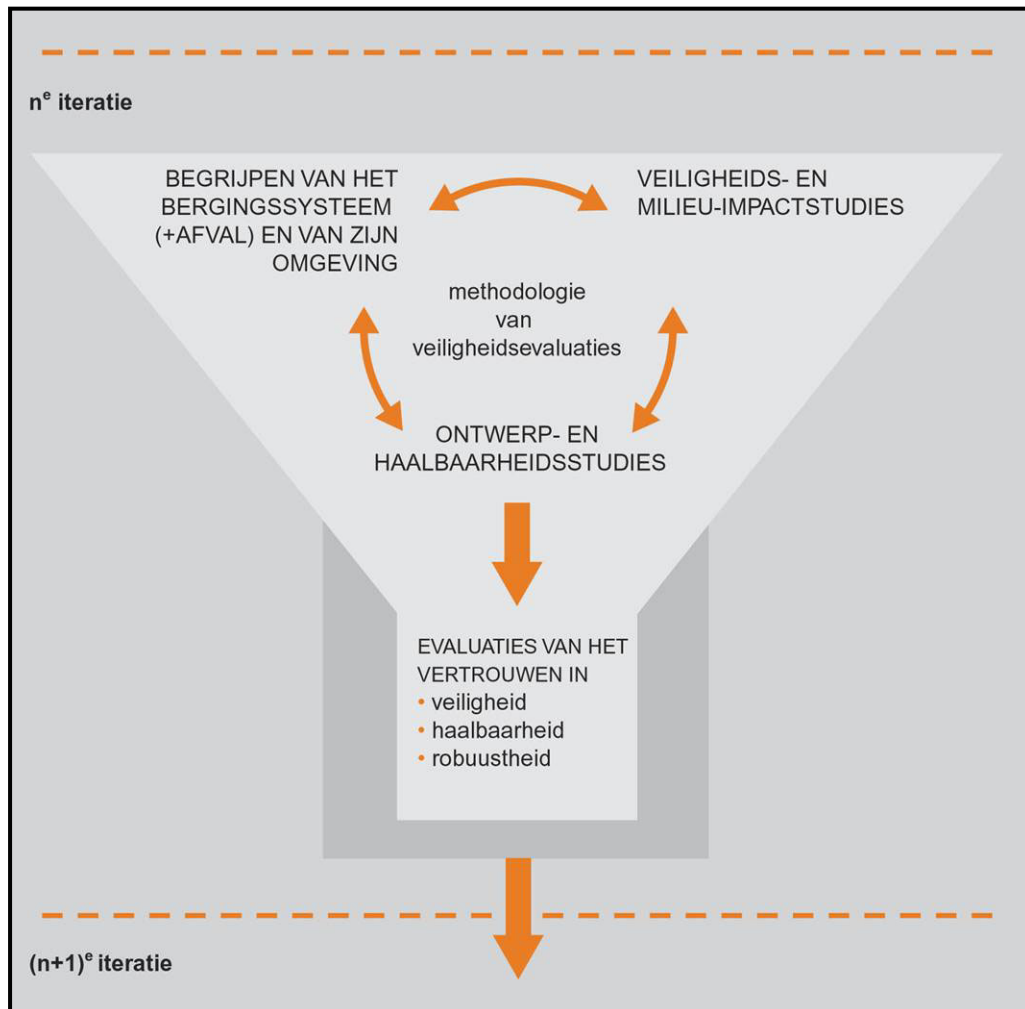
- *de Boomse Klei en de nucleaire zone van Mol–Dessel*: referentie-gastformatie en referentiesite;
- *de Ieperiaan-kleien en de nucleaire zone van Doel*: alternatieve gastformatie en alternatieve site.

(Aangezien België op heden geen bergings-site heeft gekozen, bevat de term “site” geen enkele notie van bergings-site.) 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 afvalbergings-

verrichtingen 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 op de volgende pagina voor een nadere beschrijving van de hoofddoelstellingen van het methodologische onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma van NIRAS.)



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

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 performanties 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.

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 kleiformatie, 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 langetermijnbeheer van radioactief afval.

SAFIR 2 is geen veiligheidsrapport *stricto sensu*: het begeleidt immers geen vergunningsaanvraag. Het is veeleer een rapport met de huidige stand van zaken in België.

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 langetermijnbeheer van radioactief afval.

1.3 Het technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport

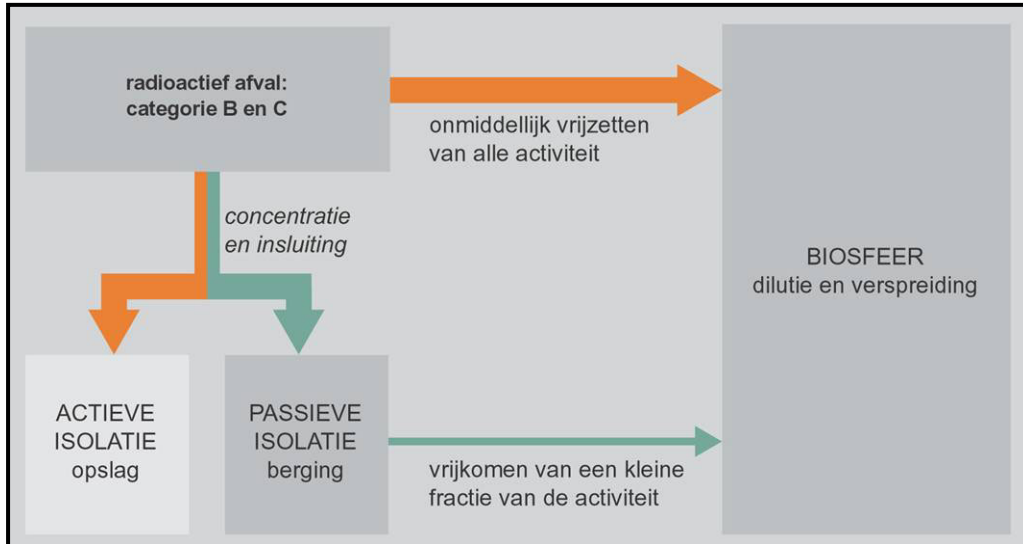
Dit document is het technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport, dat integraal beschikbaar is op de bijgevoegde CD-ROM. De doelstellingen en de draagwijdte van dit document zijn dus identiek aan die van het SAFIR 2-rapport. De structuur werd echter aangepast met het oog op een vlottere lectuur en spitst 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 Ieperiaan-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: basisprincipes 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-

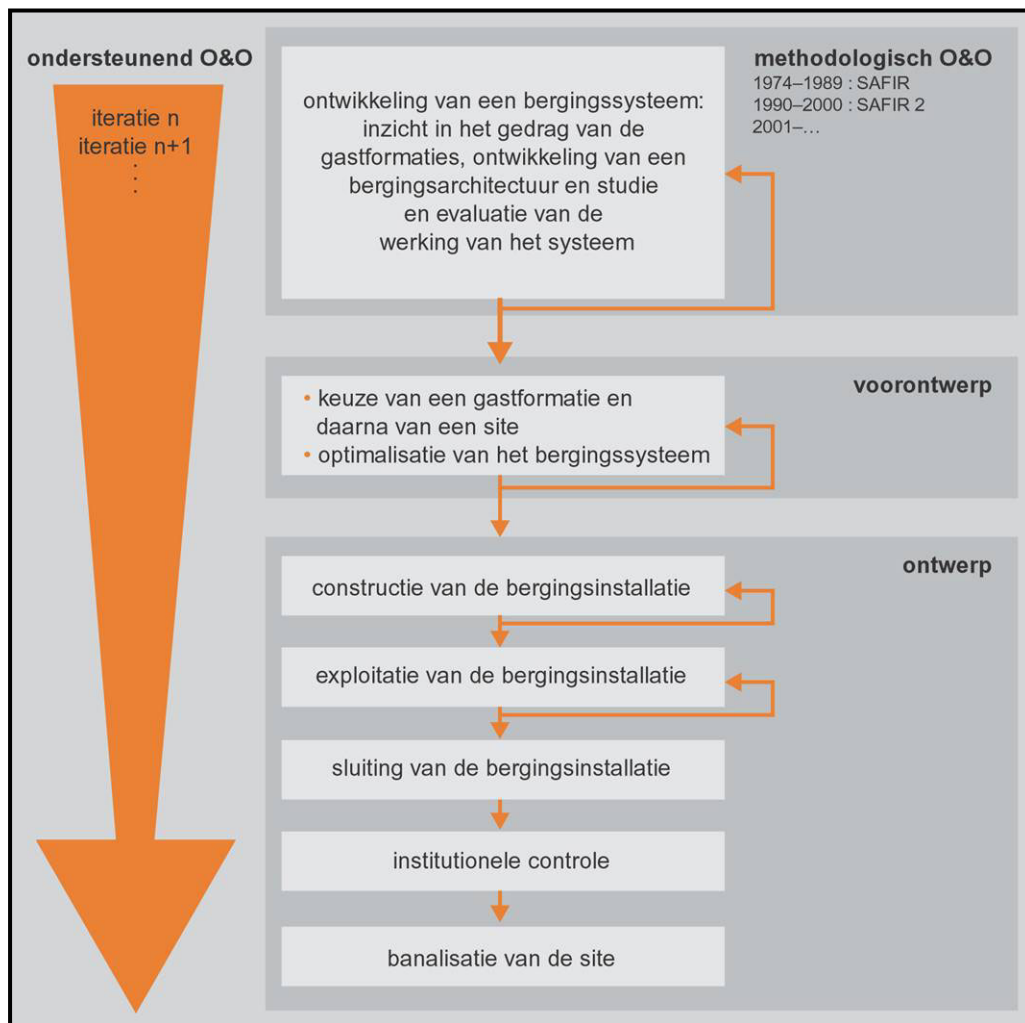
evaluatie

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 veiligheids-evaluaties 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 veiligheids-evaluaties, die telkens de overgang naar de volgende realisatiefase bepalen, en de evolutie van de bergingsarchitectuur geven op hun beurt aanleiding tot nieuwe onderzoeks-werken 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.

2.1	Doelstellingen van een diepe berging	13
2.2	Algemene vereisten	14
2.2.1	Radiologische veiligheid op lange termijn	15
2.2.2	Robuustheid	20
2.2.3	Operationele veiligheid	21
2.2.4	Subkritikaliteit en naleving van de <i>safeguards</i>	21
2.2.5	Milieubescherming	22
2.2.6	Flexibiliteit	22
2.2.7	Haalbaarheid	22
2.2.8	Terugneembaarheid	23
2.3	Specifieke vereisten voor de Boomse Klei	24
2.4	Kwaliteitsbeheer en kwaliteitsborging	25

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 op de volgende pagina), 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 milieueffectbeoordeling 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

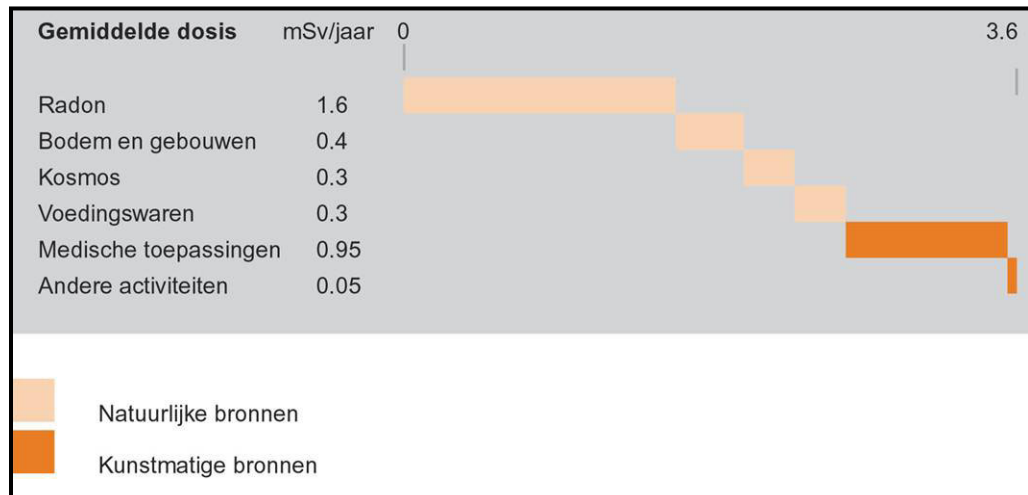
Energie die door de straling afgegeven wordt per massa-eenheid. De geabsorbeerde dosis wordt uitgedrukt in gray (Gy).

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 *gasformatie* die de kunstmatige barrières omgeeft. (De *watervoerende lagen* boven en onder de gasformatie 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* ervan.) Alle componenten van de bergingsinstallatie, met inbegrip van het afval, en het *deel* van de gasformatie *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 volledige 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 vereisten zijn drie in getal:

- *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.

Barrière Geologische gasformatie 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.

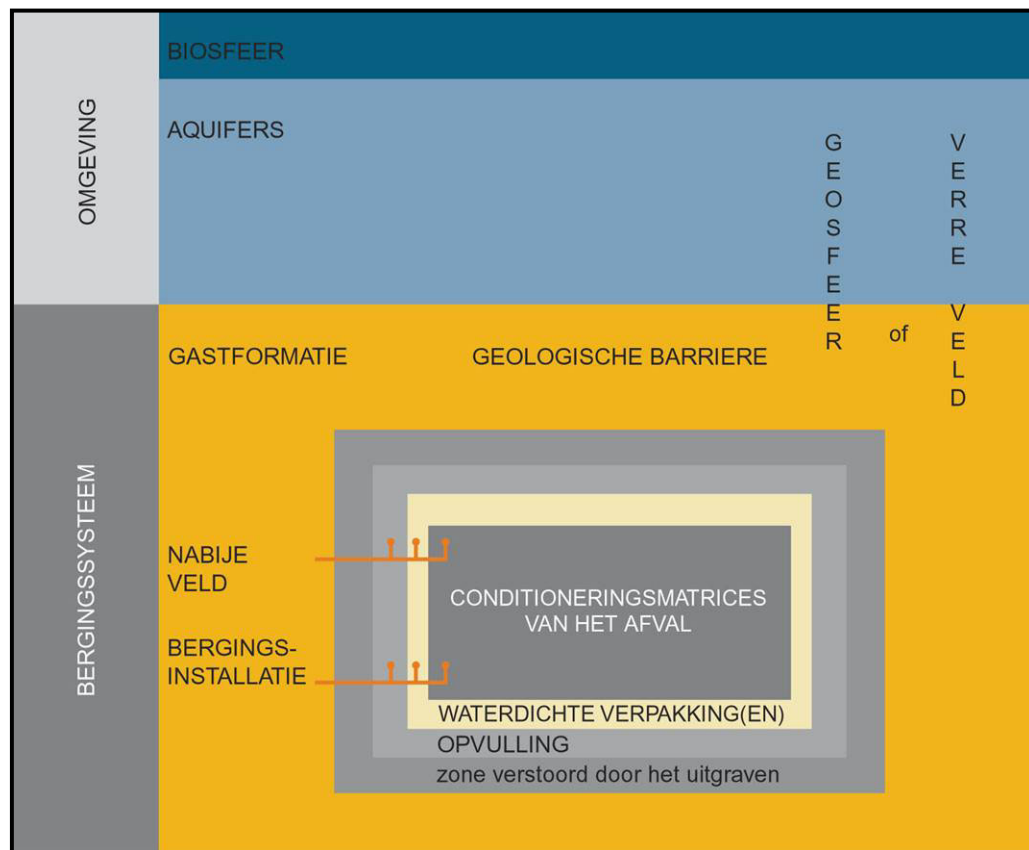
Biosfeer Deel van de aarde waar de mensen, de dieren en de planten leven en zich ontwikkelen en waar zij kunnen worden blootgesteld aan de radioactieve stoffen die kunnen vrijkomen uit de bergingsinstallatie.

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.



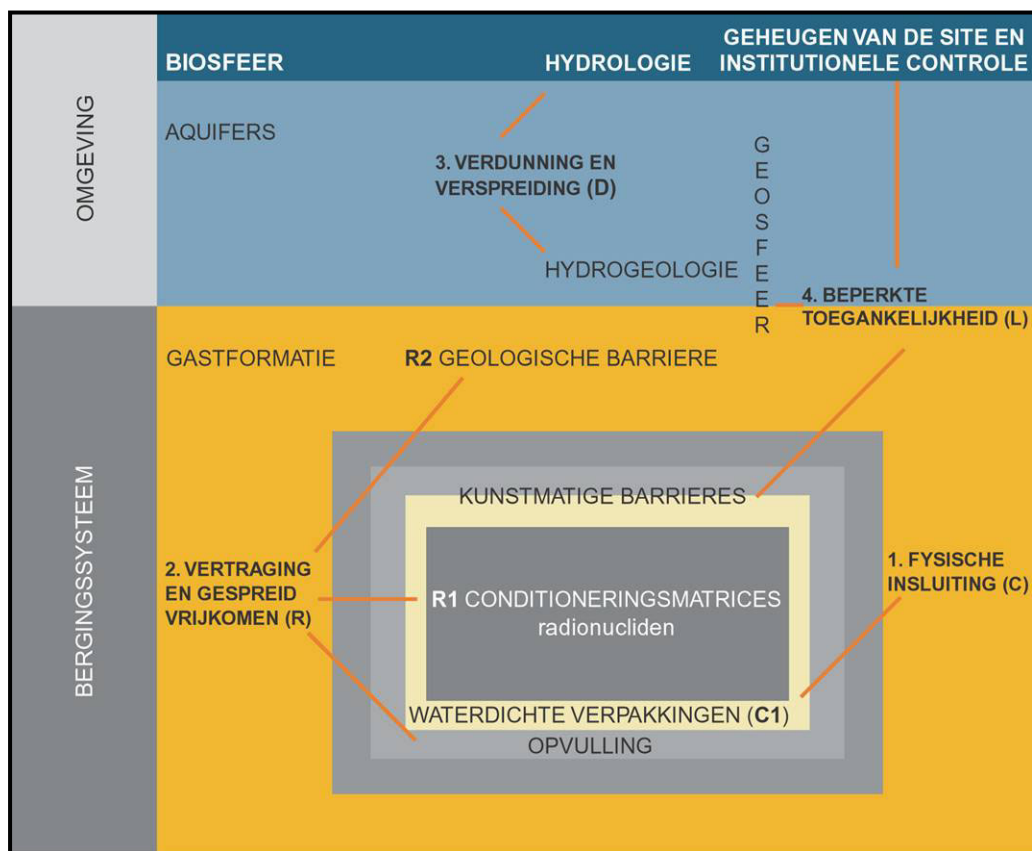
Figuur 2.4 Principeschema van een diepebergingsinstallatie en bijbehorende terminologie.

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.

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 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 bergingssysteem moet voorkomen, dit is gedurende de periode waarin de aanwezigheid van het afval in de bergingsinstallatie de temperatuur in en rond de installatie 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 — 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 *bepmerking 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.



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

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 toezichtperiode 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.

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

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.

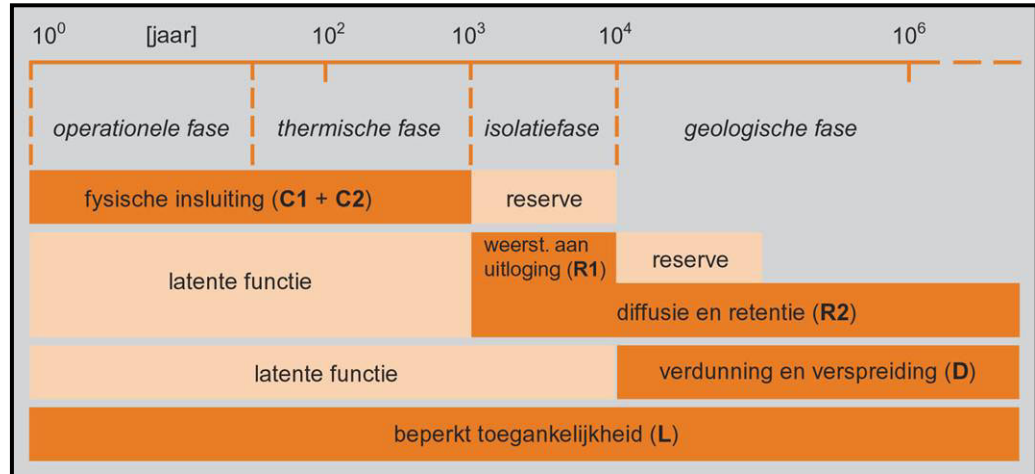
De eerste twee veiligheidsfuncties worden vervuld door het bergingssysteem in zijn geheel of door één of meer componenten ervan, de derde wordt verzekerd door de omgeving van het bergingssysteem en de vierde wordt tegelijk verzekerd door het bergingssysteem, de omgeving ervan en maatregelen van institutionele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

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 *isotiefase*, 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 verduunning 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

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.

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 de veiligheidsreserve.



Figuur 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, zijnde verglaasd afval en bestraalde splijtstofelementen (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 (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 weggelaten. 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

Robuustheid

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

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.

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 (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 subkritekriteitsaspecten 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 scharnieretappes (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 (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 (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 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 (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.

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.

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 (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 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 (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 (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 (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 natriumnitratfront 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 (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 wanden 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 (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 (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 deze 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

- 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 vergelijkings-oefeningen 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).