

Dwarsverbindingen tussen buizen van geboorde tunnels

Literatuurstudie

CUR / COB K300
Deelcommissie K340: Montagespanningen en
Dwarsverbindingen

Holland Railconsult
ir. E.J. van der Horst
kenmerk VC/MVD/ 95168 - versie 4.0

Utrecht, 17 november 1999
vrijgegeven

© 1999, Holland Railconsult BV.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Holland Railconsult BV.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	4
2. Algemeen	5
2.1. Functies	5
2.2. H.o.h afstand	5
2.3. Afmetingen	5
2.4. Lengte van de dwarsverbinding	6
3. Uitgevoerde projecten	7
3.1. Inleiding	7
3.2. Kanaaltunnel	7
3.2.1. Inleiding	7
3.2.2. Geologie en onderzoek	8
3.2.3. Ontwerp en constructie van de dwarsverbindingen	9
3.3. Spoortunnel onder de Størebælt	11
3.3.1. Inleiding	11
3.3.2. Geologie en onderzoek	11
3.3.3. Ontwerp van de dwarsverbindingen	12
3.3.4. Constructie dwarsverbindingen in de glaciale tills	13
3.3.5. Constructie dwarsverbindingen in de Upper Palaeocene Marl	14
3.3.6. Hoofdtunnellining rond de verbindingen	15
3.3.7. Ontwateringprogramma Moses	15
3.4. Westerscheldetunnel	16
3.4.1. Inleiding	16
3.4.2. Geologie en onderzoek	17
3.4.3. Ontwerp en constructie van de dwarsverbindingen	17
3.5. Botlekspoortunnel	20
3.5.1. Inleiding	20
3.5.2. Geologie en onderzoek	20
3.5.3. Ontwerp en constructie van de dwarsverbindingen	21
3.6. 4 ^e Elbetunnel	22
3.6.1. Inleiding	22
3.6.2. Geologie en onderzoek	22
3.6.3. Ontwerp en constructie van de dwarsverbindingen	22
3.7. Overzicht projecten met dwarsverbindingen	24
4. Constructie van dwarsverbindingen	25
4.1. Inleiding	25
4.2. Bestaande methoden	25
4.2.1. Vanaf het maaiveld	25
4.2.2. Vanuit de tunnel	27
4.2.3. Innovatieve methoden	30
4.3. Overzicht constructiemethoden dwarsverbindingen	34
5. Grondverbeteringstechnieken	36
5.1. Inleiding	36

5.2.	Bevriezen van grond	36
5.2.1.	Inleiding	36
5.2.2.	Dwarsverbindingen met behulp van de vriestechniek	37
5.2.3.	Techniek van het bevriezen van grond	37
5.2.4.	Kosten bevriezen van grond	39
5.3.	Jetgrouten	39
5.3.1.	Inleiding	39
5.3.2.	Techniek van het jetgrouten	39
5.3.3.	Kosten jetgrouten	41
5.4.	Injectie van grout en chemische oplossingen	41
5.4.1.	Inleiding	41
5.4.2.	Techniek van het injecteren	42
5.4.3.	Kosten injectie methoden	43
5.5.	Kalk/cement kolommen	43
5.5.1.	Inleiding	43
5.5.2.	Techniek van het maken van kalk/cement kolommen	43
5.5.3.	Kosten kalk/cement kolommen	44
5.6.	Overzicht grondverbeteringstechnieken	45
6.	Conclusies	46
7.	Literatuurlijst	47
	Colofon	48

1. Inleiding

In het kader van het K300-onderzoek aan de Botlekspoortunnel binnen deelcommissie Montagespanningen en Dwarsverbindingen is een literatuurstudie gemaakt met betrekking tot dwarsverbindingen tussen buizen van boortunnels. Dit om inzicht te verkrijgen in de verschillende uitvoeringsmethoden en -constructies van reeds uitgevoerde projecten en van eventuele nieuwe / experimentele methoden en de mogelijkheden en onmogelijkheden van deze methoden.

Voor deze studie is gebruik gemaakt van literatuur die beschikbaar is bij het Projectbureau Boortunnel van Projectorganisatie Hogesnelheidslijn Zuid, Holland Railconsult, TU Delft en Bouwdienst Rijkswaterstaat in Utrecht.

In hoofdstuk 2 wordt kort aandacht besteed aan de vorm en de functie van de dwarsverbinding.

Hoofdstuk 3 behandelt reeds uitgevoerde projecten, de Kanaaltunnel en de Størebælt spoortunnel, en projecten die op dit moment in uitvoering zijn, namelijk de Westerscheldetunnel, Botlekspoortunnel en de 4^e Elbetunnel. Onder andere worden de verschillende achtergronden, constructiemethoden en geologische omstandigheden besproken.

In hoofdstuk 4 wordt een onderverdeling gemaakt in bestaande en nieuwe technieken, geschikt voor de ontgraving en de opbouw van de lining van een dwarsverbinding. Fasering en voor- en nadelen van bouwkuip, caisson, open front, perstechniek, buizenmethode en een kleinere tunnelboormachine komen aan bod. Van de nieuwe technieken, de ringmethode en groutboog met horizontaal meer-fasen jet-grouten methode wordt een uitleg van de werking gegeven. De methode die gebruik maakt van een groutboog heeft waarschijnlijk de meeste kans om in de toekomst, na het overkomen van een aantal praktische problemen, geschikt te zijn voor de aanleg van dwarsverbindingen tussen geboorde tunnels.

Grondverbeteringsmethoden, al dan niet geschikt voor de Nederlandse grond, zijn het onderwerp van hoofdstuk 5. Toepassingen, geschiktheid van grondsoorten voor de methoden, technieken, geschiktheid voor het maken van dwarsverbindingen, en kosten worden gegeven voor verbetering van de grond door middel van vriezen, jetgrouten, injecteren van grout en chemische oplossingen en het maken van kalk/cement kolommen.

2. Algemeen

De dwarsverbinding heeft zijn bestaan te danken aan het feit dat er tijdens het ontwerpproces gekozen wordt voor een tunnel die uit twee of meer buizen bestaat. De verbinding wordt tussen de tunnels aangebracht om een voldoende veilige tunnel te verkrijgen.

De redenen dat men voor twee of meer geboorde tunnels kiest, en niet voor bijvoorbeeld een Double-O-Tube (DOT) of één grotere buis, kunnen verschillend zijn. Enkele redenen om voor twee afzonderlijke tunnels te kiezen kunnen onder andere zijn:

- Een dubbelsporige tunnel heeft een grotere dekking nodig; hetgeen ook een langere toeritten inhoudt.
- Veiligheid van de tunnel.
- De ervaring met het boren van tunnels met een grote diameter onder Nederlandse omstandigheden is gering.
- De bedrijfszekerheid van twee buizen is groter; zowel tijdens uitvoering als gebruik.
- In een dubbelsporige tunnel heeft men meer te maken met drukgolfproblematiek.
- Met een DOT-tunnel is het lastig om bochten te maken, omdat de 'ringen' niet gedraaid kunnen worden, zoals bij een ronde tunnel tapse ringen gedraaid worden om een bepaalde boogstraal te realiseren.

2.1. Functies

De voornaamste functies van een dwarsverbinding zijn het bieden van een vluchtweg voor passagiers, het mogelijk maken voor hulpverleners om in de tunnel te komen en het bieden van ruimte om allerlei apparatuur te kunnen plaatsen.

2.2. H.o.h afstand

Het aantal dwarsverbindingen dat in een tunnel noodzakelijk is, is afhankelijk van de af te leggen afstand naar een vluchtdeur. Op dit moment geldt voor tunnels voor personenvervoer een tussenafstand van min of meer 250 m voor wegverkeer en 300 m voor spoorverkeer. Goederenvervoer door een tunnel met de trein heeft vanwege het geringe aantal mensen een hart op hart (h.o.h.) afstand tussen de vluchtwegen van ongeveer 500 m.

2.3. Afmetingen

De minimale eis aan de grootte van een dwarsverbinding wordt gesteld door de ruimte die hulpverleners met een brancard nodig hebben. Het profiel van vrije ruimte is hierdoor minimaal 1.5 bij 2.1 m. Er wordt vaak voor een iets grotere opening gekozen, zodat allerlei andere voorzieningen (elektrische apparatuur, brandblusinstallatie, etc.) aangelegd kunnen worden. De dwarsverbinding biedt daarnaast vaak ruimte aan een

noodstroomvoorziening. In geval van stroomuitval kan er via de andere tunnel stroom geleverd worden.

2.4. Lengte van de dwarsverbinding

De lengte van een dwarsverbinding is afhankelijk van de afstand tussen de twee (of meer) tunnels. Meestal zal deze afstand overigens een maal de diameter van de hoofdtunnel zijn, omdat bij deze afstand de verandering van de spanningen in de grond, tijdens het boren van de andere tunnelbuis, verwaarloosd kan worden.

Bij twee evenwijdige tunnels bestaan voor een vluchtplan verschillende opties, wanneer het uitgangspunt is dat de mensen binnen een bepaalde tijd een veilige tunnelbuis in kunnen vluchten. Ten eerste kan men een ontwerp maken zoals bij de Kanaaltunnel is toegepast: een extra (centraal) gelegen tunnel die met beide tunnels op regelmatige afstand verbonden is. Dit ontwerp heeft enkele voordelen ten aanzien van het onderhoud en beheer in een tunnel met een grote lengte. Ten tweede kan men een ontwerp maken zoals bijvoorbeeld bij de Størebælt is toegepast. De tunnels waarin de treinen rijden zijn direct verbonden door op regelmatige afstand gelegen dwarsverbindingen.

De dwarsverbinding is verder voorzien van een enkele branddeur of van twee deuren aan de uiteinden. Het toepassen van twee deuren biedt enkele voordelen, zoals het niet hoeven aanbrengen van een brandwerende laag in de lining van de dwarsverbinding, het creëren van een veilige ruimte voor apparatuur en mensen in de verbinding, etc.

3. Uitgevoerde projecten

3.1. Inleiding

Gezocht is naar informatie over projecten met dwarsverbindingen, zoals die in Nederland aangelegd worden of zouden kunnen worden. Aan de hand van een aantal projecten wordt een beeld gegeven van de mogelijkheden van bestaande constructiemethoden en grondverbeteringstechnieken.

Besproken worden de:

- Kanaaltunnel
- Størebælt spoortunnel
- Westerscheldetunnel
- Botlekspoortunnel
- 4^e Elbetunnel

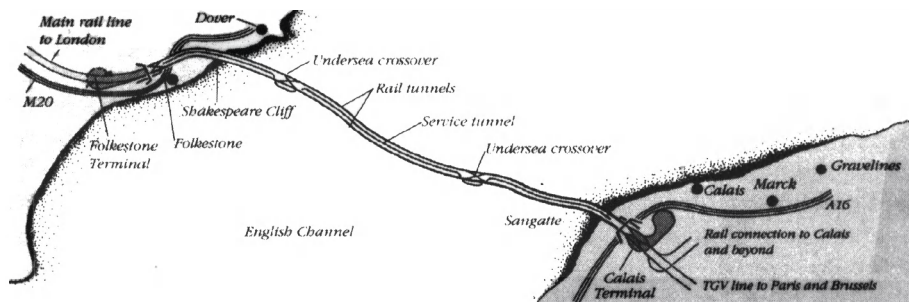
De eerste twee tunnels zijn reeds gebouwd; er is veel informatie beschikbaar. De Westerscheldetunnel, Botlekspoortunnel en de 4^e Elbetunnel worden op dit moment gebouwd. De informatie van deze tunnels is niet geheel volledig of ontbreekt op bepaalde punten geheel.

De tunnels en dwarsverbindingen, die in dit hoofdstuk worden besproken, hebben allemaal een 'korte' dwarsverbinding tussen een of meer geboorde tunnels. De verbindingen zijn onder de grondwaterspiegel uitgevoerd in relatief zachte heterogene gronden.

3.2. Kanaaltunnel

3.2.1. Inleiding

Sinds mei 1994 is de Kanaaltunnel in gebruik voor het transport, door middel van treinen, van goederen en passagiers. De Kanaaltunnel verbindt Engeland met Frankrijk door middel van een geboorde tunnel tussen Folkestone (tunnel nabij Dover) en Calais (tunnel nabij Sangatte). Het grootste deel van de tunnel, ongeveer 38 km, ligt op een diepte tussen de 25 en 45 m onder de zeebodem [17].

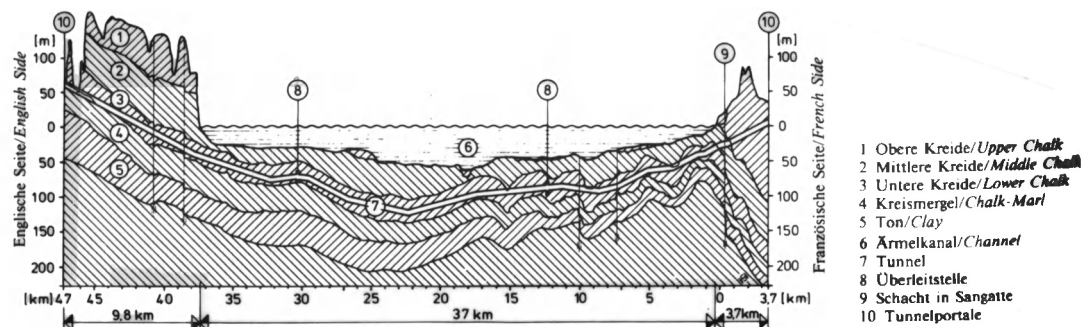


figuur 3.1: Tracé van de Kanaaltunnel

3.2.2. Geologie en onderzoek

Het geologisch onderzoek bestond in eerste instantie uit het verwerken van oude grondgegevens en het in 1986 en 1987 doen van nieuwe boringen langs het geplande tracé. De allereerste boringen zijn voornamelijk wijder verspreide boringen onder de Engelse kust, de meest recente boringen waren gericht op het in kaart brengen van de onregelmatigheden in de grondlagen nabij de Franse kust.

De opbouw van de grond onder het Kanaal is onder te verdelen in drie lagen. De onderste laag bestaat uit kalk die afgezet is in de Krijt periode met daarbovenop de middelste laag Gault klei (laag 5 in onderstaande figuur). De bovenste laag kalk is wederom onder te verdelen in vier soorten, te weten Upper-, Middle-, Lower- en Chalk-Marl. De Middle- en Lower-Chalk lagen die men tegenkwam, bij boringen, bleken gemakkelijk bewerkbare materialen. De lagen bestaan uit een mengsel van kalk en klei (25%) die uitermate geschikt is om in te boren vanwege de extreme uniformiteit, geringe plasticiteit en geringe mate van verstoring [19].



Figuur 3.2 Geologische opbouw ondergrond

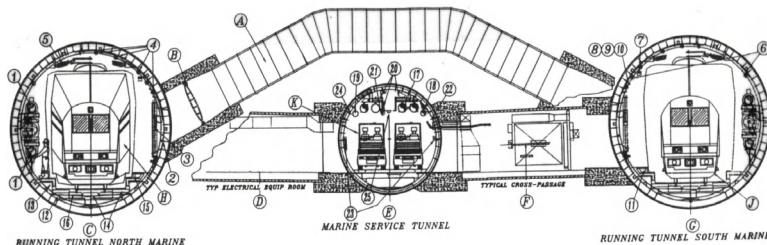
De Chalk-Marl laag is ook zo goed als waterdicht, maar wel zachter dan de bovenliggende lagen. Uiteindelijk is 90% van de tunnel in de Lower-Chalk en Chalk-Marl lagen aangelegd.

De boormachine in de servicetunnel liep tijdens het project gemiddeld 5 kilometer voor op de machines in de hoofdtunnels. Vanuit de servicetunnel kon er daarom een uitgebreid grondonderzoek worden gedaan in het tracé van de hoofdtunnels. Grondverstoringen en plaatsen waar men vermoedde dat er water in de tunnel zou stromen konden gelokaliseerd worden, zodat men tijdig maatregelen kon treffen. Naast grondonderzoek vanuit de servicetunnel is er ook voorwaarts, zijdelings en verticaal onderzoek gedaan vanuit de hoofdtunnels zelf [19].

Aan de Franse kant van het Kanaal was de grond minder uniform van samenstelling, bevatte de nodige scheuren en vervuilingen, en was het nodig om op verscheidene plaatsen de scheuren in de kalk lagen door middel van injectie van grout op te vullen. Na injectie was de indringing van water in de tunnel voldoende gereduceerd om met een open graaffront verder te kunnen graven aan de dwarsverbindingen.

3.2.3. Ontwerp en constructie van de dwarsverbindingen

Tussen de twee hoofdtunnels met een inwendige diameter van 7.6 m, waarin de treinen rijden, ligt een servicetunnel met een inwendige diameter van 4.8 m. Er zijn twee verschillende soorten dwarsverbindingen gemaakt; verbindingen om de 250 m die nodig zijn voor het opnemen van de door de trein veroorzaakte drukgolf en verbindingen om de



figuur 3.3 Dwarsdoorsnede van de tunnel

375 m die dienst doen als vluchtweg, onderhoudstoegang, opslag van apparatuur en ventilatiesysteem [15].

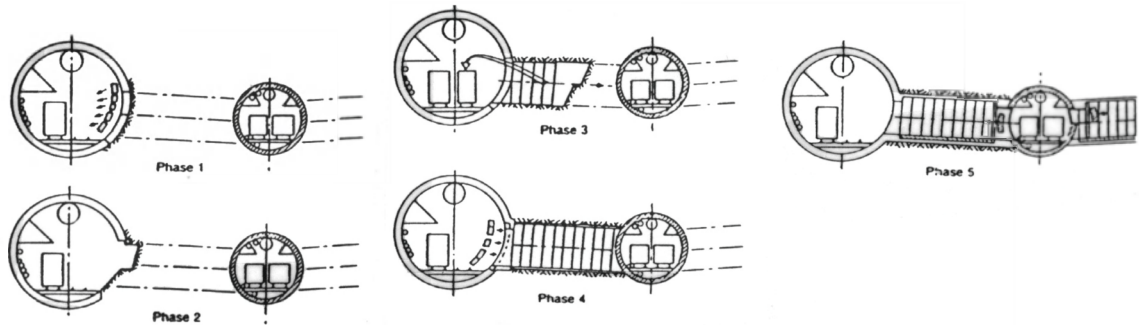
Voor de openingen in de wanden van de hoofdtunnels is plaatselijk een lining gebruikt van ijzer, Spheroidal Graphite Iron (SGI) genaamd. Deze segmenten werden verkozen boven segmenten van een sterke betonsoort, omdat de spanningen beter opgevangen konden worden.

Dwarsverbindingen naar de service tunnel

De dwarsverbindingen die op de servicetunnel uitkomen zijn om de 375 m aangelegd en liggen in elkaars verlengde. Zij doen dienst als vluchtweg, opslagruimte voor apparatuur, ventilatiesysteem en toegang voor het onderhoud aan de tunnels. In totaal zijn er 130 verbindingen met de servicetunnel, met een lengte van 17.60 m en een interne diameter van 3.30 of 4.80 m.

Voor de hart op hart afstand van de dwarsverbindingen die als vluchtweg dienst doen is 375 m gekozen omdat Eurotunnel, het bedrijf dat de tunnel exploiteert, contractueel verplicht was om de vluchttijd van passagiers en treinbemanning (tot wel maximaal 3000 mensen) onder de 90 minuten te houden. Om in 90 minuten van het midden naar een uiteinde van de tunnel te komen (via de servicetunnel of de andere hoofdtunnel) bleek het nodig dat er per 750 m lange trein minimaal twee verbindingen met de servicetunnel gerealiseerd moesten worden. Bij deze h.o.h. afstand zijn er altijd twee verbindingen, direct naast de trein gelegen, beschikbaar.

Ter plaatse van een dwarsverbinding werd in de lining in de hoofdtunnel een speciale 'Cast Tubbing Window', gemaakt van gietijzer en beton, door de erector van de TBM geplaatst.



figuur 3.4: Fasering bouw dwarsverbinding

De bouw van een dwarsverbinding bestond uit verschillende fases. Na het verwijderen van de panelen kon men de achterliggende grond uitgebreid injecteren. Het werkelijke ontgraven gebeurde voornamelijk met pneumatische (hand)graafwerktuigen, nadat er verschillende pogingen tot het gebruik van graafmachines waren gedaan.

De nieuw gevormde wand van vergrootte grond werd gestabiliseerd met shotcrete, waarna de nieuwe lining in de dwarsverbindingen, gemaakt van gietijzer (SGI), binnen een paar meter van het front al geplaatst werd met een kleine erector.

Voor het bouwen van de dwarsverbindingen was altijd een spoor nodig voor het aan en afvoeren van materiaal.

Piston relief duct verbindingen

Aangezien de hoofdtunnels een relatief kleine diameter hebben, voor treinen die maximaal met een snelheid van 160 kilometer per uur rijden, bleek het nodig om verbindingen te maken die de luchtdruk golf kunnen opvangen. Deze piston relief ducts verbinden de twee hoofdtunnels om de 250 m, zonder nog op de servicetunnel uit te komen. Er zijn 150 van deze drukkanalen gebouwd met een lengte van 23.40 m en een interne diameter van 2 m [19].

De piston relief ducts verbindingen zijn op dezelfde manier gemaakt als de dwarsverbindingen naar de servicetunnel, met als enige verschil dat deze verbindingen plaatselijk onder een hoek omhoog lopen. De binnenkant van de lining is glad afgewerkt om de weerstand van de luchtstroming te verminderen.

3.3. Spoortunnel onder de Størebælt

3.3.1. Inleiding

Twee 8 km lange enkelsporige tunnels met een interne diameter van 7.7 m, vervoeren het spoorverkeer tussen Zeeland en het eiland Sprogø. Deze tunnels maken onderdeel uit van het Størebælt project dat de Deense eilanden Funen en Zeeland met elkaar verbindt door middel van een tweetal bruggen en de geboorde tunnels.

Het geboorde deel van de tunnels werd door een glaciale till en de onderliggende "Upper Palaeocene Marl" aangelegd door vier EPB TBM's en bestaat uit prefab gesegmenteerde ringen van versterkt beton.

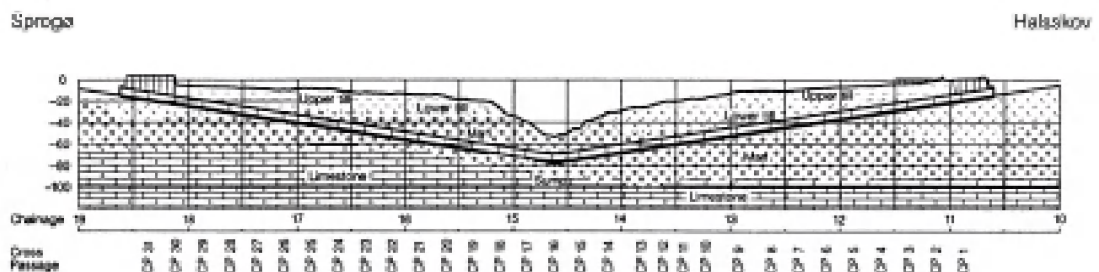
De 8 km lange tunnel bestaat uit een geboorde gedeelte van 7.5 km en een cut en cover gedeelte van 0.5 km. De onderlinge afstand tussen de tunnels bedraagt 17 m (25 m tussen de tunnel assen). Dwarsverbindingen zijn geconstrueerd om de 250 m voor ontsnappingsroutes voor de passagiers, toegangswegen voor redding- en onderhoudspersoneel en voor de behuizing van elektrisch en mechanisch materieel. De dwarsverbindingen hebben een interne diameter van 4.5 m en liggen maximaal op een diepte van 80 m onder zeeniveau [8]

Aangezien men verwachtte dat de grond condities moeilijk waren heeft men voorzieningen getroffen die het mogelijk maakten om geotechnisch onderzoek te verrichten door de hoofdtunnel heen bij ieder te construeren dwarsverbinding.

In totaal zijn er 31 dwarsverbindingen; 29 werden er geboord en 2 werden er geconstrueerd aan de uiteinden van de tunnels door middel van de cut en cover techniek.

3.3.2. Geologie en onderzoek

De Størebælt is een glaciaal erosie kanaal. Zoals te zien is in onderstaande figuur neemt de waterdiepte geleidelijk toe naar het midden van het kanaal tot een diepte van 55 m. Vanwege deze diepte in het midden van het kanaal en om andere redenen werd gekozen voor een meer noordelijke route van de tunnels.



figuur 3.5 Langsdoorsnede Størebælt-tunnel

De grond kan geologisch onderverdeeld worden in drie typen: glaciale tills, Upper Palaeocene Marl en Tertiary Lower Palaeocene Danian Limestone.

De glaciale tills bestaan voornamelijk uit slecht doorlatende klei met lagen leem, slib, zand en opgesloten smeltwater. Daarnaast worden er in deze lagen ook granieten keien gevonden met een diameter tot wel 3 m. De glaciale afzettingen zijn compact en dicht door de preconsolidatie als gevolg van de bovenliggende gletsjers. De tills kunnen worden onderverdeeld in twee soorten, te weten de Upper en Lower Till.

De Upper Till is qua samenstelling redelijk uniform op een paar geïsoleerde zand afzettingen na (minder dan 1% van de totale massa). De Lower Till is minder homogeen; zand en grind afzettingen komen vaker voor (tot wel 20% van de totale massa).

De Upper Palaeocene Marl bestaat uit mergelachtig gesteente (redelijk zwak volgens de Britse standaard classificatie) met een druksterkte groter dan 2 MPa. Door veel scheurvorming is de permeabiliteit vergelijkbaar met die van de Lower Till.

De Tertiary Lower Palaeocene Danian Limestone is een zwakke zandige kalksteen laag met hier en daar slib afzettingen.

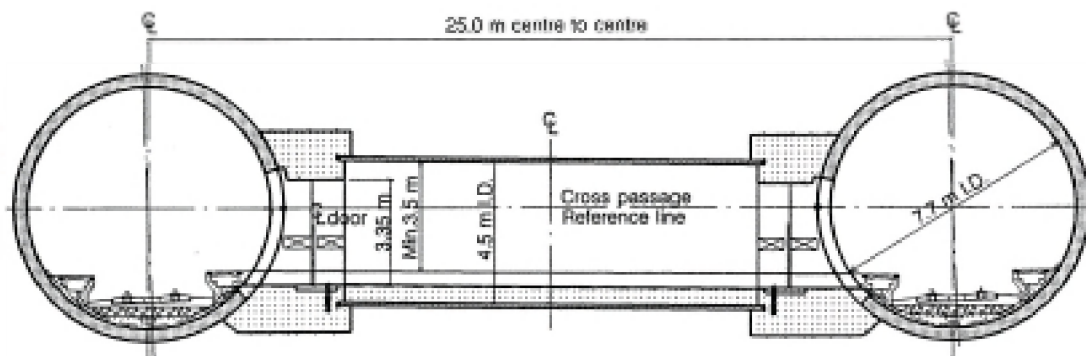
De dwarsverbindingen tussen de tunnels bevinden zich in de glaciale tills (12 stuks), de Upper Palaeocene Marl (16 stuks) en in de overgangszone tussen deze twee lagen (1 stuks). [8]

Naast het nemen van grondmonsters ter plaatse van een te construeren dwarsverbinding werden er in totaal 58 boringen verricht tot aan het niveau van de tunnel. Voornaamste reden van al het grondonderzoek was om de eventuele aanwezigheid van verzadigde zand of zand till pakketten te ontdekken tot op 10 m van de ontgraving. De mate van grondwaterstroming, op gang gebracht door wateronttrekking, was daarbij van groot belang.

3.3.3. Ontwerp van de dwarsverbindingen

De ontsnappingstijd voor de passagier was gebaseerd op de Amerikaanse standaard NFPA130, welke voorschrijft dat de laatst ontsnappende van de trein binnen 6 minuten via een dwarsverbinding een andere tunnel kan bereiken. Berekeningen gebaseerd op een volledig beladen IC3-trein, 300 m lang met 720 passagiers, wees uit dat aan de ontsnappingstijd voldaan kon worden als er om de 250 m dwarsverbindingen zouden zijn. Minimale afmetingen van de ontsnappingsweg zouden 1.85 m breed en 2.10 m hoog moeten zijn. Deze afmetingen, samen met de ruimte voor de elektrische en mechanische apparatuur, resulteerden in een inwendige diameter van 4.5 m. [8]

Het met de aannemer overeengekomen contract was gebaseerd op het gebruik van een SGI lining en onversterkt beton voor de aansluitingen met de hoofdtunnels.



figuur 3.6 Dwarsdoorsnede Størebælt-tunnel

De aannemer stelde na enige tijd voor om de ondersteuning te veranderen in een primaire lining van spuitbeton, gevolgd door een secundaire lining van onverstekt beton (NATM), hetgeen een optie was in de tender documenten. De nieuwe methode werd door de opdrachtgever geaccepteerd.

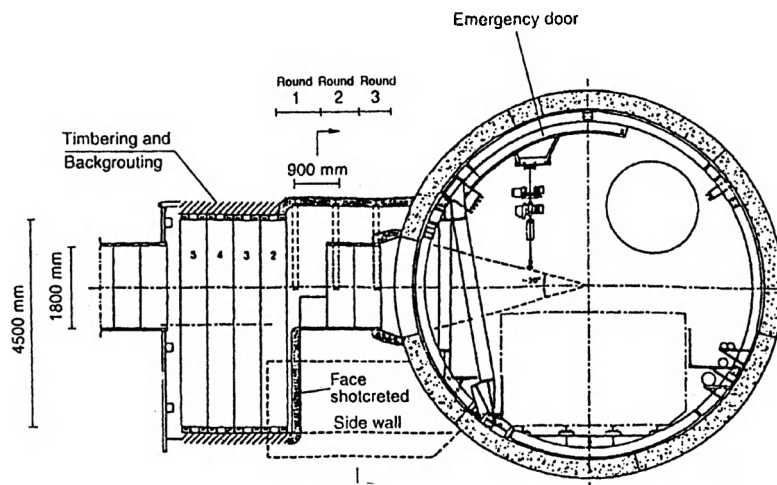
3.3.4. Constructie dwarsverbindingen in de glaciale tills

Het toepassen van NATM was mogelijk omdat in het grootste gedeelte van de glaciale tills de grond voldoende sterk en stijf was om zonder ondersteuning te kunnen worden ontgraven

Een voorwaarde voor het ontgraven zonder ondersteuning was wel dat de waterspanningen teruggebracht dienden te worden. (Zie het hoofdstuk ontwateringsprogramma Moses.)

Ter bevordering van de stabiliteit van de hoofdtunnel werd er voor gekozen om met het ontgraven en aanbrengen van de SGI lining, vanuit de pilot tunnel, pas op 5 m buiten de hoofdtunnel te beginnen. Direct aansluitend op de hoofdtunnel werd iedere keer eerst een stevige kraag, gemaakt van ongewapend beton vanwege de duurzaamheid, aangebracht die de krachten kon overbrengen. (Scheuren werden tijdens de constructie fase met een fijn cement geïnjecteerd.)

Het originele ontwerp van de SGI lining bestond uit 9 segmenten en een sluitsteen. Het alternatief van de aannemer bestond uit 17 segmenten en een sluitsteen en werd door de opdrachtgever geaccepteerd.

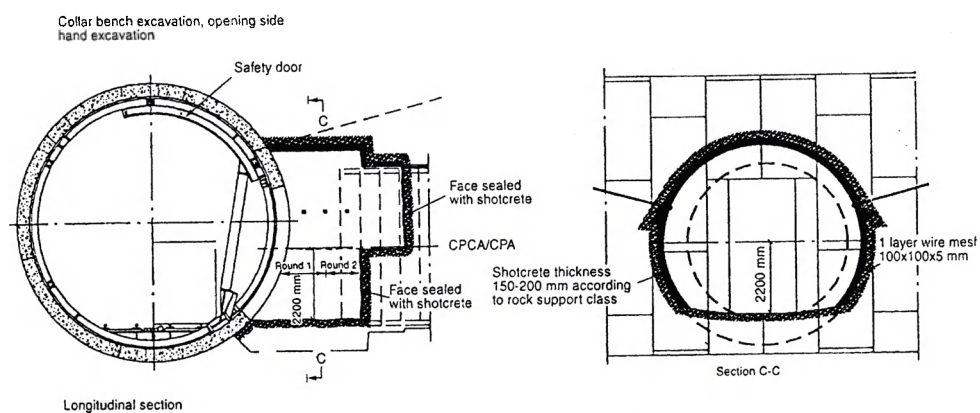


figuur 3.7 Ontgraving dwarsverbinding in de glaciale tills

De kleinere segmenten waren beter te maken en te hanteren, maar de lining werd er wel flexibeler en gevoeliger voor lekkages van. De ring wijde was 600 mm en de dikte 14 mm. De lining werd met behulp van bouten in elkaar gezet en kon een druk van 8 bar weerstaan. Corrosie bescherming werd voorzien door een bitumen coating. Het hittebestendig maken van de dwarsverbindingen werd niet nodig geacht door de aanwezigheid van branddeuren.

3.3.5. Constructie dwarsverbindingen in de Upper Palaeocene Marl

Door ervaringen, opgedaan bij het graven in de tills, heeft men bij het graven in het mergelachtig gesteente het gebruik van de SGI lining gecontinueerd, zonder echter nog verder de pilot tunnel in te zetten.



figuur 3.8: Ontgraving dwarsverbinding in Upper Palaeocene Marl

Voor de overgang tussen tunnel en dwarsverbinding en voor de rest van de tunnel is gebruik gemaakt van shotcrete. Om dit mogelijk te maken werd de waterspanning kunstmatig laag gehouden door het ontwateringsprogramma Moses. Voor de dieper gelegen dwarsverbindingen, waar een waterdruk heerst tot 7 bar, was dit echter niet voldoende en is besloten om het bemaalen te combineren met grouten. Door het gebruik van bijzonder fijn cement kon de waterdruk voldoende omlaag gebracht worden.

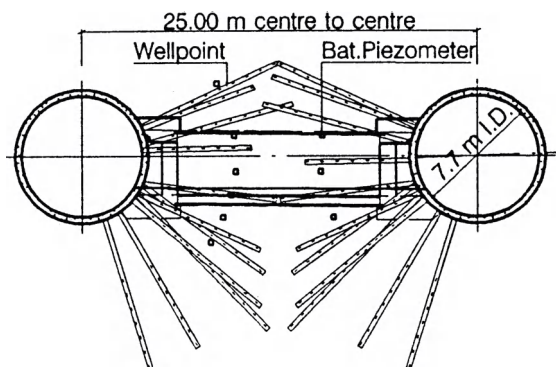
3.3.6. Hoofdtunnellining rond de verbindingen

Voor de lining van de hoofdtunnel bij de dwarsverbindingen is tijdens het ontwerp gekozen voor een constructie met een set van 6 SGI elementen. Deze elementen zijn gemaakt van ductiel gietijzer, die door grote flexibiliteit en sterkte de tijdelijke en permanente lasten kunnen opnemen tijdens het bouwen van de dwarsverbindingen. De elementen zijn gevuld met beton om de afzetkrachten van de TBM op te kunnen nemen en om de wand tegen hitte te beschermen. De sets hebben verwijderbare elementen om toegang te krijgen tot het graaffront, maar kunnen wel, net als de normale tunnelementen, machinaal geplaatst worden. Door problemen met de levering van de SGI-elementen is er door de aannemer voor gekozen om bij de diepst gelegen 11 dwarsverbindingen wel gebruik te maken van deze elementen, maar voor de overige op zoek te gaan naar een alternatief. Dit alternatief werd uiteindelijk een normale betonnen lining met extra stalen verstevigingen rond het uitbreekgat. Op bepaalde plaatsen waren de elementen dikker, zodat ze doorvoerbaar waren voor het toepassen van grondverbetering. Bij het maken van deze elementen is een sterkere betonsoort gebruikt dan normaal. Het toepassen van deze betonnen elementen bleek in de praktijk goed te bevallen, ondanks het feit dat er de nodige scheurvorming optrad. De scheuren werden veroorzaakt door het ontbreken van de flexibele eigenschappen die nodig zijn om de belastingen te verdelen. De opgetreden scheuren konden vrij eenvoudig gerepareerd worden.

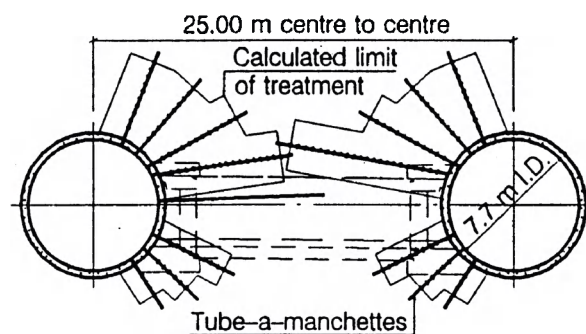
3.3.7. Ontwateringsprogramma Moses

In 1992 werd het project Moses, een grootschalig ontwateringsprogramma, geïntroduceerd met als doel om ten eerste de waterdruk in de poriën te reduceren tot 3 bar of minder om het mogelijk te maken voor mensen om de werkkamer van de TBM te betreden en ten tweede om de grondstabiliteit te verbeteren zodat er niet (of minder) vanuit de tunnel aan lokale ontwatering gewerkt diende te worden.

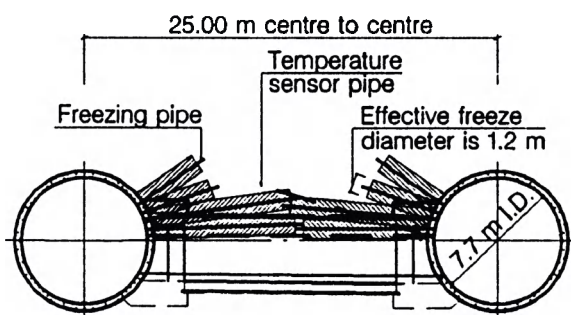
Het mergelachtig gesteente is als gevolg van de scheuren waterdragend. Het glaciale till, dat boven het mergelachtig gesteente ligt, heeft over het algemeen een lage permeabiliteit, en verhindert daardoor infiltratie van water uit de Størebælt naar het mergelachtige gesteente. Diepe putten, 405 mm in diameter, werden geboord vanaf jack up rigs tot een diepte van 10 m in de kalksteenlaag onder het mergelachtig gesteente. In totaal zijn er 43 putten gemaakt, onderverdeeld in 6 groepen, en van energie voorzien door diesel generatoren die op schepen waren geplaatst. De putten waren min of meer om de 125 m langs de lining geplaatst, 35 m opzij om en om aan beide zijden. Over het gebied waar de invloed merkbaar was bedroeg de drukreductie ongeveer 3.5 bar in het mergelachtig gesteente en 1 tot 2 bar in de tills. In het geval van het falen van een put was de waterdruk verhoging langzaam genoeg om bijtijds actie te ondernemen. [8]



figuur 3.9: (plaatselijke) ontwatering



figuur 3.10: tube-a-manchettes grouten



figuur 3.11: vriezen

Naast de ontwatering was het noodzakelijk om de grond plaatselijk verder te verbeteren. De voornaamste doelen van de grondverbetering waren het verlagen van de grondwaterspanning en het stabiliseren van de grond. Er zijn in totaal vier soorten grondverbetering toegepast, in wisselende combinaties: contact grouting, dewatering, tube-a-manchette grouting en bevriezing [8]. De combinatie grouten en (plaatselijke) ontwatering (figuur 3.9) bleek een veilige en economische oplossing voor de meeste dwarsverbindingen. Voor de ondiep gelegen dwarsverbindingen was normaal grouten met cement-bentoniet voldoende. Voor de dieper liggende dwarsverbindingen werd door zogenaamde PVC tube-a-manchettes gegrout met ultrafijn cementgrout (figuur 3.10). Bij vier dwarsverbindingen was er een verbinding tussen de zandlagen en de Størebælt, zodat hier vriezen noodzakelijk was (figuur 3.11).

3.4. Westerscheldetunnel

3.4.1. Inleiding

De Westerscheldetunnel, gereed eind 2002, gaat de Zeeuwse autoveer-verbindingen (Vlissingen-Breskens en Kruiningen-Perk-Polder) vervangen. De tunnel komt op een smal punt van de Westerschelde te liggen, tussen Borssele en Terneuzen, en zal een lengte hebben van 6.6 km.

De oeververbinding bestaat uit twee tunnelbuizen met ruimte voor twee rijstroken per buis (8.50 m breed, er zal geen vluchstrook aanwezig zijn). De uitwendige buisdiameter is bepaald op 11.3 m. Vanwege de diepe en zich vaak verplaatsende geulen in de Westerschelde moet de bodem van de tunnel op het diepste punt 60 m onder de waterspiegel komen te liggen.

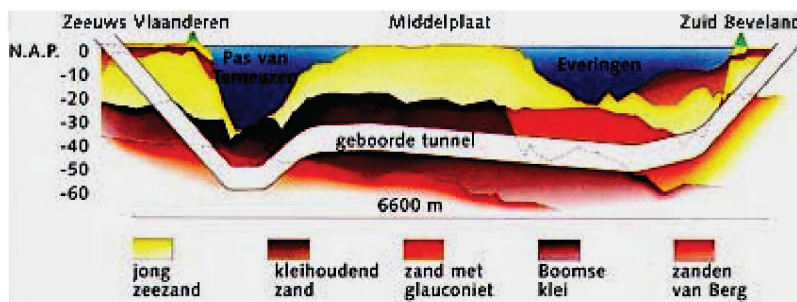
De hoofdtunnels worden door twee slurry-tunnelboormachines, met een faseverschil van twee à drie maanden, gelijktijdig geboord, vertrekkend vanaf Terneuzen richting Zuid-Beveland.

3.4.2. Geologie en onderzoek

De grond waar de tunnel doorheen geboord gaat worden varieert van zand tot zeer vaste overgeconsolideerde klei, de Boomse kleilaag genaamd. Tijdens het ontwerpproces is een uitgebreid grondonderzoek gedaan, tot een diepte van 100 m.

De Boomse kleilaag onder de Westerschelde kan in geotechnische zin niet als een homogeen lichaam worden beschouwd. De klei is globaal in twee lagen te verdelen. De bovenste laag is zwak siltig, waarbij het kleigehalte 50 à 60% bedraagt. De onderste laag bevat zeer dunne laagjes matig tot sterk siltig en plaatselijk sterk siltige tot kleiige zandlaagjes, waarbij het kleigehalte verloopt tot 20%. Door de opgetreden geulerosie ontbreekt op sommige plaatsen de bovenste laag. [13]

Onder de kleilaag komen over het gehele tracé de zanden van Berg voor: een grof, licht-glauconiethoudend (ongeveer 6%) zand. Deze zanden staan in verbinding met de bovenliggende zanden, zodat er een hydrostatische druk heerst.

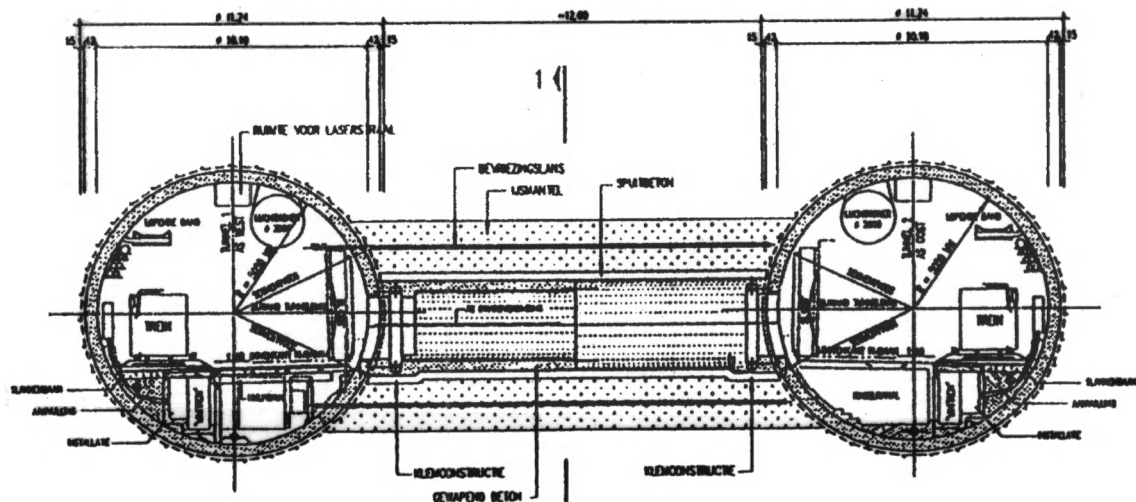


figuur 3.12 Geologische opbouw ondergrond

3.4.3. Ontwerp en constructie van de dwarsverbindingen

De 25 dwarsverbindingen, waarvan de hart op hart afstand 250 m bedraagt, zijn bij deze tunnel bedoeld als vluchtroute voor mensen in nood en geven toegang voor hulpverleners. De kleinste doorsnede in de dwarsverbinding, ter hoogte van de deur, is minimaal 2.10 m hoog en 1.50 m breed.

Voor de bouw van de dwarsverbindingen is gekozen voor de vriesmethode, voornamelijk vanwege de veiligheid en de beperkte risico's. Hierbij wordt een rond vrieslichaam gemaakt met behulp van 22 vrieslansen. Het vriesmedium dat men wil gaan gebruiken is een natriumsulfiet oplossing met een temperatuur van -40°C (stikstof werd een te dure oplossing bevonden). De te vormen ijsmantel zal in het midden niet bevroren zijn ([6] en [12]).



kenmerk VC/MVD/ 95168 - versie 4.0 - 17 11 99 - vrijgegeven
Afdeling Ruimtelijke Inpassing en Kunstwerken

Na voltooiing van het ijslichaam kan er uit de lining van de hoofdtunnel een deel van een segment worden verwijderd. Om er voor te zorgen dat er een niet te grote positiefout ontstaat tussen de twee tunnelbuizen, is er voorzien dat er een ring met een breedte van 1 m ingevoegd kan worden, zodat de aansluiting van de twee buizen min of meer loodrecht is.

In de hoofdtunnelling wordt t.p.v. de dwarsverbinding door de erector van de TBM enkele stalen segmenten geplaatst. Uit het middelste stalen segment van 2 bij 5 m wordt een deur verwijderd van 1.5 bij 2.1 m. Dit element heeft de minimaal toegestane doorsnede, zodat de verzwakking van de tunnelling minimaal is. Door deze opening zal de ontgraving plaatsvinden.

Rond de overgang tussen tunnel en dwarsverbinding wordt er meer ontgraven dan noodzakelijk is, omdat er dan ruimte is voor een in te storten strip met zwelband, die lekkages voorkomt. De extra ruimte is ook nodig voor het aanbrengen van een branddeur.

Tegen de ontgraven wand wordt eerst een laag spuitbeton van circa 30 cm aangebracht voor een tijdelijke ondersteuning. Deze laag is nodig vanwege kruip van het ijslichaam. Uiteindelijk wordt er tegen het spuitbeton een ter plaatse gestorte, gewapende betonwand van 40 cm dikte aangebracht.

3.5. Botlekspoortunnel

3.5.1. Inleiding

De Betuweroute, 160 km lang, betreft de aanleg van een spoorverbinding t.b.v. goederentransport, inbegrepen gevaarlijke stoffen, vanaf de Maasvlakte via Rotterdam, Kijfhoek en Zevenaar naar Duitsland. Ter plaatse van de geprojecteerde Botlekspoortunnel bevinden zich uitzonderlijk veel kabels en leidingen, waaronder diverse grote transportleidingen van de chemische industrie

De totale Botlekspoortunnel is 3400 m lang en circa 1850 m wordt daarvan geboord. Het boorproces start op een diepte van 9 m, vanaf dit niveau biedt de grond op de westoever namelijk voldoende stevigheid. De maximale diepte van de bovenkant van de tunnel zal ongeveer 20 m onder N.A.P. bedragen. Deze diepe ligging garandeert dat overal minimaal 7 m rivierbodem boven de tunnelbuizen ligt.

De tunnels worden enkelsporig uitgevoerd; de vereiste minimale binnendiameter komt in de orde van de 8.65 m te liggen. De tunnels worden geboord met een EPB-schild.

3.5.2. Geologie en onderzoek

De grondlagen worden ingedeeld in 3 geologische eenheden [11]. Vanaf het maaiveld zijn dit:

- Kunstmatig aangebrachte grond ter ophoging van het maaiveld. De totale dikte van deze laag bedraagt circa 5 m.
- De holocene grondlagen, tot een diepte van circa N.A.P. -18 m.
- De pleistocene grondlagen, beneden circa N.A.P. -18 m.

Holocene grondlagen

De holocene grondlagen bestaan hoofdzakelijk uit klei en kleiig zand behorende tot de Westland Formatie. Beneden de kunstmatig aangebrachte grondlagen (circa N.A.P. -1.0 m) wordt allereerst klei, afgewisseld met enkele zandlaagjes aangetroffen. Deze grondlagen behoren tot de Afzettingen van Tiel. Vanaf km 414.05 tot aan de ontvangtschacht komt tussen circa N.A.P. -5.0 m en N.A.P. -10.0 m een veenlaag voor met een dikte tot 4.0 m. Deze veenlaag wordt gerekend tot het Hollandveen.

Plaatselijk is het veen sterk kleiig en kan een deel van het pakket veen worden afgewisseld door een sterk humeuze klei behorende tot de afzettingen van Gorkum [11].

Pleistocene grondlagen

De bovenzijde van het Pleistoceen bevindt zich op de meeste plaatsen op een diepte van circa N.A.P. -18 m. Het bovenste gedeelte van het Pleistoceen wordt gevormd door de Formatie van Kreftenheye. Aan de bovenzijde van deze formatie komt op de meeste plaatsen een zandige leemlaag of zandige zware kleilaag van 0.3 m tot 1.0 meter voor. Gezien de samenstelling en de geringe dikte is deze laag, op basis van het verrichtte

grondonderzoek, vaak moeilijk te onderscheiden van het Basisveen. Om deze reden zijn de eventueel aanwezige leemlaag en het Basisveen als één laag weergegeven in het geotechnisch lengteprofiel.

Op een diepte van gemiddeld N.A.P. -18.5 m begint een 6.0 m tot 12.0 meter dik pakket matig grof tot grof, zwak tot matig grindig zand. Deze zanden zijn afgezet door zogenaamde vlechtende rivieren, de voorlopers van de huidige Maas en de Rijn. Plaatselijk komen in het zand sterk grindige lagen voor met een dikte tot 0.70 m [11].

Chloridegehalte

In de holocene grondlagen zijn chloridegehaltes gemeten van 68 tot 1000 mg/l. In het pleistocene zand dient rekening te worden gehouden met chloridegehaltes van gemiddeld 800 mg/l, incidenteel komen hogere concentraties voor tot 1500 mg/l.

De Botlekspoortunnel komt voor het grootste deel door het raakvlak tussen de holocene en pleistocene grondlagen te liggen.

3.5.3. Ontwerp en constructie van de dwarsverbindingen

Tussen de beide tunnelbuizen moeten in totaal drie dwarsverbindingen komen, h.o.h. ca. 600 m. De h.o.h.-afstand van de beide buizen bedraagt t.p.v. de dwarsverbindingen 20m, zodat de lengte van de verbindingen ca. 10,5m bedraagt.



figuur 3.15 Dwarsverbinding Botlekspoortunnel

De dwarsverbindingen zullen worden gemaakt door vanaf het maaiveld met diepwanden een bouwkuip te creëren, voordat de TBM die locatie passeert [23].

De bouw wordt gefaseerd uitgevoerd. Vóór passage van de TBM worden diepwandschermen aangebracht, zie figuur 4.1. De TBM boort op een zeer kleine afstand langs de diepwandschermen heen. Na het beëindigen van het boorproces van de hoofdtunnel wordt de bouwput nat ontgraven en wordt een onderwaterbetonvloer aangebracht, waarna, na droogpompen, vanuit de kuip doorgebroken kan worden naar de tunnel door het toepassen van grondverbetering. De ruimte tussen de damwandschacht en de hoofdtunnelbuis wordt voorzien van een grout- en/of vrieslichaam. In de damwandschacht wordt vervolgens de betonnen dwarsverbinding gerealiseerd. Na voltooiing van de aansluiting tussen tunnelbuis en dwarsverbinding kan de tunnelbuis geopend worden. (zie 4.2.1)

3.6. 4^e Elbetunnel

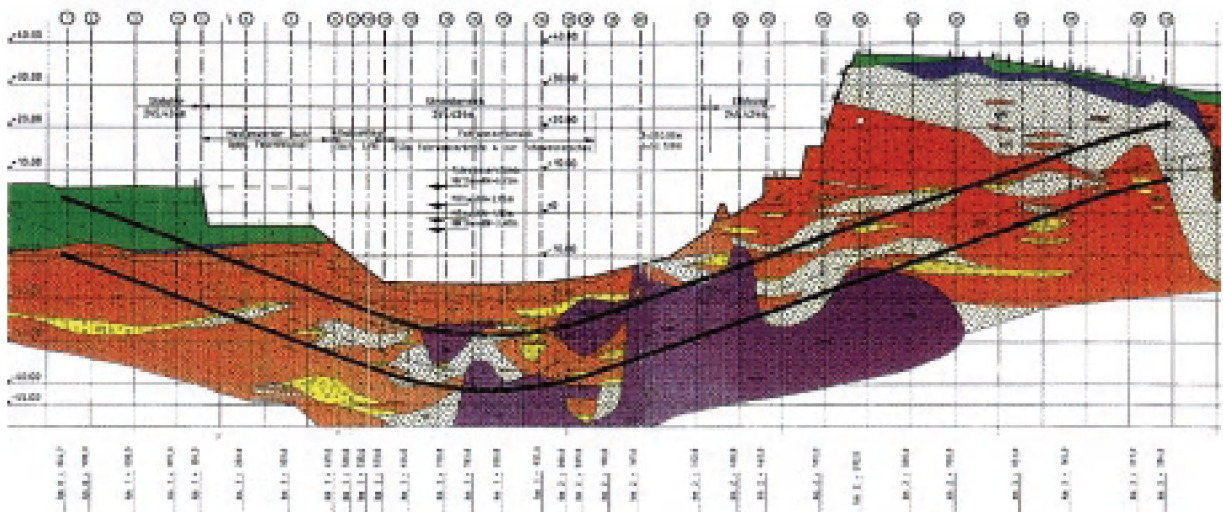
3.6.1. Inleiding

Naast de bestaande verkeerstunnel, 3 buizen van 2 rijstroken, werd het noodzakelijk door de toegenomen verkeersdrukke sinds de jaren zeventig om de capaciteit uit te breiden. Er is voor gekozen om een enkele geboorde buis met twee rijstroken aan te leggen, aangezien men het niet verantwoord vond om de tunnel af te zinken tussen het drukke scheepvaartverkeer op de Elbe. De nieuwe tunnelbuis is bestemd voor het vrachtverkeer in zuidelijke richting.

De totale constructie (toeritten en tunnel) wordt 4.4 km lang. Het geboorde deel wordt 2561 m lang met een buitendiameter van 14.20 m. De boormachine is van het type Mixschild en wordt overwegend als Hydroschild gebruikt. De geplaatste segmenten zijn 5.25 bij 2 m bij 70 cm en wegen elk 18 ton. In het tracé is de bodemdekking boven de tunnel 4 (t.p.v. start-dichtblok) tot 11 (t.p.v. de bodem van de Elbe) meter. [4]

3.6.2. Geologie en onderzoek

De ondergrond kan bijzonder heterogeen genoemd worden. Er bevinden zich zandlenzen, mergel, gecementeerd silt, glaciale afzettingen, mica silt, scheuren gevuld met water, stenen en keien tot wel 2 meter diameter in de bodem. De hoge grondwaterstand en de getijbeweging van de Elbe zorgen voor extra moeilijke grondcondities. [5]

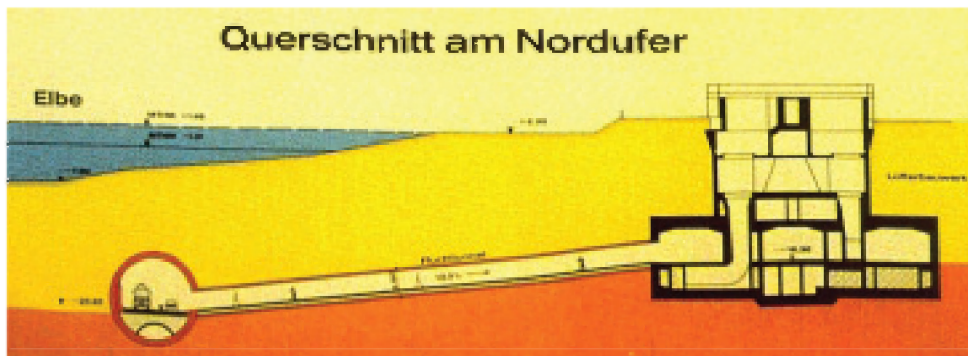


Figuur 3.16 Geologische opbouw ondergrond

3.6.3. Ontwerp en constructie van de dwarsverbindingen

De drie dwarsverbindingen, h.o.h. 1100 m en een binnendiameter van 3.5 m, zijn tussen de 12.6 en 70 m lang en verbinden de geboorde tunnel met de bestaande tunnel. De verbindingen worden aangelegd na het gereedkomen van de geboorde tunnel met behulp van de buisperstechniek. Ter plaatse van de uitbraak is, voordat de hoofdbuis is aangelegd, een HDI-lichaam van circa 5 meter breed aangelegd. Door het wegnemen

van de stalen segmenten kan de buis-perstechniek worden gestart. Er wordt bij het persen tegen de lining afgezet. [4]



Figuur 3.17 Dwarsverbinding 4^e Elbetunnel

3.7. Overzicht projecten met dwarsverbindingen

Gegevens dwarsverbindingen		Kanaaltunnel	Størebælt spoortunnel	Westerschelde tunnel	Botlek spoortunnel	4 ^e Elbetunnel
Hoofdtunnel		2 buizen	2 buizen	2 buizen	2 buizen	1 buis
	lengte	38 km	7.5 km	6.6 km	1.8 km	2.5 km
	d _{inw.}	7.6	7.7	10.1	8.65	12.8
Lengte [m]		17.60	17.00	12.00	8.00 tot 9.00	12.60 tot 70.00
H.o.h afstand [m]		vluchtgangen: 375 drukkanalen: 250	250	250	600	1100
Inwendige diameter [m]		3.30	4.50	2.36 tot 2.69	-	3.5
Opbouw lining		SGI ¹⁾	SGI ¹⁾	Gewapend beton	Betonnen wand	Buizen en ongew. beton
Constructie methode		Open front/NATM	Open front/NATM	Open front	Bouwkuip	Buispers-techniek
Grondverbetering		Grouten	Waterstands-verlaging / grouten / vriezen	Vriezen	Vriezen / grouten	HDI-lichaam ²⁾
Maaiveldactiviteiten		Geen	Waterstands-verlaging	Geen	Diepwanden-bouwkuip	Injectie HDI-lichaam
Aantal		vluchtgangen: 130 drukkanalen: 150	31	25	3	3
Overwe- gingen keuze bouwme- thode	onder- gronds / vanaf maaiveld	diepteligging	diepteligging	diepteligging	beperkte risico's	-
	grondver- betering	bodemcondities	bodemcondities	veiligheid, beperkte risico's	-	-
Problemen tijdens uitvoering		-	scheuren in aansluiting op hoofdtunnel (geïnjecteerd)	nog niet uitgevoerd	localiseren uitsparingen in diepwanden	-

tabel 3.1 Overzicht projecten met dwarsverbindingen

- 1) SGI: Spheroidal Graphite Iron
- 2) HDI: Hoge Druk Injectie

4. Constructie van dwarsverbindingen

4.1. Inleiding

Bij de constructie van dwarsverbindingen kan men gebruik maken van verschillende soorten grondverbetering, tunnellingen, graafmethoden, etc. Daarnaast kan er gekozen worden voor het graven en verbeteren van grond vanaf het maaiveld of vanuit een geboorde tunnel [6].

Naast al eerder gebruikte technieken wordt er ook aandacht besteed aan een tweetal nieuwe ideeën voor het maken van een dwarsverbinding vanuit een bestaande tunnel.

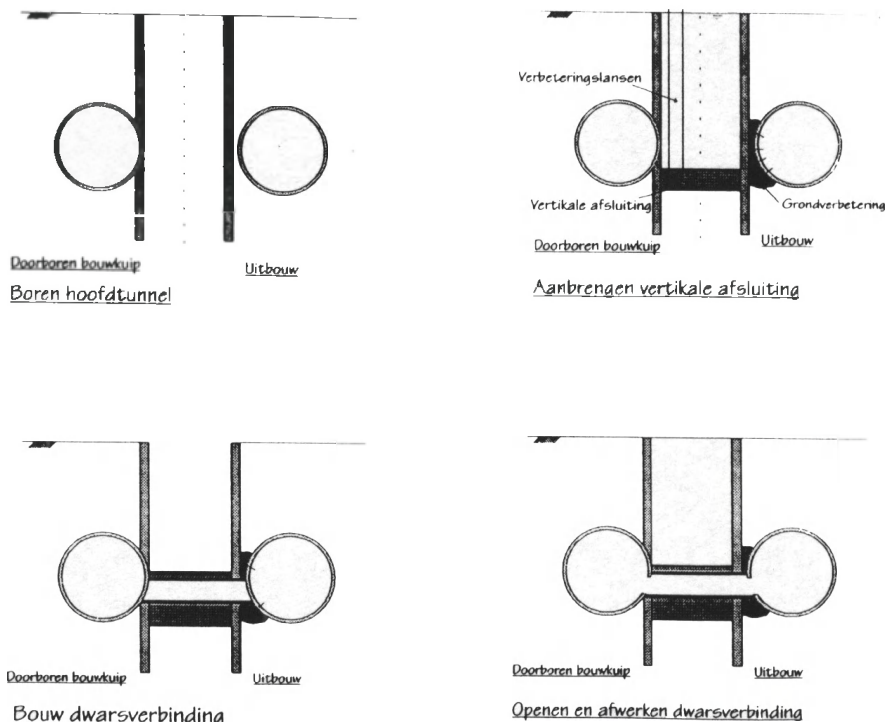
4.2. Bestaande methoden

De bestaande methoden voor het maken van een dwarsverbinding kunnen onderverdeeld worden in bouwactiviteiten die plaatsvinden vanaf het maaiveld en vanuit de tunnels. Beide soorten activiteiten kunnen verder onderverdeeld worden in specifieke methoden en constructies.

4.2.1. Vanaf het maaiveld

Bouwkuip

Wanneer het toegestaan en mogelijk is om op het maaiveld een bouwterrein in te richten, kan de dwarsverbinding in een bouwkuip gebouwd worden. Om normaal te kunnen werken moet de kuip zowel grond- als waterkerend zijn. Voor het maken van een



Figuur 4.1 Bouwkuip

bouwkuip zijn verschillende mogelijkheden t.a.v. de wanden, vloer en hulpmiddelen voorhanden. Dam-, diep- en combiwanden kunnen gecombineerd worden met een waterdichte vloer. Het waterdicht krijgen van de vloer kan bereikt worden door het storten van onderwaterbeton, een natuurlijk afsluitende laag en een injectielaag (grout). De wanden van de kuip dienen gesteund te worden met behulp van stempels of ankers.

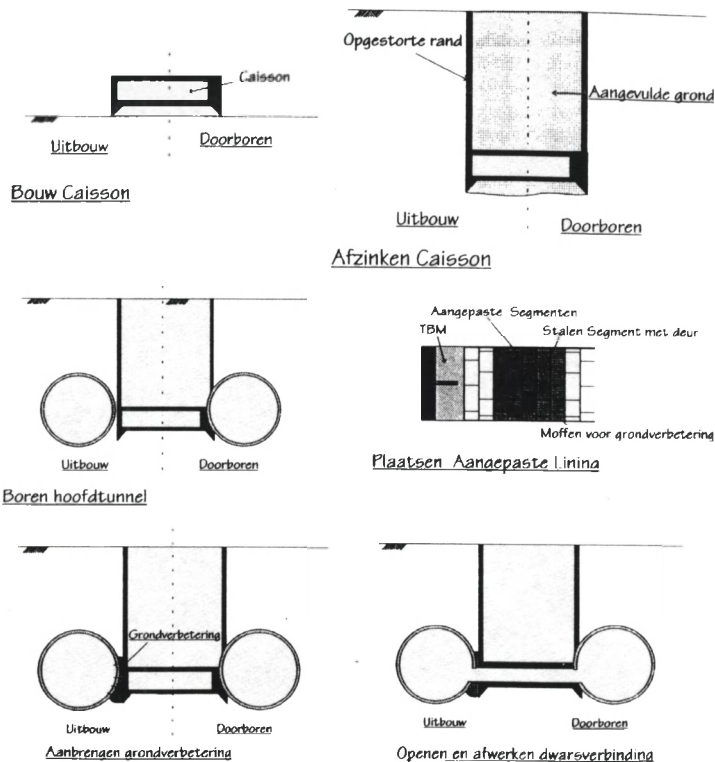
Het is mogelijk om de bouwkuip eerst aan te leggen en vervolgens gedeeltelijk met een TBM te doorboren of de bouwkuip vlak naast een geboorde tunnel aan te leggen. In het laatste geval zal er een waterdichte verbinding tussen de kuip en tunnel aangebracht moeten worden.

In de bouwkuip kan er alleen vanaf het maaiveld een vloer tussen de wanden aangebracht worden. Na het ontgraven van de kuip is de aansluiting (door middel van grondverbetering) met een tunnel, die niet door de wand heen is geboord, te maken vanuit de kuip of de tunnel zelf. Na de constructie van de dwarsverbinding kan de grond weer worden aangebracht tot maaiveld niveau.

Opgemerkt moet worden dat door de grote diepteligging van de tunnel de kosten van de bouwput hoog zullen zijn en dat door de tijdelijke functie van de kuip er een hoop werk voor een kleine verbinding wordt gedaan. Het werken vanaf het maaiveld zorgt er echter wel voor dat in het geval van problemen, bij bijvoorbeeld de waterdichtheid van de aansluiting, er beter ingegrepen kan worden.

Caisson

De dwarsverbinding wordt gemaakt in de vorm van een doos die voorzien is van een snijrand. Door onder verhoogde luchtdruk onder de doos te ontgraven kan ze op de juiste diepte gebracht worden zonder wateroverlast. Na het eventueel aanbrengen van grondverbetering kan uitbouwen plaatsvinden en de dwarsverbinding verder afgebouwd worden.



figuur 4.2 Caisson

\Het plaatsen van een caisson of het maken van een kuip nabij een geboorde tunnel zorgt voor verstoring van de grond en eventuele veranderingen in de spanningen in de tunnelling. Het doorboren van een caisson kan daarentegen voor verdraaiing, kanteling of verplaatsen zorgen.

Bij dwarsverbindingen op grote diepte kan het aanwezig zijn van mensen bij het ontgraven van de grond problemen opleveren en zal er naar andere mechanische ontgravingsmethoden uitgeweken moeten worden.

4.2.2. Vanuit de tunnel

Het bouwen van dwarsverbindingen vanuit de geboorde tunnels is in Nederlandse grond eigenlijk niet te doen zonder eerst grondverbetering toe te passen. De grond bezit niet genoeg sterkte en is verzadigd met water.

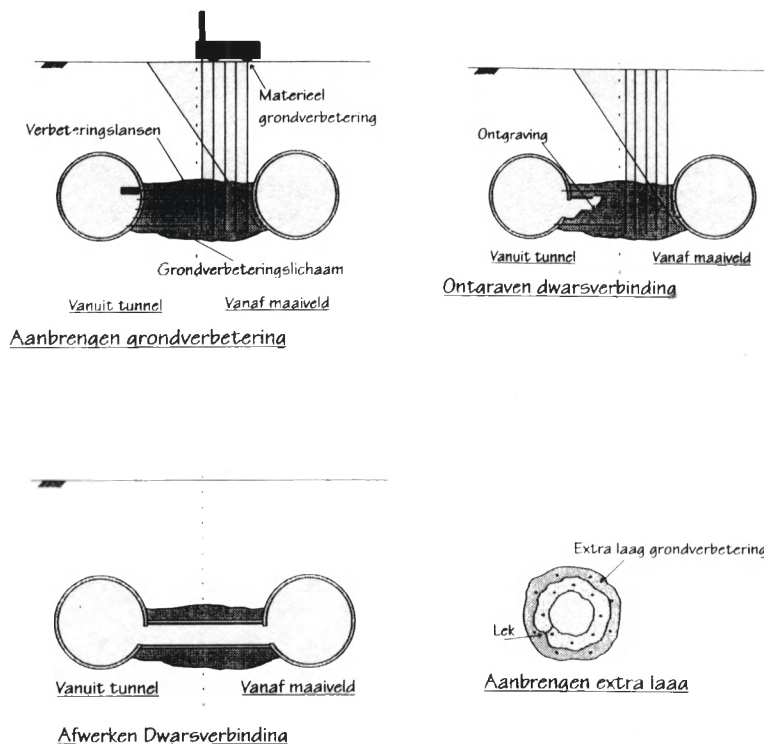
Het grote probleem bij het maken van de verbindingen is enerzijds de waterdichtheid en sterkte van het grondmassief en anderzijds de manier waarop deze door de tunnelling moet worden aangelegd. Door het maken van allerlei openingen in de gesegmenteerde lining verzwakt men deze plaatselijk.

Het aanbrengen van de grondverbetering kan vanuit de tunnel of vanaf het maaiveld plaatsvinden. Daarnaast kan men vanaf het maaiveld de verbetering voor de passage van de TBM aanbrengen of direct aansluitend naast de tunnelling.

In dit stuk wordt achtereenvolgens aandacht besteed aan het graven met een open front, het persen van dwarsverbindingen, het boren met een kleine TBM en de buizenmethode.

Open front

Na de grondverbetering hoeft de grond niet de vereiste eindsterkte en waterdichtheid te hebben. In ieder geval moet het voldoende zijn om met de NATM zonder wateroverlast

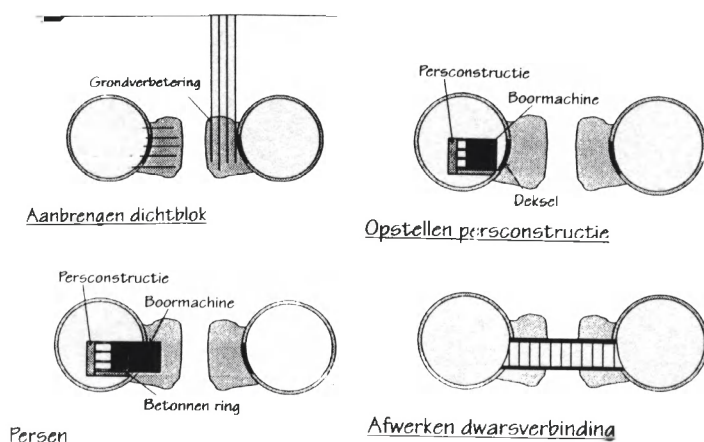


figuur 4.3 Open front ontgraving

te kunnen worden ontgraven. De NATM kan het graaffront tijdelijk ondersteunen, waarna de definitieve lining aangebracht wordt.

Persen van dwarsverbindingen

In de wand van de hoofdtunnel moet een speciaal element worden aangebracht, groot genoeg om de geperste ringen door te laten. Grondverbetering kan zowel vanuit de tunnel als vanaf het maaiveld worden aangebracht. De vriestechniek is in dit geval minder geschikt omdat de lansen daarin achterblijven. De grond hoeft slechts over een korte lengte verbeterd te worden (dichtblok) omdat de ringen onderling waterdicht zijn. De persconstructie en de constructie die de afzetkrachten overbrengt mogen het boorproces van de TBM niet onderbreken, ondanks dat de krachten over een groot oppervlak overgebracht moeten worden. De boormachine aan de kop van de persbuis ontgraaft de grond en wordt door de persconstructie tot in het tweede dichtblok geperst. De methoden om het front stabiel te houden zijn het slurry-schild en EPB-schild.



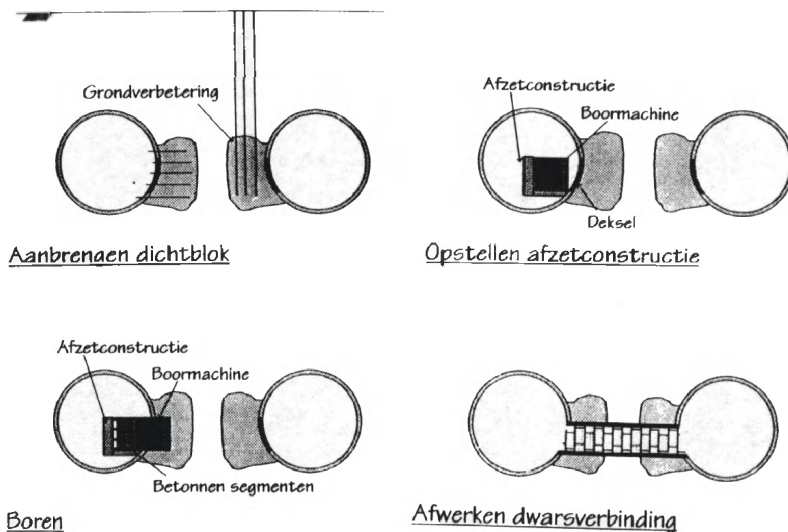
Figuur 4.4 Persen van dwarsverbinding

Het trekken van de boormachine is ook mogelijk. Hierbij wordt een hogere nauwkeurigheid behaald, omdat de machine naar de juiste plek getrokken wordt. Een pilotboring voor het trekelement dient nauwkeurig uitgevoerd te worden. In beide gevallen kan de installatie opnieuw gebruikt worden voor andere dwarsverbindingen.

Hoewel er in Nederland ervaring bestaat met het persen van leidingen en tunnels van deze diameter zorgt de methode hier voor extra problemen. De voornaamste problemen bij deze manier van construeren zijn het goed op de grond overbrengen van de perskrachten en de ruimte die door de installatie wordt ingenomen. Er komen erg hoge krachten op een gesegmenteerde tunnellinging te staan. De verplaatsingen en vervormingen van segmenten zorgen daardoor waarschijnlijk voor o.a. lekkages.

TBM

Het gebruik van een TBM verschilt weinig met een pers installatie. De vijzels zitten in dit geval direct achter de boorkop en niet bij de afzetconstructie. De lining van de dwarsverbinding bestaat uit gesegmenteerde ringen, terwijl de ringen bij de persconstructie uit één stuk gemaakt kunnen zijn.



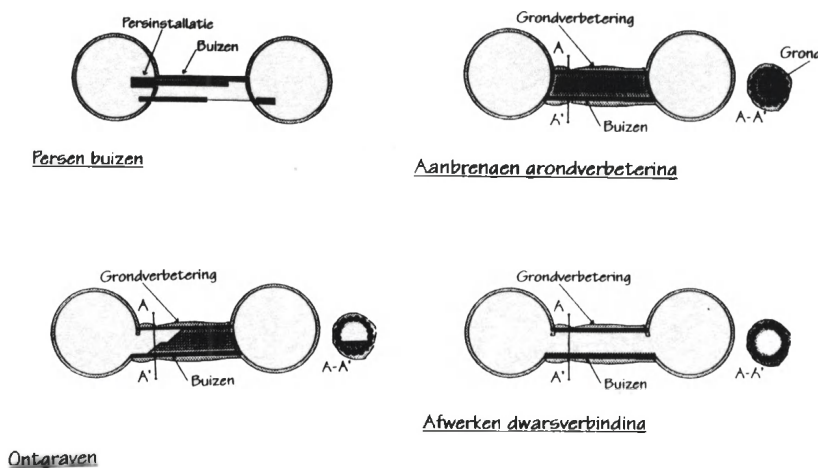
figuur 4.5 TBM

Buizenmethode

Het idee achter de buizenmethode is het creëren van een ronde stalen lining, door buiselementen in een ronde vorm te persen. De buiselementen zijn eventueel onderling verbonden door vooraf aangebrachte sloten. [1] en [6]

Bij het boren van de tunnel dienen in de lining speciale segmenten geplaatst te worden. Enerzijds moet er een opening met de grootte van het profiel van vrije ruimte gemaakt kunnen worden en anderzijds moet het mogelijk zijn om de buizen, met eventueel een boorkop, door de lining heen te kunnen steken in een achterliggende ondergrond waarin geen grondverbetering is toegepast. De buizen dienen in een boog geplaatst te worden door een boor- of persmachine.

De buizen worden door middel van vooraf aangebrachte sloten met elkaar verbonden. Om de totale afstand naar de andere tunnel te kunnen overbruggen moeten de buizen deelbaar kunnen zijn. De buizen blijven achter in de grond en worden met beton gevuld, ter versteviging van de lining. Het aanbrengen van grondverbetering rond de buizen is noodzakelijk omdat de sloten niet gegarandeerd waterdicht zijn. Het aanbrengen van die verbetering kan eventueel vanuit de buizen gebeuren. Na het openen en ontgraven van de dwarsverbinding kan deze afgewerkt worden.



Figuur 4.6 Buizenmethode

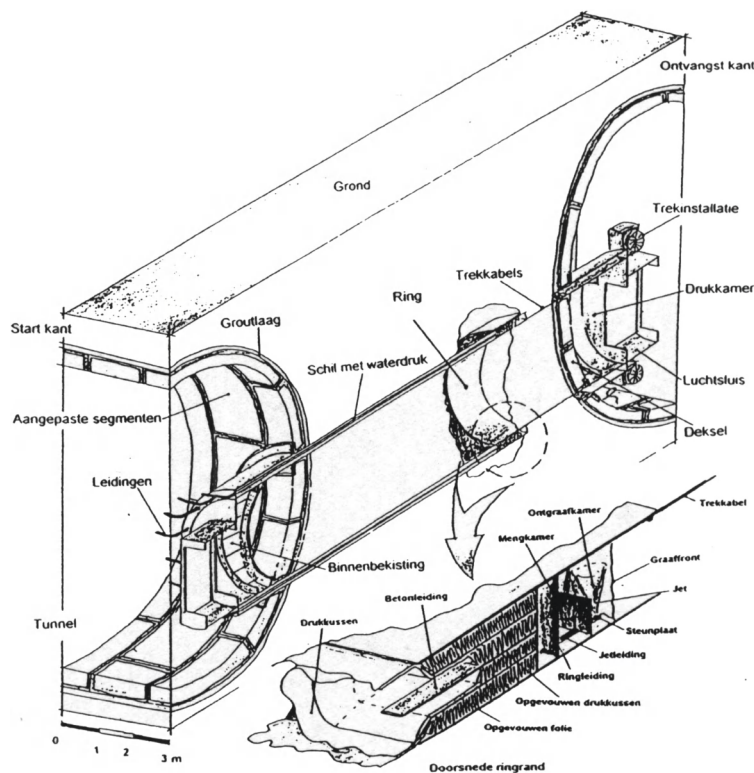
4.2.3. Innovatieve methoden

Er bestaan een tweetal nieuwe constructiemethoden, te weten de ringmethode en groutboog met horizontaal meer-fasen jet-grouten methode, voor het maken van dwarsverbindingen vanuit tunnels. De ideeën voor deze nieuwe technieken zijn gedeeltelijk tijdens afstudeerstages ontstaan, ze zijn nog nooit in de praktijk getoetst of uitgevoerd.

Ringmethode

Door met behulp van een ring een lining in de grond aan te brengen, is het volgens de bedenker van deze methode mogelijk om op een snelle manier, zonder grondverbetering, de dwarsverbinding te bouwen. De genoemde maten en afmetingen hebben betrekking op een casestudie voor de boortunnel onder het Groene Hart voor de HSL (uitwendige diameter hoofdbuizen: 10.2m (R.O.)).

Het doel van de methode is het in de grond creëren van een lining die, zonder verdere maatregelen, veilig te ontgraven en af te werken is. Hierdoor kan op een snelle en voor de werkers veilige manier een dwarsverbinding gebouwd worden. Dit gebeurt door een ring, met een diameter van ongeveer 3.6 m, een dikte van 20 cm en een lengte van 75 cm, over bijvoorbeeld een lengte van 10 m door de grond te trekken. Aan de voorkant van de ring wordt grond ontgraven. De ruimte die hierdoor achter de ring ontstaat wordt opgevuld met een steunvloeistof tussen twee folielagen. Deze schil houdt het gecreëerde gat open tijdens het trekken van de ring. Nadat de steunvloeistof vervangen is door beton kan de grond binnen de schil veilig worden verwijderd. [6] en [7]



figuur 4.7 Ringmethode

Voor deze methode moeten een aantal stappen worden ondernomen, opdat de dwarsverbinding zonder problemen gebouwd kan worden.

- Plaatsen speciale segmenten
Tijdens het bouwen van de hoofdtunnels worden rond de plaats van de toekomstige dwarsverbindingen in 5 ringen speciale stalen segmenten aangebracht. De krachten worden hierdoor beter opgevangen en de rand is rond de omtrek van de dwarsverbinding beter te verwijderen.
- Aanbrengen trekkabels
Vanuit de ontvangstbuis worden kabels naar de andere buis gebracht. Door eerst te boren en vervolgens de kabels terug te trekken kunnen de kabels worden aangebracht. Moffen in de lining van de dwarsverbinding zorgen ervoor dat het water buiten blijft.
- Aanbrengen ring en drukkamers
In beide tunnels wordt een drukkamer geplaatst, die door middel van bouten aan de tunnel wordt vastgezet. De ring is buiten de tunnel in de drukkamer geplaatst en wordt samen met de kamer aan de startkant bevestigd. Aan de ontvangstkant zit op de drukkamer een trekinstallatie. De drukkamers worden onder luchtdruk gezet, zodat de tunnelwand zonder wateroverlast over de volle omtrek van de dwarsverbinding geopend kan worden.
- Openen rand

In beide hoofdtunnels kan nu de wand geopend worden. Rond de omtrek van de dwarsverbinding wordt een cirkelvormige opening in de wand van de hoofdtunnel gemaakt met een dikte van 22 cm. Tijdens het openen van deze rand wordt in de drukkamer een bekisting aangebracht die de drukkamer met de deksel verbindt, zodat het trekproces kan worden gestart en de deksel binnenin de ring op de juiste plaats blijft. Tegelijkertijd wordt de groutlaag buiten de tunnel verwijderd en de ring aan de trekkabels gekoppeld. Aangezien de leidingen al vooraf aan de drukkamer en de ring zijn bevestigd, kan begonnen worden met trekken, zodra de druk achter de ring tussen de folielagen opgebouwd is.

- Trekken van de ring
Tijdens het trekken wordt aan de voorkant van de ring met behulp van hydro-jets de grond ontgraven en via leidingen afgevoerd. Achter de ring ontstaat hierdoor een ruimte. Deze ruimte wordt opengehouden met behulp van twee folielagen met daartussen een steunvloeistof. Het folie dat opgevouwen zit in de ring wordt tijdens het trekken in de grond ontvouwen, waarna de steunvloeistof vanuit de drukkamer de schil ingeperst kan worden. De aan- en afvoer van de benodigde vloeistoffen vindt plaats door leidingen die achter de ring aan getrokken worden en van buiten de drukkamer doorgevoerd worden. Onderin de schil bevinden zich langwerpige drukkussens die de moot grond binnenin ondersteunen.
- Vervangen van steunvloeistof door beton
Zodra de ring aan de overkant is, kan begonnen worden met het vervangen van de steunvloeistof door beton. Door eerst de drukkussens te vullen en vervolgens de ruimte hiertussen, wordt de moot grond op de juiste plek gehouden. Het beton wordt gestort tijdens het terugtrekken van betonleidingen die met de ring meegevoerd zijn.
- Losmaken drukkamers
Om vervorming van de hoofdbuizen na het verwijderen van de drukkamers tegen te gaan, wordt er rond het gat in de lining van de hoofdbuis een verstijving aangebracht. Vervolgens wordt de binnenbekisting verwijderd en de lining van de dwarsverbinding wordt doorgesneden.
- Uitgraven en afwerken dwarsverbinding
De drukkamers worden met een deel van de schil afgevoerd en kunnen schoon- en klaargemaakt worden voor de volgende dwarsverbinding. De dwarsverbinding wordt aan de tunnel gekoppeld. De deksel kan vervolgens worden verwijderd. Het water binnen de moot grond moet eerst worden weggepompt, zodat er geen wateroverlast ontstaat. Tijdens het uitgraven van de tunnel wordt een tweede lining geplaatst. Door het gefaseerd uitgraven en plaatsen van de lining wordt de schil direct ondersteund. Zodra de tweede lining volledig in de tunnel is aangebracht kan de tunnel worden afgewerkt.

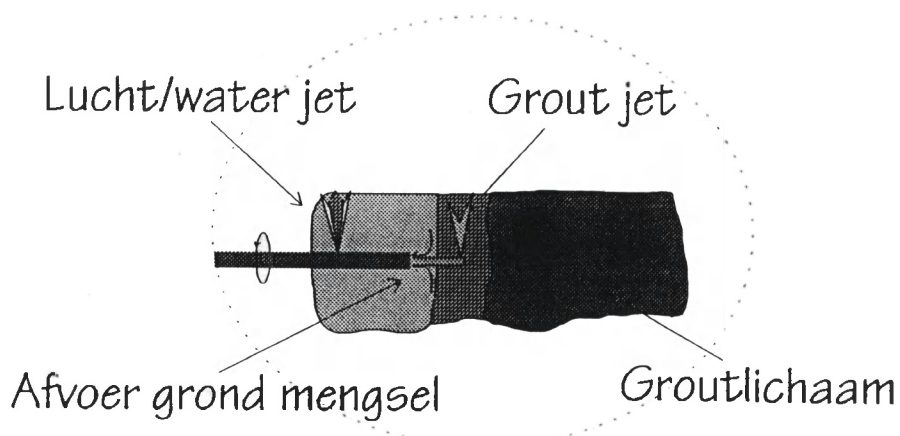
De ringmethode kan gezien worden als een interessante constructiemethode, maar is vanwege de nodige praktische problemen, niet uitgewerkte aspecten en complexe werkwijze, niet geschikt om direct gebruikt te worden. Onder andere het gebruik van folies, het aanbrengen van de trekelementen en het meetrekken van verschillende leidingen zorgt ervoor dat de methode als een complexe gezien kan worden.

Groutboog met horizontaal meer-fasen jet-grouten

Het maken van een groutboog is vergelijkbaar met het maken van een verbeterd grondlichaam, maar door het gebruik van een meer-fasen jet-grout systeem zijn de resultaten van de groutboog beter.

Onder horizontaal meer-fasen jet-grouten wordt verstaan: het horizontaal toepassen van 2- en 3- fasen jet-grouten. In tegenstelling tot het 1-fase systeem wordt er bij een meer-fasen systeem grond ontgraven, waarbij er een retourstroom langs de buis ontstaat, waarin de grond afgevoerd wordt. Uit onderzoek naar grondverbetering is naar voren gekomen, dat bij het gebruik van een meer-fasen systeem een grotere sterkte en een grotere invloedsdiameter bereikt kan worden. [6]

De methode van het maken van een groutboog met horizontale meer-fasen jet-grouten kan gezien worden als een praktisch uitvoerbare methode. Het gebruik van een jetgrout techniek is voor wat de waterdichtheid betreft een riskante methode; deze groutboog met horizontaal meer-fasen jet-grouten methode heeft echter een betere kans op een sluitend en waterdicht groutlichaam. Lekken in het lichaam blijven moeilijk op te sporen en te repareren. De aanpassingen in het groutproces zijn echter goed te realiseren.



Figuur 4.8 Horizontaal 3-fasen jet-grouten

4.3. Overzicht constructiemethoden dwarsverbindingen

		grond-verbetering	voordelen	nadelen	ervaring	toegepast voor dwarsverbinding
vanaf maaiveld	bouwkuip	- geen - vriezen - grouten	- beperkt risico - mogelijkheid ingrijpen bij lekkage	- kosten - veel werk voor tijdelijke constructie - beperkte diepte	- reeds vele bouwkuipen gemaakt	- Botlekspoor-tunnel (in uitvoering)
	caisson	- geen - vriezen - grouten	- geen wateroverlast bij aanbrengen dwarsverbinding	- beperkte diepte - doorboren van caisson kan kanteling of verplaatsing veroorzaken	- diverse tunnels/ andere constructies	- onbekend
onder-gronds	open front/NATM	- geen - vriezen - grouten	- geen grote (vijzel-) krachten op lining hoofdtunnel	- kosten (vooral bij vriezen) - risico's bij niet waterdicht zijn grondverbeteringslichaam	- vele tunnels	- Størebæltspoor-tunnel - Westerschelde-tunnel (in uitvoering)
	persen	- grouten	- grondverbetering over beperkte lengte	- grote krachten op lining hoofdtunnel - afzetconstructie in hoofdtunnel hinderlijk tijdens bouw/afbouw	- diverse tunnels (pipe-jacking)	- 4^e Elbetunnel (in uitvoering)
	TBM	- grouten	- grondverbetering over beperkte lengte	- grote krachten op lining hoofdtunnel - afzetconstructie in hoofdtunnel hinderlijk tijdens bouw/afbouw	- vele tunnels	- onbekend
	buizen-methode	- grouten (na aanbrengen buizen)	- onbekend	- onbekend	- onbekend	- onbekend

nieuwe methoden onder- gronds	ring- methode	- geen	- geen grondverbe- tering benodigd	- erg complex - niet volledig uitgewerkt	- geen	- nee
	groutboog met meer- fasen jetgrouting	- grouten (meer- fasen)	- grotere sterkte - grotere invloeds- diameter (dan bij 1-fase jetgrout)	- risico's waterdichtheid	- onbekend	- nee

tabel 4.1 Overzicht constructiemethoden dwarsverbindingen

5. Grondverbeteringstechnieken

5.1. Inleiding

Vanwege de grondgesteldheid in Nederland is voor het bouwen van dwarsverbindingen met bestaande technieken grondverbetering noodzakelijk. Om bij de beoordeling van de verschillende constructiemethoden voor het maken van dwarsverbindingen, een goed beeld te krijgen van de meest geschikte grondverbeteringstechniek wordt in dit hoofdstuk een overzicht van de mogelijke grondverbeteringen gegeven.

In dit hoofdstuk wordt allereerst aandacht besteed aan het bevroren van grond. Vervolgens komt achtereenvolgens het jetgroutproces, het injecteren van grout en chemische oplossingen en het maken van kalk/cement kolommen aan bod.

5.2. Bevroren van grond

5.2.1. Inleiding

Bij het bevroren van grond wordt het grondwater in de grond bevroren, zodat er een stabiel en ondoorlatend massief van ijs en grondkorrels gevormd wordt. Bevroren grond heeft een hoge sterkte en een zeer lage doorlatendheid.

Men kan op twee manieren de warmte aan de grond onttrekken, namelijk:

- door de koudedrager via een gesloten systeem rond te pompen (zoutoplossing), die telkens weer wordt gekoeld
 - of door bijvoorbeeld vloeibare stikstof in de vrieslansen te pompen, waarbij door verdamping van de vloeistof in de vrieslansen warmte aan de grond wordt onttrokken. Hierbij wordt de vloeistof slechts eenmaal gebruikt.
- In beide gevallen wordt het koude medium door de vrieslansen gepompt, zodat geen indringing van de vloeistof in de grond mogelijk is.

Voor het in de grond brengen van een koudedrager maakt men dus gebruik van een buizensysteem, ook wel vrieslansen genaamd. Voor het maken van een dwarsverbinding tussen twee tunnels is het mogelijk om de lansen horizontaal (vanuit een tunnel) of vertikaal (vanaf het maaiveld) in de grond te brengen. Door het gebruik van meerdere lansen kan een wand of een massief worden gevormd.

Het maken van een vrieslichaam is afhankelijk van een groot aantal factoren, zoals grondopbouw, watergehalte, heterogeniteit, grondwaterstroming, zoutgehalte, etc. Het is mogelijk dat de structuur van de grond veranderd is na het weer ontdooien van de grond.

Een vrieslichaam gemaakt met behulp van bijvoorbeeld stikstof kan (door de lage temperatuur van -196°C) zijn uiteindelijke grootte bereiken in 2 tot 5 dagen, bij een zoutoplossing (ca. -30°C) als koudedrager kan dit al snel 4 tot 8 weken duren.

5.2.2. Dwarsverbindingen met behulp van de vriestechiek

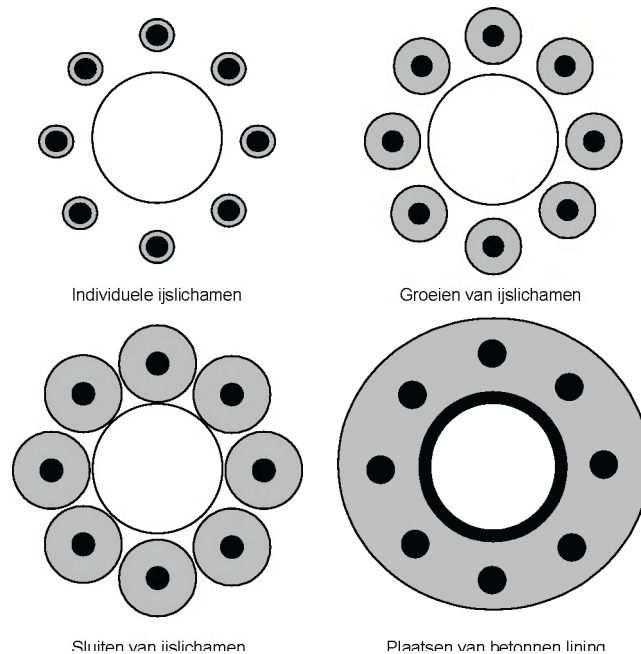
Uitgangspunt bij het maken van een dwarsverbinding met behulp van de vriestechiek is dat de grond zelf niet draagkrachtig en waterdicht genoeg is. Bij de bouw wordt daarom gebruik gemaakt van een (cirkelvormig) vrieslichaam tussen de twee reeds geboorde tunnels, gemaakt met vrieslansen die door van te voren aangebrachte moffen in de tunnelling steken. Nadat deze vrieslansen zijn aangebracht, kan worden begonnen met het bevriezen van de grond.

Zodra het vrieslichaam gereed is, moet worden getest of de hulpconstructie waterdicht is. Ook al blijkt de waterdichtheid op een gegeven moment in orde, dan is het nog niet zeker dat deze gehandhaafd blijft bij verder ontgraven van de dwarsverbinding. Door ontgraven, tijdsafhankelijke effecten of het uitvallen van de koeling kan de draagkracht van de ijsring onvoldoende worden. Daarnaast is het mogelijk dat het gekozen ontwerp niet juist is, waardoor bij volledige ontgraving onvoldoende stabiliteit ontstaat. Veiligheidsmaatregelen (bijvoorbeeld een snel te sluiten deur, zoals hieronder te zien is) moeten bij een eventueel bezwijken, het volstromen van de hoofdtunnel voorkomen. Wanneer de waterdichtheid en de sterkte voldoende blijken te zijn kan via een opening in de wand van een van de boortunnels de grond binnen het vrieslichaam weggehaald worden.

Het vrieslichaam moet tijdens de aanleg van de dwarsverbinding grond en water keren, zodat een vrije ruimte ontstaat waarin de verbinding kan worden gebouwd. Nadat de dwarsverbinding gereed is, heeft het vrieslichaam geen functie meer en kan het lichaam (al dan niet geforceerd) ontdooien. Bij het ontdooien wordt de uitzetting, die bij de overgang van water naar ijs optreedt, teniet gedaan. Het directe gevolg hiervan is dat de grond onder de dwarsverbinding zal zetten. Afhankelijk van het gewicht van de verbinding en het opdrijvend vermogen zal de dwarsverbinding t.o.v. de boortunnel willen zakken of stijgen.

5.2.3. Techniek van het bevriezen van grond

Het vriezen van grond is gebaseerd op het bevriezen van het aanwezige water in de grond. Alleen als er voldoende water aanwezig is kan de grond worden bevroren. In de literatuur wordt voor de minimale hoeveelheid water in de grond een percentage van 8% genoemd [6].



figuur 5.1 Ontwikkeling van een ijswand

Over het algemeen wordt er van een zoutoplossing (bijvoorbeeld pekkel, te koelen tot -30°C) of van vloeibaar stikstof (met een temperatuur van -196°C) gebruik gemaakt. De zoutoplossing circuleert in een gesloten koel- en leidingensysteem, terwijl bij het gebruik van stikstof er voortdurend aangevuld dient te worden. Door de koude zal het aanwezige water bevriezen en één geheel vormen met de omliggende grond [6].

Bij het gebruik van vloeibare stikstof treedt over de lengte van de vrieslans een veel groter temperatuursverloop op dan bij het gebruik van pekkel. Hierdoor zal rond een met stikstof gevulde lans een kegelvormig en bij het gebruik van pekkel een cilindervormig vrieslichaam ontstaan. De keuze van een van beide systemen is afhankelijk van de beoogde toepassing en de beschikbare financiële middelen. In het algemeen kan men stellen dat bij grote en voor een langere duur in stand te houden vrieslichamen het gebruik van een koelsysteem met pekkel goedkoper is. [9]

Voor het vriesproces zijn drie eigenschappen voornamelijk maatgevend. Het betreft de warmtegeleidingscoëfficiënt, de warmtecapaciteit en de smeltwarmte. [9]

Ervaring met het vriezen van grond is voornamelijk beperkt tot werkzaamheden op relatief kleine diepten. Het is gebleken dat er bij onderzoek naar het bevriezen slechts tot een paar grondeigenschappen wordt gekeken, die per project vaak nog verschillend willen zijn. Belangrijke grondeigenschappen t.a.v. het vriezen zijn de aanwezigheid van capillairen, fijn materiaal, zoutgehalte en de doorlatendheid (grondwaterstroming).

5.2.4. Kosten bevriezen van grond

Een kosten indicatie van het vriesproces is moeilijk te geven door schaarse informatie, die onderling sterk verschillend is. Toch kan er gesteld worden dat de soort koudedragers voor de kosten bepalend is.

De vriesinstallatie die gebruik maakt van een zoutoplossing is relatief duur en is voor een langere tijd in gebruik. Tijdens het vriezen zijn de kosten per tijdseenheid laag. Voor het gebruik van een gas zijn de kosten per tijdseenheid hoog, omdat er veel duur vloeibaar gas gebruikt wordt. Een kostbare installatie is hierbij echter niet nodig en door het snellere vriesproces hoeft men het gebruik van gas maar kort toe te passen. Voor grote projecten is het gebruik van een zoutoplossing waarschijnlijk goedkoper, door het hergebruik van de koelinstallatie. Bij kleine en kortdurende projecten verdient het toepassen van een gasvormige koudedragers, vanwege de korte vriestijd, de voorkeur.

In België is een project uitgevoerd waar de kosten bij min of meer verticale vrieslansen tussen de f 500.- en f 1250.- per strekkende meter vriesbuis bedroegen. Het gebruik van horizontale vrieslansen dreef de kosten op tot circa f 1750.- per strekkende meter vriesbuis. [6] en [11]

5.3. Jetgrouten

5.3.1. Inleiding

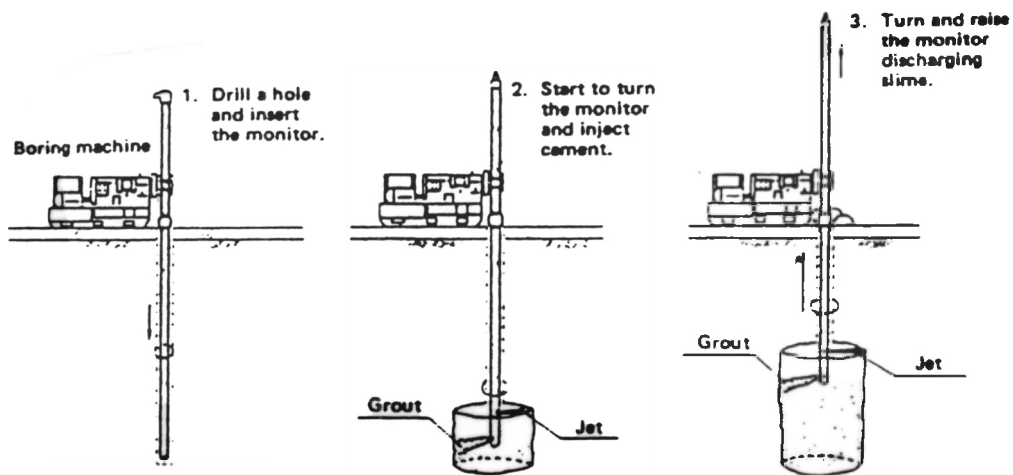
Het onder hoge druk injecteren van grout en tegelijkertijd versnijden van de grond wordt naast jetgrouten ook wel very-high-pressure-grouting (VHP-grouting) of hogedruk-injectie (HDI) genoemd. Het mengsel van geërodeerde grond en grout noemt men in engelse publicaties soilcrete. [11]

De processen die in de grond optreden zijn: het versnijden van de grondstructuur, het (gedeeltelijk) afvoeren van de losgesneden grond en het toevoeren van een verhardende specie waardoor een dragend en/of waterdicht element ontstaat.

5.3.2. Techniek van het jetgrouten

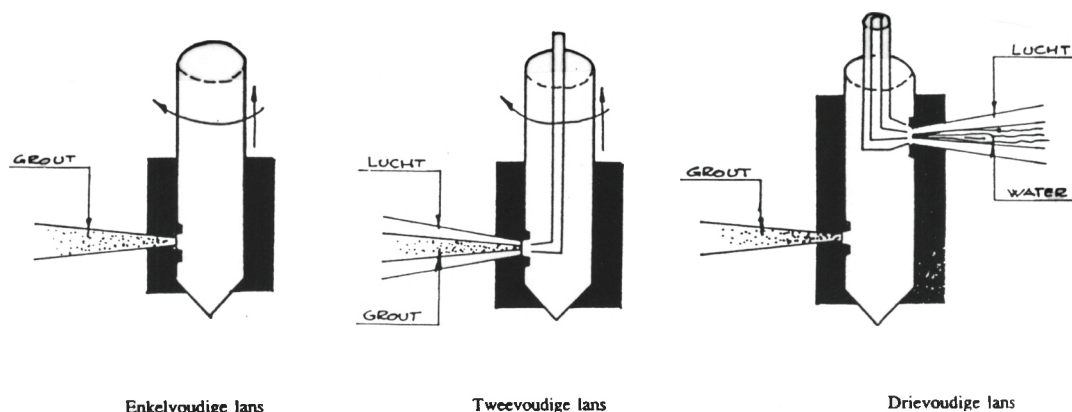
Het jetgroutproces vindt plaats vanuit een boorgat (diameter 100 à 150 mm). Dit boorgat wordt meestal door middel van spoelboren gemaakt met dezelfde lans waarmee vervolgens de jetgroutkolom wordt vervaardigd. De injectielans is voorzien van horizontaal gerichte spuitmondjes (nozzles) die een doorstroomopening hebben van 1.5 à 4.0 mm. Met een zeer hoge druk, tussen de 60 en 80 MPa, wordt vanuit dit boorgat met een injectielans (diameter 60 à 120 mm) een vloeistof in de grond gestuwd, beginnend op het diepste punt van het boorgat. Vanwege de hoge snijenergie erodeert de grond tot op een zekere afstand van het boorgat. Door de hoge vloeistofdruk wordt de korrelspanning tijdelijk volledig opgeheven en ontstaat een dikke brij. [11]

Door de injectielans te roteren en gelijktijdig langzaam te trekken, wordt een cilindervormige kolom in de grond gevormd. Ook is het mogelijk om tussen twee boorgaten panelen te formeren; de lans wordt dan getrokken zonder te roteren zodat in de grond tussen de beide boorgaten een wand (paneel) wordt gevormd. Een derde mogelijkheid is de lans over een kleine hoek te laten zwenken, zodat een wigvormig massief ontstaat, het zogenaamde 'winggrouten'. Deze methode kan gebruikt worden om een aansluiting met een bestaande constructie te realiseren.



Figuur 5.2 Jetgrouttechniek

Door de toevoer van water en grout zal het geërodeerde grond-water-mengsel via een ruimte tussen lans en boorgat afstromen. De hoeveelheid bodemmateriaal dat via het boorgat afstroomt is afhankelijk van de grondsoort; het achterblijvende materiaal wordt met de toegevoerde grout gemengd en bepaalt in belangrijke mate de uiteindelijke eigenschappen.



Figuur 5.3 Typen jetgroutlansen

In bovenstaande figuur staan de enkelvoudige, tweevoudige en drievoudige lansen afgebeeld. Met de enkelvoudige lans wordt, met een druk van 20 à 80 MPa, in niet-samenhangende grond gewerkt. De verkregen kolomdiameter ligt tussen de 0.4 en 1.0 m. De tweevoudige lans, met een groutstraaldruk van 20 à 40 MPa, heeft door het gebruik van een luchtstraal een groter bereik. Een bijkomend voordeel is de grotere grondafvoer vanwege de opwaartse luchtstroom (airliftwerking). Bij toepassing in niet sterk samenhangende grond is de kolomdiameter 0.8 à 1.4 m. Voor het versnijden van de grond is, bij een drievoudige lans, een waterstraal aanwezig. Via een aparte opening wordt grout als vulmiddel geïnjecteerd met een druk van 2 tot 7 MPa. Met deze lans kan een groutkolomdiameter van 0.8 à 2.0 m worden vervaardigd.

Verschillen tussen de drie systemen komen verder naar voren bij o.a. de boorgatstabiliteit, mengselsamenstelling, bereikte druksterkte en achterblijvende onregelmatigheden (lucht, water of grondresten).

Een jetgroutkolom kan op enige diepte beneden maaiveld worden beëindigd. De methode is volledig trillingsvrij. Bij een kleine h.o.h.-afstand dient een wachttijd (circa 1 dag) te worden aangehouden bij de vervaardiging van aangrenzende kolommen.

5.3.3. Kosten jetgrouten

De kosten per m³ grond liggen in dezelfde orde van grootte als die van chemisch injecteren. Indicatie is als volgt: vaste kosten bedragen f 50.000.- en per meter kolom f 500.- [6], [10] en [11]

5.4. Injectie van grout en chemische oplossingen

5.4.1. Inleiding

Het onder druk injecteren van bijvoorbeeld grout zorgt voor een herstructurering van de ondergrond door het veroorzaken van scheuren of het verdringen van grond. Bij het

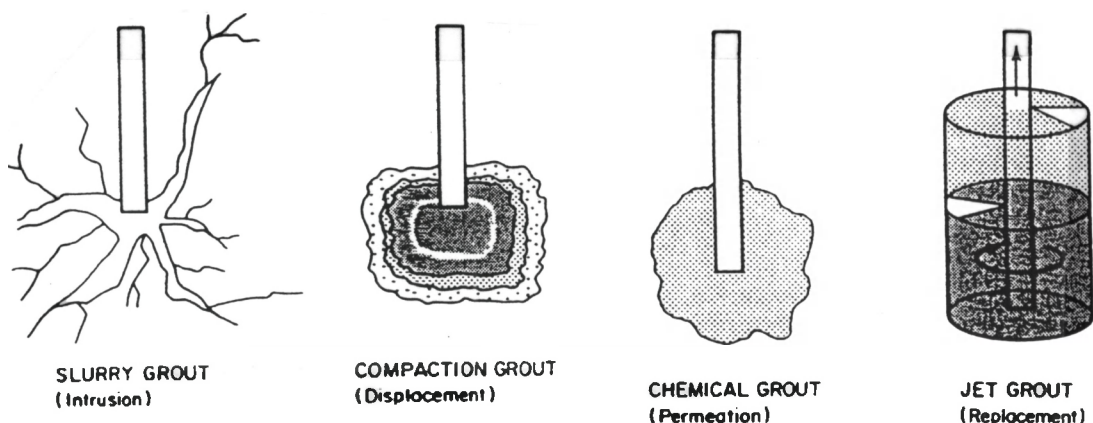
injecteren van chemische oplossingen blijft de oorspronkelijke korrelstructuur ongewijzigd en worden alleen de poriën gevuld met een verhardende injectievloeistof. [11]

Toepassingen zijn bekend van bijvoorbeeld het opvullen van holtes, verdringen van grond, opvullen van poriën en verwijderen van grond door een grout mengsel. De laatste toepassing, het jetgrouten, staat elders in dit hoofdstuk beschreven omdat het als enige ook uitgaat van het verwijderen van grond.

De reden om te injecteren kan daarnaast een verschillende achtergrond hebben. De voornaamste redenen om te injecteren zijn het compenseren van zakkingen, het remmen van de waterstroming door een massief en het stabiliseren van gronden. Het compenseren van zakkingen is voor het maken van dwarsverbindingen slechts gedeeltelijk interessant; een mogelijke toepassing zou het compenseren van een zakking na een vries-dooi cyclus (verweking van grond) kunnen zijn.

5.4.2. Techniek van het injecteren

Voor het maken van een injectielichaam moeten eerst injectie-elementen geplaatst worden.



Figuur 5.4 Overzicht injectiemethoden

Hiervoor bestaan 3 uitvoeringsmethoden, te weten, injectielansen, speciale injectie-elementen en manchetsbuizen. Bij de laatste twee is het mogelijk om het maken van de gaten onafhankelijk van de injectiewerkzaamheden te laten plaatsvinden.

Een ondergrond is nooit volledig homogeen en maakt daardoor het injectieproces moeilijk beheersbaar. Doordat de vloeistof altijd de weg van de minste weerstand zoekt kan het voorkomen dat alleen de doorlatende lagen geïnjecteerd zijn en de slecht doorlatende lagen minder of niet. Zekerheid over het volledig gesloten zijn van een grondmassief is dus nagenoeg niet te geven. [11]

5.4.3. Kosten injectie methoden

Een indicatie voor de injectie van verschillende stoffen zijn als volgt: waterglas, micro cement en cementgrout liggen tussen de f 400.- en f 750.- per m^3 en het gebruik van polymeren en harsen ligt tussen f 1000.- en f 1400.- per m^3 . [6], [11] en [27]

Uit verschillende recente bronnen valt voor waterremmende injecties een gemiddelde van f 950.- per m^3 af te leiden en voor stabiliserende werken f 1500.- per m^3 .

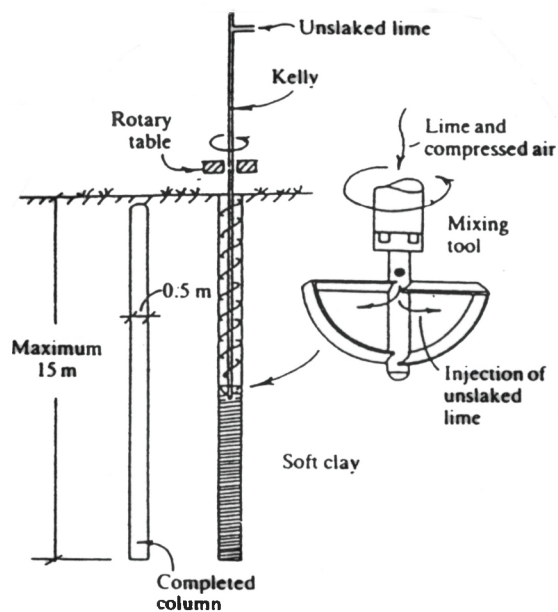
5.5. Kalk/cement kolommen

5.5.1. Inleiding

Kalk/cement kolommen zijn relatief sterke en stijve elementen in slappe cohesieve grond die zijn geformeerd door kalk en/of cement met de ondergrond te mengen. Doorgaans worden deze kolommen niet geconstrueerd in niet-cohesieve gronden.

5.5.2. Techniek van het maken van kalk/cement kolommen

De methode is midden 70-er jaren ongeveer gelijktijdig in Zweden en Japan ontwikkeld. Bij de Zweedse methode worden de kolommen geïnstalleerd door een buis, voorzien van een mengblad, in de grond te boren. De cohesieve grond wordt hierbij losgewoeld. Nadat de buis op diepte is, wordt van onderuit met behulp van luchtdruk ongebluste kalk ingebracht. Tegelijkertijd wordt de buis langzaam opgetrokken (<25 mm/omwenteling), waarbij de roterende beweging van de avegaar zorgt voor een goede menging van de kalk met de grond. De hoeveelheid kalk die in de kolom wordt geperst is afhankelijk van de grondsoort en het watergehalte [11].



Figuur 5.5 Aanbrengen kalkkolom, Zweedse methode

De materialen die men bij de verschillende methoden gebruikt zijn vaak opgebouwd uit mengsels van CaO (fijngemalen ongebluste kalk), gebluste kalk, cement, gips, vliegashoudend beton en bentoniet in verschillende verhoudingen. De samenstelling van de mengsels wordt vaak specifiek aan de grond, die men ter plekke aantreft, aangepast.

De werking van de kalk/cement kolommen berust op de binding van vrij water, waarbij vaak een aanzienlijke volumevergroting optreedt, samenklontering en reacties tussen klei en kalk. Voorwaarde voor het kunnen toepassen van kalk/cement kolommen is de aanwezigheid van water en een kleigehalte van ten minste 20%.

De kolomdiameters, die men met deze methoden verkrijgt, variëren van 0.5 tot 1.8 meter. Bij het gebruik van ongebluste kalk is de waterdoorlatendheid toegenomen, terwijl bij het gebruik van cement de waterdoorlatendheid juist afneemt. Door het naast elkaar plaatsen van kolommen kan ondergronds een wand worden opgebouwd, waarvan de waterdichtheid sterk afhangt van de homogeniteit van de grond en de toegepaste nauwkeurigheid.

5.5.3. Kosten kalk/cement kolommen

Doordat er in Nederland geen ervaring met deze methode is, zijn de kosten moeilijk in te schatten. Gebaseerd op buitenlandse ervaringen kan verwacht worden dat de methode net iets goedkoper is dan jetgrouten [11].

5.6. Overzicht grondverbeteringstechnieken

grondverbeteringstechniek		kosten		voordelen	nadelen	risico's	ervaring
principe	techniek	vast	variabel				
vriezen	zoutoplossing	>stikstof	<stikstof	- kosten (lange duur) - mogelijkheid doorvriezen wanneer niet-waterdicht	- kosten	- (ontbreken van) waterdichtheid bij grondwaterstroming	- Størebælt - kleine, ondiepe projecten
	stikstof	< zout	> zout	- snel			
grond-injectie	slurry grout	?	fl.500,- tot fl.1400,- / m ³ [6]	- mogelijkheid compenseren zakkingen	- moeilijk beheersbaar	- zie 'nadelen'	-
	compaction grout						
	chemische grout						
	jetgrouten						
kalk-cement kolommen		?	zie grond-injectie	- onbekend	- onbekend	- onbekend	- Zweden / Japan

tabel 5.1 Overzicht grondverbeteringstechnieken

6. Conclusies

Voorgaande literatuurstudie laat zien dat er aan ondergrondse methoden om in Nederlandse omstandigheden dwarsverbindingen aan te leggen behoorlijke risico's kleven. Met name grondwaterstroming en het niet-homogeen zijn van de grond zorgen ervoor dat je nooit volledige zekerheid hebt over waterdichtheid van het grondmassief. Bij aanleg vanuit een bouwkuip is er evenwel sneller en effectiever in te grijpen bij eventuele lekkages. Dit is een beproefde techniek en daarom minder risicovol dan ondergrondse methoden.

Geconcludeerd kan worden dat door de conventionele bouwmethode voor de aanleg van de dwarsverbindingen er geen gegronde redenen zijn om uitgebreid onderzoek te doen in K300-verband. De bij de gekozen uitvoeringsmethode toe te passen grondverbeteringstechnieken (vriezen + additioneel grouten) zijn wel voldoende reden voor de monitoring die plaats zal vinden.

7. Literatuurlijst

1. Kivi, 'Boren van tunnels voor rail- en wegverbindingen', KIVI-eindrapportage, Afdeling voor Tunneltechniek en Ondergrondse Werken, 1993
2. Naslagwerk, 'Ontwerpen van spoorlijnen', NS Railinfrabeheer, baan en kunstwerken, 1994
3. 'Boren in Japan doorgrond', verslag studiereis, 1997
4. Burger, H., e.a., 'Bouwplaatsbezoek 4^e Elbetunnel', HSL-Zuid-Projectbureau Boortunnel, Utrecht 1998
5. Herrenknecht News, Schwanau, nr. 5 1998
6. Slijkhuys, E., 'Inventarisatie dwarsverbindingen in geboorde tunnels', Utrecht 1998
7. Slijkhuys, E., 'Validatie ringmethode, dwarsverbindingen in geboorde tunnels', Utrecht 1998
8. Murray, M., S.D.Eskesen, 'Design and construction of cross passages at the Størebælt Eastern Railway Tunnel', Tunnelling '97, Institution of Mining and Metallurgy / British Tunnelling Society, proceedings, p.463-479, London, september 1997
9. Naaktgeboren, N.M., 'Dwarsverbindingen met behulp van de vriestechniek', literatuurstudie, Utrecht 1998
10. Tigchelaar, J., 'Literatuurstudie jetgrouten', Praktijkervaringen in binnen- en buitenland, Gouda 1997
11. 'Geotechnisch advies grondverbeteringstechnieken Botlekspoortunnel', NS Railinfrabeheer, 1995
12. 'Het effect van een vries-dooi cyclus op het mechanische gedrag van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel', TNO, 1998
13. Hoonaard, J. v/d, 'De Westerscheldetunnel, Deel 1: Historie en hoofdlijnen ontwerp', Civiele Techniek nr. 4, 1996
14. Heyman, J., H.L.Gunnar, 'Onderzoek naar de optimalisering van de afstand tussen de dwarsverbindingen in de Westerscheldetunnel', Ministerie van Binnenlandse Zaken, EB96/1343, 1997
15. Brux, G., 'Safety systems for the Channel Tunnel', 1994
16. Morrison B., 'Eurotunnel's fateful night', Modern railways, 1997
17. Wilson, D., 'Breakthrough, Tunnelling the Channel', 1988
18. 'Inquiry into the fire on heavy goods vehicle shuttle 7539 on 18 november 1996', Channel Tunnel Safety Authority, 1997
19. Harris, C., 'Engineering geology of the Channel Tunnel', Londen 1996
20. Horvat, E., 'Ondergronds bouwen', dictaat E18 deel 1, Delft 1997
21. Arends, G., 'Ondergronds bouwen', dictaat E18 deel 2, Delft 1997
22. Weele, A. van, 'Moderne funderingsmethoden', Waltman, Delft, 1983
23. 'Boortunnel - Diepwandkuip tbv de dwarsverbinding', BTC Botlek, 1999

Colofon

Opdrachtgever CUR / COB
Deelcommissie K340: Montagespanningen en Dwarsverbindingen

Uitgave Holland Railconsult
Afdeling Ruimtelijke Inpassing en Kunstwerken

Daalseplein 101
Postbus 2855
3500 GW Utrecht
Telefoon 030 - 285 84 15
Telefax 030 - 285 84 60

Auteur ir. E.J. van der Horst

Projectnummer 8019001

versie:	4.0	Status	vrijgegeven
	Naam:	Paraaf:	Datum:
Opsteller	ir. E.J. van der Horst		17 november 1999
Projectleider	ir. E.J. van der Horst		17 november 1999