

Uitbreiding van het ondergronds laboratorium HADES

Ir. Wim Bastiaens

ESV EURIDICE, Mol (België)

SAMENVATTING

Internationaal gezien, beschouwt men geologische berging als de beste oplossing voor hoogactief, langlevend, radioactief afval. Ook in België wordt deze mogelijkheid bestudeerd. In 1980 werd dan ook begonnen met de bouw van het ondergronds laboratorium HADES te Mol. HADES bevindt zich op een diepte van 223 m in de Boomse kleilaag, een potentiële gastformatie voor berging. Recent werd het laboratorium uitgebreid door de bouw van een 85 m lange galerij. Ondanks de korte lengte werden industriële technieken gebruikt om de galerij uit te graven en te bekleden. Dit om de haalbaarheid aan te tonen van de constructie van een toekomstige bergingssite (enkele kilometers galerijen) met een minimale verstoring van het massief. De uitgraving ging samen met een uitgebreid wetenschappelijk programma om de hydromechanische respons van het massief te karakteriseren.

INLEIDING

De productie van nucleaire elektriciteit brengt het beheer van radioactief afval met zich mee. Internationaal gezien, beschouwt men geologische berging als de beste oplossing voor hoogactief, langlevend, radioactief afval (High Level Waste). Sinds 1974 bestudeert het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK·CEN) die mogelijkheid in België. Het studiecentrum is gelegen te Mol; de Boomse klei, één van de potentiële gastgesteenten, situeert zich daar tussen ongeveer 190 m en 290 m diepte. Gunstige karakteristieken van de Boomse klei voor een potentiële berging zijn de lage permeabiliteit, de hoge plasticiteit en de hoge sorptiecoëfficiënt voor radionucliden. Bovendien bezit de klei zelf-helende eigenschappen: breuken geïnduceerd door een uitgraving sluiten zich

terug af [1].

Naast laboratoriumproeven, worden er ook in-situ experimenten uitgevoerd op de Boomse klei. Speciaal hiervoor werd op 223 m diepte het ondergronds laboratorium HADES gebouwd dat beheerd wordt door het ESV EURIDICE. HADES is zo'n 200 m lang en is bereikbaar via twee 230 m diepe schachten. Naast geomechanisch en geotechnisch onderzoek, gebeuren er ook experimenten in tal van andere disciplines, onder andere corrosiegevoeligheid, geochemische samenstelling en gedrag, warmte transfer en migratie van radionucliden.

oosten en wordt ook dikker in deze richting (figuur 2).

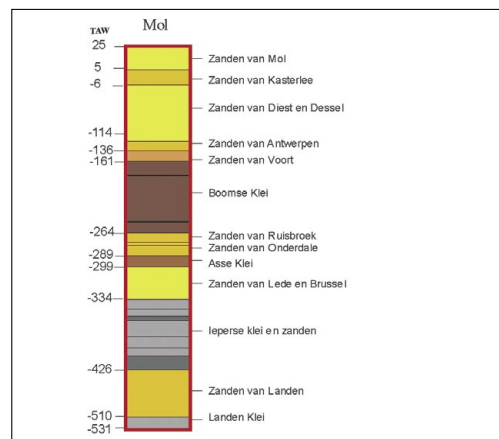
Tabel 1 geeft de ongedraineerde geomechanische karakteristieken ter hoogte van HADES (-223 m) in onverstoorde toestand, wanneer we een perfect elasto-plastisch model beschouwen type Mohr-Coulomb. De porositeit bedraagt 0,39 en de hydraulische geleidbaarheid is van de grootteorde 10^{-12} m/s ($k_H \sim 4 \times 10^{-12}$ m/s, $k_V \sim 2 \times 10^{-12}$ m/s).

DE BOOMSE KLEI

De Boomse klei behoort tot het Rupeliaan en is in Mol zo'n 100 m dik. Figuur 1 toont de stratigrafie te Mol, boven en onder de klei bevinden zich watervoerende zandlagen en een tweede potentieel gastgesteente, de Ieperse klei, bevindt zich nog dieper. De Boomse kleilaag heeft een helling van 1 à 2% naar het noord-

DE BESTAANDE ONDERGRONDSE INSTALLATIES

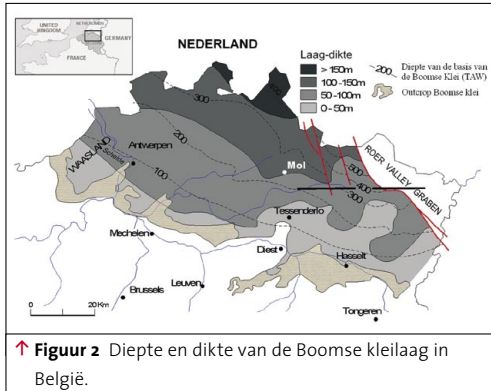
Figuur 3 geeft een overzicht van de constructiegeschiedenis van HADES. In 1980 werd begonnen met de uitgraving van de eerste schacht, binnendiameter 2,65 m. Voor de uitgraving van de schacht in de watervoerende zandlagen boven de kleilaag was grondbevriezing noodzakelijk. Het waren de eerste constructiewerken wereldwijd in zulk een kleilaag op deze diepte, het exacte gedrag van het massief bij uitgraving was dus nog niet



↑ Figuur 1 Stratigrafische kolom te Mol (diepte in m, TAW).

Parameter	Afkorting	Waarde
Young modulus	E	200-400 MPa
Poisson coëfficiënt	ν	0,4-0,45
Wrijvingshoek	φ	4°
Cohesie	c	0,5-1 MPa
Uitrolgrens	w_p	23-29 %
Vloeigrens	w_l	55-80 %
Vloei-index	IP	32-51 %

↑ Tabel 1: De ongedraineerde karakteristieken van de Boomse klei op de diepte van HADES (-223 m).

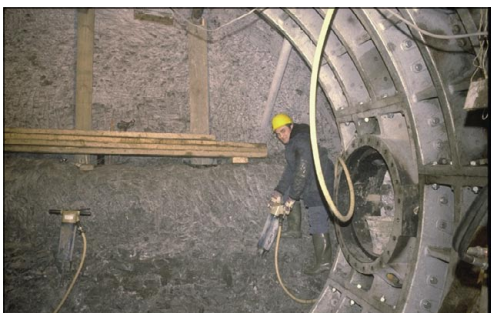


↑ **Figuur 2** Diepte en dikte van de Boomse kleilaag in België.

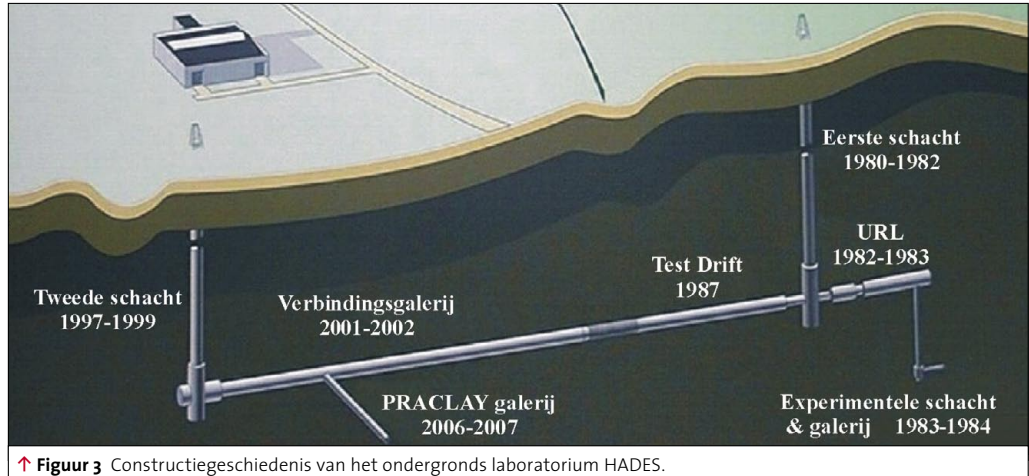
bekend. Gebaseerd op de toenmalige kennis werd beslist ook grondbevriezing toe te passen in de kleilaag. De uitgraving van de schacht gebeurde semi-manueel, met pneumatische hamers.

Bij de uitgraving van de eerste galerij (URL of Underground Research Laboratory genoemd, binnendiameter 3,5 m) werden dezelfde technieken gebruikt: bevriezing van het kleimassief en semi-manuele uitgraving (figuur 4). Voor de bekleding werden zware gietijzeren segmenten gebruikt die berekend waren om de totale lithostatische druk op te vangen.

Observaties tijdens deze werken toonden aan dat bevriezing niet noodzakelijk was bij uitgravingswerken in de klei. Sterker nog, de bevriezing bemoeilijktte in feite de werken; er werd bijvoorbeeld vastgesteld dat door de bevriezing de terreindruk en de convergentie hoger waren dan verwacht. Gebaseerd op deze nieuwe inzichten werden vanuit het laboratorium een kleine schacht (1983) en galerij (1984) gegraven zonder bevriezing, beide met een binnendiameter van 1,4 m. Bovendien werd als bekleding gekozen voor ringen opgebouwd uit ongewapende betonnen segmenten (0,3 m dikte). De uitgraving zelf gebeurde opnieuw semi-manueel. Deze aangepaste techniek gaf betere resultaten en was bovendien sneller en minder duur. De haalbaarheid van een galerij uitgegraven zonder bevriezing



↑ **Figuur 4** Constructie van de URL: uitgraving op semi-manuele wijze in bevroren klei. Rechts op de foto is de gietijzeren bekleding te zien.



↑ **Figuur 3** Constructiegeschiedenis van het ondergronds laboratorium HADES.

en met een betonnen bekleding werd op grotere schaal gedemonstreerd door de constructie van de Test Drift (1987). De binnendiameter van de Test Drift is 3,5 m en de bekleding is 0,6 m dik.

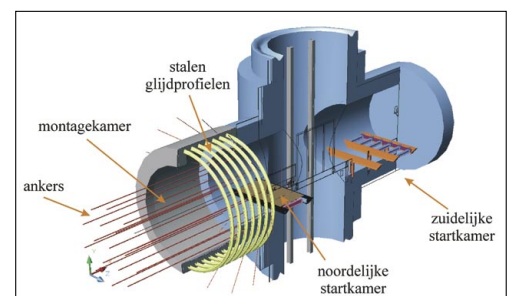
Eind jaren negentig werd een nieuwe uitbreidingsfase van het laboratorium aangevat. Voor een grootschalig experiment (PRACLAY) was er een zijgalerij nodig en de Belgische mijnautoriteiten eisten de bouw van een extra toegangsschacht vóór een verdere verlenging van de bestaande galerijen. Deze schacht (1997-1999) heeft een binnendiameter van 3 m en bij de bouw ervan werd enkel grondbevriezing toegepast in de watervoerende zandlagen boven de Boomse klei [2]. In de zandlagen is bevriezing steeds nodig om de nodige stabiliteit te garanderen en de instroom van water te beperken. In de Boomse klei zelf is de instroom van water geen probleem (zeer lage permeabiliteit) en verslechtert bevriezing zelfs de condities voor uitgraving (cf. supra). In 16 vriesbuizen (op een cirkel met diameter 7 m) werd pekkel gecirculeerd bij -33°C . Het verloop van de bevriezing werd opgevolgd aan de hand van temperatuur- en waterdrukmetingen; na 6 weken bevriezing konden de graafwerkzaamheden aangevat worden. Uiteraard waren de beschikbare technieken sterk geëvolueerd sinds de constructie van de eerste schacht en de uitgraving gebeurde dan ook met een meer industriële techniek (figuur 5). Onder aan de schacht werden twee startkamers gebouwd. De meest recente uitbreiding, de verbindingsgalerij (2002), werd gegraven beginnende vanaf de noordelijke startkamer naar de Test Drift toe. Deze galerij heeft een lengte van ongeveer 85 m, een inwendige diameter van 4 m en is bekleed met betonnen segmenten van 0,4 m dik. Het vervolg van dit artikel handelt hoofdzakelijk over de realisatie van de verbindingsgalerij [3].



↑ **Figuur 5** Constructie van de tweede schacht: uitgraving op industriële wijze in niet-bevroren klei. De tijdelijke bekleding bestond uit TH-profielen.

DE MONTAGEKAMER

Voor de eigenlijke uitgraving van de verbindingsgalerij kon starten, werd eerst een montagekamer gemaakt vanaf de noordelijke startkamer (figuur 6). Deze kamer had een lengte van 3,15 m, een diameter van 6,4 m en verschaftte de nodige ruimte om de elementen waaruit het schild was samengesteld te monteren. De uitgraving van de 2^e schacht had

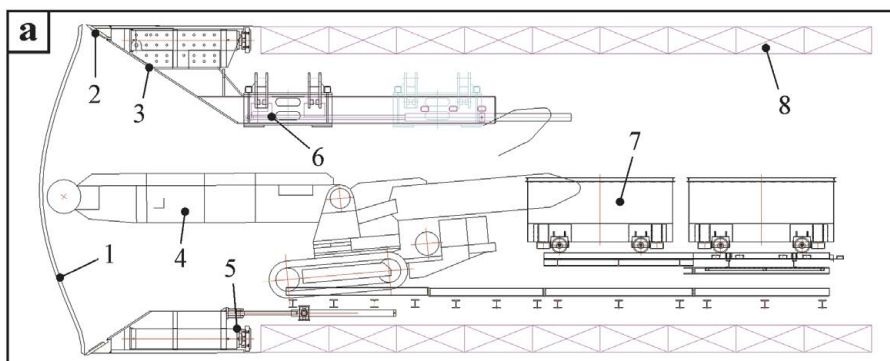


↑ **Figuur 6** Schema van de startkamers en de montagekamer onderaan de tweede schacht.

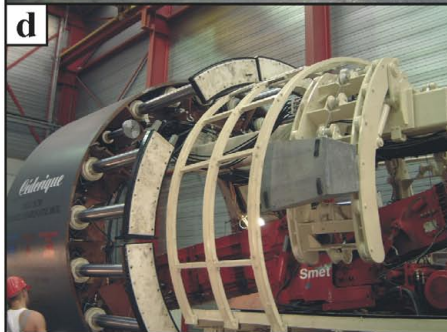
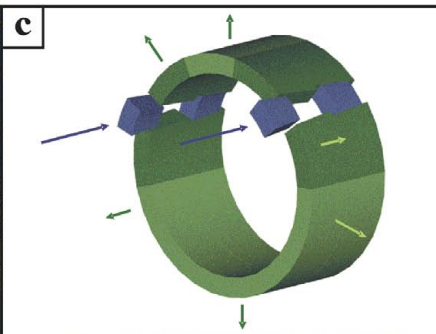


↑ **Figuur 7** Constructie van de montagekamer.

a: De uitgraving gebeurde met een pneumatische hamer; in het front zijn de glasvezel ankers zichtbaar.
 b: Het aanbrengen van de spuitbeton op de wanden van de montagekamer. De TH-profielen zijn eveneens te zien.



1: uitgravingsfront
 2: snijschoen, de oversize is aanpasbaar van 0 tot 30 mm
 3: schild
 4: freeskop
 5: hydraulische vijzel
 6: bird-wing erector
 7: wagon
 8: bekleding: wedge-block systeem



↑ **Figuur 8** Algemeen overzicht van de tunnelmachine.

a: Schematisch overzicht van de machine en haar onderdelen.
 b: De machine tijdens de proefmontage.
 c: Het wedge-block systeem: door het induwen van conische sleutelsegmenten wordt de ring opgespannen tegen het massief.
 d: De hydraulische vijzels die instaan voor het voortduwen van het schild en de bird-wing erector die een sleutelsegment verplaatst.
 e: Freeskop op de beweegbare arm. Aan de randen van het schild zijn ook de aanpasbare snijmesses zichtbaar.

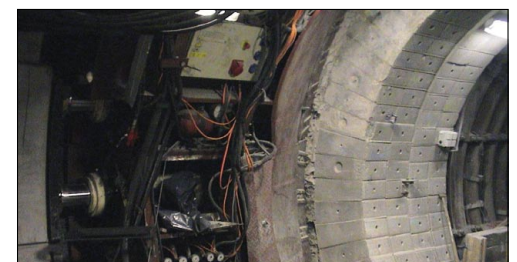
breuken geïnduceerd in het massief, daarom werd het front van de startkamer met glasvezel ankers versterkt vooraleer de montagekamer werd uitgegraven. De uitgraving gebeurde door middel van een pneumatische hamer (*figuur 7a*) en de bekleding bestond uit stalen glijdprofielen (TH-profielen) en vezelversterkte spuitbeton (*figuur 7b*). Eens de montagekamer z'n uiteindelijke lengte had, werd ook op het front spuitbeton aangebracht. De finale bekleding van de montagekamer is dezelfde als die van de verbindingsgalerij zelf (cf. infra). Voordat de tunnelmachine overgebracht werd naar de montagekamer, werd ze eerst gemonteerd aan de oppervlakte om de geometrie en de goede werking van alle onderdelen en de machine in haar geheel te controleren. Deze test was noodzakelijk omdat zelfs een kleine aanpassing zeer moeilijk kan zijn eens in de ondergrond. Nadat de goede werking vastgesteld was, werd alles terug ontmanteld en werden alle onderdelen ondergronds gebracht en gemonteerd. De initiële positie en oriëntatie van het schild werden verzekerd door een schildwieg op de bodem van de montagekamer.

DE GALERIJ

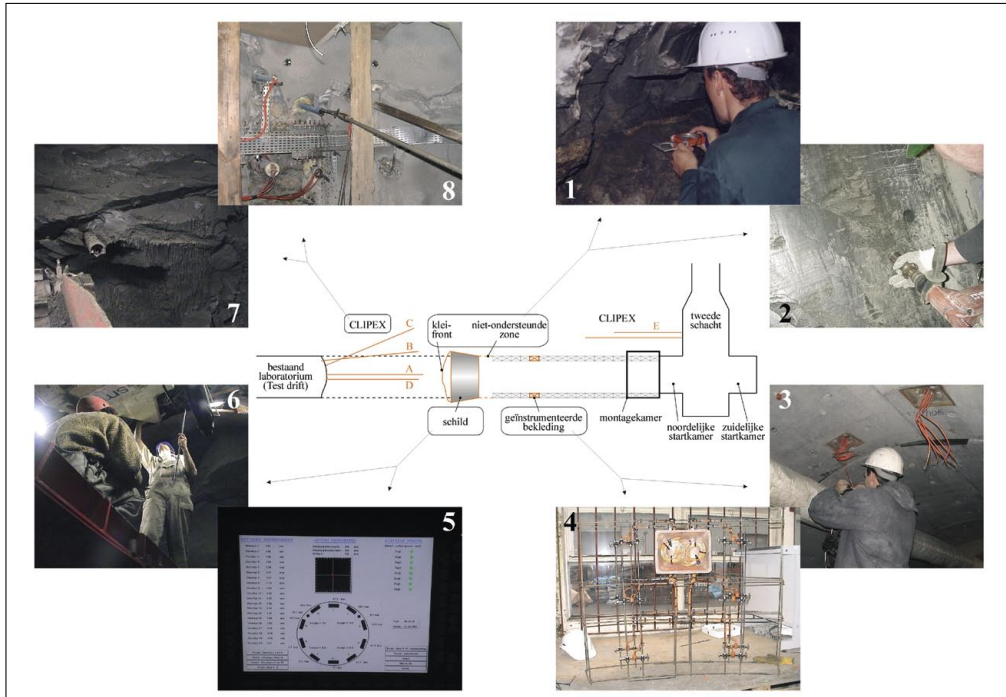
Figuur 8 geeft enkele beelden van de gebruikte tunnelmachine: de uitgravings- en bekledings-techniek en het schild worden er geïllustreerd.

Uitgravingstechniek

Het kleifront werd uitgegraven met een freeskop gemonteerd op een beweegbare arm; deze arm zorgde tevens voor de onmiddellijke afvoer van de uitgegraven klei. Het schild was lichtjes conisch: de diameter vooraan was 4,83 m en achteraan 4,82 m, de lengte was 2,3 m. Het uiteindelijke uitgravingsprofiel was effen en gelijkmatig aangezien het schild vooraan uitgerust was met snijmesses. De actieradius van de freeskop was bewust beperkt opdat deze niet de gehele oppervlakte van het front kon affrezen en de snijmesses van het schild schraapten dus de laatste decimeters klei af wanneer het schild vooruit gedrukt



↑ **Figuur 9** Het schild in contact met de Test Drift (betonnen bekleding).



↑ **Figuur 10** Overzicht van het wetenschappelijk programma (in wijzerzin). Observatie van het front en de zijwanden: opmeten van de oriëntatie en helling van een breukvlak (1) en monsternamen naast een breukvlak (2). Geïnstumenteerde segmenten: manuele uitlezing van de rekstrookjes vlak na de plaatsing van de bekleding (3) en de rekstrookjes op hun draagstructuur zoals ze ingegoten werden in de bekledingssegmenten (4). Instrumentatie van het schild: het scherm dat de uitgravingsparameters visualiseerde en de nodige informatie gaf voor de bediener van de tunnelmachine (5) en de manuele meting van de afstand tussen het schild en het kleimassief (6). Instrumentatie van het kleimassief geplaatst vanuit de Test Drift (CLIPLEX): instrumentatie in het uitgravings-gabariet, gezien op het uitgravingsfront van de verbindingsgalerij (7) en gezien op het front van de Test Drift (8).

werd. De positie van de messen kon aangepast worden zodat een uitgegraven diameter tussen 4,83 m en 4,89 m mogelijk was.

Het ontwerp van het schild vereiste een goede kennis van de respons van het massief op de uitgraving. Voor het vastleggen van de geometrie die hierboven beschreven werd, was het namelijk belangrijk de ogenblikkelijke convergentie van de klei nauwkeurig in te schatten. Indien er een grotere convergentie zou optreden dan verwacht, bestond het gevaar dat de wrijving tussen het schild en het massief zo hoog werd dat het onmogelijk zou worden het schild vooruit te drukken. Ook het uitvoeren van stuurcorrecties werd moeilijker bij een grotere druk van het massief op het schild. Daartegenover staat dat er toch een zekere contact-zone (klei/schild) nodig was achteraan het schild om het te centraliseren. De startpositie van de messen werd bepaald aan de hand van modelberekeningen. De uitgegraven diameter bedroeg 4,89 m, de snijmesses werden dus op hun maximale positie ingesteld. Deze keuze bleek optimaal te zijn zodat de positie van de messen ongewijzigd bleef tijdens de gehele uitgraving.

Om het risico op blockage van het schild te

verkleinen werd het conisch uitgevoerd, werd het bekleed met een verf op basis van teflon (cf. lage wrijvingscoëfficiënt) en werd een grote duwkracht voorzien. Het schild werd namelijk vooruitgedrukt door 20 hydraulische vijzels die samen een kracht van 40000 kN konden leveren.

De bekleding

De dimensionering van de bekleding van de verbindingsgalerij gebeurde volgens Eurocode 2, bij uiterste grenstoestand. Naast het eigen gewicht en de belastingen door manipulaties was de druk van het massief op de bekleding het belangrijkste belastingsgeval. Het meest penaliserende geval dat beschouwd werd was een anisotrope druk van het massief: horizontale druk van 3,7 MPa en een verticale van 3 MPa. Er werd geopteerd voor het zogenaamd wedge-block systeem, deze techniek bestaat erin een bekledingsring op te bouwen uit segmenten waarvan er twee conisch van vorm zijn: de zogenaamde sleutels. Nadat de andere segmenten geplaatst waren, werden de sleutels in de ring gedruwd; daardoor wil de ring uitzetten en werd deze als het ware opgespannen tegen de wand van de uitgraving. De seg-

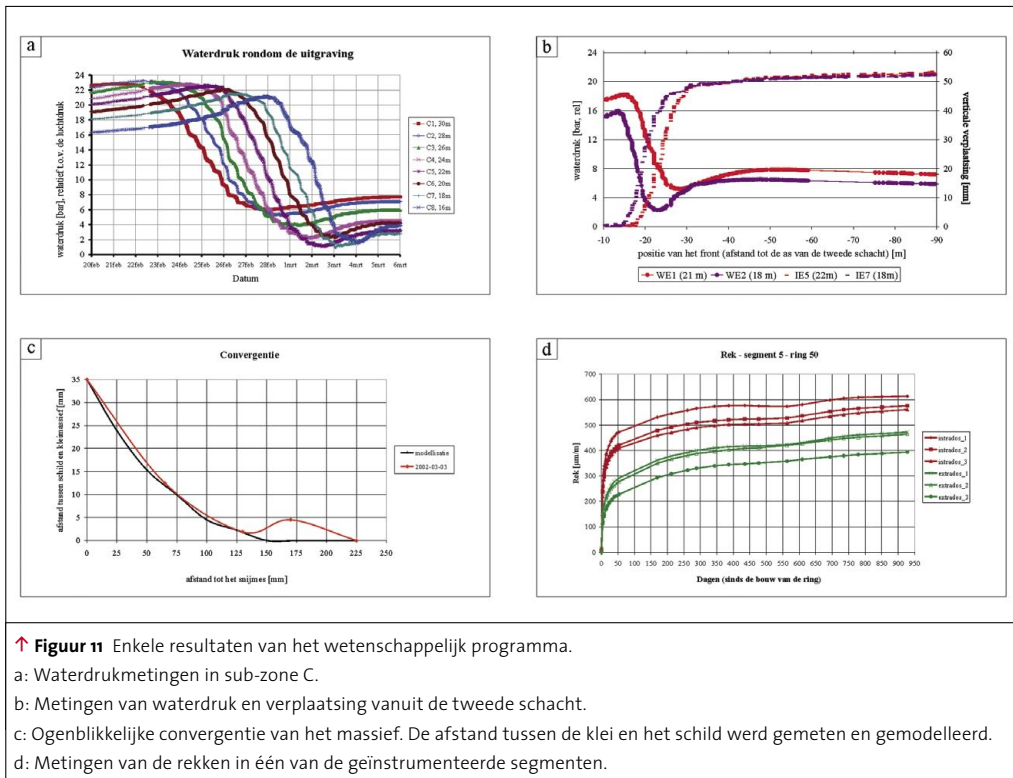
menten worden geplaatst door een zogenaamde bird-wing erector, ze zijn vervaardigd uit ongewapend beton (C65/80), hebben een dikte van 0,4 m en zijn 1 m breed. De sleutels konden minder of meer ingedrukt worden, naargelang de vereiste buitendiameter. Zo werd het mogelijk ringen te bouwen met een diameter tussen 4,79 m en 4,81 m. Speciale maatregelen, zoals een andere type van sleutels, waren voorhanden indien de benodigde diameter buiten dit bereik zou liggen. Om de verstoring van het massief zoveel mogelijk te beperken werd de bekleding zo snel mogelijk na de uitgraving geplaatst. In de praktijk gebeurde dit door 1 m uit te graven en vervolgens achter het schild een bekledingsring, eveneens 1 m, te plaatsen.

Beperken van de convergentie

Voor een toekomstige bergingssite en ook voor het huidige onderzoekslaboratorium is het van belang dat de Excavation Damage Zone (EDZ) tot een minimum beperkt blijft. Daarom werd getracht een zo klein mogelijke convergentie van het massief toe te laten. Deze doelstelling werd ondermeer bereikt door volcontinu te werken (7/7, 24/24). Een ander belangrijk aspect hierin is de snelheid van uitgraving. Studies toonden aan dat indien een uitgraving aan een snelheid van meer dan 2m/24u gebeurt, de convergentie (en dus de verstoring) van het massief kleiner is dan bij lagere snelheden [4], [5]. De aannemer was dan ook verplicht minimum 2 m per 24 uur uit te graven en te bekleden, een vereiste die steeds gerespecteerd werd: de gemiddelde snelheid was zo'n 3m/24u, met pieken tot 4m/24u. Vooral de aan- en afvoer van materiaal via de schacht was hier de beperkende factor. Zoals reeds vermeld droeg ook de keuze van het bekledingssysteem bij tot het beperken van de convergentie: de bekleding werd vlak achter het schild geplaatst en werd tegen de klei geëxpandeerd zodat er geen bijkomende convergentie mogelijk was.

De verbinding

De aansluiting van de verbindingsgalerij op de Test Drift was nagenoeg perfect: de eindpositie van het schild sluit goed aan bij de bestaande galerij (figuur 9). Aangezien het terug uitbouwen van het schild een grote verstoring van het massief zou teweegbrengen, werd het schild ter plaatse gelaten en doet het dienst als bekleding van de laatste meters van de galerij. Bovendien blijft het zichtbaar zodat de herinering aan de uitgraving levend gehouden wordt voor toekomstige ingenieurs die, binnen



enkele decennia, de eigenlijke bergings-site moeten construeren.

HET WETENSCHAPPELIJK PROGRAMMA

Doordat de uitgraving naar het bestaande laboratorium toe gebeurde, was dit een unieke gelegenheid om het hydromechanische gedrag van de Boomse klei in meer detail te bestuderen. Het massief vóór het uitgravingsfront kon immers geïnstrumenteerd worden vanaf de Test Drift. Het wetenschappelijk programma kan onderverdeeld worden in enkele categorieën (figuur 10).

Ten eerste werd het kleimassief zelf geïnstrumenteerd (project CLIPLEX): waterdrukken, totale drukken en verplaatsingen werden op verscheidene plaatsen opgemeten. Het doel van CLIPLEX was niet zozeer de monitoring van de stabiliteit van het massief tijdens de uitgraving (vroegere uitgravingen toonden dit reeds voldoende aan) maar wel het verkrijgen van een beter inzicht in de hydromechanische respons van de Boomse Klei op een uitgraving. Dit moet toelaten bij volgende projecten de respons van het massief met meer zekerheid te voorspellen. De instrumentatie bevond zich in twee zones rondom de verbindingsgalerij; 8 boorgaten (30 m diep) werden geïnstrumenteerd vanuit de Test Drift en twee (21 en 30 m diep) vanuit de tweede schacht. De acht boringen vanuit de Test Drift waren

verder verdeeld in vier sub-zones: de as van de toekomstige verbindingsgalerij (sub-zone A), de plaats van de toekomstige tunnelbekleding (sub-zone B), rondom de toekomstige galerij in een verticaal (sub-zone C) en een horizontaal vlak (sub-zone D). Elke sub-zone omvat twee boorgaten: één voor het meten van verplaatsingen, het ander voor het meten van waterdrukken en totale drukken. Eveneens vanuit de tweede schacht (E) werden verplaatsingen enerzijds (2,5 m boven de verbindingsgalerij) en waterdrukken en totale drukken anderzijds (4 m boven de verbindingsgalerij) gemeten. De plaatsing van de instrumentatie gebeurde enkele jaren voor de eigenlijke uitgraving van de verbindingsgalerij, zodat de verstoring van het massief door de plaatsing geen invloed meer had. De metingen verliepen volautomatisch en continu.

Ten tweede gebeurden er diverse metingen op het schild zoals de benodigde kracht om het schild vooruit te duwen en de positie van de hydraulische vijzels. Deze automatische metingen werden om de dertig seconden opgeslagen op een PC in het schild. Daarnaast werden verscheidene malen per dag manuele metingen uitgevoerd van de positie en de oriëntatie van het schild, van de uitgegraven diameter en van de ogenblikkelijke convergentie van het massief. De metingen op het schild bewezen hun nut tijdens de uitgraving; op basis van de metingen werden koers-

correcties gepland en kon nagegaan worden of het uitgegraven profiel compatibel bleef met de bekleding.

Ten derde werden 32 bekledingssegmenten voorzien van rekstrookjes (trilsnaren) in de omtreksrichting. Drie volledige secties (behalve de sleutelsegmenten) werden op deze wijze geïnstrumenteerd zodat de spanningsopbouw op deze secties in de tijd kon opgevolgd worden.

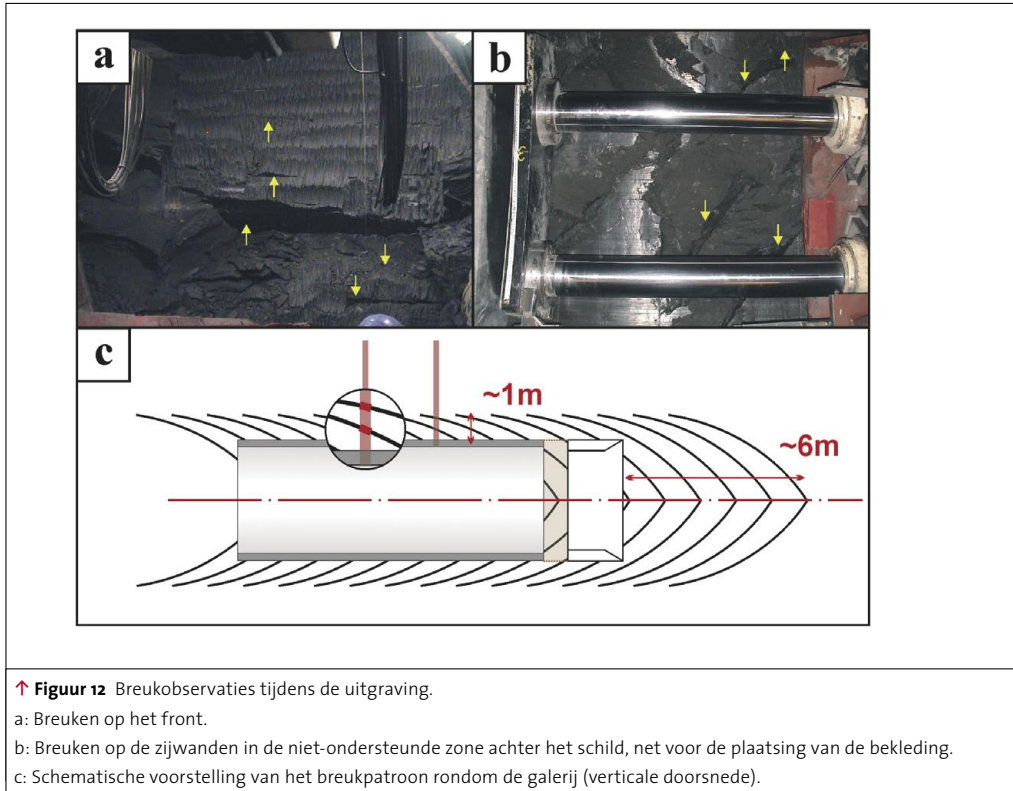
Tenslotte werd de EDZ gekarakteriseerd; tijdens de uitgraving werden het front en de zijwanden systematisch geobserveerd en werden de breuken opgetekend en gekarakteriseerd (breuktype en oriëntatie). Dit resulteerde in een gedetailleerd overzicht van de breuken geïnduceerd door de uitgraving. Na de voltooiing van de galerij werden kernboringen uitgevoerd om te bepalen hoever de breuken zich in het massief uitstrekken.

RESULTATEN

Voor een uitvoerige bespreking van de resultaten van het wetenschappelijk programma wordt verwezen naar [3] en [6]. Bij wijze van voorbeeld worden hier enkele resultaten aangehaald.

Figuur 11a toont metingen van de waterdruk in het massief. Deze metingen gebeurden in sub-zone C (figuur 10), de meetpunten bevinden zich tussen 16 m en 30 m diepte in het boorgat. Het meetpunt C1, 30 m in het boorgat, is het verst gelegen van de Test Drift en reageerde dus het eerst op de uitgraving. Het verloop van de metingen is voor alle meetpunten gelijkaardig. Eerst is er een stijging van de waterdruk: voor het front is er een verhoging van de (totale) spanningen en doordat de permeabiliteit van de klei zeer klein is kan het poriënwater niet wegvloeien zodat ook de waterdruk stijgt (ongedraineerde respons). Als het front nog dichterbij komt daalt de waterdruk sterk door de ontspanning van de klei in de onmiddellijke omgeving van het front. Wanneer de bekleding geplaatst is, treedt er een reconsolidatie van het massief op en hierdoor stijgt de waterdruk weer. Het verloop van de waterdruk werd vooraf ook gemodelleerd. De tendensen (stijging, daling en weer stijging) werden correct berekend maar de absolute waarde van de drukvariaties werden onderschat door de modellen.

Figuur 11b toont metingen in zone E (vanuit de tweede schacht) van de waterdruk en de



verticale verplaatsing boven de verbindingsgalerij. Voor de waterdruk bevat de grafiek de gegevens van de meetpunten 18 en 21 m diep in het boorgat, voor de verplaatsing die van de meetpunten op 18 en 22 m diepte. De respons van de waterdrukken op de uitgraving is gelijkaardig als in sub-zone C: eerst een stijging, vervolgens een sterke daling en ten slotte terug een kleine stijging. De verplaatsingsmetingen tonen een sterke hydromechanische koppeling aan. De ontspanning van het massief is zichtbaar in de opgemeten verplaatsingen en na de plaatsing van de bekleding, stabiliseren de verplaatsingen zich.

Figuur 11c toont resultaten van de convergentiemetingen op het schild. De afstand tussen de buitenkant van het schild en het massief werd op verschillende plaatsen opgemeten. Voor de uitgraving werden modelberekeningen gemaakt van de convergentie dewelke door de metingen bevestigd werden. De contact-zone klei/schild was ongeveer 0,75 m. De totale radiale convergentie (som van de convergentie vóór het front en de convergentie tussen het front en de plaats van bekleding) bedroeg 0,09 m op de straal.

Figuur 11d toont de metingen van de rekstrookjes in een bekledingssegment. Drie meetpunten zijn gelegen dicht bij de binnenzijde van de galerij (intrados), drie dicht

bij de butenzijde (extrados). De spanning loopt sterk op gedurende de eerste weken na de plaatsing: snelle drukopbouw van het massief op de bekleding. Daarna lopen de metingen geleidelijk aan verder op door verdere drukopbouw van het massief maar ook door kruip in de bekledingssegmenten. De detail-analyse van de metingen gaf een schatting van de uitwendige druk van het massief op de bekleding tussen de 2,1 en 3,1 MPa na ~1,5 jaar. De in-situ druk is ~4,5 MPa.

Door breukobservaties tijdens de uitgraving van de galerij en de analyse van kernen werd een breukpatroon geïdentificeerd. Een verticale doorsnede van dit patroon is te zien op *figuur 12*. De vorm van de breuken is te verklaren door de spanningstoestand waarin ze ontstaan. Voor het front van een galerij vallen de spanningen in de as-richting nagenoeg op nul; de spanningen in radiale richting nemen er daarentegen toe. Bovendien is in onverstoorde toestand de verticale spanning ter hoogte van HADES iets hoger dan de horizontale spanningen ($K_0 \sim 0,9$). Dit maakt dat voor het front van de verbindingsgalerij de grootste hoofdspanning verticaal was en de kleinste volgens de asrichting van de galerij. Het geobserveerde breukpatroon is het gevolg van deze spanningstoestand. De breuken ontstonden zo'n 6 m voor het front en strekten zich ongeveer 1 m uit in het massief. De afstand tussen opeenvolgende

breukvlakken was enkele decimeter. De beperkte (radiale) omvang van de breukzone is een rechtstreeks gevolg van de genomen maatregelen om de convergentie te beperken: continue en snelle uitgraving en het plaatsen van een rigide bekleding snel na de uitgraving [7].

CONCLUSIES

De succesvolle realisatie van de verbindingsgalerij was een belangrijke stap in de haalbaarheidsstudie voor diepe berging van hoogactief afval in België. Er werd namelijk aangetoond dat het mogelijk is galerijen uit te graven op industriële wijze en met beperkte verstoring van het massief. Met aangepaste middelen en vooral een grotere toegangschacht wordt 10m/dag mogelijk geacht. Het bijhorende wetenschappelijke programma leverde waardevolle gegevens over het hydromechanische gedrag van de Boomse Klei rondom een uitgraving. Er werd onder meer bevestigd dat de poriënwater drukken sterk samenhangen met de verplaatsingen in het massief en dat ze sterker beïnvloed worden door een uitgraving dan voordien gedacht. Verder werd voor het eerst de ogenblikkelijke convergentie van het massief opgemeten vlak na uitgraving, deze was in overeenstemming met de modelberekeningen. De druk van het massief op de bekleding bedraagt ongeveer 1/2 à 2/3 van de oorspronkelijke druk (4,5 MPa). De studie van de breuken rondom de uitgraving leidde tot de herkenning en verklaring van een breukpatroon.

DANKWOORD

De succesvolle realisatie van de verbindingsgalerij en het bijhorende wetenschappelijk programma was slechts mogelijk door een goede samenwerking tussen alle partners: de aannemer was de Tijdelijke Vereniging SCM (Smet Tunneling, Wayss & Freytag AG en Deilmann-Haniel GmbH), Tractebel Development Engineering trad op als studiebureau, SECO als controlebureau en het ESV EURIDICE was de bouwheer. Het wetenschappelijk programma werd mede mogelijk gemaakt door de steun van de Europese Commissie.

REFERENTIES

- [1] Bernier F., Bastiaens W., (2004), "Fracturation and Self-Sealing processes in clays: the SELFRAC project", EURADWASTE 2004, 29 March - 1 April, Luxembourg, to be published.

- [2] De Bruyn D., Van Cauteren L., (1997), “De tweede schacht te Mol: een eerste stap in de verdere uitbreiding van een ondergronds onderzoekslaboratorium”, Geotechniek 1^e jaargang n^o4, EDUCOM Rotterdam.
- [3] Bastiaens W., Bernier F., Buyens M., Demarche M., Li X.L., Linotte J.-M., Verstricht J., (2003), “The connecting gallery – the extension of the HADES underground research facility at Mol, Belgium”, EURIDICE report 03-294, ESV EURIDICE.
- [4] Rousset G., (1988), “Comportement mécanique des argiles profondes – application au stockage des déchets radioactifs”, Thèse de doctorat, Ecole Nationale de Ponts et Chaussées.
- [5] Van Cotthem A., (1992), “L’expérience de démonstration PRACLAY – Modalités de réalisation des excavations et soutènements”, report NIROND 92-03, ONDRAF/NIRAS.
- [6] Bernier F., Li X.L., Verstricht J., Barnichon J.D., Labiouse V., Bastiaens W., Palut J.M., Ben Slimane K., Ghoreychi M., Gaombalet J., Huertas F., Galera J.M., Merrien K., Elorza F.J., Davies C., (2002), “CLIPLEX”, Report EUR 20619, Commission of the European Communities.
- [7] Mertens J., Bastiaens W., Dehandschutter B., (2004), “Characterisation of induced discontinuities in the Boom Clay around the underground excavations (URF, Mol, Belgium)”, Applied clay science 26 (2004), pp. 413-428, ELSEVIER.
- in 1952 opgericht en één van de statutair vastgelegde opdrachten is het uitvoeren van onderzoek naar de veilige conditionering en berging van radioactief afval.
- NIRAS:
Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen (Kunstlaan 14, 1210 Brussel, België, HYPERLINK “<http://www.niras.be>” www.niras.be). De instelling werd in 1980 bij wet opgericht en is verantwoordelijk voor al het in België geproduceerde radioactief afval.
- EDZ:
Excavation Damaged Zone. Dit is de beschadigde zone rond een uitgraving. Specifiek voor geologische berging van nucleair afval wordt de EDZ gedefinieerd als die zone rond een galerij of schacht waar de transportkarakteristieken (bv. permeabiliteit) van het gastgesteente significant gewijzigd werden door de uitgraving.
- Rupeliaan:
Geologische periode uit het Tertiair, ~36-30 miljoen jaar geleden.
- TAW:
Tweede Algemene Waterpassing. In België gebruikt men TAW als referentie voor het aanduiden van hoogten. In Nederland is NAP (Normaal Amsterdams Peil) de standaard. TAW ~ NAP + 2,33 m.

VERKLARENDE WOORDENLIJST

HADES:

High Activity Disposal Experimental Site.
Ondergronds onderzoekslaboratorium voor de geologische berging van radioactief afval.
Gelegen onder de terreinen van het SCK•CEN te Mol, 223 m diep in de Boomse kleilaag.

ESV EURIDICE:

Economisch SamenwerkingsVerband European Underground Research Infrastructure for Disposal of nuclear waste In Clay Environment (Boeretang 200, 2400 Mol, België, HYPERLINK “<http://www.euridice.be>” www.euridice.be), dit is een samenwerkingsverband tussen SCK•CEN en NIRAS.

SCK•CEN:

Studiecentrum voor kernenergie - Centre d’étude de l’énergie nucléaire (Boeretang 200, 2400 Mol, België, HYPERLINK “<http://www.sckcen.be>” www.sckcen.be). Het SCK•CEN werd