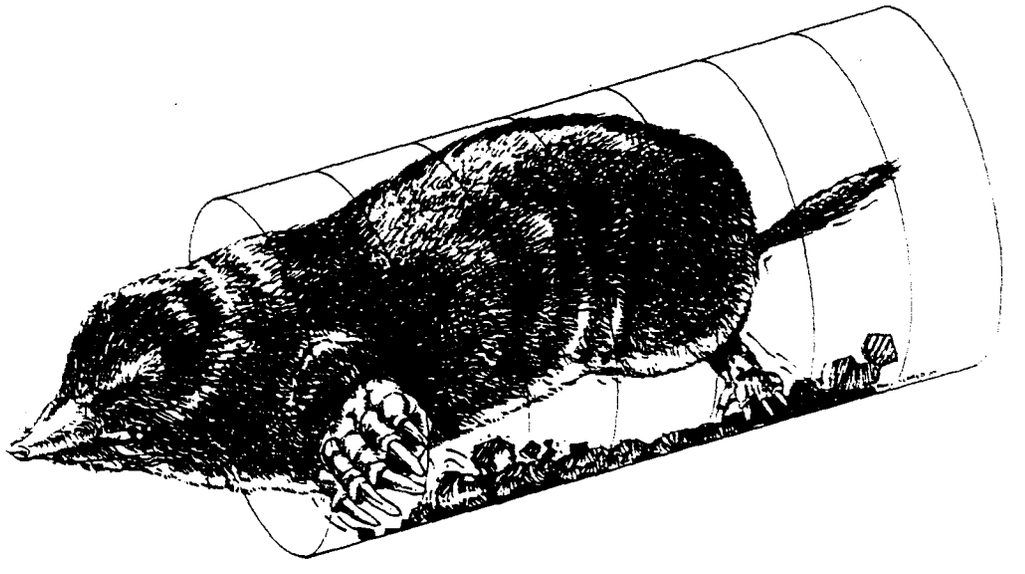
RDC-96-003

Keuze tunnelboormachine
Tweede Heinenoordtunnel

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Bouwdienst Rijkswaterstaat
Droge Infrastructuur
Afdeling Tunnelbouw

Keuze Tunnel-Boor-Machine (TBM) 2e-Heinenoordtunnel



Bouwdienst Rijkswaterstaat Afdeling Tunnelbouw

datum : 3 februari 1995
documentnr. : LVTH-D-94005
opsteller : ir Arjan van der Put
bron : Tunnel Combinatie Heinenoord bestaande uit:
Ballast Nedam Beton en Waterbouw bv, Hollandsche Beton en Waterbouw bv, Van Hattum en Blankevoort bv, Wayss & Freytag ag.
status : definitief

Voorwoord

Hierbij wil ik iedereen bedanken die heeft meegeholpen aan de totstandkoming van dit document.
In het bijzonder wil ik alle leden van de tunnelboormachine-werkgroep bedanken voor de prettige samenwerking en goede sfeer in de afgelopen periode.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Keuze TBM-type 2e-Heinenoordtunnel	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Beschrijving grondopbouw	3
2.3	Overzicht mogelijke TBM-typen	5
2.4	Toepassingscriteria van de verschillende TBM-typen	12
2.5	Keuze TBM-type	17
2.5.1	Algemeen	17
2.5.2	Criteria	17
2.5.3	Grove selectie TBM-type	18
2.5.4	Definitieve keuze TBM-type	21
2.5.4.1	Algemeen	21
2.5.4.2	EPB-schild	21
2.5.4.3	Slurry-schild op Duitse wijze (Hydro-schild)	25
2.5.4.4	Conclusie	27
3	Bepaling programma van eisen TBM	28
3.1	Algemeen	28
3.2	Beschrijving TBM-ontwerp	28
3.2.1	Uitgangspunten TBM-ontwerp	28
3.2.2	Technische beschrijving TBM-ontwerp	31
3.2.2.1	Algemeen	31
3.2.2.2	Schild	31
3.2.2.3	Ontgravingsmechaniek	32
3.2.2.4	Aandrijvingshydrauliek	32
3.2.2.5	Erector	33
3.2.2.6	Stuurcabine	33
3.2.2.7	Grondafvoer	34

3.2.2.8 Staartdichting 37
3.2.2.9 Trailers 37
3.2.3 Maatregelen tbv veiligheid en risico-preventie 38
3.2.4 Ondersteunende TBM-voorzieningen 38
3.3 Beschrijving scheidingsinstallatie 41
3.3.1 Algemeen 41
3.3.2 Eisen en keuze van het scheidingsmaterieel 41
3.3.3 Technische beschrijving van de scheidingsinstallatie 41
3.3.4 Uitgangspunten ontwerp van de scheidingsinstallatie 42
4 Selectieprocedure TBM-leveranciers 2e-Heinenoordtunnel 43
4.1 Aanbiedingen TBM-leveranciers 43
4.2 Technische beoordeling TBM-aanbiedingen 43
4.3 Financiële beoordeling TBM-aanbiedingen 44
4.4 Definitieve keuze TBM 45

Bijlagen

Bijlage 1 Overzicht materieelverschillen tussen EPB- en Hydo-schild 46
Bijlage 2 Standaard metingen tbv het boorproces 47

1 Inleiding

Ten behoeve van de oplossing van de congestieproblematiek ter plaatse van de Heinenoordtunnel wordt de bestaande Heinenoordtunnel gerenoveerd. Deze renovatie bestaat uit:
- het uitbreiden van de snelverkeerstroken van twee naar drie rijstroken door de bestaande langzaamverkeerstroken aan te passen;
- de aanleg van een langzaamverkeerstunnel voor landbouw- , fiets- en voetgangersverkeer.

Met de renovatie van de westelijke tunnelbuis werd in 1994 begonnen. Het langzaamverkeer kan thans alleen gebruik maken van de westelijke tunnelbuis waar in verband met het huidige tweerichtingsverkeer een verkeersreguleringssysteem noodzakelijk is.

Het ontwerp van de 2e-Heinenoordtunnel voor het langzaam verkeer behelst een geboorde tunnel inclusief toeritten, onder de Oude Maas bij Heinenoord in de gemeenten Barendrecht en Binnenmaas. Het ontwerp wordt gemaakt in projectteamverband door de Bouwdienst Rijkswaterstaat en de Tunnel Combinatie Heinenoord (verder TCH genoemd in deze rapportage).
In 1990 is in opdracht van de Bouwdienst Rijkswaterstaat reeds een studie uitgevoerd door Ballast Nedam Beton en Waterbouw en Wayss & Freytag voor uitvoering van de 2e-Heinenoordtunnel als boortunnel. Het project kwam echter niet in uitvoering vanwege financiële redenen. In 1993 heeft de overheid dit project aangewezen als praktijkproject in het kader van de uitbreiding van de ondergrondse infrastructuurkennis en zijn er financiële middelen vrijgemaakt.

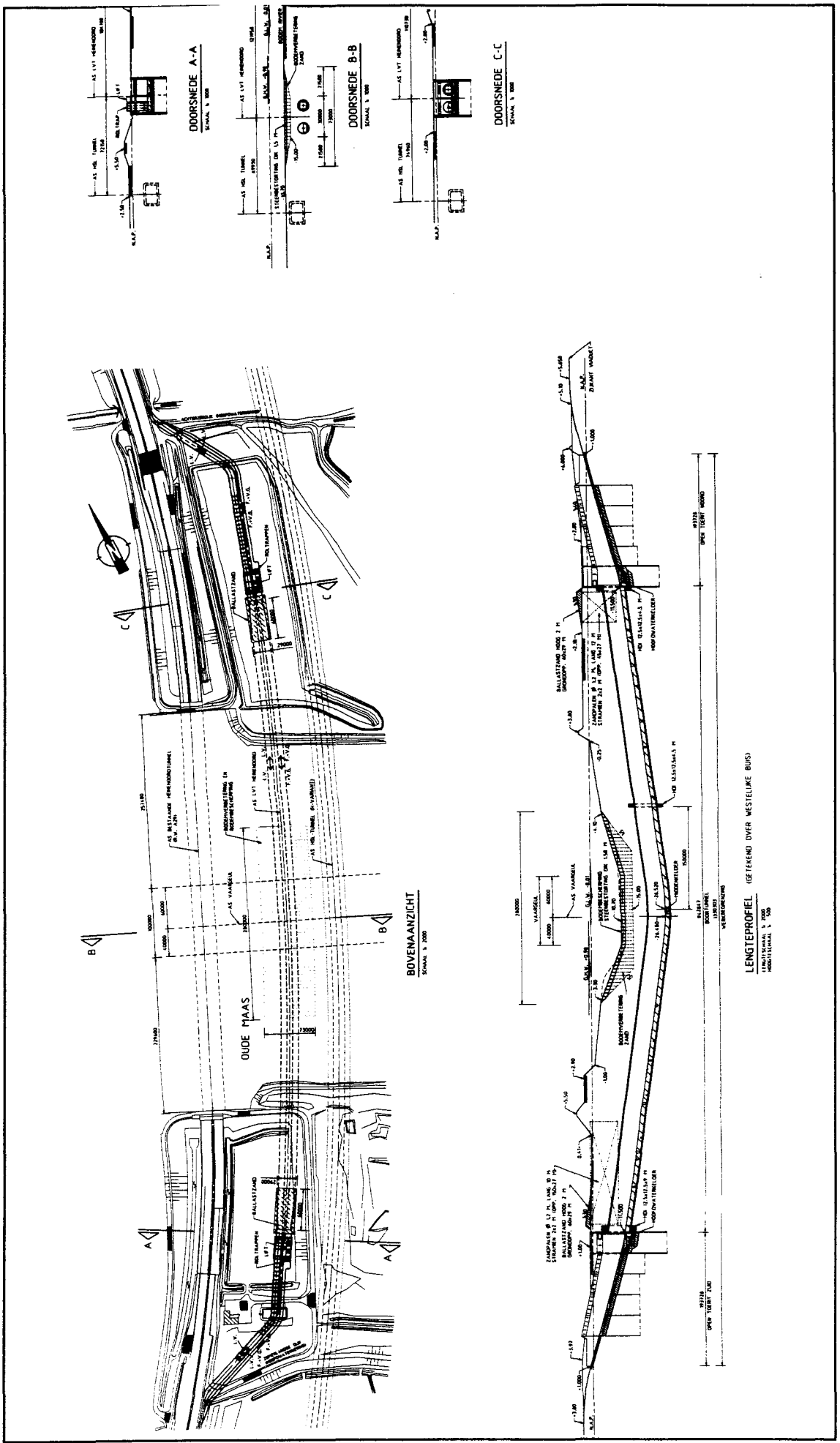
Het doel van deze rapportage is het vastleggen van de verworven kennis die is opgedaan bij de keuze van de tunnelboormachine (in het vervolg van deze rapportage kortweg TBM genoemd) van de 2e-Heinenoordtunnel.

Het voorliggende rapport "Keuze TunnelBoorMachine 2e-Heinenoordtunnel" beschrijft de aspecten mbt de keuze van de TBM van het boortunnelproject 2e-Heinenoordtunnel en geeft een samenvatting van het TBM-proces van juni t/m december 1994. In deze periode is een keuze van het TBM-type gemaakt, het programma van eisen voor de TBM opgesteld, de TBM-aanvraag verzonden en heeft een TBM-leverancier selectieprocedure plaatsgevonden.

Voor de keuze van de tunnelboormachine is een TBM-werkgroep samengesteld. Deze werkgroep bestaat naast TCH-leden ook uit Bouwdienstmedewerkers vanwege het projectteam- en praktijkkarakter van het project. De Bouwdienst heeft met betrekking tot de keuze van de TBM slechts een observerende rol vervuld.
De TBM-werkgroep bestaat uit de volgende leden:

Claus Becker	(TCH, Wayss & Freytag)
Kees Fransen	(TCH, Hollandsche Beton- en Waterbouw)
Bruno Gärtner	(TCH, Wayss & Freytag)
Erdogan Gürkan	(TCH, Wayss & Freytag)
Wim van de Linde	(Bouwdienst Rijkswaterstaat)
Bas Obladen	(TCH, Ballast Nedam Beton en Waterbouw)
Arjan van der Put	(Bouwdienst Rijkswaterstaat)
Marinus Quaak	(TCH, van Hattum en Blankevoort)
Ed de Ruig	(TCH, van Hattum en Blankevoort)
Gert van Ruit	(Bouwdienst Rijkswaterstaat)
Harry van Splunder	(TCH, van Hattum en Blankevoort)
Joost Vlasblom	(Bouwdienst Rijkswaterstaat)
Sytse van Vliet	(TCH, Ballast Nedam Beton en Waterbouw)

In deze rapportage zijn grote delen mbt de keuze TBM-type (hoofdstuk 3) en bepaling programma van eisen TBM (hoofdstuk 4) overgenomen en vertaald uit stukken van TCH. Eveneens zijn delen uit het rapport "Technische & Financiële Evaluatie Offertes Tunnelboormachines" van de TBM-werkgroep in deze rapportage verwerkt.



Figuur 2.1 Alignementstekening 2e-Heinenoordtunnel

2 Keuze TBM-type 2e-Heinenoordtunnel

2.1 Inleiding

Het boortracé en het grondonderzoek vormen de basis voor de keuze van het TBM-type en de eisen die aan de TBM moet worden gesteld.
Om de keuze van het TBM-type te kunnen onderbouwen moet er een indruk zijn van het algemene ontwerp van de boortunnel waarvoor de TBM-type keuze moet worden gemaakt. De algemene gegevens van de boortunnel die men moet weten zijn: de grondopbouw, het alignement van de boortunnel (dekking, boogstralen, lengte), de waterdruk en de afstand tussen een eventuele tweede boortunnelbuis. De alignementstekeningen van het boordeel van de 2e-Heinenoordtunnel zijn in figuur 2.1 weergegeven.

2.2 Beschrijving grondopbouw

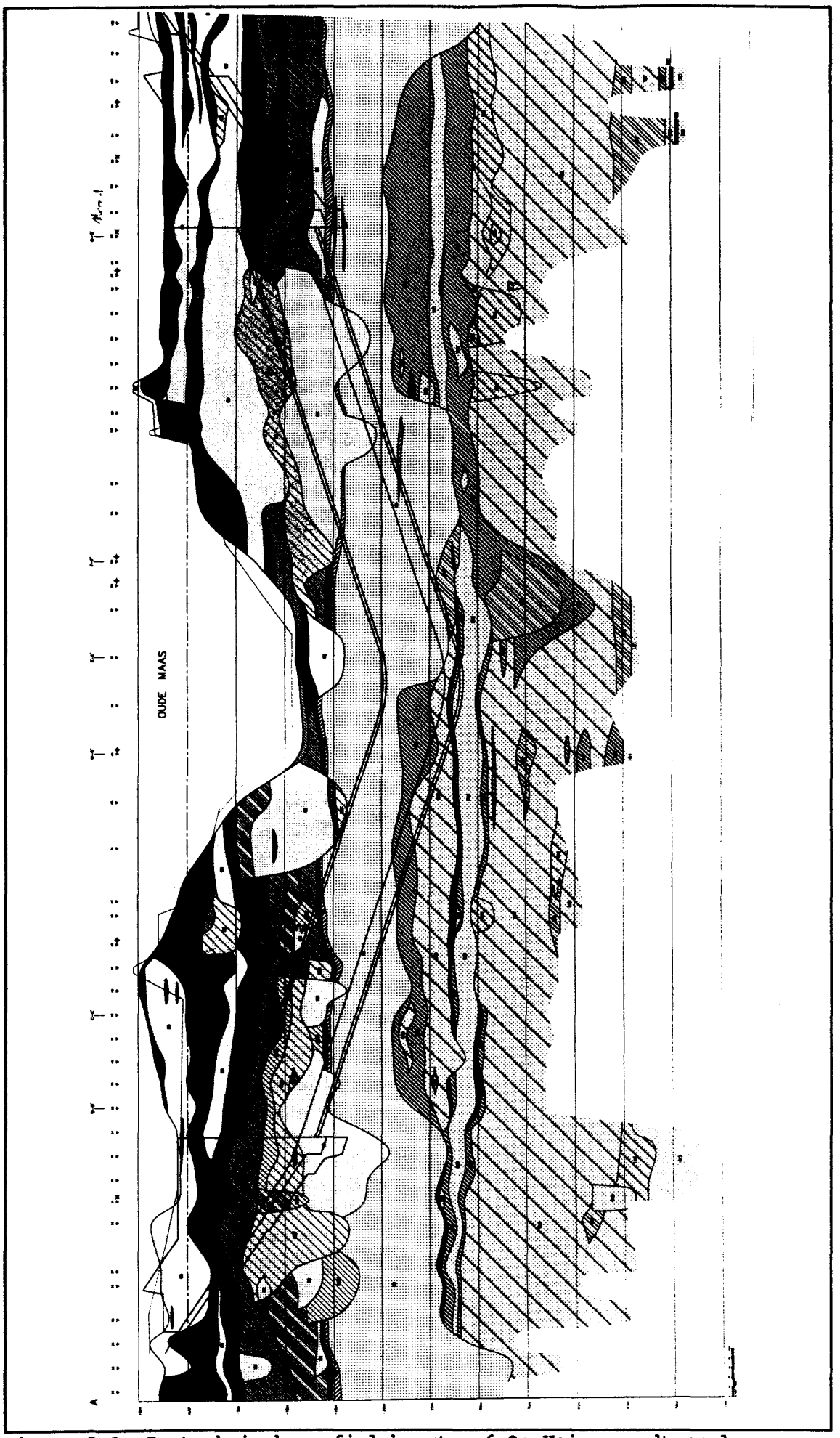
De bodemopbouw is voor iedere bouwlokatie verschillend. De grondopbouw ter plaatse van de 2e-Heinenoordtunnel kan typisch Nederlands worden genoemd. In figuur 2.2 is een geotechnisch profiel hiervan weergegeven.

Van zuid naar noord worden globaal de volgende grondsoorten aangetroffen in de boordoorsnede van het geotechnisch profiel:
Zuidoever:
- klei/zwak humeus/met dunne zandlaagjes, klei/zandig/tot zand/kleiig, zand plaatselijk met dunne klei- en veenlaagjes;
- klei, laagje veen, zand/middel grof tot matig;
- zand/middel grof tot matig.

Oude Maas:
- hoofdzakelijk zand/middel grof tot matig en deels klei/plaatselijk zandig en of met dunne zandlaagjes;
- hoofdzakelijk zand/middel grof tot matig en deels klei/plaatselijk zandig en of met dunne zandlaagjes, zand/plaatselijk met dunne kleilaagjes;
- hoofdzakelijk zand/middel grof tot matig onderbroken door een zandlaag/middel tot grof/vaak grindig.

Noordoever:
- hoofdzakelijk zand/middel grof tot matig onderbroken door een kleilaag/siltig/zandig;
- hoofdzakelijk zand/plaatselijk dunne kleilaagjes onderbroken door een kleilaag/siltig/zandig;
- veen, klei/humeus tot sterk humeus vak met veenstukjes, klei/zwak humeus/met dunne zandlaagjes.

Het grondonderzoek vertoont wisselende zand- en kleilagen langs het boortracé. Stenen van noemenswaardige grootte zijn niet te verwachten.
In de doorlatende zandlagen wordt een grondwaterdruk tot de volle hoogte van de waterstandhoogte in de Oude Maas verwacht.



Figuur 2.2 Geotechnisch profiel boortracé 2e-Heinenoordtunnel

2.3 Overzicht mogelijke TBM-typen

In deze paragraaf worden de TBM-typen, die in zand en kleibodem toepasbaar zijn, opgesomd en geanalyseerd.
TBM-typen die niet inzetbaar zijn in de grondopbouw van de 2e-Heinenoordtunnel worden hier niet genoemd. Evenzo wordt de oplossing "graaffrontondersteuning door luchtdruk voor het gehele boortracé" als niet meer overeenkomend met de stand van de techniek gezien. Door het uitwisselen van onderdelen kan er veel variëteit van de beschreven TBM-typen ontstaan.

De TBM's kunnen worden onderverdeeld in de volgende typen:

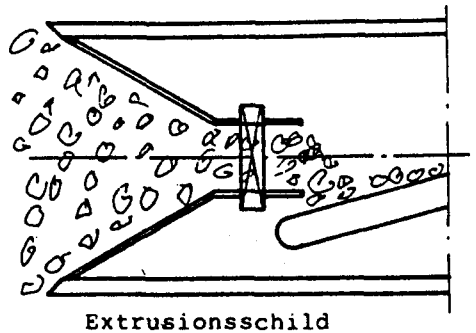
1 Mechanische ondersteuning van het graaffront:
- extrusie-schild
- bühnen-schild
- verbauplatten-schild
- schurfscheiben-schild

2 Ondersteuning van het graaffront door vloeistof:
- ontgraving met teilschnittmachine
- ontgraving met vollschnitt ("Japanse bouwmethode")
- ontgraving met vollschnitt ("Duitse bouwmethode")

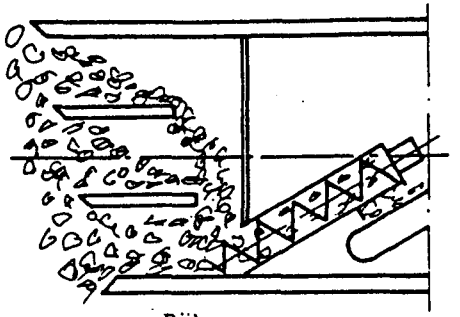
3 Ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid:
- High Density Slurry Shields
- Slime Shield/ Mud injection Shield
- Earth Pressure Balance Shield (standaard-uitvoering)
- Earth Pressure Balance Shield (meng-kamer-uitvoering)
- Earth Pressure Balance Shield (muckring-uitvoering)

4 Standaard TBM (Mixschild)

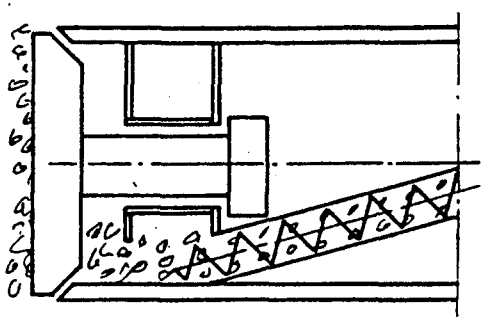
De verschillende TBM-typen zijn in de figuren 2.3 t/m 2.5 weergegeven. In de tabellen 2.1 t/m 2.6 worden de kenmerken van de TBM-typen beschreven.



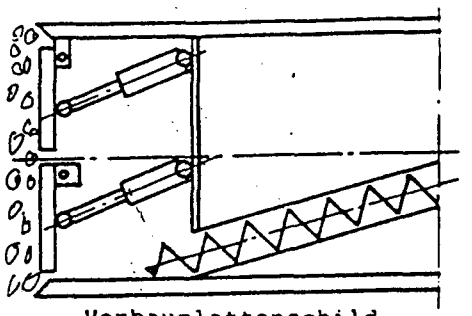
Extrusionsschild



Bühnenschild



Schürfscheibenschild

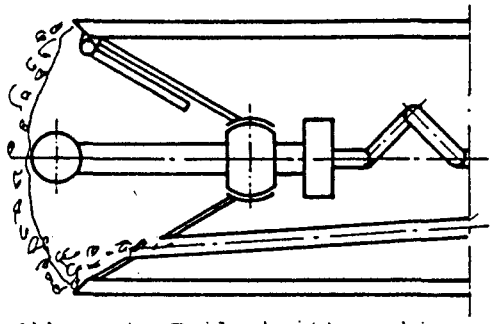


Verbauplattenschild

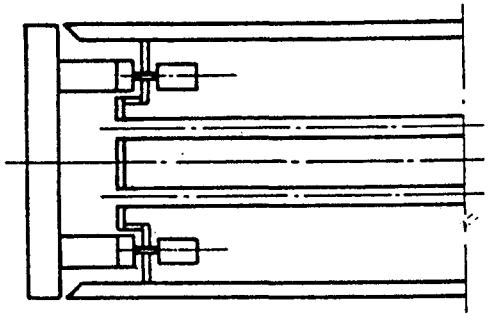
Figuur 2.3 TBM-typen met mechanische graaffrontondersteuning

Tabel 2.1 TBM-typen met mechanische ondersteuning van het graaffront

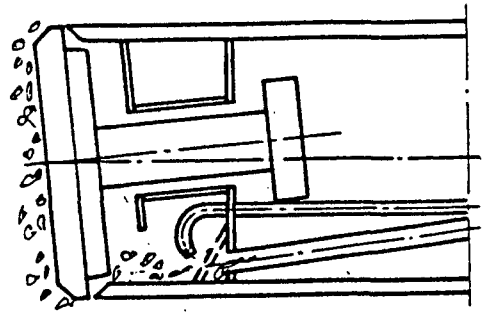
1 Mechanische ondersteuning van het graaffront				
Kenmerken	Extrusie-schild	Bühnen-schild	Verbauplatten-schild	Schurfscheiben-schild
graaffrontondersteuning	Vlakke ondersteuning door grondoverdruk in de ontgravingskamer. De opbouw van de steundruk geschiedt bij de voortgang door insnoering van de doorsnede (extrusie).	Onder hoek van natuurlijk talud op eventueel beweegbare tussenplateaus.	Op deelvlakken van het graaffront door beweegbare steunplaten die door drukcilinders worden aangedrukt.	Gedeeltelijk door de gesloten voorzijde van het ontgravingswiel, dat verend wordt aangedrukt.
waterdichtheid	Door het vormen van een grondprop.	Door middel van luchtdruk.	Door middel van luchtdruk.	Door middel van luchtdruk.
Ontgravingsmethode	Niet aanwezig.	Ontgravingsmaterieel op de plateaus (schop, kleine graafmachine etc.).	Bagger- en ontgravingsmaterieel op de vrije doorsnedevlakken.	Snijrad met snijwerktuigen langs de doorgangsopeningen in het snijrad.
afvoer van grond	Als een pasta door een verstelbare diafragma-opening naar een transportband	Door afvoer in den droge en luchtsluis (cellensluis, avegaar).	Door afvoer in den droge en luchtsluis.	Door afvoer in den droge en luchtsluis.
toegang tot de graafkamer	Door eventueel een verbrede extrusie-opening en onder luchtdruk.	Door een luchtsluis.	Door een luchtsluis.	Door een luchtsluis.
opmerkingen	Geen.	Regulering ontgraving binnen of buiten de drukkamer.	Regulering ontgraving binnen of buiten de drukkamer.	



Abbau mit Teilschnittmaschine



Abbau im Vollschnitt
"japanische Bauart"



Abbau im Vollschnitt

Figuur 2.4 TBM-typen met vloeistofondersteuning van het graaffront

Tabel 2.2 TBM-typen met ondersteuning van het graaffront door vloeistof

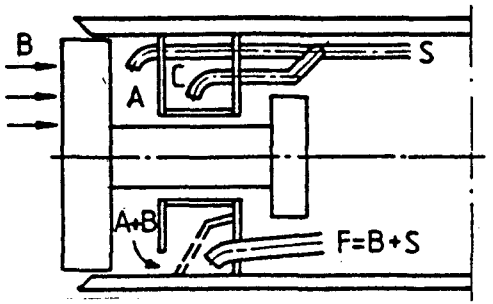
2 Ondersteuning van het graaffront door vloeistof			
Kenmerken	Ontgraving met teilschnitt	Ontgraving met vollschnitt ("Japanse bouwmethode")	Ontgraving met vollschnitt ("Duitse bouwmethode")
graaffrontondersteuning	Een drukgeregelde vloeistofvulling in de graafkamer.	Een drukgeregelde vloeistofvulling in de graafkamer.	Door een luchtkussen achter de duikwand en een drukgeregelde vloeistofvulling in de graafkamer.
waterdichtheid	Door steunvloeistof.	Door steunvloeistof.	Door steunvloeistof.
afgraafmethode	Een baggercutter.	Een zeer dicht snijrad met spleetopeningen.	Een open spaakwiel eventueel door platen afsluitbaar.
afvoer van grond	door een beweegbare cutterkop losgesneden en vervolgens hydraulisch afgevoerd.	Hydraulisch, het inbouwen van een steenbreker is mogelijk.	Hydraulisch, het inbouwen van een steenbreker is mogelijk.
toegang tot de graafkamer	Door een luchtsluis bij verlaagd steunvloeistofniveau en luchtdruk in de graafkamer. Beschermplaten aan bovenzijde.	Door een luchtsluis bij verlaagd steunvloeistofniveau en luchtdruk in de graafkamer.	Door een luchtsluis in kruin van de TBM met achter de duikwand een beschermde ingang en een verlaagd steunvloeistofniveau plus luchtdruk in de graafkamer.
opmerkingen	Geen.	Geen.	Het snijrad kan verschuifbaar worden uitgevoerd tov as van de TBM en onder een hoek worden geplaatst tov de as van de TBM.

Masseströme: A, B, C, F, S

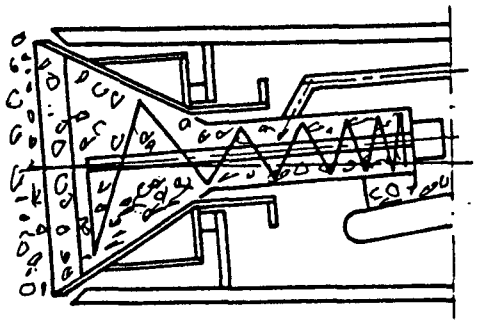
Grenzwerte:

A = S) Slurry-Shield
C = 0)

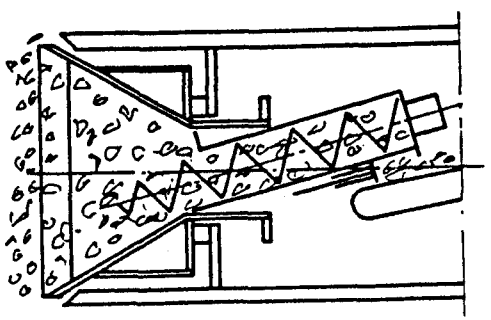
A = 0) Erddruckschild
C = S)



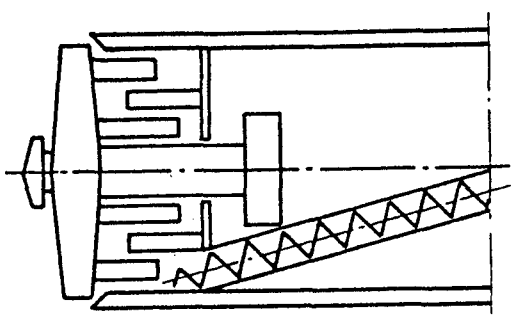
High Density Slurry Shields



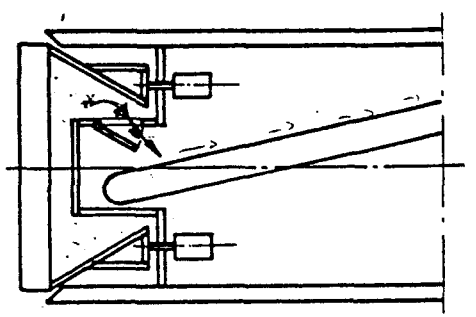
Slime Shield/ Mud injection Shield



Erddruckschilde
- Standardbauart -



Erddruckschild
- Mischkammerbauart -



Erddruckschild
- Bauart mit Muckring -

Figuur 2.5 TBM-typen met graaffrontondersteuning door media met hoge dichtheid

Tabel 2.3 TBM-typen met ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid

3 Ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid					
Kenmerken	High Density Slurry Shield	Slime Shield/ Mud injection Shield	Earth Pressure Balance Shield (standaard-uitvoering)	Earth Pressure Balance Shield (mengkamer-uitvoering)	Earth Pressure Balance Shield (muckring-uitvoering)
graaffrontondersteuning	Een drukgeregelde vloeistofondersteuning met een grote dichtheid (tot die van de grondbrei) in de graafkamer.	Een drukgeregelde, geconditioneerde vulling van de graafkamer.	Een drukgeregelde grondvulling van de graafkamer.	Een drukgeregelde grondvulling van de graafkamer.	Een drukgeregelde grondvulling van de graafkamer.
waterdichtheid	Door een drukgeregelde vulling van de graafkamer.	Door een drukgeregelde, geconditioneerde vulling van de graafkamer.	Door een grondvulling van de graafkamer.	Door een grondvulling van de graafkamer.	Door een drukgeregelde grondvulling van de graafkamer.
afgraafmethode	Een open of gesloten snijrad.	Een redelijk dicht snijrad met openingen.	Een zeer dicht snijrad met openingen.	Een open snijrad met injectieleidingen en mengstaven aan de achterzijde van het snijrad.	Een open snijrad met afsluitplaten (zgn. flood-doors).
afvoer van grond	Hydraulisch met een maximale dichtheid van ca. 1,5 ton/m3.	Via compressie met een avegaar en een transportband.	Via, eventueel 2 achterelkaar opgestelde avegaren, en een transportband.	Via, eventueel 2 achterelkaar opgestelde avegaren en een transportband.	Door een voorgespannen afsluitklep in de muck-ring en een transportband.
toegang tot de graafkamer	Door een luchtsluis in de luchtdrukruimte.	Door een sluis langs de rand en luiken in de "snijradtrommel"	Door een sluis langs de rand en luiken in de "snijradtrommel"	Door een luchtsluis naar de (deels) geleegde mengkamer onder luchtdruk.	Door een luchtsluis naar de (deels) geleegde mengkamer onder luchtdruk.
opmerkingen	Geen.	Geen.	Geen.	Injectie tbv bodemconditionering door de snijnaaf.	Bouwmethode van de Canadese TBM-leverancier "Lovat"

4 Standaard TBM (Mix-schild)

Het toepassen van de boormethode in een bodemgesteldheid met wisselende grondlagen komt vandaag de dag steeds vaker voor. Het toepassingsgebied wordt steeds groter en strekt zich uit van cohesieloze, grofkorrellige bodems en vaste kleilagen tot morenenformaties (met ingebedde harde stenen) en rots. De genoemde grondlagen kunnen in één boortracé achtereenvolgens voorkomen of gelijktijdig aan het graaffront optreden.

In de schildtechniek is er een trent van een pure "Unieke TBM" naar een veelzijdig toepasbare "Standaard TBM". Het ontwerp van de TBM wordt zodanig uitgevoerd dat de TBM kan worden aangepast aan de omstandigheden. Door het verwisselen van standaard onderdelen kan de Standaard TBM voldoen aan de ontwerpeisen van een bepaalde bouwlokatie. Aanpassingen van ontgravingswerktuigen, methode van graaffrontstabiliteit, grondafvoermaterieel etc. behoren tot de mogelijkheden. Hieronder zijn de hoofdonderdelen van de standaard TBM weergegeven die aan de eisen kunnen worden aangepast.

Ontgravingsmaterieel:

Stichel	=	tanden om zand af te snijden;
Cutterdiscs	=	ronde snijmessen die langs de buitenzijde van het snijrad meerollen en vooral in rots worden toegepast;
Schalmesser	=	snijmessen voor kleiige bodem;
Disken	=	snijtanden;
Copy-cutters	=	tanden die oversnijding van het profiel mogelijk maken en op de buitenkant van het snijrad kunnen worden geplaatst.

Snijrad/spaakwiel:
- open met steunplaten;
- met uitschuifbare oversnijdingstanden (copy-cutters);
- met verstelbare excentriciteit;
- met injectiekanalen.

Afvoermaterieel:
- steenbreker;
- beweegbare afzuigmond;
- afvoer mbv hydraulisch systeem;
- afvoer mbv avegaar en transportband.

Graaffrontstabiliteit:
- open graaffront;
- druklucht;
- EPB met injectiemogelijkheden van additieven (foams, bentoniet e.d.);
- vloeistofondersteuning.

2.4 Toepassingscriteria van de verschillende TBM-typen

In deze paragraaf worden de globale toepassingsgebieden beschreven van de in paragraaf 2.3 genoemde TBM-typen. De belangrijkste voor- en nadelen worden kort behandeld. De aangegeven meer- of minderkosten gelden vanzelfsprekend alleen voor schilden van gelijke diameter.

Als referentie voor de kosten zijn de kosten van ieder schild vergeleken met de kosten van een volledig gemechaniseerde TBM met open graaffront.

Tabel 2.4 Afweging TBM-typen met mechanische ondersteuning van het graaffront

1 Mechanische ondersteuning van het graaffront				
Criteria	Extrusie-schild	Bühnen-schild	Verbauplatten-schild	Schurfscheiben-schild
toepassingsgebied	homogene, zachte, vervormbare en quasi waterondoorlatende grond.	niet cohesieve en ook waterdoorlatende bodem met geringe cohesie. Dekking op tunnel moet luchtdruk toelaten bij werken onder de grondwaterspiegel.	cohesieve, gedeeltelijk standvaste veen- en kleibodem.	van niet cohesieve tot gedeeltelijk standvaste zand/grindbodem, ook watervoerend.
voordelen	- zeer eenvoudig zonder ontgravingsmechaniek; - korte levertijd; - directe optische controle van de samenstelling van de ontgraven grond; - bij juiste openingsverhouding nauwelijks vooruitlopende bodemverstoring.	- eenvoudig schild; - korte levertijd; - ontgravingswerktuigen vaak serie-materieel; - directe controle van de samenstelling van de ontgraven grond.	- eenvoudig schild; - binnen ruime grenzen aanpasbaar aan de bodemgesteldheid; - directe controle van het graaffront in het open deel van het graaffront.	- eenvoudig schild met mechanische verzekering tegen instorten van het graaffront door een zeer dicht snijrad; - groot toepassingsgebied.
nadelen	- stelt hoge eisen aan de homogeniteit van de grond; - vereist grote aandrijfkrachten tijdens boren.	- ongelijkmatige graaffrontondersteuning hoge aandrijfkrachten tijdens boren. - zettingsgevoelig bij onprofessioneel toepassing.	- langzaam tgv afgraven op deelvlakken van het graaffront; - veelvuldige onvolledige ondersteuning met als gevolg zettingen.	- hoge aandrijfmomenten en aandrijfkrachten met als gevolg verstoring van de natuurlijke bodemspanning voor het schild en eventuele zettingen.

kosten	- het dure snijrad met de hydraulische aandrijfmotoren en de grondafvoerinstallatie van het graaffront naar de TBM ontbreekt; - vaak ook luchtdruk.	- serie-materieel dus goedkoper dan andere ontgravingstechnieken; - TBM zonder hoge nauwkeurigheidseisen; - afvoer van grond uit werkkamer met luchtsluis; - werken onder luchtdruk;	- schild hetzelfde als Bühnen-schild; - ontgravingsmaterieel echter zwaarder uitgevoerd en niet serie-materieel; - bij werken onder de grondwaterspiegel is luchtdruk en afvoer dmv luchtsluis aan te bevelen.	- actieve steunplaten in het snijrad maken het ontgravingsmaterieel duur; - zware aandrijfaggregaten; - bij werken onder de grondwaterspiegel is luchtdruk en afvoer dmv luchtsluis aan te bevelen.

Tabel 2.5 Afweging TBM-typen met ondersteuning van het graaffront door vloeistof

2 Ondersteuning van het graaffront door vloeistof			
Criteria	Ontgraving met teilschnitt	Ontgraving met vollschnitt ("Japanse bouwmethode")	Ontgraving met vollschnitt ("Duitse bouwmethode")
toepassingsgebied	Door de keuze van de juiste ondersteuningssupensie in praktisch alle hydraulisch ondersteunbare zand- en kleibodems.	Door de keuze van de juiste ondersteuningssupensie in praktisch alle bodemsoorten.	Door de keuze van de juiste ondersteuningssupensie in praktisch alle bodemsoorten.

voordelen	- hydraulische ondersteuning van het graaffront met geringe verstoring van de natuurlijke bodemspanningen; - afsnijden van hindernissen mogelijk; - directe afvoer van de ontgraven grond door de cutterkop van de afvoerleiding; - inspectie van het graaffront mogelijk na verlaging van de bentonietspiegel.	- zeer breed toepassingsgebied; - geringe verstoring van de bodemstructuur aan het graaffront; - verzekering tegen instorten van graaffront door gesloten snijrad; - de geometrie van het graaffront blijft onveranderd.	- volledige scheiding van ondersteuning en ontgravingsfuncties door de open graafspaken; - zeer geringe structuurverstoring van de grond en daardoor geringe zetting; - gelijkmatige continue ondersteuning van het graaffront door luchtkussentoepassing; - beschermde entree achter de duikwand naar de graafkamer; - gering draaimoment.
nadelen	- de geometrie van het graaffront verandert voortdurend; - aan het graaffront geen instortverzekering mogelijk tijdens ontgraven (steunplaten); - voortgang kleiner dan Vollschnitt-TBM's.	- verhoogd draaimoment nodig; - graaffront nauwelijks te zien (bij vloeistofspiegelverlaging); - drukschommelingen in de graafkamer worden geregeld met aan- en afvoer van vloeistof.	- instorten van graaffront bij betreden van graafkamer vereist eventueel een volledige afsluiting van het open spaakwiel.
kosten	- kosten vergelijkbaar met een Vollschnitt-TBM; - luchtdrukinstallatie; - hydraulische afvoer en scheidingsinstallatie.	- ontgravingstechniek met hoofdlagerafdichtingen - eventueel mengselbehandeling voor het hydraulisch transport; - scheidingsinstallatie; - luchtdrukinstallatie.	- ontgravingstechniek met hoofdlagerafdichtingen; - eventueel mengselbehandeling voor het hydraulisch transport; - scheidingsinstallatie; - luchtdruk installatie.

4 Ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid

Voor de TBM-typen met ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid geldt voor het principe van een High Density Slurry Shield en het Slime Shield/ Mud injection Shield hetzelfde als voor een vloeistof- en vollschnittschild.

Voor het Earth Pressure Balance Shield zijn de criteria voor alle genoemde EPB-uitvoeringen in de onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 2.6 Afwegingen verschillende EPB-schild-uitvoeringen

4 Ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid	
Criteria	EPB-schild-uitvoeringen
toepassingsgebied	Voor de klassieke EPB-schilden plastisch vervormbare bodemsoorten met een geringe wrijving (zandaandeel onder de 20%). Door toevoegen van plastificeermiddelen aan het graaffront kan het toepassingsgebied aanmerkelijk worden vergroot.
voordelen	- onmiddellijk gebruik van de ontgraven grond voor de ondersteuning van het graaffront en afdichting tegen het grondwater; - geen hydraulische afvoer; - geen scheidingsinstallatie.
nadelen	- kwaliteit van de graaffrontondersteuning en de uitkomende grond is afhankelijk van de (onbekende en eventueel sterk wisselende) eigenschappen van de bodem; - betreden van de graafkamer lastig.
kosten	- ontgravingsmechaniek zeer robuust met hoog benodigd aandrijfvermogen; - avegaar met regelbare omwentelingssnelheid; - gebruik van drukmeters en regelsysteem.

2.5 Keuze TBM-type

2.5.1 Algemeen

In de voorgaande paragrafen zijn mogelijke TBM-typen en hun kenmerken beschreven. In deze paragraaf wordt een keuze van het TBM-type gemaakt voor toepassing bij de 2e-Heinenoordtunnel. Hiervoor worden eerst de criteria beschreven waaraan de TBM moet voldoen vervolgens wordt een grove selectie gemaakt en tenslotte een definitieve keuze.

2.5.2 Criteria

Voor het functioneren van een TBM in een bepaalde grondslag dient de TBM aan verschillende eisen te voldoen. De toepasbaarheid van een TBM-type moet worden onderzocht op:
- de graaffrontondersteuning;
- het ontgravingsmechanisme;
- het grondafvoersysteem;
- diversen: benodigde aandrijfkracht, grondbehandeling en ervaring.

Deze aspecten en de daaruit vloeiende eisen worden achtereenvolgens voor de lokatie van de 2e-Heinenoordtunnel behandeld.

Graaffrontondersteuning

De eisen ter beperking van zettingen aan het maaiveld gelden alleen voor het boortracé ter plaatse van de schachten en onder de dijken om schade aan schachten en dijken te voorkomen.
Vanwege het feit dat de schachten en dijkonderdoorgangen slechts een klein deel van het totale boortracé uitmaken kan in geval van voorziene ontoereikende graaffrontondersteuning door lokale maatregelen instabiliteit worden voorkomen.
De gevolgen van een ontoereikende ondersteuning tijdens boren komen vooral tot uiting in een sterke verstoring van de bodemstructuur voor en boven het schild.

Te veel ontgraving leidt tot vermindering van de voortgangssnelheid (meer graafwerk, meer materiaal afvoeren en eventueel behandelen) en vermindering van de kwaliteit van de bouw van de lining (de grout die langs de tunnelmantel de oversnijdingsruimte moet opvullen kan naar het graaffront lopen waardoor de groutdruk langs de tunnelmantel niet is verzekerd en de segmenten van de tunnelring niet goed op elkaar kunnen worden aangedrukt).

Het toetreden tot het graaffront onder luchtdruk kan onmogelijk worden indien door bodembewegingen spleten in het grondmassief optreden waardoor de lucht- en waterdoorlatendheid van de bodemlagen toeneemt.

Graaffrontondersteuningseis: een zekere graaffrontondersteuning met geringe storing van de natuurlijke grondspanningen.

Ontgravingsmechanisme

Het boortracé doorsnijdt over aanzienlijke lengten verschillende grondlagen. Het draaimoment en de benodigde vijzeldruk van het snijrad moeten worden bepaald met de hoogste belasting.

De werkelijke slijtage van de graaftanden is slecht dmv berekeningen vast te stellen en wordt pas duidelijk tijdens het boorproces. Met inspectie onder druklucht en eventuele vervanging van de graaftanden moet rekening worden gehouden.

Eis ontgravingsmechanisme: mogelijkheid om snel de graafkamer te kunnen betreden en simpel inspectie van het graaffront en de ontgravingswerktuigen te kunnen uitvoeren.

Grondafvoersysteem

Het transport van de ontgraven grond dient onafhankelijk van de graaffrontondersteuning te geschieden. De zwaartekracht kan hier gunstig werken indien de afgegraven gronddeeltjes aan de voet van de tunnel worden verwijderd.
Zanddeeltjes leveren voor de grondafvoer nauwelijks moeilijkheden op. Kleideeltjes daarentegen hebben de neiging onder bepaalde vochtcondities te kleven aan de constructie-elementen van het snijrad. Uit de praktijk is echter gebleken dat dit "kleeffenomeen" door speciale aanpassingen (spuitlanzen, speciale vormgeving snijrad, gedeeltelijke vulling bij vloeistofondersteuning etc.) kan worden voorkomen.

Uit het grondonderzoek is gebleken dat het grondafvoersyteem geen stenen groter dan D = 100 mm hoeft te verwerken. Desondanks zijn grotere obstakels niet uit te sluiten.

Grondafvoereisen:
- toetreden van het graaffront onder luchtdruk om eventuele hindernissen te verwijderen;
- transport van de ontgraven grond en de graaffrontondersteuning dienen onafhankelijk van elkaar te geschieden.

Diversen

De benodigde aandrijfkracht moet zo klein mogelijk zijn zodat deze kracht niet het maatgevende belastingsgeval wordt voor de wapening van de tunnelsegmenten.
Er dient een grondbehandeling te worden nagestreefd waarbij directe beschikbaarheid van een deponie zonder nabehandeling kan worden toegepast.
De geëiste tunneldiameter van 8,3 m is relatief groot. De voorkeur ligt voor een TBM-type waarbij meerdere succesvolle ervaringen zijn opgedaan.

2.5.3 Grove selectie TBM-type

Uit de voorgaande paragraaf volgt direct de (on)geschiktheid voor toepassing van bepaalde TBM-typen in de omstandigheden van de Heinenoordtunnel.

1a	Extrusieschild	:	niet geschikt tgv de wisselende grondlagen.
1b	Bühnen-schild	:	niet geschikt tgv ongelijkmatige ondersteuning van het graaffront en te hoge aandrijfkrachten.
1c	Verbauplattenschild	:	niet geschikt vanwege te kleine voortgangssnelheid en te speciale TBM voor de wisselende grondlagen.
2a	Teilschnittmachine met vloeistofondersteuning	:	niet geschikt vanwege te kleine voortgangssnelheid.

3a-b High Density Slurry Shield, Slime Shield/ Mud injection Shield zijn min of meer geschikt en worden in tabel 7 onder HDS (high-density-shield) behandeld.

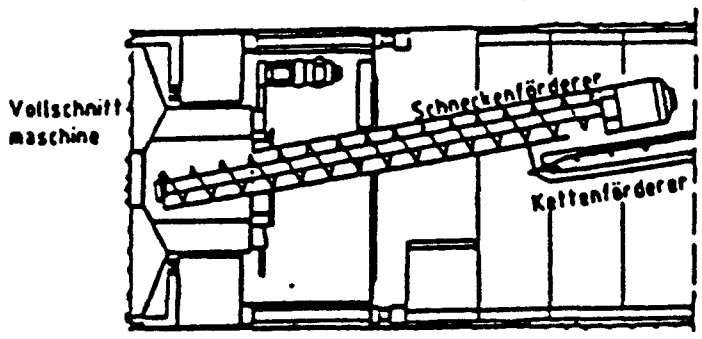
3c-e Earth Pressure Balance Shield (standaard-uitvoering), Earth Pressure Balance Shield (meng-kamer-uitvoering) en Earth Pressure Balance Shield (muckring-uitvoering) zijn min of meer geschikt en worden in tabel 7 onder EPB (earth-pressure-balance-shield) behandeld.

In tabel 2.7 zijn de overgebleven TBM-typen op de criteria vergeleken en overzichtelijk weergegeven

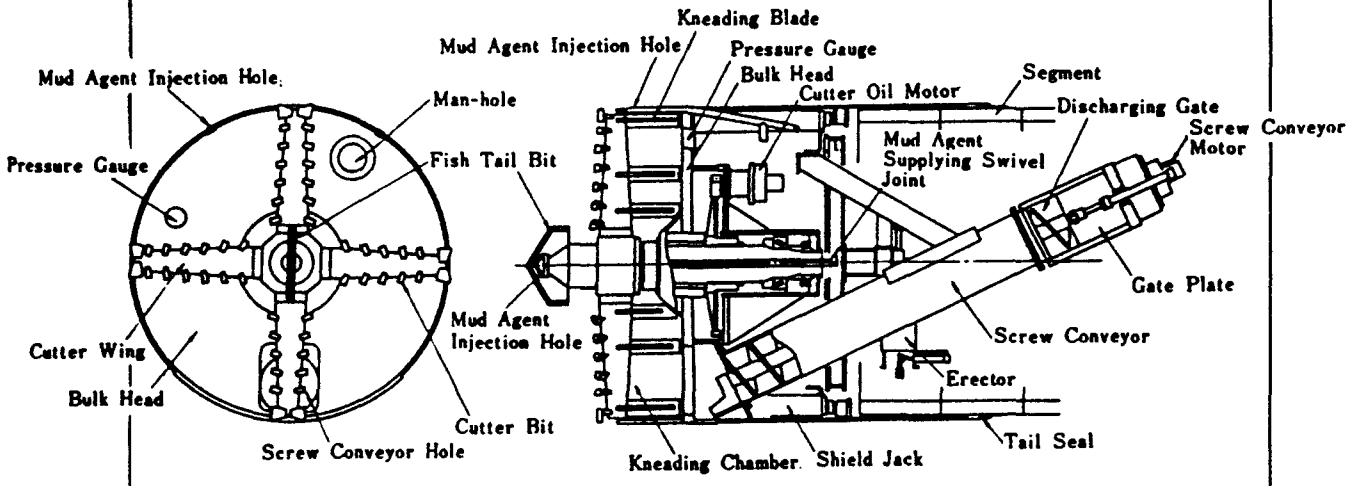
Tabel 2.7 Vergelijkingstabel TBM-typen

Criteria	Schurfscheibe	Slurry (Japans)	Slurry (Duits)	High density-schild	EPB-schild
1 graaffrontondersteuning met weinig grondvervormingen tijdens: a) boorproces; b) toetreden van graafkamer.	a) onzeker b) middelmatig	a) goed b) middelmatig	a) zeer goed b) middelmatig	a) goed b) middelmatig	a) onzeker b) middelmatig
2 mogelijkheid tot toetreden van graafkamer	zeer goed	goed	zeer goed	goed	middelmatig
3 benodigde druklucht tijdens boorproces	te hoog	geen	gering	geen	geen
4 benodigd draaimoment	hoog	middelmatig	gering	middelmatig	zeer hoog
5 benodigde aandrijfkracht	hoog	middelmatig	gering	middelmatig	zeer hoog
6 mogelijkheid tot inbouw van steenbreker	ja	ja	ja	beperkt	nee
7 afvoermechanisme	droog	nat	nat	plastisch	plastisch
8 scheidingsinstallatie	nee	ja	ja	beperkt	nee
9 ervaring van schilden met D > 10m	--	talrijk	enkele	onbekend	onbekend

Omdat de keuzecriteria zich beperken tot de wezenlijke aspecten, die tot kwaliteitsonderscheid van de verschillende TBM-typen leiden, blijft de tabel overzichtelijk. Uit tabel 7 blijkt dat de met vloeistof ondersteunde schilden en de EPB-schilden het meest geschikt zijn voor de situatie van de Heinenoordtunnel.



Erddruck- und Wasserdruckausgleichender Schild (earthpressure balanced shield).



Figuur 2.6 Principe EPB-schild

2.5.4 Definitieve keuze TBM-type

2.5.4.1 Algemeen

In deze paragraaf worden de twee meest geschikte TBM-typen voor toepassing van de situatie bij de 2e-Heinenoordtunnel, het vloeistofondersteunde schild (Slurry-schild op Duitse wijze oftewel Hydro-schild) en het EPB-schild, nader behandeld en met elkaar vergeleken.

2.5.4.2 EPB-schild

Algemeen
Het ideale EPB-type is het blindschild waarbij de bodem door de aandrijfkracht van het schild in de graafkamer wordt gedrukt en door openingen in de drukwand geextrudeerd wordt. Een voorwaarde voor een storingvrije functionering is een gelijkmatig vervormbare bodem waarvan de natuurlijke plasticiteit de mogelijke steundruk bepaald.
Toepassing van een EPB-schild in een stijvere bodem kan mogelijk worden gemaakt door het inbouwen van een snijrad. Het snijrad vormt met de afgegraven grond een waterdichte- en drukoverdragende grondprop in de graafkamer door middel van ontgravings-, meng, - en kneedwerktuigen aan de voor- en of achterkant van het snijrad. De benodigde smeerstoffen (water, bentoniet, foams etc.) worden gedeeltelijk door het snijrad aan het graaffront ingespoten.
Het is noodzakelijk de graafkamer volledig met een homogene, plastische grond-/smeermengsel te vullen. De druk in de graafkamer wordt dmv drukdozen aan de drukwand vastgesteld. De drukregeling geschiedt door aanpassing van de afvoersnelheid van de grond uit de graafkamer (bij toepassing van een avegaar aanpassing van de omwentelingssnelheid van de avegaar).

Vanwege de relatieve onbekendheid van foamtoepassing zijn hieronder enkele gegevens mbt foam weergegeven:
- foamontwikkeling is 10 jaar geleden gestart. De foams van tegenwoordig worden steeds zeepachtiger;
- de werking van het foam is gebaseerd op het voegen van luchtbelletjes tussen de grondkorrels. De voordelen hiervan zijn:
  * de grond wordt smeuïger en daardoor beter transporteerbaar;
  * de behandelde grond geeft een betere afdichting tegen water;
  * de behandelde grond heeft een verende werking. Water zet niet uit en is bijna onsamendrukbaar. Voor luchtbelletjes daarentegen geldt het omgekeerde. Indien er weinig grond voor het graaffront wordt uitgenomen is er geen stabiele situatie meer voor de met waterverzadigde grond echter de met luchtbellen geïnjecteerde grond kan terugveren en een stabiele situatie behouden;

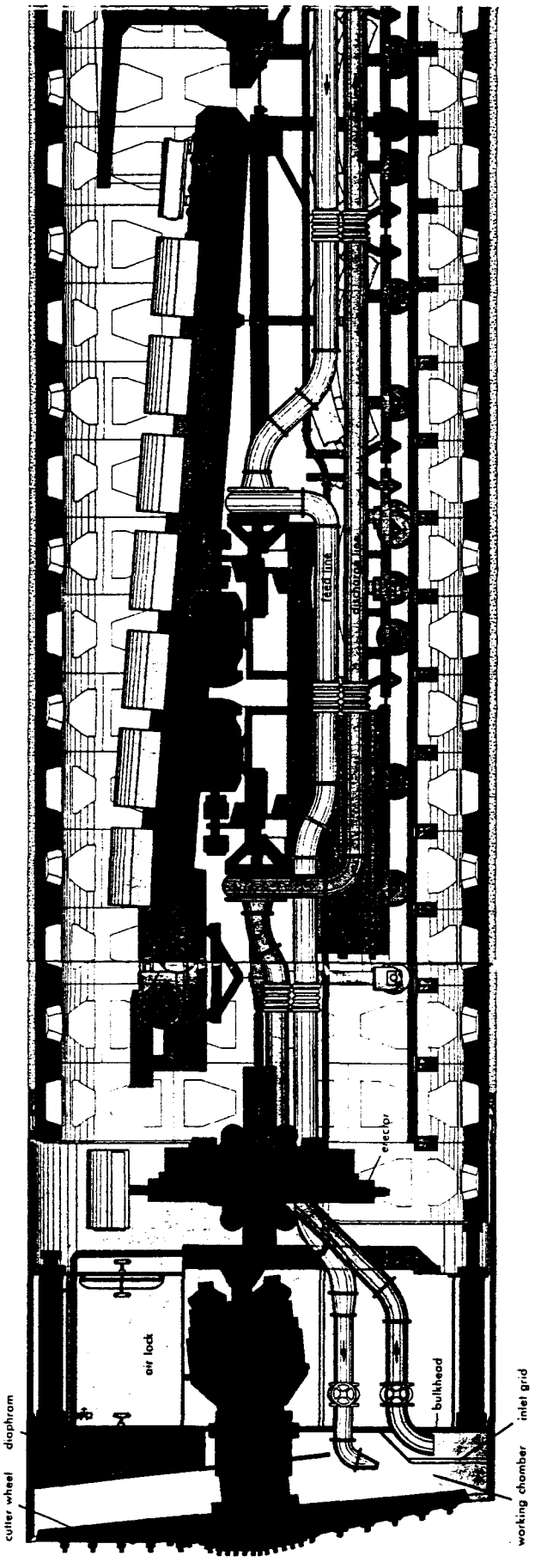
Voordelen
De voordelen van een EPB-schild zijn:
- bij een volle graafkamer een absolute zekerheid dat het graaffront niet instabiel wordt;
- de afgegraven grond wordt naar het afvoerpunt geperst waardoor er geen verklevingsverschijnselen optreden;
- automatische vulling van de ruimte tgv oversnijding;
- droog transport van afgegraven grond door de tunnel;
- geen scheidingsinstallatie nodig indien het plastische ontgravingsmateriaal direct kan worden gestort.

Nadelen

- het gebruik van een avegaar, transportband en locomotief met wagonnetjes is nodig tbv van de grondafvoer. Het grondtransport gaat gepaard met mors waardoor de kans groot is dat de tunnel vuil is. Het is overigens de vraag of er geen grondbehandelingsinstallatie moet worden toegepast waardoor de kosten van de grondafvoer hoger worden;
- het benodigde draaimoment is circa 3 maal groter dan voor een Hydro-schild. De grond moet als het ware naar worden binnengedraaid;
- de benodigde aandrukkrachten zijn groter dan bij een Hydro-schild omdat:
  * de smerende werking van de bentoniet ontbreekt waardoor de wandwrijving groter is;
  * bij de EPB-ontgravingsmethode draait een grondbrei in de graafkamer mee;
  * de onzekerheid van de drukverdeling aan het graaffront te compenseren.

  Het gevolg hiervan is dat de tunnellining zwaarder wordt belast waardoor meer splijtwapening nodig is in de segmenten en er meer aandrukvijzels nodig zijn dan bij een Hydro-schild;
- het snijrad is zwaarder en de benodigde aandrukkracht is groter waardoor het hoofdlager zwaarder wordt belast. Hierdoor is de kans op falen groter en de levensduur kleiner;
- het benodigd geïnstalleerde vermogen is groter dan bij een Hydro-schild waardoor de runningkosten hoger zijn;
- grotere verstoring van de natuurlijke grondspanningen dan bij een Hydroschild. Dit kan leiden tot grotere zettingen;
- voor grotere diameters treden opmerkbare drukverschillen over de hoogte van het graaffront op. De Ko-waarde van een bodem in rust bedraagt circa 0,5 echter voor mechanisch bewegende plastische grond in de graafkamer is de Ko-waarde circa 1;
- voor alle boortracédelen waar een wezenlijk zandaandeel aanwezig is (70% van het totale boortracé van de Heinenoordtunnel) moeten hulpstoffen (additieven) worden toegepast. Foam moet als hulpstof worden gebruikt om de wrijvingskrachten te verminderen en een goede waterdichting van het zand te bewerkstelligen. Deze functies heeft het foam echter voor een beperkte tijd. Onderbreking van het boorproces om de graafkamer te betreden geeft problemen doordat de bodem na verloop van tijd weer waterdoorlatend wordt. Bentonietinjectie zou deze problemen kunnen verhelpen. Er zijn geen referenties voor het gebruik van foam voor de Heinenoordsituatie (3,4 bar waterdruk, niet cohesieve grond);
- het foam is niet 100% milieuvriendelijk, circa 10% van de foamchemicaliën zijn niet biologisch afbreekbaar;
- het betreden van de graafkamer geeft meer problemen dan bij een Hydro-schild namelijk:
  * het leegmaken van de graafkamer duurt langer;
  * de avegaar mag niet leeggedraaid worden omdat deze anders de dichtende werking verliest;
  * bij uitval van de grondsteunplaten op het snijrad is het graaffront niet verzegeld, hetgeen pas bij betreden van de graafkamer wordt opgemerkt;
  * na betreden van de graafkamer moet de graafkamer weer gevuld worden voor de TBM weer kan gaan ontgraven. De steundrukverhoudingen tijdens deze overgang zijn minder nauwkeurig te bepalen dan bij een Hydro-schild;
- drukverschillen aan het graaffront kunnen minder goed worden opgevangen dan bij een Hydro-schild met luchtbuffer;
- doordat er geen steenbreker kan worden geïnstalleerd is een blokkage van de avegaar niet ondenkbeeldig;
- stenen in de graafkamer kunnen de mengarmen achter op het snijrad beschadigen.
- bij gebruik van een staartdichting met staalborstels en vetafdichting geeft deze staartdichting hechtingsproblemen tussen de grout en de tunnellining tgv een vetfilm op lining. Tevens kunnen de borstels dicht gaan zitten met grout en is het vet milieubelastend. De vervanging van de staalborstels is echter eenvoudiger dan van een rubber profielstaartafdichting.

- indien er gassen (CH4, H2S, CO) in de grond aanwezig zijn kunnen deze in de tunnelbuis komen doordat het grondtransportsysteem niet gesloten is. Voor een EPB moet voor het ontwerp van de ventilatie hiermee rekening worden gehouden:
- een EPB heeft relatief meer snijelementen dan een Hydro-schild waardoor vervanging duurder is en langer duurt met als gevolg een kleinere inzetbaarheid bij grote slijtage;
- relatief veel mensen in tunnel en veel transportbewegingen waardoor de kans op ongelukken groter is dan bij een Hydro-schild.



Figuur 2.7 Principe Hydro-schild

2.5.4.3 Slurry-schild op Duitse wijze (Hydro-schild)

Algemeen
Tijdens het boorproces steunt een speciale suspensie (bentoniet) het graaffront. De steundruk verloopt hydrostatisch. De steundruk wordt gecontroleerd en constant gehouden door een luchtkist achter de duikwand waardoor de schommelingen van de ondersteuningsdruk gering zijn. De bentoniet vormt een dichte filterkoek op het oppervlak van het graaffront en zet het graaffront onder druk. De zettingen blijven door deze graaffrontondersteuning zeer beperkt. De vorming van de membraamachtige filterkoek is tijdens vele boorprojecten bewezen. De bentonietcake is relatief luchtondoorlatend waardoor het graaffront door druklucht kan worden gesteund tijdens het betreden van de graafkamer. De eigenschappen van de steundruksuspensie kunnen aan de situatie worden aangepast.

Voordelen
Naast de voordelen die hierboven zijn omschreven kunnen worden genoemd:
- de geringe aandrijfkrachten: door de bekendheid van de drukverdeling over de hoogte van het graaffront, de smerende werking van het bentoniet en de scheiding van de functies ondersteuning (door suspensie) en afgraven (door snijrad) van graaffront;
- geringe verstoring van de natuurlijk aanwezige grondspanningen;
- er kan beter in niet homogene grondlagen worden geboord dan bij een EPB-schild door de zelf-instellende drukregeling;
- doordat de TBM lichter is en minder aandruk en draaimoment nodig heeft wordt het hoofdlager minder belast waardoor de levensduur groter is dan van een EPB-schild;
- het geïnstalleerd vermogen is kleiner waardoor de runningkosten lager zijn dan voor een EPB;
- steenbrekerinbouw is mogelijk zodat afvoer van afgegraven materiaal geen problemen oplevert;
- hergebruik ondersteuningssuspensie;
- het afvoersysteem van afgegraven grond kenmerkt zich door:
  * schoon transport;
  * neemt weinig ruimte in beslag;
  * is richtingsonafhankelijk.
- de scheidingsinstallatie scheidt naar korrelgrootte zodat het gescheiden materiaal eventueel verder gebruikt kan worden;
- indien een Neopreen-staartdichting wordt toegepast is deze eenvoudiger en minder gevoelig voor grout en oneffenheden dan een staartdichting dmv vetinjectie en staalborstels;
- door de toepassing van een gesloten grondafvoersysteem is er geen gevaar tgv vrijkomende stoffen in de tunnelbuis en is er minder lawaai in de TBM en tunnelbuis;
- het aantal benodigde snij-elementen is kleiner waardoor het benodigde draaimoment en aandrukkracht kleiner is. Tevens is vervanging goedkoper en kan sneller plaatsvinden waardoor de inzet van de TBM groter is dan voor een EPB;
- er zijn relatief weinig mensen betrokken bij het boorproces.

Nadelen
- het gebruik van een scheidingsinstallatie, een aanvoersysteem tbv ondersteuningssuspensie en een afvoersysteem tbv de met afgegraven grond vervuilde ondersteuningssuspensie is nodig;
- bij kleinere gronddeeltjes wordt de scheiding van de bentoniet en de ontgraven grond moeilijk of zelfs onmogelijk waardoor er veel bentonietvloeistof verloren kan gaan;
- men houdt een hoeveelheid bentonietvloeistof en eventueel met bentoniet vermengde grond over waarvoor een stort moet worden gezocht;
- kleven van kleideeltjes aan het ontgravingsmaterieel. Hiertegen kunnen enige maatregelen worden genomen door speciale aanpassingen (spuitkoppen, snijradvormgeving, gedeeltelijke vulling bij vloeistofondersteuning etc.).

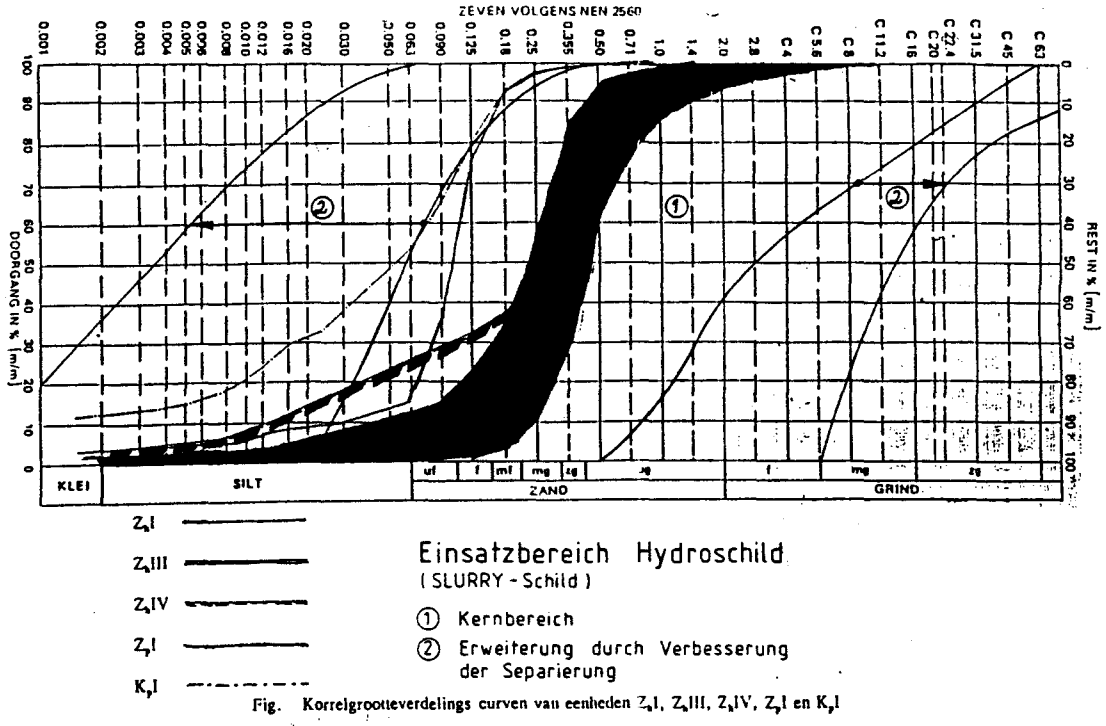


Fig. Korrelgrootteverdelings curven van eenheden Z_4I, Z_4III, Z_4IV, Z_5I en K_5I

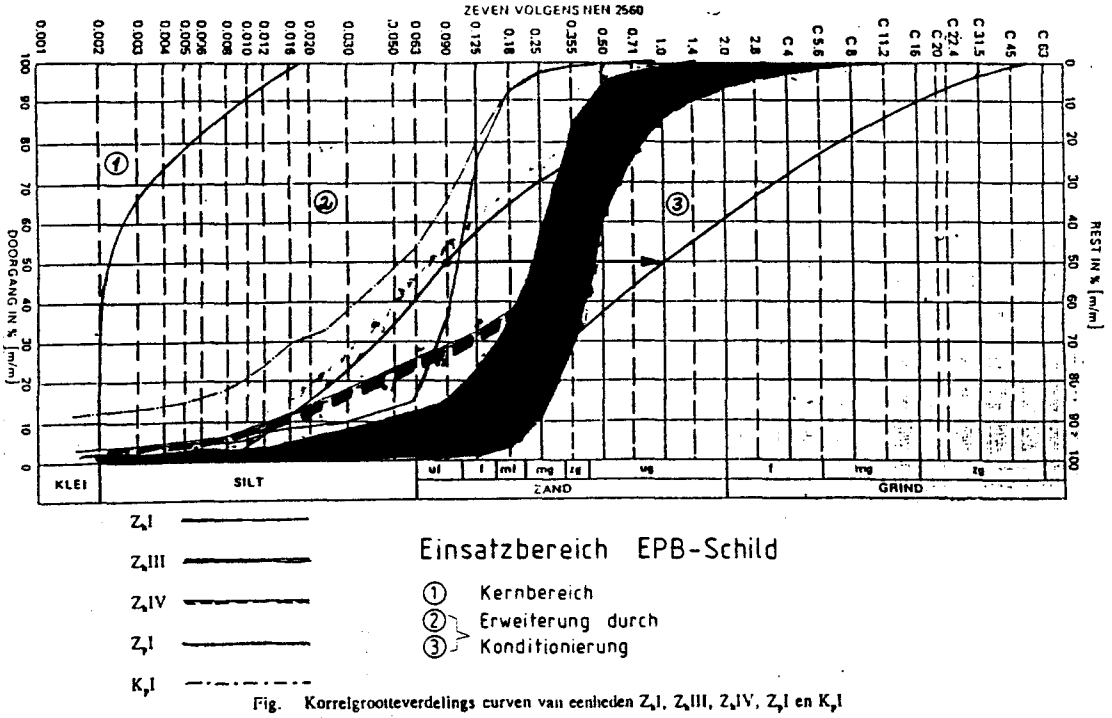


Fig. Korrelgrootteverdelings curven van eenheden Z_4I, Z_4III, Z_4IV, Z_5I en K_5I

Figuur 2.8 Toepassingsgebieden Hydro- EPB-schild aan de hand van korrelgrootte diagrammen

2.5.4.4 Conclusie

Over bijna de gehele lengte van het boortracé is een grondslag aanwezig die, bij toepassing van een EPB-schild, intensief bewerkt moet worden om een plastische en drukhoudende bodemprop te kunnen vormen. De wisselende grondlagen in het boortracé dwingen tot een veelvuldige aanpassing van hulpmaatregelen.

Het Hydro-schild daarentegen is over de gehele bandbreedte van de verschillende voorkomende grondlagen makkelijker inzetbaar zonder veel hulpmaatregelen. Het noodzakelijke gebruik bij een Hydro-schild van installaties ten behoeve van het hydraulisch transport en suspensiescheiding wegen op tegen het geringere risico bij het betreden van de graafkamer, kleinere aandrijfkrachten en een schoon grondafvoertransport door de tunnelbuis.

In de figuren 2.8 zijn de toepassingsgebieden van het EPB-,en het Hydro-schild aan de hand van korrelgrootteverdelingsdiagrammen weergegeven. In deze diagrammen is aangegeven binnen welke korrelgroottebanden de verschillende schilden van oorsprong ontwikkeld zijn en tot welke korrelgroottebanden de toepasbaarheid van schilden mbv hulpmaatregelen kan worden uitgebreid.
Tevens is de korrelgrootteband van het boortracé van de 2e-Heinenoordtunnel in deze diagrammen aangegeven. Uit deze diagrammen is duidelijk af te lezen dat de grondslag in het boortracé van de Heinenoordtunnel voor 70 à 80 % uit zandgrond is bestaat en dat het toepassingsgebied van een Hydro-schild het meest geschikt lijkt in deze grondslag.

TCH heeft om deze redenen gekozen voor toepassing van een Hydro-schild voor het boren van de 2e-Heinenoordtunnel. In tabel 2.8 is de beoordeling van de belangrijkste TBM-keuzecriteria voor het EPB- en Hydro-schildtype overzichtelijk weergegeven.

Tabel 2.8 Vergelijkingstabel EPB en Hydro-schildtype

Criteria	Hydro-schild	EPB-schild
1 Toepasbaarheid schild mbt korrelgrootte-band grondslag 2e-Heinenoordtunnel	zeer goed	niet geschikt zonder hulpmaatregelen
2 graaffrontondersteuning tijdens: a) boorproces; b) toetreden van graafkamer.	 a) zeer goed b) goed	 a) middelmatig b) middelmatig (onzeker)
3 benodigd draaimoment en verstoring van het graaffront tijdens het boorproces	gering	zeer hoog (tot 3 keer hoger)
4 mogelijkheid en veiligheid tot toetreden van graafkamer	goed	middelmatig
5 meting van de steundrukken	betrouwbaar	onzeker (maar werkbaar)
6 behandeling van de af te graven grond	niet nodig	nodig
7 benodigde aandrijfkracht	laag	hoog (2 tot 3 keer hoger)
8 zettingen	beperkt	klein
9 scheidingsinstallatie	nodig	niet nodig
10 ervaring van schilden met D = +/- 8,5m	talrijk	talrijk

3 Bepaling programma van eisen TBM

3.1 Algemeen

Nadat de keuze van het TBM-type was gevallen op het Hydro-schild is er een programma van eisen voor de TBM opgesteld.

Voor de bepaling van de TBM-eisen is eerst een checklist gemaakt van onderdelen die in de TBM aanwezig behoren te zijn.

Vervolgens zijn enkele grove berekeningen gemaakt ter bepaling van:
a) de orde van grootte van de aandrijfkracht en het draaimoment;
b) een ontwerp van het hydraulisch afvoersysteem;
c) een schatting van de afmetingen en het gewicht van een segment en het aantal segmenten in een tunnelring;
d) de levensduurverwachting van het hoofdlager;

Vervolgens is het voorziene TBM-ontwerp van een Hydro-schild beschreven waarbij eerst de uitgangspunten voor het ontwerp zijn opgesteld en vervolgens een technische beschrijving van het Hydro-schild is gemaakt. Het beschreven TBM-ontwerp geeft een uiteenzetting van een mogelijk Hydro-schildontwerp voor de 2e-Heinenoordtunnel zoals door de TBM-werkgroep werd voorzien voordat met de TBM-leveranciers was gesproken.

3.2 Beschrijving TBM-ontwerp

3.2.1 Uitgangspunten TBM-ontwerp

Boortunneldimensies
De 2e-Heinenoordtunnel heeft de volgende kenmerken:
- binnendiameter 7.6 meter;
- buitendiameter 8.3 meter;
- segmentdikte 0.35 meter;
- ringbreedte 1.5 meter;
- ringopbouw 7 segmenten en 1 sluitsteen;
- oversnijding 0.125 meter;
- theoretische buitendiameter 0.125*2 + 8.3 = 8.55 meter.

De totale lengte van de starre schildmantel bedraagt circa 8,3 meter.

Belastingen op de TBM
De schildmantel wordt belast door de van buiten werkende krachten en de krachten die van binnenuit de TBM op de mantel.

De van buitenaf werkende belastingen op de schildmantel zijn weergegeven in tabel 3.1.

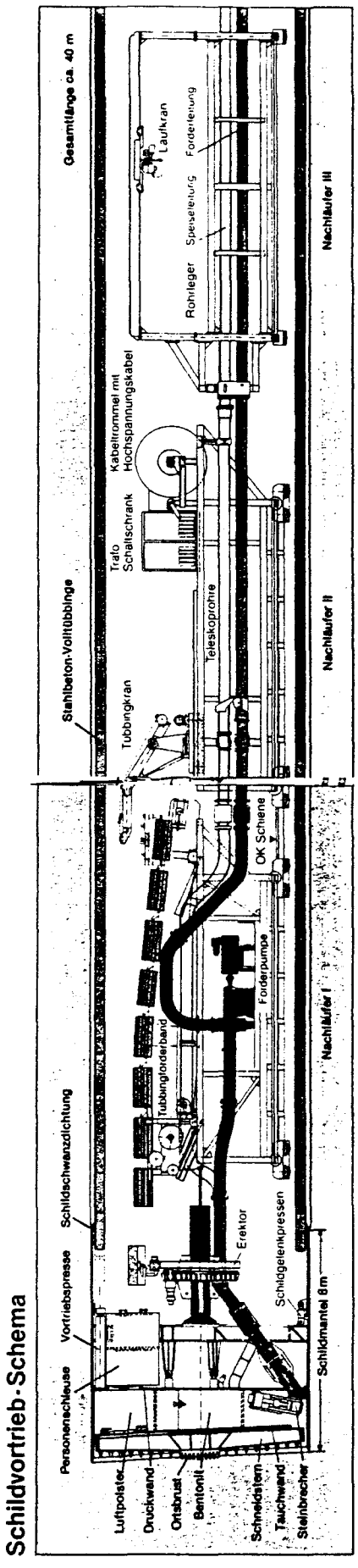
Tabel 3.1 Belasting op de schildmantel

Belasting	Maximaalwaarde	Belastte TBM-deel	Opmerkingen
waterdruk	350 KN/m2	- schildmantel (zonder snijdeel); - drukwand; - sluis.	Gelijkmatig verdeeld.
gronddruk	250 KN/m2	- gehele mantel; - drukwand.	p = pmax*cosϕ p1 = pmax
hindernis	-	- snijdeel.	Constructief door wandsterkte opgenomen.
wrijving staartdichting	100 KN/m	Stalen staartplaat.	
ophanging trailer	100 + 50 KN	Verstijving binnenkant TBM.	Trailergewicht circa 180 ton maximale vijzelhelling circa 3%.
verschildruk op de drukwand	p = 60 KN/m2 p = 200 KN puntlast	Duikwand.	Werken niet gelijktijdig.

De belastingen vanuit de TBM zijn:
- het eigen gewicht van de TBM;
- reactiekrachten vanuit:
  - * de snijradaandrijving:
    - max. draaimoment circa 4 MNm. De hydraulische aandrijving is gerelateerd aan de draaisnelheid.
      max Md= 4.0 MNm bij n=1 omwenteling per minuut
      max Md= 2.0 MNm bij n=2 omwentelingen per minuut
    - max. aandrukkracht circa 3 MN.
  - * vijzels:
    - 14 vijzelsets à 1.8 MN;
    - max. aandrijfkracht 50.4 MN.
  - * ringerector:
    - ontwerpen op tillen en verplaatsen van segmenten met een maximaal eigengewicht van 50 KN.

Alle overige belastingen vanuit de TBM zijn voor het ontwerp van de TBM niet maatgevend.

Opmerking: Voor het voorontwerp van de 2e-Heinenoordtunnel zijn onder andere berekeningen gemaakt mbt de benodigde dekking op de tunnel, de tunnellining en de benodigde steundruk in de verschillende bedrijfsituaties van de TBM (graaffront geheel en gedeeltelijk ondersteund met bentoniet en of luchtdruk). Deze berekeningen geven waarden die als uitgangspunt voor het ontwerp van de TBM worden genomen. Voor deze berekeningen wordt verwezen naar het rapport "Berekeningen Voorontwerp Boortunnel Heinenoord" van Arjan van der Put.



Figuur 3.1 Principe Hydro-schild

3.2.2 Technische beschrijving TBM-ontwerp

3.2.2.1 Algemeen

De TBM bestaat in hoofdlijnen uit:
- het schild
- de ontgravingsmechaniek;
- de aandrijvingshydraulic;
- de erector;
- de stuurcabine;
- het grondafvoersysteem;
- de staartvulling;
- de staartdichting;
- de trailers die achter de TBM worden meegesleept.

In deze paragraaf worden deze TBM-onderdelen nader beschreven.

3.2.2.2 Schild

Het schild bestaat in wezen uit een cilindrische buitenomhulling met binnenliggende verstijvingen en afsluitwanden. In figuur 3.1 is een Hydroschilduitvoering weergegeven.

De schildmantel
De schildmantel is opgebouwd uit 3 buisdelen namelijk: het graafdeel, het middendeel en het staartdeel. Deze buisdelen hebben een nominale buitendiameter van 8,55 meter.

Het graafdeel
Het graafdeel loopt van de snijmessen tot aan de drukwand. De gekozen metaaldikte van 80 mm is een compromis tussen materiaalsterkte, nog eenvoudig lasbare verbindingen en bouwtolerantie. De ervaring heeft geleerd dat deze staaldikte voldoende is. De vereiste montage van de langsnaden bestaat uit een doorlopende las. Duik- en drukwand zorgen in dwarsrichting voor een praktisch onvervormbare verstijving.

Het middendeel
Het middendeel sluit achter het graafdeel aan en reikt tot aan het einde van het ringspant. In het middendeel bevinden zich de aandrijfvijzels rondom de wanden. Het ringspant wordt verstijfd met "een draagkruis" waarbinnen een centraal venster is waardoor de aandrijfas van het snijrad loopt. Het draagkruis neemt van voren de aandrukkrachten vanuit het snijrad op en van achteren de aansluitkrachten van de erectorconsole met de daaraan hangende trailers.

Het staartdeel
Het staartdeel bedekt aan het schildeinde de werkruimte van de erector en de laatst gebouwde ring. Aan het einde van het staartdeel bevindt zich het staartdichtingsprofiel en het noodafdichtingsprofiel. In het staal van de buis van het staartdeel zijn tbv de staartdichting op gelijke afstanden 4 groutdrukleidingen opgenomen.

Druk- en duikwand
De dwarsschotten verstijven de schildmantel tegen van buitenaf werkende radiale belastingen. De gladde voorzijde van de duikwand sluit de graafkamer af. Meerdere naar achteren sluitende luiken geven toegangsmogelijkheid tot het snijrad. Aan de voet van de tunnel is er een opening in de duikwand die de graafkamer met de drukkamer verbind. De drukwand sluit de atmosferische binnenruimte van de drukkamer af. In de drukwand zijn doorgangen aanwezig namelijk:
- in de tunnelkruin: openingen tbv een sluis en toevoerleidingen;
- in de as en voet van de tunnel: openingen tbv spoel- en afvoerleidingen

3.2.2.3 Ontgravingsmechaniek

Het snijrad, hoofdlager, aandrijfhuis en de hydraulische aandrijfmotoren zijn in één blok samengesteld. Een sferisch kip- en glijlager kan axiaal verschuiven en kan kleine rotaties opnemen (bolscharnier). Hierdoor is een oversnijding van 50 mm mogelijk. Drie drukgroepen, waarvan de vijzelslag wordt gecontroleerd en gesynchroniseerd, houden het snijrad in de gewenste positie. De vijzels zijn beveiligd tegen overdruk. Indien bijvoorbeeld tijdens het boorproces het snijrad tegen een harde obstakel stuit, blijft de functie van de vijzels behouden. De hydraulische aandrijfmotoren kunnen met verschillende draaisnelheden in beide richtingen draaien.

De 3-maal gelagerde ophanging van de as van het snijrad heeft een rekentechnische levensduur van 6000 uur bij 2 omwentelingen per minuut en een excentrische belasting van 75% van de maximaalwaarde. Het lager kan in noodgevallen zonder veel problemen worden vervangen. Hetzelfde geldt voor de hoofdlagerdichtingsprofielen. Deze zijn van voren toegankelijk en kunnen eventueel worden verwijderd.

Het snijrad is een open spaakwielconstructie met 5 graafspaken. In natte cohesieve grond bestaat het gevaar van kleven van gronddeeltjes aan het ontgravingsmaterieel. Dit kan worden voorkomen door bijvoorbeeld spuitlanzen op het snijrad.

Het snijrad vervult de volgende functies:
- ontgraving:
  Voor de ontgravingsfunctie zijn 2 verschillende soorten graafwerktuigen op de voorkant van het spaakwiel gemonteerd namelijk:
  * snijtanden (Stichel) : voor de ontgraving in zand;
  * snijmessen : voor de ontgraving in klei.

  De graafwerktuigen kunnen bij slijtage van achter het snijrad vervangen worden.
- instabiliteit graaffront:
  De open driehoeksvlakken tussen de spaken van het bovenste deel van het snijrad kunnen bij betreding van de graafkamer worden bedekt met 2 steunplaten. Het werken in de graafkamer kan daardoor in veiliger omstandigheden plaatsvinden. Tijdens het boorproces zijn de platen ingetrokken en vergrendeld op de buitenzijde van de duikwand.
- grondafvoer:
  Bij vloeistofondersteuning houden de brede spaken de naar de tunnelvoet zinkende gronddeeltjes in beweging. De met het snijrad meedraaiende "vloeistofschijf" voert gronddeeltjes langs het graaffront en rondom het schild totdat het gronddeeltje door het raster voor de afzuigmond de afvoerpijp in wordt gezogen.

3.2.2.4 Aandrijvingshydrauliek

Tijdens het boorproces en de ringbouw drukt het schild met 28 drukvijzels op de tunnelring. De drukvijzels zijn met drukschoenen tot 14 drukeenheden samengevoegd. Voor de regeling van de stuurrichting zijn de aandrukvijzels in 7 onafhankelijke drukgroepen verdeeld. De resulterende drukverschillen tussen de naast elkaar liggende drukgroepen moet door de lining worden opgenomen.
De toepassing van meerdere parallel geschakelde hydraulische pompen staat kleine trapsgewijze aanpassing van de voortgangssnelheid toe. Tijdens de ringbouw begrenst een overdrukventiel de oliedruk van de vijzels om te verhinderen dat het schild vooruit schuift. Gelijktijdig wordt het terugschuiven van de TBM onder de werking van de steundruk ook bij ingetrokken vijzels verhinderd. Een samenschakeling van alle oliestromen bewerkstelligt een snellere vijzelbeweging dan tijdens het boorpoces. Een drukreservoir in de olietoevoerleiding van de vijzel verzekert een constante druk van de drukvijzels tijdens de ringbouw.

Om verdraaiing van het schild te voorkomen kunnen de drukvijzels op een lagerpunt tangentiaal worden versteld. Ieder vijzelpaar zit aan het voorste druklager in een hydraulisch tangentiaal verschuifbare slee. Het achterste lager heeft elastische gummiedelen, die bij uitschuivende vijzels tijdelijk meegeven en daarmee de buigbelasting van de vijzelstang wezenlijk verkleinen.

3.2.2.5 Erector

De erector is bevestigd als ringerector om zijn draagconsole, die aan het verstijvingskruis van het schild is bevestigd. Door het vrije midden lopen alle verbindingsleidingen van het schild naar de trailers.
De driedelige vacuüm-tilkop voor de segmenten (voor A, B en C-segmenten en de sluitsteen) is bevestigd op een hefbrug.
Door langsverschuiving over de draagconstructie, de rotatie, de slag van de brugvijzels en 2 verstelbare vijzels aan de vacuüm-tilkop kan het element nauwkeurig worden geplaatst. Twee centreerconussen op de vacuüm-tilkop vergemakkelijken de overname van de transporttafel en voorkomen het vallen van het segment bij een defect aan de vacuümsysteem. Alle bewegingen van de erector worden traploos hydraulisch met ventielen geregeld.

3.2.2.6 Stuurcabine

Alle bedieningselementen van het schild zijn in de stuurcabine ondergebracht. De stuurcabine is ondergebracht op een plateau aan de zijkant in de TBM. Het stuurpaneel heeft verschillende modulen waarop de volgende functies staan afgebeeld:
- boorproces : positie, beweging en druk van de vijzels;
- ontgraven : positie, snelheid en vermogenafname van het snijrad;
- graaffront-ondersteuning : steundruk, suspensie-spiegelniveau, mengselcirculatie in de verschillende leidingen, pompcontrole;
- positionering : schild- en ringpositie.

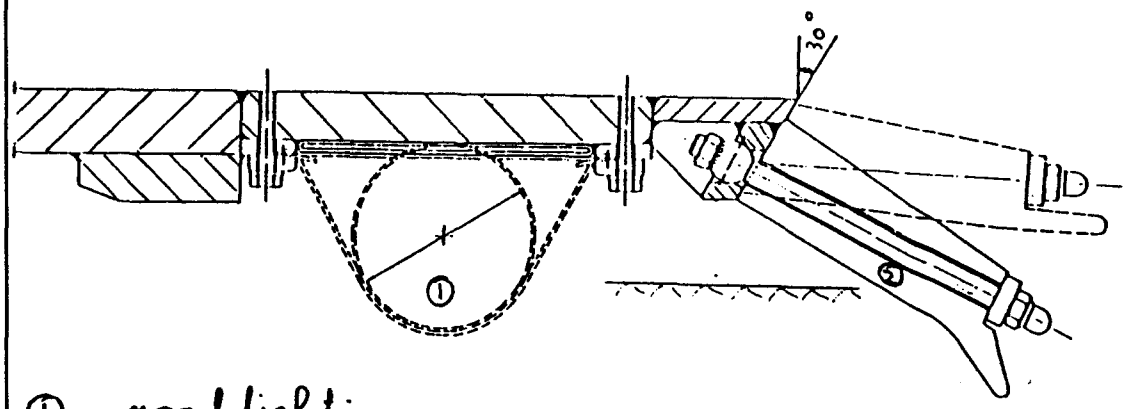
Door het basisprincipe van een Hydro-schild is er weinig bijstelling van het ontgravings- en hydraulisch systeem tijdens het boorproces nodig omdat:
- de steundruk wordt automatisch op de gekozen waarde gehouden;
- na instelling van de toe- en afvoerleidingen stelt zich een stabiel bedrijfspunt in waarbij de vloeistofspiegel in de graafkamer slechts enkele decimeters aan verandering onderhevig is;
- indien er boven- of ondergrenzen van het vloeistofspiegelniveau worden bereikt dan wordt de voortgang automatisch uitgeschakeld en treden de afsluiters in werking;
- bij stroomuitval valt de boorinstallatie in een veilige bedrijfstoestand met gesloten omloopventielen.

Uit de ervaring blijkt dat de besturing van een Hydro-schild nauwelijks moeilijkheden oplevert. Afwijkingen van meer dan 5 cm buiten het boortracé treden zelden op.

3.2.2.7 Grondafvoer

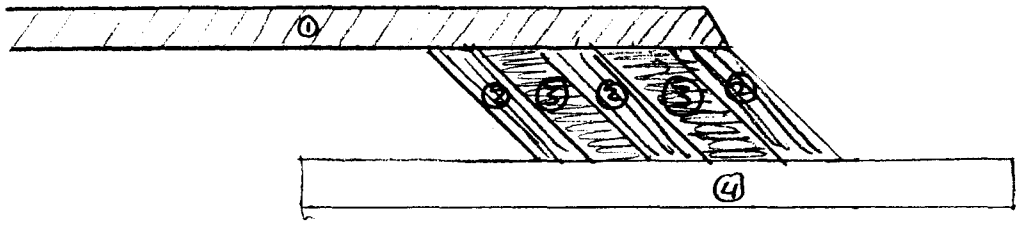
De aan het graaffront losgemaakte grond wordt aan de voet van de TBM onmiddellijk achter de duikwandopening afgezogen. Voor de afzuigmond is een rooster/traliewerk bevestigd zodat te grote gronddelen niet in de afvoerleiding terecht kunnen komen. Spuitlansen verhinderen het ophopen van ontgraven materiaal voor het tralierooster. Een draaischarnier met een horizontale as vergroot het gebied van de afzuigmond tot circa 2 meter breedte. De suspensie wordt afgevoerd vanuit de graafkamer naar de afvoerpomp op de trailer en vervolgens via buizen, met eventueel tussenpompen, naar de scheidingsinstallatie. Na scheiding van de grond en ondersteuningsvloeistof wordt de vloeistof bijgemengd met verse bentoniet en weer hergebruikt in het hydraulische systeem.
De toe- en afvoerleiding die door de drukwand lopen kunnen door afsluiters worden afgesloten.

Rubber profiel staartdichting



① = noodafdichting
② = rubber profiel

Staalborstel staartdichting



① = schildmantel
② = staalborstel
③ = vet
④ = lining

Figuur 3.2 Staartafdichtingsprofielen

3.2.2.8 Staartdichting

Staartvulling
Om de spleet tussen de buitenkant van de mantel en de buitenkant van de lining (oversnijding) met grout te vullen zijn groutdrukleidingen langs de schildmantelomtrek opgenomen. Er zijn 4 groutdrukleidingen voorzien. Deze treden in een boog in het mantelstaal en lopen door tot de buitenzijde van staartdichting.
Iedere aangesloten leiding wordt door een eigen pomp aangedreven. Op deze manier kan op verschillende hoogten over de schilddiameter de groutdruk worden aangepast. De capaciteit van de groutpompen wordt zo ontworpen dat zelfs bij uitval van enkele groutleidingen de voortgang zonder problemen en met voldoende groutdruk doorgang kan vinden. Het schoonmaken van de groutpijpjes is mogelijk. Hiervoor zijn schoonmaakprocedures ontwikkeld.

Staartafdichting
Voor de staartdichting staan 2 bewezen afdichtingen ter beschikking namelijk:
- een staalborsteldichting met vetinjectie;
- een rubberprofielafdichting met nooddichting.

In de figuren 3.2 is het principe van de beide staartafdichtingen weergegeven.

De staalborsteldichting vereist bij een buitendruk tot 6 bar minstens 3 rijen borstels. De tussenruimten van de borstels worden met vet geïnjecteerd tijdens de TBM-voortgang. De voegen worden op deze wijze afgesloten en het aanhechten van de grout aan de afdichtingsvezels van de staalborstels wordt verhinderd. Er is een voorkeur voor de rubberprofielafdichting onder andere vanwege het hoge vetgebruik.

De rubberprofielafdichting wordt in secties ingebouwd, door trekbouten voorgespannen en wordt op het uiterste einde van de schildmantel opgespannen. Het rubberprofiel wordt naast de voorspanning ook door de morteldruk tegen de lining gedrukt. Het werkingsbereik van de dichting bedraagt circa 40 mm. Aan de schildbinnenkant is in geval van calamiteit een nooddichting aanwezig die de spleet tussen het schild en de lining kan afsluiten.

3.2.2.9 Trailers

De aan het schild geschakelde installaties zijn op 3 trailers ondergebracht. De trailers hebben brede kunststofbanden. Op de trailers zijn (van voren naar achteren) ondergebracht:

- Trailer 1 (circa 10 meter lang);
  * tijdelijk 2 beweegbare werkplateaus voor de segmentmontage;
  * de groutdrukpompen;
  * de segmentoverdrachtsband;
  * de centrale hydrauliekverzorging met pompen en tank;
  * de afvoerpomp en afvoerpijp van het hydraulisch transport.

- Trailer 2 (circa 10 meter lang)
  * de segmentkraan;
  * een reservoir voor speciale steundruksuspensie;
  * apparatuur tbv van de elektrische energievoorziening zoals kabelhaspels, trafo, verdeelkast;

  Het verzorgingsspoor loopt via een sleepspoor op trailer 1 naar trailer 2 over.

- Trailer 3 (circa 10 meter lang)
  * materieel tbv verlenging van de volgleidingen zoals telescoopbuizen, slangovergangen, buizen- en railsmagazijn;
  * een kleine werkplaats.

Trailer 3 staat stil tijdens de TBM-voortgang. Deze wordt slechts bij het intrekken van de telescopische buis weer naar de TBM getrokken.

3.2.3 Maatregelen tbv veiligheid en risico-preventie

Voor het TBM-ontwerp zijn maatregelen t.b.v. veiligheid en risico-preventie onderzocht. In de volgende lijst zijn de resultaten van deze analyse weergegeven.

Lijst met maatregelen tbv veiligheid en risico-preventie
- voortstuwingskrachten te groot: smeren van schild, ventielen inbouwen, copy-cutters;
- extreme winter: scheidingsinstallatie overkappen;
- verstoppingen onder in boorkamer: jets toepassen;
- bentonietspiegel tijdens weekends of verlof: hydrostatische druk vanaf scheidingsinstallatie handhaven;
- hoogspanningskabel: hoog ophangen;
- wegvallen stroomvoorziening: noodstroomaggregaat voor kritische functies (stabiliteit graaffront);
- electrosysteem explosievrij maken: gasdetectie;
- drukluchtvoorziening: dubbele leiding;
- spiegelniveau: altijd binnen bepaalde grenzen automatisch gegarandeerd;
- hoofdlager: reserve lager moet beschikbaar zijn, hetzij 2e-hands, dan wel nieuw met terugkoop optie;
- obstakel: volledige spiegeldaling, vanuit TBM het hoge drukinjectie lichaam aanbrengen (umbrella + druklucht), ventielen inbouwen;
- rotatie van schild: drukcylinders paarsgewijs op hydraulisch verschuifbare slee geeft reactiecomponent, clockwise en counter clockwise draaien van snijrad;
- slijtage: moeilijk voorspelbaar, KAS onderzoek, reserve set snijtanden beschikbaar houden;
- steunplaten bij toetreden boorkamer: 2 stuks aan bovenzijde inbouwen of gehele graaffront afdekken;
- blowout gevaar: reduceren door speciale bentoniet samenstelling;
- falen plaatsbepalingssysteem: controle door opdrachtgever!;
- bestuurbaarheid schild (duiken en vetergang): naast standaard procedures corrigeren met drukcylinders plus (optioneel) tweeledig (gelede) schild;
- wegvallen hydraulische druk hoofdcylinders: verdeling over 7 gescheiden groepen;
- staartafdichting: 1 reserve set meenemen;
- zuur grondwater: speciale bentoniet, Ph-waarden meten;
- doorboren van verschillende grondlagen met wateroverspanningen.

3.2.4 Ondersteunende TBM-voorzieningen

De TBM wordt vanuit de startschacht voorzien van energie en alle benodigde bouw- en bedrijfmaterialen. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de benodigde ondersteunende voorzieningen ten behoeve van het boorproces.

Voorzieningen in de tunnelbuis tbv het boorproces

De voorzieningen in de tunnelbuis zijn:
- HSP-kabel voor de energie-voorziening;
- een lichtkabel met tunnelverlichting;
- een telefoon- en datacommunicatiekabel;
- een waterleiding;
- een toe- en afvoerleiding van het hydraulisch systeem;
- eventueel een waterafvoerleiding.

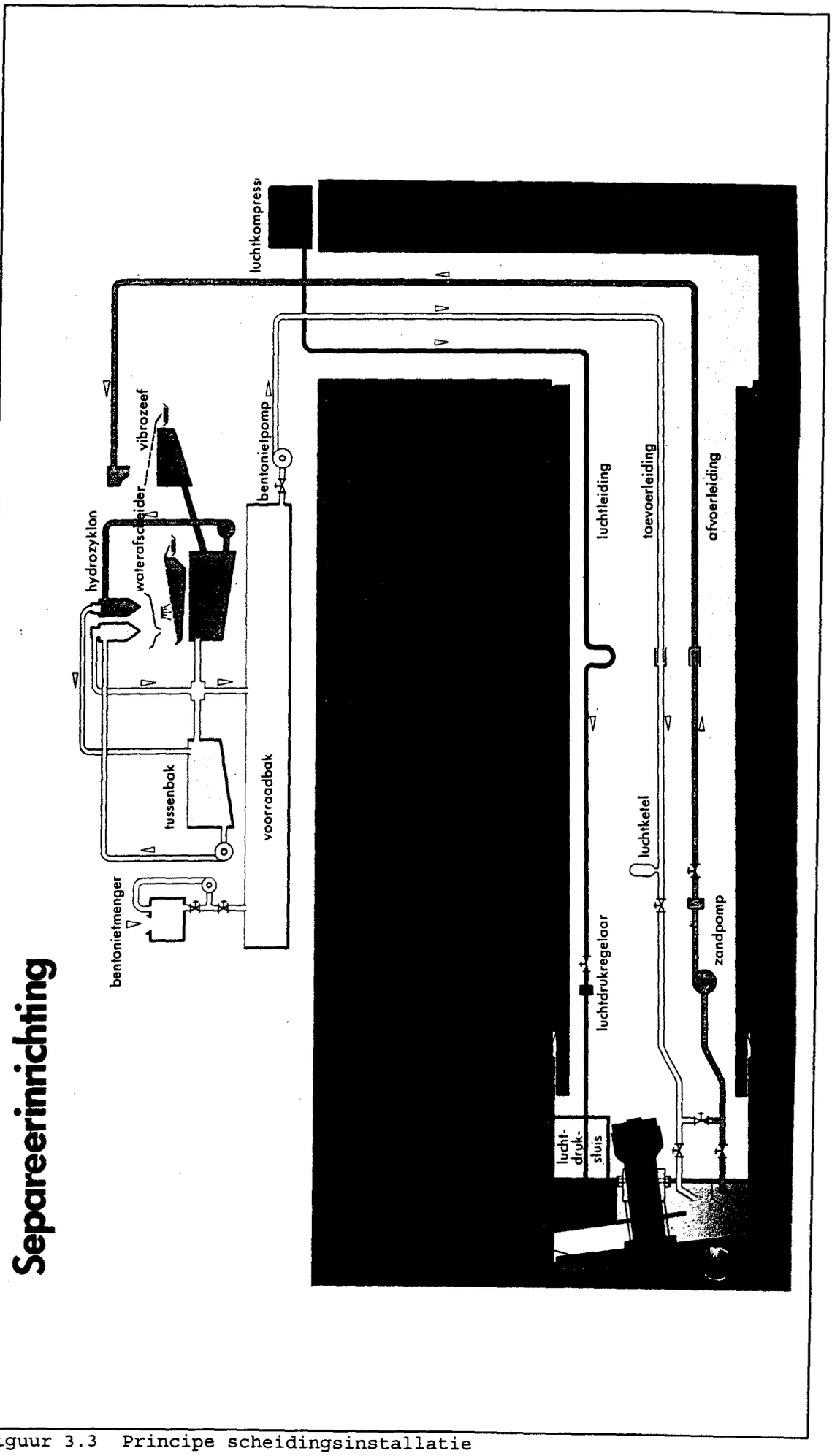
Deze leidingen worden vanuit veiligheidsoogpunt opgehangen aan de zijwand van tunnel.

Op de voet van tunnel ligt een spoorrails waarover de grout, segmenten, verbindingsmaterialen en personeel worden getransporteerd. De luchtverversingskoker wordt in de tunnelkruin opgehangen.
Alle bouwmaterialen voor de bouw van een ring worden op zo'n wijze met een trein getransporteerd dat per gebouwde ring slechts 2 treinbewegingen nodig zijn. De standaardtrein is opgebouwd uit een groutwagon, een segmentenwagon, een materiaalwagon en een locomotief.

Voorzieningen in de schacht en op het maaiveld tbv het boorproces

De voorzieningen in de schacht zijn:
- groutmenginstallatie met bijbehorende silo's: deze wordt indien mogelijk aan de tunnelingang opgesteld zodat de per vrachtwagen aangeleverde bouwstoffen zonder tussentransport in de silo's kunnen worden gestort en van daaruit de mixer voedt. De mixer voorziet de wagon van het tunneltransport;
- batterij-oplaadstation: bij toepassing van een elektrische locomotief. Op de schachtbodem opgesteld om kraantransport te vermijden;
- spoorrails in de schacht: ten behoeve van het laden, reinigen en wisselen van de treinwagons;
- tussenvoorraad van segmenten: als buffer en aanbrengen van uitrusting op segmenten. Deze voorraad moet minstens 2 tot 3 segmentdagproducties bevatten;
- omslagkraan: om de gehele bouwplaats te bedienen. Naast de bevoorrading van de tunnel met bouwstoffen (segmenten) en bouwhulpstoffen (leidingen, kabels, spoorrails, planken etc.) lost deze kraan materialen;
- mechanische werkplaats: een goed uitgeruste werkplaats tbv onderhoud, kleine reparaties en herstel van graafwerktuigen;
- compressiestation: voor de druklucht in het schild en de druklucht van segmentmontagewerktuigen;
- ziekensluis: zoals deze door de opdrachtgever wordt voorschreven indien geen goed uitgerust ziekenhuis in de onmiddellijke omgeving aanwezig is;
- noodstroomverzorging: bij uitval van het stroomnet schakelt deze automatisch aan en voorziet de bouwplaats van de minimaal benodigde stroom.

Met behulp van de gegevens uit de voorgaande paragrafen is het programma van eisen (technische specificaties) opgesteld voor de TBM van de 2e-Heinenoordtunnel.



Figuur 3.3 Principe scheidingsinstallatie

3.3 Beschrijving scheidingsinstallatie

3.3.1 Algemeen

Het functioneren van de scheidingsinstallatie is direct aan de TBM-voortgang gekoppeld. Ondanks deze directe relatie met de TBM is de scheidingsinstallatie niet vanzelfsprekend een onderdeel van de TBM-aanbieding van een leverancier. Bij de aanvraag zijn door de TBM-werkgroep geen technische specificaties mbt de scheidingsinstallatie meegestuurd en is er door de TBM-leveranciers geen scheidingsinstallatie in de aanbiedingen opgenomen. Desondanks wordt in deze rapportage een beschrijving gegeven van de voor het boorproces van een Hydro-schild noodzakelijke scheidingsinstallatie.

3.3.2 Eisen en keuze van het scheidingsmaterieel

De steunvloeistof dient om het graaffront te ondersteunen en de afgegraven gronddeeltjes met het hydraulisch systeem af te voeren. De taak van de scheidingsinstallatie is om de gronddeeltjes te scheiden van de steunvloeistof. Een complete scheiding wordt niet nagestreefd echter een grote gronddichtheid is voor de stortlokatie gewenst.
Voor kleine korrelgroottes is de scheiding lastig. Aan de steunvloeistof worden namelijk additieven toegevoegd om de vloeistof de gewenste eigenschappen te geven. De korrelgrootte van de toevoegingen en de afgegraven grond liggen soms dicht bij elkaar. De scheidingsinstallatie is niet in staat om de gewenste en ongewenste kleinere korreldeeltjes te onderscheiden zodat er een compromis mbt de scheidingsintensiteit moet worden gemaakt.
Afhankelijk van de benodigde ruimte, de opstelvoorwaarden en de ontwateringsmogelijkheden is er een duidelijk onderscheid van de scheidingsapparatuur bij een scheiding van korrels met een grootte van 25μ.
Scheiding van grotere korrelfracties geschiedt met een hydrocycloon met een aangekoppelde ontwaterinstallatie. Ter bescherming van de cycloon worden de grootste gronddelen eerst door een zeef gescheiden van de suspensie.
De scheiding van de fijnere korrelfracties vereisen een grotere inspanning. Een vlokkingsbekken met aangekoppelde gronddroging in centrifuges of filterpersen brengen hoge investerings- en bedrijfskosten met zich mee. Alternatieven zoals storten of mengen van de restvloeistof kunnen lokaal economisch aantrekkelijke oplossingen zijn.
Omdat de afmetingen van de tunnel het niet toelaten de cyclonen op de trailers te bouwen moet de complete scheidingsinstallatie op de oever worden geplaatst.

3.3.3 Technische beschrijving van de scheidingsinstallatie

De scheidingstrappen van de scheidingsinstallatie worden in deze paragraaf achtereenvolgens beschreven.

<u>Eerste scheidingstrap</u>
De vervuilde steunvloeistof doorloopt vanuit de afvoerpijp:
- de stenenkist : deze dient om de bewegingsenergie van de vloeistofstroom te verkleinen en voor een gelijkmatige verdeling op het zeefvlak;
- de voorzeef : deze dient om de nakomende installaties te beschermen tegen grote korreldelen. Het bestaat uit een trillende metalen- of kunstofzeef met een maaswijdte van 4 à 5 mm. De afgezeefde gronddelen worden afgevoerd.

<u>Tweede scheidingstrap</u> (middelste cycloonscheidingstrap)
Het afvoermengsel stroomt van de voorzeef in een opvangreservoir onder de ontwaterinstallatie, van waaruit het mengsel naar de eerste cycloon wordt gepompt. De eerste cycloon scheidt de korrelgroottes van 100μ en groter (de zandfracties). Op een ontwaterinstallatie

wordt het watergehalte van het mengsel tot circa 18 à 20% teruggebracht. Het gescheiden zand wordt met een transportband afgevoerd. Het overloopmengsel van de cycloon en de zeefdoorslag stromen terug naar een opvangreservoir van de ontwaterinstallatie. Bij variabele steunvloeistoftoevoer of plotselinge onderbreking van de toevoer kan de pomp de cycloon enige tijd blijven voeden vanuit het opvangreservoir.

Derde scheidingstrap (fijne cycloonscheidingstrap)
Een tweede cycloon sluit op de eerste aan. Ook hier zorgt een circulatie voor het onderhouden van de bedrijfstoestand bij storingen in de steunvloeistoftoevoer.
De tweede cycloon heeft dankzij zijn kleine diameter een aanzienlijk hogere omwentelingsversnelling dan de eerste cycloon. Ter oriëntatie: gangbare diameters van de eerste cycloon en tweede cycloon zijn 500 en 120 mm. In geval van gunstige en gelijkmatige bedrijfswerkzaamheden kan een scheiding worden verkregen tot circa 30μ. Met behulp van een ontwaterinstallatie kan een groot deel vaste stof worden ingedikt, opgevangen en afgevoerd.
Al naar gelang van de beschikbare apparatuurafmetingen kan de installatie met meerdere parallel werkende installatiemodulen worden uitgevoerd. Om overvloedige suspensietoevoer naar de installatie te voorkomen schakelt een elektrisch bewakingsysteem bij funtiestoornissen de scheidingsinstallatie en de toevoer van de suspensie uit.

Vierde scheidingstrap (fijnste scheidingstrap)
De scheiding van de gronddeeltjes met een korrelgrootte kleiner dan 30μ kan op twee manieren gebeuren namelijk:
- uitvlokken van de suspensie en ontwatering van de uitgevlokte gronddeeltjes door filterpersen;
- directe scheiding van de zwevende delen door centrifuges.

Beide methoden zijn in de praktijk toegepast. De ontwatering mbv filterpersen wordt niet aangeraden vanwege:
- verontreiniging van de bentoniet door de uitvlokkingsmiddelen;
- verlies van bentoniet in de reststof;
- hoger watergehalte van de reststof dan bij centrifugeren.

De centrifuges worden door een dichtheidsgeregelde doseerpomp vanuit de tussenopslag gevoed. Onder normale omstandigheden is per installatie bij een toevoer van 50 m3 per uur een produktie van 10 ton vaste stof en een scheiding tot een korrelgrootte 10 μ te verwachten. Het bentoniet wordt met het residu weer teruggewonnen.

3.3.4 Uitgangspunten ontwerp van de scheidingsinstallatie

De resultaten van de berekeningen en de ontwerpfilosofie van de scheidingsinstallatie leidt tot de volgende ontwerpuitgangspunten van de scheidingsinstallatie:
- steunvloeistof : bentoniet
- maximale suspensietoevoer : 1000 m3/uur
- continue suspensietoevoer : 900 m3/uur
- maximale dichtheid : 1,35 ton/m3
- continue dichtheid : 1,25 m3/uur
- maximale korrelgrootte : 150 mm

4 Selectieprocedure TBM-leveranciers 2e-Heinenoordtunnel

4.1 Aanbiedingen TBM-leveranciers

Na selectie van 7 TBM-leveranciers is de TBM-aanvraag voor de 2e-Heinenoordtunnel verstuurd naar deze 7 TBM-leveranciers. Door de 7 leveranciers zijn 5 aanbiedingen ingediend omdat 2 TBM-leveranciers gezamenlijk een aanbieding indienden.
Ondanks dat er door de TBM-werkgroep om een Hydro-schild was gevraagd hadden 2 leveranciers een EPB-schild aangeboden. De redenen hiervoor waren:
- een EPB zou goedkoper zijn: er is onder andere geen scheidingsinstallatie nodig;
- men heeft veel ervaring met EPB-schilden met een diameter van 8,3 meter. In Japan past men voor de Tokyo Bay-tunnel een Slurry-schild van 13,9 meter toe omdat de referenties van EPB-schilden slechts reiken tot een diameter van 10.8 meter. Voor grotere diameters is veel power nodig bij een EPB-schild. Voor de Slurry-schilden is de ervaring met grote diameters in de range van 10-14 meter talrijker. Ontwikkelingen gaan stap voor stap dus voor het toepassen van EPB-schilden met grote diameter is men nog terughoudend. Voor kleinere diameters, rond de 8 meter, is er wel voldoende ervaring met EPB's. De toepassing van een EPB voor de 2e-Heinenoordtunnel (D=8.3 m) komt dus goed overeen met de ervaring die men heeft.

4.2 Technische beoordeling TBM-aanbiedingen

Een technische beschrijving van de hoofdonderdelen van de TBM-machines is in hoofdstuk 3 gegeven.

De aanbiedingen zijn eerst gecontroleerd op volledigheid. Aan de hand van een technische TBM-checklist is de volledigheid van de verschillende aanbiedingen gecontroleerd en zijn de verschillende aanbiedingen met elkaar vergeleken.

De ervaring heeft geleerd dat naast de controle of de aanbiedingen voldoen aan het gestelde programma van eisen ook moet worden gelet op de volgende technische aspecten:
- waarborging stabiliteit graaffront en mogelijkheid tot betreden van graafkamer;
- voorzieningen mbt waterdichtheid TBM;
- hoofdlager (constructie, levensduur, vervangingsmogelijkheid e.d.);
- staartafdichting;
- groutsysteem om oversnijdingsruimte op te vullen;
- constructie van snijrad (o.a. aantal bewegingsvrijheden);
- geïnstalleerd vermogen;
- voorzieningen mbt voorkoming van tordering van de TBM;
- veiligheidsvoorzieningen van de TBM bij:
  * bij stroomuitval (benodigde handelingen);
  * brand;
  * explosie;
  * lekkage;
- ARBO-wetgeving, Stoomwezen, Caissonwet;
- reserve-onderdelen;
- ringbouwplanningssysteem;
- plaatsbepalingssysteem/besturingssysteem;
- mogelijke vervanging van essentiële onderdelen (hoofdlager, staartdichting, snijtanden etc.);
- meetapparatuur en data-verwerking/opslag (in bijlage 2 is een lijst opgenomen met metingen die standaard tbv van het boorproces worden uitgevoerd);
- tekensystemen en software (aan de laatste ontwikkelingen aangepast?);
- zwaartepunt van TBM;
- vetconsumptie van TBM-onderdelen;

- wiellast van trailer op lining;
- aarding van de TBM;
- fabrikanten en merken van de verschillende TBM-onderdelen;

4.3 Financiële beoordeling TBM-aanbiedingen

De financiële vergelijking van de aanbiedingen van de verschillende TBM-leveranciers is gebeurt aan de hand van tabel 4.1

Kostenitems Hydroschild	Kostenitems EPB-schild
1a ontwerp TBM b assisteren, goedkeuren opdrachtgever c tekeningen/handboeken/specificaties	1a ontwerp TBM b assisteren, goedkeuren opdrachtgever c tekeningen/handboeken/specificaties
2a bouw TBM b proefdraaien op fabriek	2a bouw TBM b proefdraaien op fabriek
3a demontage/transport/levering op bouwplaats b montage op bouwplaats c proefdraaien op bouwplaats	3a demontage/transport/levering op bouwplaats b montage op bouwplaats c proefdraaien op bouwplaats
4a levering/installeren survey-equipment	4a levering/installeren survey-equipment
5a assistentie eerste 200 meter boren (vastleggen aantal mensen van leverancier) b groutinstallatie c remote control d HV-kabel e reserveonderdelen	5a assistentie eerste 200 meter boren (vastleggen aantal mensen van leverancier) b remote control c HV-kabel d reserveonderdelen
6a set drill-bits b verzekering	6a set drill-bits b verzekering
Optelling van deze 6 kostenposten geeft de basis prijs van de TBM echter de TBM is nu nog niet klaar voor gebruik (turn key).	Optelling van deze 6 kostenposten geeft de basis prijs van de TBM echter de TBM is nu nog niet klaar voor gebruik (turn key).
7 graaffontstabiliteit a bentoniet produktie materieel b bentonietverbruik	7 graaffontstabiliteit a foam produktie materieel b foamverbruik c extra stroomverbruik
8 -	8a extra wapening b grondbehandeling tbv afvoer
9 ontgravingsmaterieel a toe en afvoerleidingen b boosterpompen met en zonder transformer c scheidingsinstallatie	9 ontgravingsmaterieel a grondwagons b locomotieven c rails d wissels
10 terugkoopaanbod	10 terugkoopaanbod

Tabel 4.1 Kostenvergelijking aanbiedingen TBM-leveranciers.

Aan de TBM-leveranciers zijn vragen gesteld om een volledig financieel beeld te krijgen van de TBM. Het is van belang gebleken bij de leveranciers veel aandacht te besteden aan de check van de volledigheid van de aanbieding (turn-key/klaar voor gebruik zijn).

Naast de aspecten uit tabel 4.1 is op kostprijsgebied gelet of de volgende onderdelen in de aanbiedingen waren opgenomen en wat de kosten waren van:
- reserveonderdelen;
- slijtdelen zoals een set drill bits;
- tunnel quidance-system;
- groutsysteem;
- bentonietverbruik, foamtoepassing;
- ontgravingsmaterieel (locomotief, wagons, rails etc.);
- stroomtransformers e.d.;
- hydraulisch systeem; pompinstallaties, afsluiters pijpen, spillage tank etc.;
- scheidingsinstallatie;
- tunnelventilatie;
- voorzieningen tbv industrieel water;
- kosten om alle elektrische componenten explosie-proof te maken;
- toezegging van leverancier dat de in budgetprijs ook de kosten voor levering, installatie, proefdraaien en x meter begeleiding plus inwerken boorploeg op de bouwplaats zijn opgenomen;

Opmerking:
Bedacht moet worden dat de leverancier meestal alleen de TBM van graafwiel t/m achterkant van het trailersysteem van de TBM aanbiedt. Dit houdt in dat kabels, ventilatie, hydraulisch systeem, rails en bielzen en af- en toevoersystemen van achterkant TBM t/m maaiveld niet in de prijs zijn inbegrepen. Dit geldt meestal ook voor de scheidingsinstallatie, back-up generator, compressors, electriciteits- en bentonietverbruik.

4.4 Definitieve keuze TBM

In een drietal gespreksronden zijn de TBM-leveranciers apart ondervraagd.

De 2 EPB-aanbiedingen vielen al na de eerste gespreksronde af vanwege onvoldoende vertrouwen van de TBM-werkgroep in de toepasbaarheid van een EPB-schild onder de omstandigheden die er heersen bij de 2e-Heinenoordtunnel (hoge waterdruk van 3,4 bar en 70 à 80 % zandgrond).

In de tweede gespreksronde zijn de overgebleven TBM-leveranciers verder ondervraagd. Ten slotte is er nog een derde gespreksronde geweest waarbij aan de twee meestbelovende TBM-aanbieders vragen zijn gesteld.

Uiteindelijk is voor een Slurry-schildleverancier gekozen.

Bijlagen

Bijlage 1 Overzicht materieelverschillen tussen EPB- en Hydo-schild

EPB-schild	Hydro-schild
TBM - schild - aandruk cylinders - graafwiel - frontondersteuning (foam en grond-drukbalance - staartdichting (staalborstels en vet)	TBM - schild - aandruk cylinders - graafwiel - frontondersteuning (bentoniet en lucht-drukbuffer) - staartdichting (neopreen)
segmenthandling	segmenthandling
segmenterector	segmenterector
groutinjectie	groutinjectie
foaminstallatie - foamconsumptie	bentonietcentrale - bentonietconsumptie
afvoer grond - rotadumpers - locomotieven - depot	afvoer grond - baggerpomp - boosterstation - leidingen - grondscheidingsinstallatie
ZED 261 (guidance-system)	ZED 261 (guidance-system)
luchtdruk (compressoren)	luchtdruk (compressoren)
diverse transportmaterieel - segmenttrein - grouttrein - personeelstrein - platte trein - locomotief	diverse transportmaterieel - segmenttrein - grouttrein - personeelstrein - platte trein - locomotief
diverse services in tunnel - HSP-kabel 10 kV - luchtdruk dubbel - rails/wissels	diverse services in tunnel - HSP-kabel 10 kV - luchtdruk dubbel - aanvoerleiding bentoniet 350 mm - afvoerleiding grondmengsel 350 mm - rails/wissels
groutcentrale 25 m3/uur	groutcentrale 25 m3/uur
segmentopslag - aanbrengen neopreen afdichtingsprofie-len - aanbrengen bitumenstroken - inzepen segmenten	segmentopslag - aanbrengen neopreen afdichtingspro-fielen - aanbrengen bitumenstroken - inzepen segmenten

Bijlage 2 Standaard metingen tbv het boorproces

Voor geboorde tunnels worden ten behoeve van de kwaliteitsborging van het boorproces en de ringbouw de volgende metingen uitgevoerd en gerapporteerd.

Metingen ten behoeve van het boorproces

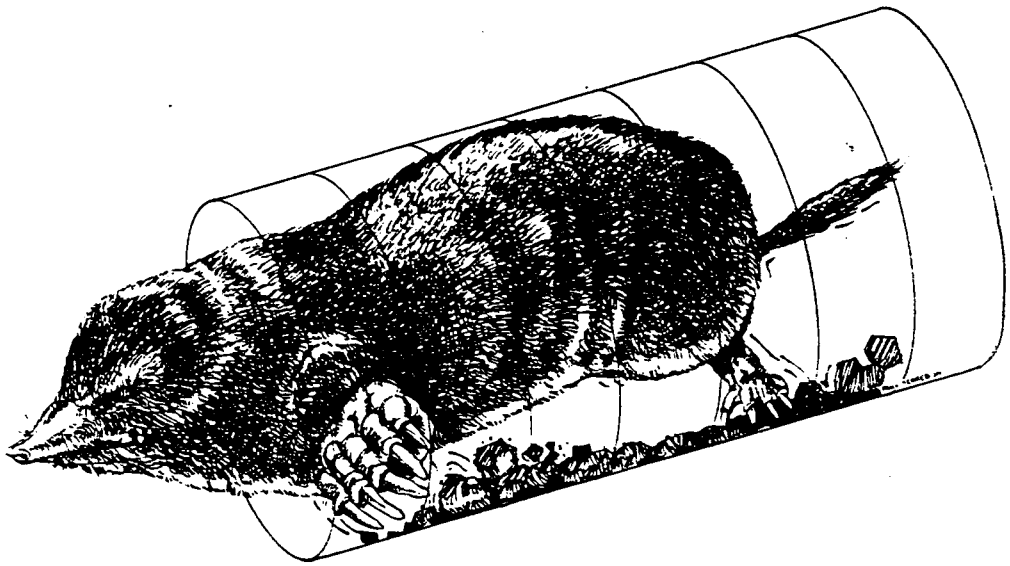
- steundruk aan het graaffront;
- bentonietspiegelniveau;
- draaimoment en draaisnelheid van het snijrad;
- draaitijd en draairichting van het snijrad;
- snijradpositie;
- drukkracht van de drukvijzels;
- schildregeling (horizontale en vertikale helling van de schildas);
- schildverdraaiing tgv torsie;
- grondwaterdruk aan het graaffront;
- aan- en afvoermengsel van de suspensie;
- kwaliteitscontrole van de suspensie;
- luchtverbruik tijdens graaffrontondersteuning onder druklucht;
- stroomverbruik van de aggregaten.

Metingen ten behoeve van het bouwen van de tunnelring

- geometrische positie van de ring ter plaatse van staartopening (spleet tussen buitenkant schildmantel en segment);
- geometrische positie van de ring ten opzicht van de schildas;
- groutdruk en groutmengsel van het grout dat de staartopening opvult tussen schildmantel en segment.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Bouwdienst Rijkswaterstaat
Droge Infrastructuur
Afdeling Tunnelbouw

Keuze Tunnel-Boor-Machine (TBM) 2e-Heinenoordtunnel



Bouwdienst Rijkswaterstaat Afdeling Tunnelbouw

datum : 3 februari 1995
documentnr. : LVTH-D-94005
opsteller : ir Arjan van der Put
bron : Tunnel Combinatie Heinenoord bestaande uit:
Ballast Nedam Beton en Waterbouw bv, Hollandsche Beton en Waterbouw bv, Van Hattum en Blankevoort bv, Wayss & Freytag ag.
status : definitief

Voorwoord

Hierbij wil ik iedereen bedanken die heeft meegeholpen aan de totstandkoming van dit document.
In het bijzonder wil ik alle leden van de tunnelboormachine-werkgroep bedanken voor de prettige samenwerking en goede sfeer in de afgelopen periode.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Keuze TBM-type 2e-Heinenoordtunnel	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Beschrijving grondopbouw	3
2.3	Overzicht mogelijke TBM-typen	5
2.4	Toepassingscriteria van de verschillende TBM-typen	12
2.5	Keuze TBM-type	17
2.5.1	Algemeen	17
2.5.2	Criteria	17
2.5.3	Grove selectie TBM-type	18
2.5.4	Definitieve keuze TBM-type	21
2.5.4.1	Algemeen	21
2.5.4.2	EPB-schild	21
2.5.4.3	Slurry-schild op Duitse wijze (Hydro-schild)	25
2.5.4.4	Conclusie	27
3	Bepaling programma van eisen TBM	28
3.1	Algemeen	28
3.2	Beschrijving TBM-ontwerp	28
3.2.1	Uitgangspunten TBM-ontwerp	28
3.2.2	Technische beschrijving TBM-ontwerp	31
3.2.2.1	Algemeen	31
3.2.2.2	Schild	31
3.2.2.3	Ontgravingsmechaniek	32
3.2.2.4	Aandrijvingshydrauliek	32
3.2.2.5	Erector	33
3.2.2.6	Stuurcabine	33
3.2.2.7	Grondafvoer	34

3.2.2.8 Staartdichting 37
3.2.2.9 Trailers 37
3.2.3 Maatregelen tbv veiligheid en risico-preventie 38
3.2.4 Ondersteunende TBM-voorzieningen 38
3.3 Beschrijving scheidingsinstallatie 41
3.3.1 Algemeen 41
3.3.2 Eisen en keuze van het scheidingsmaterieel 41
3.3.3 Technische beschrijving van de scheidingsinstallatie 41
3.3.4 Uitgangspunten ontwerp van de scheidingsinstallatie 42
4 Selectieprocedure TBM-leveranciers 2e-Heinenoordtunnel 43
4.1 Aanbiedingen TBM-leveranciers 43
4.2 Technische beoordeling TBM-aanbiedingen 43
4.3 Financiële beoordeling TBM-aanbiedingen 44
4.4 Definitieve keuze TBM 45

Bijlagen

Bijlage 1 Overzicht materieelverschillen tussen EPB- en Hydo-schild 46
Bijlage 2 Standaard metingen tbv het boorproces 47

1 Inleiding

Ten behoeve van de oplossing van de congestieproblematiek ter plaatse van de Heinenoordtunnel wordt de bestaande Heinenoordtunnel gerenoveerd. Deze renovatie bestaat uit:
- het uitbreiden van de snelverkeerstroken van twee naar drie rijstroken door de bestaande langzaamverkeerstroken aan te passen;
- de aanleg van een langzaamverkeerstunnel voor landbouw- , fiets- en voetgangersverkeer.

Met de renovatie van de westelijke tunnelbuis werd in 1994 begonnen. Het langzaamverkeer kan thans alleen gebruik maken van de westelijke tunnelbuis waar in verband met het huidige tweerichtingsverkeer een verkeersreguleringssysteem noodzakelijk is.

Het ontwerp van de 2e-Heinenoordtunnel voor het langzaam verkeer behelst een geboorde tunnel inclusief toeritten, onder de Oude Maas bij Heinenoord in de gemeenten Barendrecht en Binnenmaas. Het ontwerp wordt gemaakt in projectteamverband door de Bouwdienst Rijkswaterstaat en de Tunnel Combinatie Heinenoord (verder TCH genoemd in deze rapportage).
In 1990 is in opdracht van de Bouwdienst Rijkswaterstaat reeds een studie uitgevoerd door Ballast Nedam Beton en Waterbouw en Wayss & Freytag voor uitvoering van de 2e-Heinenoordtunnel als boortunnel. Het project kwam echter niet in uitvoering vanwege financiële redenen. In 1993 heeft de overheid dit project aangewezen als praktijkproject in het kader van de uitbreiding van de ondergrondse infrastructuurkennis en zijn er financiële middelen vrijgemaakt.

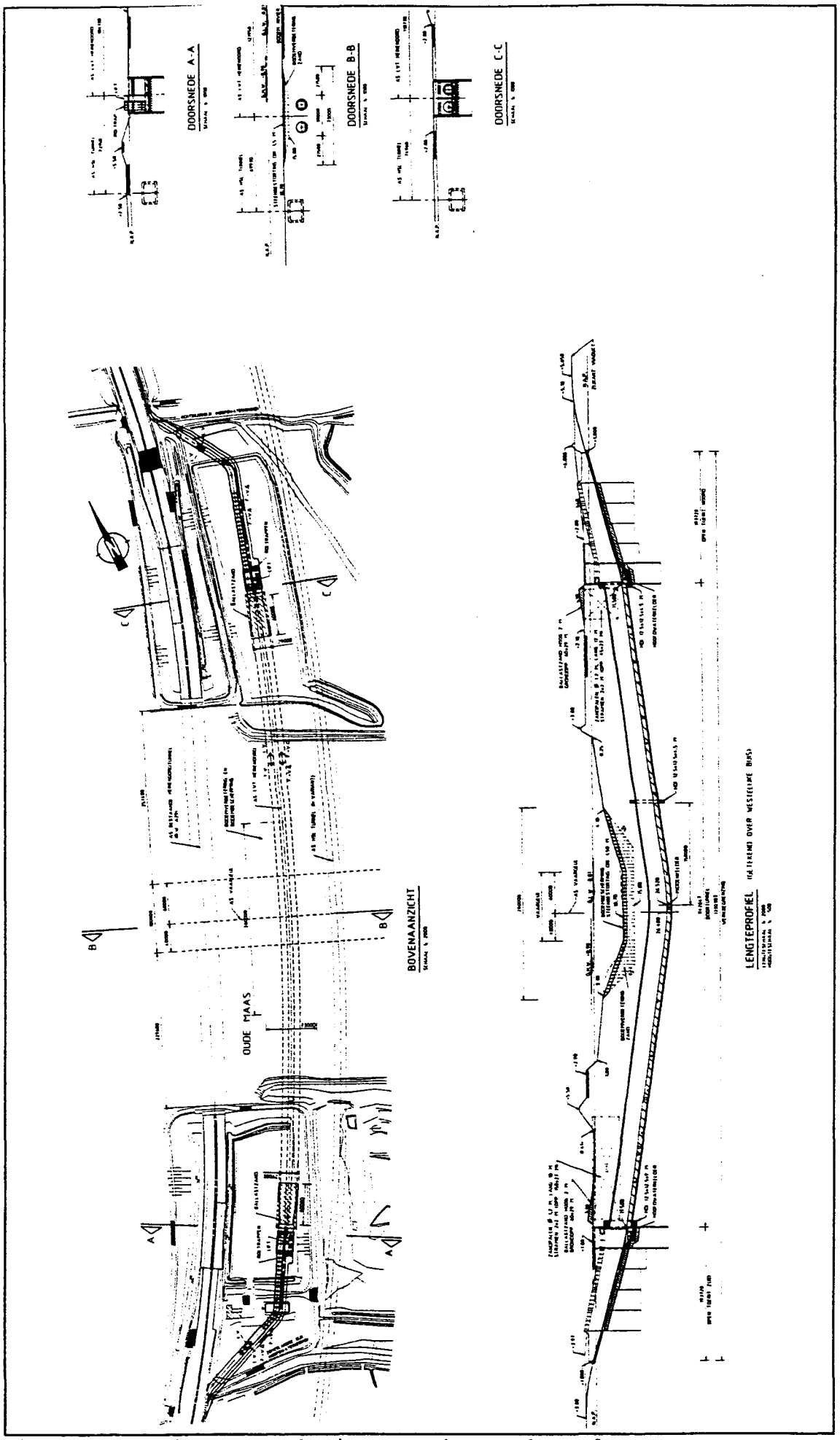
Het doel van deze rapportage is het vastleggen van de verworven kennis die is opgedaan bij de keuze van de tunnelboormachine (in het vervolg van deze rapportage kortweg TBM genoemd) van de 2e-Heinenoordtunnel.

Het voorliggende rapport "Keuze TunnelBoorMachine 2e-Heinenoordtunnel" beschrijft de aspecten mbt de keuze van de TBM van het boortunnelproject 2e-Heinenoordtunnel en geeft een samenvatting van het TBM-proces van juni t/m december 1994. In deze periode is een keuze van het TBM-type gemaakt, het programma van eisen voor de TBM opgesteld, de TBM-aanvraag verzonden en heeft een TBM-leverancier selectieprocedure plaatsgevonden.

Voor de keuze van de tunnelboormachine is een TBM-werkgroep samengesteld. Deze werkgroep bestaat naast TCH-leden ook uit Bouwdienstmedewerkers vanwege het projectteam- en praktijkkarakter van het project. De Bouwdienst heeft met betrekking tot de keuze van de TBM slechts een observerende rol vervuld.
De TBM-werkgroep bestaat uit de volgende leden:

Claus Becker	(TCH, Wayss & Freytag)
Kees Fransen	(TCH, Hollandsche Beton- en Waterbouw)
Bruno Gärtner	(TCH, Wayss & Freytag)
Erdogan Gürkan	(TCH, Wayss & Freytag)
Wim van de Linde	(Bouwdienst Rijkswaterstaat)
Bas Obladen	(TCH, Ballast Nedam Beton en Waterbouw)
Arjan van der Put	(Bouwdienst Rijkswaterstaat)
Marinus Quaak	(TCH, van Hattum en Blankevoort)
Ed de Ruig	(TCH, van Hattum en Blankevoort)
Gert van Ruit	(Bouwdienst Rijkswaterstaat)
Harry van Splunder	(TCH, van Hattum en Blankevoort)
Joost Vlasblom	(Bouwdienst Rijkswaterstaat)
Sytse van Vliet	(TCH, Ballast Nedam Beton en Waterbouw)

In deze rapportage zijn grote delen mbt de keuze TBM-type (hoofdstuk 3) en bepaling programma van eisen TBM (hoofdstuk 4) overgenomen en vertaald uit stukken van TCH. Eveneens zijn delen uit het rapport "Technische & Financiële Evaluatie Offertes Tunnelboormachines" van de TBM-werkgroep in deze rapportage verwerkt.



Figuur 2.1 Alignementstekening 2e-Heinenoordtunnel

2 Keuze TBM-type 2e-Heinenoordtunnel

2.1 Inleiding

Het boortracé en het grondonderzoek vormen de basis voor de keuze van het TBM-type en de eisen die aan de TBM moet worden gesteld.
Om de keuze van het TBM-type te kunnen onderbouwen moet er een indruk zijn van het algemene ontwerp van de boortunnel waarvoor de TBM-type keuze moet worden gemaakt. De algemene gegevens van de boortunnel die men moet weten zijn: de grondopbouw, het alignement van de boortunnel (dekking, boogstralen, lengte), de waterdruk en de afstand tussen een eventuele tweede boortunnelbuis. De alignementstekeningen van het boordeel van de 2e-Heinenoordtunnel zijn in figuur 2.1 weergegeven.

2.2 Beschrijving grondopbouw

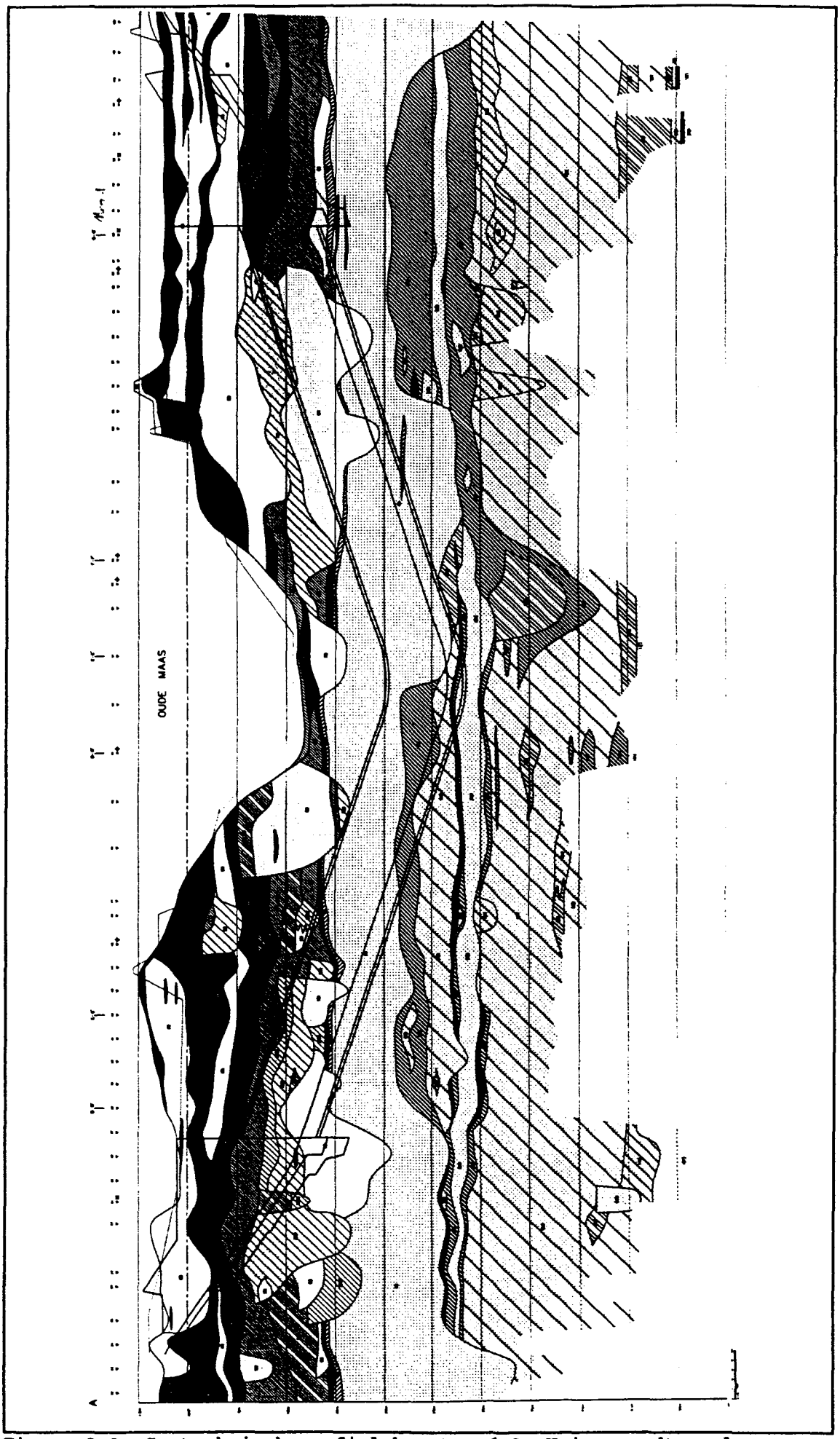
De bodemopbouw is voor iedere bouwlokatie verschillend. De grondopbouw ter plaatse van de 2e-Heinenoordtunnel kan typisch Nederlands worden genoemd. In figuur 2.2 is een geotechnisch profiel hiervan weergegeven.

Van zuid naar noord worden globaal de volgende grondsoorten aangetroffen in de boordoorsnede van het geotechnisch profiel:
Zuidoever:
- klei/zwak humeus/met dunne zandlaagjes, klei/zandig/tot zand/kleiig, zand plaatselijk met dunne klei- en veenlaagjes;
- klei, laagje veen, zand/middel grof tot matig;
- zand/middel grof tot matig.

Oude Maas:
- hoofdzakelijk zand/middel grof tot matig en deels klei/plaatselijk zandig en of met dunne zandlaagjes;
- hoofdzakelijk zand/middel grof tot matig en deels klei/plaatselijk zandig en of met dunne zandlaagjes, zand/plaatselijk met dunne kleilaagjes;
- hoofdzakelijk zand/middel grof tot matig onderbroken door een zandlaag/middel tot grof/vaak grindig.

Noordoever:
- hoofdzakelijk zand/middel grof tot matig onderbroken door een kleilaag/siltig/zandig;
- hoofdzakelijk zand/plaatselijk dunne kleilaagjes onderbroken door een kleilaag/siltig/zandig;
- veen, klei/humeus tot sterk humeus vak met veenstukjes, klei/zwak humeus/met dunne zandlaagjes.

Het grondonderzoek vertoont wisselende zand- en kleilagen langs het boortracé. Stenen van noemenswaardige grootte zijn niet te verwachten.
In de doorlatende zandlagen wordt een grondwaterdruk tot de volle hoogte van de waterstandhoogte in de Oude Maas verwacht.



Figuur 2.2 Geotechnisch profiel boortracé 2e-Heinenoordtunnel

2.3 Overzicht mogelijke TBM-typen

In deze paragraaf worden de TBM-typen, die in zand en kleibodem toepasbaar zijn, opgesomd en geanalyseerd.
TBM-typen die niet inzetbaar zijn in de grondopbouw van de 2e-Heinenoordtunnel worden hier niet genoemd. Evenzo wordt de oplossing "graaffrontondersteuning door luchtdruk voor het gehele boortracé" als niet meer overeenkomend met de stand van de techniek gezien. Door het uitwisselen van onderdelen kan er veel variëteit van de beschreven TBM-typen ontstaan.

De TBM's kunnen worden onderverdeeld in de volgende typen:

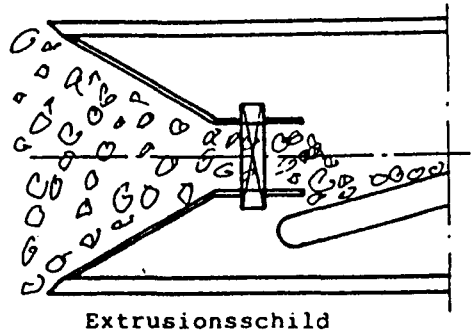
1 Mechanische ondersteuning van het graaffront:
- extrusie-schild
- bühnen-schild
- verbauplatten-schild
- schurfscheiben-schild

2 Ondersteuning van het graaffront door vloeistof:
- ontgraving met teilschnittmachine
- ontgraving met vollschnitt ("Japanse bouwmethode")
- ontgraving met vollschnitt ("Duitse bouwmethode")

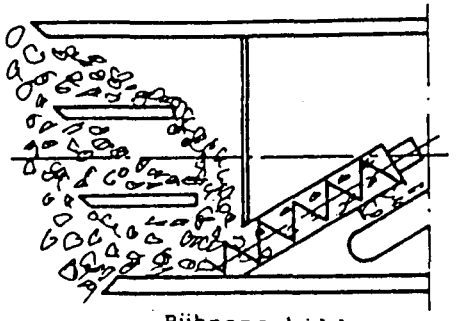
3 Ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid:
- High Density Slurry Shields
- Slime Shield/ Mud injection Shield
- Earth Pressure Balance Shield (standaard-uitvoering)
- Earth Pressure Balance Shield (meng-kamer-uitvoering)
- Earth Pressure Balance Shield (muckring-uitvoering)

4 Standaard TBM (Mixschild)

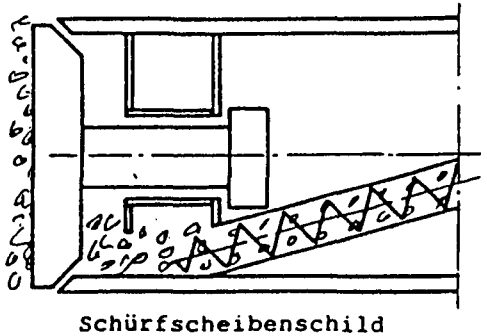
De verschillende TBM-typen zijn in de figuren 2.3 t/m 2.5 weergegeven. In de tabellen 2.1 t/m 2.6 worden de kenmerken van de TBM-typen beschreven.



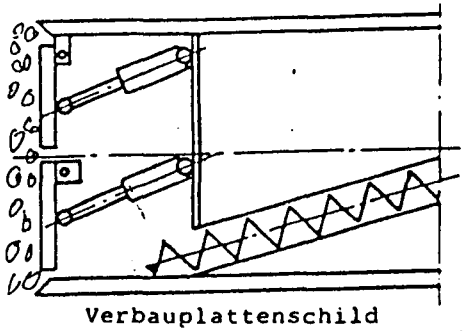
Extrusionsschild



Bühnenschild



Schürfscheibenschild

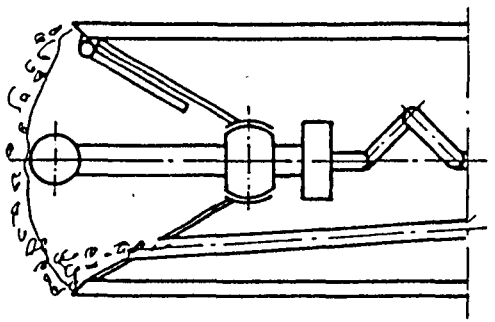


Verbauplattenschild

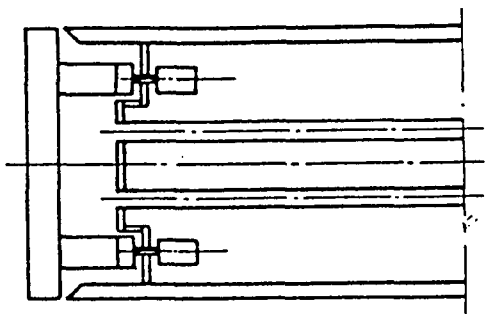
Figuur 2.3 TBM-typen met mechanische graaffrontondersteuning

Tabel 2.1 TBM-typen met mechanische ondersteuning van het graaffront

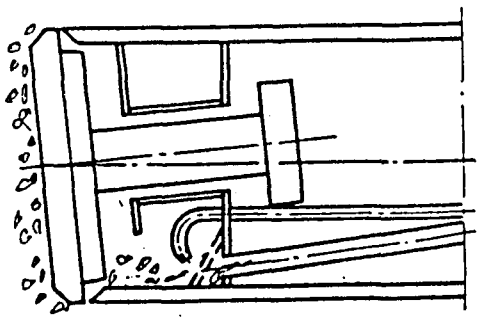
1 Mechanische ondersteuning van het graaffront				
Kenmerken	Extrusie-schild	Bühnen-schild	Verbauplatten-schild	Schurfscheiben-schild
graaffrontondersteuning	Vlakke ondersteuning door grondoverdruk in de ontgravingskamer. De opbouw van de steundruk geschiedt bij de voortgang door insnoering van de doorsnede (extrusie).	Onder hoek van natuurlijk talud op eventueel beweegbare tussenplateaus.	Op deelvlakken van het graaffront door beweegbare steunplaten die door drukcilinders worden aangedrukt.	Gedeeltelijk door de gesloten voorzijde van het ontgravingswiel, dat verend wordt aangedrukt.
waterdichtheid	Door het vormen van een grondprop.	Door middel van luchtdruk.	Door middel van luchtdruk.	Door middel van luchtdruk.
Ontgravingsmethode	Niet aanwezig.	Ontgravingsmaterieel op de plateaus (schop, kleine graafmachine etc.).	Bagger- en ontgravingsmaterieel op de vrije doorsnedevlakken.	Snijrad met snijwerktuigen langs de doorgangsopeningen in het snijrad.
afvoer van grond	Als een pasta door een verstelbare diafragma-opening naar een transportband	Door afvoer in den droge en luchtsluis (cellensluis, avegaar).	Door afvoer in den droge en luchtsluis.	Door afvoer in den droge en luchtsluis.
toegang tot de graafkamer	Door eventueel een verbrede extrusie-opening en onder luchtdruk.	Door een luchtsluis.	Door een luchtsluis.	Door een luchtsluis.
opmerkingen	Geen.	Regulering ontgraving binnen of buiten de drukkamer.	Regulering ontgraving binnen of buiten de drukkamer.	



Abbau mit Teilschnittmaschine



Abbau im Vollschnitt
"japanische Bauart"



Abbau im Vollschnitt

Figuur 2.4 TBM-typen met vloeistofondersteuning van het graaffront

Tabel 2.2 TBM-typen met ondersteuning van het graaffront door vloeistof

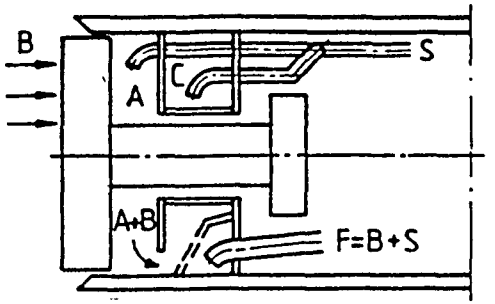
2 Ondersteuning van het graaffront door vloeistof			
Kenmerken	Ontgraving met teilschnitt	Ontgraving met vollschnitt ("Japanse bouwmethode")	Ontgraving met vollschnitt ("Duitse bouwmethode")
graaffrontondersteuning	Een drukgeregelde vloeistofvulling in de graafkamer.	Een drukgeregelde vloeistofvulling in de graafkamer.	Door een luchtkussen achter de duikwand en een drukgeregelde vloeistofvulling in de graafkamer.
waterdichtheid	Door steunvloeistof.	Door steunvloeistof.	Door steunvloeistof.
afgraafmethode	Een baggercutter.	Een zeer dicht snijrad met spleetopeningen.	Een open spaakwiel eventueel door platen afsluitbaar.
afvoer van grond	door een beweegbare cutterkop losgesneden en vervolgens hydraulisch afgevoerd.	Hydraulisch, het inbouwen van een steenbreker is mogelijk.	Hydraulisch, het inbouwen van een steenbreker is mogelijk.
toegang tot de graafkamer	Door een luchtsluis bij verlaagd steunvloeistofniveau en luchtdruk in de graafkamer. Beschermplaten aan bovenzijde.	Door een luchtsluis bij verlaagd steunvloeistofniveau en luchtdruk in de graafkamer.	Door een luchtsluis in kruin van de TBM met achter de duikwand een beschermde ingang en een verlaagd steunvloeistofniveau plus luchtdruk in de graafkamer.
opmerkingen	Geen.	Geen.	Het snijrad kan verschuifbaar worden uitgevoerd tov as van de TBM en onder een hoek worden geplaatst tov de as van de TBM.

Masseströme: A, B, C, F, S

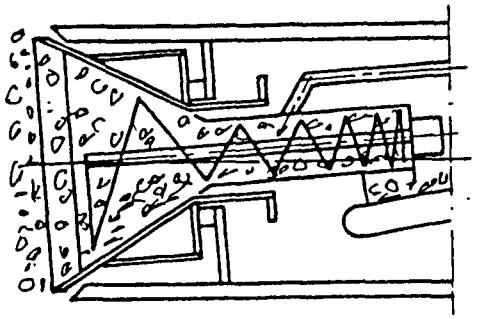
Grenzwerte:

A = S) Slurry-Shield
C = 0)

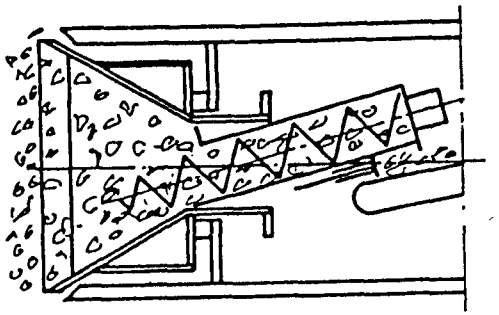
A = 0) Erddruckschild
C = S)



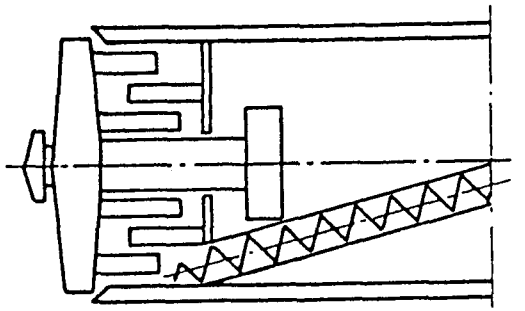
High Density Slurry Shields



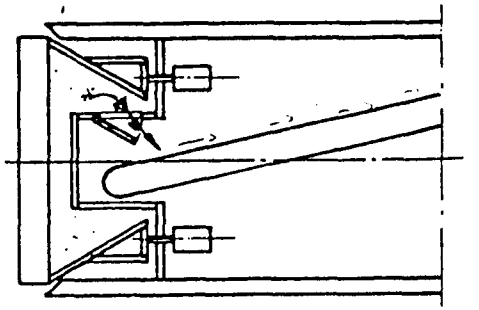
Slime Shield/ Mud injection Shield



Erddruckschilde
- Standardbauart -



Erddruckschild
- Mischkammerbauart -



Erddruckschild
- Bauart mit Muckring -

Figuur 2.5 TBM-typen met graaffrontondersteuning door media met hoge dichtheid

Tabel 2.3 TBM-typen met ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid

3 Ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid					
Kenmerken	High Density Slurry Shield	Slime Shield/ Mud injection Shield	Earth Pressure Balance Shield (standaard-uitvoering)	Earth Pressure Balance Shield (mengkamer-uitvoering)	Earth Pressure Balance Shield (muck-ring-uitvoering)
graaffrontondersteuning	Een drukgeregelde vloeistofondersteuning met een grote dichtheid (tot die van de grondbrei) in de graafkamer.	Een drukgeregelde, geconditioneerde vulling van de graafkamer.	Een drukgeregelde grondvulling van de graafkamer.	Een drukgeregelde grondvulling van de graafkamer.	Een drukgeregelde grondvulling van de graafkamer.
waterdichtheid	Door een drukgeregelde vulling van de graafkamer.	Door een drukgeregelde, geconditioneerde vulling van de graafkamer.	Door een grondvulling van de graafkamer.	Door een grondvulling van de graafkamer.	Door een drukgeregelde grondvulling van de graafkamer.
afgraafmethode	Een open of gesloten snijrad.	Een redelijk dicht snijrad met openingen.	Een zeer dicht snijrad met openingen.	Een open snijrad met injectieleidingen en mengstaven aan de achterzijde van het snijrad.	Een open snijrad met afsluitplaten (zgn. flood-doors).
afvoer van grond	Hydraulisch met een maximale dichtheid van ca. 1,5 ton/m3.	Via compressie met een avegaar en een transportband.	Via, eventueel 2 achterelkaar opgestelde avegaren, en een transportband.	Via, eventueel 2 achterelkaar opgestelde avegaren en een transportband.	Door een voorgespannen afsluitklep in de muck-ring en een transportband.
toegang tot de graafkamer	Door een luchtsluis in de luchtdrukruimte.	Door een sluis langs de rand en luiken in de "snijradtrommel"	Door een sluis langs de rand en luiken in de "snijradtrommel"	Door een luchtsluis naar de (deels) geleegde mengkamer onder luchtdruk.	Door een luchtsluis naar de (deels) geleegde mengkamer onder luchtdruk.
opmerkingen	Geen.	Geen.	Geen.	Injectie tbv bodemconditionering door de snijnaaf.	Bouwmethode van de Canadese TBM-leverancier "Lovat"

4 Standaard TBM (Mix-schild)

Het toepassen van de boormethode in een bodemgesteldheid met wisselende grondlagen komt vandaag de dag steeds vaker voor. Het toepassingsgebied wordt steeds groter en strekt zich uit van cohesieloze, grofkorrellige bodems en vaste kleilagen tot morenenformaties (met ingebedde harde stenen) en rots. De genoemde grondlagen kunnen in één boortracé achtereenvolgens voorkomen of gelijktijdig aan het graaffront optreden.

In de schildtechniek is er een trent van een pure "Unieke TBM" naar een veelzijdig toepasbare "Standaard TBM". Het ontwerp van de TBM wordt zodanig uitgevoerd dat de TBM kan worden aangepast aan de omstandigheden. Door het verwisselen van standaard onderdelen kan de Standaard TBM voldoen aan de ontwerpeisen van een bepaalde bouwlokatie. Aanpassingen van ontgravingswerktuigen, methode van graaffrontstabiliteit, grondafvoermaterieel etc. behoren tot de mogelijkheden. Hieronder zijn de hoofdonderdelen van de standaard TBM weergegeven die aan de eisen kunnen worden aangepast.

Ontgravingsmaterieel:

Stichel	=	tanden om zand af te snijden;
Cutterdiscs	=	ronde snijmessen die langs de buitenzijde van het snijrad meerollen en vooral in rots worden toegepast;
Schalmesser	=	snijmessen voor kleiige bodem;
Disken	=	snijtanden;
Copy-cutters	=	tanden die oversnijding van het profiel mogelijk maken en op de buitenkant van het snijrad kunnen worden geplaatst.

Snijrad/spaakwiel:
- open met steunplaten;
- met uitschuifbare oversnijdingstanden (copy-cutters);
- met verstelbare excentriciteit;
- met injectiekanalen.

Afvoermaterieel:
- steenbreker;
- beweegbare afzuigmond;
- afvoer mbv hydraulisch systeem;
- afvoer mbv avegaar en transportband.

Graaffrontstabiliteit:
- open graaffront;
- druklucht;
- EPB met injectiemogelijkheden van additieven (foams, bentoniet e.d.);
- vloeistofondersteuning.

2.4 Toepassingscriteria van de verschillende TBM-typen

In deze paragraaf worden de globale toepassingsgebieden beschreven van de in paragraaf 2.3 genoemde TBM-typen. De belangrijkste voor- en nadelen worden kort behandeld. De aangegeven meer- of minderkosten gelden vanzelfsprekend alleen voor schilden van gelijke diameter.

Als referentie voor de kosten zijn de kosten van ieder schild vergeleken met de kosten van een volledig gemechaniseerde TBM met open graaffront.

Tabel 2.4 Afweging TBM-typen met mechanische ondersteuning van het graaffront

1 Mechanische ondersteuning van het graaffront				
Criteria	Extrusie-schild	Bühnen-schild	Verbauplatten-schild	Schurfscheiben-schild
toepassingsgebied	homogene, zachte, vervormbare en quasi waterondoorlatende grond.	niet cohesieve en ook waterdoorlatende bodem met geringe cohesie. Dekking op tunnel moet luchtdruk toelaten bij werken onder de grondwaterspiegel.	cohesieve, gedeeltelijk standvaste veen- en kleibodem.	van niet cohesieve tot gedeeltelijk standvaste zand/grindbodem, ook watervoerend.
voordelen	- zeer eenvoudig zonder ontgravingsmechaniek; - korte levertijd; - directe optische controle van de samenstelling van de ontgraven grond; - bij juiste openingsverhouding nauwelijks vooruitlopende bodemverstoring.	- eenvoudig schild; - korte levertijd; - ontgravingswerktuigen vaak serie-materieel; - directe controle van de samenstelling van de ontgraven grond.	- eenvoudig schild; - binnen ruime grenzen aanpasbaar aan de bodemgesteldheid; - directe controle van het graaffront in het open deel van het graaffront.	- eenvoudig schild met mechanische verzekering tegen instorten van het graaffront door een zeer dicht snijrad; - groot toepassingsgebied.
nadelen	- stelt hoge eisen aan de homogeniteit van de grond; - vereist grote aandrijfkrachten tijdens boren.	- ongelijkmatige graaffrontondersteuning hoge aandrijfkrachten tijdens boren. - zettingsgevoelig bij onprofessioneel toepassing.	- langzaam tgv afgraven op deelvlakken van het graaffront; - veelvuldige onvolledige ondersteuning met als gevolg zettingen.	- hoge aandrijfmomenten en aandrijfkrachten met als gevolg verstoring van de natuurlijke bodemspanning voor het schild en eventuele zettingen.

kosten	- het dure snijrad met de hydraulische aandrijfmotoren en de grondafvoerinstallatie van het graaffront naar de TBM ontbreekt; - vaak ook luchtdruk.	- serie-materieel dus goedkoper dan andere ontgravingstechnieken; - TBM zonder hoge nauwkeurigheidseisen; - afvoer van grond uit werkkamer met luchtsluis; - werken onder luchtdruk;	- schild hetzelfde als Bühnen-schild; - ontgravingsmaterieel echter zwaarder uitgevoerd en niet serie-materieel; - bij werken onder de grondwaterspiegel is luchtdruk en afvoer dmv luchtsluis aan te bevelen.	- actieve steunplaten in het snijrad maken het ontgravingsmaterieel duur; - zware aandrijfaggregaten; - bij werken onder de grondwaterspiegel is luchtdruk en afvoer dmv luchtsluis aan te bevelen.

Tabel 2.5 Afweging TBM-typen met ondersteuning van het graaffront door vloeistof

2 Ondersteuning van het graaffront door vloeistof			
Criteria	Ontgraving met teilschnitt	Ontgraving met vollschnitt ("Japanse bouwmethode")	Ontgraving met vollschnitt ("Duitse bouwmethode")
toepassingsgebied	Door de keuze van de juiste ondersteuningssupensie in praktisch alle hydraulisch ondersteunbare zand- en kleibodems.	Door de keuze van de juiste ondersteuningssupensie in praktisch alle bodemsoorten.	Door de keuze van de juiste ondersteuningssupensie in praktisch alle bodemsoorten.

voordelen	- hydraulische ondersteuning van het graaffront met geringe verstoring van de natuurlijke bodemspanningen; - afsnijden van hindernissen mogelijk; - directe afvoer van de ontgraven grond door de cutterkop van de afvoerleiding; - inspectie van het graaffront mogelijk na verlaging van de bentonietspiegel.	- zeer breed toepassingsgebied; - geringe verstoring van de bodemstructuur aan het graaffront; - verzekering tegen instorten van graaffront door gesloten snijrad; - de geometrie van het graaffront blijft onveranderd.	- volledige scheiding van ondersteuning en ontgravingsfuncties door de open graafspaken; - zeer geringe structuurverstoring van de grond en daardoor geringe zetting; - gelijkmatige continue ondersteuning van het graaffront door luchtkussentoepassing; - beschermde entree achter de duikwand naar de graafkamer; - gering draaimoment.
nadelen	- de geometrie van het graaffront verandert voortdurend; - aan het graaffront geen instortverzekering mogelijk tijdens ontgraven (steunplaten); - voortgang kleiner dan Vollschnitt-TBM's.	- verhoogd draaimoment nodig; - graaffront nauwelijks te zien (bij vloeistofspiegelverlaging); - drukschommelingen in de graafkamer worden geregeld met aan- en afvoer van vloeistof.	- instorten van graaffront bij betreden van graafkamer vereist eventueel een volledige afsluiting van het open spaakwiel.
kosten	- kosten vergelijkbaar met een Vollschnitt-TBM; - luchtdrukinstallatie; - hydraulische afvoer en scheidingsinstallatie.	- ontgravingstechniek met hoofdlagerafdichtingen - eventueel mengselbehandeling voor het hydraulisch transport; - scheidingsinstallatie; - luchtdrukinstallatie.	- ontgravingstechniek met hoofdlagerafdichtingen; - eventueel mengselbehandeling voor het hydraulisch transport; - scheidingsinstallatie; - luchtdruk installatie.

4 Ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid

Voor de TBM-typen met ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid geldt voor het principe van een High Density Slurry Shield en het Slime Shield/ Mud injection Shield hetzelfde als voor een vloeistof- en vollschnittschild.

Voor het Earth Pressure Balance Shield zijn de criteria voor alle genoemde EPB-uitvoeringen in de onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 2.6 Afwegingen verschillende EPB-schild-uitvoeringen

4 Ondersteuning van het graaffront door media met hoge dichtheid	
Criteria	EPB-schild-uitvoeringen
toepassingsgebied	Voor de klassieke EPB-schilden plastisch vervormbare bodemsoorten met een geringe wrijving (zandaandeel onder de 20%). Door toevoegen van plastificeermiddelen aan het graaffront kan het toepassingsgebied aanmerkelijk worden vergroot.
voordelen	- onmiddellijk gebruik van de ontgraven grond voor de ondersteuning van het graaffront en afdichting tegen het grondwater; - geen hydraulische afvoer; - geen scheidingsinstallatie.
nadelen	- kwaliteit van de graaffrontondersteuning en de uitkomende grond is afhankelijk van de (onbekende en eventueel sterk wisselende) eigenschappen van de bodem; - betreden van de graafkamer lastig.
kosten	- ontgravingsmechaniek zeer robuust met hoog benodigd aandrijfvermogen; - avegaar met regelbare omwentelingssnelheid; - gebruik van drukmeters en regelsysteem.

2.5 Keuze TBM-type

2.5.1 Algemeen

In de voorgaande paragrafen zijn mogelijke TBM-typen en hun kenmerken beschreven. In deze paragraaf wordt een keuze van het TBM-type gemaakt voor toepassing bij de 2e-Heinenoordtunnel. Hiervoor worden eerst de criteria beschreven waaraan de TBM moet voldoen vervolgens wordt een grove selectie gemaakt en tenslotte een definitieve keuze.

2.5.2 Criteria

Voor het functioneren van een TBM in een bepaalde grondslag dient de TBM aan verschillende eisen te voldoen. De toepasbaarheid van een TBM-type moet worden onderzocht op:
- de graaffrontondersteuning;
- het ontgravingsmechanisme;
- het grondafvoersysteem;
- diversen: benodigde aandrijfkracht, grondbehandeling en ervaring.

Deze aspecten en de daaruit vloeiende eisen worden achtereenvolgens voor de lokatie van de 2e-Heinenoordtunnel behandeld.

Graaffrontondersteuning

De eisen ter beperking van zettingen aan het maaiveld gelden alleen voor het boortracé ter plaatse van de schachten en onder de dijken om schade aan schachten en dijken te voorkomen.
Vanwege het feit dat de schachten en dijkonderdoorgangen slechts een klein deel van het totale boortracé uitmaken kan in geval van voorziene ontoereikende graaffrontondersteuning door lokale maatregelen instabiliteit worden voorkomen.
De gevolgen van een ontoereikende ondersteuning tijdens boren komen vooral tot uiting in een sterke verstoring van de bodemstructuur voor en boven het schild.

Te veel ontgraving leidt tot vermindering van de voortgangssnelheid (meer graafwerk, meer materiaal afvoeren en eventueel behandelen) en vermindering van de kwaliteit van de bouw van de lining (de grout die langs de tunnelmantel de oversnijdingsruimte moet opvullen kan naar het graaffront lopen waardoor de groutdruk langs de tunnelmantel niet is verzekerd en de segmenten van de tunnelring niet goed op elkaar kunnen worden aangedrukt).

Het toetreden tot het graaffront onder luchtdruk kan onmogelijk worden indien door bodembewegingen spleten in het grondmassief optreden waardoor de lucht- en waterdoorlatendheid van de bodemlagen toeneemt.

Graaffrontondersteuningseis: een zekere graaffrontondersteuning met geringe storing van de natuurlijke grondspanningen.

Ontgravingsmechanisme

Het boortracé doorsnijdt over aanzienlijke lengten verschillende grondlagen. Het draaimoment en de benodigde vijzeldruk van het snijrad moeten worden bepaald met de hoogste belasting.

De werkelijke slijtage van de graaftanden is slecht dmv berekeningen vast te stellen en wordt pas duidelijk tijdens het boorproces. Met inspectie onder druklucht en eventuele vervanging van de graaftanden moet rekening worden gehouden.

Eis ontgravingsmechanisme: mogelijkheid om snel de graafkamer te kunnen betreden en simpel inspectie van het graaffront en de ontgravingswerktuigen te kunnen uitvoeren.

Grondafvoersysteem

Het transport van de ontgraven grond dient onafhankelijk van de graaffrontondersteuning te geschieden. De zwaartekracht kan hier gunstig werken indien de afgegraven gronddeeltjes aan de voet van de tunnel worden verwijderd.
Zanddeeltjes leveren voor de grondafvoer nauwelijks moeilijkheden op. Kleideeltjes daarentegen hebben de neiging onder bepaalde vochtcondities te kleven aan de constructie-elementen van het snijrad. Uit de praktijk is echter gebleken dat dit "kleeffenomeen" door speciale aanpassingen (spuitlanzen, speciale vormgeving snijrad, gedeeltelijke vulling bij vloeistofondersteuning etc.) kan worden voorkomen.

Uit het grondonderzoek is gebleken dat het grondafvoersyteem geen stenen groter dan D = 100 mm hoeft te verwerken. Desondanks zijn grotere obstakels niet uit te sluiten.

Grondafvoereisen:
- toetreden van het graaffront onder luchtdruk om eventuele hindernissen te verwijderen;
- transport van de ontgraven grond en de graaffrontondersteuning dienen onafhankelijk van elkaar te geschieden.

Diversen

De benodigde aandrijfkracht moet zo klein mogelijk zijn zodat deze kracht niet het maatgevende belastingsgeval wordt voor de wapening van de tunnelsegmenten.
Er dient een grondbehandeling te worden nagestreefd waarbij directe beschikbaarheid van een deponie zonder nabehandeling kan worden toegepast.
De geëiste tunneldiameter van 8,3 m is relatief groot. De voorkeur ligt voor een TBM-type waarbij meerdere succesvolle ervaringen zijn opgedaan.

2.5.3 Grove selectie TBM-type

Uit de voorgaande paragraaf volgt direct de (on)geschiktheid voor toepassing van bepaalde TBM-typen in de omstandigheden van de Heinenoordtunnel.

1a	Extrusieschild	:	niet geschikt tgv de wisselende grondlagen.
1b	Bühnen-schild	:	niet geschikt tgv ongelijkmatige ondersteuning van het graaffront en te hoge aandrijfkrachten.
1c	Verbauplattenschild	:	niet geschikt vanwege te kleine voortgangssnelheid en te speciale TBM voor de wisselende grondlagen.
2a	Teilschnittmachine met vloeistofondersteuning	:	niet geschikt vanwege te kleine voortgangssnelheid.

3a-b High Density Slurry Shield, Slime Shield/ Mud injection Shield zijn min of meer geschikt en worden in tabel 7 onder HDS (high-density-shield) behandeld.

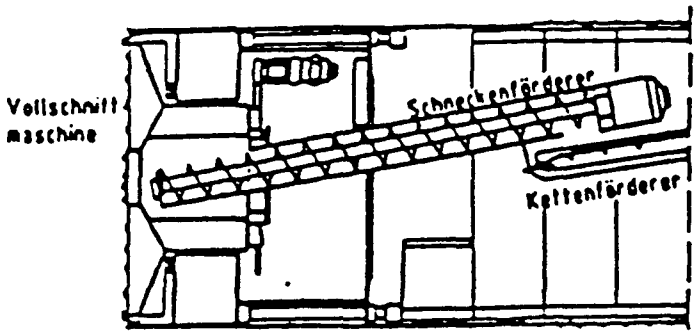
3c-e Earth Pressure Balance Shield (standaard-uitvoering), Earth Pressure Balance Shield (meng-kamer-uitvoering) en Earth Pressure Balance Shield (muckring-uitvoering) zijn min of meer geschikt en worden in tabel 7 onder EPB (earth-pressure-balance-shield) behandeld.

In tabel 2.7 zijn de overgebleven TBM-typen op de criteria vergeleken en overzichtelijk weergegeven

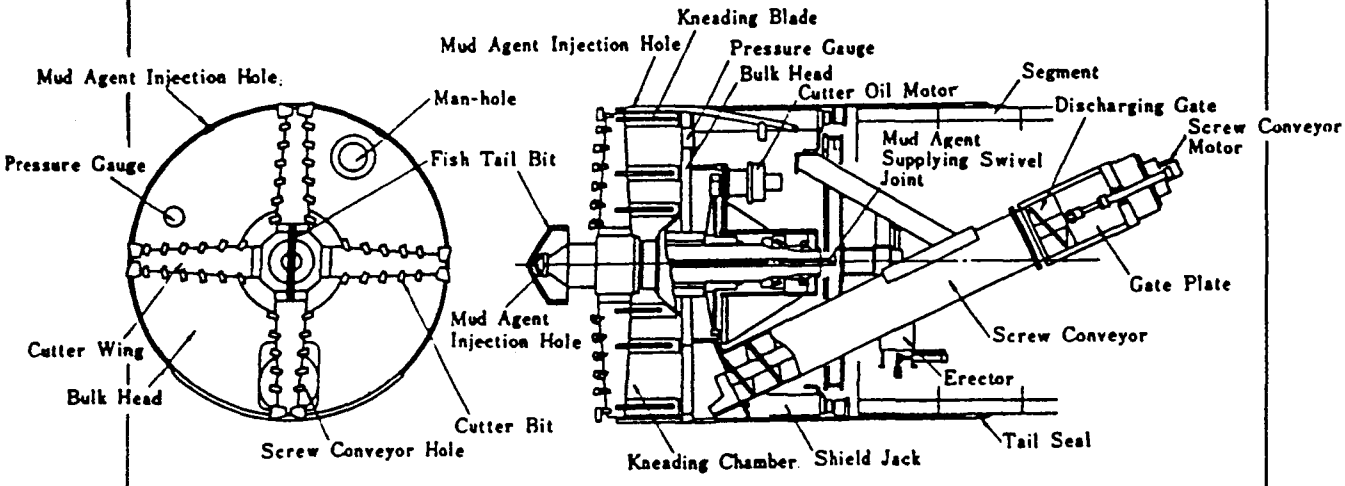
Tabel 2.7 Vergelijkingstabel TBM-typen

Criteria	Schurfscheibe	Slurry (Japans)	Slurry (Duits)	High density-schild	EPB-schild
1 graaffrontondersteuning met weinig grondvervormingen tijdens: a) boorproces; b) toetreden van graafkamer.	a) onzeker b) middelmatig	a) goed b) middelmatig	a) zeer goed b) middelmatig	a) goed b) middelmatig	a) onzeker b) middelmatig
2 mogelijkheid tot toetreden van graafkamer	zeer goed	goed	zeer goed	goed	middelmatig
3 benodigde druklucht tijdens boorproces	te hoog	geen	gering	geen	geen
4 benodigd draaimoment	hoog	middelmatig	gering	middelmatig	zeer hoog
5 benodigde aandrijfkracht	hoog	middelmatig	gering	middelmatig	zeer hoog
6 mogelijkheid tot inbouw van steenbreker	ja	ja	ja	beperkt	nee
7 afvoermechanisme	droog	nat	nat	plastisch	plastisch
8 scheidingsinstallatie	nee	ja	ja	beperkt	nee
9 ervaring van schilden met D > 10m	--	talrijk	enkele	onbekend	onbekend

Omdat de keuzecriteria zich beperken tot de wezenlijke aspecten, die tot kwaliteitsonderscheid van de verschillende TBM-typen leiden, blijft de tabel overzichtelijk. Uit tabel 7 blijkt dat de met vloeistof ondersteunde schilden en de EPB-schilden het meest geschikt zijn voor de situatie van de Heinenoordtunnel.



Erddruck- und Wasserdruckausgleichender Schild (earthpressure balanced shield).



Figuur 2.6 Principe EPB-schild

2.5.4 Definitieve keuze TBM-type

2.5.4.1 Algemeen

In deze paragraaf worden de twee meest geschikte TBM-typen voor toepassing van de situatie bij de 2e-Heinenoordtunnel, het vloeistofondersteunde schild (Slurry-schild op Duitse wijze oftewel Hydro-schild) en het EPB-schild, nader behandeld en met elkaar vergeleken.

2.5.4.2 EPB-schild

Algemeen
Het ideale EPB-type is het blindschild waarbij de bodem door de aandrijfkracht van het schild in de graafkamer wordt gedrukt en door openingen in de drukwand geextrudeerd wordt. Een voorwaarde voor een storingvrije functionering is een gelijkmatig vervormbare bodem waarvan de natuurlijke plasticiteit de mogelijke steundruk bepaald.
Toepassing van een EPB-schild in een stijvere bodem kan mogelijk worden gemaakt door het inbouwen van een snijrad. Het snijrad vormt met de afgegraven grond een waterdichte- en drukoverdragende grondprop in de graafkamer door middel van ontgravings-, meng, - en kneedwerktuigen aan de voor- en of achterkant van het snijrad. De benodigde smeerstoffen (water, bentoniet, foams etc.) worden gedeeltelijk door het snijrad aan het graaffront ingespoten.
Het is noodzakelijk de graafkamer volledig met een homogene, plastische grond-/smeermengsel te vullen. De druk in de graafkamer wordt dmv drukdozen aan de drukwand vastgesteld. De drukregeling geschiedt door aanpassing van de afvoersnelheid van de grond uit de graafkamer (bij toepassing van een avegaar aanpassing van de omwentelingssnelheid van de avegaar).

Vanwege de relatieve onbekendheid van foamtoepassing zijn hieronder enkele gegevens mbt foam weergegeven:
- foamontwikkeling is 10 jaar geleden gestart. De foams van tegenwoordig worden steeds zeepachtiger;
- de werking van het foam is gebaseerd op het voegen van luchtbelletjes tussen de grondkorrels. De voordelen hiervan zijn:
  * de grond wordt smeuïger en daardoor beter transporteerbaar;
  * de behandelde grond geeft een betere afdichting tegen water;
  * de behandelde grond heeft een verende werking. Water zet niet uit en is bijna onsamendrukbaar. Voor luchtbelletjes daarentegen geldt het omgekeerde. Indien er weinig grond voor het graaffront wordt uitgenomen is er geen stabiele situatie meer voor de met waterverzadigde grond echter de met luchtbellen geïnjecteerde grond kan terugveren en een stabiele situatie behouden;

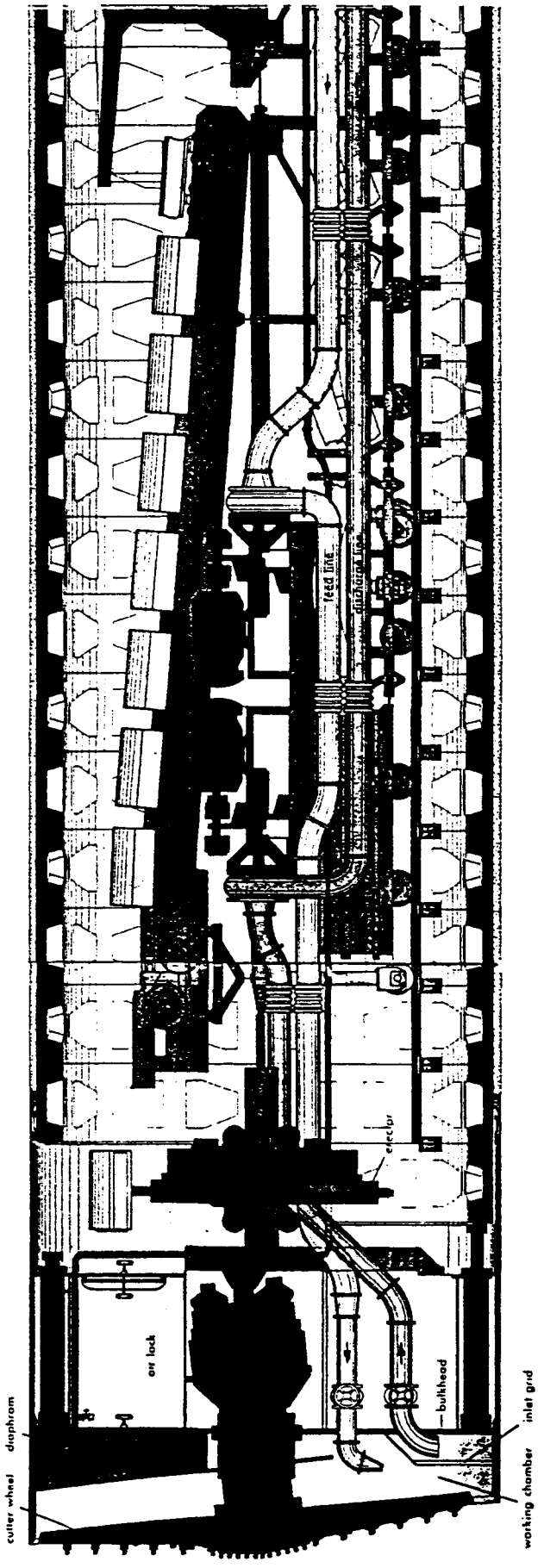
Voordelen
De voordelen van een EPB-schild zijn:
- bij een volle graafkamer een absolute zekerheid dat het graaffront niet instabiel wordt;
- de afgegraven grond wordt naar het afvoerpunt geperst waardoor er geen verklevingsverschijnselen optreden;
- automatische vulling van de ruimte tgv oversnijding;
- droog transport van afgegraven grond door de tunnel;
- geen scheidingsinstallatie nodig indien het plastische ontgravingsmateriaal direct kan worden gestort.

Nadelen

- het gebruik van een avegaar, transportband en locomotief met wagonnetjes is nodig tbv van de grondafvoer. Het grondtransport gaat gepaard met mors waardoor de kans groot is dat de tunnel vuil is. Het is overigens de vraag of er geen grondbehandelingsinstallatie moet worden toegepast waardoor de kosten van de grondafvoer hoger worden;
- het benodigde draaimoment is circa 3 maal groter dan voor een Hydro-schild. De grond moet als het ware naar worden binnengedraaid;
- de benodigde aandrukkrachten zijn groter dan bij een Hydro-schild omdat:
  * de smerende werking van de bentoniet ontbreekt waardoor de wandwrijving groter is;
  * bij de EPB-ontgravingsmethode draait een grondbrei in de graafkamer mee;
  * de onzekerheid van de drukverdeling aan het graaffront te compenseren.

  Het gevolg hiervan is dat de tunnellining zwaarder wordt belast waardoor meer splijtwapening nodig is in de segmenten en er meer aandrukvijzels nodig zijn dan bij een Hydro-schild;
- het snijrad is zwaarder en de benodigde aandrukkracht is groter waardoor het hoofdlager zwaarder wordt belast. Hierdoor is de kans op falen groter en de levensduur kleiner;
- het benodigd geïnstalleerde vermogen is groter dan bij een Hydro-schild waardoor de runningkosten hoger zijn;
- grotere verstoring van de natuurlijke grondspanningen dan bij een Hydroschild. Dit kan leiden tot grotere zettingen;
- voor grotere diameters treden opmerkbare drukverschillen over de hoogte van het graaffront op. De Ko-waarde van een bodem in rust bedraagt circa 0,5 echter voor mechanisch bewegende plastische grond in de graafkamer is de Ko-waarde circa 1;
- voor alle boortracédelen waar een wezenlijk zandaandeel aanwezig is (70% van het totale boortracé van de Heinenoordtunnel) moeten hulpstoffen (additieven) worden toegepast. Foam moet als hulpstof worden gebruikt om de wrijvingskrachten te verminderen en een goede waterdichting van het zand te bewerkstelligen. Deze functies heeft het foam echter voor een beperkte tijd. Onderbreking van het boorproces om de graafkamer te betreden geeft problemen doordat de bodem na verloop van tijd weer waterdoorlatend wordt. Bentonietinjectie zou deze problemen kunnen verhelpen. Er zijn geen referenties voor het gebruik van foam voor de Heinenoordsituatie (3,4 bar waterdruk, niet cohesieve grond);
- het foam is niet 100% milieuvriendelijk, circa 10% van de foamchemicaliën zijn niet biologisch afbreekbaar;
- het betreden van de graafkamer geeft meer problemen dan bij een Hydro-schild namelijk:
  * het leegmaken van de graafkamer duurt langer;
  * de avegaar mag niet leeggedraaid worden omdat deze anders de dichtende werking verliest;
  * bij uitval van de grondsteunplaten op het snijrad is het graaffront niet verzegeld, hetgeen pas bij betreden van de graafkamer wordt opgemerkt;
  * na betreden van de graafkamer moet de graafkamer weer gevuld worden voor de TBM weer kan gaan ontgraven. De steundrukverhoudingen tijdens deze overgang zijn minder nauwkeurig te bepalen dan bij een Hydro-schild;
- drukverschillen aan het graaffront kunnen minder goed worden opgevangen dan bij een Hydro-schild met luchtbuffer;
- doordat er geen steenbreker kan worden geïnstalleerd is een blokkage van de avegaar niet ondenkbeeldig;
- stenen in de graafkamer kunnen de mengarmen achter op het snijrad beschadigen.
- bij gebruik van een staartdichting met staalborstels en vetafdichting geeft deze staartdichting hechtingsproblemen tussen de grout en de tunnellining tgv een vetfilm op lining. Tevens kunnen de borstels dicht gaan zitten met grout en is het vet milieubelastend. De vervanging van de staalborstels is echter eenvoudiger dan van een rubber profielstaartafdichting.

- indien er gassen (CH4, H2S, CO) in de grond aanwezig zijn kunnen deze in de tunnelbuis komen doordat het grondtransportsysteem niet gesloten is. Voor een EPB moet voor het ontwerp van de ventilatie hiermee rekening worden gehouden:
- een EPB heeft relatief meer snijelementen dan een Hydro-schild waardoor vervanging duurder is en langer duurt met als gevolg een kleinere inzetbaarheid bij grote slijtage;
- relatief veel mensen in tunnel en veel transportbewegingen waardoor de kans op ongelukken groter is dan bij een Hydro-schild.



Figuur 2.7 Principe Hydro-schild

2.5.4.3 Slurry-schild op Duitse wijze (Hydro-schild)

Algemeen
Tijdens het boorproces steunt een speciale suspensie (bentoniet) het graaffront. De steundruk verloopt hydrostatisch. De steundruk wordt gecontroleerd en constant gehouden door een luchtkist achter de duikwand waardoor de schommelingen van de ondersteuningsdruk gering zijn. De bentoniet vormt een dichte filterkoek op het oppervlak van het graaffront en zet het graaffront onder druk. De zettingen blijven door deze graaffrontondersteuning zeer beperkt. De vorming van de membraamachtige filterkoek is tijdens vele boorprojecten bewezen. De bentonietcake is relatief luchtondoorlatend waardoor het graaffront door druklucht kan worden gesteund tijdens het betreden van de graafkamer. De eigenschappen van de steundruksuspensie kunnen aan de situatie worden aangepast.

Voordelen
Naast de voordelen die hierboven zijn omschreven kunnen worden genoemd:
- de geringe aandrijfkrachten: door de bekendheid van de drukverdeling over de hoogte van het graaffront, de smerende werking van het bentoniet en de scheiding van de functies ondersteuning (door suspensie) en afgraven (door snijrad) van graaffront;
- geringe verstoring van de natuurlijk aanwezige grondspanningen;
- er kan beter in niet homogene grondlagen worden geboord dan bij een EPB-schild door de zelf-instellende drukregeling;
- doordat de TBM lichter is en minder aandruk en draaimoment nodig heeft wordt het hoofdlager minder belast waardoor de levensduur groter is dan van een EPB-schild;
- het geïnstalleerd vermogen is kleiner waardoor de runningkosten lager zijn dan voor een EPB;
- steenbrekerinbouw is mogelijk zodat afvoer van afgegraven materiaal geen problemen oplevert;
- hergebruik ondersteuningssuspensie;
- het afvoersysteem van afgegraven grond kenmerkt zich door:
  * schoon transport;
  * neemt weinig ruimte in beslag;
  * is richtingsonafhankelijk.
- de scheidingsinstallatie scheidt naar korrelgrootte zodat het gescheiden materiaal eventueel verder gebruikt kan worden;
- indien een Neopreen-staartdichting wordt toegepast is deze eenvoudiger en minder gevoelig voor grout en oneffenheden dan een staartdichting dmv vetinjectie en staalborstels;
- door de toepassing van een gesloten grondafvoersysteem is er geen gevaar tgv vrijkomende stoffen in de tunnelbuis en is er minder lawaai in de TBM en tunnelbuis;
- het aantal benodigde snij-elementen is kleiner waardoor het benodigde draaimoment en aandrukkracht kleiner is. Tevens is vervanging goedkoper en kan sneller plaatsvinden waardoor de inzet van de TBM groter is dan voor een EPB;
- er zijn relatief weinig mensen betrokken bij het boorproces.

Nadelen
- het gebruik van een scheidingsinstallatie, een aanvoersysteem tbv ondersteuningssuspensie en een afvoersysteem tbv de met afgegraven grond vervuilde ondersteuningssuspensie is nodig;
- bij kleinere gronddeeltjes wordt de scheiding van de bentoniet en de ontgraven grond moeilijk of zelfs onmogelijk waardoor er veel bentonietvloeistof verloren kan gaan;
- men houdt een hoeveelheid bentonietvloeistof en eventueel met bentoniet vermengde grond over waarvoor een stort moet worden gezocht;
- kleven van kleideeltjes aan het ontgravingsmaterieel. Hiertegen kunnen enige maatregelen worden genomen door speciale aanpassingen (spuitkoppen, snijradvormgeving, gedeeltelijke vulling bij vloeistofondersteuning etc.).

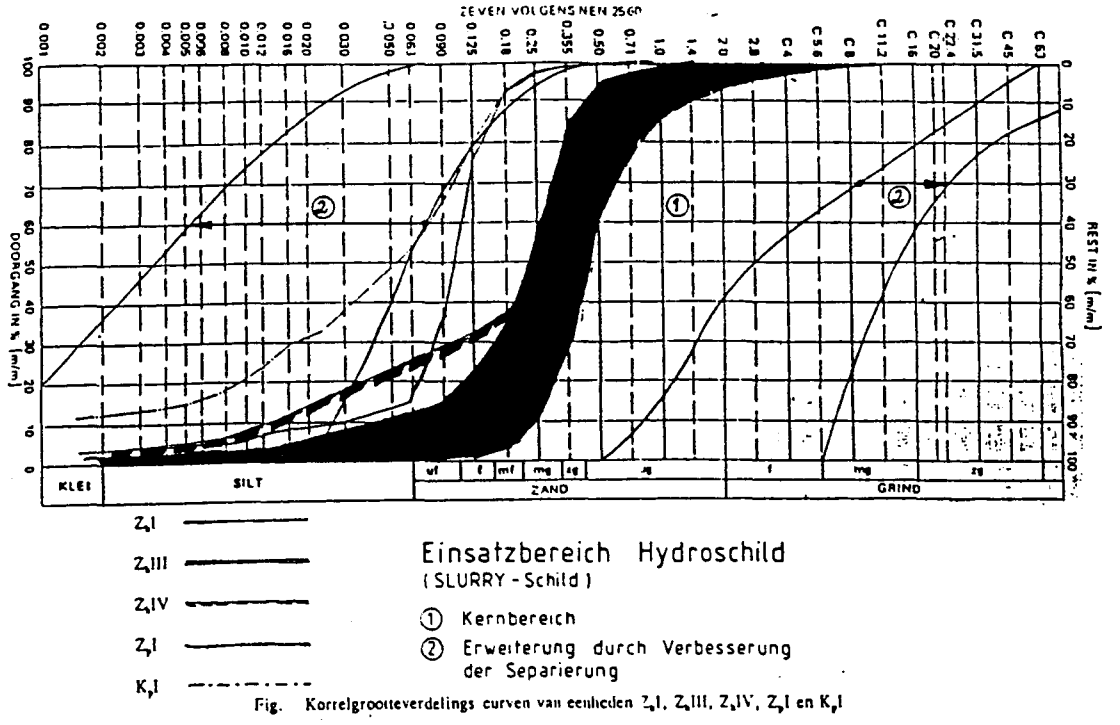


Fig. Korrelgrootteverdelings curven van eenheden Z,I, Z,III, Z,IV, Z,I en K,I

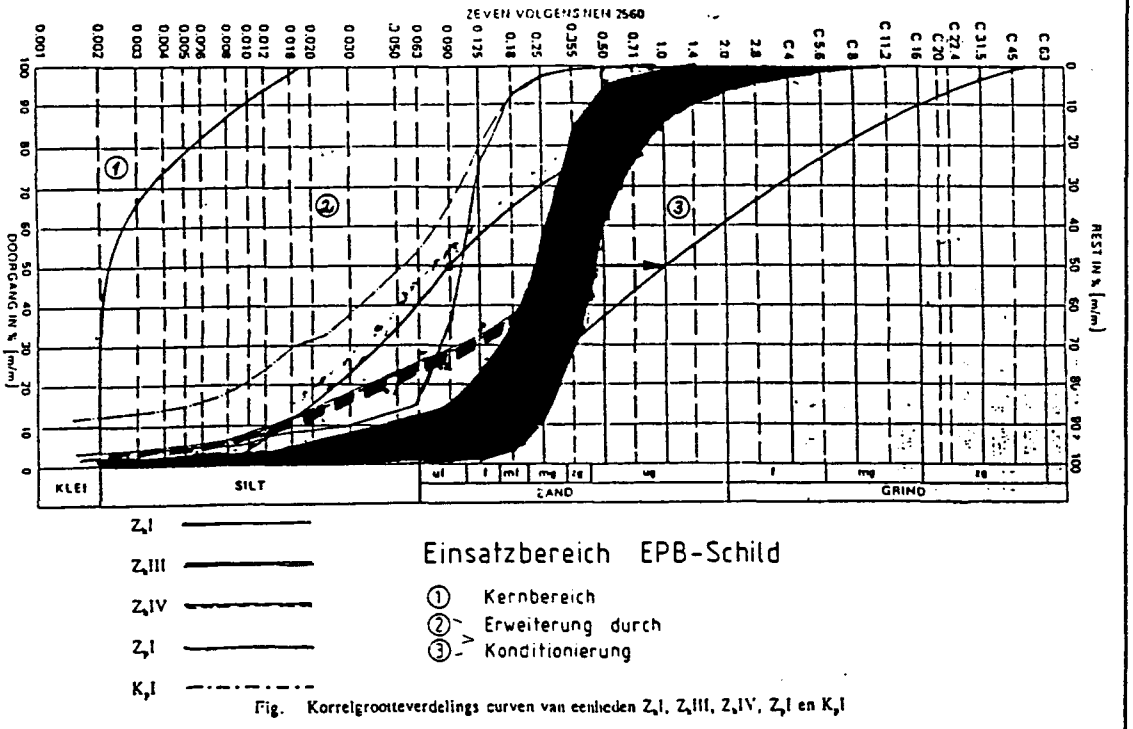


Fig. Korrelgrootteverdelings curven van eenheden Z,I, Z,III, Z,IV, Z,I en K,I

Figuur 2.8 Toepassingsgebieden Hydro- EPB-schild aan de hand van korrelgrootte diagrammen

2.5.4.4 Conclusie

Over bijna de gehele lengte van het boortracé is een grondslag aanwezig die, bij toepassing van een EPB-schild, intensief bewerkt moet worden om een plastische en drukhoudende bodemprop te kunnen vormen. De wisselende grondlagen in het boortracé dwingen tot een veelvuldige aanpassing van hulpmaatregelen.

Het Hydro-schild daarentegen is over de gehele bandbreedte van de verschillende voorkomende grondlagen makkelijker inzetbaar zonder veel hulpmaatregelen. Het noodzakelijke gebruik bij een Hydro-schild van installaties ten behoeve van het hydraulisch transport en suspensiescheiding wegen op tegen het geringere risico bij het betreden van de graafkamer, kleinere aandrijfkrachten en een schoon grondafvoertransport door de tunnelbuis.

In de figuren 2.8 zijn de toepassingsgebieden van het EPB-,en het Hydro-schild aan de hand van korrelgrootteverdelingsdiagrammen weergegeven. In deze diagrammen is aangegeven binnen welke korrelgroottebanden de verschillende schilden van oorsprong ontwikkeld zijn en tot welke korrelgroottebanden de toepasbaarheid van schilden mbv hulpmaatregelen kan worden uitgebreid.
Tevens is de korrelgrootteband van het boortracé van de 2e-Heinenoordtunnel in deze diagrammen aangegeven. Uit deze diagrammen is duidelijk af te lezen dat de grondslag in het boortracé van de Heinenoordtunnel voor 70 à 80 % uit zandgrond is bestaat en dat het toepassingsgebied van een Hydro-schild het meest geschikt lijkt in deze grondslag.

TCH heeft om deze redenen gekozen voor toepassing van een Hydro-schild voor het boren van de 2e-Heinenoordtunnel. In tabel 2.8 is de beoordeling van de belangrijkste TBM-keuzecriteria voor het EPB- en Hydro-schildtype overzichtelijk weergegeven.

Tabel 2.8 Vergelijkingstabel EPB en Hydro-schildtype

Criteria	Hydro-schild	EPB-schild
1 Toepasbaarheid schild mbt korrelgrootte-band grondslag 2e-Heinenoordtunnel	zeer goed	niet geschikt zonder hulpmaatregelen
2 graaffrontondersteuning tijdens: a) boorproces; b) toetreden van graafkamer.	 a) zeer goed b) goed	 a) middelmatig b) middelmatig (onzeker)
3 benodigd draaimoment en verstoring van het graaffront tijdens het boorproces	gering	zeer hoog (tot 3 keer hoger)
4 mogelijkheid en veiligheid tot toetreden van graafkamer	goed	middelmatig
5 meting van de steundrukken	betrouwbaar	onzeker (maar werkbaar)
6 behandeling van de af te graven grond	niet nodig	nodig
7 benodigde aandrijfkracht	laag	hoog (2 tot 3 keer hoger)
8 zettingen	beperkt	klein
9 scheidingsinstallatie	nodig	niet nodig
10 ervaring van schilden met D = +/- 8,5m	talrijk	talrijk

3 Bepaling programma van eisen TBM

3.1 Algemeen

Nadat de keuze van het TBM-type was gevallen op het Hydro-schild is er een programma van eisen voor de TBM opgesteld.

Voor de bepaling van de TBM-eisen is eerst een checklist gemaakt van onderdelen die in de TBM aanwezig behoren te zijn.

Vervolgens zijn enkele grove berekeningen gemaakt ter bepaling van:
a) de orde van grootte van de aandrijfkracht en het draaimoment;
b) een ontwerp van het hydraulisch afvoersysteem;
c) een schatting van de afmetingen en het gewicht van een segment en het aantal segmenten in een tunnelring;
d) de levensduurverwachting van het hoofdlager;

Vervolgens is het voorziene TBM-ontwerp van een Hydro-schild beschreven waarbij eerst de uitgangspunten voor het ontwerp zijn opgesteld en vervolgens een technische beschrijving van het Hydro-schild is gemaakt. Het beschreven TBM-ontwerp geeft een uiteenzetting van een mogelijk Hydro-schildontwerp voor de 2e-Heinenoordtunnel zoals door de TBM-werkgroep werd voorzien voordat met de TBM-leveranciers was gesproken.

3.2 Beschrijving TBM-ontwerp

3.2.1 Uitgangspunten TBM-ontwerp

Boortunneldimensies

De 2e-Heinenoordtunnel heeft de volgende kenmerken:

- binnendiameter	7.6 meter;
- buitendiameter	8.3 meter;
- segmentdikte	0.35 meter;
- ringbreedte	1.5 meter;
- ringopbouw	7 segmenten en 1 sluitsteen;
- oversnijding	0.125 meter;
- theoretische buitendiameter	0.125*2 + 8.3 = 8.55 meter.

De totale lengte van de starre schildmantel bedraagt circa 8,3 meter.

Belastingen op de TBM

De schildmantel wordt belast door de van buiten werkende krachten en de krachten die van binnenuit de TBM op de mantel.

De van buitenaf werkende belastingen op de schildmantel zijn weergegeven in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Belasting op de schildmantel

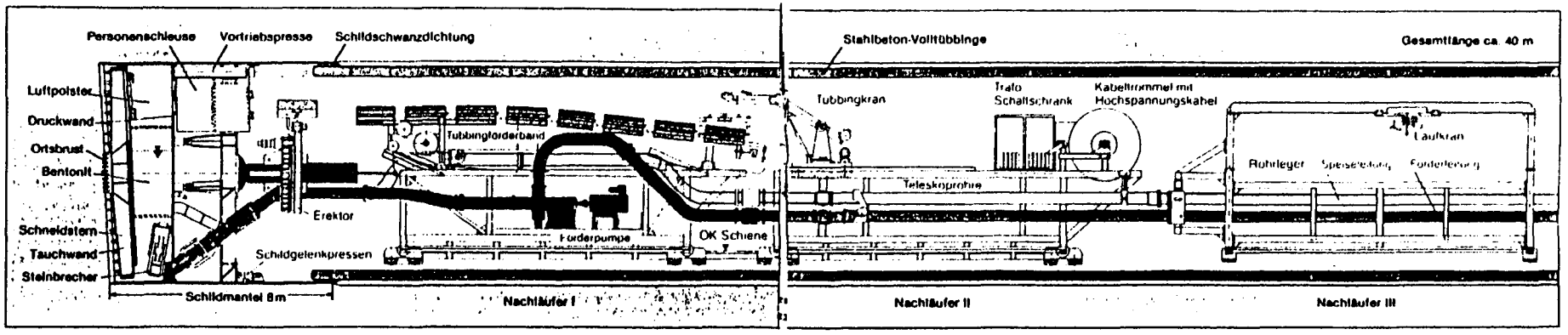
Belasting	Maximaalwaarde	Belastte TBM-deel	Opmerkingen
waterdruk	350 KN/m2	- schildmantel (zonder snijdeel); - drukwand; - sluis.	Gelijkmatig verdeeld.
gronddruk	250 KN/m2	- gehele mantel; - drukwand.	p = pmax*cosϕ p1 = pmax
hindernis	-	- snijdeel.	Constructief door wandsterkte opgenomen.
wrijving staartdichting	100 KN/m	Stalen staartplaat.	
ophanging trailer	100 + 50 KN	Verstijving binnenkant TBM.	Trailergewicht circa 180 ton maximale vijzelhelling circa 3%.
verschildruk op de drukwand	p = 60 KN/m2 p = 200 KN puntlast	Duikwand.	Werken niet gelijktijdig.

De belastingen vanuit de TBM zijn:
- het eigen gewicht van de TBM;
- reactiekrachten vanuit:
  * de snijradaandrijving:
    - max. draaimoment circa 4 MNm. De hydraulische aandrijving is gerelateerd aan de draaisnelheid.
      max Md= 4.0 MNm bij n=1 omwenteling per minuut
      max Md= 2.0 MNm bij n=2 omwentelingen per minuut
    - max. aandrukkracht circa 3 MN.
  * vijzels:
    - 14 vijzelsets à 1.8 MN;
    - max. aandrijfkracht 50.4 MN.
  * ringerector:
    - ontwerpen op tillen en verplaatsen van segmenten met een maximaal eigengewicht van 50 KN.

Alle overige belastingen vanuit de TBM zijn voor het ontwerp van de TBM niet maatgevend.

Opmerking: Voor het voorontwerp van de 2e-Heinenoordtunnel zijn onder andere berekeningen gemaakt mbt de benodigde dekking op de tunnel, de tunnellining en de benodigde steundruk in de verschillende bedrijfsituaties van de TBM (graaffront geheel en gedeeltelijk ondersteund met bentoniet en of luchtdruk). Deze berekeningen geven waarden die als uitgangspunt voor het ontwerp van de TBM worden genomen. Voor deze berekeningen wordt verwezen naar het rapport "Berekeningen Voorontwerp Boortunnel Heinenoord" van Arjan van der Put.

Figuur 3.1 Principe Hydro-schild



3.2.2 Technische beschrijving TBM-ontwerp

3.2.2.1 Algemeen

De TBM bestaat in hoofdlijnen uit:
- het schild
- de ontgravingsmechaniek;
- de aandrijvingshydraulic;
- de erector;
- de stuurcabine;
- het grondafvoersysteem;
- de staartvulling;
- de staartdichting;
- de trailers die achter de TBM worden meegesleept.

In deze paragraaf worden deze TBM-onderdelen nader beschreven.

3.2.2.2 Schild

Het schild bestaat in wezen uit een cilindrische buitenomhulling met binnenliggende verstijvingen en afsluitwanden. In figuur 3.1 is een Hydroschilduitvoering weergegeven.

De schildmantel
De schildmantel is opgebouwd uit 3 buisdelen namelijk: het graafdeel, het middendeel en het staartdeel. Deze buisdelen hebben een nominale buitendiameter van 8,55 meter.

Het graafdeel
Het graafdeel loopt van de snijmessen tot aan de drukwand. De gekozen metaaldikte van 80 mm is een compromis tussen materiaalsterkte, nog eenvoudig lasbare verbindingen en bouwtolerantie. De ervaring heeft geleerd dat deze staaldikte voldoende is. De vereiste montage van de langsnaden bestaat uit een doorlopende las. Duik- en drukwand zorgen in dwarsrichting voor een praktisch onvervormbare verstijving.

Het middendeel
Het middendeel sluit achter het graafdeel aan en reikt tot aan het einde van het ringspant. In het middendeel bevinden zich de aandrijfvijzels rondom de wanden. Het ringspant wordt verstijfd met "een draagkruis" waarbinnen een centraal venster is waardoor de aandrijfas van het snijrad loopt. Het draagkruis neemt van voren de aandrukkrachten vanuit het snijrad op en van achteren de aansluitkrachten van de erectorconsole met de daaraan hangende trailers.

Het staartdeel
Het staartdeel bedekt aan het schildeinde de werkruimte van de erector en de laatst gebouwde ring. Aan het einde van het staartdeel bevindt zich het staartdichtingsprofiel en het noodafdichtingsprofiel. In het staal van de buis van het staartdeel zijn tbv de staartdichting op gelijke afstanden 4 groutdrukleidingen opgenomen.

Druk- en duikwand
De dwarsschotten verstijven de schildmantel tegen van buitenaf werkende radiale belastingen. De gladde voorzijde van de duikwand sluit de graafkamer af. Meerdere naar achteren sluitende luiken geven toegangsmogelijkheid tot het snijrad. Aan de voet van de tunnel is er een opening in de duikwand die de graafkamer met de drukkamer verbind. De drukwand sluit de atmosferische binnenruimte van de drukkamer af. In de drukwand zijn doorgangen aanwezig namelijk:
- in de tunnelkruin: openingen tbv een sluis en toevoerleidingen;
- in de as en voet van de tunnel: openingen tbv spoel- en afvoerleidingen

3.2.2.3 Ontgravingsmechaniek

Het snijrad, hoofdlager, aandrijfhuis en de hydraulische aandrijfmotoren zijn in één blok samengesteld. Een sferisch kip- en glijlager kan axiaal verschuiven en kan kleine rotaties opnemen (bolscharnier). Hierdoor is een oversnijding van 50 mm mogelijk. Drie drukgroepen, waarvan de vijzelslag wordt gecontroleerd en gesynchroniseerd, houden het snijrad in de gewenste positie. De vijzels zijn beveiligd tegen overdruk. Indien bijvoorbeeld tijdens het boorproces het snijrad tegen een harde obstakel stuit, blijft de functie van de vijzels behouden. De hydraulische aandrijfmotoren kunnen met verschillende draaisnelheden in beide richtingen draaien.

De 3-maal gelagerde ophanging van de as van het snijrad heeft een rekentechnische levensduur van 6000 uur bij 2 omwentelingen per minuut en een excentrische belasting van 75% van de maximaalwaarde. Het lager kan in noodgevallen zonder veel problemen worden vervangen. Hetzelfde geldt voor de hoofdlagerdichtingsprofielen. Deze zijn van voren toegankelijk en kunnen eventueel worden verwijderd.

Het snijrad is een open spaakwielconstructie met 5 graafspaken. In natte cohesieve grond bestaat het gevaar van kleven van gronddeeltjes aan het ontgravingsmaterieel. Dit kan worden voorkomen door bijvoorbeeld spuitlanzen op het snijrad.

Het snijrad vervult de volgende functies:
- ontgraving:
  Voor de ontgravingsfunctie zijn 2 verschillende soorten graafwerktuigen op de voorkant van het spaakwiel gemonteerd namelijk:
  * snijtanden (Stichel) : voor de ontgraving in zand;
  * snijmessen : voor de ontgraving in klei.

  De graafwerktuigen kunnen bij slijtage van achter het snijrad vervangen worden.
- instabiliteit graaffront:
  De open driehoeksvlakken tussen de spaken van het bovenste deel van het snijrad kunnen bij betreding van de graafkamer worden bedekt met 2 steunplaten. Het werken in de graafkamer kan daardoor in veiliger omstandigheden plaatsvinden. Tijdens het boorproces zijn de platen ingetrokken en vergrendeld op de buitenzijde van de duikwand.
- grondafvoer:
  Bij vloeistofondersteuning houden de brede spaken de naar de tunnelvoet zinkende gronddeeltjes in beweging. De met het snijrad meedraaiende "vloeistofschijf" voert gronddeeltjes langs het graaffront en rondom het schild totdat het gronddeeltje door het raster voor de afzuigmond de afvoerpijp in wordt gezogen.

3.2.2.4 Aandrijvingshydrauliek

Tijdens het boorproces en de ringbouw drukt het schild met 28 drukvijzels op de tunnelring. De drukvijzels zijn met drukschoenen tot 14 drukeenheden samengevoegd. Voor de regeling van de stuurrichting zijn de aandrukvijzels in 7 onafhankelijke drukgroepen verdeeld. De resulterende drukverschillen tussen de naast elkaar liggende drukgroepen moet door de lining worden opgenomen.
De toepassing van meerdere parallel geschakelde hydraulische pompen staat kleine trapsgewijze aanpassing van de voortgangssnelheid toe. Tijdens de ringbouw begrenst een overdrukventiel de oliedruk van de vijzels om te verhinderen dat het schild vooruit schuift. Gelijktijdig wordt het terugschuiven van de TBM onder de werking van de steundruk ook bij ingetrokken vijzels verhinderd. Een samenschakeling van alle oliestromen bewerkstelligt een snellere vijzelbeweging dan tijdens het boorpoces. Een drukreservoir in de olietoevoerleiding van de vijzel verzekert een constante druk van de drukvijzels tijdens de ringbouw.

Om verdraaiing van het schild te voorkomen kunnen de drukvijzels op een lagerpunt tangentiaal worden versteld. Ieder vijzelpaar zit aan het voorste druklager in een hydraulisch tangentiaal verschuifbare slee. Het achterste lager heeft elastische gummiedelen, die bij uitschuivende vijzels tijdelijk meegeven en daarmee de buigbelasting van de vijzelstang wezenlijk verkleinen.

3.2.2.5 Erector

De erector is bevestigd als ringerector om zijn draagconsole, die aan het verstijvingskruis van het schild is bevestigd. Door het vrije midden lopen alle verbindingsleidingen van het schild naar de trailers.
De driedelige vacuüm-tilkop voor de segmenten (voor A, B en C-segmenten en de sluitsteen) is bevestigd op een hefbrug.
Door langsverschuiving over de draagconstructie, de rotatie, de slag van de brugvijzels en 2 verstelbare vijzels aan de vacuüm-tilkop kan het element nauwkeurig worden geplaatst. Twee centreerconussen op de vacuüm-tilkop vergemakkelijken de overname van de transporttafel en voorkomen het vallen van het segment bij een defect aan de vacuümsysteem. Alle bewegingen van de erector worden traploos hydraulisch met ventielen geregeld.

3.2.2.6 Stuurcabine

Alle bedieningselementen van het schild zijn in de stuurcabine ondergebracht. De stuurcabine is ondergebracht op een plateau aan de zijkant in de TBM. Het stuurpaneel heeft verschillende modulen waarop de volgende functies staan afgebeeld:
- boorproces : positie, beweging en druk van de vijzels;
- ontgraven : positie, snelheid en vermogenafname van het snijrad;
- graaffront-ondersteuning : steundruk, suspensie-spiegelniveau, mengselcirculatie in de verschillende leidingen, pompcontrole;
- positionering : schild- en ringpositie.

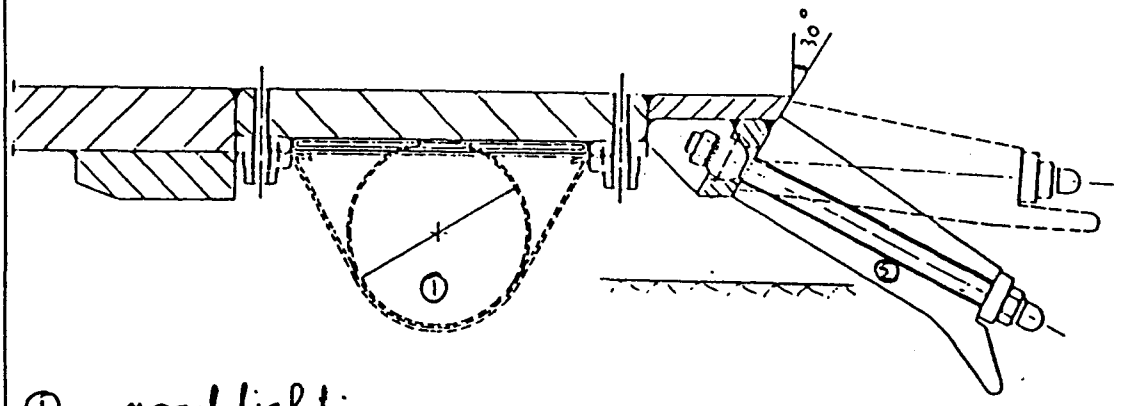
Door het basisprincipe van een Hydro-schild is er weinig bijstelling van het ontgravings- en hydraulisch systeem tijdens het boorproces nodig omdat:
- de steundruk wordt automatisch op de gekozen waarde gehouden;
- na instelling van de toe- en afvoerleidingen stelt zich een stabiel bedrijfspunt in waarbij de vloeistofspiegel in de graafkamer slechts enkele decimeters aan verandering onderhevig is;
- indien er boven- of ondergrenzen van het vloeistofspiegelniveau worden bereikt dan wordt de voortgang automatisch uitgeschakeld en treden de afsluiters in werking;
- bij stroomuitval valt de boorinstallatie in een veilige bedrijfstoestand met gesloten omloopventielen.

Uit de ervaring blijkt dat de besturing van een Hydro-schild nauwelijks moeilijkheden oplevert. Afwijkingen van meer dan 5 cm buiten het boortracé treden zelden op.

3.2.2.7 Grondafvoer

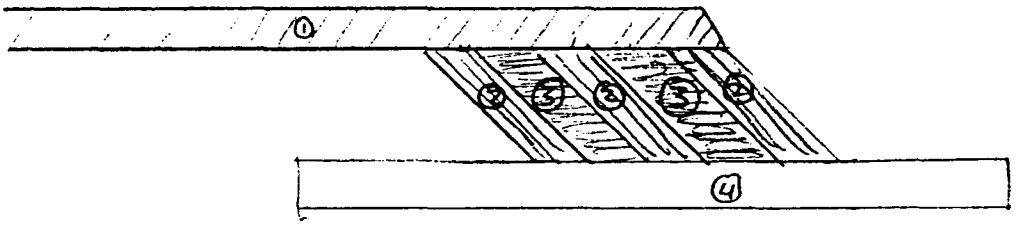
De aan het graaffront losgemaakte grond wordt aan de voet van de TBM onmiddellijk achter de duikwandopening afgezogen. Voor de afzuigmond is een rooster/traliewerk bevestigd zodat te grote gronddelen niet in de afvoerleiding terecht kunnen komen. Spuitlansen verhinderen het ophopen van ontgraven materiaal voor het tralierooster. Een draaischarnier met een horizontale as vergroot het gebied van de afzuigmond tot circa 2 meter breedte. De suspensie wordt afgevoerd vanuit de graafkamer naar de afvoerpomp op de trailer en vervolgens via buizen, met eventueel tussenpompen, naar de scheidingsinstallatie. Na scheiding van de grond en ondersteuningsvloeistof wordt de vloeistof bijgemengd met verse bentoniet en weer hergebruikt in het hydraulische systeem.
De toe- en afvoerleiding die door de drukwand lopen kunnen door afsluiters worden afgesloten.

Rubber profiel staartdichting



① = noodlichting
② = rubber profiel

Staalborstel staartdichting



① = schildmantel
② = staalborstel
③ = vet
④ = lining

Figuur 3.2 Staartafdichtingsprofielen

3.2.2.8 Staartdichting

Staartvulling
Om de spleet tussen de buitenkant van de mantel en de buitenkant van de lining (oversnijding) met grout te vullen zijn groutdrukleidingen langs de schildmantelomtrek opgenomen. Er zijn 4 groutdrukleidingen voorzien. Deze treden in een boog in het mantelstaal en lopen door tot de buitenzijde van staartdichting.
Iedere aangesloten leiding wordt door een eigen pomp aangedreven. Op deze manier kan op verschillende hoogten over de schilddiameter de groutdruk worden aangepast. De capaciteit van de groutpompen wordt zo ontworpen dat zelfs bij uitval van enkele groutleidingen de voortgang zonder problemen en met voldoende groutdruk doorgang kan vinden. Het schoonmaken van de groutpijpjes is mogelijk. Hiervoor zijn schoonmaakprocedures ontwikkeld.

Staartafdichting
Voor de staartdichting staan 2 bewezen afdichtingen ter beschikking namelijk:
- een staalborsteldichting met vetinjectie;
- een rubberprofielafdichting met nooddichting.

In de figuren 3.2 is het principe van de beide staartafdichtingen weergegeven.

De staalborsteldichting vereist bij een buitendruk tot 6 bar minstens 3 rijen borstels. De tussenruimten van de borstels worden met vet geïnjecteerd tijdens de TBM-voortgang. De voegen worden op deze wijze afgesloten en het aanhechten van de grout aan de afdichtingsvezels van de staalborstels wordt verhinderd. Er is een voorkeur voor de rubberprofielafdichting onder andere vanwege het hoge vetgebruik.

De rubberprofielafdichting wordt in secties ingebouwd, door trekbouten voorgespannen en wordt op het uiterste einde van de schildmantel opgespannen. Het rubberprofiel wordt naast de voorspanning ook door de morteldruk tegen de lining gedrukt. Het werkingsbereik van de dichting bedraagt circa 40 mm. Aan de schildbinnenkant is in geval van calamiteit een nooddichting aanwezig die de spleet tussen het schild en de lining kan afsluiten.

3.2.2.9 Trailers

De aan het schild geschakelde installaties zijn op 3 trailers ondergebracht. De trailers hebben brede kunststofbanden. Op de trailers zijn (van voren naar achteren) ondergebracht:

- Trailer 1 (circa 10 meter lang);
  * tijdelijk 2 beweegbare werkplateaus voor de segmentmontage;
  * de groutdrukpompen;
  * de segmentoverdrachtsband;
  * de centrale hydrauliekverzorging met pompen en tank;
  * de afvoerpomp en afvoerpijp van het hydraulisch transport.

- Trailer 2 (circa 10 meter lang)
  * de segmentkraan;
  * een reservoir voor speciale steundruksuspensie;
  * apparatuur tbv van de elektrische energievoorziening zoals kabelhaspels, trafo, verdeelkast;

  Het verzorgingsspoor loopt via een sleepspoor op trailer 1 naar trailer 2 over.

- Trailer 3 (circa 10 meter lang)
  * materieel tbv verlenging van de volgleidingen zoals telescoopbuizen, slangovergangen, buizen- en railsmagazijn;
  * een kleine werkplaats.

Trailer 3 staat stil tijdens de TBM-voortgang. Deze wordt slechts bij het intrekken van de telescopische buis weer naar de TBM getrokken.

3.2.3 Maatregelen tbv veiligheid en risico-preventie

Voor het TBM-ontwerp zijn maatregelen t.b.v. veiligheid en risico-preventie onderzocht. In de volgende lijst zijn de resultaten van deze analyse weergegeven.

Lijst met maatregelen tbv veiligheid en risico-preventie
- voortstuwingskrachten te groot: smeren van schild, ventielen inbouwen, copy-cutters;
- extreme winter: scheidingsinstallatie overkappen;
- verstoppingen onder in boorkamer: jets toepassen;
- bentonietspiegel tijdens weekends of verlof: hydrostatische druk vanaf scheidingsinstallatie handhaven;
- hoogspanningskabel: hoog ophangen;
- wegvallen stroomvoorziening: noodstroomaggregaat voor kritische functies (stabiliteit graaffront);
- electrosysteem explosievrij maken: gasdetectie;
- drukluchtvoorziening: dubbele leiding;
- spiegelniveau: altijd binnen bepaalde grenzen automatisch gegarandeerd;
- hoofdlager: reserve lager moet beschikbaar zijn, hetzij 2e-hands, dan wel nieuw met terugkoop optie;
- obstakel: volledige spiegeldaling, vanuit TBM het hoge drukinjectie lichaam aanbrengen (umbrella + druklucht), ventielen inbouwen;
- rotatie van schild: drukcylinders paarsgewijs op hydraulisch verschuifbare slee geeft reactiecomponent, clockwise en counter clockwise draaien van snijrad;
- slijtage: moeilijk voorspelbaar, KAS onderzoek, reserve set snijtanden beschikbaar houden;
- steunplaten bij toetreden boorkamer: 2 stuks aan bovenzijde inbouwen of gehele graaffront afdekken;
- blowout gevaar: reduceren door speciale bentoniet samenstelling;
- falen plaatsbepalingssysteem: controle door opdrachtgever!;
- bestuurbaarheid schild (duiken en vetergang): naast standaard procedures corrigeren met drukcylinders plus (optioneel) tweeledig (gelede) schild;
- wegvallen hydraulische druk hoofdcylinders: verdeling over 7 gescheiden groepen;
- staartafdichting: 1 reserve set meenemen;
- zuur grondwater: speciale bentoniet, Ph-waarden meten;
- doorboren van verschillende grondlagen met wateroverspanningen.

3.2.4 Ondersteunende TBM-voorzieningen

De TBM wordt vanuit de startschacht voorzien van energie en alle benodigde bouw- en bedrijfmaterialen. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de benodigde ondersteunende voorzieningen ten behoeve van het boorproces.

Voorzieningen in de tunnelbuis tbv het boorproces

De voorzieningen in de tunnelbuis zijn:
- HSP-kabel voor de energie-voorziening;
- een lichtkabel met tunnelverlichting;
- een telefoon- en datacommunicatiekabel;
- een waterleiding;
- een toe- en afvoerleiding van het hydraulisch systeem;
- eventueel een waterafvoerleiding.

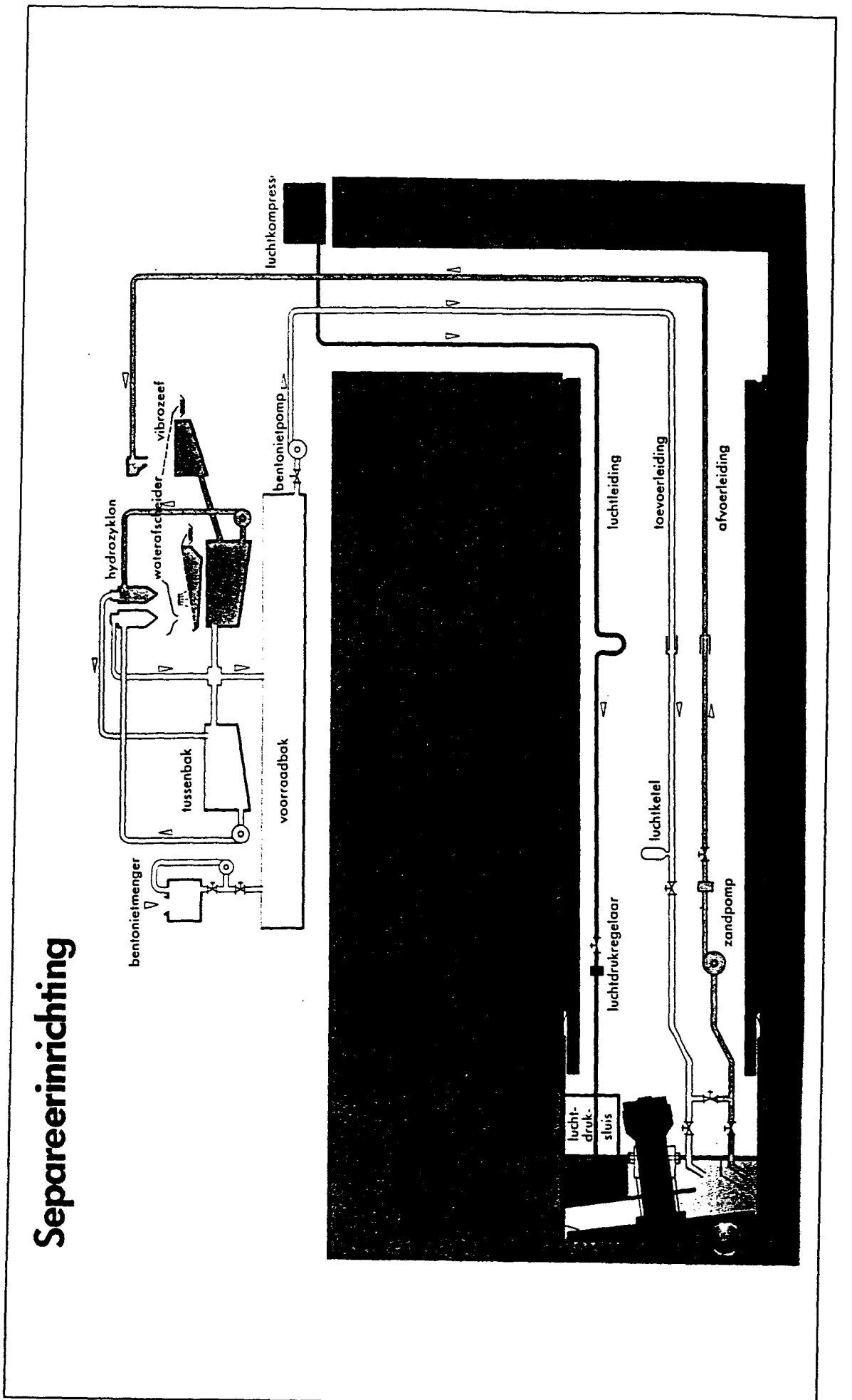
Deze leidingen worden vanuit veiligheidsoogpunt opgehangen aan de zijwand van tunnel.

Op de voet van tunnel ligt een spoorrails waarover de grout, segmenten, verbindingsmaterialen en personeel worden getransporteerd. De luchtverversingskoker wordt in de tunnelkruin opgehangen.
Alle bouwmaterialen voor de bouw van een ring worden op zo'n wijze met een trein getransporteerd dat per gebouwde ring slechts 2 treinbewegingen nodig zijn. De standaardtrein is opgebouwd uit een groutwagon, een segmentenwagon, een materiaalwagon en een locomotief.

Voorzieningen in de schacht en op het maaiveld tbv het boorproces

De voorzieningen in de schacht zijn:
- groutmenginstallatie met bijbehorende silo's: deze wordt indien mogelijk aan de tunnelingang opgesteld zodat de per vrachtwagen aangeleverde bouwstoffen zonder tussentransport in de silo's kunnen worden gestort en van daaruit de mixer voedt. De mixer voorziet de wagon van het tunneltransport;
- batterij-oplaadstation: bij toepassing van een elektrische locomotief. Op de schachtbodem opgesteld om kraantransport te vermijden;
- spoorrails in de schacht: ten behoeve van het laden, reinigen en wisselen van de treinwagons;
- tussenvoorraad van segmenten: als buffer en aanbrengen van uitrusting op segmenten. Deze voorraad moet minstens 2 tot 3 segmentdagproducties bevatten;
- omslagkraan: om de gehele bouwplaats te bedienen. Naast de bevoorrading van de tunnel met bouwstoffen (segmenten) en bouwhulpstoffen (leidingen, kabels, spoorrails, planken etc.) lost deze kraan materialen;
- mechanische werkplaats: een goed uitgeruste werkplaats tbv onderhoud, kleine reparaties en herstel van graafwerktuigen;
- compressiestation: voor de druklucht in het schild en de druklucht van segmentmontagewerktuigen;
- ziekensluis: zoals deze door de opdrachtgever wordt voorschreven indien geen goed uitgerust ziekenhuis in de onmiddellijke omgeving aanwezig is;
- noodstroomverzorging: bij uitval van het stroomnet schakelt deze automatisch aan en voorziet de bouwplaats van de minimaal benodigde stroom.

Met behulp van de gegevens uit de voorgaande paragrafen is het programma van eisen (technische specificaties) opgesteld voor de TBM van de 2e-Heinenoordtunnel.



Figuur 3.3 Principe scheidingsinstallatie

3.3 Beschrijving scheidingsinstallatie

3.3.1 Algemeen

Het functioneren van de scheidingsinstallatie is direct aan de TBM-voortgang gekoppeld. Ondanks deze directe relatie met de TBM is de scheidingsinstallatie niet vanzelfsprekend een onderdeel van de TBM-aanbieding van een leverancier. Bij de aanvraag zijn door de TBM-werkgroep geen technische specificaties mbt de scheidingsinstallatie meegestuurd en is er door de TBM-leveranciers geen scheidingsinstallatie in de aanbiedingen opgenomen. Desondanks wordt in deze rapportage een beschrijving gegeven van de voor het boorproces van een Hydro-schild noodzakelijke scheidingsinstallatie.

3.3.2 Eisen en keuze van het scheidingsmaterieel

De steunvloeistof dient om het graaffront te ondersteunen en de afgegraven gronddeeltjes met het hydraulisch systeem af te voeren. De taak van de scheidingsinstallatie is om de gronddeeltjes te scheiden van de steunvloeistof. Een complete scheiding wordt niet nagestreefd echter een grote gronddichtheid is voor de stortlokatie gewenst.
Voor kleine korrelgroottes is de scheiding lastig. Aan de steunvloeistof worden namelijk additieven toegevoegd om de vloeistof de gewenste eigenschappen te geven. De korrelgrootte van de toevoegingen en de afgegraven grond liggen soms dicht bij elkaar. De scheidingsinstallatie is niet in staat om de gewenste en ongewenste kleinere korreldeeltjes te onderscheiden zodat er een compromis mbt de scheidingsintensiteit moet worden gemaakt.
Afhankelijk van de benodigde ruimte, de opstelvoorwaarden en de ontwateringsmogelijkheden is er een duidelijk onderscheid van de scheidingsapparatuur bij een scheiding van korrels met een grootte van 25μ.
Scheiding van grotere korrelfracties geschiedt met een hydrocycloon met een aangekoppelde ontwaterinstallatie. Ter bescherming van de cycloon worden de grootste gronddelen eerst door een zeef gescheiden van de suspensie.
De scheiding van de fijnere korrelfracties vereisen een grotere inspanning. Een vlokkingsbekken met aangekoppelde gronddroging in centrifuges of filterpersen brengen hoge investerings- en bedrijfskosten met zich mee. Alternatieven zoals storten of mengen van de restvloeistof kunnen lokaal economisch aantrekkelijke oplossingen zijn.
Omdat de afmetingen van de tunnel het niet toelaten de cyclonen op de trailers te bouwen moet de complete scheidingsinstallatie op de oever worden geplaatst.

3.3.3 Technische beschrijving van de scheidingsinstallatie

De scheidingstrappen van de scheidingsinstallatie worden in deze paragraaf achtereenvolgens beschreven.

<u>Eerste scheidingstrap</u>
De vervuilde steunvloeistof doorloopt vanuit de afvoerpijp:
- de stenenkist : deze dient om de bewegingsenergie van de vloeistofstroom te verkleinen en voor een gelijkmatige verdeling op het zeefvlak;
- de voorzeef : deze dient om de nakomende installaties te beschermen tegen grote korreldelen. Het bestaat uit een trillende metalen- of kunstofzeef met een maaswijdte van 4 à 5 mm. De afgezeefde gronddelen worden afgevoerd.

<u>Tweede scheidingstrap</u> (middelste cycloonscheidingstrap)
Het afvoermengsel stroomt van de voorzeef in een opvangreservoir onder de ontwaterinstallatie, van waaruit het mengsel naar de eerste cycloon wordt gepompt. De eerste cycloon scheidt de korrelgroottes van 100μ en groter (de zandfracties). Op een ontwaterinstallatie

wordt het watergehalte van het mengsel tot circa 18 à 20% teruggebracht. Het gescheiden zand wordt met een transportband afgevoerd. Het overloopmengsel van de cycloon en de zeefdoorslag stromen terug naar een opvangreservoir van de ontwaterinstallatie. Bij variabele steunvloeistoftoevoer of plotselinge onderbreking van de toevoer kan de pomp de cycloon enige tijd blijven voeden vanuit het opvangreservoir.

Derde scheidingstrap (fijne cycloonscheidingstrap)
Een tweede cycloon sluit op de eerste aan. Ook hier zorgt een circulatie voor het onderhouden van de bedrijfstoestand bij storingen in de steunvloeistoftoevoer.
De tweede cycloon heeft dankzij zijn kleine diameter een aanzienlijk hogere omwentelingsversnelling dan de eerste cycloon. Ter oriëntatie: gangbare diameters van de eerste cycloon en tweede cycloon zijn 500 en 120 mm. In geval van gunstige en gelijkmatige bedrijfswerkzaamheden kan een scheiding worden verkregen tot circa 30μ. Met behulp van een ontwaterinstallatie kan een groot deel vaste stof worden ingedikt, opgevangen en afgevoerd.
Al naar gelang van de beschikbare apparatuurafmetingen kan de installatie met meerdere parallel werkende installatiemodulen worden uitgevoerd. Om overvloedige suspensietoevoer naar de installatie te voorkomen schakelt een elektrisch bewakingsysteem bij funtiestoornissen de scheidingsinstallatie en de toevoer van de suspensie uit.

Vierde scheidingstrap (fijnste scheidingstrap)
De scheiding van de gronddeeltjes met een korrelgrootte kleiner dan 30μ kan op twee manieren gebeuren namelijk:
- uitvlokken van de suspensie en ontwatering van de uitgevlokte gronddeeltjes door filterpersen;
- directe scheiding van de zwevende delen door centrifuges.

Beide methoden zijn in de praktijk toegepast. De ontwatering mbv filterpersen wordt niet aangeraden vanwege:
- verontreiniging van de bentoniet door de uitvlokkingsmiddelen;
- verlies van bentoniet in de reststof;
- hoger watergehalte van de reststof dan bij centrifugeren.

De centrifuges worden door een dichtheidsgeregelde doseerpomp vanuit de tussenopslag gevoed. Onder normale omstandigheden is per installatie bij een toevoer van 50 m3 per uur een produktie van 10 ton vaste stof en een scheiding tot een korrelgrootte 10 μ te verwachten. Het bentoniet wordt met het residu weer teruggewonnen.

3.3.4 Uitgangspunten ontwerp van de scheidingsinstallatie

De resultaten van de berekeningen en de ontwerpfilosofie van de scheidingsinstallatie leidt tot de volgende ontwerpuitgangspunten van de scheidingsinstallatie:
- steunvloeistof : bentoniet
- maximale suspensietoevoer : 1000 m3/uur
- continue suspensietoevoer : 900 m3/uur
- maximale dichtheid : 1,35 ton/m3
- continue dichtheid : 1,25 m3/uur
- maximale korrelgrootte : 150 mm

4 Selectieprocedure TBM-leveranciers 2e-Heinenoordtunnel

4.1 Aanbiedingen TBM-leveranciers

Na selectie van 7 TBM-leveranciers is de TBM-aanvraag voor de 2e-Heinenoordtunnel verstuurd naar deze 7 TBM-leveranciers. Door de 7 leveranciers zijn 5 aanbiedingen ingediend omdat 2 TBM-leveranciers gezamenlijk een aanbieding indienden.
Ondanks dat er door de TBM-werkgroep om een Hydro-schild was gevraagd hadden 2 leveranciers een EPB-schild aangeboden. De redenen hiervoor waren:
- een EPB zou goedkoper zijn: er is onder andere geen scheidingsinstallatie nodig;
- men heeft veel ervaring met EPB-schilden met een diameter van 8,3 meter. In Japan past men voor de Tokyo Bay-tunnel een Slurry-schild van 13,9 meter toe omdat de referenties van EPB-schilden slechts reiken tot een diameter van 10.8 meter. Voor grotere diameters is veel power nodig bij een EPB-schild. Voor de Slurry-schilden is de ervaring met grote diameters in de range van 10-14 meter talrijker. Ontwikkelingen gaan stap voor stap dus voor het toepassen van EPB-schilden met grote diameter is men nog terughoudend. Voor kleinere diameters, rond de 8 meter, is er wel voldoende ervaring met EPB's. De toepassing van een EPB voor de 2e-Heinenoordtunnel (D=8.3 m) komt dus goed overeen met de ervaring die men heeft.

4.2 Technische beoordeling TBM-aanbiedingen

Een technische beschrijving van de hoofdonderdelen van de TBM-machines is in hoofdstuk 3 gegeven.

De aanbiedingen zijn eerst gecontroleerd op volledigheid. Aan de hand van een technische TBM-checklist is de volledigheid van de verschillende aanbiedingen gecontroleerd en zijn de verschillende aanbiedingen met elkaar vergeleken.

De ervaring heeft geleerd dat naast de controle of de aanbiedingen voldoen aan het gestelde programma van eisen ook moet worden gelet op de volgende technische aspecten:
- waarborging stabiliteit graaffront en mogelijkheid tot betreden van graafkamer;
- voorzieningen mbt waterdichtheid TBM;
- hoofdlager (constructie, levensduur, vervangingsmogelijkheid e.d.);
- staartafdichting;
- groutsysteem om oversnijdingsruimte op te vullen;
- constructie van snijrad (o.a. aantal bewegingsvrijheden);
- geïnstalleerd vermogen;
- voorzieningen mbt voorkoming van tordering van de TBM;
- veiligheidsvoorzieningen van de TBM bij:
  * bij stroomuitval (benodigde handelingen);
  * brand;
  * explosie;
  * lekkage;
- ARBO-wetgeving, Stoomwezen, Caissonwet;
- reserve-onderdelen;
- ringbouwplanningssysteem;
- plaatsbepalingssysteem/besturingssysteem;
- mogelijke vervanging van essentiële onderdelen (hoofdlager, staartdichting, snijtanden etc.);
- meetapparatuur en data-verwerking/opslag (in bijlage 2 is een lijst opgenomen met metingen die standaard tbv van het boorproces worden uitgevoerd);
- tekensystemen en software (aan de laatste ontwikkelingen aangepast?);
- zwaartepunt van TBM;
- vetconsumptie van TBM-onderdelen;

- wiellast van trailer op lining;
- aarding van de TBM;
- fabrikanten en merken van de verschillende TBM-onderdelen;

4.3 Financiële beoordeling TBM-aanbiedingen

De financiële vergelijking van de aanbiedingen van de verschillende TBM-leveranciers is gebeurt aan de hand van tabel 4.1

Kostenitems Hydroschild	Kostenitems EPB-schild
1a ontwerp TBM b assisteren, goedkeuren opdrachtgever c tekeningen/handboeken/specificaties	1a ontwerp TBM b assisteren, goedkeuren opdrachtgever c tekeningen/handboeken/specificaties
2a bouw TBM b proefdraaien op fabriek	2a bouw TBM b proefdraaien op fabriek
3a demontage/transport/levering op bouwplaats b montage op bouwplaats c proefdraaien op bouwplaats	3a demontage/transport/levering op bouwplaats b montage op bouwplaats c proefdraaien op bouwplaats
4a levering/installeren survey-equipment	4a levering/installeren survey-equipment
5a assistentie eerste 200 meter boren (vastleggen aantal mensen van leverancier) b groutinstallatie c remote control d HV-kabel e reserveonderdelen	5a assistentie eerste 200 meter boren (vastleggen aantal mensen van leverancier) b remote control c HV-kabel d reserveonderdelen
6a set drill-bits b verzekering	6a set drill-bits b verzekering
Optelling van deze 6 kostenposten geeft de basis prijs van de TBM echter de TBM is nu nog niet klaar voor gebruik (turn key).	Optelling van deze 6 kostenposten geeft de basis prijs van de TBM echter de TBM is nu nog niet klaar voor gebruik (turn key).
7 graaffontstabiliteit a bentoniet produktie materieel b bentonietverbruik	7 graaffontstabiliteit a foam produktie materieel b foamverbruik c extra stroomverbruik
8 -	8a extra wapening b grondbehandeling tbv afvoer
9 ontgravingsmaterieel a toe en afvoerleidingen b boosterpompen met en zonder transformer c scheidingsinstallatie	9 ontgravingsmaterieel a grondwagons b locomotieven c rails d wissels
10 terugkoopaanbod	10 terugkoopaanbod

Tabel 4.1 Kostenvergelijking aanbiedingen TBM-leveranciers.

Aan de TBM-leveranciers zijn vragen gesteld om een volledig financieel beeld te krijgen van de TBM. Het is van belang gebleken bij de leveranciers veel aandacht te besteden aan de check van de volledigheid van de aanbieding (turn-key/klaar voor gebruik zijn).

Naast de aspecten uit tabel 4.1 is op kostprijsgebied gelet of de volgende onderdelen in de aanbiedingen waren opgenomen en wat de kosten waren van:
- reserveonderdelen;
- slijtdelen zoals een set drill bits;
- tunnel quidance-system;
- groutsysteem;
- bentonietverbruik, foamtoepassing;
- ontgravingsmaterieel (locomotief, wagons, rails etc.);
- stroomtransformers e.d.;
- hydraulisch systeem; pompinstallaties, afsluiters pijpen, spillage tank etc.;
- scheidingsinstallatie;
- tunnelventilatie;
- voorzieningen tbv industrieel water;
- kosten om alle elektrische componenten explosie-proof te maken;
- toezegging van leverancier dat de in budgetprijs ook de kosten voor levering, installatie, proefdraaien en x meter begeleiding plus inwerken boorploeg op de bouwplaats zijn opgenomen;

Opmerking:
Bedacht moet worden dat de leverancier meestal alleen de TBM van graafwiel t/m achterkant van het trailersysteem van de TBM aanbiedt. Dit houdt in dat kabels, ventilatie, hydraulisch systeem, rails en bielzen en af- en toevoersystemen van achterkant TBM t/m maaiveld niet in de prijs zijn inbegrepen. Dit geldt meestal ook voor de scheidingsinstallatie, back-up generator, compressors, electriciteits- en bentonietverbruik.

4.4 Definitieve keuze TBM

In een drietal gespreksronden zijn de TBM-leveranciers apart ondervraagd.

De 2 EPB-aanbiedingen vielen al na de eerste gespreksronde af vanwege onvoldoende vertrouwen van de TBM-werkgroep in de toepasbaarheid van een EPB-schild onder de omstandigheden die er heersen bij de 2e-Heinenoordtunnel (hoge waterdruk van 3,4 bar en 70 à 80 % zandgrond).

In de tweede gespreksronde zijn de overgebleven TBM-leveranciers verder ondervraagd. Ten slotte is er nog een derde gespreksronde geweest waarbij aan de twee meestbelovende TBM-aanbieders vragen zijn gesteld.

Uiteindelijk is voor een Slurry-schildleverancier gekozen.

Bijlagen

Bijlage 1 Overzicht materieelverschillen tussen EPB- en Hydo-schild

EPB-schild	Hydro-schild
TBM - schild - aandruk cylinders - graafwiel - frontondersteuning (foam en grond-drukbalance - staartdichting (staalborstels en vet)	TBM - schild - aandruk cylinders - graafwiel - frontondersteuning (bentoniet en lucht-drukbuffer) - staartdichting (neopreen)
segmenthandling	segmenthandling
segmenterector	segmenterector
groutinjectie	groutinjectie
foaminstallatie - foamconsumptie	bentonietcentrale - bentonietconsumptie
afvoer grond - rotadumpers - locomotieven - depot	afvoer grond - baggerpomp - boosterstation - leidingen - grondscheidingsinstallatie
ZED 261 (guidance-system)	ZED 261 (guidance-system)
luchtdruk (compressoren)	luchtdruk (compressoren)
diverse transportmaterieel - segmenttrein - grouttrein - personeelstrein - platte trein - locomotief	diverse transportmaterieel - segmenttrein - grouttrein - personeelstrein - platte trein - locomotief
diverse services in tunnel - HSP-kabel 10 kV - luchtdruk dubbel - rails/wissels	diverse services in tunnel - HSP-kabel 10 kV - luchtdruk dubbel - aanvoerleiding bentoniet 350 mm - afvoerleiding grondmengsel 350 mm - rails/wissels
groutcentrale 25 m3/uur	groutcentrale 25 m3/uur
segmentopslag - aanbrengen neopreen afdichtingsprofie-len - aanbrengen bitumenstroken - inzepen segmenten	segmentopslag - aanbrengen neopreen afdichtingspro-fielen - aanbrengen bitumenstroken - inzepen segmenten

Bijlage 2 Standaard metingen tbv het boorproces

Voor geboorde tunnels worden ten behoeve van de kwaliteitsborging van het boorproces en de ringbouw de volgende metingen uitgevoerd en gerapporteerd.

Metingen ten behoeve van het boorproces

- steundruk aan het graaffront;
- bentonietspiegelniveau;
- draaimoment en draaisnelheid van het snijrad;
- draaitijd en draairichting van het snijrad;
- snijradpositie;
- drukkracht van de drukvijzels;
- schildregeling (horizontale en vertikale helling van de schildas);
- schildverdraaiing tgv torsie;
- grondwaterdruk aan het graaffront;
- aan- en afvoermengsel van de suspensie;
- kwaliteitscontrole van de suspensie;
- luchtverbruik tijdens graaffrontondersteuning onder druklucht;
- stroomverbruik van de aggregaten.

Metingen ten behoeve van het bouwen van de tunnelring

- geometrische positie van de ring ter plaatse van staartopening (spleet tussen buitenkant schildmantel en segment);
- geometrische positie van de ring ten opzicht van de schildas;
- groutdruk en groutmengsel van het grout dat de staartopening opvult tussen schildmantel en segment.