

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.

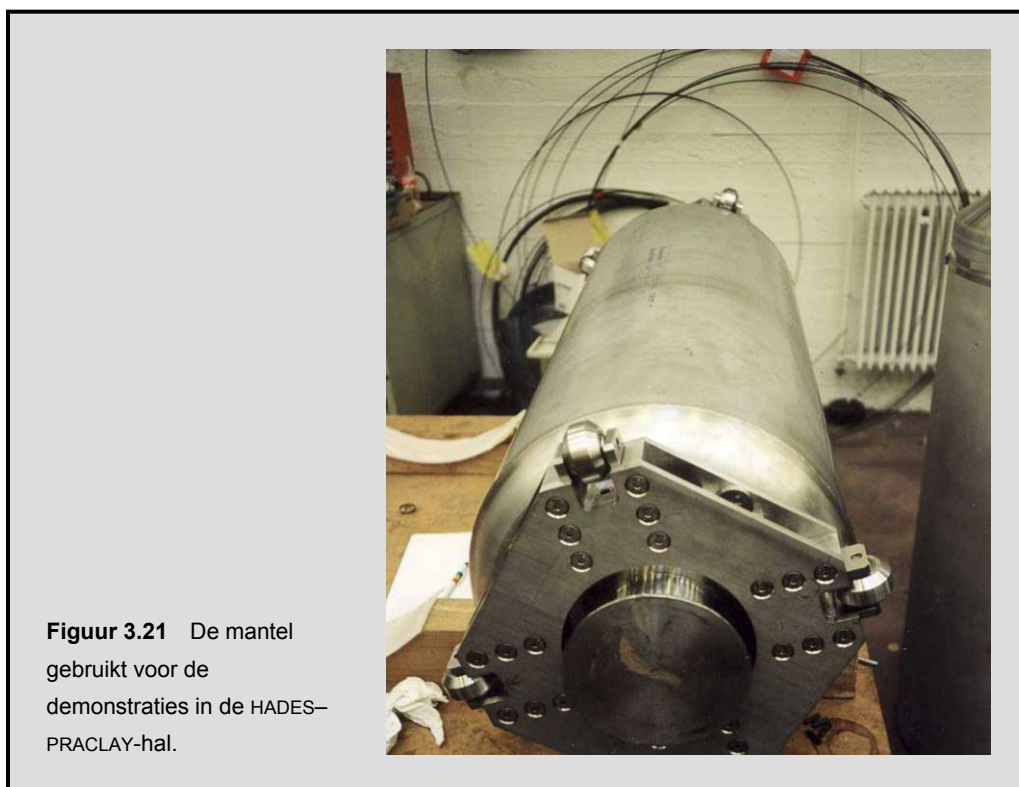
### **3.3.1 De referentiearchitectuur**

De in België ontwikkelde referentiearchitectuur voor de installatie van diepe berging kan voorgesteld worden als een netwerk van rechthoekige 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:

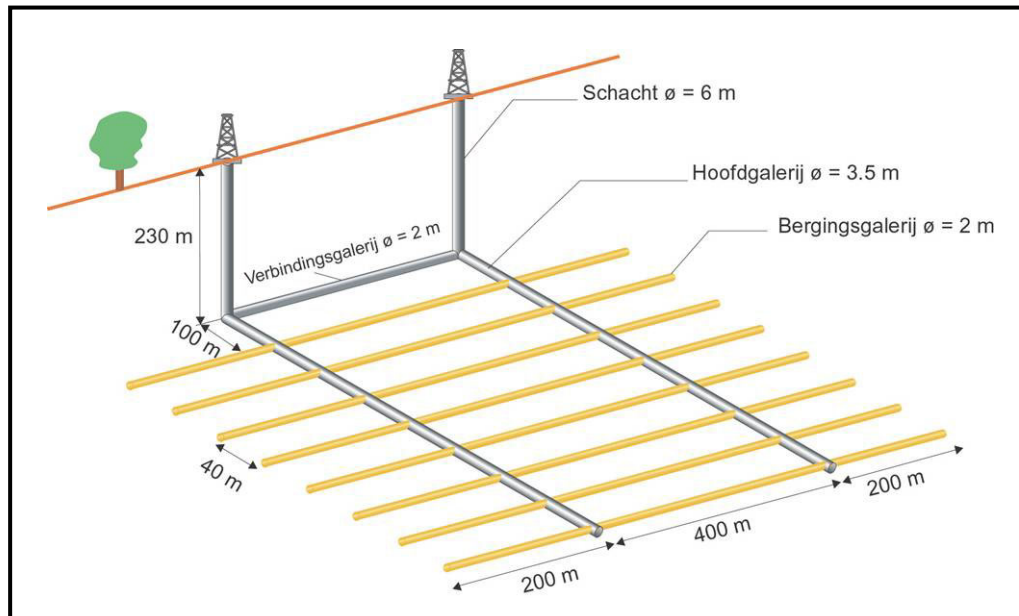
- de *scheiding* van het verglaasde afval en de bestraalde splijtstoffen van het andere afval van de geologische groep, om fysico-chemische interacties die nadelig zouden kunnen zijn voor de langetermijn veiligheid, te voorkomen (verhoging van de robuustheid), om de thermische berekeningen te vergemakkelijken 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 UO<sub>2</sub>-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.



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

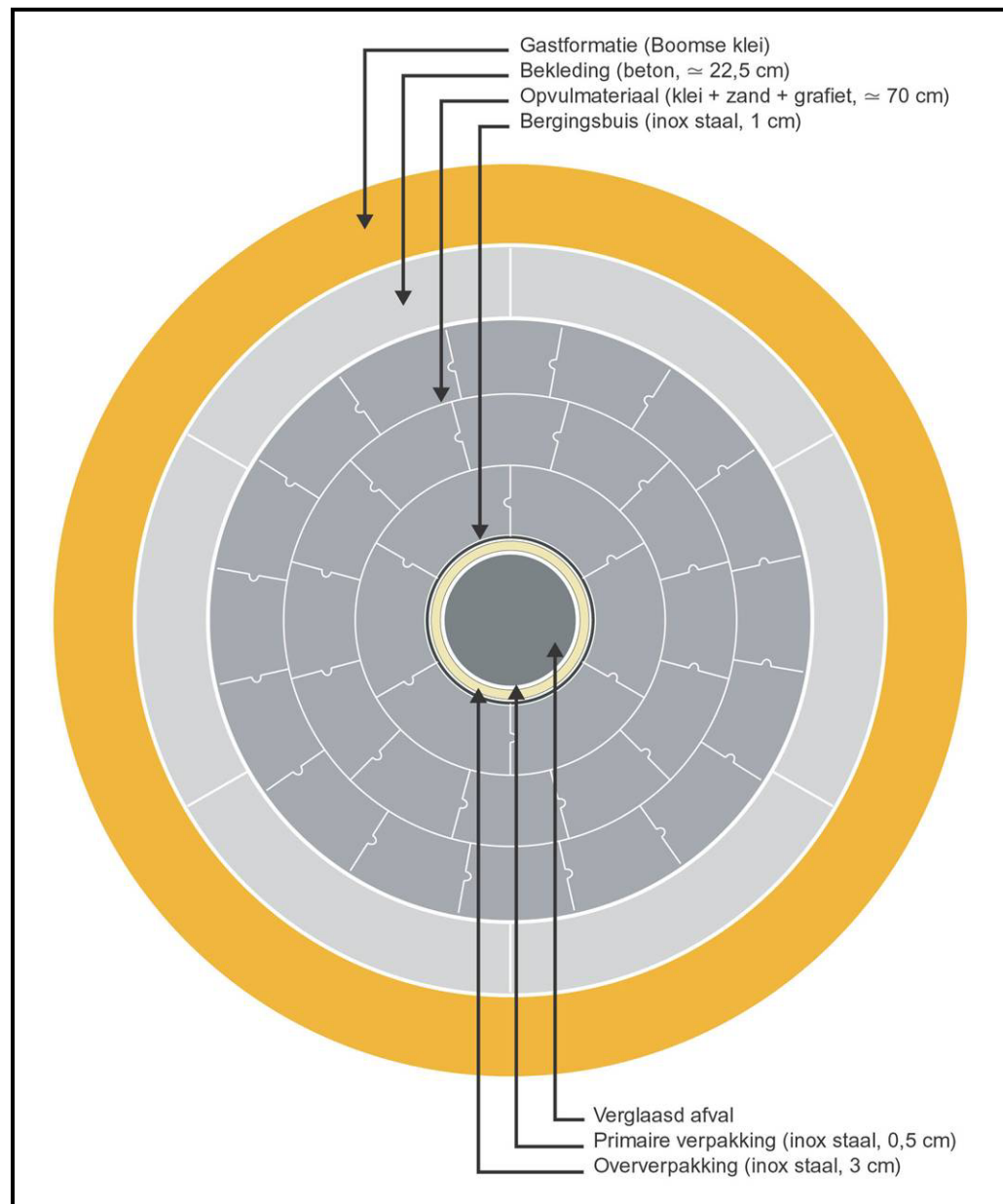
hebben een tussenruimte van 40 meter, opdat de gemiddelde temperatuurverhoging in de watervoerende laag van het Neogeen, die NIRAS bij gebrek aan wettelijke norm op 6°C heeft vastgesteld, zou worden gerespecteerd. De installatie die bestemd is voor de berging van het verglaasde afval, zou dus een oppervlakte van 0.224 km<sup>2</sup> beslaan.



**Figuur 3.22** De referentie-bergingenarchitectuur 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 “bergingbuis” genoemd, die gecentreerd 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 splijststoffen* (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 UO<sub>2</sub>-splijstof, die in een vierkant rond de as van de galerij worden geplaatst; één enkele bergingsbuis in het geval van MOX-splijstof, 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 splijstof-elementen. Het zou dus een oppervlakte van ongeveer 1.3 km<sup>2</sup> 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 (hoofdstuk 4). Deze componenten zijn de conditioneringsmatrices (glas en UO<sub>2</sub>) 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 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 ongevolde 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 ongevolde ruimte in het afval. Dit totale percentage ongevolde 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 radiologische langetermijn veiligheid voor het normale-evolutiescenario (**C1** = waterdichtheid; **R1** = weerstand aan uitloging; **R2** =

| Componenten  | Kenmerken   | Veiligheidsfuncties tijdens de vlg. fases:         |           |           |           | Andere Functies  |
|--|---|--|-----------|-----------|-----------|--|
|  |   | operationele                                       | therm.    | isolat.   | geolog.   |  |
| <b>Matrix</b>  | Borosilicaatglas  | Immobilisatie                                      | –         | <b>R1</b> | R1        | Terugneembaarheid  |
| <b>Primaire verpakking</b><br>(gelaste cilindervormige container)                        | Roestvast staal AISI 309<br>hoogte: 1.34 m<br>buiten Ø: 43 cm<br>dikte: 5 mm<br>gemiddeld vol gewicht: 492 kg                         | Mechanische weerstand                              | C1        | R2        | –         | Behandeling<br>Terugneembaarheid   |
| <b>Mantel</b><br>(gelaste cilindervormige container uitgerust met 2 × 4 wieltjes op 90°) | Roestvast staal AISI 316L hMo<br>hoogte: 1.58 m<br>binnen Ø: 46 cm<br>dikte: 30 mm<br>gemiddeld vol gewicht: 1000 kg                  | Radiologische bescherming                          | <b>C1</b> | R2        | –         | Behandeling<br>Vermindering van het lineaire warmtevermogen<br>Terugneembaarheid |
| <b>Bergingsbuis</b>  | Roestvast staal AISI 316L hMo<br>binnen Ø: 55 cm<br>dikte: 10 mm<br>lengte stukken: 3 à 4 m<br>lengte segmenten: 200 of 400 m         | –  | C1        | R2        | –         | Berging<br>Terugneembaarheid   |
| <b>Opvulmateriaal van de bergingsgalerijen</b>   | Geprefabriceerde blokken bestaande uit een mengsel van zwellende FoCa-klei van het bentoniettype (60 %), zand (35 %) en grafiet (5 %) | Ondersteuning                                      | C2        | R2        | <b>R2</b> | Warmteafvoer   |
| <b>Bekleding van de bergingsgalerijen</b>  | Geprefabriceerde betonblokken<br>minimumdikte: 22.5 cm  | Ondersteuning                                      | –         | –         | –         | Terugneembaarheid  |
| <b>Galerijen</b>   | BinnenØ tot.lengte tussenruimte   |  |           |           |           |  |
| <b>bergingsgalerijen</b>   | 2 8 × 800 [m] 40 [m]  | –  | –         | –         | –         | Berging  |
| <b>hoofdgalerijen</b>  | 3.5 380 400   | –  | –         | –         | –         | Aanvoer  |
| <b>verbindingsgalerij</b>  | 2 400 –   | –  | –         | –         | –         | Verbinding   |
| <b>Toegangsschacht</b>   | Binnen Ø: 6 m   | –  | –         | –         | –         | Aanvoer  |
| <b>Bekleding van de toegangsschachten</b>  | Beton en asfalt   | Ondersteuning<br>Waterdichtheid                    | –         | –         | –         | Terugneembaarheid  |
| <b>Opvulmateriaal van de rest van de installatie</b>                                     | Mengsel van zwellende FoCa-klei en zand   | Ondersteuning                                      | C2        | <b>R2</b> | <b>R2</b> | –  |
| <b>Afdichtingsmateriaal van de galerijen en schachten</b>                                | Mengsel van zwellende FoCa-klei en zand<br>Beton  | Radiologische bescherming<br>Mechanische weerstand | C2        | <b>R2</b> | <b>R2</b> | –  |

door de hoofdcomponenten van het systeem en zijn omgeving en, **met vet**, functies in aanmerking genomen in de evaluaties van de 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 spelingen

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 verbindingkamers tussen de bergingsgalerijen en de hoofdgalerijen

de minimumafstand bevestigen tussen de verbindingsgalerij en de eerste bergingsgalerij

de diameter bevestigen

---

–

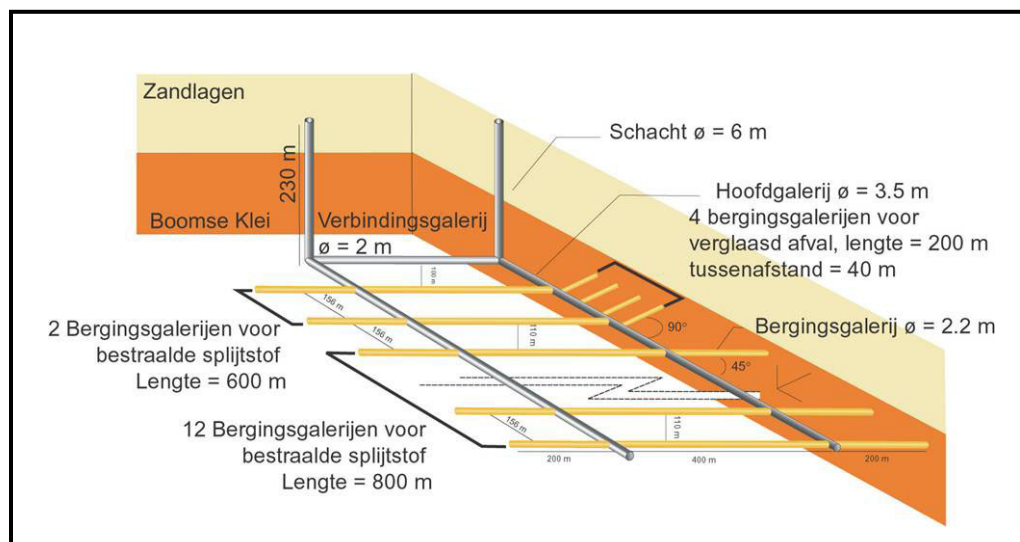
–

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 splijstof.

### 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 bergingsite 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.
- 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 bevroren. 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 (sectie 3.3.3).

### Safeguards

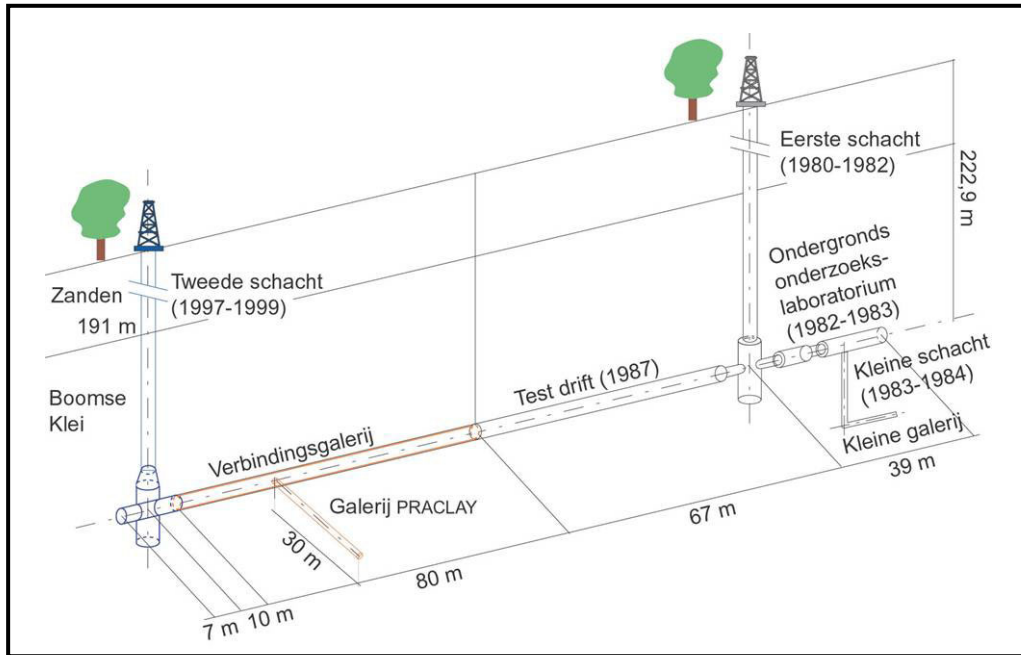
Vereisten vastgesteld door de internationale non-proliferatie-verdragen inzake splijtstoffen die de wederrechtelijke toeëigening van splijtstoffen voor om het even welk doel beogen te verhinderen. Deze vereisten omvatten met name de boekhouding en de opspoorbaarheid van de geborgen splijtstoffen (zie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

## Evolutie van de graaf- en ondersteuningstechnieken

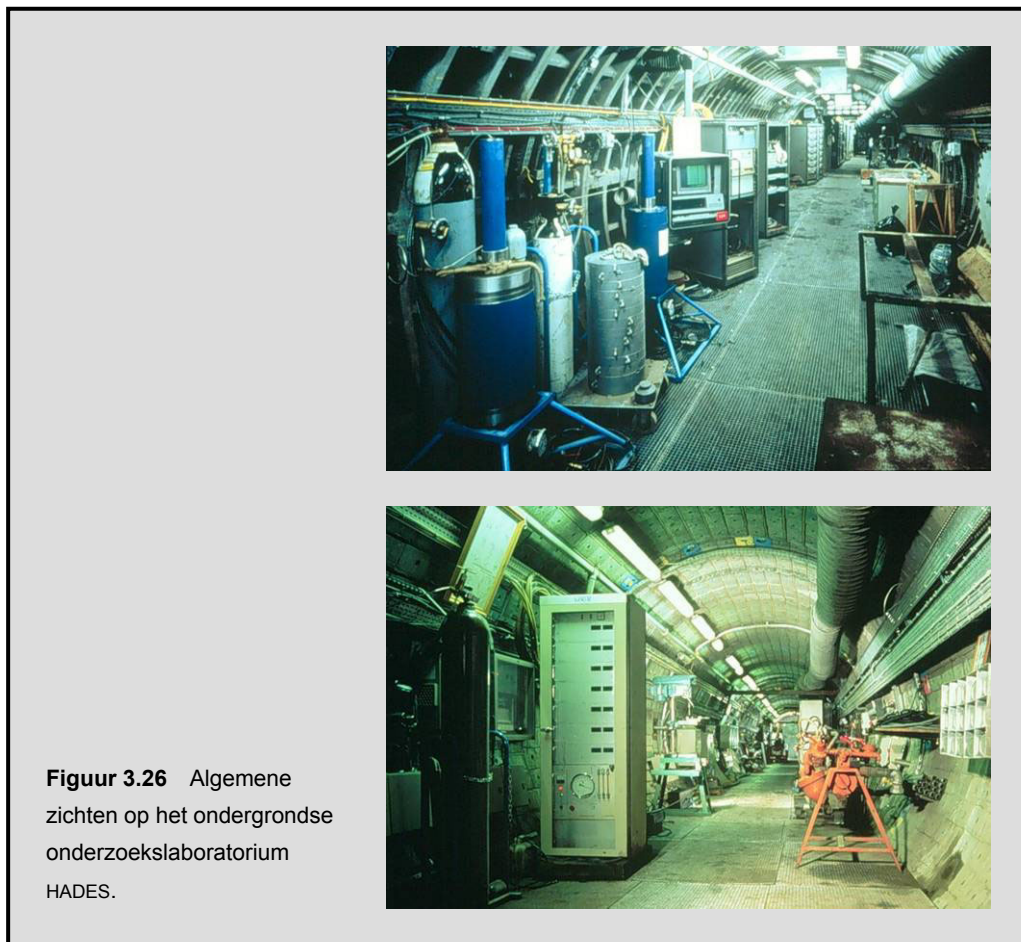
Het ondergrondse laboratorium HADES heeft sinds 1982 vijf ontwikkelingsfasen doorgevoerd (figuren 3.25 en 3.26), die hoofdzakelijk worden gekenmerkt door de vereenvoudiging van de graaftechnieken en de evolutie van de bekledingstypes dankzij de verbetering van de kennis over het geomechanische gedrag 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  $-15^{\circ}\text{C}$  dankzij  $2 \times 16$  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 verbindingkamer van 13 meter hoog en 4 meter binnendiameter.

De *experimentele galerij HADES* werd gebouwd in 1982–1983, eveneens na bevroering 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 verbindingkamer 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 alleen 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. 3.27).



**Figuur 3.25** Het ondergrondse onderzoekslaboratorium HADES. Het uitgraven van de verbindingsgalerij en de PRACLAY-galerij (in bruin aangeduid) is voorzien voor respectievelijk 2002 en 2006.



**Figuur 3.26** Algemene zichten op het ondergrondse onderzoekslaboratorium HADES.



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

Aangezien de bevroeringstechniek 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 bevroering 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. 3.27). 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 (fig. 3.27) 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 verbindingskamer en de aanzet van de verbindingsgalerij (fig. 3.28) 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 (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 onder-

steuning worden geplaatst die in staat was deze convergentie te beperken. Er werd dus ten spoedigste een voorlopige bekleding in metalen glijprofielen geplaatst (fig. 3.28); 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 operationale als de langetermijn veiligheid.



**Figuur 3.28** Graven van de tweede schacht: bovenaan, het graven van de aanzet van de verbindingsgalerij; onderaan, de hydraulische arm en de metalen glijprofielen.



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 (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 (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 kostenoogpunt des te interessanter naarmate de te graven galerij langer is.

De moeilijkheid van de tunnelboormachineteknik 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 belastingwijze die wordt teweeggebracht in een cirkelvormige bekleding die onderworpen is aan nagenoeg isotrope uitwendige spanningen ( $K_0 \approx 0.9$  — 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 hoofdgalerijen, die zullen uitkomen op de bergingsgalerijen, 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 bergingsgalerijen te maximaliseren. Overigens zal de bouw van de verbindingkamers 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 tunnelboormachineteknik 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  $P_v = 3.5$  MPa en  $P_h = K_0 P_v$ , met  $K_0 = 0.9$ .

### 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 bergingsite, 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 grijper 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 transferwagons 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 transferwagons 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.

### 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 performantie van het bergingssysteem, zodat de praktische uitvoering, in het bijzonder wat de keuze van de materialen en de plaatsingstechnieken betreft, zorgvuldig moet bestudeerd worden (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 afdichting 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 bergingsite 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 geanalyseerd. 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 demonstratie-project**

Het in 1995 aangevangen demonstratie-project 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

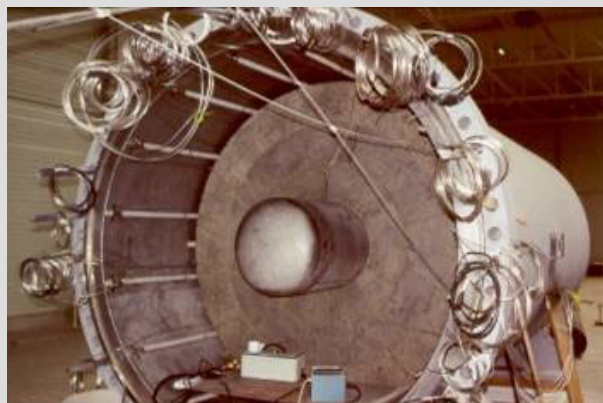
bergen in de Boomse Klei mét inachtneming van de vereisten die voortvloeien uit de veiligheidsstudies. Dit sleutelproject, dat openstaat voor internationale samenwerking, bestaat erin in situ op ware grootte een stuk bergingsgalerij te bouwen dat in alle opzichten vergelijkbaar is met de galerijen die 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 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 het SCK•CEN en NIRAS. De ESV EURIDICE 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.

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 OPHELIE-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).

**Figuur 3.31** De OPHELIE-  
maquette.



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;
- het PRACLAY demonstratie-experiment verder te zetten;
- 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.