BIBLIOTHEEK
GeoDelft
Dok.nr. 2002-539

Dwarsverbindingen Hubertustunnel

Innovatieve oplossing voor waterdichte dwarsverbinding

ing. C. Huisman, BAM Civiel / Delta Marine Consultants
ir. S. van der Woude, Van Hattum en Blankevoort

De Hubertustunnel is onderdeel van de Noordelijke Randweg Haagse Regio (N14) en sluit aan op het Hubertusviaduct in Den Haag. De tunnel bestaat uit twee buizen van circa 1500 m lengte met een inwendige diameter van 9,40 m, een tussenafstand van 6 m en vijf dwarsverbindingen, 250 m h.o.h. De grondopbouw bestaat hoofdzakelijk uit zand (fig. 1). In het bestek werd geëist de dwarsverbindingen volledig ondergronds uit te voeren, met volledige ontwerpvrijheid voor de aannemer. Het innovatieve van de door de bouwcombinatie ontworpen dwarsverbindingen is dat deze voor het eerst geheel met spuittechniek worden uitgevoerd, zowel het beton als de waterdichte folie.

De dwarsverbindingen worden aangelegd met behulp van vriestechniek. In een cirkelvormig raster worden vrieslansen van de ene naar de andere tunnelbuis geboord. De vrieslansen worden aangesloten op een vriesinstallatie, die pekel van -30°C door de lansen pompt. Als de vriesring die zo tussen beide tunnelbuizen ontstaat voldoende dikte heeft en aansluit aan beide buizen, kan de lining aan een zijde worden doorbroken. Vervolgens wordt het inwendige van de bevroren ring in twee fasen ontgraven, eerst het bovenste driekwart deel en later het onderste kwart deel. Na de eerste fase worden een wapeningskorf en een 220 mm dikke spuitbetonlaag aangebracht. In de tweede fase wordt het onderste gedeelte ontgraven, waarna de wapening wordt aangeheeld en het laatste spuitbeton wordt aangebracht. Op dat moment is een gesloten ring aanwezig van gewapend spuitbeton, die de grond en waterdruk kan weerstaan (fig. 2).

Op deze spuitbetonlaag wordt een waterdichte folie aangebracht, die aansluit tegen de lining van de tunnel (fig. 3). Om beschadigingen te voorkomen, wordt hiertegen een beschermlaag van 25 mm spuitbeton aangebracht. Ten slotte wordt de definitieve gewapendbetonconstructie gemaakt met een dikte van 350 mm, waarna de vriesinstallatie kan worden uitgeschakeld. Een overgangsconstructie aan weerszijden, waarin de brandwerende deur wordt aangebracht, completeert de dwarsverbinding (fig. 4).
Bij de bouw van de tunnelbuizen zijn ter plaatse van elke dwarsverbinding vier segmenten ingebouwd met extra wapening. De doorbraak in de lining wordt tot stand gebracht door bij deze segmenten een deel ervan weg te breken. De momenten en normaalkrachten worden opgenomen door de wapening in het resterende deel van de segmenten.

Op moment van schrijven, eind augustus 2007, is het werk aan de dwarsverbindingen van de Hubertustunnel in volle gang. De ruwbouw van de eerste twee dwarsverbindingen is klaar en ook de ruwbouw van de derde dwarsverbinding is bijna afgerond. Het vriezen van de vierde dwarsverbinding is in gang en binnen enkele weken zal ook de vriesinstallatie voor de laatste dwarsverbinding zijn werk gaan doen.

Ontwikkeling bouwmethode

In het oorspronkelijke aanbestedingsontwerp bestonden de dwarsverbindingen uit een buitenring van gewapend spuitbeton waartegen een prefab folie werd aangebracht, die met klemstrippen aan de tunnellining werd bevestigd. Hiertegen werd, met behulp van een binnenbekisting, in het werk een binnenring gestort. Al in deze fase is onderzocht of als alternatief een gespoten folie kon worden toegepast. Destijds was de koude ondergrond waarop de folie moest worden aangebracht een te groot bezwaar. Verwacht werd dat de buitenring binnen korte tijd volledig zou

Artikelenserie Hubertustunnel

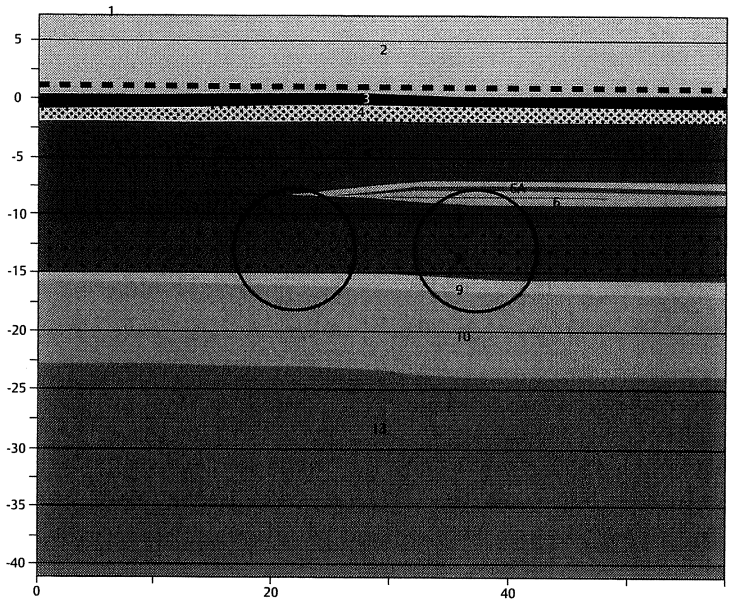
De Hubertustunnel is het gemeentelijk deel van de N14. De tunnel verbetert de bereikbaarheid van Den Haag en vermindert de verkeersdrukte in de wijken rond de Waalsdorperweg in Den Haag. Het is voor Nederland de eerste geboorde tunnel onder gebouwen door. De resultaten hierbij waren bijzonder goed. De Hubertustunnel wordt medio 2008 opgeleverd en is dan in vier jaar tijd gerealiseerd.
De goede resultaten bij de Hubertustunnel bieden veel perspectief voor toekomstige projecten zoals het Trekvliettracé in Den Haag en de te boren tunnels in de Noord/Zuidlijn in Amsterdam. In komende uitgaven van Cement zal er aandacht zijn voor verschillende aspecten van de aanleg van de Hubertustunnel.
Voor meer informatie: www.denhaag.nl/hubertustunnel

Tabel 1 | **Grondparameters**

laag (fig. 1)	E (10^5 kN/m²)	ν (-)	φ (°)	ψ (°)	c (kN/m²)	$\gamma_{verzadigd}$ (kN/m³)	γ_{droog} (kN/m³)	σ_{toel} (kN/m²)	standtijd (weken)
2	0,441	0,3	34	4	0	19,4	15,5		
$2_{verzadigd}$	0,444	0,3	34	4	0	19,4	19,4		
3	0,023	0,3	17	0	12	11,4	4,3		
4	0,452	0,3	35	5	0	18,9	14,8		
5	0,754	0,3	40	10	0	19,4	15,3		
6	0,471	0,3	32	2	0	18,7	14,2		
7	0,507	0,3	32	2	0	19,6	15,5		
8	0,85	0,3	37	7	0	19,6	15,6		
9	0,659	0,3	31,5	1,5	0	19,3	15,1		
10	0,63	0,3	33	3	0	19,3	15,1		
$7_{bevroren}$	1,5	0,3	5	0	440	19,6	15,5	950	8
$8_{bevroren}$	1,5	0,3	33	3	480	19,6	15,6	1750	8
$9_{bevroren}$	0,5	0,3	5	0	440	19,3	15,1	950	8
$10_{bevroren}$	1,5	0,3	33	3	480	19,3	15,1	1750	8

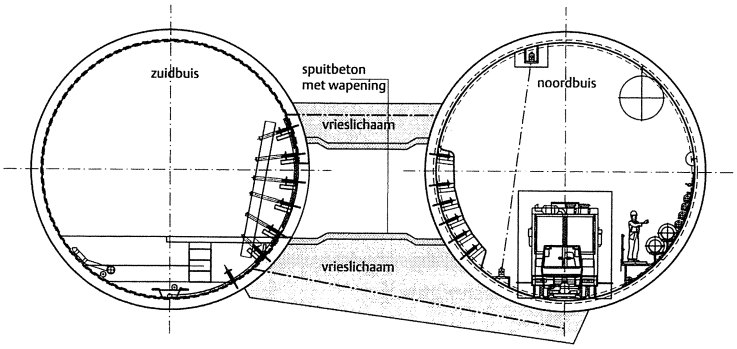
doorvriezen. De spuitfolie heeft een ondergrond met een minimale temperatuur van +5°C nodig. Om de risico's te beheersen en te onderzoeken of de uitvoeringsmethode met spuitfolie mogelijk zou zijn, is met de opdrachtgever, de gemeente Den Haag, overeengekomen een proef uit te voeren.

Bij het HSL3-project zijn succesvolle proeven uitgevoerd met het spuiten van folie, maar zonder bevroren ondergrond. De minimale ondergrondtemperatuur van +5°C kan zonder maatregelen niet worden gegarandeerd. Bij lagere temperaturen verhardt de folie zeer langzaam, terwijl bevriezen van de folie tijdens verharden staal is. Nadat de folie een minimale Shore (hardheid) heeft bereikt van 25, is het wel toelaatbaar dat deze bevriest.
Om een minimale temperatuur van de ondergrond te garanderen, worden verwarmingsdraden, zogenoemde tracings, toegepast. Deze worden vastgezet op de langswapening van het binnennet van de buitenring, h.o.h. 200 mm. Omdat op deze wijze twee constructieonderdelen zouden worden gespoten, is onderzocht of ook het definitieve constructiebeton, de binnenring, in spuitbeton zou kunnen worden aangebracht. Van het gehele proces is een proefopstelling opgezet waarin alle lagen zijn aangebracht en onderzocht.



1 | **Grondopbouw ter plaatse van Hubertusduin**

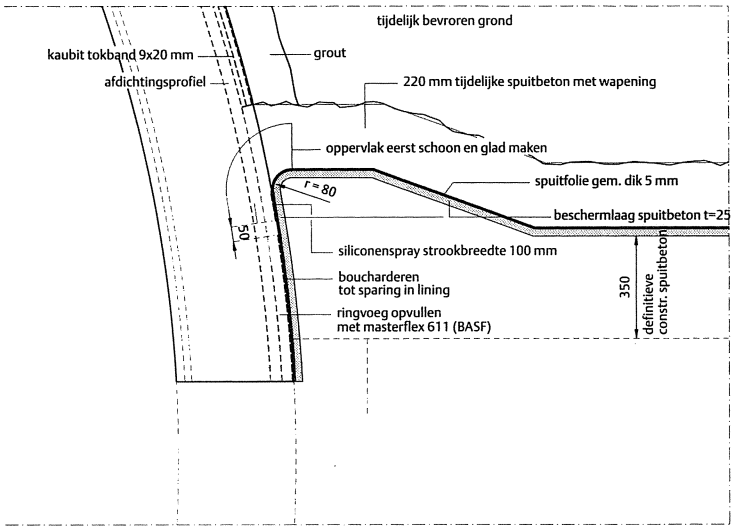
2 jong strandzand
3 hollandveen
4 duinzand
5 strandzand
6 zand met zeeklei
7 overgangslaag
8 oud strandzand
9 ziltige klei met zandlaagjes
10 zwak ziltig zand



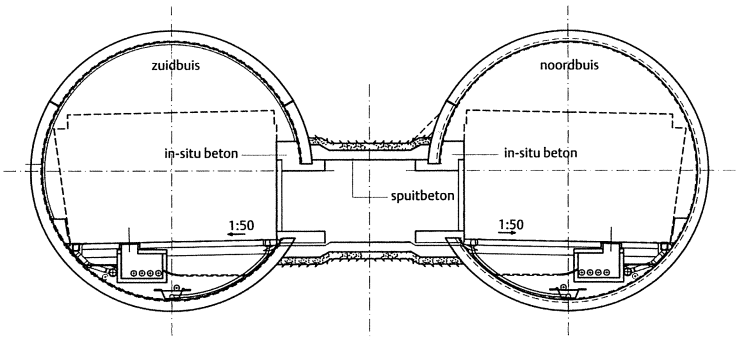
2 | **Buitenring van 220 mm spuitbeton in vrieslichaam**

Proefopstelling

Met de proef is onderzocht of de spuitfolie op een koude ondergrond kan worden aangebracht en hoe het spuitbeton rondom de wapening aansluit. De binnenring is de uiteindelijke definitieve constructie met een levensduur van honderd jaar, gewapend met een binnen- en buitennet. De aanhechting van beton aan wapening is dus essentieel.
De proef is uitgevoerd in een loods van BAM Betontechniek te Schiedam. De constructie is opgebouwd uit twee L-wanden als 'lining', waartussen een houten bekisting is aangebracht met afmetingen 2,5 x 0,30



3 | **Aansluiting waterdichte folie tegen tunnelbuis**



4 | **Dwarsverbinding voltooid**

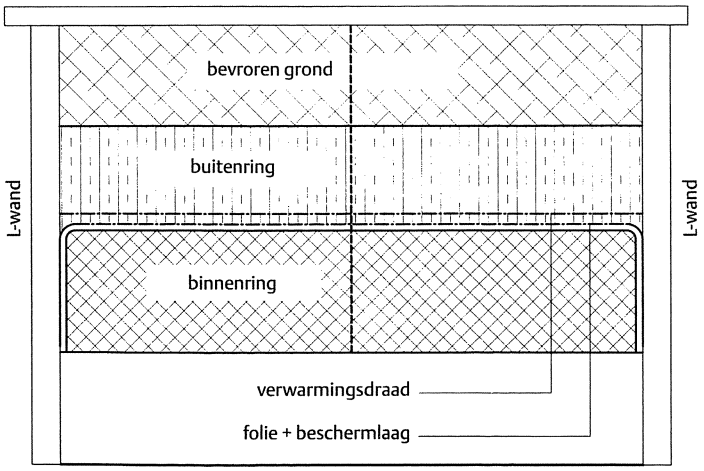
x 1,00 m³. Hierin is een koelleiding aangebracht, aangesloten op een vriesinstallatie, alsmede water en zand. Een aantal thermokoppels registreert het verloop van de temperatuur. Het principe van de opstelling is weergegeven in figuur 5. De folie op de buitenring en de tunnellining zorgen dus voor de waterdichtheid.

De volgorde van de proef bestond in hoofdlijnen uit het aanbrengen van:

- grondmassief met water en bevriezen;
- wapeningskorf buitenring (foto 6). De werkelijke wapening van de buitenring wordt ook in de proef toegepast. Ook laslengten worden gesimuleerd om het gedrag van het spuitbeton rondom de staven te kunnen onderzoeken;
- verwarmingsdraden op binnennet. Deze zijn met een thermostaat en een temperatuurvoeler te regelen. Het type draad is Jowitherm type HTA-RVS/0,42 Ohm;
- spuitbeton Maxit Gun 174 met korrel 8 mm als buitenring, totaal in één laag van 220 mm dikte met de natte spuitmethode op een bevroren ondergrond met een temperatuur van ongeveer -6°C;
- spuitfolie Masterseal*345 van BASF van gemiddeld 5 mm op de buitenring, waarbij de verwarmingsdraden voor de minimaal vereiste oppervlaktetemperatuur van +5 °C moeten zorgen;
- spuitbeton Maxit Gun 174/8 van 20 à 25 mm op de folie als beschermlaag om beschadiging tijdens het vlechten van de binnenring te voorkomen;
- wapening van de binnenring, met dwarskrachtbeugels alleen in het achternet om voldoende ruimte te hebben voor het aanbrengen van het spuitbeton (foto 7). In een volgende fase wordt het binnennet afgevlochten;
- spuitbeton Maxit Gun 174/8, 150 mm dik;
- wapening voornet;
- spuitbeton Maxit Gun 174/8, 150 mm dik tot en met het voornet;
- laatste laag spuitbeton, Maxit Gun 172, milieuklasse 3, 50 mm dik, waarmee een binnenring ontstaat van 350 mm dikte.

Resultaten en bevindingen proef

De grond werd bevroren tot een temperatuur van -4°C tot -10°C. Een belangrijk onderzoeksdetail was de werking van de verwarmingsdraden, cruciaal voor de kwaliteit van de folielaag. Om het verschil tussen wel en niet verwarmen te kunnen bepalen, waren twee circuits aangelegd waarmee de twee helften van de proefopstelling met eigen thermostaten werden aangestuurd. Nadat het spuitbeton van de buitenring was aangebracht, kon de werking van de draden nader worden onderzocht. In de proef is de thermostaat aanvankelijk op 30°C gezet en daarna gedurende 1½ dag op 15°C



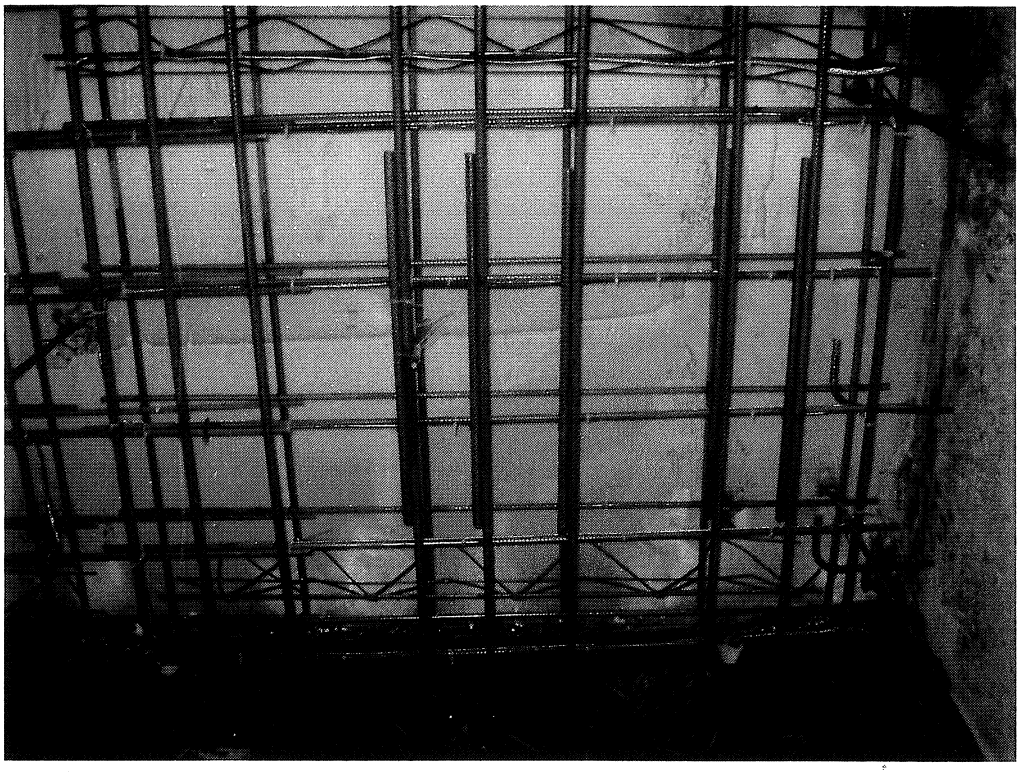
5 | **Principe proefopstelling**

gehouden. In 5 à 6 uur was de oppervlaktetemperatuur ongeveer 15°C aan de zijde met ingeschakelde draden, waaruit bleek dat de draden hun functie goed vervulden.

De folie is aangebracht bij een minimale oppervlaktetemperatuur van het beton van +3°C à +5°C, om de ondergrens te onderzoeken. De verdere condities waren een omgevingstemperatuur van 15°C en voldoende ventilatie door een blower. Een leermoment in de proef volgde al de dag erop, toen bleek dat de folie was gescheurd door een direct op de folie gerichte, te sterke luchtstroom van de blower.
Ook werd een tweede methode van aanbrengen van de folie beproefd, namelijk handmatig met een blokkwast op de al gespoten laag. Hiermee werden de scheuren ingewassen. Het bleek dat met handmatig aanbrengen een laag folie kan worden opgebracht van 1 à 1,5 mm, mits de ondergrond voldoende droog is.

Nadat alle spuitbeton van de binnenring in de diverse lagen was aangebracht, zijn over de volledige laagdikte tot in de bevroren grond, ter plaatse van wapeningsconcentraties, 22 kernen geboord. Uit het boorkernonderzoek kwamen een aantal belangrijke bevindingen naar voren:

- het natte spuitbeton Maxit Gun 174 met korrel 8 mm is ongeschikt om aan te brengen op een bevroren grondlichaam, dus voor de buitenring. Het beton aan de zijde van de bevroren grond was op een groot aantal plaatsen bevroren, waardoor geen binding was opgetreden. Tijdens het boren van de kernen verdween dit losse materiaal;
- een alternatief spuitbetonmengsel is noodzakelijk. In het verleden zijn diverse malen spuitbetonmengsels tegen bevroren grond aangebracht. Dit is goed uitvoerbaar met de droge spuittechniek met het mengsel Maxit Gun K36. Het nadeel van deze methode is echter de grote stofontwikkeling, waardoor dit 's nachts moet worden aangebracht om de andere werkzaamheden in de tunnel niet te storen;
- in de boorkernen van de binnenring, met het toegepaste mengsel Maxit Gun 174 korrel 8 mm, waren op sommige locaties holle ruimten achter de wapening. De oorzaak hiervan is de korrel van 8 mm. Er moest worden overgegaan naar een maximale korrel van 4 mm, met als gevolg een groter aantal lagen omdat de maximale laagdikte hier 70 à 80 mm is tegen-



6 | **Wapeningskorf buitenring in proefopstelling**

7 | **Achternet met dwarskrachtbeugels binnenring in proefopstelling**

over 150 mm met een korrel van 8 mm;
- de dikte van de folie was in sommige kernen kleiner dan de minimaal vereiste 3 mm.

Tijdens het spuiten van de folie was de dikte regelmatig in de natte situatie gemeten. Het blijkt dat na droging de dikte iets afneemt door uittreden van water. Dit is opgelost door de folie in twee gangen direct achter elkaar nat op nat aan te brengen.

Al deze bevindingen hebben geleid tot een tweede proef in een iets andere samenstelling, maar met de verbeteringen van mengsels en methode van folie aanbrengen. Deze verbeteringen zijn als voldoende beoordeeld en als zodanig in uitvoering genomen.

8 | **Steunconstructie noordbuis**

De Hubertustunnel in cijfers

tunnellengte	*1500 m*
diepste punt tunnel	*25 m onder maaiveld*
boordiameter	*10,52 m*
boorschildlengte	*10,48 m*
lengte tunnelboormachine (inclusief twee volgtreinen)	*63 m*
massa tunnelboormachine	*1110 ton*
tunnelringbreedte	*2 m*
tunnelringdikte	*0,40 m*
tunnelringdiameter (buitenkant)	*10,20 m*
gewicht van een tunnelring	*64 ton*
vrijkomend zand	*260 000 m³*
tunnelringen per buis	*750*
segmenten per ring	*7 segmenten + 1 sluitsteen*
segmenten per tunnelbuis	*5250 segmenten en 750 sluitstenen*
verwachte voortgang boren en bouwen	*eerste en tweede buis gemiddeld 15 m per dag gehaald, werk 7 dagen per week, 24 uur per dag in vier ploegendiensten*
start eerste tunnelbuis	*juli 2006*
doorbraak eerste tunnelbuis	*13 november 2006*
start tweede tunnelbuis	*februari 2007*
doorbraak tweede tunnelbuis	*4 juni 2007*
Hubertustunnel gereed	*juni 2008*

Stalen steunconstructie

Een boortunnel ontleent zijn stabiliteit aan de steun van de omliggende grond, die tevens met de waterdruk de belasting op de tunnelbuis vormt. Door de cirkelvorm ontstaan voornamelijk normaalkrachten in de ringen en ten gevolge van verschildrukken tevens nog momenten.

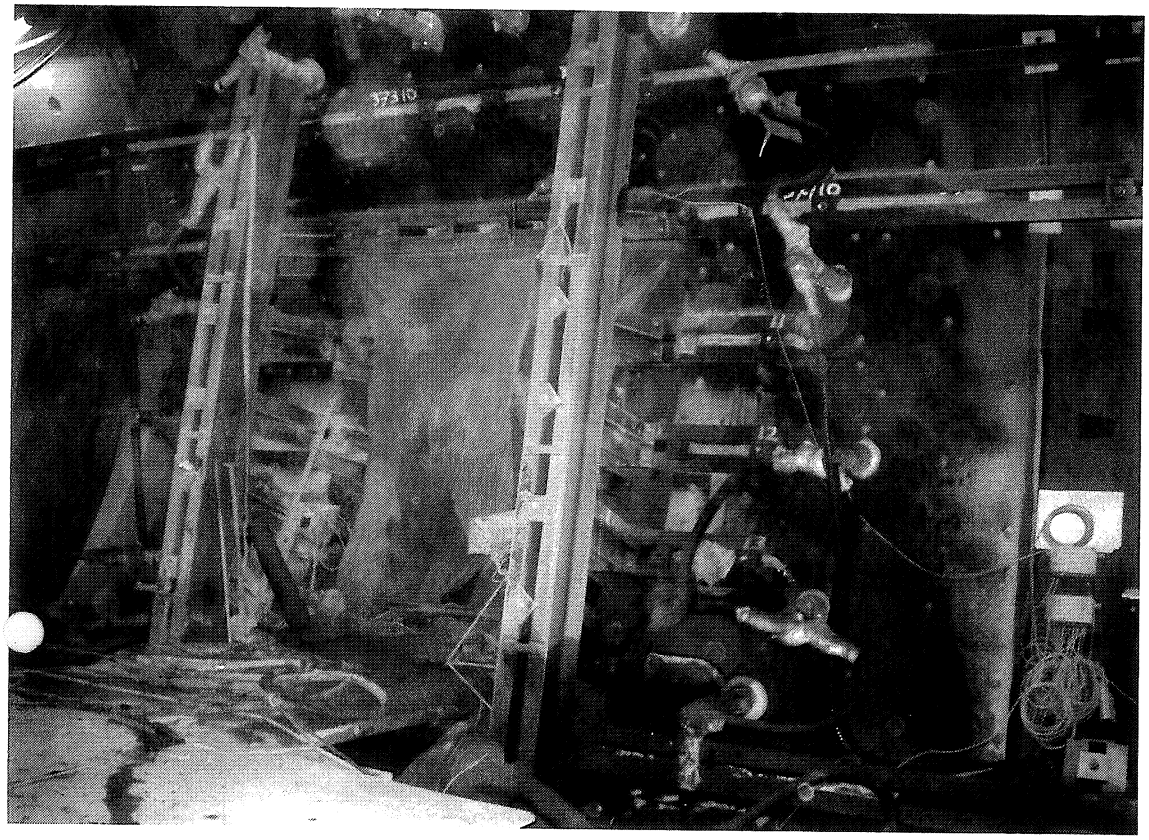
Het vrieslichaam van de dwarsverbinding kan druk uitoefenen op de tunnellining, afhankelijk van de grondsoort. Bij zand ontstaan niet of nauwelijks vriesdrukken, bij klei wel.

Als binnen de bevroren ring de grond wordt ontgraven, vervalt daar de steun voor de tunnellining, waardoor deze naar buiten wil verplaatsen. Om dit te verhinderen wordt een hulpconstructie aangebracht, bestaande uit horizontale stalen balken die afsteunen op het vrieslichaam en waaraan de segmenten met lijmankers worden bevestigd.

In de noordbuis van de Hubertustunnel (foto 8) bestaat deze constructie uit dubbele unp400 liggers, waartussen de lijmverankeringen zijn aangebracht. In de zuidbuis (foto 9) is de constructie zodanig aangepast dat ertussen kan worden gewerkt om vanaf die zijde de dwarsverbinding aan te leggen.

Vriezen

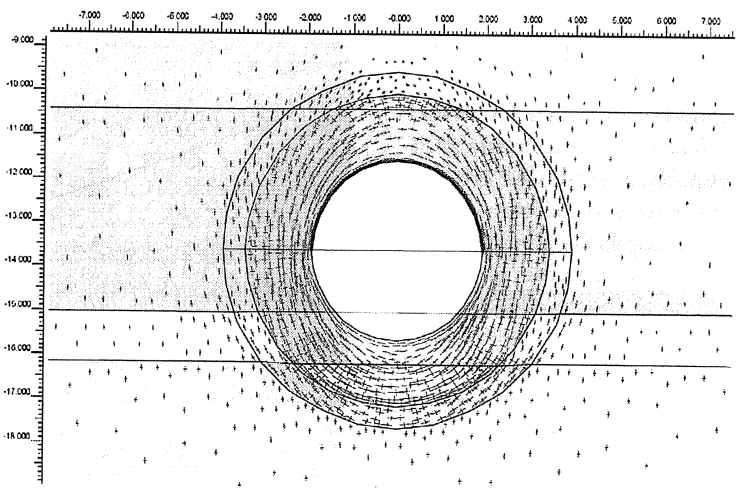
Vanuit de zuidbuis, op voorziene locaties zonder wapening, worden in een cirkelvormig raster twintig vrieslansen naar de noordbuis geboord, waarvan de invloedssferen elkaar overlappen. De vriesring is berekend met het EEM-programma Plaxis,



9 | Steunconstructie zuidbuis

waarbij een minimale dikte van 1,50 m is aangehouden (fig. 10). De grondparameters van het vrieslichaam zijn weergegeven in tabel 1. De parameters voor de bevroren grond gelden voor -10°C en een standtijd van acht weken, waarbij de waarden van de elasticiteitsmoduli als minimum gelden.

In de lijn door het toekomstige vrieslichaam zijn twee temperatuurlansen aangebracht, voorzien van thermokoppels h.o.h. 500 mm. Hiermee wordt de temperatuur van de grond en daarmee de dikte van het ijslichaam bepaald. De grens van het vrieslichaam is gedefinieerd als -2°C. In de lining van beide buizen zijn rondom het toekomstige vrieslichaam thermokoppels aangebracht om de aansluiting van het vrieslichaam op de lining te controleren. Na een invriesperiode van ruim zes weken was de eerste dwarsverbinding gesloten en kon de lining worden geopend.
Voor meer informatie over de vriestechniek, zie [1, 2].



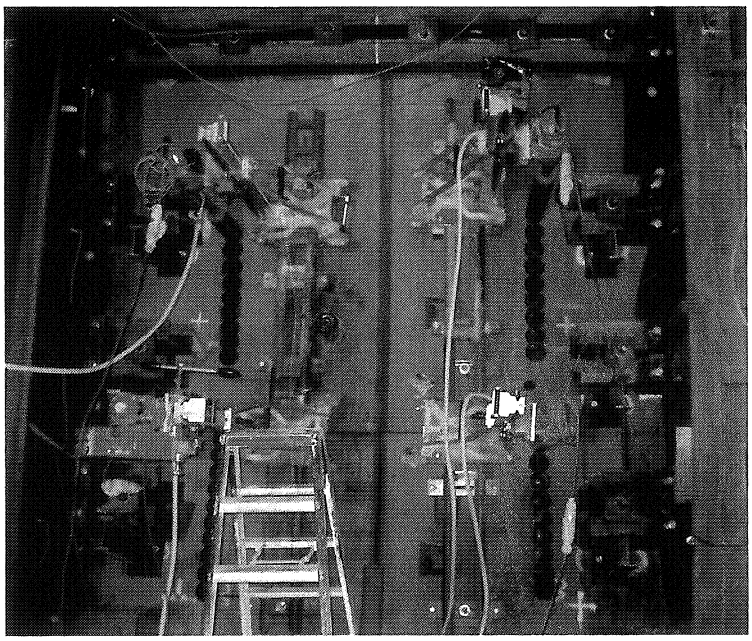
10 | Vriesring berekend met Plaxis

Openen lining

Om voor het openen van de lining zeker te zijn van de dichtheid van het bevroren grondlichaam, is een ontwateringsboring aangebracht met een manometer voor de waterdruk. Als het vrieslichaam gesloten is, wordt doorgegaan met vriezen waardoor de ring zich ook naar binnen uitbreidt. Hierdoor komt het opgesloten water aan de binnenzijde onder druk te staan, waardoor de manometer stijgt, een aanwijzing dat de ring gesloten is. De lining wordt door middel van aansluitende kernboringen plaatselijk verwijderd (foto 11).

Buitenring

Nadat in de eerste dwarsverbinding de eerste fase van ontgraving was voltooid, bleek deze iets groter dan theoretisch noodzakelijk waardoor de buitendekking ruimschoots wordt gehaald. Vervolgens is de wapening van de buitenring aangebracht en het



11 | **Verwijderen lining met kernboringen**

een dwarsverbinding duurt zo slechts twee uur.
De verwarmingsdraden zorgen voor een juiste temperatuur van de ondergrond waarop wordt gespoten, minimaal +5°C, in de praktijk +10°C tot +15°C. Nadat de folielaag is aangebracht, moet voldoende worden geventileerd om het vocht uit de folie snel af te voeren tot een relatieve vochtigheid van maximaal 65% à 70%. Na het verharden moet een minimale Shore aanwezig zijn van ten minste 25.

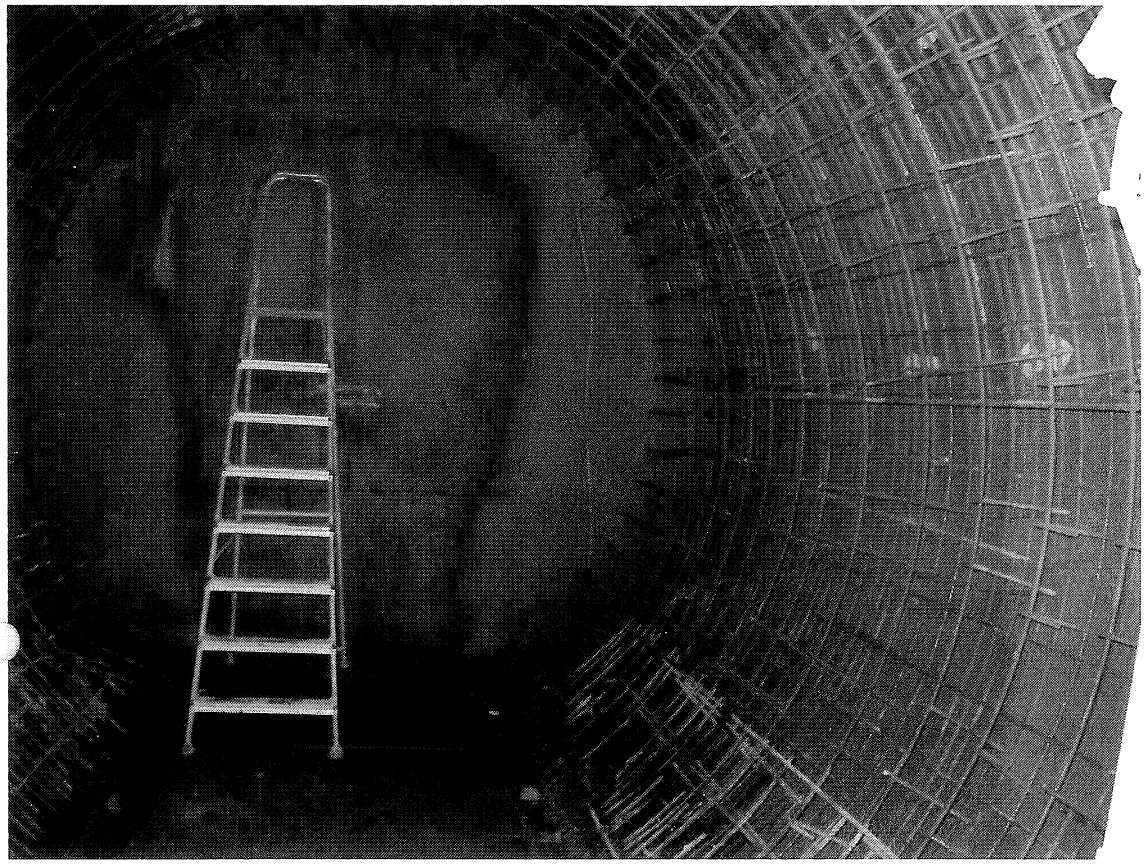
Binnenring

Nadat de 25 mm dikke beschermlaag op de folie is gespoten, wordt de vloerwapening aangebracht en spuitbeton met de droge spuitmethode met mengsel Maxit Gun K36 tegen de bevroren ondergrond gespoten tot een aantal centimeters achter het voornet.
Er is 's nachts gewerkt aan de dwarsverbindingen en er zijn vier nachten nodig geweest voor de volledige vulling. De verwarmingsdraden zijn op het voornet geplaatst voordat de laatste spuitbetonlaag in Maxit Gun 175 werd aangebracht. Ten slotte is deze laatste laag glad afgewerkt ten behoeve van het aanbrengen van de folie en zijn dezelfde activiteiten voor het onderste kwart van de dwarsverbinding uitgevoerd.

12 – 13 | **Spuiten folie**

Aanbrengen folie

Na het aanbrengen van het beton van de buitenring en nadat de ruimte voldoende is gedroogd door de verwarmingsdraden in combinatie met een ontvochtiger en een blower, kan de folielaag worden aangebracht. De stofontwikkeling tijdens het spuiten van de folie wordt zoveel mogelijk beperkt (foto 12 en 13). In de noordbuis zijn daartoe twee gaten geboord met daarachter een ventilator om het stof zo snel mogelijk af te voeren. Eerst worden zijwanden en dak gespoten en als laatste de vloer. Het aanbrengen van de folielaag in



14 | **Achternet met dwarskrachtbeugels binnenring**

wordt de vloer in normaal beton gestort. De wapening van de vloer is redelijk ingewikkeld vanwege de sparingen voor de kabelkokers. De bovenzijde van de vloer is vlak. Vervolgens wordt de rest van de wapening aangebracht. Een deel wordt geprefabriceerd; de aanheelstukken tegen de lining worden in het werk gevlochten. Om het spuitproces goed te laten verlopen, wordt eerst het achternet met de dwarskrachtbeugels aangebracht (foto 14).
Het voornet wordt na twee spuitlagen van 70 mm Maxit Gun 175 aangebracht, waarna nog twee lagen van 70 mm Maxit Gun 175 worden gespoten. De laatste laag van 70 mm wordt in Maxit Gun 172 aangebracht, die bestand is tegen milieuklasse 3.
Na afwerken van het oppervlak van het spuitbeton is het spuitgedeelte van de dwarsverbinding gereed. Nadat het beton is verhard, wordt de vriesinstallatie uitgezet, de steunconstructies verwijderd en kan de afronding met de overgangsconstructie met de lining worden gemaakt in normaal gestort beton.

Ten slotte

Voor de aanleg van de dwarsverbindingen bij de Hubertustunnel is veel winst geboekt met de resultaten van de uitgebreide proeven. Zo is voor de buitenring een spuitmortel ontwikkeld om tegen bevroren grond te worden aangebracht. Uit de proeven is verder gebleken dat het uitvoeren van de folielaag als spuitfolie een snelle verwerking oplevert en een eenvoudige aansluiting tegen de lining. Het aanbrengen van verwarmingsdraden is de basis van deze oplossing, anders zou de ondergrond te koud zijn. Het vervolgens aanbrengen van de binnenring in spuitbeton is een voortzetting van de spuittechniek en levert qua tijd niet veel winst op, maar spaart een zeer moeilijke bekisting met aansluitingen uit. Ook het aanbrengen van zelfverdichtend beton tot tegen de bovenzijde met eventuele luchtinsluitingen, wordt voorkomen. ■

Literatuur

1. Huisman, C. en F. Vahle, Diepwanden bieden veilige oplossing. *Cement* 2004, nr. 1.
2. Tuunter, L.T.C. en H. Mortier, Open vriessysteem voldoet. *Cement* 2004, nr. 1.

Projectgegevens

opdrachtgever:
Gemeente Den Haag
aannemer:
Hubertus Tunnel Combinatie (HTC), bestaande uit BAM Civiel, Van Hattum en Blankevoort en Wayss&Freytag Ingenieurbau AG
adviseur vriestechniek:
CDM (voorheen Jessberger)
uitvoering vriestechniek:
Rodio GmbH Spezial Tiefbau
leverancier tunnelelementen:
Max Bögl Bauunternehmung GmbH&Co.KG
uitvoering spuitbeton en folie:
Combinatie Brandwerende Bekleding Nederland (CBBN), bestaande uit BAM Betontechniek en Vogel