

DOT-tunnel onder het Groene Hart

***Deel I: analyse van het boor- en
bouwproces van een DOT-tunnel***

Datum	3 november 1998
Ons kenmerk	MVE/R/985611/3.10.10
Bestand	EINDRAPPORT DEEL I.DOC
Opsteller	M.F.H. Veenma
Status	definitief
Fase	eindrapport
Gecontroleerd	-
Goedgekeurd	-
Geautoriseerd	-

Voorwoord

Na zes jaar studie aan de Faculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft heeft u het resultaat in handen van één van mijn laatste activiteiten als student. Deze rapportage vormt het eindverslag van mijn afstudeeronderzoek dat mede mogelijk is gemaakt door DHV Milieu en Infrastructuur. Namens DHV Milieu en Infrastructuur heb ik stage gelopen bij de Projectorganisatie Hogesnelheidslijn-Zuid, projectbureau Boortunnel in Utrecht.

In de Projectorganisatie Hogesnelheidslijn-Zuid wordt op dit moment hard gewerkt aan het ontwerp van de infrastructuur voor de HSL-Zuid, die 2005 gereed zal moeten zijn. In de Projectorganisatie Hogesnelheidslijn-Zuid werken NS Railinfrabeheer, Holland Railconsult en DHV Milieu en Infrastructuur samen onder verantwoordelijkheid van de Ministeries van Verkeer en Waterstaat en VROM.

De rapportage van het afstudeeronderzoek bestaat uit drie deelrapporten die min of meer onafhankelijk van elkaar kunnen worden gelezen. Het eerste deelrapport vormt het hoofdrapport waarin een analyse is gemaakt van het boor- en bouwproces van een DOT-tunnel. Het tweede deelrapport is toegespitst op de boortunnel onder het Groene Hart en bevat de specifieke uitwerking van een haalbaarheidsstudie van de DOT-tunnel in vergelijking met het referentieontwerp. Het derde deelrapport bevat de gedetailleerde afleiding van de verschillende modelleringen en risico-analyses, die zijn gebruikt in het eerste deelrapport. In dit laatste deelrapport kunt u ook de overige achtergrond informatie vinden.

Ik wil van deze gelegenheid gebruik maken om een aantal personen te bedanken voor de begeleiding, het meedenken en de ondersteuning. Als eerste mijn afstudeercommissie met prof.dr.s.ir. J.K. Vrijling, prof.ir. E. Horvat, ir. H.K.T. Kuijper, ir. H. Burger en ir. M.P. Oude Essink. Speciaal Hans en Michel die als dagelijkse begeleiders de tijd namen voor een kritische blik en korte discussies. Verder alle collega's van het "boortunnel-team" voor de serieuze en minder serieuze momenten gedurende de afgelopen maanden. Tot slot wil ik vrienden en familie bedanken voor hun directe maar ook zeker indirecte ondersteuning.

Ik hoop dat u na het lezen van deze rapportage meer inzicht heeft gekregen in de Double-O-Tube tunnel; kortweg DOT-tunnel genaamd.

Mark Veenma
Utrecht, 3 november 1998

Samenvatting

Dit deelrapport vormt samen met de overige twee deelrapporten de rapportage van het afstudeeronderzoek naar de haalbaarheid van een Double-O-Tube tunnel. Dit eerste deelrapport is toegespitst op de analyse van het boor- en bouwproces van een DOT-tunnel onder Nederlandse omstandigheden. Het afstudeeronderzoek heeft als titel "DOT-tunnel onder Het Groene Hart – haalbaarheidsstudie van een Double-O-Tube tunnel onder Nederlandse omstandigheden" en heeft, namens DHV Milieu en Infrastructuur, plaatsgevonden bij de Projectorganisatie HSL-Zuid, projectbureau boortunnel. Het afstudeeronderzoek is uitgevoerd in opdracht van de Faculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft en is begeleid door een afstudeercommissie. De afstudeercommissie bestaat uit prof.dr.s.ir. J.K. Vrijling (vakgroep waterbouwkunde, Civiele Techniek), prof.ir. E. Horvat (sectie Ondergronds Bouwen, Civiele Techniek), ir. H.K.T. Kuijper (vakgroep waterbouwkunde, Civiele Techniek), ir. H. Burger (DHV Milieu en Infrastructuur) en ir. M.P. Oude Essink (Bouwdienst Rijkswaterstaat).

Het doel van dit afstudeeronderzoek is het onderzoeken van de haalbaarheid van een DOT-tunnel onder Nederlandse omstandigheden en specifiek voor de HSL-Zuid boortunnel onder Het Groene Hart. In deelrapport I is een analyse gemaakt van het boor- en bouwproces van een DOT-tunnel. Het tweede deelrapport is toegespitst op de boortunnel onder het Groene Hart en bevat de specifieke uitwerking van een haalbaarheidsstudie van de DOT-tunnel in vergelijking met het Referentie Ontwerp. Het derde deelrapport bevat de gedetailleerde afleiding van de verschillende modelleringen en risico-analyses, die zijn gebruikt in het eerste deelrapport. In dit laatste deelrapport is ook de overige achtergrond informatie te vinden.

Om de haalbaarheid van een DOT-tunnel te onderzoeken onder de Nederlandse omstandigheden is een analyse gemaakt van het boor- en bouwproces. Aangezien de DOT-tunnel zijn afkomst ontleent aan de cirkelvormige tunnels is aangegeven in hoeverre er een analogie kan worden getrokken tussen beide tunnelvormen en boormethodes, maar vooral waar niet.

De tunnelboormachine heeft een aantal aanpassingen ondergaan als gevolg van het boor- en bouwproces van DOT-tunnels, waaronder een aantal aanpassingen van de machine, zoals speciale erectoren, het segment expansion device, het segment holding device, de rolling control jacks (DOT-schild), een beveiliging voor het elkaar raken van de graafwielen (DOT-schild) en de face-collapse detector (MF-schild). Het bouwen van een DOT-tunnel is complexer dan een cirkelvormige tunnel door de verschillende typen segmenten. Dit blijkt eens te meer uit de technologie die is ontwikkeld (speciale erectoren, segment expansion device, segment holding device) om beschadiging van de segmenten bij inbouwen zoveel mogelijk te voorkomen. Het beheersen van het roteren van het schild om de x-as (rolling) verdient extra aandacht aangezien de niet-ronde vorm van de tunnel het niet toelaat dat de tunnel teveel roteert omdat anders het Profiel van Vrije Ruimte in het geding komt. Pitching en yawing treden nauwelijks op en zijn goed in de hand te houden.

Voor het garanderen van de boorfrontstabiliteit worden tijdens het boren van de tunnel onder- en bovengrenzen gesteld, waarbij een onderscheid moet worden gemaakt voor een slurry-schild en een EPB-schild. Bij een slurry-schild heeft de breedte een geringe invloed op de grootte van de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt. Voor de maximaal toelaatbare steundruk geldt dat deze wordt bepaald aan de hand van een verticale evenwichtssituatie, waarop de breedte van de tunnel geen invloed heeft.

Derhalve is de maximale toelaatbare steundruk gelijk voor tunnelboormachines van DOT-tunnels en cirkelvormige boortunnels. Toch zijn er meerdere mechanismen die de bovengrens bepalen van de steundruk, te weten: piping en fracturing – Op deze mechanismen dient ook te worden getoetst. De steundruk van het boorfront bij een EPB-schild is, net als bij slurry-schilden, gedefinieerd door een bezwijkmechanisme door middel van afschuiving en kan worden gezien als een “gecontroleerde instorting”. In theorie bezwijkt het boorfront pas wanneer de gronddrukcoëfficiënt de actieve waarde K_a bereikt terwijl in de praktijk de neutrale gronddrukcoëfficiënt wordt aangehouden. Een bovengrens is voor EPB-schilden niet echt te stellen. De theoretische bovengrenswaarde zal niet worden gehaald aangezien de krachten voor het leveren van het benodigde draaimoment onnodig worden opgevoerd en de grond omhoog kan drukken wanneer de gronddrukcoëfficiënt groter is dan één. Indien voor de waarde van de gronddrukcoëfficiënt één wordt aangehouden geldt dezelfde filosofie als bij slurry-schilden oftewel een verticale evenwichtssituatie. De ideale situatie treedt op wanneer de verplaatsing gelijk is aan nul oftewel bij de neutrale gronddrukcoëfficiënt.

Voor het bepalen van de diepteligging van de DOT-tunnel moet worden getoetst op de toe te passen steundrukken, werken onder verhoogde luchtdruk en opdrijven. Uit de berekeningen kan worden geconcludeerd dat de minimaal benodigde steundruk voor een DOT-tunnel iets hoger is dan de steundruk voor een cirkelvormige tunnel - orde grootte 5%. Ondanks deze kleine steundrukverhoging is de marge tussen de minimaal benodigde en maximaal toelaatbare steundruk nog steeds ruim voldoende. Voor het criterium opdrijven geldt dat het mechanisme voor een DOT-tunnel sneller maatgevend is, waardoor de DOT-tunnel iets dieper moet liggen dan een cirkelvormige tunnel.

Tijdens en na het boorproces kunnen zettingen optreden. De maximale zetting bij een DOT-tunnel is groter dan twee buizen met eenzelfde diameter op een afstand van een diameter uit elkaar. Echter de breedte van de zettingstrog bij een DOT-tunnel is minder dan bij twee buizen met eenzelfde diameter. Dit kan van groot belang zijn wanneer in een stedelijke omgeving geboord moet worden.

Over de krachtswerking in de lining van een DOT-tunnel is nog zeer weinig bekend. In dit afstudeeronderzoek zal hier niet verder op worden ingegaan. Toch dient vermeld te worden dat kennis en inzicht over de krachtswerking van essentieel belang is om tot een goede analyse en vergelijking te komen.

In theorie zou het mogelijk moeten zijn om voor een DOT dezelfde voortgangssnelheid te halen als bij een cirkelvormig schild. In de praktijk ligt de voortgangssnelheid lager omdat er een afhankelijkheid is tussen de twee erectoren tijdens het inbouwen van de ring en het inbouwen complexer is door de verschillende typen segmenten. De krachtswerking in en op de lining van de DOT-tunnel wordt door tal van factoren beïnvloed die niet of nauwelijks van invloed zijn op de cirkelvormige tunnel, zoals complexe krachtswerking in de K-segmenten, scheefstand van de kolommen en asymmetrische belastinggevallen in de gebruiksfase.

De waterafdichting is in principe hetzelfde als bij de conventionele tunnelboormachines. Bij het ontwerp van de tunnelboormachine moet goed worden gelet op de detaillering van de waterafdichting bij de sluitsegmenten.

Om voor een DOT-tunnel inzichtelijk te krijgen waar de risico's zitten met betrekking tot geld en tijd moet eerst duidelijk worden wat de belangrijkste risico's zijn, die de kwaliteit beïnvloeden van de tunnel. Dit is gedaan door het maken van een technische risico-analyse. In deze risico-analyse zijn faalkansen met een grote bandbreedte gebruikt enerzijds omdat er te weinig tot geen referentie materiaal voor handen is met betrekking tot DOT-tunnels en anderzijds omdat het signaleren van de risico's in deze fase van het onderzoek belangrijker is dan de daarbijbehorende grootte van de faalkans. De risico-analyse is uitgewerkt voor een zestal type tunnelboormachines. De vorm van de machine en tunnel, de stand van de graafwielen en de boorfrontondersteuning zijn hierbij verschillend. Met behulp van het risico-afwegingsmodel is een afweging gemaakt voor het type boorfrontondersteuning en de stand van de graafwielen.

De keuze voor het type boorfrontondersteuning vindt op dezelfde wijze plaats als bij conventionele tunnelboormachines en wel op de punten vakbekwaamheid, slijtage, krachtenbalans, grondafvoer en hergebruik van de grond. Op basis hiervan kan *geen* algemene voorkeur worden uitgesproken voor een bepaalde type tunnelboormachine. De keuze tussen een EPB-schild of een slurry-schild dient met name gemaakt te worden op basis van de te verwachten geologische omstandigheden en voor een deel op basis van milieukundige aspecten. Ondanks de mogelijkheid dat de graafwielen bij een DOT-TBM elkaar zouden kunnen raken is deze kans erg klein door een ingebouwd controlesysteem. De drukopbouw en de daar aangekoppelde beheersing van het boorproces kunnen tot grotere risico's leiden indien de graafwielen versprongen staan ten opzichte van elkaar. Voor de afweging van de stand van de graafwielen bestaat de voorkeur voor de graafwielen in één vlak zoals bij een DOT-schild gebruikelijk is, maar de versprongen stand van de graafwielen is niet onmogelijk.

Overall kan worden geconcludeerd dat een DOT-tunnel haalbaar is onder Nederlandse omstandigheden. Hierbij verdient het de aanbeveling om de volgende aspecten nader te onderzoeken:

- Het toetsen van de berekeningen voor de steundruk van niet-cirkelvormige tunnels aan de hand van fysisch onderzoek door middel van of geocentrifuge-proeven of aan de hand van praktijkvoorbeelden;
- De grondvervormingen bij een DOT-tunnel door bijvoorbeeld een modellering in Plaxis;
- De krachtswerking in en op de lining van een DOT-tunnel.

Inhoud

VOORWOORD	i
SAMENVATTING	ii
1 INLEIDING	1
1.1 Kernvragen onderzoek	2
1.2 Doelstelling onderzoek	2
1.3 Beperking onderzoek	2
1.4 Fasering onderzoek	3
1.5 Leeswijzer deelrapport I	4
2 OPBOUW TUNNELBOORMACHINES	5
2.1 Geschiedenis van de DOT-tunnel	5
2.2 Boormethoden DOT-vormige-tunnels	5
2.2.1 Multi-Face methode	6
2.2.2 DOT methode	6
2.2.3 H&V methode	6
2.2.4 DPLEX methode	6
2.3 Verschillen	8
2.4 Speciale Double-O-Tube ontwikkelingen	9
3 BOORFRONTSTABILITEIT	12
3.1 Algemeen	12
3.2 Boorfrontstabiliteit bij slurry-schilden	13
3.2.1 Minimale steundruk	13
3.2.2 Maximale steundruk	20
3.3 Boorfrontstabiliteit bij EPB-schilden	22
3.3.1 Minimale steundruk	22
3.3.2 Maximale steundruk	23
3.4 Conclusie	23
4 DIEPTELIKKING	25
4.1 Boren	25
4.2 Werken onder verhoogde luchtdruk	25
4.3 Opdrijven	26
4.3.1 oprijfberekening	26
4.3.2 rekenvoorbeeld	27
4.4 Opbreken	28
4.5 Diepteligging DOT-tunnel	28

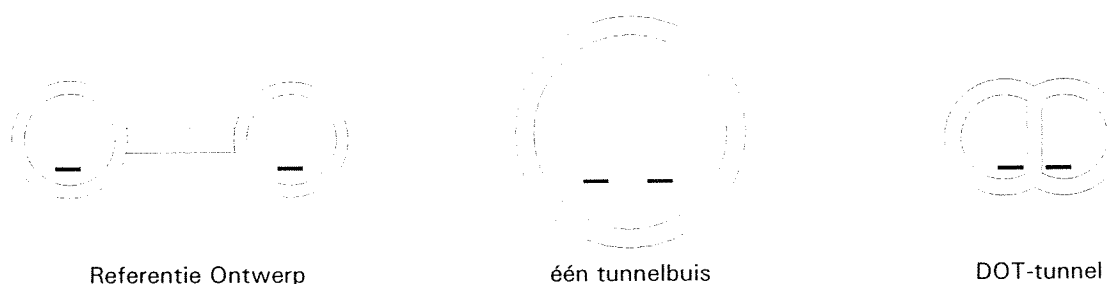
5	VERVORMING VAN DE GROND	29
5.1	Algemeen	29
5.2	Modellering vervormingen in dwarsrichting	30
5.3	Modellering vervormingen in de langsrichting	32
5.4	Vergelijking vervormingen van de verschillende tunnelvormen	33
6	TUNNELBOUW	37
6.1	Liningtypen	37
6.1.1	Configuratie	37
6.1.2	Bochten	38
6.1.3	Ringvoegen	39
6.2	Plaatsing van de segmenten	40
6.3	Voortgangssnelheid	41
6.4	Vervormingen	42
6.5	Krachtenwerking in de lining	42
6.6	Conclusie	44
7	WATERAFDICHTING	45
7.1	Waterafdichting aan het boorfront	45
7.2	Waterafdichting bij de staartspleet	45
7.3	Conclusie	46
8	BESTUREN VAN DE MACHINE	47
8.1	Multi-Face methode	47
8.2	DOT-methode	48
8.3	Vergelijking	49
9	RISICO-AFWEGINGSMODEL	50
9.1	Algemeen	50
9.2	Foutenboom	50
9.2.1	Uitgangspunten	51
9.2.2	Opstellen foutenboom	52
9.3	Risico-analyses	55
9.3.1	Algemeen	55
9.3.2	Type tunnelboormachines	55
9.3.3	Risicogroepen	56
9.3.4	Vergelijken van de risico-analyses	57
10	KEUZE DOT-TUNNELBOORMACHINE	63
10.1	Afweging boorfront ondersteuning	63
10.2	Afweging stand graafwielen	64
10.3	Conclusie	65
11	Haalbaarheid DOT-tunnels	66
11.1	Beheersing proces	66
11.2	Constructie	68
11.3	Aanbevelingen	68

1 INLEIDING

Een deel van de HSL-Zuid gaat dwars door het natuurgebied Het Groene Hart. Om dit natuurgebied niet te verstoren, heeft het kabinet gekozen voor de aanleg van een tunnel. In haalbaarheidsstudies zijn de verschillende methoden voor een tunnel onderzocht. Het kabinet heeft uiteindelijk gekozen voor een boortunnel. In het Referentie Ontwerp wordt uitgegaan van een boortunnel bestaande uit twee buizen welke, op regelmatige afstand, onderling worden verbonden door dwarsverbindingen.

Het huidige tracé van de boortunnel loopt van Westeinde tot Leiderdorp en heeft een lengte van zo'n 7 km. De toeritten worden deels uitgevoerd als open bak en deels als Cut & Cover (C&C).

Aangezien er meerdere configuraties mogelijk zijn om een tunnel vorm te geven worden twee andere tunnelconcepten verder uitgezocht, te weten twee sporen in één tunnelbuis en een Double-O-Tube (DOT) tunnel – figuur 1.1. Doel van deze studies is om na te gaan welke vrijheden nog aan de aannemers kunnen worden gegeven en welke aanvullende eisen hieraan dan eventueel gesteld dienen te worden. Tevens wordt nagegaan wat de effecten zijn op de omgeving.



figuur 1.1 - ontwerpconfiguraties boortunnel

Dit onderzoek richt zich uitsluitend op de DOT-tunnel en heeft plaatsgevonden bij de projectorganisatie HSL-Zuid, projectbureau boortunnel in Utrecht.

De balans zou wel eens ten gunste van de DOT-tunnel kunnen uitvallen door:

- Het ontbreken van de dwarsverbindingen
- het kleiner benodigd oppervlak
- het kleinere horizontale ruimtebeslag
- de mogelijk lagere kosten

Het grootste nadeel is gelegen in de complexiteit van het boor- en bouwproces.

1.1 Kernvragen onderzoek

Aan de hand van de globale beschrijving van de verschillende boormethoden zijn een aantal kernvragen opgesteld voor het onderzoek:

Is een DOT-tunnel haalbaar onder de Nederlandse omstandigheden?

Om de haalbaarheid van een DOT-tunnel te onderzoeken onder de Nederlandse omstandigheden is een analyse gemaakt van het boor- en bouwproces. Aangezien de DOT-tunnel zijn afkomst ontleend van de cirkelvormige tunnels is onderzocht in hoeverre er een analogie kan worden getrokken tussen beide tunnelvormen en boormethodes. Met name zal duidelijk worden waar beide tunnelvormen sterk verschillen van elkaar en vooral waar de DOT-tunnel meer of minder risico's met zich meebrengt.

Wat zijn de risico's gedurende de uitvoeringsfase van een DOT-tunnel?

Door de niet-cirkelvormige vorm van de DOT-tunnel wordt het gehele boor- en bouwproces een stuk complexer. Na de analyse van het boor- en bouwproces is bekeken wat de kritieke aspecten zijn van het DOT-tunnel proces met name gedurende de uitvoeringsfase.

Is een DOT-tunnel concurrerend met het huidig ontwerp van de boortunnel onder Het Groene Hart?

De niet-cirkelvormige DOT-tunnel heeft niet alleen invloed op het boor- en bouwproces, maar ook op het ontwerp van de vluchtschachten en de toeritten. Daarnaast heeft het veranderde ontwerp consequenties voor de bouwtijd en de kosten. Een vergelijking tussen het Referentie Ontwerp en de DOT-tunnel op basis van bouwtijd, bouw hinder, kosten en risico's moet uitwijzen of de DOT-tunnel concurrerend is of niet.

1.2 Doelstelling onderzoek

Het doel van dit onderzoek is driedelig:

- Het onderzoeken van de haalbaarheid van een DOT-tunnel voor de boortunnel onder het Groene Hart;
- Het kunnen vergelijken van een DOT-tunnel met twee cirkelvormige, van vrijwel gelijke diameter, boortunnels op basis van bouw tijd, theoretische kosten en risico's voor de boortunnel onder het Groene Hart.
- Het aangeven van eisen, welke extra dienen te worden gesteld bij een realisatie van een DOT-tunnel.

1.3 Beperking onderzoek

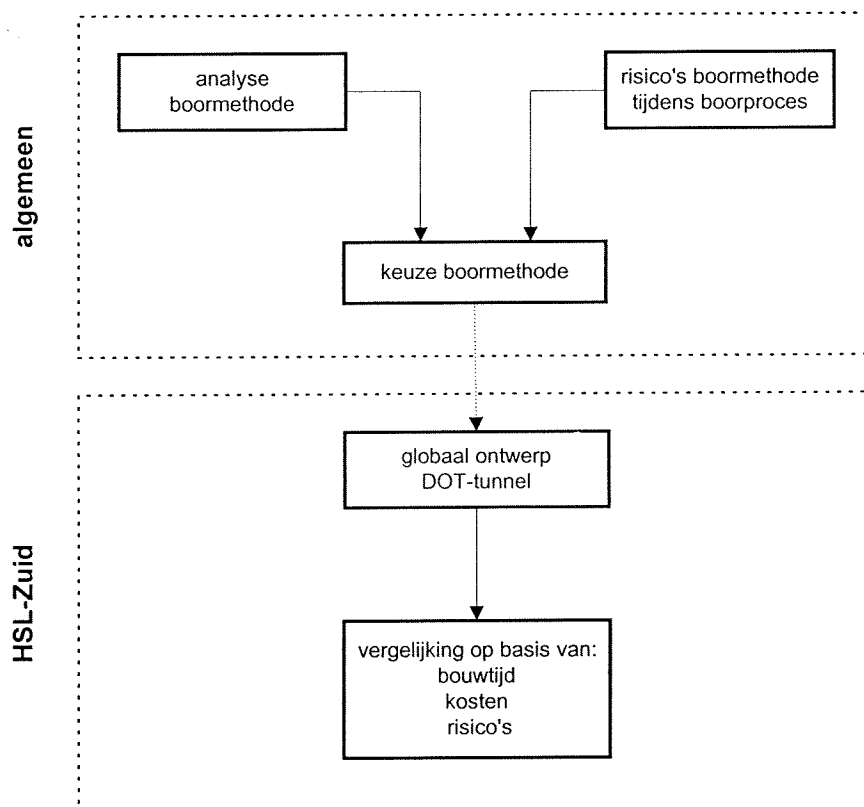
- De H&V en de DPLEX methoden worden verder buiten beschouwing gelaten. Deze verschillen dermate van de andere twee methoden dat het op zichzelf staande onderzoeken worden en er is zeer weinig bekend over deze methoden. Tevens is de H&V methode vooral gericht op stedelijke situaties met veel ruimtebeperking; hetgeen noodzaakt tot deels onder elkaar boren en deels naast elkaar.
- De krachtswerking van de grond op de lining en de krachtswerking binnen in de lining zijn niet gedetailleerd uitgewerkt in dit onderzoek.

1.4 Fasering onderzoek

Om het onderzoek te structureren is een verdeling gemaakt in een vijftal fasen.

- fase 1 Analyse boor- en bouwproces DOT
- fase 2 Risico's DOT-boorproces tijdens de uitvoeringsfase
- fase 3 Keuze boormethode
- fase 4 Globaal ontwerp DOT-tunnel Groene Hart
- fase 5 Vergelijking met Referentie Ontwerp

De eerste drie fasen van het onderzoek hebben een algemeen karakter, terwijl fase vier en vijf specifiek zijn gericht op de HSL-Zuid boortunnel onder het Groene Hart. In figuur 1.2 is nogmaals aangegeven hoe het onderzoek is gefaseerd.



figuur 1.2 – fasering onderzoek

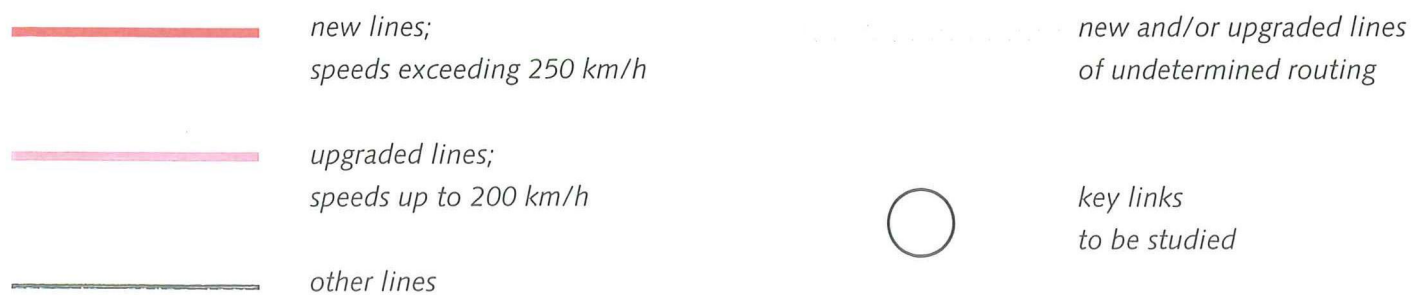
De rapportage van het onderzoek bestaat uit drie deelrapporten die min of meer onafhankelijk van elkaar kunnen worden gelezen. Het eerste deelrapport vormt het hoofdrapport waarin een analyse is gemaakt van het boor- en bouwproces van een DOT-tunnel. Het tweede deelrapport is toegespitst op de boortunnel onder het Groene Hart en bevat de specifieke uitwerking van een haalbaarheidstudie van de DOT-tunnel in vergelijking met het referentieontwerp. Het derde deelrapport bevat de gedetailleerde afleiding van de verschillende modelleringen en risico-analyses, die zijn gebruikt in het eerste deelrapport.

1.5 Leeswijzer deelrapport I

Dit deelrapport is als volgt ingedeeld: in hoofdstuk 2 wordt allereerst de opbouw van de tunnelboormachine met de belangrijkste onderdelen behandeld. Een andere opbouw van de machine kan gevolgen hebben voor één of meer functies van de tunnelboormachine. De boorfrontstabiliteit wordt uiteengezet in hoofdstuk 3. Reeds bestaande modellen voor cirkelvormige boortunnels zijn aangepast voor DOT-tunnels en de Nederlandse heterogene gronden. De boorfrontstabiliteit is één van de criteria voor het bepalen van de (minimale) diepteligging. Naast de boorfrontstabiliteit spelen ook opdrijf- en opbreekmechanismen een rol. Dit alles is uitgewerkt in hoofdstuk 4. Eén van de ongewenste effecten tijdens het boor- en bouwproces zijn deformaties en zettingen van de grond. In hoofdstuk 5 is een empirische modellering opgesteld van deformaties en zettingen voor een DOT-tunnel, waarna een vergelijking wordt gemaakt tussen verschillende tunnelvormen. In hoofdstuk 6 wordt uitgelegd hoe de tunnelbouw plaatsvindt. Tevens zal worden aangegeven hoe de krachtswerking in de lining verder moet worden onderzocht. De waterdichting wordt uitgelegd in hoofdstuk 7. Stuurcorrecties van de tunnelboormachine verdienen extra aandacht omdat kleine rotaties en verplaatsingen bij een niet-cirkelvormige tunnel kunnen leiden tot doorsnijding van het Profiel van Vrije Ruimte (PVR) – hoofdstuk 8. In hoofdstuk 9 wordt het risico-afwegingsmodel behandeld. In dit afwegingsmodel zijn de risico's vergeleken tussen de verschillende typen tunnelboormachines, waarna in hoofdstuk 10 een keuze is gemaakt voor een type tunnelboormachine van een DOT-tunnel. De resultaten zijn samengevat in hoofdstuk 11.



High speed railroads in Europe

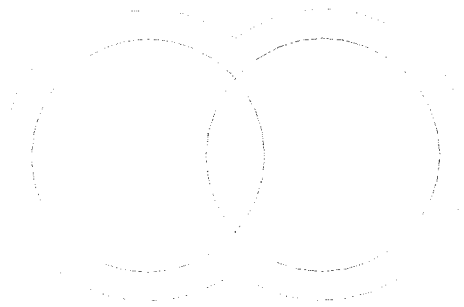


2 OPBOUW TUNNELBOORMACHINES

Om een goede analyse te kunnen maken van het boor- en bouwproces van Double-O-Tube tunnels (DOT) is het belangrijk om te weten hoe een tunnelboormachine voor dit type tunnels is opgebouwd. Aangezien DOT-tunnels analoog zijn ontwikkeld aan de cirkelvormige boortunnels, vertonen ze veel overeenkomsten; Datzelfde geldt voor de tunnelboormachines. Toch zijn er een aantal verschillen aan te geven in de opbouw van de verscheidene typen tunnelboormachines, welke in dit hoofdstuk zullen worden behandeld.

2.1 Geschiedenis van de DOT-tunnel

In Japan is door het intensieve gebruik van zowel de boven- als de ondergrond de ruimte voor ondergrondse constructies beperkt geworden. Daarom is men al in de jaren tachtig begonnen met de ontwikkeling van niet-cirkelvormige tunnels, die beter aansluiten bij het benodigde inwendige oppervlak en daardoor minder ruimte in beslag nemen. De tunnelvorm Double-O-Tube of kortweg DOT is de meest bekende. De DOT-tunnel bestaat uit twee elkaar overlappende cirkels, zoals weergegeven in onderstaande figuur. De naam DOT heeft echter een dubbele betekenis: behalve de tunnelvorm wordt ook nog gerefereerd aan de aannemers die deze van de boormethodes hebben ontwikkeld: (Daiho/Obayashi/Taisei).



figuur 2.1 - Double-O-Tube tunnel

2.2 Boormethoden DOT-vormige-tunnels

Er zijn inmiddels vier boormethodes ontwikkeld waarmee DOT-vormige-tunnels kunnen worden gemaakt, te weten – figuur 2.2:

- Multi-Face methode
- DOT methode
- H&V methode
- DPLEX methode

2.2.1 Multi-Face methode

Bij de Multi-Face (MF) methode wordt gebruik gemaakt van twee elkaar overlappende graafwielen, die versprongen staan ten opzichte van elkaar. Hierdoor is het mogelijk om zowel gesloten als open graafwielen toe te passen. De twee graafwielen kunnen één gemeenschappelijke mengkamer dan wel twee gescheiden mengkamers hebben. In de praktijk worden de gescheiden mengkamers toegepast vanwege de betere boorfrontstabiliteit en besturing van de boormachine. Tot nu toe is de boorfrontondersteuning van MF-schilden een slurry-schild. Tevens is de lengte van de MF-tunnelboormachine wat langer dan een normale machine door de versprongen stand van de graafwielen.

2.2.2 DOT methode

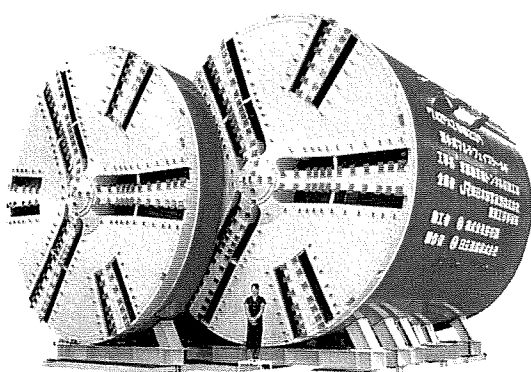
In tegenstelling tot de MF-methode staan de beide graafwielen bij de DOT-methode in één vlak, waardoor het onmogelijk is om een gesloten graafwiel toe te passen. Tevens maken beide graafwielen gebruik van dezelfde mengkamer. Een EPB-schild is de boorfrontondersteuning van de DOT methode. Eventueel zou ook een high density-slurry-schild kunnen worden toegepast. De drie aannemers, die deze techniek samen hebben ontwikkeld, hebben patent op de DOT-methode. Van de vier technieken is de DOT-methode het meest toegepast voor het maken van deze tunnelvorm.

2.2.3 H&V methode

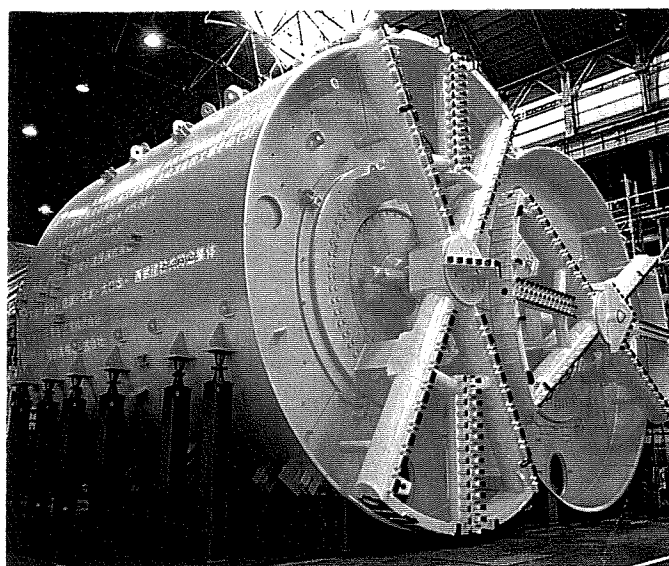
De H&V-methode is een afkorting voor Horizontale&Verticale schild methode. Bij de H&V-methode staan beide graafwielen in één vlak, maar de cirkels overlappen elkaar niet. Met de H&V-methode kunnen twee tunnelbuizen zeer dicht bij elkaar gelegd worden (klein ruimtebeslag) en is het mogelijk de tunnelbuizen zowel in horizontale als verticale richting naast elkaar te leggen. Het roteren van de tunnelbuizen is met de MF en de DOT methodes niet mogelijk vanwege de aanwezigheid van de kolommen. Indien de kolommen scheef staan blijft een andere ruimte over. H&V-schilden hebben dit nadeel niet omdat beide tunnelbuizen rond zijn.

2.2.4 DPLEX methode

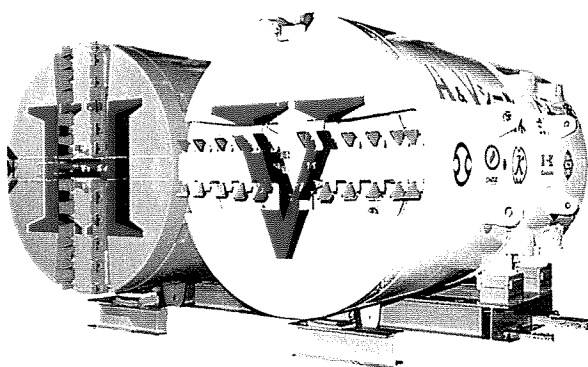
De DPLEX methode is een ontwikkeling van het Japanse bedrijf DAIHO-corporation. DPLEX staat voor Developing Parallel Link Excavated shield method. Met dit type aandrijving is het mogelijk tunnelboormachines en dus ook tunnels te bouwen met allerlei soorten doorsneden. Het graafwiel roteert niet, maar maakt een schuivende beweging. Het snijframe roteert wel, maar is eenvoudiger. Een snijframe is gemonteerd op meerdere excentrische assen. De assen maken allen dezelfde beweging waardoor het frame een beweging in de rondte maakt. Afhankelijk van de geometrie van het frame ontstaat het boorgat. In vergelijking met het conventionele ronde schild is slechts 1/3 tot de helft van het vermogen nodig om te draaien. Tevens wordt de afgelegde afstand van de snijtanden beperkt. Speciale kruisvormige bits worden toegepast bij dit type graafwiel vanwege de alternatieve beweging van het graafwiel.



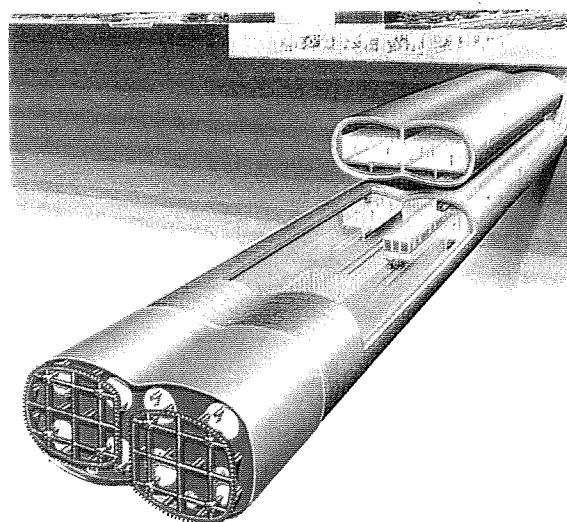
Multi-Face methode



DOT methode



H&V methode



DPLEX methode

figuur 2.2 - boormethoden voor DOT-tunnels

2.3 Verschillen

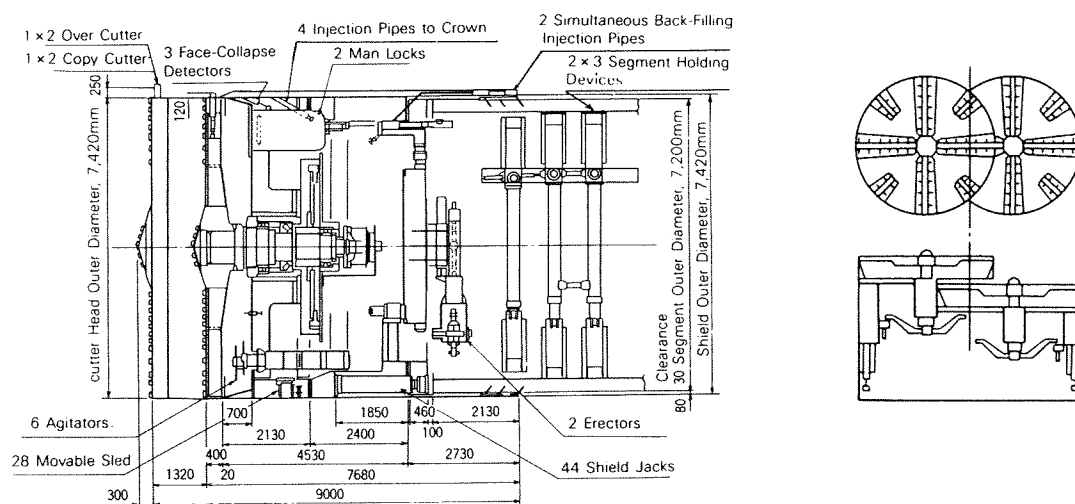
Er zijn een aantal verschillen tussen de twee beschouwde boormethodes voor Double-O-Tube tunnels, waarvan de volgende de belangrijkste zijn:

- de plaatsing van de twee graafwielen ten opzichte van elkaar
- type boorfrontondersteuning
- aantal mengkamers
- lengte van de tunnelboormachine
- rolling control device

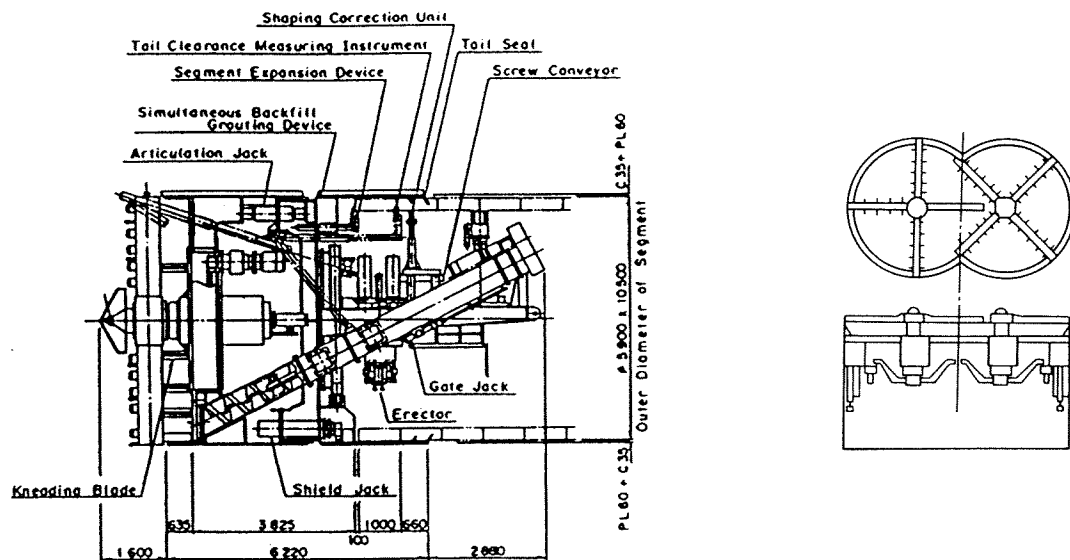
	plaats graafwielen	boorfront ondersteuning	aantal mengkamers	lengte boormachine	rolling control device
MF	achter elkaar	slurry	2	langer	nee
DOT	naast elkaar	EPB	1	even lang	ja

Tot nu toe is de boorfrontondersteuning bij de MF-methode alleen slurry en bij de DOT-methode EPB. Het is misschien goed mogelijk om voor beide methoden het andere type boorfrontondersteuning toe te passen, oftewel er zijn vier configuraties mogelijk: slurry- en EPB-schilden met of zonder versprongen stand van de graafwielen.

In figuur 2.3 en 2.4 zijn MF-methode en de DOT-methode tunnels weergegeven met de bijbehorende configuratie van de mengkamers.



figuur 2.3 – MF-schild: opbouw TBM (links) en configuratie mengkamers (rechts)



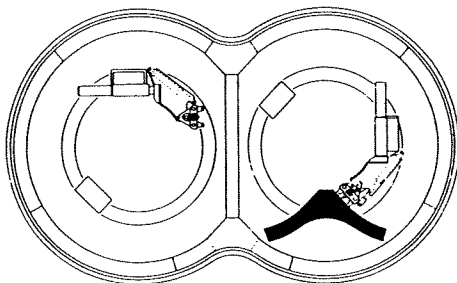
figuur 2.4 – DOT-schild: opbouw TBM (links) en configuratie mengkamers (rechts)

2.4 Speciale Double-O-Tube ontwikkelingen

In eerste instantie lijkt de tunnelboormachine voor een DOT-tunnel niets meer dan een samensmelting van twee tunnelboormachines in één. Toch zijn er enige aanpassingen aan de machine gedaan om het boor- en bouwproces goed te laten verlopen en wel de volgende:

Erectors

Evenals bij de cirkelvormige tunnelboormachines zorgt de erector ervoor dat de segmenten worden geplaatst. Toch heeft de erector een aanpassing ondergaan voor het inbouwen van een ring van een DOT-tunnel. In tegenstelling tot de erector bij een conventionele TBM moet de erector bij een DOT-TBM naast de radiale richting ook in tangentiële richting segmenten kunnen plaatsen. In figuur 2.5 is te zien hoe de erector segmenten kan draaien door de twee vijzels over een verschillende lengte uit te drukken.



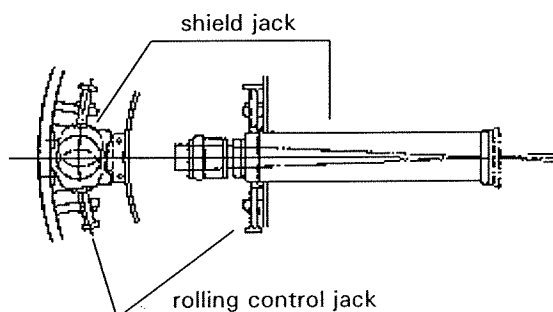
figuur 2.5 – erector in een DOT-TBM

Segment expansion device

Tijdens het plaatsen van het bovenste sluitsegment en de kolom worden de reeds geplaatste segmenten van de ring iets opgetild zodat voldoende ruimte wordt gemaakt om in eerste instantie het bovenste sluitsegment goed te kunnen plaatsen zonder dat de waterafsluitende strip of het segment zelf wordt beschadigd. Hierna moet er voldoende ruimte worden gecreëerd om de kolom te plaatsen.

Rolling control jacks

De rolling control jacks zijn kleine vijzels die elk shield-jack verbinden met het schild en zijn speciaal ontwikkeld voor de DOT-TBM. Deze rolling control jacks kunnen het schild enkele graden roteren (om de lengte-as van de tunnel) ten opzichte van de tunnel. De shield-jacks en de segmenten worden hierbij als vaste punten gezien. Op deze wijze wordt het mogelijk gemaakt de lining rechtop de bouwen indien een DOT-schild enigszins is geroteerd. Een MF-TBM heeft geen rolling control jacks nodig aangezien de draairichtingen van de graafwielen onafhankelijk van elkaar zijn en eenvoudig zijn te veranderen.



figuur 2.6 – zijaanzicht en doorsnede rolling control jacks

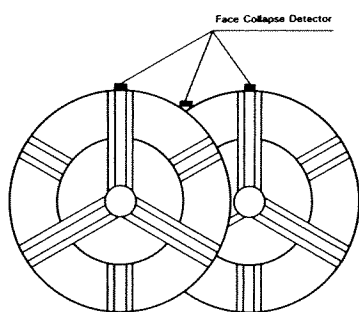
Beveiliging voor het elkaar raken van de graafwielen

Bij een DOT-TBM doet zich nog een ander probleem voor. Doordat de graafwielen in hetzelfde vlak staan kunnen ze elkaar raken wanneer ze niet synchroon lopen. Een beveiliging stopt het boorproces automatisch wanneer de afwijking meer dan een paar graden bedraagt.

Face collapse detector

Op de bovenkant van de MF-tunnelboormachine wordt op een drietal plaatsen vlak achter de graafwielen een face-collapse detector schuin naar voren geplaatst, welke de dichtheid en veranderingen vlak boven het graaffront registreert door middel van straling – figuur 2.7. Het principe werkt hetzelfde als een sonar: Door een bundel te versturen en ze weer op te vangen kan de conditie van de grond worden vastgesteld. Dit soort detectie kan ook op andere tunnelboormachines worden toegepast.

De aanwezigheid van de face-collapse detector kan een verklaring zijn voor het volgende boorfrontstabiliteitsprobleem: Het voorste graafwiel ontgraaft, maar zorgt er tevens voor dat in het overlappende gedeelte ontspanning van de grond plaatsvindt. Omdat het achterste graafwiel deels verscholen zit achter het voorste graafwiel ontstaat hier geen drukopbouw van de grond. Het grondgedeelte wat reeds ontspannen is, levert weer een andere drukopbouw dan het nog ongestoorde gedeelte. Deze ongelijke drukopbouw kan een ander bezwijkmechanisme hebben dan is aangenomen, wat ongunstig is voor de boorfrontstabiliteit.



figuur 2.7 – face-collapse detector

Sleds

Op een MF-tunnelboormachine zijn soms kleine cilindertjes met een schuin aflopend bovenzvlak geplaatst welke verzonken zitten in het schild zowel aan de boven als aan de onderkant. Ze worden naar buiten geschoven indien de tunnelboormachine moet worden (bij-)gestuurd in verticale richting. Voor de sleds geldt dat ze eventueel ook op andere type tunnelboormachines kunnen worden aangebracht. Deze sleds zitten van oorsprong op het MF-schild vanwege de noodzaak tot bijsturen door de zware voorkant van de machine – twee gesloten graafwielen.

Segment holding device

Dit is een systeem wat ervoor moet zorgen dat de laatst ingebouwde ringen op hun plaats blijven en niet (teveel) vervormen. Op deze ringen komen grote krachten te staan doordat de tunnelboormachine zich afzet op de laatst gebouwde ring en tevens moet de staartspleet worden opgevuld. Deze twee processen kunnen de oorzaak zijn van vervormingen van de lining, welke kan leiden tot schade aan de tunnel zelf. Ook voor het segment holding device geldt dat ze eventueel ook op andere type tunnelboormachines kunnen worden aangebracht. De noodzaak doet zich alleen eerder en sterker voor bij een tunnelboormachine voor DOT-tunnels.

3 BOORFRONTSTABILITEIT

In dit hoofdstuk wordt aangegeven hoe de steundrukken kunnen worden bepaald voor niet-cirkelvormige tunnelvormen, waarbij een duidelijke onderscheid moet worden gemaakt tussen slurry- en EPB-schilden.

3.1 Algemeen

Door het ontgraven van grond door het snijrad treedt ontspanning van de grond op. Dit heeft tot gevolg dat er deformaties van de grond in de richting van de ontgraving zullen plaatsvinden als de grond niet van zichzelf voldoende sterkte heeft om te blijven staan, wat kan leiden tot instorten van het boorfront. Om instorten van het boorfront danwel te grote vervormingen aan het boorfront te voorkomen wordt een tegendruk opgebouwd in de tunnelboormachine welke zorgdraagt voor de stabilisatie van het boorfront. Deze tegendruk wordt ook wel steundruk genoemd en wordt verkregen door het onder druk houden van een medium. Bij een slurry-schild werkt een bentonietsuspensie als steunvloeistof, terwijl bij een gronddrukbalansschild (Earth Pressure Balance shield - EPB-schild) de steun aan het boorfront wordt gerealiseerd door het onder druk houden van een mengsel van afgegraven grond, genaamd mud. De mate van stabiliteit van het boorfront is bij tunnelboormachines in grote mate afhankelijk van de eigenschappen van de mud in het geval van een EPB-schild en van de slurry bij een slurry-schild.



figuur 3.1 - ondersteuning van het boorfront

In het geval dat een obstakel wordt aangeboord, kan deze worden verwijderd door het onder luchtdruk zetten van de mengkamer of door het uitvoeren van grondverbeteringen waardoor de mengkamer kan worden betreden zonder dat er instabiliteit optreedt van het boorfront. Hiervoor is het noodzakelijk dat een filtercake aanwezig is. Bij een slurry-schild is dit reeds het geval, maar bij een EPB-schild ontbreekt de cake. Een filtercake moet ook aanwezig zijn indien onderhoud moet worden gepleegd aan de tunnelboormachine.

Om de stabiliteit van het boorfront te garanderen tijdens het boren van de tunnel worden onder- en bovengrenzen van de steundruk vastgesteld, die op het boorfront minimaal moeten danwel maximaal mogen worden toegepast. Voor het bepalen van de minimaal benodigde en maximaal toelaatbare steundrukken dienen de volgende vragen te worden gesteld:

- minimaal benodigde steundruk: Welke steundruk is nodig om bezwijken van het boorfront danwel intreden van het grondwater te voorkomen?
- maximaal toelaatbare steundruk: Welke steundruk is toelaatbaar om bezwijken van de grond voor of boven het boorfront te voorkomen danwel piping / fracturing?

Tevens moet er een niet te kleine "bandbreedte" zijn tussen de minimale en maximale steundruk om variaties tussen de heersende steundruk en de gewenste ideale steundruk op te kunnen vangen; Anders zou het boorproces een veel te gevoelige operatie worden.

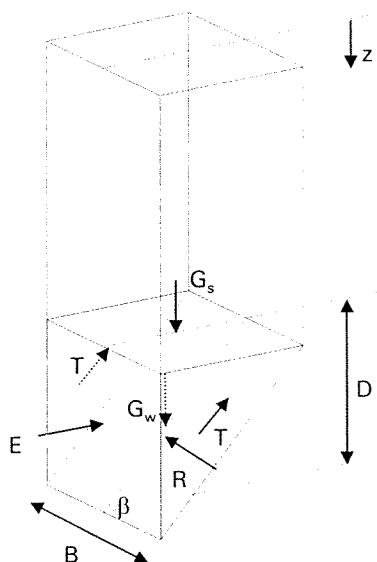
Ten aanzien van de stabiliteit van het grondmassief dient een onderscheid te worden gemaakt tussen micro- en macrostabiliteit. Micro-stabiliteit heeft betrekking op het al dan niet uit het grondmassief vallen van korrels of groepen korrels. Als deze uit het grondmassief vallen dan kan instorting van dit grondmassief plaatsvinden. Macro-stabiliteit heeft betrekking op het al dan niet bezwijken van de grond door middel van het afschuiven langs een glijvlak of het optreden van een "blow-out" danwel "piping" of "fracturing". In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de macro-stabiliteit.

Naast de stabiliteit van het boorfront spelen ook andere factoren een rol voor het bepalen van de "ideale" steundruk. De grootste problemen bij het bepalen van een optimale steundruk treden op bij sterk wisselende condities en sterk gelaagde formaties van de grond aangezien elke grondslag zijn eigen aanpak vraagt en een eigen ideale steundruk heeft. In de volgende paragrafen zal een berekeningsmethodiek worden aangegeven voor het bepalen van de minimale en maximale steundruk bij de aanleg van een geboorde tunnel. Hierbij moet een verschil worden gemaakt voor slurry- en EPB-schilden.

3.2 Boorfrontstabiliteit bij slurry-schilden

3.2.1 Minimale steundruk

De minimale steundruk moet ervoor zorgen dat het boorfront niet bezwijkt en water niet de tunnelboormachine inkomt. In de loop der jaren zijn er verschillende modellen ontwikkeld om de minimale steundruk te bepalen. Eén van de modellen is de methode van Jancsecz [Jancsecz, 1994], waarbij wordt uitgegaan van een actief bezwijk-mechanisme door middel van afschuiving. Het afschuifmechanisme bestaat uit een grondwig (onderste gedeelte) voor het boorfront en een rechthoekige grondkolom (bovenste gedeelte) op deze wig tot aan het maaiveld - figuur 3.2.



figuur 3.2 – model Jancsecz

De diepte van de wig voor het boorfront hangt volgens Jancsecz af van:

- de hoek van inwendige wrijving ϕ en
- de relatieve diepte H/D

Hiermee kan de afschuifhoek β en daarna de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt K_{A3} worden bepaald. De minimaal aan te houden korrelspanning is dan:

$$\sigma'_{h,min} = K_{A3} \cdot \sigma'_{v,red}(H) \quad (3.1)$$

waarin:

$\sigma'_{h,min}$	minimale horizontale korrelspanning	[kN/m ²]
K_{A3}	driedimensionale gronddrukcoëfficiënt	[-]
$\sigma'_{v,red}$	gereduceerde verticale korrelspanning	[kN/m ²]
H	dekking	[m]

De minimaal benodigde steundruk wordt gevonden door ook de waterspanning en de veiligheidscoëfficiënten mee te nemen:

$$\sigma_{steun,min} = \gamma_{f,korrel} \cdot \sigma'_{h,min} + \gamma_{f,water} \cdot \sigma_{water} \quad (3.2)$$

waarin:

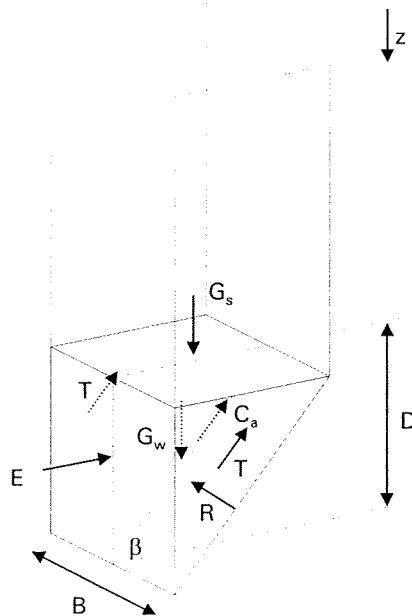
$\gamma_{f,korrel}$	veiligheidscoëfficiënt korrelspanning	[-]
$\gamma_{f,water}$	veiligheidscoëfficiënt waterspanning	[-]
$\sigma_{steun,min}$	minimale steundruk	[kN/m ²]
$\sigma'_{h,min}$	minimale horizontale korrelspanning	[kN/m ²]
σ_{water}	waterspanning	[kN/m ²]

De methode van Jancsecz kent echter een aantal beperkingen, te weten:

- het model gaat uit van een homogene grondslag;
- het model is alleen geschikt voor niet-cohesieve gronden oftewel $c = 0$;
- het model is alleen geschikt voor cirkelvormige boortunnels;

Zoals bovenstaand is aangegeven, is het model Jancsecz tot nu toe alleen gebruikt voor cirkelvormige boortunnels, waarbij de hoogte en breedte hetzelfde zijn. Wanneer een DOT-tunnel wordt toegepast, dient de breedte te worden meegenomen in het model. Tevens moet, gezien de samenstelling van de Nederlandse bodem, ook rekening worden gehouden met heterogene gronden oftewel grondlagen met cohesie. Het model Jancsecz wordt daarom opnieuw afgeleid waarbij de invloed van de breedte en de cohesie is meegenomen.

De wijzigingen zijn gemarkeerd door een grijze arcering. De gedetailleerde afleiding van het model is opgenomen in deelrapport III, bijlage F.



figuur 3.3 - bezwijkmechanisme boorfront

In het bezwijkmechanisme - figuur 3.3 - spelen de volgende krachten een rol:

- G_s kracht ten gevolge van de grondkolom op de bovenkant van de wig
- G_w kracht ten gevolge van het eigen gewicht van de wig
- T kracht ten gevolge van afschuiven op de twee zijvlakken van de wig
- C_a kracht ten gevolge van cohesie op het voorvlak van de wig
- R reactiekracht van de grond op de wig
- E reactiekracht van de tunnelboormachine op het boorfront

Invloed van de cohesie

De cohesie werkt op de twee zijvlakken en het voorvlak van de wig.

- De kracht T , die werkt op de twee zijvlakken van de wig is als volgt opgebouwd:

$$T = 2 \cdot A_{\text{zijvlak wig}} \cdot (\sigma'_h \cdot \tan \phi + c) \quad (3.3)$$

waarin:

$A_{\text{zijvlak wig}}$	oppervlakte zijvlak wig	[m ²]
σ'_h	horizontale korrelspanning	[kN/m ²]
ϕ	hoek van inwendige wrijving	[°]
c	cohesie	[kN/m ²]

$$T = 2 \cdot D^2 \cdot \cot \beta \cdot \left(K_y \cdot \gamma' \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot H + \frac{1}{6} \cdot D \right) \cdot \tan \phi + c \right) \quad (3.4)$$

- Op het voorvlak van de wig werkt de kracht C_a

$$C_a = A_{\text{voorvlak wig}} \cdot c \quad (3.5)$$

waarin:

$$\begin{array}{ll} A_{\text{voorvlak wig}} & \text{oppervlakte voorvlak wig} \quad [m^2] \\ c & \text{cohesie} \quad [kN/m^2] \end{array}$$

$$C_a = \frac{c \cdot B \cdot D}{\sin \beta} \quad (3.6)$$

De evenwichtsbeschouwing kan nu als volgt worden bepaald:

$$\sum T + C_a + R \cdot \sin \phi + E \cdot \cos \beta - \sum G \cdot \sin \beta = 0 \quad \text{horizontaal} \quad (3.7)$$

$$-R \cdot \cos \phi + E \cdot \sin \beta + \sum G \cdot \cos \beta = 0 \quad \text{verticaal} \quad (3.8)$$

De reactiekracht E wordt door samenvoegen van bovenstaande evenwichtsbeschouwingen:

$$E = \frac{\sum G \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \phi) - \sum T - C_a}{\tan \phi \cdot \sin \beta + \cos \beta} \quad (3.9)$$

De maximale reactiekracht E wordt gevonden door de differentiaalvergelijking $\frac{\partial E}{\partial \beta} = 0$ op te lossen.

De oplossing wordt verkregen door een aantal iteraties.

De afschuifhoek β is een functie van:

- de hoek van inwendige wrijving ϕ
- de cohesie c
- de breedte B
- de relatieve diepte H/D

Door de krachten te substitueren in vergelijking 3.9 is het mogelijk om de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt af te leiden:

$$K_{A3} = \frac{\cos \beta \cdot \sin \beta - \cos^2 \beta \cdot \tan \phi - \frac{K}{1,5} \cdot \alpha \cdot \frac{D}{B} \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi - \frac{2 \cdot c \cdot \cos \beta}{\left(1 + 2 \cdot \frac{H}{D}\right) \cdot \gamma \cdot B} - \frac{2 \cdot c}{\left(1 + 2 \cdot \frac{H}{D}\right) \cdot \gamma \cdot D}}{\tan \phi \cdot \sin^2 \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad (3.10)$$

waarin:

$$K \approx \frac{1 - \sin \phi + \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2}\right)}{2} \quad \alpha = \frac{1 + 3 \cdot \frac{H}{D}}{1 + 2 \cdot \frac{H}{D}}$$

Toetsing model

De aanpassingen van het model moeten natuurlijk worden getoetst om aan te tonen of het model realistische waarden geeft. In het kader van het COB-K100 onderzoek heeft Grondmechanica Delft een aantal geocentrifuge proeven uitgevoerd. De uitkomsten van deze proeven zijn gebruikt om het model te controleren.

In het model zijn de veiligheidsfactoren uit vergelijking 3.2 voor de berekening van de minimaal benodigde steundruk op één gesteld zodat de daadwerkelijke bezwijkdruk wordt berekend. Het onderzoek bestaat uit één proef in een zandlaag en twee proeven in een kleilaag, waarbij de diepteligging is gevarieerd. De vergelijking van de resultaten is weergegeven in onderstaande tabellen.

Het blijkt dat de uitkomsten van de proef met zand zeer dicht bij elkaar liggen en dat bij de klei een afwijking wordt gevonden van 5%. Het model benadert de resultaten van de geocentrifuge dus redelijk goed.

Zand proef met H/D = 0.8					
D	[m]	10	γ_{droog}	[kN/m ³]	15.37
H	[m]	8	γ_{nat}	[kN/m ³]	19.5
Maaiveld	[m]	0	ϕ	[°]	35.6
Grondwaterstand	[m]	0.5	c	[kN/m ²]	0
Resultaat geocentrifuge	[kPa]	143	Resultaat model	[kPa]	140.8

tabel 3.1 – resultaat geocentrifuge-proef zand

Klei proef met H/D = 0.8					
D	[m]	10	γ_{droog}	[kN/m ³]	16.7
H	[m]	8	γ_{nat}	[kN/m ³]	16.7
Maaiveld	[m]	0	ϕ	[°]	23
Grondwaterstand	[m]	0.5	c	[kN/m ²]	1
Resultaat geocentrifuge	[kPa]	152	Resultaat model	[kPa]	161.1

tabel 3.2 – resultaat geocentrifuge-proef klei I

Klei proef met H/D = 0.6					
D	[m]	10	γ_{droog}	[kN/m ³]	16.7
H	[m]	6	γ_{nat}	[kN/m ³]	16.7
Maaiveld	[m]	0	ϕ	[°]	23
Grondwaterstand	[m]	0.5	c	[kN/m ²]	1
Resultaat geocentrifuge	[kPa]	130	Resultaat model	[kPa]	137.2

tabel 3.3 – resultaat geocentrifuge-proef klei II

NB De gebruikte waarden voor het volume gewicht γ , de hoek van inwendige wrijving ϕ en de cohesie c zijn bepaald uit de geocentrifuge.

Invloed breedte

Nu het model van Jancsecz is aangepast, wordt bekeken wat de invloed van de breedte is op de afschuifhoek β en de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt K_{A3} . Hiervoor is de breedte gevarieerd voor enkele waarden, welke zijn weergegeven in onderstaande tabel:

$D = 10 \text{ m}$

$B = 10 \text{ m}$

$H = 0, 10, 20, 30 \text{ m}$

$\phi = 20, 25, 30, 35, 40$

$c = 0 \text{ kPa}$

H/D	β					K_{A3}				
	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 25^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 40^\circ$	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 25^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 40^\circ$
0	60.337	62.623	64.807	66.901	68.925	0.386	0.309	0.247	0.199	0.159
1	61.893	64.165	66.291	68.287	70.180	0.354	0.279	0.222	0.177	0.141
2	62.194	64.467	66.582	68.561	70.429	0.348	0.273	0.217	0.173	0.138
3	62.323	64.595	66.707	68.678	70.535	0.345	0.271	0.214	0.171	0.136

tabel 3.4 – waarden voor β en K_{A3} voor $D/B = 1$

$D = 10 \text{ m}$

$B = 20 \text{ m}$

$H = 0, 10, 20, 30 \text{ m}$

$\phi = 20, 25, 30, 35, 40$

$c = 0 \text{ kPa}$

H/D	β					K_{A3}				
	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 25^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 40^\circ$	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 25^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 40^\circ$
0	57.820	60.174	62.484	64.756	66.998	0.436	0.355	0.289	0.233	0.187
1	58.687	61.012	63.273	65.481	67.647	0.419	0.339	0.275	0.221	0.177
2	58.857	61.177	63.429	65.625	67.776	0.416	0.336	0.272	0.219	0.175
3	58.930	61.247	63.496	65.687	67.831	0.414	0.335	0.271	0.218	0.175

tabel 3.5 – waarden voor β en K_{A3} voor $D/B = 0,5$

$D = 10 \text{ m}$

$B = 1000 \text{ m}$

$H = 0, 10, 20, 30 \text{ m}$

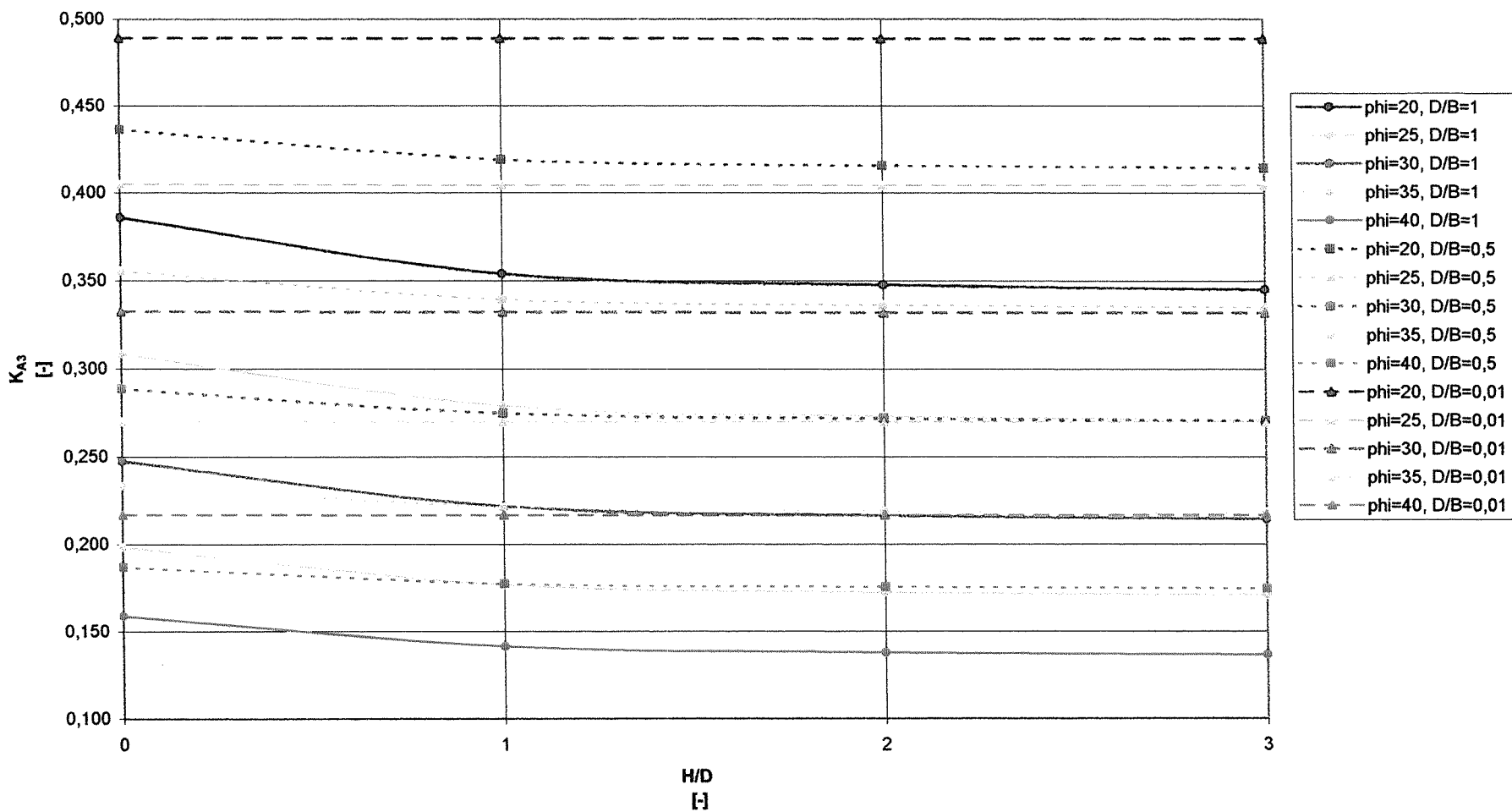
$\phi = 20, 25, 30, 35, 40$

$c = 0 \text{ kPa}$

H/D	β					K_{A3}				
	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 25^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 40^\circ$	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 25^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 40^\circ$
0	55.060	57.556	60.052	62.546	65.041	0.489	0.405	0.332	0.270	0.217
1	55.080	57.575	60.069	62.562	65.054	0.489	0.404	0.332	0.270	0.217
2	55.084	57.579	60.072	62.565	65.057	0.489	0.404	0.332	0.270	0.217
3	55.086	57.580	60.074	62.566	65.058	0.489	0.404	0.332	0.270	0.217

tabel 3.6 – waarden voor β en K_{A3} voor $D/B = 0,01$

K_{A3} volgens Jancsecz voor verschillende D/B-verhoudingen



figuur 3.4 – driedimensionale grondrukcoëfficiënt voor verschillende breedten

Conclusie

De resultaten zijn nog eens grafisch weergegeven op de vorige bladzijde. Het is duidelijk te zien dat de breedte een geringe invloed heeft – ongeveer 10% – op de grootte van de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt. Bij een toenemende breedte wordt deze invloed nog kleiner. Wanneer in zandige gronden wordt geboord met een cohesie van nul kan zelfs worden vastgesteld dat bij een 'oneindige' sleuf de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt niet meer verandert.

Of het model representatieve waarden geeft voor niet-cirkelvormige tunnels kan alleen worden aangetoond met fysisch onderzoek door middel van geocentrifuge-proeven of aan de hand van praktijkvoorbeelden. Het mag dan ook duidelijk zijn dat nader onderzoek op dit punt gewenst is, waarbij de volgende vragen beantwoord dienen te worden:

- *Hoe dient silowerking te worden meegenomen in het model?*
Jancsecz geeft aan dat er pas reductie in de korrelspanning ten gevolge van silowerking mag worden meegenomen wanneer de dekking minimaal twee maal de diameter bedraagt. In de modellering van de steundrukken is de boogwerking echter altijd meegenomen.
- *Hoe komt de silowerking bij een DOT-tunnel tot stand? Ontstaat er één boog of twee bogen?*
- *Wat is de invloed van de micro-stabiliteit op de macro-stabiliteit bij een DOT-tunnel?*

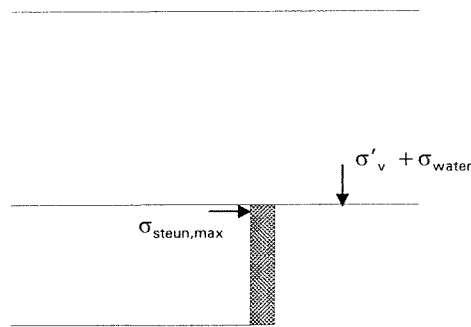
Bij de MF-methode kan zich nog een extra boorfrontstabiliteitsprobleem voordoen:

Het voorste graafwiel ontgraaft, maar zorgt er tevens voor dat in het overlappende gedeelte ontspanning van de grond plaatsvindt. Omdat het achterste graafwiel deels verscholen zit achter het voorste graafwiel ontstaat hier geen drukopbouw van de grond. Het grondgedeelte wat reeds ontspannen is, levert weer een andere drukopbouw dan het nog ongestoorde gedeelte. Deze ongelijke drukopbouw kan een ander bezwijkmechanisme hebben dan is aangenomen, wat ongunstig is voor de boorfrontstabiliteit. De aanwezigheid van de face-collapse detector kan een verklaring zijn voor dit probleem. Nader onderzoek op dit punt is daarom gewenst.

3.2.2 Maximale steundruk

Door middel van het opleggen van een hoge steundruk aan het boorfront kunnen deformaties rond de tunnel worden beperkt. De bovengrens voor de steundruk ligt op het punt waarbij, in het geval van een boring met een slurry-schild, de steunvloeistof ontsnapt naar het maaiveld ("piping" of zelfs een 'blow-out'), of bij aanwezigheid van slappe lagen op het punt waar de steundruk scheurvorming initieert. Bij een hoge verticale korrelspanning zal de steunvloeistof kunnen ontsnappen naar de achterzijde van de machine en eventueel verder langs de tunnel-lining.

De maximale steundruk wordt bepaald door een vergelijking op te stellen voor een verticale evenwichtssituatie waarbij de steundruk aan de bovenkant van het schild niet groter mag zijn dan het gewicht van de grondkolom boven het schild met een bepaalde veiligheidsfactor – figuur 3.5.



figuur 3.5 - maximaal toelaatbare steundruk

In formulevorm ziet het er zo uit:

$$\sigma_{\text{steun,max}} = \frac{\sigma'_v + \sigma_{\text{water}}}{\gamma_f} \quad (3.11)$$

$\sigma_{\text{steun,max}}$	maximale steundruk	[kN/m ²]
σ'_v	verticale korrelspanning	[kN/m ²]
σ_{water}	waterspanning	[kN/m ²]
γ_f	veiligheidscoëfficiënt	[-]

Aangezien het hier om een verticale evenwichtssituatie gaat, speelt de breedte van de tunnel geen rol en kan dezelfde benadering worden toegepast voor een niet-cirkelvormig schild. De veiligheidscoëfficiënt wordt op 1,1 gesteld.

Bij deze benadering dienen een aantal kanttekeningen te worden geplaatst:

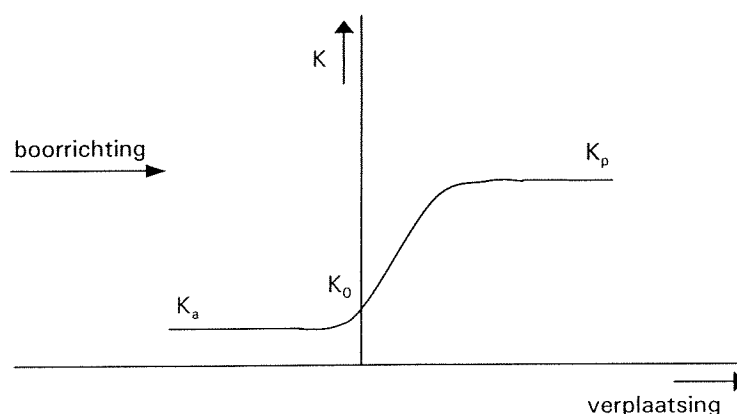
- Het model gaat uit van een statische evenwichtssituatie, waarbij dynamische invloeden worden verwaarloosd.
- Bij een slurry-schild kan een lokale instabiliteit leiden tot het bezwijken van het gehele boorfront.

Toch zijn er meerdere mechanismen die de bovengrens bepalen van de steundruk. De mechanismen die ook nog een rol kunnen spelen, zijn:

- *piping* – Dit mechanisme ontstaat door een verhang tussen twee punten. Als gevolg van een grondwaterstroming die gaat lopen tussen de punten van het verhang zal deze stroom eroderend werken en een “pipe” uitwassen, die groter wordt totdat het verhang nul is geworden. Voorwaarde voor piping is wel dat het materiaal granulair is. Bij een slurry-schild kan het voorkomen dat de drijvende kracht de onder druk gehouden slurry is. Piping kan dan zowel in horizontale als in verticale richting optreden, maar kiest de weg van de minste weerstand.
- *fracturing* – Dit verschijnsel treedt op in grond waar drukken te hoog worden en een spleet of wig in de grond naar het maaiveld wordt gevormd doordat de druk van de slurry groter is dan die van de omliggende grond. Deze vorm van bezwijken kan piping danwel een blow-out veroorzaken.

3.3 Boorfrontstabiliteit bij EPB-schilden

Het aantal berekeningsmethodieken voor het bepalen van steundruk voor EPB-schilden is vrij beperkt. Dit wordt veroorzaakt doordat het basisprincipe van steunen voor een EPB-schild anders is dan voor een slurry-schild. Bij een slurry-schild wordt namelijk op druk gestuurd, terwijl bij een EPB-schild op volumebalans wordt gestuurd. Daar komt bij dat het vrij moeilijk is om steundrukken te meten bij een EPB-schild. Toch is het mogelijk de steundrukken te modelleren door een relatie te leggen tussen de verplaatsing ter plaatse van het boorfront en de gronddrukcoëfficiënt en wel als volgt:



figuur 3.6 – relatie verplaatsing - gronddrukcoëfficiënt

Indien de grond wordt verondersteld als een elastisch materiaal dan wordt de theoretische boven- en ondergrens bepaald door de actieve en passieve gronddrukcoëfficiënt. Wanneer deze twee waarden worden bereikt dan vervormt de grond dusdanig dat gesproken kan worden van bezwijken – figuur 3.6. De ideale situatie treedt op wanneer de verplaatsing gelijk is aan nul oftewel bij de neutrale gronddrukcoëfficiënt.

De steundruk in de graafkamer wordt verkregen door de groundbrij onder druk te zetten met een volumebalans van inkomende en uitgaande grond in de graafkamer. De benodigde steundruk wordt via de drukwand aan de groundbrij in de graafkamer overgebracht. Tijdens het boren is de druk van de groundbrij in de frontkamer iets hoger dan de gronddruk heersend net voor het ontgravingsfront. Deze gronddruk bestaat uit de effectieve horizontale gronddruk plus de waterdruk. In formule vorm ziet het er als volgt uit:

$$\sigma_{\text{steun}} = K \cdot \sigma'_v + \sigma_{\text{water}} \quad (3.12)$$

3.3.1 Minimale steundruk

De steundruk van het boorfront is, net als bij slurry-schilden, gedefinieerd door een bezwijkmechanisme door middel van afschuiving en kan worden gezien als een “gecontroleerde instorting”. In theorie zou het boorfront pas bezwijken wanneer de gronddrukcoëfficiënt de actieve waarde K_a bereikt. In de praktijk blijkt dat de neutrale gronddrukcoëfficiënt wordt aangehouden.

3.3.2 Maximale steundruk

Een bovengrens is voor EPB-schilden niet echt te stellen. In theorie zou de maximale toelaatbare steundruk worden bepaald door de passieve gronddruk, waarbij de grondmassa in een dergelijke mate vervormt dat de interne schuifweerstand wordt gerealiseerd langs een potentieel breukvlak.

Toch zal deze theoretische waarde niet worden gehaald aangezien de krachten voor het leveren van het benodigde draaimoment onnodig worden opgevoerd en de grond omhoog kan drukken wanneer de gronddrukcoëfficiënt groter dan één wordt - dit geldt zeker voor dieper gelegen tunnels!

Indien voor de waarde van de gronddrukcoëfficiënt één wordt aangehouden geldt dezelfde filosofie als bij slurry-schilden oftewel een verticale evenwichtssituatie – zie paragraaf 3.2.2.

3.4 Conclusie

Voor het bepalen van de minimaal benodigde en maximaal toelaatbare steundrukken moet allereerst een onderscheid worden gemaakt in het type boorfrontondersteuning. Dit wordt veroorzaakt doordat het basisprincipe van steunen voor een EPB-schild anders is dan voor een slurry-schild: Bij een slurry-schild wordt namelijk op druk gestuurd, terwijl bij een EPB-schild op volume-balans wordt gestuurd.

Slurry-schild

Bij het bepalen van de minimaal benodigde steundruk is duidelijk te zien dat de breedte een geringe invloed heeft – ongeveer 10% – op de grootte van de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt. Al wordt deze invloed kleiner bij een toenemende breedte. Wanneer in zandige gronden wordt geboord met een cohesie van nul kan zelfs worden vastgesteld dat bij een 'oneindige' sleuf de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt niet meer verandert. Of het model representatieve waarden geeft voor niet-cirkelvormige tunnels kan alleen worden aangetoond met fysisch onderzoek door middel van geocentrifuge-proeven of aan de hand van praktijkvoorbeelden.

Voor de maximaal toelaatbare steundruk geldt dat deze wordt bepaald aan de hand van een verticale evenwichtssituatie, waarop de breedte van de tunnel geen invloed heeft. Derhalve is de maximale toelaatbare steundruk gelijk voor tunnelboormachines van DOT-tunnels en cirkelvormige boortunnels. Toch zijn er meerdere mechanismen die de bovengrens bepalen van de steundruk, te weten: piping en fracturing – Op deze mechanismen dient ook te worden getoetst.

Bij de MF-methode kan zich nog een extra boorfrontstabiliteitsprobleem voordoen:

Het voorste graafwiel ontgraaft, maar zorgt er tevens voor dat in het overlappende gedeelte ontspanning van de grond plaatsvindt. Omdat het achterste graafwiel deels verscholen zit achter het voorste graafwiel ontstaat hier geen drukopbouw van de grond. Het grondgedeelte wat reeds ontspannen is, levert weer een andere drukopbouw dan het nog ongestoorde gedeelte. Deze ongelijke drukopbouw kan een ander bezwijkmechanisme hebben dan is aangenomen, wat ongunstig is voor de boorfrontstabiliteit. De aanwezigheid van de face-collapse detector kan een verklaring zijn voor dit probleem. Nader onderzoek op dit punt is daarom gewenst.

Voor de maximaal toelaatbare steundruk geldt dat deze wordt bepaald aan de hand van een verticale evenwichtssituatie, waarop de breedte van de tunnel geen invloed heeft. Derhalve is de maximale toelaatbare steundruk gelijk voor tunnelboormachines van DOT-tunnels en cirkelvormige boortunnels.

EPB-schild

De steundruk van het boorfront is, net als bij slurry-schilden, gedefinieerd door een bezwijkmechanisme door middel van afschuiving en kan worden gezien als een "gecontroleerde instorting". In theorie zou het boorfront pas bezwijken wanneer de gronddrukcoëfficiënt de actieve waarde K_a bereikt. In de praktijk blijkt dat de neutrale gronddrukcoëfficiënt wordt aangehouden.

Een bovengrens is voor EPB-schilden niet echt te stellen. De theoretische bovengrenswaarde zal niet worden gehaald aangezien de krachten voor het leveren van het benodigde draaimoment onnodig worden opgevoerd en de grond omhoog kan drukken wanneer de gronddrukcoëfficiënt groter is dan één. Indien voor de waarde van de gronddrukcoëfficiënt één wordt aangehouden geldt dezelfde filosofie als bij slurry-schilden oftewel een verticale evenwichtssituatie.

4 DIEPTELIGGING

In dit hoofdstuk wordt aangegeven hoe de diepteligging kan worden bepaald voor een DOT-tunnel, waarbij rekening dient te worden gehouden met een aantal criteria:

- boren moet mogelijk zijn
- de tunnel mag niet opdrijven
- werken onder luchtdruk moet mogelijk zijn

4.1 Boren

In hoofdstuk 3, boorfrontstabiliteit, is aangegeven hoe de minimaal benodigde en maximaal toelaatbare steundrukken bij zowel een slurry- als een EPB-schild kunnen worden bepaald. Deze onder- en bovengrenzen volgen uit de geologische omstandigheden ter plaats van de tunnel en de gekozen diepteligging.

Om het boorproces niet te gevoelig te maken voor fluctuaties tussen de heersende steundruk en de gewenste ideale steundruk moet er een niet te kleine marge – orde grootte 20 à 30 kPa – zijn tussen de minimale en maximale steundruk. Als de marge te klein is, kunnen fluctuaties in de steundrukken niet worden opgevangen en kan instabiliteit van het boorfront optreden.

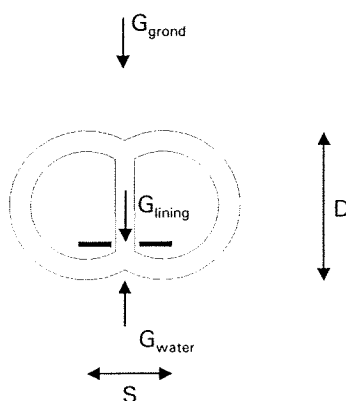
4.2 Werken onder verhoogde luchtdruk

Bij een geboorde tunnel kan worden geëist dat de mogelijkheid aanwezig moet zijn om het boorfront met luchtdruk stabiel te houden. Op deze manier is het mogelijk dat de mengkamer kan worden betreden voor het uitvoeren van inspecties van het boorschild, het uitvoeren van reparaties en het verwijderen van obstakels aan het boorfront of in de mengkamer. Wanneer de eis wordt gesteld dat het front stabiel moet worden gehouden met verhoogde luchtdruk dan betekent dit vaak dat dit maatgevend is voor de minimale dekking en diepteligging van de tunnel. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat bij het toepassen van luchtdruk er één uniforme druk heerst aan het boorfront. Tevens moet er een druk heersen die het grondwater verdringt; Dat wil zeggen de grondwaterdruk aan de onderzijde van het schild. Hierdoor is de druk aan de bovenzijde van het schild aanzienlijk groter dan de heersende grondwaterdruk. Als tweede eis dient te worden gesteld dat er geen lokale instabiliteiten optreden.

4.3 Opdrijven

4.3.1 oprijfberekening

In de oprijfberekening wordt gecontroleerd of de boortunnel niet opdrijft ten gevolge van de opwaartse waterkracht. Het verticale evenwicht moet gewaarborgd zijn. De oprijfberekening moet worden gecontroleerd voor iedere fase van de uitvoering van de boortunnel. In figuur 4.1 zijn de, voor de oprijfberekening relevante, krachten weergegeven.



figuur 4.1 - oprijfberekening

De neerwaarts gerichte krachten bestaan uit het grondgewicht recht boven de kruin van de tunnel en het gewicht van de tunnel zelf. De opwaartse kracht wordt bepaald met de wet van Archimedes.

$$G_{\text{neerwaarts}} = G_{\text{grond}} + G_{\text{lining}} \quad (4.1)$$

$$G_{\text{grond}} = \sum (h_i \cdot \gamma_{i;\text{grond}}) \cdot B \quad (4.2)$$

$$G_{\text{lining}} \approx 2 \cdot \left[\left(\frac{360 - 2 \cdot \arccos\left(\frac{S}{D}\right)}{360} \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 + 0,25 \cdot \tan\left(\arccos\left(\frac{S}{D}\right)\right) \cdot S^2 \right) - \left(\frac{360 - 2 \cdot \arccos\left(\frac{S - d_{\text{kolom}}}{D - 2 \cdot d_{\text{lining}}}\right)}{360} \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot (D - 2 \cdot d_{\text{lining}})^2 + 0,25 \cdot \tan\left(\arccos\left(\frac{S - d_{\text{kolom}}}{D - 2 \cdot d_{\text{lining}}}\right)\right) \cdot (S - d_{\text{kolom}})^2 \right) \right] \cdot \gamma_{\text{beton}} \quad (4.3)$$

$$G_{\text{water}} = A_{\text{DOT}} \cdot \gamma_{\text{water}} \quad (4.4)$$

$$G_{\text{water}} = 2 \cdot \left[\frac{360 - 2 \cdot \arccos\left(\frac{S}{D}\right)}{360} \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 + 0,25 \tan\left(\arccos\left(\frac{S}{D}\right)\right) \cdot S^2 \right] \cdot \gamma_{\text{water}} \quad (4.5)$$

waarin:

S	afstand tussen de middelpunten van de twee cirkels	[m]
D	diameter DOT-tunnel	[m]
B	breedte DOT-tunnel	[m]
d_{kolom}	wanddikte kolom	[m]
d_{lining}	dikte lining	[m]
γ_{water}	volumegewicht water	[kN/m ³]
γ_{beton}	volumegewicht beton	[kN/m ³]
h_i	dikte grondlaag i	[m]
γ_i	volumegewicht grondlaag i	[kN/m ³]

De tunnel drijft niet op indien het volgende geldt:

$$\frac{G_{\text{neerwaarts}}}{G_{\text{opwaarts}}} = 1,1 \quad (4.6)$$

4.3.2 rekenvoorbeeld

In dit rekenvoorbeeld zal worden aangegeven hoe het oprijfmechanisme voor een DOT-tunnel is in vergelijking met een cirkelvormige tunnel. Er wordt uitgegaan van dezelfde diepteligging en een gelijk grondprofiel.

gegevens		cirkelvormige tunnel	DOT-tunnel
S	[m]	---	7,5
D	[m]	10,4	10,4
B	[m]	10,4	17,9
d_{kolom}	[m]	---	0,5
d_{lining}	[m]	0,5	0,5
G_{grond}	[kN]	937	1567
G_{lining}	[kN]	373	649
G_{opwaarts}	[kN]	849	1555
oprijven	[-]	1,54	1,43

tabel 4.1 – voorbeeld oprijfberekening

Uit bovenstaand rekenvoorbeeld blijkt dat het oprijfmechanisme voor de diepteligging van een DOT-tunnel iets sneller maatgevend is dan een cirkelvormige tunnel. Dit wordt veroorzaakt doordat het gewicht van DOT-tunnelling niet toeneemt met de breedte, oftewel:

$$G_0 \geq \frac{G_{\infty}}{2} \quad (4.7)$$

4.4 Opbreken

Bij een boortunnel vormen de tunnelling en de omliggende grond een samenhangend systeem. Bij een raamwerkmodel wordt de werking van de grond met beddingkrachten geschematiseerd. Voor een tunnelring, die als een staande ellips vervormt, wordt de bedding in de tunnelkruin belast. Bij een afnemende buigstijfheid van de tunnelling wordt steeds meer belasting op de bedding overgedragen. Wanneer het beddingdraagvermogen boven de tunnelkruin haar grens bereikt vormt zich een afschuivende grondkegel. De opbrekberekening is gebaseerd op het voorkomen van hoogovale vervorming zodat rondom de gehele tunnelling een bedding kan worden geschematiseerd. Om opbreken van de grond te voorkomen wordt in de opbrekberekening het verticale evenwicht beschouwd. Het verticale evenwicht wordt gevormd door opwaartse gerichte krachten en neerwaarts gerichte krachten. Onderzoek [van der Put, 1996] heeft uitgewezen dat bij een hoog grondwaterpeil opdrijven het maatgevende mechanisme is. Indien een dekking wordt gerealiseerd welke voldoende is om opdrijven te voorkomen dan zal hoogovale vervorming vrijwel zeker niet optreden.

4.5 Diepteligging DOT-tunnel

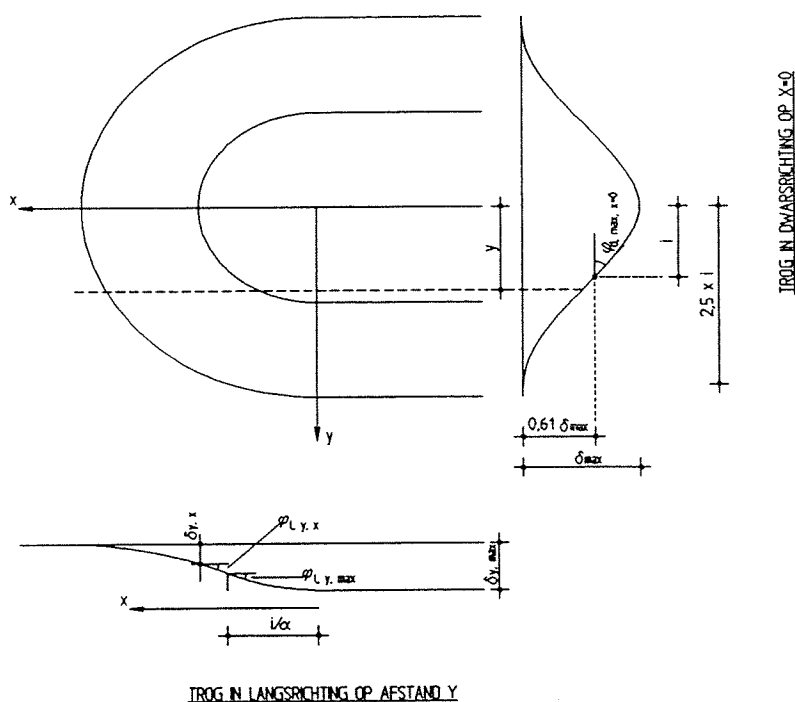
Voor het bepalen van de minimale diepteligging van een DOT-tunnel moet rekening worden gehouden met een tweetal aspecten, te weten: het boorproces en het opdrijf-mechanisme. Aangezien de minimaal benodigde steundruk voor slurry-schilden, volgens de modellering, bij een DOT-tunnel iets hoger is dan bij een cirkelvormige tunnel zal de marge tussen de onder- en bovengrens afnemen. De DOT-tunnel zal daarom iets dieper moet liggen dan een cirkelvormige tunnel. Voor EPB-schilden is dit niet het geval. Het opdrijfmechanisme is voor DOT-tunnels iets ongunstiger, waardoor opdrijven bij een DOT-tunnel wat sneller maatgevend zal zijn. Hierdoor zal de DOT-tunnel dieper moet liggen dan een cirkelvormige tunnel. Wanneer de eis wordt gesteld dat werken onder verhoogde luchtdruk mogelijk moet zijn, zal dit criterium maatgevend zijn voor de diepteligging.

5 VERVORMING VAN DE GROND

In dit hoofdstuk wordt aangegeven hoe met behulp van empirische modellen een voorspelling kan worden gedaan voor het vervormingsgedrag van de grond bij een DOT-tunnel in vergelijking met een cirkelvormige tunnel.

5.1 Algemeen

Ten gevolge van het boorproces treedt ontspanning van de grond rondom de tunnelboormachine op, waardoor de grond naar het centrum van de tunnel toe beweegt en ontstaan er zowel verticale als horizontale vervormingen in de ondergrond - zie figuur 5.1.



figuur 5.1 - zettingstrog

Deze vervormingen worden veroorzaakt doordat tijdens het boorproces meer volume wordt ontgraven dan er wordt teruggebracht. De grootte van dit volumeverlies bepaalt de omvang van de zettingen. De uiteindelijke vervorming van de ondergrond (en zetting) komt door de volgende aspecten tot stand:

- zetting aan het boorfront
- zetting boven het schild
- zetting bij de staartspleet
- tijdafhankelijke zetting

zetting aan het boorfront

Omdat de steundruk aan het boorfront nooit exact gelijk kan zijn aan de heersende horizontale gronddruk in de ondergrond, zal er ter plaatse van het boorfront altijd een vervorming van de ondergrond optreden. Deze kunnen worden voorkomen door de steundruk gelijk te stellen met de neutrale gronddrukcoëfficiënt of door deze druk zo goed mogelijk te benaderen. Indien rekening wordt gehouden met de optredende boogwerking dan is de K_{A3} -coëfficiënt een goede benadering.

zetting boven het schild

Het schild van de boormachine heeft in het algemeen een conische vorm. De reden van de conische ontwerpvorm vindt zijn oorsprong, globaal gesproken, in het feit dat te allen tijde dient te worden voorkomen dat de tunnelboormachine tijdens het boren vast komt te zitten in het boormassief. Door middel van deze conische vorm kan de kans hierop substantieel worden gereduceerd. Omdat de tunnelboormachine tijdens het boorproces als het ware naar voren schuift, ontstaat er een spleet tussen het grondmassief en de tunnelboormachine. Bij zachte grond wordt deze spleet weer dichtgedrukt door het zich vervormende grondmassief. Hierdoor ontstaan uiteindelijk zettingen. Daarnaast ontstaan er nog vervormingen doordat de bewegende tunnelboormachine een evenwijdige aan de tunnel-as gerichte wrijvingskracht op de omringende grond uitoefent.

zetting bij de staartspleet

Ter plaatse van de achterzijde van de tunnelboormachine bevindt zich de staartspleet, welke onder hoge druk dient te worden gevuld met grout. De dikte van deze staartspleet is circa 12-15 cm, hetgeen betekent dat bij een onvolledige of slechte vulling hiervan een aanzienlijk volumeverlies kan optreden. Dit volumeverlies vertaalt zich in relatief slappe gronden in vervormingen in de ondergrond.

tijdafhankelijke zetting

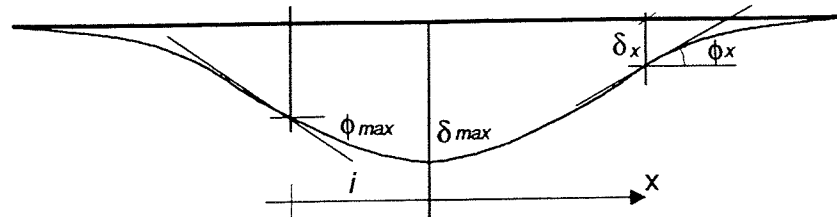
Doordat er tijdens het boorproces ten gevolge van de hiervoor genoemde processen in de grond spanningsveranderingen optreden, kunnen er ook op de wat langere termijn (verlopend vanaf twee weken tot meerdere jaren na passage van de tunnelboormachine nog tijdafhankelijke vervormingen optreden. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de door het boorproces veroorzaakte wateroverspanning na verloop van tijd weer afnemen, met als gevolg een (plaatselijke) toename van de korrelspanning. Met name in cohesieve gronden kunnen tijdafhankelijke zetting een relatief grote bijdrage leveren aan het totale zettingsbeeld.

5.2 Modelleren vervormingen in dwarsrichting

De bepaling van het zettingsbeeld loodrecht op de boorrichting wordt veelal empirisch benaderd door een sterke vereenvoudiging, waarbij gelet dient te worden op de volgende uitgangspunten:

- In deze empirische formules wordt het volumeverlies als een invoerparameter, waarbij er vanuit wordt gegaan dat het gehele volumeverlies optreedt in één punt. In de praktijk treedt het volumeverlies op in de gehele doorsnede;
- Het volume van de zettingstrog wordt gelijk verondersteld aan het volumeverlies tijdens het boorproces;
- De formules zijn gebaseerd op een homogene of sterk geschematiseerde grondopbouw. De Nederlandse bodemgesteldheid kenmerkt zich veelal door de aanwezigheid van relatief slappe, gelaagde gronden;
- Interactie tussen de grond en de constructie wordt buiten beschouwing gelaten;
- Er wordt geen rekening gehouden met tijdafhankelijke zettingen

In de theorie van Peck [COB-L510, 1996] wordt het probleem tweedimensionaal beschouwd en wordt de zettingstrog beschreven door een Gauss-verdeling - zie figuur 5.2.



$$\begin{aligned}\delta_x &= \delta_{max} \cdot e^{(-x^2/2i^2)} \\ \delta_i &= 0,61 \cdot \delta_{max} \\ \phi_x &= \delta_x \cdot \frac{x}{i^2} \\ \phi_{max} &= 0,61 \cdot \delta_{max} \cdot \frac{1}{i}\end{aligned}$$

figuur 5.2 - Gausskromme

$$\delta_z(x) = \delta_{z,max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (5.1)$$

met

$$\delta_{z,max} = \frac{V}{i \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}$$

waarin:

i	buigpuntcoëfficiënt	[-]
x	horizontale afstand vanaf het middelpunt van de tunnel	[m]
V	volume zettingstrog	[m ³ /m]
$\delta_z(x)$	zetting op afstand x van het middelpunt van de tunnel	[m]
$\delta_{z,max}$	maximale zetting boven het middelpunt van de tunnel	[m]

De geometrie van de zettingstrog wordt daarbij bepaald door twee parameters:

- i Dit is een maat voor de breedte van de trog.
In theorie is het de afstand van het midden tot het buigpunt van de kromme. Een hogere waarde van i betekent een bredere trog. De totale breedte van de trog wordt gesteld op $5i$. De grootte van i , dus de breedte van de trog wordt bepaald door de opbouw en de samenstelling van de grond en door de afmetingen en diepteligging van de tunnel. Het volumeverlies heeft geen invloed op de waarde van i en dus ook geen invloed op de breedte van de trog.
- $\delta_{z, \max}$ Dit is de maximale zetting in het hart van de trog.
De grootte wordt bepaald door het volumeverlies en de parameter i . De waarde van i is onafhankelijk van het volumeverlies. Dus kan de maximale zetting, bij een bepaalde ligging van de tunnel, nog uitsluitend worden beïnvloed door het volumeverlies. Uit bovenstaande formules blijkt dat de grootte van $\delta_{z, \max}$ recht evenredig is met het volumeverlies.

Met name voor het bepalen van de waarde van i worden in de literatuur verschillende en uiteenlopende methoden beschreven welke kort worden beschreven (deelrapport III, bijlage G).

5.3 Modelleren vervormingen in de langsrichting

De trog, die in de dwarsrichting optreedt, ontstaat tijdens de voortgang van het boorproces. Dit betekent dat ook in de langsrichting vervormingen en zettingsverschillen zullen optreden. Deze vervormingen hebben een grote invloed op de bebouwing langs het tracé. Ook in de langsrichting treedt het volumeverlies niet op in één snede, maar deze wordt zowel voor, naast als achter de tunnelboormachine opgebouwd. Attewell [COB-L510, 1996] geeft een beschrijving van het driedimensionaal zettingsgedrag. Daarbij wordt er vanuit gegaan dat de zetting in dwarsrichting beschreven kan worden door middel van een Gausskromme. Uitgangspunt bij deze beschrijving is dat op willekeurige afstanden tot de tunnelas de zetting in langsrichting de vorm heeft van een cumulatieve kansverdeling. Afhankelijk van de afstand tot het boorfront bedraagt de zetting een bepaald percentage van de maximale zetting. Ter plaatse van het boorfront wordt verondersteld dat 50% van de maximale zetting is opgetreden. Daar wordt ook de oorsprong van het assenstelsel gedacht. De maximale verticale vervorming dient uiteraard overeen te komen met de verticale vervorming die uit de zettingstrog in dwarsrichting volgt. Uitgaande van een oneindig lang boortracé wordt de zettingstrog beschreven door:

$$\partial_z(y) = \partial_{z, \max} \cdot e^{-\left(\frac{x^2}{2i^2}\right)} \cdot [G(y/i_y)] \quad (5.2)$$

De waarde voor $[G(y/i_y)]$ kan uit tabel 5.1 worden afgelezen.

Door Attewell is tevens onderzoek gedaan naar de verhouding tussen i_x en i_y . Deze verhouding ligt ongeveer tussen $i_y = 1.0$ à $1.5 i_x$. Hierin is i_x de buigcoëfficiënt van de trog in de dwarsrichting.

y	$G(y/i_y)$	y	$G(y/i_y)$
3,0	0,1	-0,2	57,9
2,8	0,3	0,4	65,5
2,6	0,5	0,6	72,8
2,4	0,8	0,8	78,8
2,2	1,4	1,0	84,1
2,0	2,3	1,2	88,5
1,8	3,6	1,4	91,9
1,6	5,5	1,6	94,5
1,4	8,1	1,8	96,4
1,2	11,5	2,0	97,7
1,0	15,9	2,2	98,9
0,8	21,2	2,4	99,2
0,6	27,4	2,6	99,5
0,4	34,5	2,8	99,7
0,2	42,1	3,0	99,9
0,0	50,0		

tabel 5.1 - waarde $[G(y/i_y)]$

5.4 Vergelijking vervormingen van de verschillende tunnelvormen

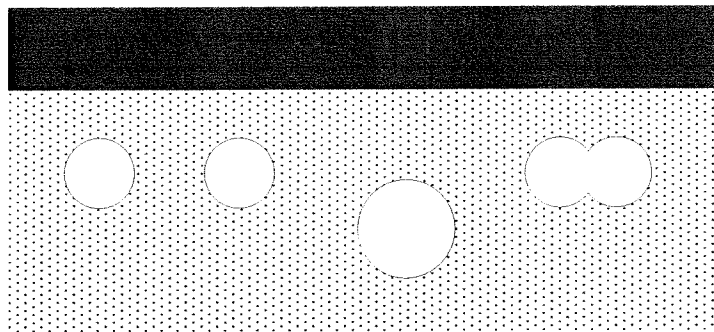
De niet-ronde vorm van een DOT-tunnel zal een andere zettingstrog tot gevolg hebben dan één ronde buis. Om de invloed van de tunnelvorm te bekijken is een empirisch model gemaakt, waarin de volgende tunnelvormen worden vergeleken:

- twee aparte buizen
- één grote buis
- DOT

Voor de vergelijking wordt uitgegaan van de volgende punten:

- Het te gebruiken model is empirisch
- De grond is gemodelleerd als een twee lagen model
- De methode "New & O'Reilly – klei op zand" wordt gebruikt voor de bepaling van de buigpuntcoëfficiënt
- De dekking boven op de tunnel is gelijk aan 1,5 keer de diameter
- Het volumeverlies van een DOT-tunnel wordt groter verondersteld dan het volumeverlies van een cirkelvormige tunnel aangezien de andere geometrie van de machine een groter verlies tot gevolg heeft. In de vergelijking wordt uitgegaan van een 25% groter verlies.

In figuur 5.3 is de modellering grafisch weergegeven.



figuur 5.3 – modellering vervormingen

tunnelvorm	afmetingen [m]	dekking [m]	dikte kleilaag [m]	dikte zandlaag [m]	volumeverlies [m]	i [-]	$\delta_{\max}$ [mm]
2 buizen	Ø10 – 20	15	10	∞	1	7	46
1 buis	Ø14	21	10	∞	1	9.24	66
DOT	Ø10 – 7.5	15	10	∞	1	7	72
DOT	Ø10 – 7.5	15	10	∞	1.25	7	90

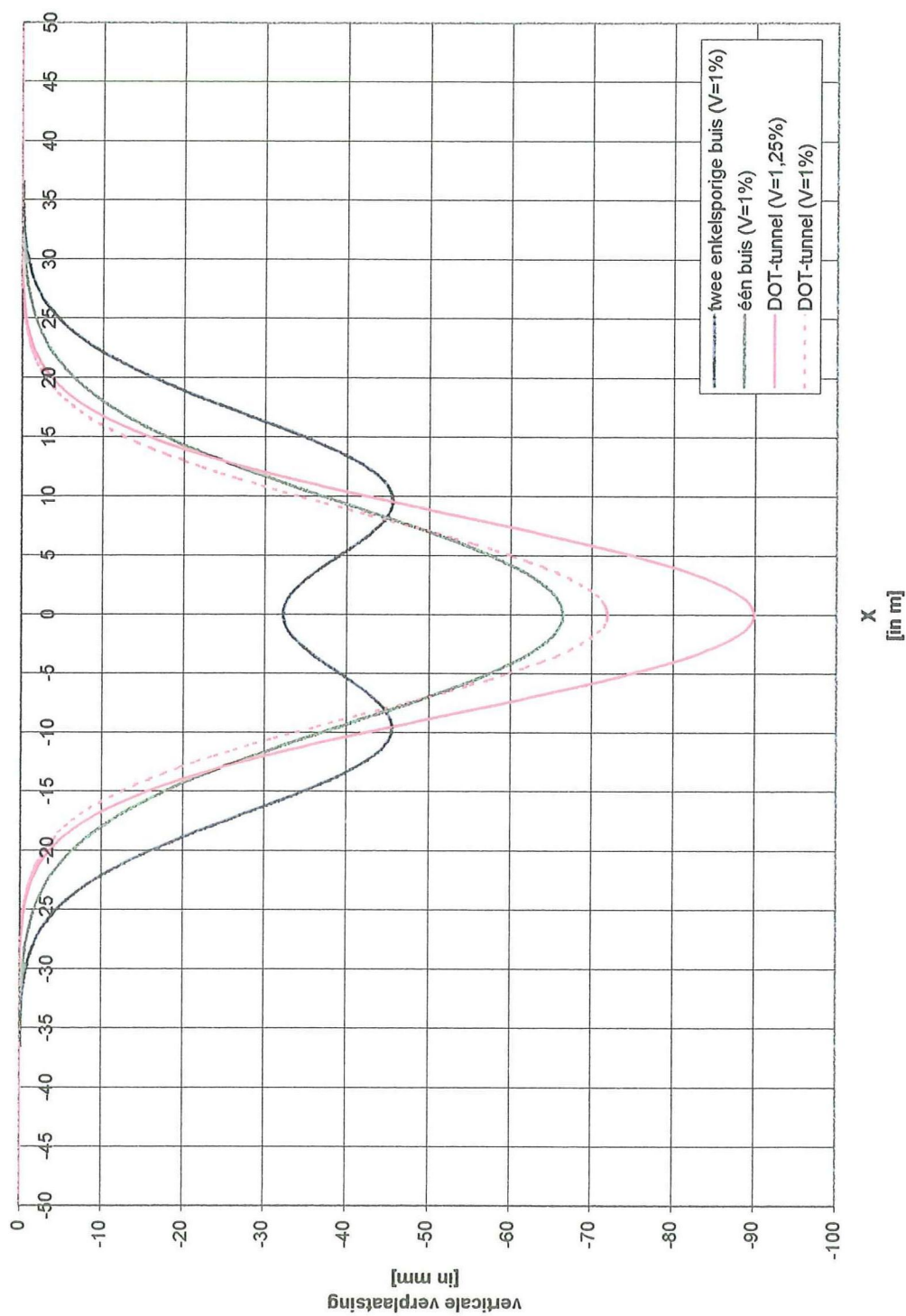
tabel 5.2 – gegevens en resultaten

De resultaten van de vergelijking in zowel dwarsrichting als langsrichting zijn grafisch weergegeven in figuur 5.4 en figuur 5.5.

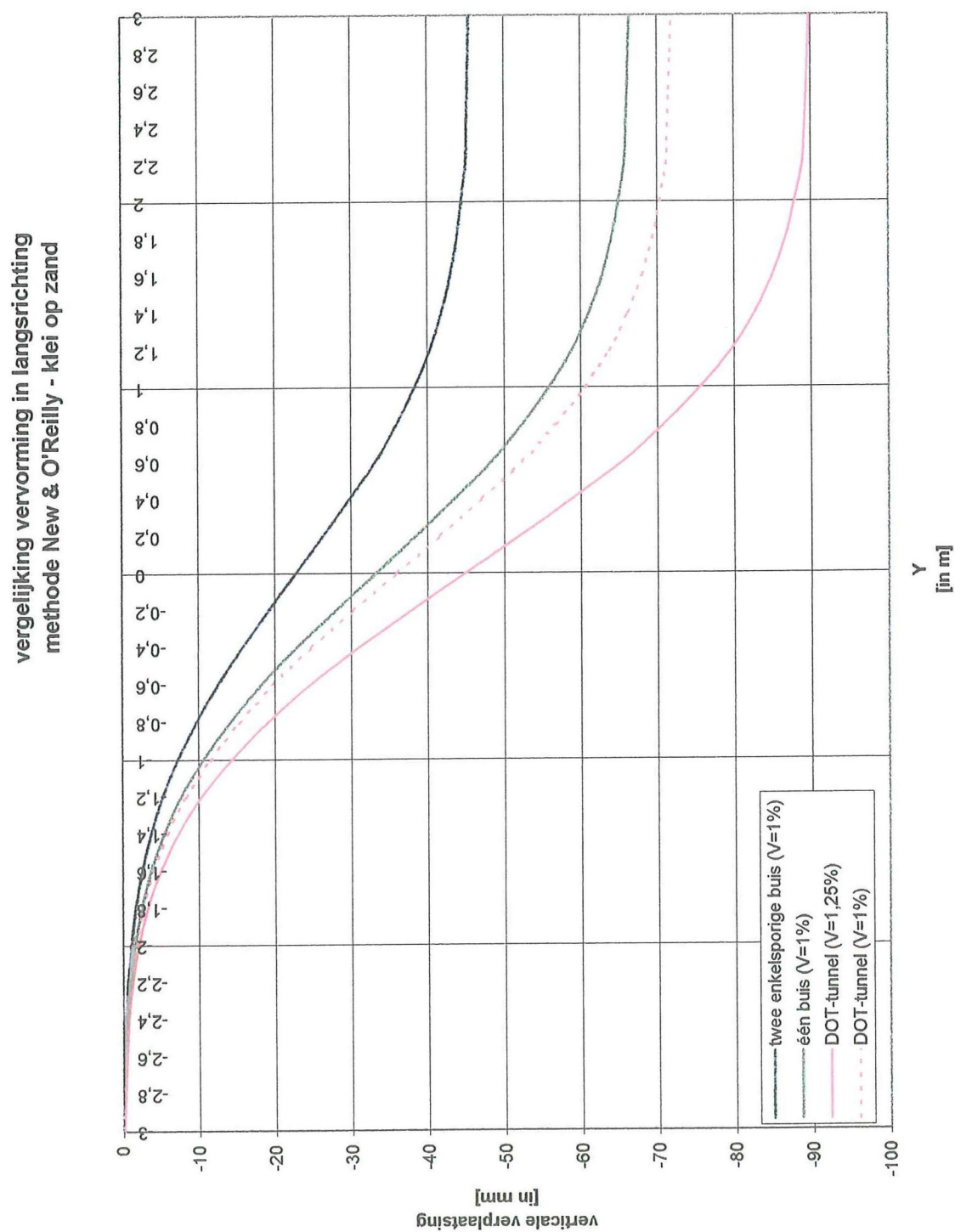
Uit de vergelijking kan worden geconcludeerd dat de maximale zetting bij een DOT-tunnel is groter dan twee buizen met eenzelfde diameter op een afstand van een diameter uit elkaar. Dit is volgens verwachting aangezien het te ontgraven oppervlak bij een DOT groter is dan bij een enkele buis. Het verdient zeker de aanbeveling om nader onderzoek te doen naar de grondvervormingen bij een DOT-tunnel. Dit kan worden gedaan door een modellering in Plaxis. De breedte van de zettingstrog bij een DOT-tunnel is minder breed dan twee buizen met eenzelfde diameter. Dit kan van groot belang zijn wanneer in een stedelijke omgeving geboord moet worden.

Bij projecten, die in Japan zijn uitgevoerd, is gebleken dat de zakkingen bij DOT-tunnels ongeveer gelijk zijn aan de zakkingen die veroorzaakt worden bij het boren van cirkelvormige tunnels met een gelijke oppervlakte.

vergelijking vervorming in dwarsrichting
methode New & O'Reilly - klei op zand



figuur 5.4 – vervormingen in dwarsrichting



figuur 5.5 – vervormingen in langsrichting

6 TUNNELBOUW

In dit hoofdstuk wordt aangegeven hoe de lining van de DOT-tunnel is opgebouwd, waar rekening mee dient te worden gehouden en wat de consequenties zijn voor de voortgangssnelheid. Tevens is een aanzet gemaakt hoe de krachtswerking in de lining verder moet worden onderzocht.

6.1 Liningtypen

6.1.1 Configuratie

De definitieve ondersteuning van een tunnel wordt geleverd door de tunnelmantel oftewel lining genoemd. De lining van een DOT-tunnel heeft de volgende functies:

- het waarborgen van de stabiliteit van de grond rondom het gegraven gat
- het opnemen van de grond- en waterdrukken
- het waarborgen van de waterdichtheid van de tunnel
- het opnemen van de vijzelkrachten tijdens de bouwfase
- opbouw lining

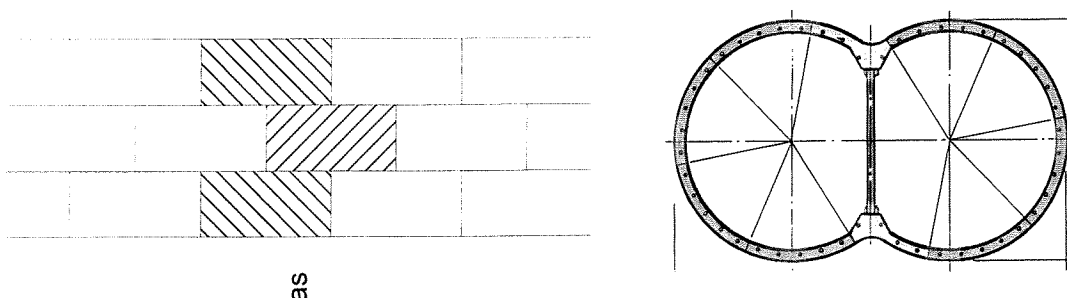
De lining van een DOT-tunnel wordt gebouwd door het toepassen van prefab-beton gesegmenteerde ringen. Door zijn niet ronde vorm kan voor de bouw van een DOT-tunnel lining niet worden volstaan met één type segment, maar zijn er drie nodig:

- normale segmenten
- sluitsegmenten
- een kolom

Evenals bij de cirkelvormige tunnels moeten de segmenten van de ringen onderling verspringen om 'naden' in de longitudinale richting te voorkomen. Hiervoor zijn in Japan twee configuraties ontwikkeld voor een ring, opgebouwd uit segmenten, door verschillende sluitsegmenten toe te passen, te weten:

- AKP-configuratie

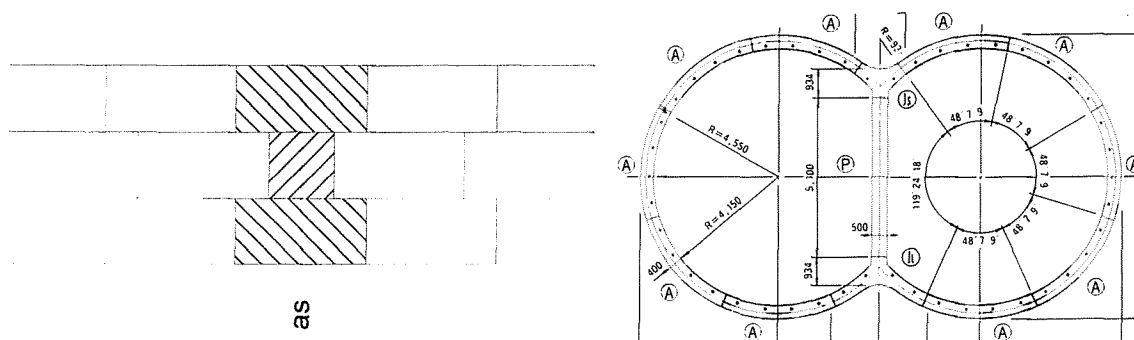
Bij deze configuratie is er één type sluitsegment (K). Het sluitsegment heeft een lange en een korte zijde, zoals is weergegeven in onderstaand figuur 6.1. Indien de lange zijde van het sluitsegment een half segment langer is dan de korte zijde van het sluitsegment zullen de segmenten in een halfsteensverband worden geplaatst. Op deze wijze kan een complete tunnel worden gebouwd.



figuur 6.1 - AKP-configuratie en sluitsegment type K

- AJ_1J_sP -configuratie

Bij deze configuratie zijn er twee typen sluitsegmenten. Per ring wordt één klein (J_s) en één groot sluitsegment (J_l), afgewisseld, onder en boven geplaatst. De grote sluitsegmenten zijn een halve lengte van een normaal langer dan de kleine sluitsegmenten. De segmenten van opvolgende ringen overlappen elkaar steeds $1/4$.

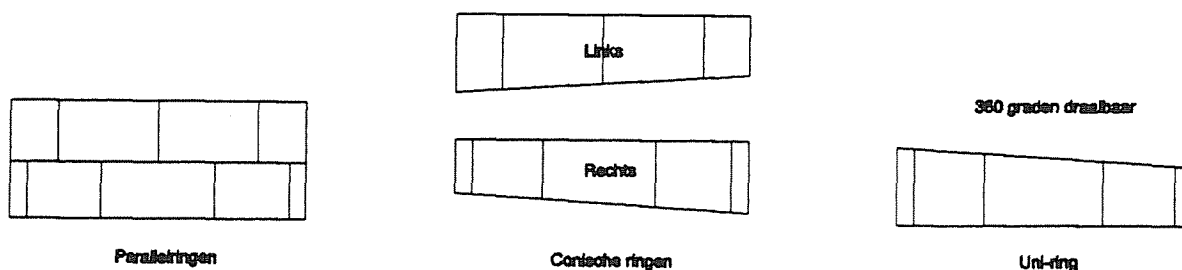


figuur 6.2 - $AJ\mu_sP$ -configuratie en sluitsegmenten J_l en J_s

6.1.2 Bochten

Normaal gesproken is een cirkelvormige boortunnel opgebouwd uit een aantal segmenten van gelijke afmeting en een sluitsteen welke de ring bij montage complementeert. De locatie van de sluitsteen is onder andere afhankelijk van het type segment en het al dan niet aanwezig zijn van bochten in het alignement. Een veel voorkomend type ringsegment is de parallelring waarbij de breedte over de gehele ring constant is en de segmenten rechthoekige elementen zijn. Om horizontale en verticale bochten te realiseren, worden afwijkende conische ringen gebruikt, waarbij de ring trapeziumvormig is. Dit wordt ook gedaan bij DOT-tunnels.

Tevens zijn universele segmenttypen ontwikkeld welke zowel voor een rechtgang als voor bochten toepasbaar zijn; de zogenaamde uni-ring. Dit is bij een DOT-tunnel niet mogelijk aangezien de segmentringen niet gedraaid kunnen worden.



figuur 6.3 - type ringsegmenten

6.1.3 Ringvoegen

De stabiliteit van een prefab-betonnen gesegmenteerde lining is in hoge mate afhankelijk van de omringende grond. De vervormingen ter plaatse van de voegen moeten beperkt blijven met het oog op de krachtswerking en het limiteren van de beton-contactspanningen. Het voeggedrag is bepalend voor de krachtswerking in de ring. De vormgeving van de voeg is bepalend voor de momentcapaciteit. De gesegmenteerde ringen hebben in de ringvoeg interactie waardoor een koppeling plaatsvindt. In de praktijk kan deze koppeling bestaan uit een vertande voeg of door middel van een vlakke voeg met geconditioneerde wrijvingsvlakken. De stijfheid van deze koppeling is mede bepalend voor krachtswerking in de gesegmenteerde ringen.

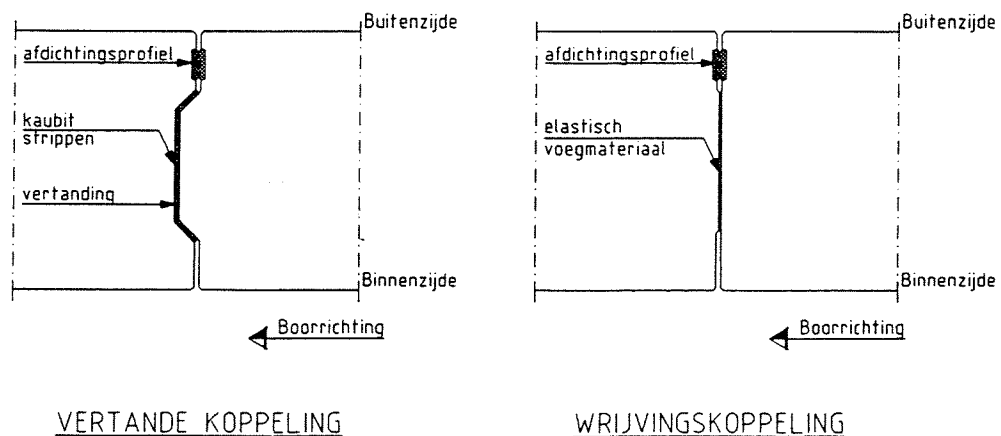
Vertande koppeling

De vertande koppeling is met name in Duitsland veelvuldig toegepast. De voeg bestaat uit een messing en groef ("Nut und Feder"). Om de piekspanningen te voorkomen, door het direct aanliggen van twee betonvlakken, worden in de groef kaubitstrippen (nylon/bitum materiaal) geplaatst. Deze strippen hebben een breedte van ongeveer 5 cm, een hoogte van 20 cm à 30 cm en een dikte van 3mm. Per ringvoeg van een segment worden 4 tot 6 strippen in de groef geplakt. Doordat de segmenten in een halfsteens verband zijn geplaatst, zullen opeenvolgende segmenten onderling verplaatsen. Hierdoor zijn ter plaatse van strippen in de ringvoeg dwarskrachten; de zogenaamde koppelkrachten.

Het gevaar bij dit voegtype is dat bij grote radiaal opgelegde verplaatsingen en / of stijve koppeling door het verperste kaubit, schade optreedt met als gevolg lekkages; Met name tijdens het grouten waarbij (lokaal) zeer hoge dwarskrachten ontstaan.

Wrijvingskoppeling

Een tweede type koppeling is de wrijvingskoppeling. Hierbij ontbreekt de vertanding en wordt de interactie tussen de segmenten gerealiseerd door vervorming van het voegmateriaal. Door gebruik te maken van een geconditioneerd materiaal met bekende fysische eigenschappen, kunnen hoge koppelkrachten en de daarmee samenhangende hoge buigende momenten in de lining voorkomen worden. Bij geringe vervormingen zal het materiaal elastisch reageren. Bij grotere vervormingen zal plastische deformatie optreden waarbij de axiale normaalkracht in de voeg de maximaal opneembare koppelkracht bepaald. Deze axiale kracht zal door tijd- en temperatureffecten kunnen reduceren.

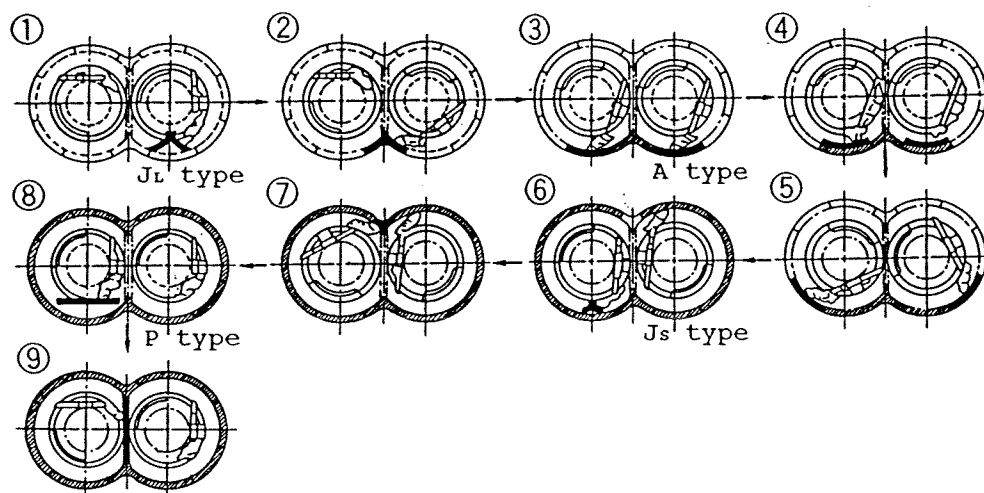


figuur 6.4 - type ringvoegen

6.2 Plaatsing van de segmenten

De aanvoer van de segmenten vindt plaats per trein door beide buizen. Hierna worden ze op een transportband gelegd, welke de segmenten naar de erector brengt. De erector pakt het segment op met behulp van een vacuüm-tilkop en kan het segment plaatsen nadat de shield-jacks zijn ingetrokken. Met bouten wordt het segment vervolgens voorlopig bevestigd aan de voorgaande ring en de reeds ingebouwde segmenten in de ring zelf. Hierna worden de shield-jacks weer op het net geplaatste segment gezet, waarna de volgende geplaatst kan worden – zie figuur 6.5.

Elke ring wordt op gelijke wijze opgebouwd: als eerste wordt het onderste sluitsegment geplaatst en daarna worden de normale segmenten van onder af op de plaats gezet en vastgebout aan de aangrenzende segmenten terwijl de erector ze op hun plek houdt. Een DOT-tunnelboormachine heeft zoals gezegd in elke tunnelbuis één erector om de segmenten te plaatsen. Indien de ring compleet is gebouwd worden de ring nog ondersteund door het segment holding device. De bouten worden nu goed aangedraaid tussen de segmenten zodat een éénheid ontstaat.



figuur 6.5 - volgorde van plaatsen segmenten in een ring

Tijdens het plaatsen van het bovenste sluitsegment en de kolom worden de reeds geplaatste segmenten van de ring op hun plaats gehouden door het zogenaamde "segment expansion device". Dit zijn speciale vizels die voorkomen dat de bovenste segmenten van de cirkelvormige doorsnede door gaan hangen. Ze tillen de segmenten in de ring iets op zodat voldoende ruimte wordt gemaakt om het bovenste sluitsegment goed te kunnen plaatsen zonder dat de waterafsluitende strip of het segment zelf wordt beschadigd. Hierna moet er voldoende ruimte worden gecreëerd om de kolom te plaatsen.

6.3 Voortgangssnelheid

De voortgangssnelheid wordt bepaald door een tweetal processen:

- het ontgraven van de grond
- het inbouwen van de lining

In theorie zou het mogelijk moeten zijn om voor een DOT dezelfde voortgangssnelheid te halen als bij een cirkelvormig schild. In de praktijk ligt de voortgangssnelheid lager omdat er een afhankelijkheid is tussen de twee erectoren tijdens het inbouwen van de ring en het inbouwen complexer is door de verschillende typen segmenten. Uit de literatuur blijkt dat met dezelfde snelheid ontgraven kan worden, maar de inbouwtijd langer is. Als richtlijnen wordt aangegeven een voortgangssnelheid van 2 tot 4 meter per dag bij de start en einde van het boorproces en 6 tot 8 meter per dag tijdens het normale boorproces. Als vergelijking kan worden aangegeven dat voor een cirkelvormige boortunnel voortgangssnelheden worden gehaald van 10 meter per dag of meer.

Om een idee te krijgen van de voortgangssnelheid is het volgende rekensommetje gemaakt, waarbij van het volgende wordt gegaan:

- De gemiddelde ontgravingstijd van een DOT-tunnel is hetzelfde als een cirkelvormige tunnel. Deze tijd kan erg variëren per grondlaag – 30 tot 60 minuten.
- De gemiddelde inbouwtijd van een DOT-tunnel ring een half uur langer duurt dan bij een cirkelvormige tunnel.
- Bij beide type tunnels behoort een risicoprofiel waardoor de gemiddeld cyclustijd wordt verdubbeld (aannahme op basis van gegevens Tweede Heinenoord). In het risicoprofiel zijn alle calamiteiten meegenomen, die invloed hebben op de voortgangssnelheid.

cirkelvormige tunnel	lengte ring = 1,5 m	
activiteit	gemiddelde tijdsduur (in minuten)	
Ontgraven	40	
Inbouwen lining	50	
Cyclustijd per ring	exclusief risicoprofiel 90	inclusief risicoprofiel 180
Voortgangssnelheid per dag	12 meter (8 cycli per 24 uur)	

tabel 6.1 – voortgangssnelheid cirkelvormige tunnel

DOT tunnel	lengte ring = 1,5 m	
activiteit	gemiddelde tijdsduur (in minuten)	
Ontgraven)	40	
Inbouwen lining	80	
Cyclustijd per ring	exclusief risicoprofiel 120	inclusief risicoprofiel 240
Voortgangssnelheid per dag	9 meter (6 cycli per 24 uur)	

tabel 6.2 – voortgangssnelheid DOT tunnel

6.4 Vervormingen

Vervormingen in de lining kunnen krachten opwekken, waarop deze niet is gedimensioneerd. Het is daarom van het grootste belang dat vervormingen worden beperkt tot een minimum. Hierbij kan getoetst worden op een aantal criteria:

- *Profiel van Vrije Ruimte*

Vervormingen ten aanzien van het Profiel van Vrije Ruimte zijn bij een DOT-tunnel uiterst ongewenst; zelfs meer dan bij een cirkelvormige tunnel. Dit komt door de niet-symmetrische vorm van de tunnel. Er kunnen een viertal oorzaken worden aangedragen, die vervormingen ten aanzien van het Profiel van Vrije Ruimte bepalen:

- *Ovalisatie van de tunnelbuis onder de bovenbelasting*

Bij een geringe zijdelingse steun in combinatie met een hoge bovenbelasting zal de lining een horizontale ovalisatie ondergaan afhankelijk van de mate van interactie tussen de ringen en de horizontale bedding.

- *Boorafwijkingen*

Tijdens het boorproces wordt altijd afgeweken van het beoogde alignement. De grootte van deze afwijking is afhankelijk van tal van omstandigheden.

- *Plaatsingsnauwkeurigheid*

Theoretisch vormen de segmenten een perfecte ring. Wanneer een element uit de ring iets verdraaid wordt geplaatst, ontstaat een extra ovalisatie van de ring.

- *Fabricagetoleranties*

De segmenten worden onder goed geconditioneerde omstandigheden, in zeer stijve stalen mallen gestort. Hierdoor is een grote mate van vormvastheid te behalen. Er zal echter altijd enige afwijking ontstaan.

- *Waterdichtheidseis*

De lining moet te allen tijde waterdicht zijn. Dit wordt gerealiseerd door het aanbrengen van afdichtingsprofielen in de langs- en ringvoegen.

- *Knikstabiliteit*

De Eulerse kniklast van een perfecte ring kan door de aanwezigheid van imperfecties in de voegen tijdens fabricage en montage, maar ook materiaalkundige imperfecties sterk terug lopen.

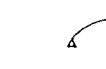
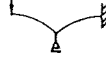
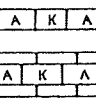
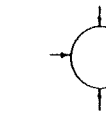
6.5 Krachtswerking in de lining

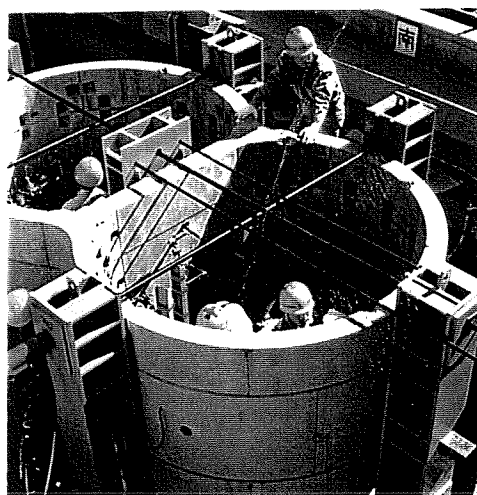
Over de krachtswerking in de lining van een DOT-tunnel is nog zeer weinig bekend. In dit afstudeeronderzoek zal hier niet verder op worden ingegaan. Toch dient vermeld te worden dat kennis en inzicht over de krachtswerking van essentieel belang is om tot een goede analyse en vergelijking te komen. Dit blijkt eens te meer als gekeken wordt naar de afmetingen van het sluitsegment, welke een grotere dikte heeft dan de overige segmenten. Door de niet-symmetrische vorm van de DOT-tunnel is scheefstand van kolommen vanuit esthetisch oogpunt niet erg gewenst, maar waarschijnlijk ook niet vanuit de krachtswerking.

Onderzoek naar de krachtswerking in de lining zou antwoord moeten geven op de volgende vragen:

- De dikte van de segmenten - Kunnen dezelfde ontwerpregels worden aangehouden als voor een cirkelvormige boortunnel?
- Welke eisen dienen gesteld te worden aan het Profiel van Vrije Ruimte, de plaatsingsnauwkeurigheid (i.v.m. bijvoorbeeld de scheefstand van de kolommen) en fabricagetoleranties?
- Welke ringconfiguratie verdient de voorkeur?
- Welke type ringvoeg verdient de voorkeur?

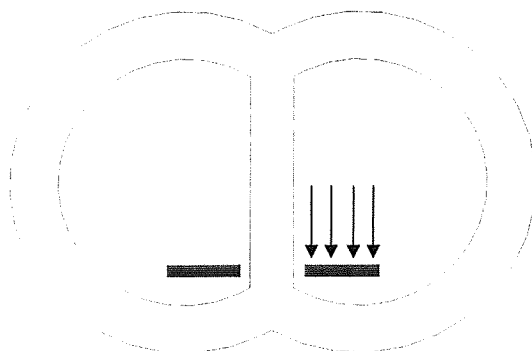
In Japan zijn in verschillende laboratoria testen gedaan naar de krachtswerking waar bijvoorbeeld de volgende opzet werd gehanteerd - figuur 6.6.

Test Case	Outline of Loading and Segments	
Bending Test between Segment to Segment (1)		
Bending Test between Segment to Segment (2)		
Shearing Test between Ring to Ring		
Bending Test of K Segment		
Bending Test of Full Ring		



figuur 6.6 - testopstellingen voor DOT-tunnelsegmenten

- Ook belastingsgevallen in de gebruiksfase moeten worden onderzocht aangezien een trein in één van de tunnelbuizen een asymmetrische belasting geeft op de tunnel - figuur 6.7.



figuur 6.7 - asymmetrische belastinggeval in DOT-tunnel

6.6 Conclusie

Het bouwen van een DOT-tunnel is complexer dan een cirkelvormige tunnel door de verschillende typen segmenten. Dit blijkt eens te meer aan de technologie, die is ontwikkeld om beschadiging van de segmenten bij inbouwen zoveel mogelijk te voorkomen. Hierdoor is de voortgangssnelheid van de DOT-tunnelboormachine lager dan bij een conventionele machine.

In dit afstudeeronderzoek wordt niet dieper ingegaan op de krachtswerking in en op de lining van een DOT-tunnel. Toch dient vermeld te worden dat kennis en inzicht over de krachtswerking van essentieel belang is om tot een goede analyse en vergelijking te komen. Een gedegen onderzoek zal meer duidelijkheid moeten geven over de krachtswerking.

7 WATERAFDICHTING

In Nederland zal het boren van tunnels vrijwel altijd beneden het grondwatervniveau plaatsvinden. Indringing van dit grondwater in de tunnelboormachine en de tunnel gedurende de uitvoerings- en gebruiksfase moet voorkomen worden. Er vanuit gaande dat het schild van de tunnelboormachine en de lining van de tunnel waterdicht zijn, blijven er twee kritieke plaatsen over waar indringing van grondwater kan plaatsvinden tijdens het boorproces, te weten:

- het boorfront
- de staartspleet

In dit hoofdstuk zal worden aangegeven hoe de waterafdichting gerealiseerd kan worden.

7.1 Waterafdichting aan het boorfront

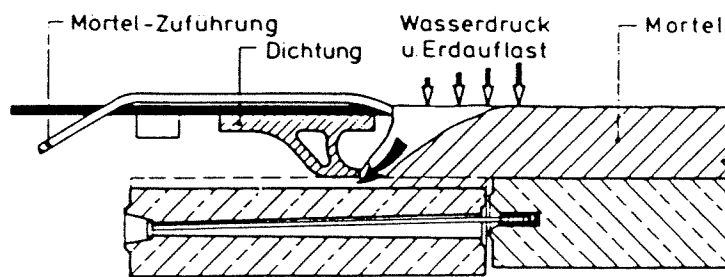
Zoals reeds in hoofdstuk 3 is aangegeven is indringing van grondwater één van de oorzaken van boorfrontinstabiliteit. Om dit te voorkomen moet een minimaal benodigde steundruk worden aangebracht, welke wordt geleverd door een onder druk gehouden medium. Deze boorfrontondersteuning is verschillend bij een slurry- en EPB-schild. Bij een slurry-schild wordt de scheiding gevormd door een wand tussen de graafkamer en de rest van het schild en het gesloten slurry-transport-systeem, ook wel drukwand genoemd. Bij een EPB-schild moet de grondbrij en eventueel de schroefvijzel voor de waterafdichting zorgen.

7.2 Waterafdichting bij de staartspleet

Aangezien de uitwendige afmetingen van de tunnelboormachine iets groter zijn dan de afmetingen van de tunnel-lining ontstaat een zogenaamde staartspleet. Om grondwater indringing via deze spleet te voorkomen wordt een zogenaamde staartafdichting aangebracht. In de praktijk worden twee type staartafdichtingen het meest gebruikt:

- staartafdichting door middel van rubberen flappen

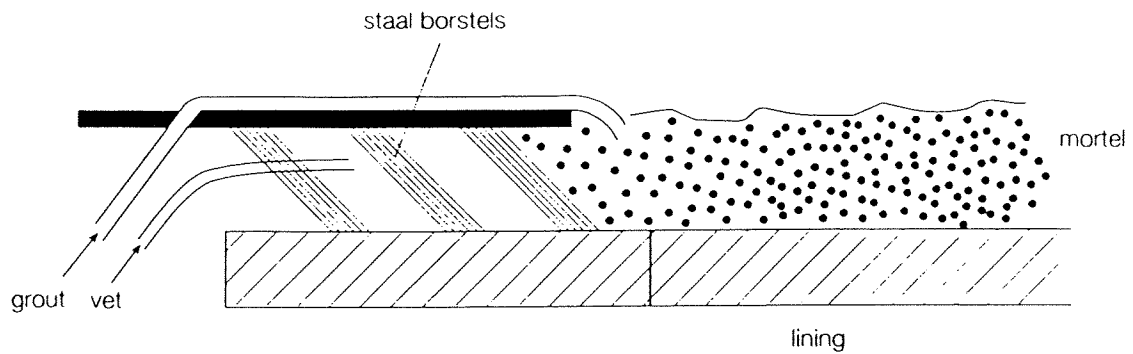
De rubberen staartafdichting bestaat uit rubberen flappen, die aan het schild van de tunnelboormachine zijn bevestigd en door de druk van grondwater en grout tegen de tunnel-lining worden gedrukt en zo een afdichting vormen. Dit type wordt voornamelijk toegepast op Europese tunnelboormachines - zie figuur 7.1.



figuur 7.1 - staartafdichting d.m.v. rubberen flappen

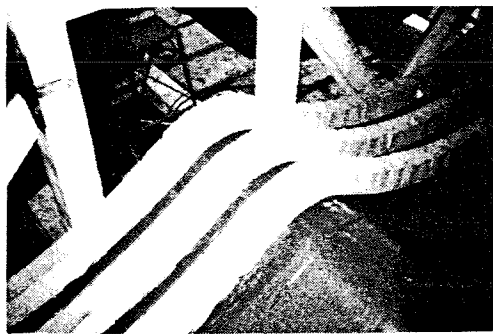
- staartafdichting door middel van staalborstels

De Japanse tunnelboormachines zijn voorzien van een staartafdichting met staalborstels en vet. Ook hier zijn de staalborstels aan het schild van de tunnelboormachine bevestigd. De afdichting wordt in feite gevormd door het vet dat zich tussen de staalborstels bevindt - zie figuur 7.2.



figuur 7.2 - staartafdichting d.m.v. staalborstels en vet

De hierboven beschreven type staartafdichtingen zijn ook toepasbaar voor de tunnelboormachines van zowel Multi-Face als DOT. De staartafdichting kan zo worden aangepast dat de niet-ronde vorm van zowel de tunnelboormachine als de tunnel-lining makkelijk kan worden gevolgd zoals te zien is in figuur 7.3.



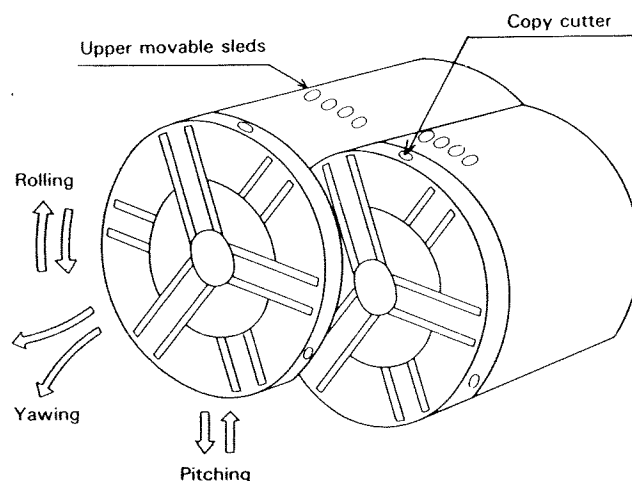
figuur 7.3 - staartafdichting met staalborstel bij een MF-schild

7.3 Conclusie

De waterafdichting is in principe hetzelfde als bij de conventionele tunnelboormachines. Bij het ontwerp van de tunnelboormachine moet goed worden gelet op de detaillering van de waterafdichting bij de sluitsegmenten.

8 BESTUREN VAN DE MACHINE

Ondanks dezelfde opbouw van de tunnelboormachine voor DOT-tunnels is de besturing van de machine een stuk complexer geworden. Dit komt enerzijds door de niet ronde vorm van de DOT-tunnel en anderzijds door de integratie van twee (on-)afhankelijke tunnelboormachines tot één machine. Gedurende het boorproces zijn een aantal van de in totaal zes vrijheidsgraden (drie verplaatsingen en drie rotaties) gewenst, maar ook een paar ongewenst. De ongewenste vrijheidsgraden, te weten pitching (rotatie om de z-as), rolling (rotatie om de x-as) en yawing (rotatie om de y-as), moeten voorkomen worden door het nemen van maatregelen. In dit hoofdstuk zal worden aangegeven welke maatregelen genomen kunnen worden om de ongewenste rotaties en verplaatsing tegen te gaan en hoe bochten kunnen worden gemaakt. Hierbij zal een onderscheid worden gemaakt tussen het MF-schild en een DOT-schild aangezien de oorzaak van de rotatie en de oplossing verschillend zijn.



figuur 8.1 – ongewenste vrijheidsgraden

8.1 Multi-Face methode

pitching

Door het grotere eigen gewicht van de tunnelboormachine heeft de machine de neiging om weg te zakken in de grond. Dit kan worden gecorrigeerd door:

- Het aanpassen van de vijzelkrachten – door op de vijzels onder of bovenin de machine meer kracht te zetten wordt de TBM als het ware naar boven danwel naar beneden geduwd.
- Toepassen van de copy cutters – door het inzetten van copy cutters onder of bovenin de machine kan op bepaalde plaatsen meer grond worden ontgraven waardoor de TBM de richting van de grotere ontgraving volgt.
- Toepassen van verticale sleds – door het inzetten van de verticale sleds wordt de machine naar boven danwel naar beneden geduwd.

rolling

Door de versprongen stand van de graafwielen is het ontgravingsoppervlak van het voorste graafwiel groter dan de achterste. Hierdoor ontstaat een verschil in draaimomenten op de beide graafwielen waardoor de machine gaat roteren in de tegengestelde richting van de draairichting van het voorste graafwiel. Andere oorzaken voor rolling zijn heterogene grondsamenstellingen met verschillende weerstandskrachten en het stuiten op obstakels. Dit kan worden tegengegaan door:

- De draairichting van de graafwielen te veranderen – hierdoor draait de TBM weer terug.
- Toepassen van de copy cutters – door het inzetten van copy cutters kan op bepaalde plaatsen meer grond worden ontgraven waardoor de TBM de richting van de grotere ontgraving volgt.
- Toepassen van verticale sleds – door het inzetten van de verticale sleds op bepaalde plaatsen wordt de machine enigszins geroteerd.

yawing

Door de versprongen stand van de graafwielen kan ook nog een andere rotatie ontstaan, die zoals reeds aangegeven, een verschillend draaimoment veroorzaakt. Yawing kan worden voorkomen door:

- Het aanpassen van de vijzelkrachten – door op de vijzels links of rechts in de machine meer kracht te zetten wordt de TBM als het ware naar links danwel naar rechts geduwd.
- Toepassen van de copy cutters – door het inzetten van copy cutters kan op bepaalde plaatsen meer grond worden ontgraven waardoor de TBM de richting van de grotere ontgraving volgt.

8.2 DOT-methode

pitching

Door het grotere eigen gewicht van de tunnelboormachine heeft de machine de neiging om weg te zakken in de grond. Dit kan worden gecorrigeerd door:

- Het aanpassen van de vijzelkrachten – door op de vijzels onder of bovenin de machine meer kracht te zetten wordt de TBM als het ware naar boven danwel naar beneden geduwd.
- Toepassen van de copy cutters – door het inzetten van copy cutters onder of bovenin de machine kan op bepaalde plaatsen meer grond worden ontgraven waardoor de TBM de richting van de grotere ontgraving volgt.

rolling

In theorie zou deze vrijheidsgraad niet optreden omdat het draaimoment van beide graafwielen aan elkaar gelijk is en tegengesteld. De praktijk wijst echter anders uit. Oorzaken voor rolling zijn heterogene grondsamenstellingen met verschillende weerstandskrachten en het stuiten op obstakels. Dit kan worden tegengegaan door:

- Rolling-control-jacks - In tegenstelling tot bij een MF-TBM kan bij een DOT-TBM de draairichting niet worden veranderd. In plaats hiervan verbinden kleine vijzels elk shield-jack met het schild zelf. Deze rolling control jacks kunnen het schild enkele graden roteren (om de as van de tunnel) ten opzichte van de tunnel. De shieldjacks en de segmenten worden hierbij als vaste punten gezien.
- Toepassen van de copy cutters – door het inzetten van copy cutters kan op bepaalde plaatsen meer grond worden ontgraven waardoor de TBM de richting van de grotere ontgraving volgt.

yawing

Door een ongelijke volumebalans in de mengkamer kan een rotatie ontstaan, die veroorzaakt kan zijn door bijvoorbeeld een heterogene grondslag. Yawing kan worden voorkomen door:

- Het aanpassen van de vijzelkrachten – door op de vijzels links of rechts in de machine meer kracht te zetten wordt de TBM als het ware naar links danwel naar rechts geduwd.
- Toepassen van de copy cutters – door het inzetten van copy cutters kan op bepaalde plaatsen meer grond worden ontgraven waardoor de TBM de richting van de grotere ontgraving volgt.

Indien de DOT-TBM een bocht moet maken dan is deze vrijheidsgraad toegestaan. De bocht kan sneller worden gemaakt door de hierboven beschreven maatregelen zo toe te passen dat ze het effect versterken in plaats van tegenwerken.

8.3 Vergelijking

Uit de praktijk blijkt dat pitching en yawing nauwelijks optreden en goed in de hand kunnen worden gehouden door de hierboven beschreven maatregelen. Het beheersen van het roteren van het schild om de x-as (rolling) verdient extra aandacht aangezien de niet-ronde vorm van de tunnel het niet toelaat dat de tunnel teveel roteert omdat anders het Profiel van Vrije Ruimte in het geding komt. Wanneer beide boormethodes worden vergeleken dan blijkt dat alleen het tegengaan van rolling op een andere wijze geschiedt en optreedt. Bij een MF-schild treedt door het niet gelijke ontgravingsoppervlak rolling sneller op. Dit kan op zich goed worden opgevangen door het veranderen van de draairichting. Bij een DOT-schild wordt rolling beheerst door rolling control jacks.

	pitching	rolling	yawing	bochten
MF	vijzels copy cutters sleds	sleds copy cutters veranderen draairichting graafwiel	vijzels copy cutters	vijzels over cutters
DOT	vijzels copy cutters	rolling control jacks copy cutters	vijzels copy cutters	vijzels over cutters

tabel 8.1 – maatregelen ter voorkoming van ongewenste rotaties

9 RISICO-AFWEGINGSMODEL

9.1 Algemeen

De risico-analyse is een relatief nieuw hulpmiddel bij het ontwerp. Traditioneel wordt een deterministische rekenwijze toegepast, waarbij veiligheidsfactoren worden gebruikt. Bij de risico-analyse daarentegen worden vooraf alle ongewenste gebeurtenissen inzichtelijk gemaakt, die kunnen leiden tot het optreden van de topgebeurtenis, de gebeurtenis die het meest ongewenst is. Het optreden van de topgebeurtenis hoeft niet het bezwijken van de constructie te betekenen, maar treedt op indien één of meerdere belangrijke functies niet (meer) kunnen worden vervuld. Door het nemen van maatregelen tegen ongewenste gebeurtenissen wordt de veiligheid van de constructie gewaarborgd.

De topgebeurtenis kan vanuit vier invalshoeken worden gedefinieerd, te weten:

- geld;
- kwaliteit;
- tijd;
- veiligheid.

Of anders gezegd de gevolgen van een ongewenste gebeurtenis kunnen worden uitgedrukt in de criteria geld, kwaliteit tijd of veiligheid. Echter hiermee is nog niet het risico bepaald aangezien dit gedefinieerd is als de kans dat een bepaald gevolg optreedt vermenigvuldigt met het gevolg. In formulevorm ziet dit er als volgt uit:

$$\text{risico} = \text{kans} \cdot \text{gevolg} \quad (9.1)$$

Om voor een DOT-tunnel inzichtelijk te krijgen waar de risico's zitten met betrekking tot geld en tijd moet eerst duidelijk worden wat de belangrijkste risico's zijn, die de kwaliteit beïnvloeden van de tunnel. Dit zal worden gedaan door het maken van een technische risico-analyse. In deze risico-analyse zullen faalkansen met een grote bandbreedte worden gebruikt enerzijds omdat er te weinig tot geen referentie materiaal voor handen is met betrekking tot DOT-tunnels en anderzijds omdat het signaleren van de risico's in deze fase van het onderzoek belangrijker is dan de daarbijbehorende grootte van de faalkans.

In dit hoofdstuk zal de gevolgde methodiek worden uitgelegd en de resultaten van de risicoafweging tussen de verschillende typen tunnelboormachines en tunnelvormen.

9.2 Foutenboom

De foutenboom is het middel bij uitstek om de gevolgen van een bepaalde afwijking in combinatie met de gevolgen van een afwijking in andere processen, te onderkennen. Vaak zijn het juist die combinaties van afwijkingen die de grote ongewenste gebeurtenissen genereren.

Bij de foutenboom wordt, uitgaande van de ongewenste topgebeurtenis, systematisch geïnventariseerd welke combinaties van ongewenste gebeurtenissen noodzakelijk zijn om de topgebeurtenis te laten optreden. Dit proces wordt net zo lang herhaald totdat verdere uitsplitsing niet meer zinvol wordt geacht.

Dit kan zijn omdat het betreffende deelproces niet verder kan worden danwel wordt uitgewerkt. Deze gebeurtenissen worden ook wel basisgebeurtenissen genoemd. De foutenboom is opgesteld aan de hand van risico-item lijsten.

9.2.1 Uitgangspunten

- De foutenboom is zo opgezet dat deze algemeen kan worden gebruikt voor verschillende tunnelvormen als voor tunnelboormachines met verschillende wijze van boorfrontondersteuning. Toch dient te worden opgemerkt dat voor de foutenboom "de HSL-Zuid boortunnel onder het Groene Hart" voor een belangrijk deel model heeft gestaan;
- In de foutenboom is de fasering van het project in de tijd meegenomen. Dit is niet gebruikelijk aangezien een tijdvak niet een opzichzelfstaande ongewenste gebeurtenis is. De fasering in de tijd is ingebouwd om de risico's gestructureerder weer te geven en inzichtelijker te maken. Tevens kunnen gevolgen van een ongewenste gebeurtenis in een bepaalde fase pas optreden danwel zichtbaar worden in een andere fase;
- Deze foutenboom richt zich met name op de uitvoeringsfase en in mindere mate op de voorbereidingsfase. De overige fases in het project worden verder buiten beschouwing gelaten;
- Deze foutenboom is alleen uitgewerkt voor het boortunnel gedeelte;
- Risico-beperkende maatregelen zijn niet in de foutenboom verwerkt om de risico's allemaal zichtbaar te krijgen.
- In de foutenboom zijn alle ongewenste gebeurtenissen ontkoppeld door OF-poorten. Dit is slechts een benadering aangezien ongewenste gebeurtenissen onderling elkaar ook beïnvloeden - correlatie;
- De ongewenste gebeurtenissen in de foutenboom kunnen zowel proces-items als product-items zijn;
- In de foutenboom zullen faalkansen met een grote bandbreedte worden aangegeven enerzijds omdat er te weinig tot geen referentie materiaal voor handen is met betrekking tot DOT-tunnels en anderzijds omdat het signaleren van de risico's in deze fase van het onderzoek belangrijker is dan de daarbijbehorende grootte van de faalkans.

9.2.2 Opstellen foutenboom

In deze paragraaf zullen de ongewenste gebeurtenissen per stap worden beschreven. De nummers tussen de haken verwijzen naar de nummers van de gebeurtenissen in de foutenboom. De foutenboom is verdeeld in vijf niveaus, te weten:

- **Topgebeurtenis** - De topgebeurtenis van de foutenboom is de boortunnel onder “het Groene Hart” [1] belicht vanuit de invalshoek kwaliteit;
- **Fasering van het project** - Het project, en zo ook de foutenboom, zijn opgedeeld in verschillende fases, te weten: aanbesteding [2], voorbereiding [3], uitvoering [4] en exploitatie [5];
- **Constructie-onderdelen** - De boortunnel onder “het Groene Hart” is niet alleen het gesloten gedeelte, maar bestaat daarnaast nog uit een aantal andere kunstwerken, te weten: start-/ontvangstschacht [12/18], toeritten (inclusief overgangsconstructie aardebaan-open bak) [13/19], boortunnel [14/20], vluchtschachten [15/21], dwarsverbindingen [16/22], afbouw [17];
- **Functies van het boortunnel proces** - In het boor- en bouwproces kunnen de volgende functies worden onderscheiden: ontgraven [27], steunen boorfront [28], waterdichting [29], tunnelconstructie [30], logistiek [31] en stuurcorrectie TBM [32];
- **Risico-items/gebeurtenissen** - Dit is het laagste niveau van de foutenboom waarin risico-items al dan niet zijn gebundeld in ongewenste basis-gebeurtenissen.

Een aantal risico-items worden nu nader toegelicht:

Voorbereiding [3]

In deze fase wordt het ontwerp van de tunnel onder het Groene Hart [7] gemaakt. De tunnel omvat alle onderdelen: start-/ontvangstschacht [18], toeritten [19], boortunnel [20], vluchtschachten [21] en dwarsverbindingen [22]. Mogelijke oorzaken, die tot falen kunnen leiden, zijn verkeerde keuze van de boormethode, gebrek aan kennis, ervaring, gegevens en nieuw gestelde eisen waardoor het ontwerp niet voldoet. Ditzelfde geldt voor de tunnelboormachine [6] en eventueel de scheidingsinstallatie [8]. Tijdens de voorbereidingsfase moet het geotechnisch onderzoek [9] zijn afgerond en dient het bouwterrein geconditioneerd te zijn [11].

Conditionering bouwterrein [11]

Om te kunnen te beginnen met de uitvoering moet de bouwlocatie helemaal ingericht zijn. Als de vergunningen niet of niet op tijd zijn geregeld, kan de uitvoering niet beginnen [23]. Ditzelfde geldt indien door procedures de grond nog niet verworven is door de opdrachtgever [24]. Eventuele kleine infrastructuur, kabels en leidingen, moet zijn omgelegd [25]. Tot slot moet het bouwterrein helemaal zijn ingericht. Hierbij is het van wezenlijk belang dat goed is nagedacht over de logistieke processen die allemaal plaatsvinden op de locatie [26].

Ontgraven [27]

Falen tijdens het ontgraven vindt vooral plaats doordat of de grondsamenstelling anders is dan verwacht [34], er obstakels [36] worden aangetroffen of de tunnelboormachine niet goed functioneert door foutief gebruik van de machine door menselijk falen [37]. Ook kan door overmatige slijtage van de snijtanden op het graafwiel of de hoofdlager [35] het ontgravings-proces falen. Bij het ontgraven van een DOT-TBM bestaat het risico dat de twee graafwielen elkaar raken wat kan leiden tot beschadiging van de machine [33].

Steunen boorfront [28]

Het steunen van het boorfront is van essentieel belang zowel tijdens het ontgraven als tijdens het inbouwen van de lining. Anders gezegd: stabiliteit van het boorfront moet continue worden gewaarborgd. Door het aantreffen van geotechnische afwijkingen [38] kan falen van het steunen optreden. Wanneer de steundruk beneden de minimale benodigde steundruk (blow-in, instorten) of boven de maximale toelaatbare steundruk (blow-out) komt, treedt graaffront instabiliteit op [39]. De ingestelde steundruk moet worden geleverd door een bentoniet-suspensie (slurry) of plastische grondbrij (mud). Indien de verkeerde additieven samenstelling wordt gebruikt of het toevoegen van de additieven onvoldoende gecontroleerd verloopt, kan het boorfront falen [40]. Het beheersen van het ondersteuningsproces is uiterst gecompliceerd doordat vele factoren kunnen leiden tot falen. Het beheersingsproces wordt vaak nog uitgevoerd door mensen. Het menselijk falen is hierbij een belangrijke factor [42]. Gedurende het boor- en bouwproces moet ook onderhoud worden gepleegd aan de machine al dan niet gepland. Deze werkzaamheden worden vaak gedaan door de graafkamer gedeeltelijk onder verhoogde luchtdruk te zetten. Het werken met luchtdruk is een risicovollere methode van boorfrontondersteuning dan met een additief [44].

Voor een tunnelboormachine van een DOT-tunnel is er nog één risico-item: Door de grotere te steunen oppervlakte bestaat de mogelijkheid dat er geen goed verdeelde drukopbouw plaatsvindt aan het boorfront wat tot instabiliteit kan leiden [41].

Waterdichting [29]

Gedurende de uitvoerings- en gebruiksfase is het ongewenst dat grondwater de tunnel instroomt. Dit kan op een drietal plekken plaatsvinden: graafkamer van de TBM [44], staartspleet [45] en de tunnel [46]. Afhankelijk van het type schild moet grondwaterinstroming in de graafkamer worden voorkomen door de bentoniet-suspensie (slurry-schild) of door de avegaar (EPB-schild). Bij de staartspleet moet de staartaafdichting zorgen voor de waterafdichting. Dit kan misgaan indien de rubberen flappen en de noodafdichting falen door versleten flappen danwel te lage groutdruk of indien de staalborstels met vet falen door slijtage of te weinig vet. In het reeds gebouwde deel van de tunnel kan lekkage ontstaan tussen de ringen (ringvoeg - [66]) of tussen de verschillende segmenten (langsvoeg - [67]). Oorzaak kan zijn het niet voldoen van het afdichtingsprofiel, te grote vervormingen van de tunnel of te grote maattolerantie. Natuurlijk speelt de tunnelconstructie hierbij ook een rol.

Tunnelconstructie [30]

In de tunnelboormachine wordt na het ontgraven van de grond de uiteindelijke tunnel gebouwd. De tunnelconstructie is onderhevig aan een aantal mechanismen, die kunnen leiden tot het falen van de tunnel. Indien de diepteligging van de tunnel onvoldoende is, kan deze opdrijven danwel opbreken [50]. De tunnel is opgebouwd uit verschillende type segmenten (ringsegment, K-segment/sluitsteen, kolom [68,69,70]) en wordt ook wel lining genoemd [49]. De lining mag niet bezwijken en moet dus tijdens de inbouwfase [76,80] en gebruiksfase [77,81,84] de optredende belastingen kunnen opnemen. Om de vervormingen te beperken is het vullen van de staartspleet met grout van groot belang. Echter tijdens dit groutproces kunnen belastingen optreden, die kunnen leiden tot het falen van de constructie [47]. Bij het plaatsen van de segmenten dient een bepaalde maattolerantie te worden aangehouden. Deze kan niet worden gehaald wanneer er tijdens de fabricage fouten zijn gemaakt [74,78,82] of tijdens het plaatsen van de lining [75,79,83]. De maatvoering van de tunnel, oftewel het alignement moet worden aangehouden omdat anders het Profiel van Vrije Ruimte niet wordt gehaald en de tunnel niet voldoet aan de gestelde eisen [48].

Logistiek [31]

Het logistieke gedeelte van het hele boor- en bouwproces is een cruciale schakel tussen de verschillende processen, die plaatsvinden op de bouwlocatie en in de tunnelboormachine. De logistiek omvat alle transportactiviteiten van materiaal, materieel en personeel. Zodoende is falen van aangevoerde materialen (bentoniet, water [51], mortel [52], segmenten [53], verlengen materieel [57]) en falen van transport van afgevoerde grond [54] ongewenst. Aangezien de afgevoerde grond niet direct bruikbaar is voor hergebruik, is afhankelijk van het type schild een scheidingsinstallatie [55] en / of een (tijdelijk) gronddepot [56] nodig.

Het plegen van onderhoud aan de machine is een gebeurtenis waarbij het een en ander kan falen [58]. Ook falen door onvoldoende energievoorziening en ventilatie moet worden voorkomen [59,60]. Het falen van het logistieke proces mag niet de oorzaak zijn van het falen van de boortunnel. Het logistieke proces kan sterk worden beïnvloed door het moment van bouwen van de dwarsverbindingen. Wanneer door een beperkte bouwtijd de dwarsverbindingen tijdens het boorproces moeten worden gebouwd, ontstaan er risico's als gevolg van calamiteiten, lekkages en extra te nemen maatregelen.

Opgemerkt moet worden dat het logistieke proces lengte-afhankelijk is. Dit wil zeggen dat het logistieke proces bij een korte tunnel minder essentieel, ander is ingericht en tot andere problemen kan leiden dan bij een tunnel met een bepaalde lengte.

Stuurcorrectie [32]

Tijdens het boorproces ondergaat de tunnelboormachine een aantal rotaties door o.a. het draaimoment. Wanneer deze rotaties te groot worden, kan het alignement niet worden gevolgd en stuurcorrectie noodzakelijk. De vrijheidsgraden waarin stuurcorrectie moet plaatsvinden zijn: rolling [61], pitching [62] en yawing [63].

9.3 Risico-analyses

9.3.1 Algemeen

Nu alle ongewenste gebeurtenissen zijn gerangschikt in de foutenboom kunnen de verschillende typen tunnelboormachines worden vergeleken in de risico-analyse. De analyse is kwalitatief van karakter en is opgezet door een aantal risicogroepen te onderscheiden en toe te kennen aan een bepaald risico-item. Hierdoor is duidelijk te zien wat de risico's zijn bij een bepaald type tunnelboormachine. Opgemerkt moet worden dat bij de tunnelboormachine de huidige ontwikkeling, voor zover bekend, wordt meegenomen. Toch is een waarschuwing hierbij op zijn plaats: Voor een aantal risico's zijn systemen ontwikkeld, waardoor het risico bijna in zijn geheel is ondervangen. Deze systemen dienen wel in de tunnelboormachine te zijn ingebouwd.

9.3.2 Type tunnelboormachines

De risico-analyse wordt uitgewerkt voor een zestal type tunnelboormachines. De vorm van de machine en tunnel, de stand van de graafwielen en de boorfrontondersteuning zijn verschillend, zoals weergegeven in onderstaande tabel 9.1. Hierbij dient te worden vermeld dat de typen tunnelboormachines DOT-slurry (nummer 3) en MF-EPB (nummer 6) zijn, voor zover bekend, nog niet ontwikkeld, maar zeker wel haalbaar.

nr		type TBM	tunnelvorm	stand graafwielen	boorfront ondersteuning
1		slurry	cirkel		slurry
2		EPB	cirkel		EPB
3		DOT-slurry	DOT	niet-versprongen	slurry
4		DOT-EPB	DOT	niet-versprongen	EPB
5		MF-slurry	DOT	versprongen	slurry
6		MF-EPB	DOT	versprongen	EPB

tabel 9.1 – type tunnelboormachines

9.3.3 Risicogroepen

Het risico is opgebouwd als het product van de kans en het gevolg. Door een schaalindeling van "zeer klein" tot "zeer groot" ontstaan zestien risiconormeringen die uiteindelijk zijn verdeeld in vijf groepen, zoals is weergegeven in onderstaande tabel.

Voor alle basisgebeurtenissen is het risico bepaald door een inschatting te maken van de kans en het gevolg van een bepaald risico-item, waardoor aan de basisgebeurtenis een risico-normering is toegekend.

gevolg \ kans	zeer klein	klein	groot	zeer groot
zeer klein				
klein				
groot				
zeer groot				

tabel 9.2 –indeling risicogroepen

De risicogroepen zijn als volgt gekarakteriseerd:

	ongunstig
	ongewenst
	zeer ongunstig
	zeer ongewenst
	onacceptabel

9.3.4 Vergelijken van de risico-analyses

Nu de risico-analyses zijn ingevuld voor de verschillende typen tunnelboormachines (deelrapport III, bijlage H) is het belangrijk om te weten te komen waar verschuivingen van risico's plaatsvinden. De vergelijking is opgezet door van de basisgebeurtenissen de verschuivingen in "grootte" van de risico's tussen de type tunnelboormachines aan te geven en waardoor deze verschillen worden veroorzaakt.

Ontwerp boortunnel

nr	risico-item	type tunnelboormachine					
		1	2	3	4	5	6
6	falen ontwerp & bouw TBM						
8	falen ontwerp scheidingsinstallatie						
18	falen ontwerp start-/ontvangtschachten						
19	falen ontwerp toeritten						
20	falen ontwerp boortunnel						
21	falen ontwerp vluchtschachten						
22	falen ontwerp dwarsverbindingen						

tabel 9.3 – afweging risico: ontwerp boortunnel

Tijdens de ontwerpfase is te zien dat het ontwerp van de DOT-tunnel een groot risico is. Aangezien op dit moment alleen in Japan nog DOT-tunnels zijn gebouwd, is er nog onvoldoende / geen kennis en ervaring is opgedaan met DOT-tunnels. Eén van de redenen om een DOT-tunnel te kiezen (en daarom een groot voordeel) is dat er geen dwarsverbindingen nodig zijn. Indien wordt gekozen voor een EPB-schild, is een scheidingsinstallatie overbodig.

Uitvoering

nr	risico-item	type tunnelboormachine					
		1	2	3	4	5	6
12	falen bouw start-/ontvangtschacht						
13	falen bouw toeritten						
15	falen bouw vluchtschachten						
16	falen bouw dwarsverbindingen						
17	falen afbouw						

tabel 9.4 – afweging risico: uitvoering

Zoals bij het ontwerp reeds is aangegeven, zijn dwarsverbindingen overbodig bij een DOT-tunnel. Aangezien het bouwen van dwarsverbindingen een zeer risicovolle operatie is, is dit een duidelijk voordeel van de DOT-tunnel.

Ontgraven

nr	risico-item	type tunnelboormachine					
		1	2	3	4	5	6
33	falen door raken graafwielen						
34	falen door bodemgesteldheid						
35	falen door slijtage						
36	falen door obstakels						
37	falen functioneren TBM						

tabel 9.5 – afweging risico: ontgraven

De grond wordt ontgraven met behulp van een graafwiel, wat al dan niet gesloten is. De keuze voor een open of gesloten graafwiel is afhankelijk van de bodemgesteldheid en de keuze voor een type schild. Door het bredere inzetgebied van een EPB-schild is de kans dat het ontgravingsproces faalt door een andere bodemgesteldheid kleiner dan bij een slurry-schild. Obstakels, die worden tegengekomen tijdens het proces kunnen met een slurry-schild makkelijker worden weggehaald dan bij een EPB-schild door de aanwezigheid van een filtercake. De slijtage van de snijtanden en het graafwiel is bij een EPB-schild groter dan bij een slurry-schild doordat grotere vijzelkrachten nodig zijn om het boorproces te beheersen. Deze risico-items zijn niet afhankelijk van de tunnelvorm en tunnelboormachine. Echter wanneer een DOT-TBM wordt ingezet, bestaat de kans dat de graafwielen elkaar raken doordat beide graafwielen in één vlak staan. Toch is het risico klein omdat de besturing van beide graafwielen aan elkaar is gekoppeld. Wanneer de spaken elkaar dreigen te raken, wordt het boorproces automatisch stopgezet. Het falen van het ontgravingsproces is bij een DOT-TBM is groter dan bij een conventionele TBM door de complexiteit van de machine en de menselijke invloed tijdens het boor- en bouwproces.

Steunen boorfront

nr	risico-item	type tunnelboormachine					
		1	2	3	4	5	6
38	falen door geotechnische afwijkingen						
39	falen door graaffrontinstabiliteit						
40	falen door toevoegen additieven						
41	falen door drukopbouw boorfront						
42	falen beheersing boorproces						
43	falen tijdens onderhoud						

tabel 9.6 – afweging risico: steunen boorfront

Gezien de Nederlandse grondsamenstelling moet het boorfront tijdens het hele boor- en bouwproces worden gesteund. Indien de steundruk te laag is ingesteld, kan het boorfront bezwijken. Dit fenomeen treedt zowel bij een slurry-schild als bij een EPB-schild op. Bij een slurry-schild kan ook nog een blow-out optreden door een te hoge steundruk. Het risico van graaffront instabiliteit is bij een slurry-schild groter dan bij een EPB-schild doordat op druk wordt gestuurd terwijl bij een EPB-schild op volumebalans wordt gestuurd. De benodigde steundruk moet tevens over het gehele boorfront optreden omdat anders (lokaal) bezwijken optreedt. Door de grote breedte van een tunnelboormachine voor een DOT-tunnel kan het zijn dat de drukopbouw zich niet goed verdeelt over de gehele breedte, waardoor lokaal grote drukken kunnen ontstaan; Dit risico is bij een cirkelvormig schild kleiner.

Behalve de drukopbouw aan het boorfront is er bij TBM's voor DOT-tunnels nog een risico. Wanneer de graafwielen niet in één vlak staan zoals bij een MF-machine dan ontstaat op het achterste graafwiel een ongelijke grondrukopbouw, wat niet bevorderlijk is voor de boorfrontstabiliteit. Dit risico wordt ook onderkend door de aanwezigheid van een zogenaamde face-collapse detector op de MF-machine, welke ervoor moet zorgen dat wanneer het boorfront bij het achterste graafwiel dreigt te gaan bezwijken er maatregelen kunnen worden genomen. Gelet op de stabiliteit van en de drukopbouw aan het graaffront kan worden gesteld dat het beheersingsproces van TBM's voor DOT-tunnels een complexer proces is doordat twee onafhankelijke machines zijn geïntegreerd tot één. Wanneer al dan niet gepland onderhoud aan de machine moet plaatsvinden dan kan dit gebeuren door de graafkamer onder verhoogde luchtdruk te zetten. Bij een EPB-schild is dit pas mogelijk wanneer met een bentoniet suspensie een filter-cake is gemaakt voor het boorfront. Doordat bij een slurry-schild reeds dit filter aanwezig is, is het risico wat kleiner.

Waterdichting

nr	risico-item	type tunnelboormachine					
		1	2	3	4	5	6
44	falen in graafkamer						
64	falen bij staartspleet door rubberen flappen						
65	falen bij staartspleet door vet / borstels						
66	falen bij ringvoeg						
67	falen bij langsvog						

tabel 9.7 – afweging risico: waterdichting

Het risico dat de waterdichting faalt, kan optreden in de graafkamer, bij de staartspleet of in het gebouwde deel van de tunnel. Voor zowel de cirkelvormige tunnel als de DOT-tunnel geldt dat het risico van het falen van de waterdichting nagenoeg gelijk is. Bij de detaillering van de staartspleet afdichting dient extra aandacht te worden geschonken ter plaatse van het K-segment. In het algemeen geldt dat het toepassen van rubberen flappen als staartafdeling onbetrouwbaarder is dan de toepassing van vet en staalborstels. Indien een EPB-schild wordt gebruikt, zijn de vjzelkrachten groter dan bij een slurry-schild waardoor sneller schade en lekkage kan optreden in de ring- en langsvog van element.

Tunnelconstructie

nr	risico-item	type tunnelboormachine					
		1	2	3	4	5	6
47	falen vullen staartspleet						
48	falen maatvoering tunnel						
50	falen door opdrijven / opbreken						

tabel 9.8 – afweging risico: tunnelconstructie

Om zakkingen aan het maaiveld tegen te gaan is het goed opvullen van de staartspleet met grout van essentieel belang. Door de niet-ronde vorm van de DOT-tunnel is het geheel rondom opvullen van de staartspleet een complexer proces en daarmee risicovoller. Te meer omdat bij een cirkelvormige tunnel al weinig inzicht bestaat over het proces van het vullen van de staartspleet. De vorm heeft verder nog het nadeel dat de maatvoering van de tunnel goed moet worden gevolgd omdat anders het Profiel van Vrije Ruimte (PVR) niet wordt gehaald. De compactere vorm van de DOT-tunnel reduceert het eigen gewicht van de tunnel. Dit heeft echter het nadeel dat de mechanismen "opdrijven" en "opbreken" eerder maatgevend worden dan bij een cirkelvormige tunnel.

	<i>ringsegment</i>						
74	falen tijdens fabricage						
75	falen tijdens plaatsen						
76	falen door vijzelkracht						
77	falen door belasting lining						
	<i>sluitsteen / K-segment</i>						
78	falen tijdens fabricage						
79	falen tijdens plaatsen						
80	falen door vijzelkracht						
81	falen door belasting lining						
	<i>kolom</i>						
82	falen tijdens fabricage						
83	falen tijdens plaatsen						
84	falen door belasting lining						

tabel 9.9 – afweging risico: tunnelconstructie

Het fabriceren van de verschillende elementen vormt een bijna te verwaarlozen risico omdat de elementen moeten voldoen aan bepaalde eisen. Wanneer deze eisen niet worden gehaald dan wordt het desbetreffende element afgekeurd. Bij een cirkelvormige tunnel geeft het plaatsen van de elementen in de ring weinig problemen waarbij het inbouwen van de sluitsteen het meest kritiek is. Bij de DOT-tunnel is het inbouwen van de elementen veel complexer. Het complexere proces wordt veroorzaakt doordat twee erectoren tegelijkertijd de verschillende elementen aan het inbouwen zijn. Door de niet-ronde vorm is het plaatsen van het bovenste sluitsegment en de kolom moeilijker doordat de elementen boven in de ring kunnen gaan doorhangen. Met behulp van het "segment expansion device" wordt de benodigde vrije ruimte gecreëerd om de segmenten goed te kunnen plaatsen zonder dat beschadiging optreedt. Ondanks alles blijft het een risicovoller proces dan bij een cirkelvormige tunnel. Tijdens de inbouwfase zet de tunnelboormachine zich af op het reeds gebouwde deel van de tunnel. De krachten, die hierbij optreden, zijn (vaak) maatgevend voor het ontwerp van de segmenten. Zowel bij een DOT-tunnel (ten opzichte van een cirkelvormige tunnel) als bij toepassing van een EPB-schild (ten opzichte van een slurry-schild) treden grotere vijzelkrachten op, waardoor het risico groter is. Bij de dimensionering van de verschillende segmenten dient rekening te worden gehouden met deze krachten. Over de krachtswerking van de lining van een DOT-tunnel is weinig tot niets bekend, waardoor dit een groot risico vormt. Onderzoek naar de krachtswerking in de lining is daarom ook noodzakelijk.

Logistiek

nr	risico-item	type tunnelboormachine					
		1	2	3	4	5	6
51	falen aanvoer bentoniet / water						
52	falen aanvoer mortel						
71	falen opslag elementen						
72	falen transport elementen naar locatie						
73	falen transport door tunnel						
54	falen grondafvoer						
55	falen scheidingsinstallatie						
56	falen hergebruik grond						
57	falen verlengen materieel						
58	falen onderhoud						
59	falen energievoorziening						
60	falen ventilatie						

tabel 9.10 – afweging risico: logistiek

De logistiek is de schakel tussen de verschillende processen die plaatsvinden tijdens het boor- en bouwproces. De invulling van het logistieke proces is project- en lengte-afhankelijk. De aanvoer van mortel voor het vullen van de staartspleet verdient aandacht aangezien bij de bouw van de Tweede Heinenoord Tunnel bleek dat het moment van leveren en de conditionering van de mortel een moeilijk in te schatten proces is. Tevens is het transport van de elementen door de tunnel van belang: Door ontsparing van de treintjes of het transporteren van de verkeerde elementen kan dit item falen. In het geval van de boortunnel "Groene Hart" is de DOT-tunnel gunstiger doordat voor het transport geen rekening hoeft te worden gehouden met de bouw van dwarsverbindingen, wat op zichzelf al een uiterst risicovolle operatie is. Tevens zijn er twee keer zo veel mogelijkheden voor transport. Dit heeft alleen maar zin indien de erector de mogelijkheid heeft om vanuit beide DOT-tunnelbuizen de segmenten op te pakken. Doordat de boortunnel nu in één keer wordt gebouwd, is het verlengen van het materieel complexer. Bij een EPB is de vrijkomende grond bijna direct bruikbaar. De grond dient enige tijd in een depot te worden gestort zodat het toegevoegde schuim kan vervluchtigen. Bij een slurry-schild is een scheidingsinstallatie nodig om de grond te kunnen scheiden van de boorspoeling. De vrijkomende grond kan worden hergebruikt. De boorspoeling dient regelmatig te worden verversd om een goede werking te kunnen garanderen. Na de scheiding komt een afgewerkte boorspoeling vrij, waarvoor moeilijk een toepassingsmogelijkheid voorhanden is. Dit materiaal dient te worden gestort in een slibdepot of op een stortplaats. Om het op een stortplaats te mogen storten dient het te worden ontwaterd, wat een duur en intensief proces is.

Stuurcorrectie

nr	risico-item	type tunnelboormachine					
		1	2	3	4	5	6
61	falen door rolling						
62	falen door pitching						
63	falen door yawing						

Van de drie rotaties treedt "rolling"(rotatie om de x-as) het meest op. De asymmetrische vorm van de tunnelboormachines voor DOT-tunnels maakt het noodzakelijk om stuurcorrecties uit te voeren. Deze correcties zijn nodig om het ontwerp-alignement zo goed mogelijk te volgen en de maatvoering van de tunnel te halen. Het feit dat twee machines zijn geïntegreerd tot één maakt het corrigeren van de boorricting moeilijker in vergelijking met de conventionele TBM's. De versprongen stand van de graafwielen bij een MF-TBM is er de oorzaak van dat sneller stuurcorrecties nodig zijn dan bij een DOT-TBM door het optredende draaimoment.

10 KEUZE DOT-TUNNELBOORMACHINE

Nu de risico's van de verschillende typen tunnelboormachines in kaart zijn gebracht, kan een keuze worden gemaakt voor een tunnelboormachine voor een DOT-tunnel. In feite moet er op een tweetal aspecten een afweging worden gemaakt:

- Type boorfrontondersteuning (slurry – EPB)
- Stand van de graafwielen bij een DOT-TBM (Multi-Face – DOT)

In dit hoofdstuk zal de afweging worden aangeven voor deze twee aspecten.

10.1 Afweging boorfront ondersteuning

De keuze tussen een EPB-schild of een slurry-schild dient met name gemaakt te worden op basis van de te verwachten geologische omstandigheden en voor een deel op basis van milieukundige aspecten. Hierbij dient te worden opgemerkt dat een duidelijke scheidslijn voor de inzetbaarheid van een type schild niet meer is aan te geven. Er zijn vele voor- en nadelen voor beide systemen en men dient op basis van evaluaties aan te geven welke aspecten doorslaggevend zijn voor een project. Bij de afweging dienen de volgende aspecten te worden meegenomen:

Vakbekwaamheid

De machine wordt, wat voor type ook wordt gebruikt, bedient door mensen. Vakkundigheid en zorgvuldigheid van het bedienend personeel dient te allen tijde in ruime mate aanwezig te zijn.

Slijtage

Een EPB-schild heeft in een zandige omgeving meer last van slijtage dan een slurry-schild. De snijtanden zullen, afhankelijk van de lengte van het boortrace, waarschijnlijk vaker moeten worden vervangen dan bij een slurry-schild. Bij een slurry-schild zal het vervangen van de snijtanden minder problemen met zich meebrengen dan bij een EPB-schild, waar om het front onder luchtdruk te kunnen zetten, als extra handeling, het aanbrengen van een filterkoek nodig is. Deze filterkoek is bij een slurry-schild reeds aanwezig. Om dezelfde reden is het verwijderen van een obstakel bij een EPB-schild wat gecompliceerder.

Krachtenbalans

Bij een EPB-schild is het draaimoment van het graafwiel groter zijn dan bij een slurry-schild. De grondbrij heeft een veel hogere viscositeit in vergelijking met een vloeistof. Het toepassen van de juiste additieven zal wel leiden tot een aanzienlijke verlaging van dit draaimoment. De vijzelkrachten voor het afzetten van het schild op de lining zijn bij een EPB groter dan bij een slurry-schild, waardoor er een verhoogde kans op schadegevallen is. Wandsmering (bijvoorbeeld met bentoniet) en het toepassen van een oversnijder kunnen zowel bij een slurry- als een EPB-schild ervoor zorgen dat de afzetkrachten binnen de perken blijven.

Grondafvoer

De verschillen tussen een slurry-schild en een EPB-schild ten aanzien van de logistieke processen liggen met name op het vlak van afvoer van grond. Bij een slurry-schild gebeurt dit per definitie per pijpleiding. Bij een EPB-schild bestaat de mogelijkheid dit per pijpleiding te doen met pompen, per transportband of karretjes.

Hergebruik van grond

Bij een EPB is de vrijkomende grond, afhankelijk van de gestelde eisen, bijna direct bruikbaar. Er dienen maatregelen te worden genomen om ervoor te zorgen dat het toegevoegde schuim kan vervluchtigen. Bij een slurry-schild is een scheidingsinstallatie nodig om de grond te kunnen scheiden van de boorspoeling. De vrijkomende grond kan afhankelijk van de mate van het scheidingsproces voor bepaalde doeleinden worden hergebruikt. De boorspoeling dient regelmatig te worden verversd om een goede werking te kunnen garanderen. Bij de scheiding komt een afgewerkte boorspoeling vrij, waarvoor moeilijk een toepassingsmogelijkheid voorhanden is. Dit materiaal dient te worden gestort in een slibdepot of op een stortplaats. Om het op een stortplaats te mogen storten dient het te worden ontwaterd, wat een duur en intensief proces is.

Afweging

De keuze voor het type boorfrontondersteuning vindt op dezelfde wijze plaats als bij conventionele tunnelboormachines en wel op de bovenstaande punten. Op basis hiervan kan *geen* algemene voorkeur worden uitgesproken voor een bepaalde type tunnelboormachine. De keuze tussen een EPB-schild of een slurry-schild dient met name gemaakt te worden op basis van de te verwachten geologische omstandigheden en voor een deel op basis van milieukundige aspecten. Er zijn vele voor- en nadelen voor beide systemen. De machine wordt, wat voor type ook wordt gebruikt, bediend door mensen. Vakkundigheid en zorgvuldigheid van het bedienend personeel dient te allen tijde in ruime mate aanwezig te zijn.

10.2 Afweging stand graafwielen

Het tweede aspect in de afweging is de stand van de graafwielen. In het afwegingsmodel zijn een aantal risico-items genoemd welke een rol spelen bij de keus voor de stand van de graafwielen. Wanneer de graafwielen in één vlak staan (DOT-schild), bestaat de kans dat de graafwielen elkaar raken. Toch is dit risico klein omdat de besturing van beide graafwielen aan elkaar is gekoppeld. Wanneer de spaken elkaar dreigen te raken, wordt het boorproces automatisch stopgezet. Bij een MF-schild staan de graafwielen niet in één vlak en ontstaat op het achterste graafwiel een ongelijke drukopbouw, wat niet bevorderlijk is voor de boorfrontstabiliteit. Dit risico wordt onderkend door de aanwezigheid van een face-collapse detector op de MF-machine. Naast de boorfrontstabiliteit zijn stuurcorrecties bij een MF-schild sneller nodig dan bij een DOT-schild door de aanwezigheid van een draaimoment. Dit is een extra moeilijkheidsgraad voor de beheersing van het boorproces.

Afweging

Ondanks de mogelijkheid dat de graafwielen bij een DOT-TBM elkaar zouden kunnen raken is deze kans erg klein door een ingebouwd controlesysteem. De drukopbouw en de daar aangekoppelde beheersing van het boorproces kunnen tot grotere risico's leiden indien de graafwielen versprongen staan ten opzichte van elkaar. Voor de afweging van de stand van de graafwielen bestaat de voorkeur voor de graafwielen in één vlak zoals bij een DOT-schild gebruikelijk is, maar de versprongen stand van de graafwielen is niet onmogelijk.

10.3 Conclusie

Nu een voorkeur bestaat voor het in één vlak houden van twee open spaakwielen, lijkt op basis van de huidige ervaring dit gekoppeld te worden aan een EPB-schild. In theorie is het echter heel goed mogelijk dit te realiseren met een slurry-schild indien de Duitse ontwikkelingen voor een DOT-tunnel zouden worden doorgezet.

11 Haalbaarheid DOT-tunnels

Om de haalbaarheid van een DOT-tunnel te onderzoeken onder de Nederlandse omstandigheden is een analyse gemaakt van het boor- en bouwproces. Aangezien de DOT-tunnel zijn afkomst ontleend van de cirkelvormige tunnels is aangegeven in hoeverre er een analogie kan worden getrokken tussen beide tunnelvormen en boormethodes, maar vooral waar niet.

Voor het goed in beeld brengen van de haalbaarheid van de DOT-tunnel moet een onderverdeling worden gemaakt in de beheersing van het boor- en bouw proces en de constructie zelf.

11.1 Beheersing proces

Algemeen

- Door de niet-cirkelvormige vorm van de DOT-tunnel en de samensmelting van twee tunnelboormachines in één wordt het gehele boor- en bouwproces een stuk complexer en daarmee risicovoller.

Machineaanpassingen

- De machine heeft een aantal aanpassingen ondergaan als gevolg van het boor- en bouwproces van DOT-tunnels, waaronder in een aantal aanpassingen van de machine, zoals speciale erectoren, het segment expansion device, het segment holding device, de rolling control jacks (DOT-schild), een beveiliging voor het elkaar raken van de graafwielen (DOT-schild) en de face-collapse detector (MF-schild).
- Het bouwen van een DOT-tunnel is complexer dan een cirkelvormige tunnel door de verschillende typen segmenten. Dit blijkt eens te meer uit de technologie die is ontwikkeld (speciale erectoren, segment expansion device, segment holding device) om beschadiging van de segmenten bij inbouwen zoveel mogelijk te voorkomen.

Boorfrontstabiliteit

- Voor het bepalen van de minimaal benodigde en maximaal toelaatbare steundrukken moet een onderscheid worden gemaakt in het type boorfrontondersteuning. Dit wordt veroorzaakt doordat het basisprincipe van steunen voor een EPB-schild anders is dan voor een slurry-schild: Bij een slurry-schild wordt namelijk op druk gestuurd, terwijl bij een EPB-schild op volume-balans wordt gestuurd.
- Slurry-schild – Bij het bepalen van de minimaal benodigde steundruk is duidelijk te zien dat de breedte een geringe invloed heeft – ongeveer 10% – op de grootte van de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt. Al wordt deze invloed kleiner bij een toenemende breedte. Wanneer in zandige gronden wordt geboord met een cohesie van nul kan zelfs worden vastgesteld dat bij een 'oneindige' sleuf de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt niet meer verandert.

- EPB-schild – De steundruk van het boorfront is, net als bij slurry-schilden, gedefinieerd door een bezwijkmechanisme door middel van afschuiving en kan worden gezien als een “gecontroleerde instorting”. In theorie zou het boorfront pas bezwijken wanneer de gronddrukcoëfficiënt de actieve waarde K_a bereikt. In de praktijk blijkt dat de neutrale gronddrukcoëfficiënt wordt aangehouden. Een bovengrens is voor EPB-schilden niet echt te stellen. De theoretische bovengrenswaarde zal niet worden gehaald aangezien de krachten voor het leveren van het benodigde draaimoment onnodig worden opgevoerd en de grond omhoog kan drukken wanneer de gronddrukcoëfficiënt groter is dan één. Indien voor de waarde van de gronddrukcoëfficiënt één wordt aangehouden geldt dezelfde filosofie als bij slurry-schilden oftewel een verticale evenwichtssituatie. De ideale situatie treedt op wanneer de verplaatsing gelijk is aan nul oftewel bij de neutrale gronddrukcoëfficiënt.
- Voor de maximaal toelaatbare steundruk geldt dat deze wordt bepaald aan de hand van een verticale evenwichtssituatie, waarop de breedte van de tunnel geen invloed heeft. Derhalve is de maximale toelaatbare steundruk gelijk voor tunnelboormachines van DOT-tunnels en cirkelvormige boortunnels. Toch zijn er meerdere mechanismen die de bovengrens bepalen van de steundruk, te weten: piping en fracturing – Op deze mechanismen dient ook te worden getoetst.
- Bij de MF-methode kan zich nog een extra boorfrontstabiliteitsprobleem voordoen door de versprongen stand van de graafwielen. De aanwezigheid van de face-collapse detector kan een verklaring zijn voor dit probleem. Nader onderzoek op dit punt is daarom gewenst.

Voortgangssnelheid

- In theorie zou het mogelijk moeten zijn om voor een DOT dezelfde voortgangssnelheid te halen als bij een cirkelvormig schild. In de praktijk ligt de voortgangssnelheid lager omdat er een afhankelijkheid is tussen de twee erectoren tijdens het inbouwen van de ring en het inbouwen complexer is door de verschillende typen segmenten.

Vullen staartspleet

- Door de niet-ronde vorm van de DOT-tunnel is het geheel rondom opvullen van de staartspleet een complexer proces en daarmee risicovoller. Te meer omdat bij een cirkelvormige tunnel al weinig inzicht bestaat over het proces van het vullen van de staartspleet.

Waterdichting

- De waterafdichting is in principe hetzelfde als bij de conventionele tunnelboormachines. Bij het ontwerp van de tunnelboormachine moet goed worden gelet op de detaillering van de waterafdichting bij de sluitsegmenten.

Logistiek

- In het geval van de boortunnel “Groene Hart” is de DOT-tunnel gunstiger doordat voor het transport geen rekening hoeft te worden gehouden met de bouw van dwarsverbindingen, wat op zichzelf al een uiterst risicovolle operatie is.

Beheersen ongewenste stuurcorrecties

- Het beheersen van het roteren van het schild om de x-as (rolling) verdient extra aandacht aangezien de niet-ronde vorm van de tunnel het niet toelaat dat de tunnel teveel roteert omdat anders het Profiel van Vrije Ruimte in het geding komt
- Pitching en yawing treden nauwelijks op en zijn goed in de hand te houden.

11.2 Constructie

Ontbreken dwarsverbindingen

- Het grootste voordeel van de DOT-tunnel is gelegen in het feit dat de uiterst risicovolle dwarsverbindingen overbodig zijn geworden.

Diepteligging

- De DOT-tunnel moet iets dieper liggen dan een cirkelvormige tunnel aangezien het opdrijfmechanisme voor een DOT-tunnel sneller maatgevend is.

Vervormingen

- De maximale zetting bij een DOT-tunnel is groter dan twee buizen met eenzelfde diameter op een afstand van een diameter uit elkaar. Echter de breedte van de zettingstrog bij een DOT-tunnel is minder dan bij twee buizen met eenzelfde diameter. Dit kan van groot belang zijn wanneer in een stedelijke omgeving geboord moet worden.

Maatvoering

- De niet-ronde en compactere vorm van de DOT-tunnel hebben tot gevolg dat de maatvoering van de tunnel goeden zal moeten worden gevolgd omdat anders het Profiel van Vrije Ruimte (PVR) niet wordt gehaald.

Krachtswerking

- De krachtswerking in en op de lining van de DOT-tunnel is complex en wordt door tal van factoren beïnvloed die niet of nauwelijks van invloed zijn op de cirkelvormige tunnel, zoals complexe krachtswerking in de K-segmenten, scheefstand van de kolommen en asymmetrische belastinggevallen in de gebruiksfase.

Overall kan worden geconcludeerd dat een DOT-tunnel haalbaar is onder Nederlandse omstandigheden.

11.3 Aanbevelingen

Naar aanleiding van dit onderzoek verdient het de aanbeveling om de volgende aspecten nader te onderzoeken:

- Het toetsen van de berekeningen voor de steundruk van niet-cirkelvormige tunnels aan de hand van fysisch onderzoek door middel van of geocentrifuge-proeven of aan de hand van praktijkvoorbeelden;
- De grondvervormingen bij een DOT-tunnel door bijvoorbeeld een modellering in Plaxis;
- De krachtswerking in en op de lining van een DOT-tunnel.

DOT-tunnel onder het Groene Hart

Deel II: Haalbaarheid van een

DOT-tunnel voor de HSL-Zuid

Datum	3 november 1998
Ons kenmerk	MVE/R/985611/3.10.10
Bestand	EINDRAPPORT DEEL II-A.DOC
Opsteller	M.F.H. Veenma
Status	definitief
Fase	eindrapport
Gecontroleerd	-
Goedgekeurd	-
Geautoriseerd	-

Voorwoord

Na zes jaar studie aan de Faculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft heeft u het resultaat in handen van één van mijn laatste activiteiten als student. Deze rapportage vormt het eindverslag van mijn afstudeeronderzoek dat mede mogelijk is gemaakt door DHV Milieu en Infrastructuur. Namens DHV Milieu en Infrastructuur heb ik stage gelopen bij de Projectorganisatie Hogesnelheidslijn-Zuid, projectbureau Boortunnel in Utrecht.

In de Projectorganisatie Hogesnelheidslijn-Zuid wordt op dit moment hard gewerkt aan het ontwerp van de infrastructuur voor de HSL-Zuid, die 2005 gereed zal moeten zijn. In de Projectorganisatie Hogesnelheidslijn-Zuid werken NS Railinfrabeheer, Holland Railconsult en DHV Milieu en Infrastructuur samen onder verantwoordelijkheid van de Ministeries van Verkeer en Waterstaat en VROM.

De rapportage van het afstudeeronderzoek bestaat uit drie deelrapporten die min of meer onafhankelijk van elkaar kunnen worden gelezen. Het eerste deelrapport vormt het hoofdrapport waarin een analyse is gemaakt van het boor- en bouwproces van een DOT-tunnel. Het tweede deelrapport is toegespitst op de boortunnel onder het Groene Hart en bevat de specifieke uitwerking van een haalbaarheidstudie van de DOT-tunnel in vergelijking met het referentieontwerp. Het derde deelrapport bevat de gedetailleerde afleiding van de verschillende modelleringen en risico-analyses, die zijn gebruikt in het eerste deelrapport. In dit laatste deelrapport kunt u ook de overige achtergrond informatie vinden.

Ik wil van deze gelegenheid gebruik maken om een aantal personen te bedanken voor de begeleiding, het meedenken en de ondersteuning. Als eerste mijn afstudeercommissie met prof.drs.ir. J.K. Vrijling, prof.ir. E. Horvat, ir. H.K.T. Kuijper, ir. H. Burger en ir. M.P. Oude Essink. Speciaal Hans en Michel die als dagelijkse begeleiders de tijd namen voor een kritische blik en korte discussies. Verder alle collega's van het "boortunnel-team" voor de serieuze en minder serieuze momenten gedurende de afgelopen maanden. Tot slot wil ik vrienden en familie bedanken voor hun directe maar ook zeker indirecte ondersteuning.

Ik hoop dat u na het lezen van deze rapportage meer inzicht heeft gekregen in de Double-O-Tube tunnel; kortweg DOT-tunnel genaamd.

Mark Veenma
Utrecht, 3 november 1998

Samenvatting

Dit deelrapport vormt samen met de overige twee deelrapporten de rapportage van het afstudeeronderzoek naar de haalbaarheid van een Double-O-Tube tunnel. Dit tweede deelrapport is toegespitst op de haalbaarheidsstudie van een DOT-tunnel voor de HSL-Zuid boortunnel onder het Groene Hart. Het afstudeeronderzoek heeft als titel "DOT-tunnel onder Het Groene Hart – haalbaarheidsstudie van een Double-O-Tube tunnel onder Nederlandse omstandigheden" en heeft, namens DHV Milieu en Infrastructuur, plaatsgevonden bij de Projectorganisatie HSL-Zuid, projectbureau boortunnel. Het afstudeeronderzoek is uitgevoerd in opdracht van de Faculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft en is begeleid door een afstudeercommissie. De afstudeercommissie bestaat uit prof.dr.s.ir. J.K. Vrijling (vakgroep waterbouwkunde, Civiele Techniek), prof.ir. E. Horvat (sectie Ondergronds Bouwen, Civiele Techniek), ir. H.K.T. Kuijper (vakgroep waterbouwkunde, Civiele Techniek), ir. H. Burger (DHV Milieu en Infrastructuur) en ir. M.P. Oude Essink (Bouwdienst Rijkswaterstaat).

Het doel van dit afstudeeronderzoek is het onderzoeken van de haalbaarheid van een DOT-tunnel onder Nederlandse omstandigheden en specifiek voor de HSL-Zuid boortunnel onder Het Groene Hart. In deelrapport I is een analyse gemaakt van het boor- en bouwproces van een DOT-tunnel. Het tweede deelrapport is toegespitst op de boortunnel onder het Groene Hart en bevat de specifieke uitwerking van een haalbaarheidstudie van de DOT-tunnel in vergelijking met het Referentie Ontwerp. Het derde deelrapport bevat de gedetailleerde afleiding van de verschillende modelleringen en risico-analyses, die zijn gebruikt in het eerste deelrapport. In dit laatste deelrapport is ook de overige achtergrond informatie te vinden.

Voor het bepalen van de diepteligging van de DOT-tunnel is als uitgangspunt de diepteligging van het Referentie Ontwerp aangehouden. Hierbij is gecontroleerd in hoeverre het Referentie Ontwerp kan worden gevolgd wanneer wordt getoetst op de toe te passen steundrukken, werken onder verhoogde luchtdruk en opdrijven. Uit de berekeningen kan worden geconcludeerd dat de minimaal benodigde steundruk voor een DOT-tunnel iets hoger is dan de steundruk voor het Referentie Ontwerp - orde grootte 5%. Ondanks deze kleine steundrukverhoging is de marge tussen de minimaal benodigde en maximaal toelaatbare steundruk nog steeds ruim voldoende. Zodoende kan de DOT-tunnel het alignement van het Referentie Ontwerp volgen.

Het bepalen van de DOT-diameter is niet alleen afhankelijk van de inrichting van de tunnel, maar ook van de gekozen veiligheidsfilosofie en het benodigd vrij oppervlak voor de luchtdrukproblematiek. In de gebruiksfase is voor de veiligheid in de tunnel "het tot stilstand komen van een brandende trein in de tunnel" het maatgevende scenario. Hiervoor moeten voorzieningen in de tunnel worden aangebracht welke de veiligheid van de gebruikers garanderen. Uitgangspunt is dat de gebruikers zo snel mogelijk in veiligheid worden gebracht in de andere, veilige, tunnelbuis en vervolgens via vluchtschachten de tunnel verlaten. In het Referentie Ontwerp is dit gerealiseerd door dwarsverbindingen op een regelmatige afstand van 300 meter en vluchtschachten op een afstand van maximaal 2 km van elkaar. Bij de DOT-tunnel ontbreken de dwarsverbindingen en kan de veilige buis betrekkelijk eenvoudig worden bereikt via een deur - h.o.h. 150 meter - in de tussenwand.

Bij het rijden met treinen door een tunnel ontstaan in de tunnel drukveranderingen op en in de trein, die door de reizigers als oncomfortabel kunnen worden aangemerkt. Om het comfort van de reizigers te verhogen, is het meest voor de handliggende een grotere tunneldoorsnede. Naast deze methode kunnen ook bijzondere maatregelen in het tunnelontwerp, zoals toepassing van luchtschachten, trechtervormige of geperforeerde tunnelmonden en dwarsverbindingen tussen twee enkelsporige tunnelkokers een gunstige invloed hebben op het reizigerscomfort. Uit studies naar deze problematiek blijkt dat wanneer er geen bijzondere maatregelen worden genomen een vrije tunneldoorsnede van 80 m² vereist is. Deze kan bij een DOT-tunnel worden gereduceerd tot 50 m² wanneer in de toeritten en de drie vluchtschachten een luchtschacht wordt toegepast met een effectief oppervlak van 12 m² en een perforatiegraad van 1% in de tussenwand.

Om een goede afweging te kunnen maken, is uitgegaan van de twee vluchtconcepten: vluchten via een trap tussen de twee sporen of vluchten via een trap welke bereikt kan worden door het spoor over te steken. Gekozen is voor één grote vluchtschacht, waarbij de vluchtmogelijkheden bereikt worden door het spoor over te steken. Door de keuze van de vluchtschacht variant kan nu de dwarsdoorsnede worden bepaald van de DOT-tunnel. Om te voldoen aan alle eisen en ontwerppuntgangspunten die worden gesteld aan de inrichting van de tunnel is een inwendige diameter van de DOT vereist van 9,4 meter. De middelpunten van beide buizen bevinden zich op een h.o.h.-afstand van 7,5 meter. De maatgevende dwangpunten van de bovenleiding en de waterafvoer zorgen ervoor dat beide sporen een excentriciteit krijgen van 0,2 meter. Als dikte van de lining en van de tussenwand wordt 0,5 meter aangehouden. Dit is 0,05 meter meer dan de lining-dikte van het Referentie Ontwerp vanwege de onbekendheid van de krachtswerking. Hierbij moet nog aandacht worden besteed aan punten op het gebied van de geometrie, veiligheid en de lining.

De uitvoeringsplanning van het Referentie Ontwerp is bepaald door te kijken welke voortgangssnelheid minimaal moet worden gehaald om het project binnen de gestelde tijd af te ronden. Met behulp van een planningsprogramma is voor een vijfdaagse werkweek een minimaal benodigde voortgangssnelheid van zo'n 11 meter per dag berekend. Gezien de ervaringen met DOT-tunnels is het realistisch een gemiddelde voortgangssnelheid van 8 meter per dag te veronderstellen. Wanneer wordt uitgegaan van een vijfdaagse werkweek dan wordt de opleverdatum ruim overschreden. Om de datum van 17 mei 2004 wel te halen moet een minimale voortgangssnelheid worden gehaald van gemiddeld 10 meter per dag en een zesdaagse werkweek. Met de huidige kennis en ervaring is het zeer de vraag of deze uitvoeringsplanning kan worden gehaald. Geconcludeerd kan worden dat de bouwtijd voor de DOT-tunnel een zeer groot risico is.

Bij het maken van de kostenraming voor de DOT-tunnel zijn de uitgangspunten voor het Ontwerp Tracé Besluit (OTB) aangehouden aangezien er nog geen aangepaste kostenraming voor het Referentie Ontwerp is gemaakt.

Aan de hand van de kostenraming van het OTB zijn een aantal uitgangspunten opgesteld waar de kostenraming van de DOT-tunnel afwijkt van het OTB, te weten: de benodigde hoeveelheden ontgraven grond, beton, grout en bentoniet; de aanschafwaarde van de tunnelboormachine; onderhoud aan de tunnelboormachine; smallere start- en ontvangtschacht en smallere toeritten. Uit de kostenvergelijking blijkt dat de DOT-tunnel zo'n 14% goedkoper is dan de cirkelvormige tunnel ten tijde van het Ontwerp Tracé Besluit.

Voor het goed in beeld brengen van de risico's van de DOT-tunnel moet een onderverdeling worden gemaakt in de beheersing van het boor- en bouwproces, de constructie en veiligheid. Voor de beheersing van het boor- en bouwproces kan algemeen worden gesteld dat door de niet-cirkelvormige vorm van de DOT-tunnel en de samensmelting van twee tunnelboormachines in één het geheel een stuk complexer en risicovoller wordt. Dit geldt zeker voor de stabiliteit van het boorfront, het vullen van de staartspleet en het beheersen van ongewenste rotaties. Echter de logistiek is gedurende het proces eenvoudiger te realiseren bij een DOT-tunnel.

Het grootste voordeel van de DOT-tunnel constructie is het ontbreken van de dwarsverbindingen. Door de reductie in het eigen gewicht van de constructie wordt het opdrijfmechanisme sneller maatgevend. De krachtswerking in en op de lining van de DOT-tunnel is complex en wordt door tal van factoren beïnvloed die niet of nauwelijks van invloed zijn op de cirkelvormige tunnel zoals een complexere krachtswerking in de K-segmenten, scheefstand van de kolommen en asymmetrische belastingsgevallen. Vanuit het aspect veiligheid van de DOT-tunnel is er sprake van een verhoogd risico door de vluchtroute over het spoor, de aanwezigheid van een hoogteverschil tussen de twee sporen en het afsluiten van de perforaties ten tijde van een calamiteit.

Geconcludeerd kan worden dat door de complexiteit van het boor- en bouwproces de DOT-tunnel op een aantal punten meer en grotere risico's heeft. Hierbij moet worden opgemerkt dat de risico's voor een deel worden veroorzaakt door onvoldoende kennis en ervaring van bepaalde aspecten, waardoor mogelijk een verkeerd beeld zou kunnen ontstaan. Ondanks de risico's is een DOT-tunnel wel degelijk technisch haalbaar onder de Nederlandse omstandigheden.

Hierbij verdient het de aanbeveling om de volgende aspecten nader te onderzoeken:

- Het toetsen van de berekeningen voor de steundruk van niet-cirkelvormige tunnels aan de hand van fysisch onderzoek door middel van of geocentrifuge-proeven of aan de hand van praktijkvoorbeelden;
- De grondvervormingen bij een DOT-tunnel door bijvoorbeeld een modellering in Plaxis;
- De krachtswerking in en op de lining van een DOT-tunnel.

Inhoud

VOORWOORD	i
SAMENVATTING	ii
1 INLEIDING	1
1.1 Haalbaarheidsstudie DOT-tunnel	1
1.2 Leeswijzer deelrapport II	1
2 HSL-Zuid	2
2.1 De PKB en het Tracé Besluit	2
2.2 Boortunnel onder 't Groene Hart	2
3 Diepteligging DOT-tunnel	4
3.1 Algemeen	4
3.2 Gebruikte rekenmodellen	4
3.2.1 Minimale steundruk	4
3.2.2 Maximale steundruk	5
3.2.3 Opdrijven	6
3.3 Diepteligging DOT-tunnel	6
4 Globaal ontwerp DOT-tunnel	10
4.1 Inrichting van de tunnel	10
4.1.1 Eisen	10
4.1.2 Ontwerp-uitgangspunten	11
4.2 Veiligheidsfilosofie	11
4.3 Luchtdrukproblematiek	13
4.4 Bepaling DOT-tunneldiameter en vluchtschachten	13
4.5 Dwarsdoorsnede DOT-tunnel	14
5 Uitvoeringsplanning	16
5.1 Uitvoeringsplanning Referentie Ontwerp	16
5.2 Uitvoeringsplanning DOT	17
5.2.1 Uitgangspunten	17
5.2.2 Planning I: variabele voortgangssnelheid	17
5.2.3 Planning II: vereiste voortgangssnelheid	18
5.2.4 Conclusie uitvoeringsplanning DOT-tunnel	18
6 Kostenraming	19
6.1 Kostenraming Ontwerp Tracé Besluit	19
6.2 Kostenraming DOT-tunnel	20
6.3 Vergelijking kostenramingen OTB en DOT	21

7	Risico's	22
7.1	Beheersing proces	22
7.2	Constructie	23
7.3	Veiligheid	23
7.4	Vergelijking	24
8	Conclusie	25

1 INLEIDING

1.1 Haalbaarheidsstudie DOT-tunnel

In het Referentie Ontwerp wordt uitgegaan van twee afzonderlijke boortunnels welke onderling verbonden zijn door dwarsverbindingen. Aangezien er meerdere configuraties mogelijk zijn om een tunnel vorm te geven is een andere tunnelconcept verder onderzocht, te weten een Double-O-Tube (DOT) tunnel. Doel van dit onderzoek is om na te gaan welke vrijheden nog aan de aannemers gegeven kunnen worden en welke eisen hieraan dan eventueel gesteld dienen te worden. Tevens wordt nagegaan wat de effecten zijn op de omgeving.

Om de haalbaarheid van een DOT-tunnel voor de HSL-Zuid boortunnel zo helder mogelijk te krijgen, wordt als uitgangspunt steeds het Referentie Ontwerp gebruikt. Dit houdt in dat bijvoorbeeld onderzocht dient te worden of een DOT-tunnel dezelfde diepteligging kan aanhouden en of dezelfde diameter als bij het referentieontwerp kan worden aangehouden. Aangezien bij de berekening van de diepteligging er vanuit is gegaan dat geboord zou worden met een slurry-schild is dit ontwerputgangspunt overgenomen. Het verdient vooraf al de aanbeveling om een goede afweging te maken voor welke type boorfrontondersteuning wordt gekozen.

De DOT-tunnel heeft niet alleen invloed op het boorproces, maar ook op het ontwerp van de vluchtschachten en de toeritten. Het veranderde ontwerp heeft ook consequenties voor de bouwtijd en de kosten. Een vergelijking tussen het referentieontwerp en de DOT-tunnel op basis van bouwtijd, kosten en risico's moet uitwijzen of de DOT-tunnel concurrerend is of niet?

1.2 Leeswijzer deelrapport II

Dit deelrapport is als volgt ingedeeld: in hoofdstuk 2 wordt allereerst een beschrijving gegeven van het project Hogesnelheidslijn Zuid en specifiek de boortunnel onder het Groene Hart. Voor de vergelijking met het Referentie Ontwerp moet allereerst de diepteligging worden bepaald. In hoofdstuk drie wordt aangegeven in hoeverre het alignement van het Referentie Ontwerp kan worden gevolgd. In hoofdstuk 4 wordt aangegeven met welke aspecten rekening moet worden gehouden om te komen tot een globaal ontwerp van de DOT-tunnel. In de hoofdstukken 5 t/m 7 wordt de vergelijking gemaakt tussen het Referentie Ontwerp en de DOT-tunnel op, achtereenvolgens, bouwtijd, kosten en risico's. Hoofdstuk 8 geeft een samenvatting van de vergelijking weer.

2 HSL-Zuid

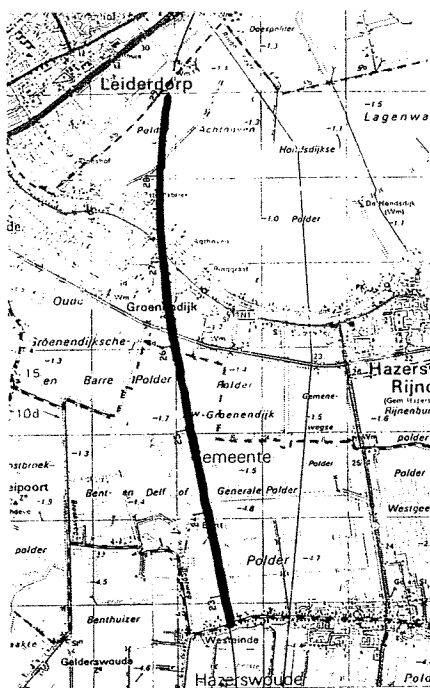
2.1 De PKB en het Tracé Besluit

De Nederlandse regering vindt dat Nederland aangesloten moet worden op het Europese net van hogesnelheidslijnen. In mei 1994 heeft het kabinet gekozen voor een nieuwe lijn tussen Amsterdam en de Belgische grens. De Hogesnelheidslijn-Zuid (HSL-Zuid) is het Nederlandse deel van de nieuwe hogesnelheidsspoorverbinding tussen Amsterdam, Rotterdam, Brussel en Parijs of Londen.

Om dat voor elkaar te krijgen is, onder verantwoordelijkheid van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, de projectorganisatie HSL-Zuid opgericht. De projectorganisatie HSL-Zuid Infrastructuur (PHZI), welke gevestigd is in Utrecht, is de afdeling binnen de organisatie die zich bezighoudt met het Programma van Eisen HSL-Zuid en tegelijkertijd met het maken van het ontwerp.

Met het vaststellen van de PKB op 29 april 1997 is ook het basisontwerp voor de HSL-Zuid afgerond. In het Programma van Eisen HSL-Zuid zijn de belangrijkste keuzen, die tot het huidige ontwerp van de HSL-Zuid hebben geleid, vastgelegd en verantwoord. Het basisontwerp is het uitgangspunt voor de nadere uitwerking van het TracéBesluit en het technisch VoorOntwerp. Het ontwerp voor het TracéBesluit richt zich volledig op de uitwerking van het in de PKB vastgestelde tracé. Daarnaast wordt, als voorbereiding op de uitvoering, de technische uitwerking van het PKB-tracé in het zogenaamde VoorOntwerp gemaakt. Uit het VoorOntwerp zal het "bestek-klaar" ontwerp volgen, welke als uitgangspunt dient bij de aanbesteding voor de aannemers. Het TracéBesluit is 15 april 1998 ondertekend door de verantwoordelijke ministers, waarna gestart kan worden met aanpassen van de diverse bestemmingsplannen. Volgens planning wordt in 1999 gestart met de bouw en in 2005 moet de hogesnelheidslijn zijn aangelegd.

2.2 Boortunnel onder 't Groene Hart



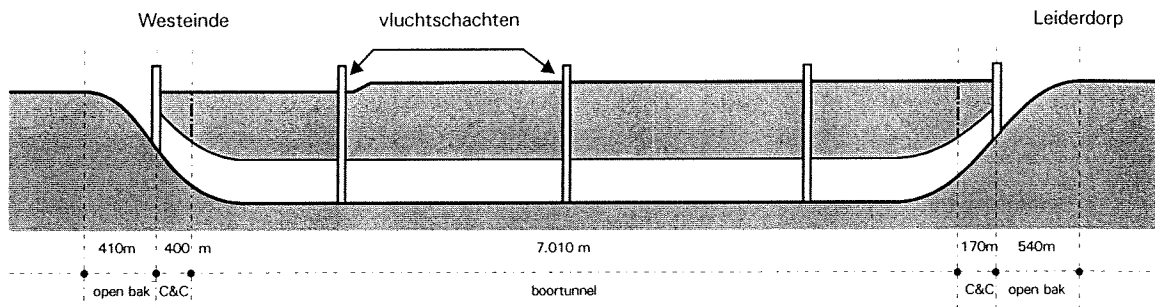
figuur 2.1 - tracé boortunnel HSL-Zuid - Het Groene Hart

Een deel van de HSL-Zuid gaat dwars door het natuurgebied Het Groene Hart. Om dit natuurgebied niet te verstoren, heeft het kabinet gekozen voor de aanleg van een tunnel.

In haalbaarheidsstudies zijn de verschillende methoden voor een tunnel onderzocht. Het kabinet heeft uiteindelijk gekozen voor een boortunnel. In het VoorOntwerp wordt uitgegaan van een boortunnel bestaande uit twee buizen welke, op regelmatige afstand, onderling verbonden worden door dwarsverbindingen.

Het huidige tracé van de boortunnel loopt van Westinde tot Leiderdorp zoals is weergegeven in figuur 2.1 en heeft een lengte van zo'n 7 km. De toeritten worden deels uitgevoerd als open bak en deels als Cut & Cover (C&C). De onderkant van de boortunnel ligt op een diepte van circa NAP -30 m.

In geval van calamiteiten moet de veiligheid van de tunnelgebruikers worden gewaarborgd door de aanwezigheid van dwarsverbindingen op een regelmatige afstand van 300 meter en vluchtschachten op een afstand van maximaal 2 km van elkaar.



figuur 2.2 - lengteprofiel boortunnel HSL-Zuid - Het Groene Hart

De toeritten van het boortunnel worden gebouwd binnen bouwkuipen van dam-/combiwanden, trekpalen en onderwaterbeton. De zuidelijke toerit bij Westeinde heeft een totale lengte van 810 meter en is onderverdeeld in een gesloten deel met een lengte van 190 meter, een deel met een zogenaamd schijndak met een lengte van 210 meter en een open gedeelte met een lengte van 410 meter. Het schijndak zorgt voor een geleidelijke overgang van het vrije doorstroomprofiel van de boortunnel naar de open toerit. Bovendien heeft het dak een stempelfunctie. De breedte van de toerit bedraagt ter plaatse van het diepste gedeelte ruim 30 meter en ter plaatse van het einde van de open toerit circa 13 meter. De noordelijke toerit heeft een totale lengte van 710 meter, waarvan het diepste gedeelte over een lengte van 170 meter gesloten is. Ook bij de noordelijke toerit verloopt de breedte van ruim 30 meter bij het gesloten deel naar circa 13 meter bij het einde van de toerit.

Voor de inwendige diameter van de tunnel van het Referentie Ontwerp geldt een maat van 9,54 meter. Deze diameter wordt bepaald door het benodigde vrije oppervlak van 60 m² ten behoeve van de luchtdrukproblematiek. De dikte van de lining bedraagt 0,45 meter.

In de gebruiksfase is voor de veiligheid in de tunnel "het tot stilstand komen van een brandende trein in de tunnel" het maatgevende scenario. Hiervoor moeten voorzieningen in de tunnel worden aangebracht welke de veiligheid van de gebruikers garanderen. Uitgangspunt is dat de gebruikers zo snel mogelijk in veiligheid worden gebracht in de andere, veilige, tunnelbuis en vervolgens via vluchtschachten de tunnel verlaten. In het Referentie Ontwerp is dit gerealiseerd door dwarsverbindingen op een regelmatige afstand van 300 meter en vluchtschachten op een afstand van maximaal 2 km van elkaar.

Dwarsdoorsneden van de tunnel in het Referentie Ontwerp zijn opgenomen in bijlage C, deelrapport III.

3 Diepteligging DOT-tunnel

In dit hoofdstuk wordt aangegeven of de DOT-tunnel het alignement kan volgen van het Referentie Ontwerp.

3.1 Algemeen

Voor de niet geringe lengte van de boortunnel (zo'n 7 km) spelen een aantal criteria een rol bij de bepaling van de diepteligging.

- De tunnelboormachine is uitgevoerd als slurry-schild.
- Het reguliere boorproces moet kunnen plaatsvinden. Dit houdt in dat er een marge nodig is tussen de minimaal benodigde steundruk en de maximaal toelaatbare steundruk. In de berekeningen wordt een marge van minimaal 20 kPa aangehouden.
- Er moet onderhoud kunnen worden gepleegd aan de tunnelboormachine. Dit is echter alleen mogelijk indien de graafkamer in zijn geheel of gedeeltelijk onder verhoogde luchtdruk kan worden gezet. Zeker gezien de lengte van het boortrace is dit geen overbodige luxe. Uitgangspunt bij de bepaling van de diepteligging is geweest dat de halve graafkamer onder luchtdruk kan worden gezet.
- De tunnel mag in de gebruiksfase niet opdrijven.

3.2 Gebruikte rekenmodellen

Voor het bepalen van de diepteligging is een spreadsheet ontwikkeld, waarbij de volgende rekenmodellen zijn gebruikt voor de bepaling van de boven- en ondergrenzen van de steundrukken en de toetsing van het opdrijfmechanisme.

3.2.1 Minimale steundruk

De analytische berekening voor de minimaal benodigde steundruk is gebaseerd op het aangepaste model Jancsecz. Voor de gedetailleerde afleiding van het model wordt verwezen naar deelrapport I, hoofdstuk drie.

Voor de minimaal aan te houden korrelspanning geldt:

$$\sigma'_{h,min} = K_{A3} \cdot \sigma'_{v,red}(H) \quad (3.1)$$

waarin:

$\sigma'_{h,min}$	minimale horizontale korrelspanning	[kN/m ²]
K_{A3}	driedimensionale gronddrukcoëfficiënt	[-]
$\sigma'_{v,red}$	gereduceerde verticale korrelspanning	[kN/m ²]
H	dekking	[m]

De driedimensionale gronddrukcoëfficiënt wordt als volgt bepaald:

$$K_{A3} = \frac{\cos \beta \cdot \sin \beta - \cos^2 \beta \cdot \tan \phi - \frac{K}{1,5} \cdot \alpha \cdot \frac{D}{B} \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi - \left(\frac{2 \cdot c \cdot \cos \beta}{(1 + 2 \cdot \frac{H}{D}) \cdot \gamma \cdot B} - \left(\frac{2 \cdot c}{(1 + 2 \cdot \frac{H}{D}) \cdot \gamma \cdot D} \right) \right)}{\tan \phi \cdot \sin^2 \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad (3.2)$$

De minimaal benodigde steundruk wordt gevonden door ook de waterspanning en de veiligheidscoëfficiënten mee te nemen:

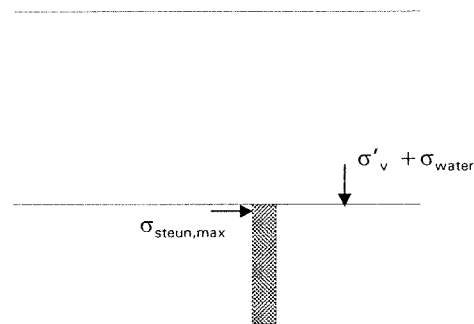
$$\sigma_{\text{steun,min}} = \gamma_{f,\text{korrel}} \cdot \sigma'_{h,\text{min}} + \gamma_{f,\text{water}} \cdot \sigma_{\text{water}} \quad (3.3)$$

waarin:

$\gamma_{f,\text{korrel}}$	veiligheidscoëfficiënt korrelspanning	[-]
$\gamma_{f,\text{water}}$	veiligheidscoëfficiënt waterspanning	[-]
$\sigma_{\text{steun,min}}$	minimale steundruk	[kN/m ²]
$\sigma'_{h,\text{min}}$	minimale horizontale korrelspanning	[kN/m ²]
σ_{water}	waterspanning	[kN/m ²]
$\gamma_{f,\text{korrel}}$	veiligheidscoëfficiënt korrelspanning – 1,5	[-]
$\gamma_{f,\text{water}}$	veiligheidscoëfficiënt waterspanning – 1,05	[-]

3.2.2 Maximale steundruk

De maximale steundruk wordt bepaald door een vergelijking op te stellen voor een verticale evenwichtssituatie waarbij de steundruk aan de bovenkant van het schild niet groter mag zijn dan het gewicht van de grondkolom boven het schild met een bepaalde veiligheidsfactor – figuur 3.1.



figuur 3.1 - maximaal toelaatbare steundruk

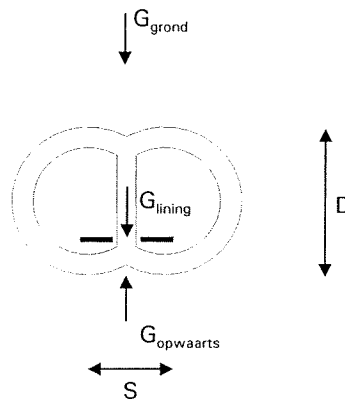
In formulevorm ziet het er zo uit, waarbij de veiligheidscoëfficiënt op 1,1 wordt gesteld:

$$\sigma_{\text{steun,max}} = \frac{\sigma'_v + \sigma_{\text{water}}}{\gamma_f} \quad (3.4)$$

$\sigma_{\text{steun,max}}$	maximale steundruk	[kN/m ²]
σ'_v	verticale korrelspanning	[kN/m ²]
σ_{water}	waterspanning	[kN/m ²]
γ_f	veiligheidscoëfficiënt	[-]

3.2.3 Opdrijven

In de opdrijfberekening wordt gecontroleerd of de boortunnel niet opdrijft ten gevolge van de opwaartse waterkracht. Het verticale evenwicht moet gewaarborgd zijn. De opdrijfberekening moet worden gecontroleerd voor iedere fase van de uitvoering van de boortunnel. In figuur 3.2 zijn de, voor de opdrijfberekening relevante, krachten weergegeven.



figuur 3.2 - opdrijfberekening

De neerwaarts gerichte krachten bestaan uit het grondgewicht recht boven de kruin van de tunnel en het gewicht van de tunnel zelf. De opwaartse kracht wordt bepaald met de wet van Archimedes.

De tunnel drijft niet op indien het volgende geldt:

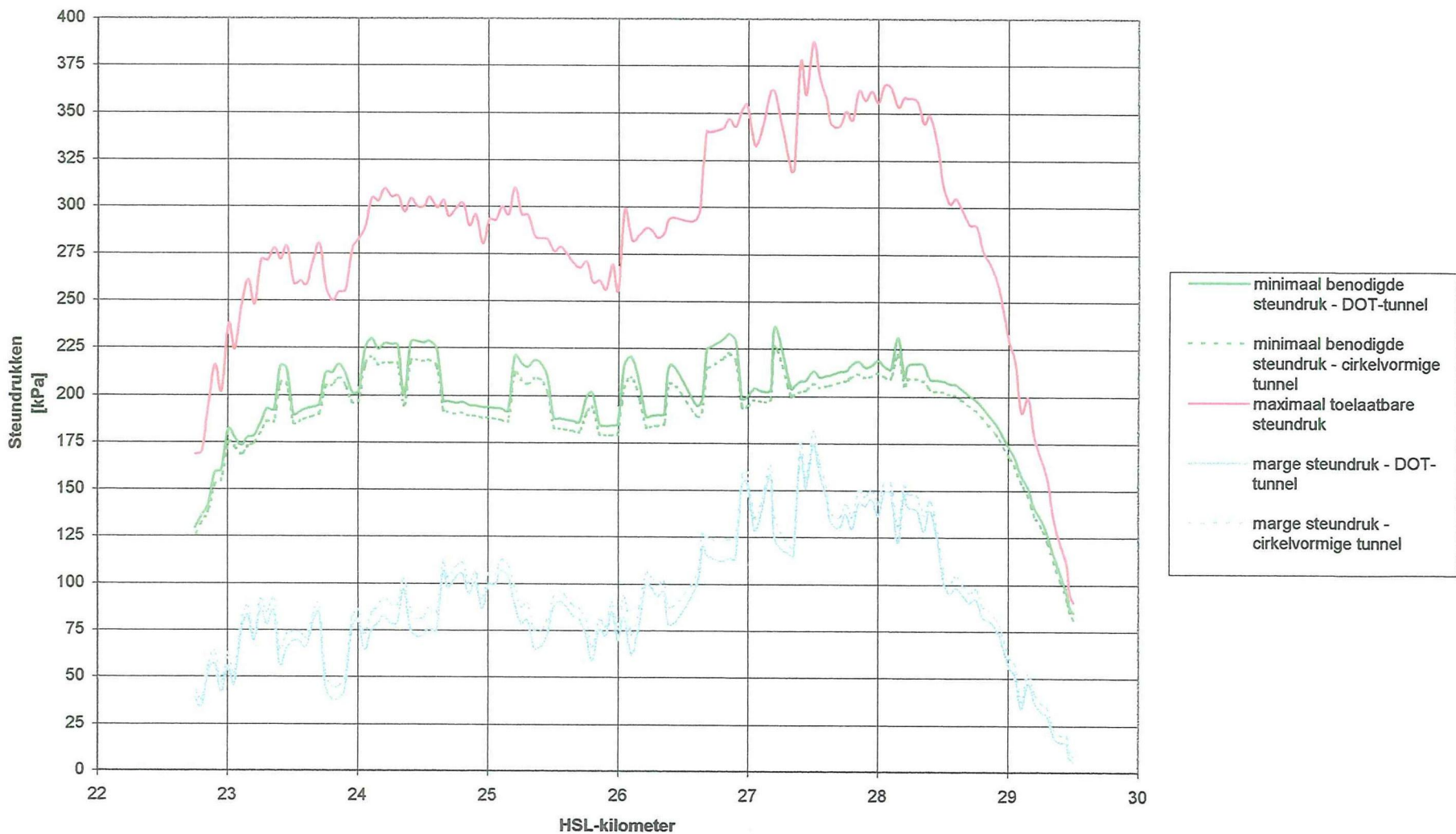
$$\frac{G_{\text{neerwaarts}}}{G_{\text{opwaarts}}} = 1,1 \quad (3.5)$$

3.3 Diepteligging DOT-tunnel

Voor het bepalen van de diepteligging van de DOT-tunnel is als uitgangspunt de diepteligging van het Referentie Ontwerp aangehouden. Hierbij is gecontroleerd in hoeverre het Referentie Ontwerp kan worden gevolgd. In de figuren op de volgende pagina's is dan ook te zien hoe de steundrukken verlopen bij het Referentie Ontwerp en bij de DOT-tunnel.

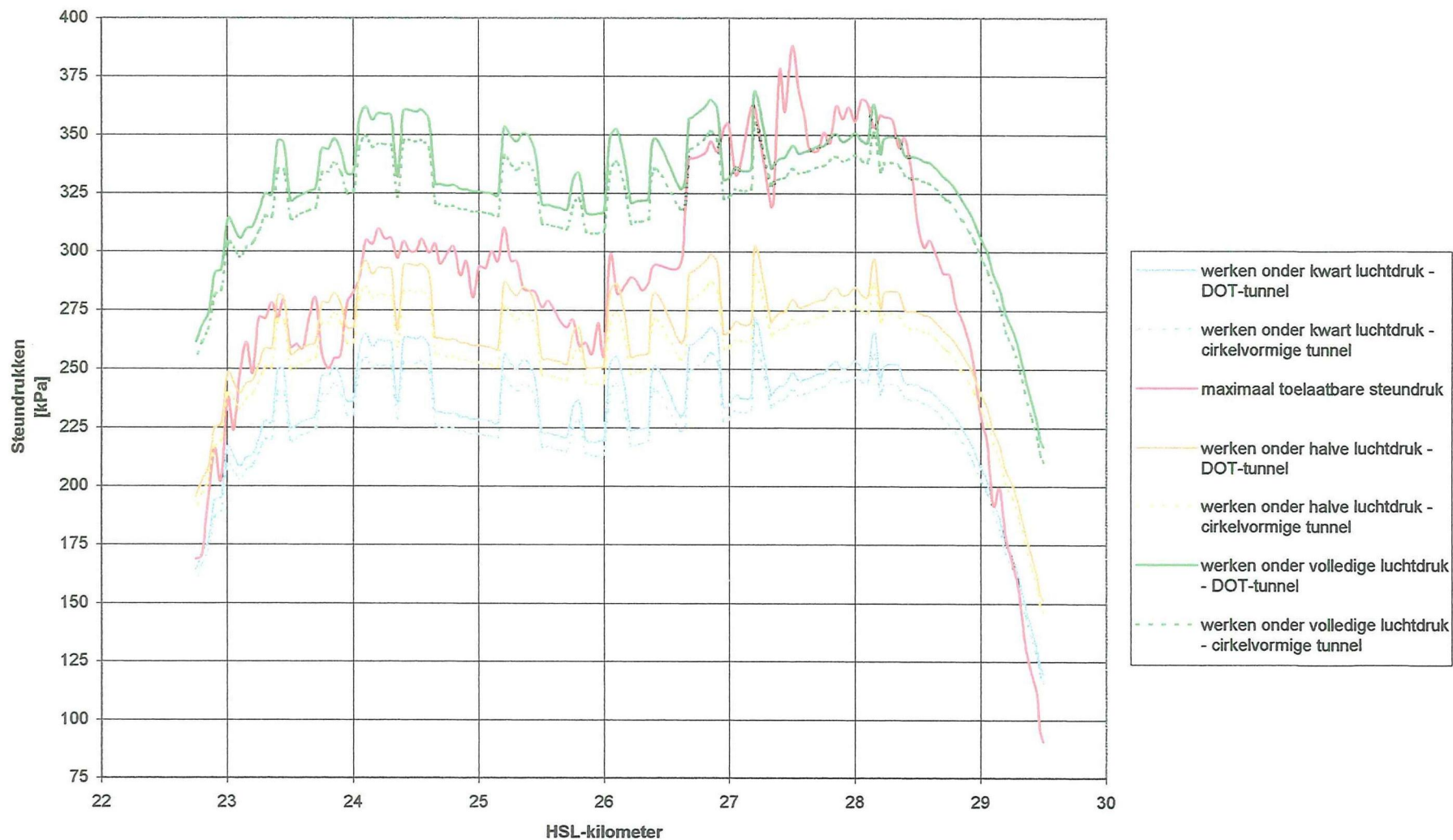
Uit de berekeningen kan worden geconcludeerd dat de minimaal benodigde steundruk voor een DOT-tunnel iets hoger is dan de steundruk voor het Referentie Ontwerp - orde grootte 5%. Ondanks deze kleine steundrukverhoging is de marge tussen de minimaal benodigde en maximaal toelaatbare steundruk nog steeds ruim voldoende. Zodoende kan de DOT-tunnel het alignment van het Referentie Ontwerp volgen. Voor zowel het Referentie Ontwerp als de DOT-tunnel geldt dat aan het einde van de boortunnel, HSL-kilometer 29.4, dat niet meer wordt voldaan aan het opdrijfcriterium en de drukband. Inmiddels is binnen het projectbureau Boortunnel besloten om op dit stuk grondverbetering aan te brengen zodat hier verder kan worden doorgeboord.

HSL-Zuid - Groene Hart boortunnel



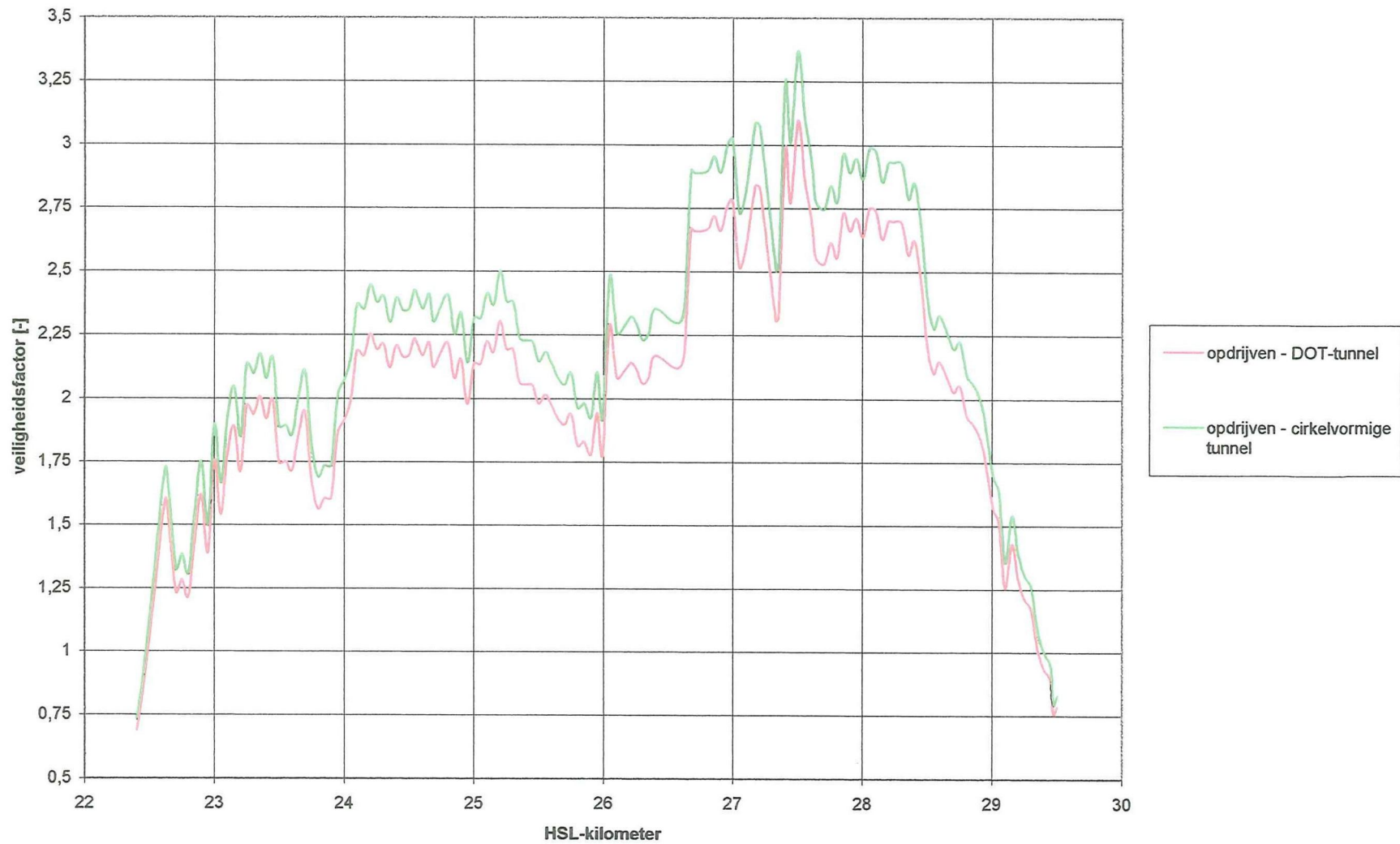
figuur 3.3 – onder- en bovengrenzen steundrukken

HSL-Zuid - Groene Hart boortunnel



figuur 3.4 – steundrukken bij werken onder verhoogde luchtdruk

HSL-Zuid - Groene Hart boortunnel



figuur 3.5 – controleren opdrijven

4 Globaal ontwerp DOT-tunnel

Het dwarsprofiel van de tunnel wordt bepaald door het gebruik van de tunnel. Voor de HSL-Zuid tunnel onder het Groene Hart moeten speciale eisen worden gesteld aan het dwarsprofiel van de tunnel ten aanzien van bijvoorbeeld de luchtdrukproblematiek en veiligheid.

In dit hoofdstuk is de dwarsdoorsnede van de DOT-tunnel bepaald afhankelijk van de eisen die worden gesteld aan:

- de inrichting van de tunnel (bovenbouw, bovenleiding, looppaden, waterafvoer, etc.)
- veiligheid
- comfort (luchtdrukproblematiek)

4.1 Inrichting van de tunnel

Bij de inrichting van de tunnel dienen een aantal voorzieningen en eisen ruimte te worden gereserveerd in de dwarsdoorsnede van de DOT-tunnel.

4.1.1 Eisen

Bij het indelen van de tunneldoorsnede moet rekening worden gehouden met:

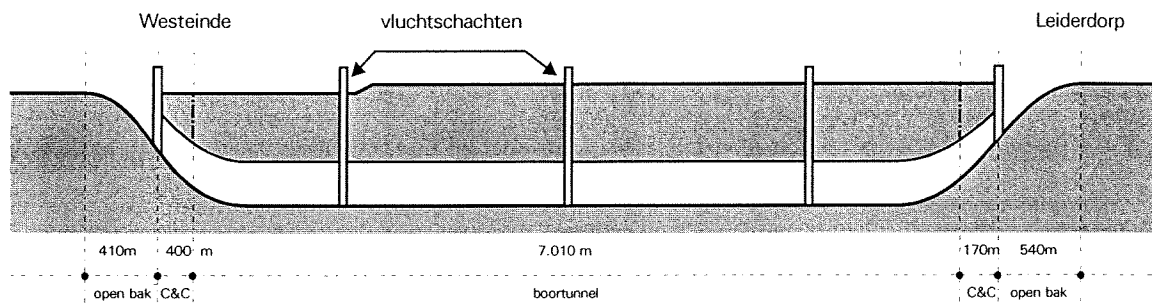
- PVR + scheefstand door verkanting; NS profiel van vrije ruimte GC 25 kV (PVE eis 3924)
- Toepassing van ballastloosspoor
- Looppad ter breedte van 800 mm en een leuning op 1000 mm boven het looppad. De leuning heeft een breedtebeslag van 150 mm. Boven het looppad moet een obstakelvrije loopruimte met een hoogte van 2200 mm worden gereserveerd.
- Ruimtereservering voor ventilatoren met diameter van 1250 mm boven de obstakelvrije loopruimte;
- Minimale vrije hoogte boven BS bedraagt 7020 mm (bij spaninrichting) + halve verkanting;
- Ter hoogte van rijdraad op 5300 mm boven BS dient de voorzijde van de verticale draagconstructie zich ten minste op 2750 mm uit hart spoor te bevinden, vermeerderd met uitzwaai-effect in verband met verkanting;
- Brandwerende bekleding in de tunnel;
- Kabelgoten aan weerszijden van het spoor met minimale breedte van 400 mm en diepte van 250 mm. Als een kabelgoot ook als waterafvoergoot dienst doet moeten beide functies fysiek worden gescheiden. Ook hoog- en laagspanningsleidingen moeten fysiek worden gescheiden;

4.1.2 Ontwerp-uitgangspunten

- De maximale verkanting in de tunnel bedraagt 180 mm;
- De geleidende opstorten staan 1600 mm uit hart spoor. In rechtstand bedraagt de minimale hoogte van de opstorten (en het looppad) 350 mm boven BS; bij scheefstand verandert deze hoogte aansluitend aan het PVR. Deze bovenbouw wijkt af van het dubbel U-baanconcept;
- Dikte van brandwerende bekleding is 50 mm;
- Minimale afstand tussen een stroomvoerend deel en een niet-stroomvoerend deel bedraagt 270 mm (Bron: discipline Railtechniek / TES);
- Inrijwater en lekwater wordt binnen de tunnelbuis in kleine waterbuffers opgevangen.
- Tussen de bovenbouw en de tunnel-lining is een betonuitvulling aanwezig om de belastingen vanuit de bovenbouw over zoveel mogelijk tunnelsegmenten te verdelen. De minimale dikte van de betonuitvulling bedraagt 300 mm. Een lokale onderbreking van de betonuitvulling ten behoeve van het plaatsen van een waterbuffer is toegestaan;
- Aan weerszijden van de bovenbouw is een goot en een buffer gesitueerd ten behoeve van de waterafvoer. De buffers hebben een inhoud van 0,1 m³ en het ruimtebeslag van een buffer is 500x300 mm².
- In verband met boor- en bouwtoleranties wordt de inwendige straal van de tunnelbuis met 100 mm vergroot. Deze toename van de tunneldoorsnede mag alleen ten goede komen aan de benodigde vrije doorsnede (luchtdrukproblematiek);
- De tunnel is niet toegankelijk tijdens exploitatie;
- Aan weerszijden van het spoor zijn er looppaden van minimaal 1200 mm breedte. Het looppad dat direct toegang geeft tot de deuren in de tussenwand dient als vluchtpad.
- De DOT-tunnel heeft een gesloten tussenwand, waarin perforaties zijn aangebracht ten behoeve van de luchtdrukproblematiek.
- Op een regelmatige afstand van 150 meter worden vluchtdeuren in de tussenwand aangebracht.
- De minimale vrije tunneldoorsnede bedraagt van 50 m². Om bij een doorsnede van 50 m² te voldoen aan de normen voor drukcomfort en drukveiligheid moeten maatregelen worden genomen in de vorm van luchtschachten en perforaties in de tussenwand;
- Symmetrieas tunnel hoeft niet samen te vallen met hart spoor;

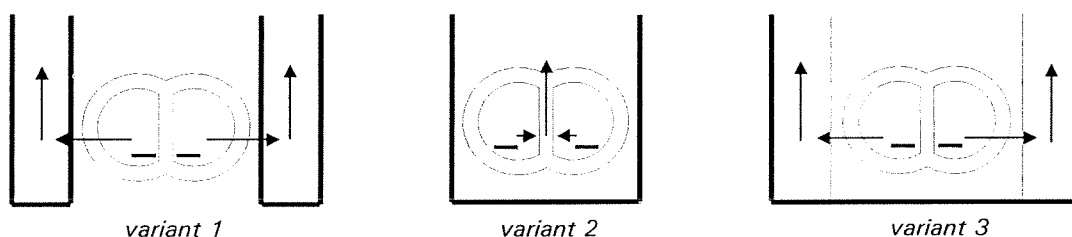
4.2 Veiligheidsfilosofie

In de gebruiksfase is voor de veiligheid in de tunnel "het tot stilstand komen van een brandende trein in de tunnel" het maatgevende scenario. Hiervoor moeten voorzieningen in de tunnel worden aangebracht welke de veiligheid van de gebruikers garanderen. Uitgangspunt is dat de gebruikers zo snel mogelijk in veiligheid worden gebracht in de andere, veilige, tunnelbuis en vervolgens via vluchtschachten de tunnel verlaten. In het Referentie Ontwerp is dit gerealiseerd door dwarsverbindingen op een regelmatige afstand van 300 meter en vluchtschachten op een afstand van maximaal 2 km van elkaar.



figuur 4.1 – veiligheidsfilosofie boortunnel

Bij de DOT-tunnel ontbreken de dwarsverbindingen en kan de veilige buis betrekkelijk eenvoudig worden bereikt via een deur - h.o.h. 150 meter - in de tussenwand. Echter door de vorm van de DOT-tunnel is een vluchtschacht tussen de twee sporen niet meer mogelijk. De meest voor de hand liggende oplossing is het maken van twee vluchtschachten aan weerskanten van de tunnelbuis (variant 1). Een andere optie is het maken van één grote vluchtschacht, waar de DOT-tunnel "doorheen" gaat, waarbij gekozen kan worden dat vluchten mogelijk is aan de binnenkant (variant 2) danwel aan de buitenkant (variant 3) van de DOT-tunnel.



figuur 4.2 – vluchtschacht varianten

In de hierboven geschetste veiligheidsconcepten speelt de h.o.h.-afstand tussen de twee sporen een cruciale rol. Het veranderen van de h.o.h.-afstand van de twee sporen heeft gevolgen voor het tracé in het horizontale vlak. Zodoende moet onderzocht worden wat de gevolgen zijn voor de MOSS-as. De MOSS-as is de lijn waarmee de ligging van het spoor in het horizontale en verticale vlak is vastgelegd.

Aan de hand van deze aspecten kunnen de volgende drie varianten worden verkregen:

	vluchtroute	h.o.h. afstand spoor	aantal vluchtschachten
variant 1	buitenkant	klein	2
variant 2	binnenkant	groot	1
variant 3	buitenkant	klein	1

tabel 4.1 – vluchtschacht varianten

Gezien de lengte van de boortunnel moet op een aantal locaties in het tracé inspectie kunnen plaatsvinden aan de tunnelboormachine. De vluchtschacht kan hiervoor uitstekend worden gebruikt; Zeker wanneer door de vluchtschacht wordt heen geboord, kan inspectie goed en relatief eenvoudig plaatsvinden. Aangezien inspectie in de vluchtschacht bij variant 1 niet mogelijk is, wordt deze variant verder niet meegenomen.

4.3 Luchtdrukproblematiek

Bij het rijden met treinen door tunnel ontstaan in de tunnel drukveranderingen op en in de trein, die door de reizigers als oncomfortabel kunnen worden aangemerkt. Bij het inrijden van de tunnel ontstaat aan de kop van de trein een overdruk golf, die zich met de geluidssnelheid voor de trein uitbeweegt. Deze golf wordt aan het einde van de tunnel weerkaatst als een onderdruk golf.

Als de staart van de trein de tunnel inrijdt, ontstaat een onderdruk golf die de trein inhaalt en eveneens aan het einde van de tunnel weerkaatst wordt en als overdruk golf weer terugkomt. Hieruit volgt een patroon van met de geluidssnelheid heen en weer lopende over- en onderdruk golven die de rijdende steeds passeren. De grootste drukverandering treedt op als de onderdruk golven, afkomstig van het inrijden van de staart van de trein en de aan het einde van de tunnel weerkaatste onderdruk golf samenvallen op een plaats waar de trein zich op dat moment ophoudt.

Bovenstaand is het verloop beschreven van de drukgolven, ontstaan door het enkelvoudig berijden van een tunnel. Bij dubbelsporig bedrijf in één tunnelbuis, waarbij sprake is van treinontmoetingen, treedt een nog ingewikkelder patroon van over- en onderdruk golven op. De drukgolven kunnen elkaar versterken of verzwakken en kunnen aanleiding geven tot relatief grote drukveranderingen.

Om het comfort van de reizigers te verhogen, is het meest voor de handliggende een grotere tunneldoorsnede. Naast deze methode kunnen ook bijzondere maatregelen in het tunnelontwerp, zoals toepassing van luchtschachten, trechtervormige of geperforeerde tunnelmonden en dwarsverbindingen tussen twee enkelsporige tunnelkokers een gunstige invloed hebben op het reizigerscomfort. Uit studies naar deze problematiek blijkt dat wanneer er geen bijzondere maatregelen worden genomen een vrije tunneldoorsnede van 80 m² vereist is. Deze kan voor een DOT-tunnel worden gereduceerd tot 50 m² wanneer in de toeritten en drie vluchtschachten een luchtschacht wordt toegepast met een effectief oppervlak van 12 m² en een perforatiegraad van 1% in de tussenwand. Dit houdt in dat er in de tussenwand kleine gaatjes moeten worden gemaakt ter grootte van 0.01 m² per strekkende meter. De vrije tunneldoorsnede van de boortunnel wordt gedefinieerd als de doorsnede die wordt omsloten door de binnenzijde van de tunnel-lining (met brandwerende bekleding), de looppaden, de geleidingsconstructies en BS.

4.4 Bepaling DOT-tunneldiameter en vluchtschachten

Het bepalen van de DOT-diameter is dus niet alleen afhankelijk van de inrichting van de tunnel, maar ook van de gekozen veiligheidsfilosofie en het benodigd vrij oppervlak voor de luchtdrukproblematiek. Om een goede afweging te kunnen maken, is uitgegaan van de twee vluchtconcepten:

- vluchten via een trap tussen de twee sporen (variant 2)
- vluchten via een trap welke bereikt kan worden door het spoor over te steken (variant 3)

Voor beide mogelijkheden zijn de diameter van de DOT-tunnel en de afmetingen van de vluchtschachten bepaald. Op basis van deze uitkomsten is een afweging gemaakt op een viertal aspecten:

- vluchtroute
- diameter DOT
- afmetingen vluchtschacht
- kosten

De afweging is weergegeven in tabel 4.2. Hieruit blijkt dat variant 2 alleen positief scoort ten opzichte van variant 3 voor wat betreft vluchtroute. Op de overige punten is dit duidelijk niet het geval. Aangezien het oversteken van de sporen niet als onoverkomelijk wordt beschouwd is uiteindelijk gekozen vluchtschacht variant 3.

afwegingsaspect	variant 2	variant 3
vluchtroute	voor het bereiken van de vluchtschacht via de "veilige" buis hoeft het spoor niet te worden overgestoken	voor het bereiken van de vluchtschacht via de "veilige" buis moet het spoor worden overgestoken
<i>beoordeling aspect</i>	+	--
inwendige diameter DOT [m]	9,6	9,4
<i>beoordeling aspect</i>	-	+
afmetingen vluchtschacht [m]	24,2 x 22,4	13,65 x 28,4
<i>beoordeling aspect</i>	-	+
kosten vluchtschacht	20% hoger	
<i>beoordeling aspect</i>	-	+
meerkosten lining + TBM	↑	↓
<i>beoordeling aspect</i>	-	+

tabel 4.2 – afweging DOT-tunneldiameter en vluchtschachten

4.5 Dwarsdoorsnede DOT-tunnel

Door de keuze van de vluchtschacht variant kan nu de dwarsdoorsnede worden bepaald van de DOT-tunnel. Om te voldoen aan alle eisen en ontwerpuitgangspunten die worden gesteld aan de inrichting van de tunnel is een inwendige diameter van de DOT vereist van 9,4 meter. De middelpunten van beide buizen bevinden zich op een h.o.h.-afstand van 7,5 meter. De maatgevende dwangpunten van de bovenleiding en de waterafvoer zorgen ervoor dat beide sporen een excentriciteit krijgen van 0,2 meter. Als dikte van de lining en van de tussenwand wordt 0,5 meter aangehouden. Dit is 0,05 meter meer dan de lining-dikte van het Referentie Ontwerp vanwege de onbekendheid van de krachtswerking. De dwarsdoorsnede van de DOT-tunnel is weergegeven in de tekening op de volgende pagina.

Hierbij moet nog aandacht worden besteed aan de volgende punten; op het gebied van:

Geometrie

- Door de dwangpunten van de bovenleiding en de waterafvoer moeten het spoor in de linkerbuis uiterst rechts worden gepositioneerd in de buis. Gezien de vrije ruimte aan de linkerkant van het spoor verdient het aandacht om de mogelijkheden te onderzoeken om het spoor naar links te verschuiven. Dit is echter alleen mogelijk wanneer er ander eisen worden gesteld aan de bovenleiding, zodat deze geen dwangpunt vormt voor de dwarsdoorsnede van de tunnel;

9400 (diameter)

500
500
1160
650
635
BS

Avrij=51,88

Avrij=52,07

180

265

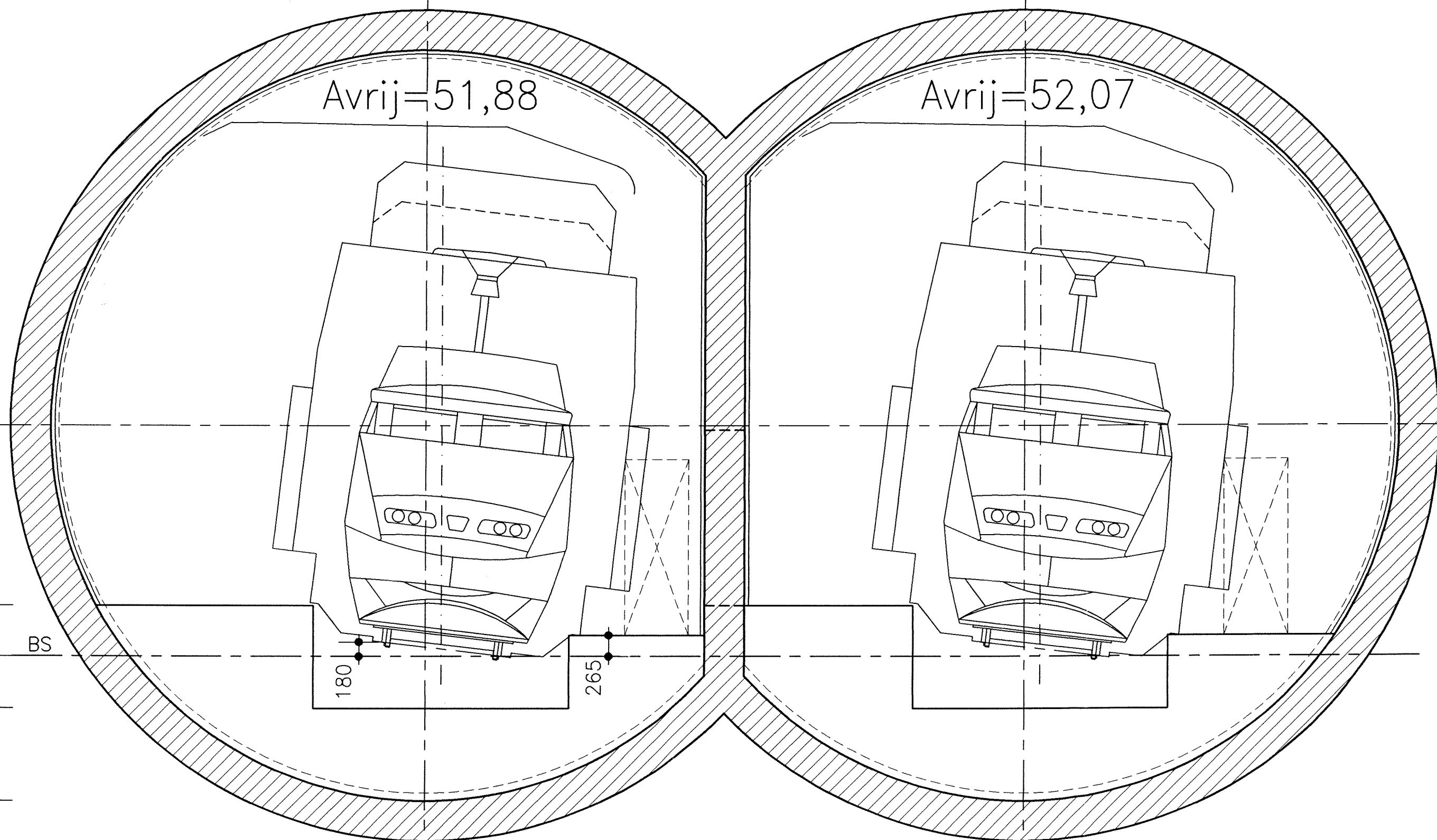
200

7500

7500

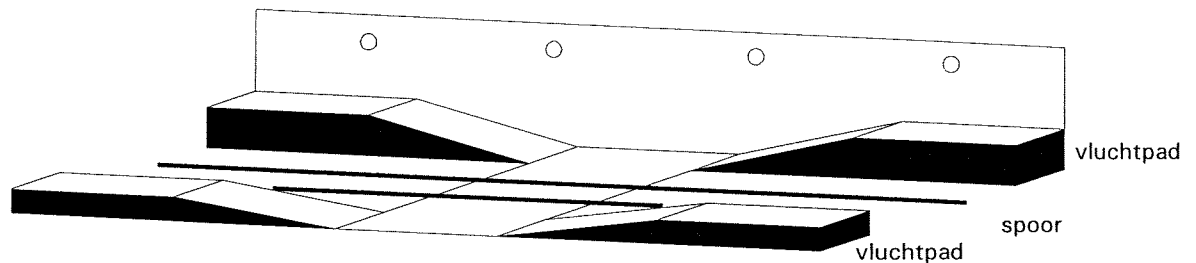
200

17900



Veiligheid

- Bij de gekozen variant moeten de reizigers het spoor oversteken. Dit is op zich niet erg wenselijk; maar kan toch betrekkelijk eenvoudig worden opgelost door ter plaatse van de vluchtschachten de loop- en vluchtpaden tijdelijk te verlagen tot spoorniveau – figuur 4.3. Dit brengt echter het probleem met zich mee dat de ontsporingsgeleiding tijdelijk is onderbroken en passagiers op deze plaatsen niet kunnen uitstappen. Onderzocht dient te worden of deze oplossing acceptabel is of niet.



figuur 4.3 – oversteekplaats ter plaatse van vluchtschachten

- Door de verkanting van de sporen liggen de vluchtpaden niet op dezelfde hoogte. Bij het vluchten naar de veilige buis moeten de gebruikers een hoogte overwinnen van 37 cm. Dit is onacceptabel. Dit kan worden opgelost door de sporen in hoogteligging te laten verschillen waardoor het hoogteverschil tussen de vluchtpaden in de buis aan weerszijden van de tussenwand wordt verkleind. Dit dient nader te worden uitgezocht waarbij als extra ontwerpuitgangspunt een maximaal hoogteverschil tussen de vluchtpaden aan weerszijden van de tussenwand mag zijn van ten hoogste 50 mm. Dit heeft hoogstwaarschijnlijk tot gevolg dat de inwendige diameter van de DOT-tunnel met zo'n 5 tot 10 centimeter moet worden vergroot.

Lining

- Nu is, op basis van literatuuronderzoek, een dikte van de segmenten aangenomen van 0,5 meter. Dit lijkt in eerste instantie een veilige aanname. Door het uitvoeren van een studie naar de krachtswerking in lining van de DOT-tunnel is wellicht een optimalisatie hierin te vinden.

5 Uitvoeringsplanning

Nu er een globaal ontwerp van de DOT-tunnel is, kan een vergelijking worden opgesteld met het Referentie Ontwerp om de haalbaarheid van deze variant aan te geven. In deze vergelijking mag een uitvoeringsplanning natuurlijk niet ontbreken, zeker wanneer de beschikbare tijd voor dit project krap is. De ruwbouw van de tunnel moet namelijk uiterlijk worden opgeleverd halverwege mei 2004.

In de planning is de benodigde tijd voor het boorgedeelte de variabele factor en zodoende het meest kritiek en bepalend voor de opleverdatum. De planning is opgezet vanuit twee invalshoeken, waar de volgende vragen aan ten grondslag liggen:

- Wat is de opleverdatum bij een bepaalde voortgangssnelheid?
- Welke voortgangssnelheid moet worden gehaald om de boortunnel op tijd op te leveren?

5.1 Uitvoeringsplanning Referentie Ontwerp

De uitvoeringsplanning van het Referentie Ontwerp is bepaald door te kijken welke voortgangssnelheid minimaal moet worden gehaald om het project binnen de gestelde tijd af te ronden. Met behulp van een planningsprogramma is de maximale doorlooptijd van de tunnel bepaald uitgaande van een vijfdaagse en zesdaagse werkweek. Voor de start van de aanleg van het spoorwerk is het niet noodzakelijk dat beide tunnelbuizen reeds gereed moeten zijn halverwege mei 2004. Ook de dwarsverbindingen liggen niet op het kritieke pad aangezien deze worden gebouwd tijdens het boorproces. Zodoende is het boorgedeelte het meest bepalend voor de opleverdatum. In de doorlooptijd van één tunnel zit naast het boorproces zelf ook nog de installatie (3 maanden) en demontage (2 maanden) van de tunnelboormachine.

aantal werkdagen per week	maximale doorlooptijd tunnel [dagen]	maximale doorlooptijd boorproces [dagen]	lengte boortunnel [m]	minimaal benodigde voortgangssnelheid [m/dag]
5	730	630	7010	11.13
6	883	783	7010	8.95

tabel 5.1 – planning Referentie Ontwerp: scenario's doorlooptijd boortunnel

Aangezien de minimaal benodigde voortgangssnelheid van 11.13 meter per dag als haalbaar wordt geacht, wordt van deze planning uitgegaan in het Referentie Ontwerp. De uitvoeringsplanning is opgenomen in bijlage I, deelrapport III.

5.2 Uitvoeringsplanning DOT

5.2.1 Uitgangspunten

Voor de uitvoeringsplanning van de DOT-tunnel gelden de volgende uitgangspunten:

- Alle bouwactiviteiten, uitgezonderd het geboorde deel, hebben dezelfde doorlooptijd als aangehouden in het Referentie Ontwerp;
- De voorlopige gunning wordt verstrekt op 1 november 1999 en de definitieve gunning wordt uiterlijk verstrekt op 1 februari 2000;
- De werkvoorbereiding kan beginnen na het verstrekken van de voorlopige gunning;
- De ontwikkeling en bouw van de tunnelboormachine voor de DOT duurt even lang als de benodigde tijd voor de twee tunnelboormachines van het Referentie Ontwerp en wel 17 maanden;
- De installatie van de DOT-TBM in de startschacht duurt twee keer zo lang als voor een cirkelvormige TBM en wel 6 maanden;
- Gezien de ervaringen met een DOT-tunnel wordt een gemiddeld voortgangssnelheid van 8 meter per dag als realistisch aangenomen;
- Het demonteren van de TBM na afloop van het boren heeft een maand extra doorlooptijd – 3 maanden;
- Op 17 mei 2004 moet gestart kunnen worden met de aanleg van het spoorwerk;

5.2.2 Planning I: variabele voortgangssnelheid

Tussen de start van de bouwactiviteiten op 1 november 1999 en de start van de aanleg van het spoorwerk op 17 mei 2004 liggen de volgende activiteiten op het kritieke pad:

- Ontwikkeling en leverantie van de DOT-TBM – 17 maanden;
- Installeren van de DOT-TBM in de startschacht – 6 maanden;
- Boorproces – variabel;
- Demonteren van de DOT-TBM – 3 maanden;
- Afbouw van de toerit zuid – deze moet gedeeltelijke gereed zijn zodat begonnen kan worden met de aanleg van het spoorwerk.

De doorlooptijd van het boorgedeelte van de DOT-tunnel is afhankelijk van:

- de gemiddelde voortgang van het boorproces per dag – 8, 10 en 12 meter per dag
- het aantal werkdagen per week – 5 of 6 dagen per week

De gemiddelde voortgangssnelheid per dag is gevarieerd met de volgende waarden: 8, 10 en 12 meter. De doorlooptijd van de DOT-tunnel kan nu worden vastgesteld, welke is weergegeven in tabel 5.2.

voortgangs- snelheid	lengte boortunnel	doorlooptijd boren	installatie TBM	demonteren TBM	doorlooptijd boorgedeelte DOT-tunnel
[m/dag]	[m]	[dagen]	[dagen]	[dagen]	[dagen]
8	7010	877	120	60	1057
10	7010	701	120	60	881
12	7010	585	120	60	765

tabel 5.2 – doorlooptijd boorgedeelte DOT-tunnel bij variabele voortgangssnelheid

Met behulp van een planningsprogramma zijn de verschillende scenario's doorgerekend, waarmee de opleverdatum is bepaald – tabel 5.3.

scenario	gemiddelde voortgang per dag [m]	aantal werkdagen per week	gemiddelde voortgang per week [m]	opleverdatum start spoorwerk
DOT1	8	5	40	08-11-2005
DOT2	10	5	50	28-01-2005
DOT3	12	5	60	08-07-2004
DOT4	8	6	48	19-01-2005
DOT5	10	6	60	17-05-2004
DOT6	12	6	72	17-05-2004

tabel 5.3 – scenario's doorlooptijd boortunnel

In de tabel 5.3 is duidelijk te zien dat de scenario's DOT 1 t/m DOT 4 niet voldoen aan de gestelde opleverdatum van 17 mei 2004 voor de startdatum van de aanleg spoorwerk; De scenario's DOT 5 en DOT 6 doen dit wel.

5.2.3 Planning II: vereiste voortgangssnelheid

Een andere manier om een planning op te zetten, is door te kijken welke voortgangssnelheid minimaal moet worden gehaald om het project binnen de gestelde tijd af te ronden. Met behulp van een planningsprogramma is de maximale doorlooptijd van de DOT-tunnel bepaald voor een vijfdaagse en zesdaagse werkweek.

aantal werkdagen per week	maximale doorlooptijd DOT-tunnel [dagen]	maximale doorlooptijd boorproces [dagen]	lengte boortunnel [m]	minimaal benodigde voortgangssnelheid [m/dag]
5	730	550	7010	12.75
6	883	703	7010	9.97

tabel 5.4 – planning II: scenario's doorlooptijd boortunnel

5.2.4 Conclusie uitvoeringsplanning DOT-tunnel

Gezien de ervaringen met DOT-tunnels is het realistisch een gemiddelde voortgangssnelheid van 8 meter per dag te veronderstellen. Wanneer wordt uitgegaan van een vijfdaagse werkweek dan wordt de opleverdatum ruim overschreden - zie tabel 5.3: DOT1 en bijlage I, deelrapport III. Dit is onacceptabel!

Om de datum van 17 mei 2004 wel te halen moet een minimale voortgangssnelheid worden gehaald van gemiddeld 10 meter per dag en een zesdaagse werkweek – zie tabel 5.3: DOT 5 en bijlage I, deelrapport III. Met de huidige kennis en ervaring is het zeer de vraag of deze uitvoeringsplanning kan worden gehaald. Geconcludeerd kan worden dat de bouwtijd voor de DOT-tunnel een zeer groot risico is.

6 Kostenraming

In dit hoofdstuk is een kostenraming opgesteld voor de DOT-tunnel. Bij het maken van de kostenraming voor de DOT-tunnel zijn de uitgangspunten voor het Ontwerp Tracé Besluit (OTB) aangehouden aangezien er nog geen aangepaste kostenraming voor het Referentie Ontwerp is gemaakt. De kostenramingen zijn gemaakt in een spreadsheet-programma.

6.1 Kostenraming Ontwerp Tracé Besluit

Voor het OTB zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

• Lengte van het te boren gedeelte	6570 [m]
• Lengte open bak constructie toerit noord	710 [m]
• Lengte gesloten gedeelte toerit noord	330 [m]
• Lengte open bak constructie toerit zuid	620 [m]
• Lengte gesloten gedeelte toerit zuid	300 [m]
• Dwarsverbindingen (h.o.h.)	300 [m]
• Gemiddelde voortgangssnelheid per dag	12 [m]
• Aantal werkdagen per week	5 [dagen]
• Aantal boorploegen	3 [-]

Voor de kostenraming van het Ontwerp Tracé Besluit zijn de volgende kostenposten te onderscheiden:

• Werkterrein	– Kosten die gemaakt worden voor de conditionering van het werkterrein waarbij inbegrepen alle kosten voor het (de-)mobiliseren van het materieel.
• TBM	– Kosten die gemaakt worden voor de Afschrijving + rente, Onderhoud + Reparatie van de tunnelboormachine, de scheidingsinstallatie en het overige benodigde materieel voor het boorproces.
• Start-/Ontvangtschacht	– Bouwkosten van de start- en ontvangtschacht inclusief de dichtblokken
• Toeritten	– Bouwkosten van de noordelijke en zuidelijke toerit
• Boortunnel	– Bouwkosten van de tunnel-lining, grout en bentoniet en uitkomende grond
• Dwarsverbindingen	– Bouwkosten van de dwarsverbindingen
• Vluchtschachten	– Bouwkosten voor de vluchtschachten
• Tunneltechnische installaties	– Kosten voor de tunneltechnische installaties zoals ventilatie, verlichting en energievoorzieningen
• Faseringsmaatregelen	– Kosten welke zijn gemoeid bij de fasering van de uitvoering
• Uitvoerings-/Loonkosten	
• Energie	– Totale energiekosten voor al het benodigde materieel
• Algemeen	– Overige kosten
• AK, W + R	– Algemene kosten aannemer, Winst en Risico aannemer

6.2 Kostenraming DOT-tunnel

Aan de hand van de kostenraming voor het OTB zijn een aantal uitgangspunten opgesteld waar de kostenraming van de DOT-tunnel afwijkt van het OTB en wel op de volgende punten:

- Voor het project moet een voortgangssnelheid worden gehaald van 60 meter per week. Voor de DOT-tunnel wordt uitgegaan dat deze snelheid pas wordt gehaald in een zesdaagse werkweek. De extra loonkosten zijn in rekening gebracht. In het OTB wordt uitgegaan van een vijfdaagse werkweek.
- De hoeveelheden ontgraven grond, beton, grout en bentoniet zijn aangepast aan de DOT-tunnel.
- De aanschafkosten van een DOT-TBM worden geschat op 70 miljoen gulden tegenover 30 miljoen gulden van een conventionele TBM.
- Voor de installatie van de TBM is een zwaardere portaalkraan nodig op het werkterrein.
- Aan de DOT-TBM moet meer onderhoud en reparatie worden gepleegd dan in één TBM – schatting zo'n 75%.
- De grootte van de boorploeg wordt geschat op 18 mensen in plaats van 12 mensen.
- In de DOT-tunnel zijn geen dwarsverbindingen, maar in de tussenwand moeten wel vluchtdeuren worden aangebracht - h.o.h. 150 meter.
- De kosten van de start- en ontvangtschacht worden op 90% geschat vanwege de kleinere breedte.
- De kosten van de toeritten worden eveneens op 90% geschat vanwege de kleinere breedte.
- De kosten van de vluchtschachten wordt hetzelfde verondersteld aangezien de afmetingen nagenoeg hetzelfde zijn.
- De energiekosten zijn gekoppeld aan de hoeveelheid te ontgraven grond. Bij een DOT-tunnel is dit zo'n 11% minder.
- De overige kostenposten worden gelijk verondersteld.

Voor de kostenraming van de DOT-tunnel zijn dezelfde kostenposten aangehouden als bij de kostenraming voor het OTB.

6.3 Vergelijking kostenramingen OTB en DOT

Uit onderstaande kostenvergelijking blijkt dat de DOT-tunnel voor de meeste kostenposten lager is dan de cirkelvormige tunnel ten tijde van het Ontwerp Tracé Besluit; Dit resulteert in een reductie van de kosten, orde grootte 14%.

De beide kostenramingen moeten natuurlijk worden aangepast aan het Referentie Ontwerp. Het is mogelijk dat het kostenverschil dan nog groter wordt.

Kostenaspect	Referentie Ontwerp	DOT-tunnel
Werkterrein	↑	↓
TBM	↓	↑
Start-/Ontvangtschacht	↑	↓
Toeritten	↑	↓
Boortunnel	↑	↓
Dwarsverbindingen	↑	↓
Vluchtschachten	=	=
Tunneltechnische installaties	=	=
Faseringsmaatregelen	=	=
Uitvoerings-/Loonkosten	↓	↑
Energie	↑	↓
Algemeen	↑	↓
AK + W + R	↑	↓
Totaal	↑	↓

tabel 6.1 – vergelijking kostenraming OTB en DOT

7 Risico's

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de risico's van de DOT-tunnel. Hierbij wordt niet een complete risico-analyse gemaakt, maar wordt gebruik gemaakt van het risicoafwegingsmodel, deelrapport I – hoofdstuk 9. Er wordt nu een overzicht gegeven van de risico's die voor de DOT-tunnel groter of kleiner zijn dan voor het Referentie Ontwerp.

Voor het goed in beeld brengen van de risico's van de DOT-tunnel moet een onderverdeling worden gemaakt in de beheersing van het boor- en bouw proces, de constructie en veiligheid.

7.1 Beheersing proces

Algemeen

- Door de niet-cirkelvormige vorm van de DOT-tunnel en de samensmelting van twee tunnelboormachines in één wordt het gehele boor- en bouwproces een stuk complexer en daarmee risicovoller.

Boorfrontstabiliteit

- De minimaal benodigde en maximaal toelaatbare steundrukken kunnen bij een cirkelvormige tunnel redelijk goed worden berekend. Uit de modellering volgt dat de breedte van het boorfront niet veel invloed heeft op de steundrukken en dat daarom mag worden uitgegaan van eenzelfde diepteligging in het geval van de HSL-Zuid. Een gedegen geotechnische onderbouwing is echter gewenst.

Voortgangssnelheid

- In theorie zou het mogelijk moeten zijn om voor een DOT dezelfde voortgangssnelheid te halen als bij een cirkelvormig schild. In de praktijk ligt de voortgangssnelheid lager omdat er een afhankelijkheid is tussen de twee erectoren tijdens het inbouwen van de ring en het inbouwen complexer is door de verschillende typen segmenten. Voor de boortunnel onder het Groene Hart is een minimale voortgangssnelheid noodzakelijk van 60 meter per week. Het is zeer twijfelachtig of deze snelheid kan worden gehaald.

Vullen staartspleet

- Door de niet-ronde vorm van de DOT-tunnel is het geheel rondom opvullen van de staartspleet een complexer proces en daarmee risicovoller. Te meer omdat bij een cirkelvormige tunnel al weinig inzicht bestaat over het proces van het vullen van de staartspleet.

Logistiek

- In het geval van de boortunnel "Groene Hart" is de DOT-tunnel gunstiger doordat voor het transport geen rekening hoeft te worden gehouden met de bouw van dwarsverbindingen, wat op zichzelf al een uiterst risicovolle operatie is.

Beheersen ongewenste rotaties

- Het beheersen van het roteren van het schild om de x-as (rolling) verdient extra aandacht aangezien de niet-ronde vorm van de tunnel het niet toelaat dat de tunnel teveel roteert omdat anders het Profiel van Vrije Ruimte in het geding komt.

7.2 Constructie

Ontbreken dwarsverbindingen

- Het grootste voordeel van de DOT-tunnel is gelegen in het feit dat de uiterst risicovolle dwarsverbindingen overbodig zijn geworden.

Diepteligging

- De DOT-tunnel moet iets dieper liggen dan een cirkelvormige tunnel aangezien het opdrijfmechanisme voor een DOT-tunnel sneller maatgevend is.

Maatvoering

- De niet-ronde en compactere vorm van de DOT-tunnel hebben tot gevolg dat de maatvoering van de tunnel goeden zal moeten worden gevolgd omdat anders het Profiel van Vrije Ruimte (PVR) niet wordt gehaald.

Krachtenwerking

- De krachtenwerking in en op de lining van de DOT-tunnel is complex en wordt door tal van factoren beïnvloed die niet of nauwelijks van invloed zijn op de cirkelvormige tunnel, zoals complexe krachtenwerking in de K-segmenten, scheefstand van de kolommen en asymmetrische belastinggevallen in de gebruiksfase. Voor de HSL-Zuid is de kolom vervangen door een tussenwand waarin vluchtdeuren en perforaties worden aangebracht. Dit zorgt voor een andere krachtsafdracht.

7.3 Veiligheid

Oversteken spoor

- Bij de gekozen variant moeten de reizigers het spoor oversteken. Dit is op zich niet erg wenselijk; maar kan toch betrekkelijk eenvoudig worden opgelost door ter plaatse van de vluchtschachten de loop- en vluchtpaden tijdelijk te verlagen tot spoorniveau. Dit brengt echter het probleem met zich mee dat de ontsporingsgeleiding tijdelijk is onderbroken en passagiers op deze plaatsen niet kunnen uitstappen. Onderzocht dient te worden of deze oplossing acceptabel is of niet.

Hoogteverschil vluchtpaden

- Door de verkanting van de sporen liggen de vluchtpaden niet op dezelfde hoogte. Bij het vluchten naar de veilige buis moeten de gebruikers een hoogte overwinnen van 37 cm. Dit is onacceptabel. Dit kan worden opgelost door de sporen in hoogteligging te laten verschillen waardoor het hoogteverschil tussen de vluchtpaden in de buis aan weerszijden van de tussenwand wordt verkleind. Dit dient nader te worden uitgezocht.

Afsluiten perforaties

- Ten tijde van een brand moeten de perforaties in de tussenwand worden afgesloten om rookverspreiding in de veilige buis te voorkomen. Aandacht moet worden geschonken aan een systeem waarmee deze afsluiting betrouwbaar is.

7.4 Vergelijking

De genoemde risico's uit de vorige paragrafen zijn in tabel 7.1 nog eens overzichtelijk weergegeven, waarbij is aangegeven wat de consequenties zijn.

risico	verhoogd risico bij		consequentie		
	Referentie Ontwerp	DOT-tunnel	tijd	kosten	kwaliteit
Beheersing proces					
Algemeen		X	X	X	X
Boorfrontstabiliteit		X	X	X	
Voortgangssnelheid		X	X	X	
Vullen staartspleet		X			X
Logistiek	X		X	X	
Beheersen ongewenste rotaties		X			X
Constructie					
Dwarsverbindingen	X		X	X	
Diepteligging		X		X	
Maatvoering		X			X
Krachtswerking		X	X	X	X
Veiligheid					
Oversteken spoor		X			X
Hoogteverschil		X			X
Afsluiten perforaties		X			X

tabel 7.1 – vergelijking van risico's

8 Conclusie

De vraagstelling van deze haalbaarheidsstudie was of een DOT-tunnel concurrerend is met het Referentie Ontwerp voor de HSL-Zuid boortunnel op basis van bouwtijd, kosten en risico's.

Op basis van de vergelijking kan het volgende worden geconcludeerd:

Bouwtijd

Gezien de ervaringen met DOT-tunnels is het realistisch een gemiddelde voortgangssnelheid van 8 meter per dag te veronderstellen. Wanneer wordt uitgegaan van een vijfdaagse werkweek dan wordt de opleverdatum ruim overschreden. Dit is onacceptabel!

Om de datum van 17 mei 2004 wel te halen moet een minimale voortgangssnelheid worden gehaald van gemiddeld 10 meter per dag en een zesdaagse werkweek. Met de huidige kennis en ervaring is het zeer de vraag of deze uitvoeringsplanning kan worden gehaald. Kortom de bouwtijd voor de DOT-tunnel is een zeer groot risico.

Kosten

Uit de kostenvergelijking blijkt dat de DOT-tunnel zo'n 140 miljoen gulden goedkoper is dan de cirkelvormige tunnel ten tijde van het Ontwerp Tracé Besluit.

Risico's

Door de complexiteit van het boor- en bouwproces heeft de DOT-tunnel meer en grotere risico's op een aantal punten. Hierbij moet worden opgemerkt dat de risico's voor een deel worden veroorzaakt door onvoldoende kennis en ervaring van bepaalde aspecten, waardoor mogelijk een verkeerd beeld zou kunnen ontstaan. Ondanks de risico's is een DOT-tunnel wel degelijk technisch haalbaar onder de Nederlandse omstandigheden.

DOT-tunnel onder het Groene Hart

Deel III: bijlagen

Datum	3 november 1998
Ons kenmerk	MVE/R/985611/3.10.10
Bestand	EINDRAPPORT DEEL III.DOC
Opsteller	M.F.H. Veenma
Status	definitief
Fase	eindrapport
Gecontroleerd	-
Goedgekeurd	-
Geautoriseerd	-

Inhoud

- A Literatuurlijst**
- B HSL-Zuid**
- C Referentie Ontwerp**
- D Geotechnisch lengteprofiel**
- E Modellerings Jancsecz**
- F Aangepaste modellerings Jancsecz**
- G Modellerings vervormingen**
 - G.1 Peck
 - G.2 New & O'Reilly
 - G.3 Leach
- H Risico-analyse**
 - H.1 risico-analyse 2 x enkelsporig, slurry-schild
 - H.2 risico-analyse 2 x enkelsporig, EPB-schild
 - H.3 risico-analyse DOT-methode, slurry-schild
 - H.4 risico-analyse DOT-methode, EPB-schild
 - H.5 risico-analyse MF-methode, slurry-schild
 - H.6 risico-analyse MF-methode, EPB-schild
- I Uitvoeringsplanning**
 - I.1 Uitvoeringsplanning Referentie Ontwerp
 - I.2 Uitvoeringsplanning DOT - 5 dagen/week; 8 meter/dag
 - I.3 Uitvoeringsplanning DOT - 6 dagen/week; 10 meter/dag
 - I.4 Uitvoeringsplanning DOT - 5 werkdagen; kritiek
 - I.5 Uitvoeringsplanning DOT - 6 werkdagen; kritiek
- J Ontwerp vluchtschacht DOT**

A Literatuurlijst

- [1] **G. Anagnostou / K. Kovári**
The face stability of slurry-shield-driven tunnels
Tunnelling and Underground space technology, 1994
- [2] **F. Boerma / M. Kempers / B. Smolders**
Double-O-Tube (DOT) toegepast bij Nederlandse Projecten
juni 1996
- [3] **D.W. Boeve**
Double-O-Tube (DOT) tunnels
augustus 1996
- [4] **D.W. Boeve**
Tunnel technology, ontwikkeling van nieuwe tunnelvormen in Japan
april 1996
- [5] **W. Broere / B. Polen**
Risico's en storingen bij geboorde tunnels
juni 1996
- [6] **W. Broere**
Face stability calculation for a slurry shield in heterogeneous soft soils
- [7] **Centrum Ondergronds Bouwen**
L510-01: Inventarisatie ontwerpmethoden boortunnels voor weg- en railverbindingen
december 1996
- [8] **Centrum Ondergronds Bouwen**
N510-01: Risico-analyse bouwfase boortunnels - werkrapport
november 1997
- [9] **M. Cornelissen, PHZI**
Nota Voorontwerp boortunnel HSL-Zuid Groene Hart
januari 1998
- [10] **DOT Tunneling Association**
DOT tunneling
- [11] **A.E.A. de Groot**
Afweging voor het gebruik van het slurry- of EPB-schild
augustus 1997

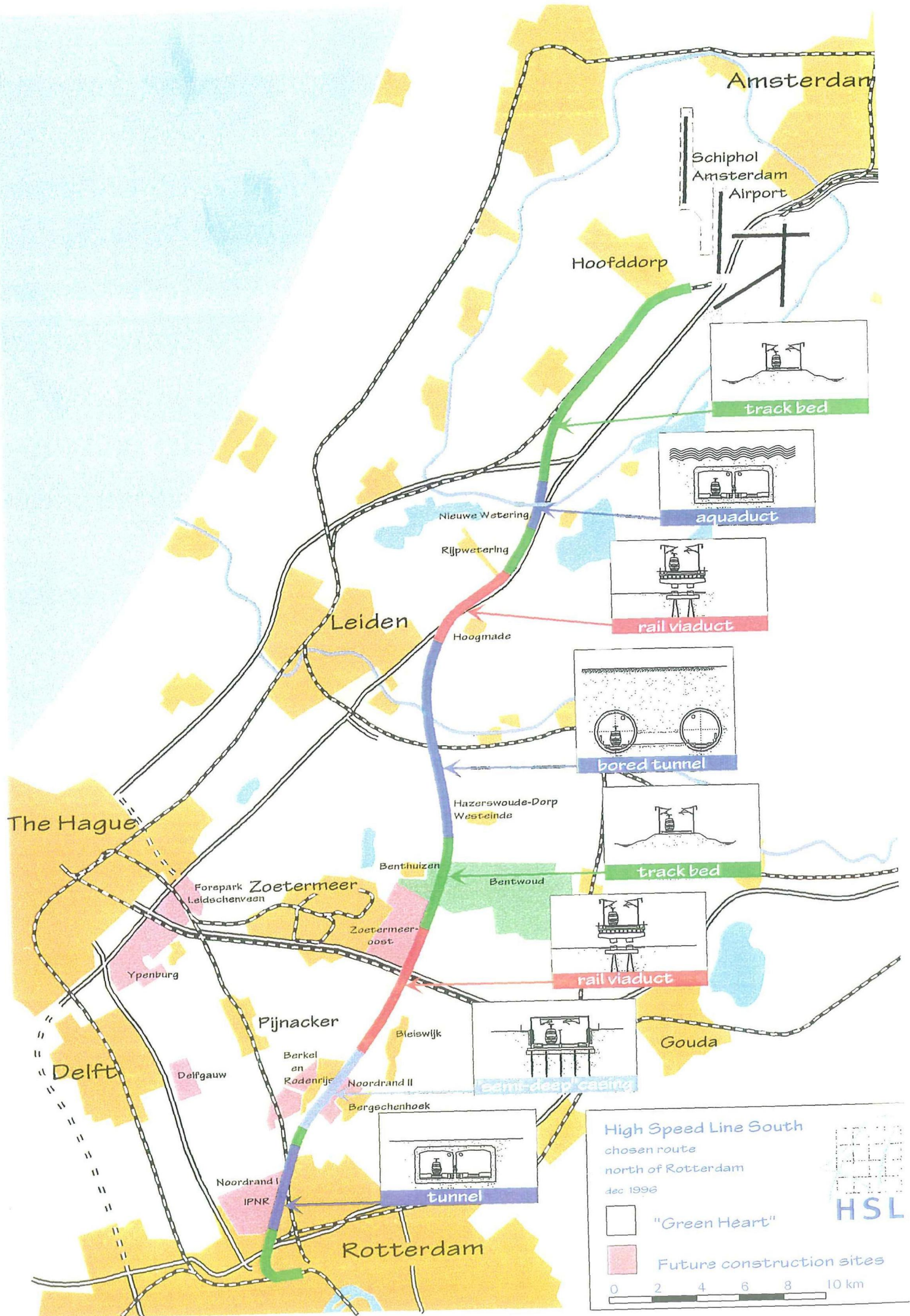
- [12] **Hitachi Zosen**
Multi-Circular Face Shield
1991
- [13] **prof.ir. E. Horvat**
Ondergronds Bouwen, deel 1 - collegedictaat e18/CTip4790
mei 1997
- [14] **H. Iida / K. Naito / A. Sumida / K. Tsuchiya**
First application of the Double-O-Tube (DOT) Tunnelling Method
International Congress "Options for tunnelling", 1993
- [15] **S. Ishikawa / K. Miya**
DOT tunneling method and selection of the shield tunneling method
for the new transportation system in Hiroshima
1992
- [16] **H. Kosterman, D.W. Nellestein**
Vluchtschachten DOT
augustus 1998
- [17] **S. Ishikawa / M. Kiyoshi**
Selection of the shield tunneling method
for the new transportation system in Hiroshima
International congress "Towards new worlds in tunnelling", mei 1992
- [18] **S. Ishikawa / K. Miya**
Toward practical utilization of the DOT tunneling method
- [19] **S. Jancsecz / W. Steiner**
Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions
Tunnelling '94, 1994
- [20] **T. Katayama / H. Azuma / T. Nomura / Y. Nagashima / Y. Kido / N. Yamamori**
Triple circular-face shield lining structure at Iidabashi station (provisional name)
on Metropolitan subway route 12
North American Tunneling, april 1996
- [21] **S. van Kinderen**
Risicoanalyse van een geboorde tunnel
juni 1995
- [22] **KIVI**
Boren van tunnels voor rail- en wegverbindingen
augustus 1993

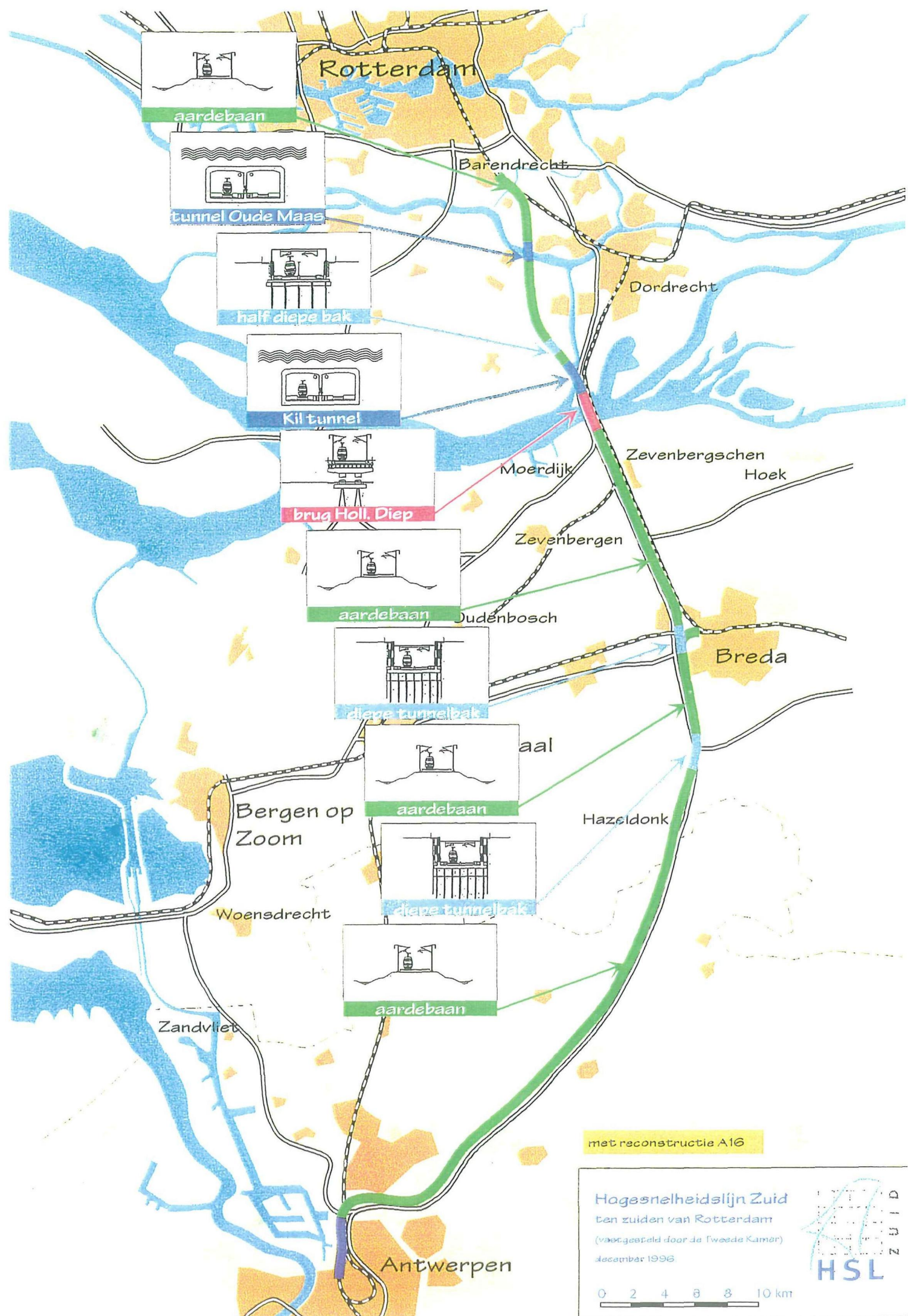
- [23] **KIVI, werkgroep Kelderconstructies**
Kelderconstructies, Op naar de diepte!
augustus 1994
- [24] **T. Kuzono / H. Takasaki / I. Yamada / T. Nakao**
Results achieved in construction of an underground station
beneath a building by slurry type triple multiface shield machine
North American Tunneling, april 1996
- [25] **S. Lokhorst, PHZI**
Diameter boortunnel Groene Hart, studie III
januari 1997
- [26] **B. Maidl / M. Herrenknecht / L. Anheuser**
Maschineller tunnelbau im schildvortrieb
augustus 1994
- [27] **B. Maidl / J. Dietrich**
Erster multi-brust schild in Japan erfolgreich eingesetzt
Bautechnik 66, 1989
- [28] **H. Matumoto / Y. Takamatu / H. Kawada / T. Arai**
Results and future prospect of MF shield tunnelling
- [29] **Y. Matsumoto / S. Uchida / Y. Koyama / T. Arai**
Multi-circular face shield driven tunnels.
Tunnels and water, Serrano, 1988
- [30] **K. Miya / F. Tada / T. Watanabe**
DOT tunneling, a multi-face earth pressure balance shield tunneling method
International symposium on unique underground structures, juni 1990
- [31] **C.A. Messemaeckers van de Graaff**
Afweging TBM-type en specificaties geotechnische ontwerpaspecten
juli 1998
- [32] **H. Möller / M. Spruijt / P. Vermeij, PHZI**
Risico analyse Boortunnel Groene Hart, deel 1: kwalitatief
februari 1998
- [33] **H. Möller / M. Spruijt / P. Vermeij, PHZI**
Risico analyse Boortunnel Groene Hart, deel 2: kwantitatief
februari 1998
- [34] **K. Naito / S. Yamamoto / A. Higashide**
First application of Double-O-Tube (DOT) tunneling method

- [35] **E.G. Prater**
Die Gewölbewirkung der Schlitzwände
Der Bauingenieur 48, 1973
- [36] **Projectorganisatie HSL-Zuid**
Ontwerp Tracébesluit Hogesnelheidslijn-Zuid
oktober 1997
- [37] **Projectorganisatie HSL-Zuid**
Tracébesluit Hogesnelheidslijn-Zuid
april 1998
- [38] **Projectorganisatie HSL-Zuid**
Hogesnelheidslijn-Zuid, projectbeschrijving en voortgangsrapport 1
april 1997
- [39] **Put van der, A.**
Samenvatting ontwerpberekeningen geboorde gedeelte Tweede Heienoordtunnel
Tunnelcombinatie Heinenoord, november 1996
- [40] **Tokyo Water Front Development Inc.**
Construction of multi-service tunnels in Ariake-Kita District (phases 1&3)
1990
- [41] **prof.ir. A.F. van Tol**
Fundering en constructie - collegedictaat g81
januari 1997
- [42] **prof.drs.ir. J.K. Vrijling / ir. K.G. Bezuyen**
Waterbouwkundige kunstwerken B.O. - collegedictaat f9c/CTwa5305
mei 1997
- [43] **H. Yokoyama / K. Ohno / K. Miya**
Tunneling with large-section overlapping
double circular earth-pressure-balance shield
North American Tunneling, april 1996
- [44] **S. Yoshida, T. Hiraide**
Construction of a ring subway line in Tokyo
Towards new world in tunneling, Acapulco, 16-20 mei 1992

B HSL-Zuid







aardebaan

tunnel Oude Maas

half diepe bak

Kil tunnel

brug Holl. Diep

aardebaan

diepe tunnelbak

aardebaan

diepe tunnelbak

aardebaan

met reconstructie A16

Hogesnelheidslijn Zuid
ten zuiden van Rotterdam
(voorgesteld door de Tweede Kamer)
december 1996.

0 2 4 8 8 10 km

HSL

ZUID



Overall-planning van het Voorkeurstracé, Versie 4c, 17 april 1997

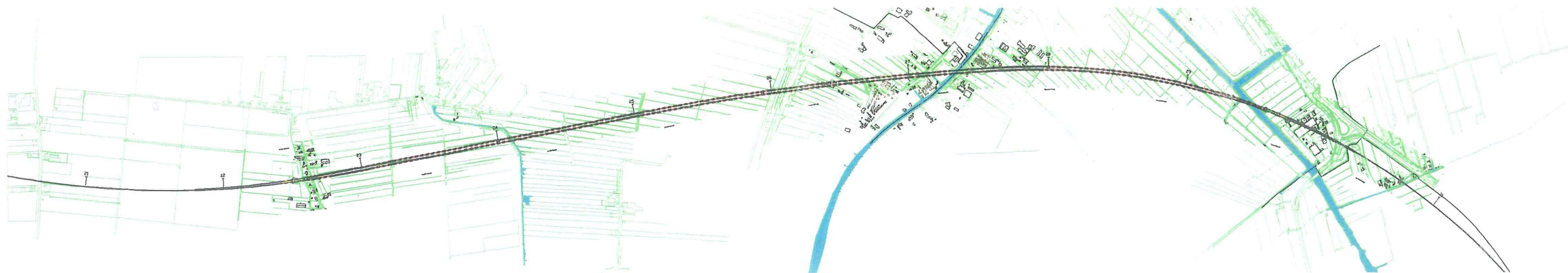
Projectmanager

Ir. A.G.M. Olsthoorn accoord:

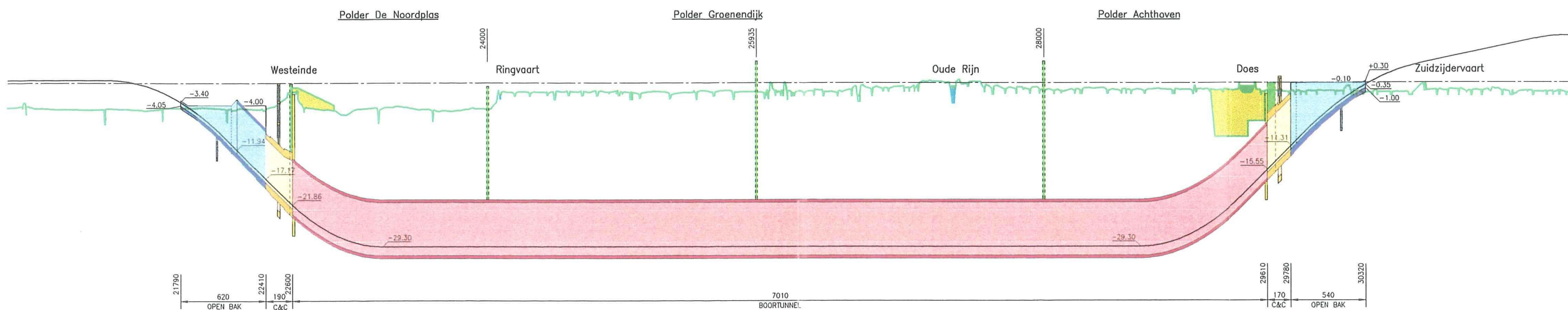


C Referentie Ontwerp

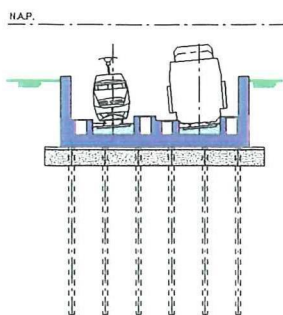
D Geotechnisch lengteprofiel



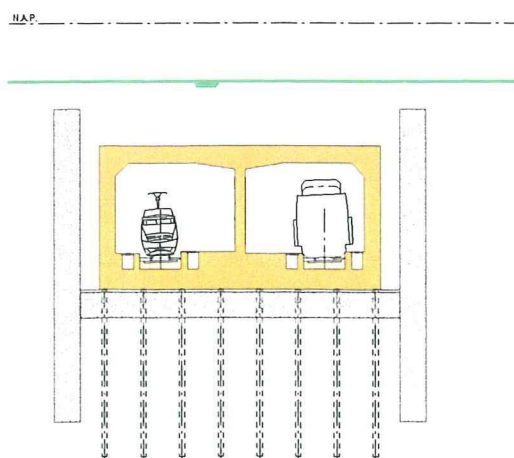
Situatie
schaal 1:10000



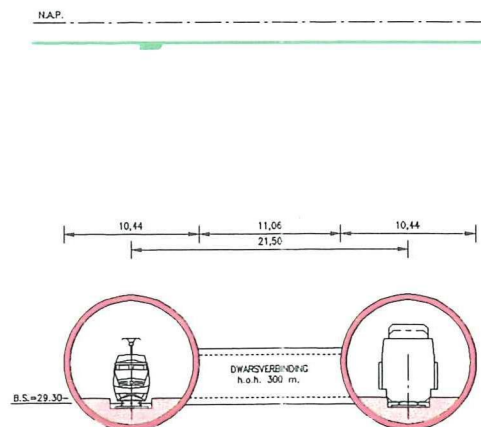
Lengteprofiel
schaal 1:10000/1:250



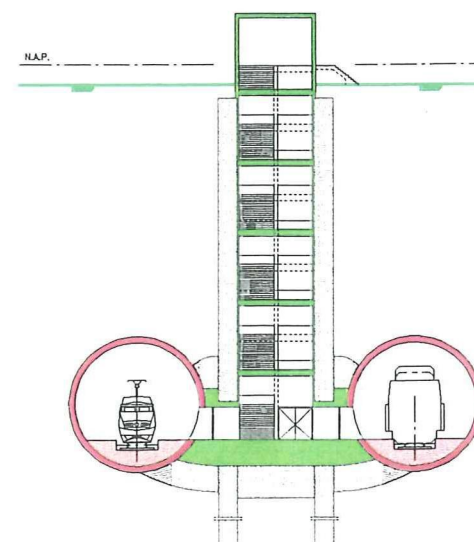
Doorsnede open bak
schaal 1:200



Doorsnede cut & cover
schaal 1:200



Doorsnede boortunnel
schaal 1:200



Doorsnede vluchtschacht
schaal 1:200

Behoort bij bijlage 6 van de selectieleidraad "Boortunnel Groene Hart"
(kenmerk BTGH.sel, datum 11-08-1998)

Ontwerper	Ex.d.Gingel	980811	Status	DEFINITIEF
Beoordelaar	S.Lohorst	980811	Fin	Selectieleidraad
Goedgekeurd	J.Helber	980811	Fin	Selectieleidraad
Beoordelaar	H.Burger	980811	Fin	Selectieleidraad
Maat in meters	Schaal	zie tekening	Treed	A1
Pakket in m. Looz. N.A.P.	Foutloos	AD		
Direct/Vrij				
Boortunnel "Groene Hart" Globaal ontwerp Hazerswoude/Westeinde - Does/N446				
Ontwerper	C00	T01	SEL	001
Fin				A

HSL
 N.V. HSL
 Postbus 100
 3720 AA Utrecht
 T 06 - 20 20 400
 F 06 - 20 20 444
 980811

E Modellerings Jancsecz

Eén van de modellen is de methode van Jancsecz, waarbij wordt uitgegaan van een actief bezwijkmechanisme door middel van afschuiving. Het afschuifmechanisme bestaat uit een grondwig (onderste gedeelte) voor het boorfront en een rechthoekige grondkolom (bovenste gedeelte) op deze wig tot aan het maaiveld - figuur E.1. De diepte van de wig voor het boorfront hangt volgens Jancsecz af van de hoek van inwendige wrijving ϕ en de relatieve diepte H/D . Hiermee kan de afschuifhoek β en daarna de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt K_{A3} worden bepaald. De minimaal aan te houden korrelspanning is dan:

$$\sigma'_{h,\min} = K_{A3} \cdot \sigma'_{v,\text{red}}(H) \quad (\text{E.1})$$

waarin:

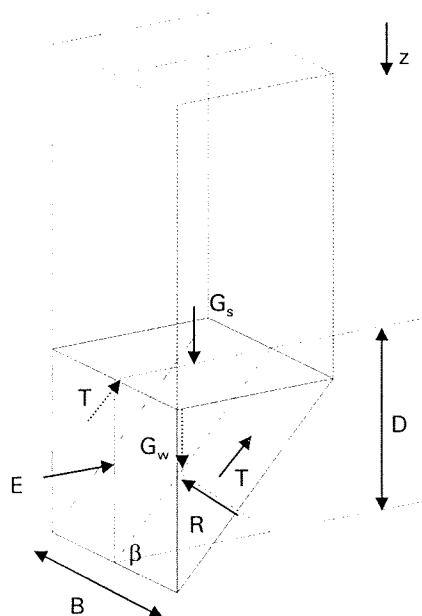
$\sigma'_{h,\min}$	minimale horizontale korrelspanning	[kN/m ²]
K_{A3}	driedimensionale gronddrukcoëfficiënt	[-]
$\sigma'_{v,\text{red}}$	gereduceerde verticale korrelspanning door boogwerking	[kN/m ²]
H	dekking	[m]

De minimaal benodigde steundruk wordt gevonden door ook de waterspanning en de veiligheidscoëfficiënten mee te nemen:

$$\sigma_{\text{steun},\min} = 1,5 \cdot \sigma'_{h,\min} + 1,05 \cdot \sigma_{\text{water}} \quad (\text{E.2})$$

waarin:

$\sigma'_{h,\min}$	minimale steundruk	[kN/m ²]
$\sigma'_{h,\min}$	minimale horizontale korrelspanning	[kN/m ²]
σ_{water}	waterspanning	[kN/m ²]



figuur E.1 - bezwijkmechanisme boorfront

De methode van Jancsecz kent echter een aantal beperkingen, te weten:

- het model is alleen geschikt voor granulaire gronden oftewel $c = 0$;
- het model gaat uit van een homogene grondslag;

In het bezwijkmechanisme spelen de volgende krachten een rol:

G_s	kracht ten gevolge van de grondkolom op de bovenkant van de wig
G_w	kracht ten gevolge van het eigen gewicht van de wig
T	kracht ten gevolge van afschuiven op de twee zijvlakken
R	reactiekracht van de grond
E	reactiekracht van de tunnelboormachine op het boorfront

De verticale bovenbelasting σ'_v ten gevolge van de grondkolom op het horizontale vlak van de grondwig kan met behulp van Terzaghi worden berekend:

$$\sigma'_v(z) = \frac{\frac{A}{O} \cdot \gamma' - c}{\lambda_a \cdot \tan \phi} \cdot \left(1 - e^{\left(-z \cdot \frac{O}{A} \cdot \lambda_a \cdot \tan \phi \right)} \right) \quad (E.3)$$

waarin:

σ'_v	verticale effectieve gronddruk op de grondwig	[kN/m ²]
z	diepte	[m]
A	oppervlakte van het horizontale vlak van de grondwig	[m ²]
O	omtrek van het horizontale vlak van de grondwig	[m]
γ'	volumegewicht grond	[kN/m ³]
c	cohesie	[kN/m ²]
λ_a	actieve gronddrukcoëfficiënt	[-]
ϕ	hoek van de inwendige wrijving	[°]

De kracht op de bovenkant van de wig wordt bepaald door σ'_v te vermenigvuldigen met de oppervlakte van de wig aan de bovenkant van de tunnel:

$$\begin{aligned} G_s &= A_{wig} \cdot \sigma'_v \\ &= B \cdot D \cdot \cot \beta \cdot \sigma'_v \end{aligned} \quad (E.4)$$

De kracht ten gevolge van het eigen gewicht wordt bepaald door de inhoud van de wig te vermenigvuldigen met het eigen gewicht van de grond:

$$G_w = \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot B \cdot D^2 \cdot \cot \beta \quad (E.5)$$

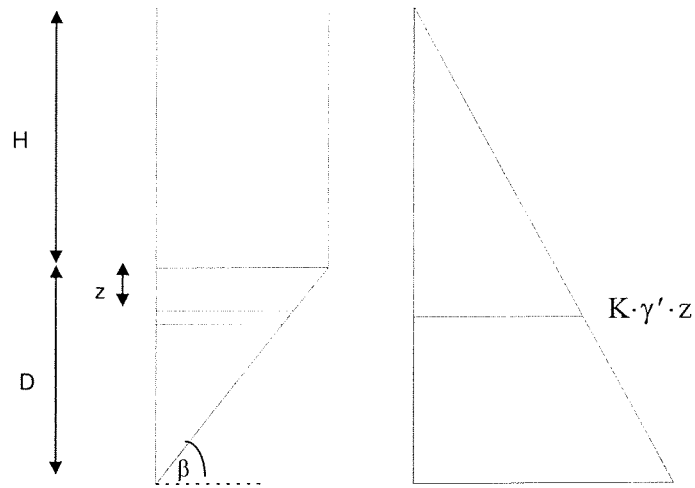
De kracht T , die werkt op de twee zijvlakken van de wig is als volgt opgebouwd:

$$T = 2 \cdot A_{zijvlak wig} \cdot (\sigma'_h \cdot \tan \phi + c) \quad (E.6)$$

waarin:

$A_{zijvlak wig}$	oppervlakte zijvlak wig	[m ²]
σ'_h	horizontale korrelspanning	[kN/m ²]
ϕ	hoek van inwendige wrijving	[°]
c	cohesie	[kN/m ²]

De afschuifkracht op één zijvlak van de wig wordt als volgt berekend:



figuur E.3 - berekening afschuifkracht

H	dekking	[m]
D	diameter tunnelboormachine	[m]
z	afstand tot de bovenkant van de wig	[m]
K	grondrukcoëfficiënt	[-]
γ'	volumegewicht grond	[kN/m ³]
β	afschuifhoek	[°]

$$\int_0^D ((D-z) \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma' \cdot (H+z)) dz \quad (E.7)$$

$$\int_0^D (D \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma' \cdot H + D \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma' \cdot z - z \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma' \cdot H - z^2 \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma') dz$$

$$\left[D \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma' \cdot H \cdot z + \frac{1}{2} \cdot D \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma' \cdot z^2 - \frac{1}{2} \cdot z^2 \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma' \cdot H - \frac{1}{3} \cdot z^3 \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma' \right]_0^D$$

$$\frac{1}{2} \cdot D^2 \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma' \cdot H + \frac{1}{6} \cdot D^3 \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma'$$

$$D^2 \cdot \cot \beta \cdot K_y \cdot \gamma' \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot H + \frac{1}{6} \cdot D \right)$$

$$T = D^2 \cdot \cot \beta \cdot \left(K_y \cdot \gamma' \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot H + \frac{1}{6} \cdot D \right) \cdot \tan \phi + c \right) \quad (E.8)$$

De evenwichtsbeschouwing kan nu als volgt worden bepaald:

$$\sum T + R \cdot \sin \phi + E \cdot \cos \beta - \sum G \cdot \sin \beta = 0 \quad \text{horizontaal} \quad (E.9)$$

$$-R \cdot \cos \phi + E \cdot \sin \phi + \sum G \cdot \cos \beta = 0 \quad \text{verticaal} \quad (E.10)$$

De reactiekracht E wordt door samenvoegen van bovenstaande evenwichtsbeschouwingen:

$$E = \frac{\sum G \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \phi) - \sum T}{\tan \phi \cdot \sin \beta + \cos \beta} \quad (\text{E.11})$$

De maximale reactiekracht E wordt gevonden door de differentiaalvergelijking $\frac{\partial E}{\partial \beta} = 0$ op te lossen.

De afschuifhoek β is een functie van de hoek van inwendige wrijving ϕ en de relatieve diepte H/D.

De oplossing wordt verkregen door een aantal iteraties.

Jancsecz heeft voor verschillende ϕ en H/D de β bepaald, welke is weergegeven in tabel E.1.

Nu β bekend is, kan met de driedimensionale gronddrukcoëfficiënt K_{A3} worden afgeleid.

De waarden voor K_{A3} weergegeven in onderstaande tabel.

$$K_{A3} = \frac{\sin \beta \cdot \cos \beta - \cos^2 \beta \cdot \tan \phi - \frac{K \cdot \alpha}{1,5} \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi}{\cos \beta \cdot \sin \beta + \tan \phi \cdot \sin^2 \beta} \quad (\text{E.12})$$

waarin:

$$K \approx \frac{1 - \sin \phi + \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)}{2} \quad \alpha = \frac{1 + 3 \cdot \frac{H}{D}}{1 + 2 \cdot \frac{H}{D}}$$

H/D	β					K_{A3}				
	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 25^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 40^\circ$	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 25^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 40^\circ$
0	60.340	62.511	64.802	66.900	68.918	0.386	0.310	0.248	0.199	0.159
1	61.890	64.161	66.286	68.283	70.177	0.354	0.279	0.222	0.177	0.141
2	62.197	64.464	66.580	68.566	70.423	0.348	0.273	0.217	0.173	0.138
3	62.322	64.592	66.706	68.683	70.527	0.345	0.271	0.214	0.171	0.136

tabel E.1 – waarden afschuifhoek β en driedimensionale gronddrukcoëfficiënt K_{A3} volgens Jancsecz

F Aangepaste modellering Jancsecz

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot B \cdot \cot \beta + \gamma \cdot t \cdot D \cdot B \cdot \cot \beta$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot B \cdot \cot \beta \cdot \left[1 + 2 \cdot \frac{t}{D} \right] \quad (\text{F.1})$$

$$T = 2 \cdot D^2 \cdot \cot \beta \cdot \left(K_y \cdot \gamma' \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot H + \frac{1}{6} \cdot D \right) \cdot \tan \phi + c \right)$$

$$= \frac{1}{3} \cdot K_y \cdot \gamma \cdot D^3 \cdot \cot \beta \cdot \tan \phi \cdot \left[1 + 3 \cdot \frac{t}{D} \right] + D^2 \cdot \cot \beta \cdot c \quad (\text{F.2})$$

$$C_a = \frac{c \cdot B \cdot D}{\sin \beta} \quad (\text{F.3})$$

$$E = \frac{\sum W \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \phi) - \sum T - C_a}{\tan \phi \cdot \sin \beta + \cos \beta} \quad (\text{F.4})$$

De formules F.1 t/m F.3 substitueren in F.4 en is te herschrijven tot:

$$E = \frac{\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot B \cdot \cot \beta \cdot \left[1 + 2 \cdot \frac{t}{D} \right] \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \phi) - \frac{1}{3} \cdot K \cdot \gamma \cdot D^3 \cdot \cot \beta \cdot \tan \phi \cdot \left[1 + 3 \cdot \frac{t}{D} \right] - D^2 \cdot \cot \beta \cdot c - \frac{c \cdot B \cdot D}{\sin \beta}}{\tan \phi \cdot \sin \beta + \cos \beta}$$

$$\alpha = \frac{1 + 3 \cdot \frac{t}{D}}{1 + 2 \cdot \frac{t}{D}} \quad n = \frac{D}{B} \quad \cot \beta = \frac{\cos \beta}{\sin \beta}$$

$$E = \frac{\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot B \cdot \cot \beta \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \phi) - \frac{1}{3} \cdot K \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot D^3 \cdot \cot \beta \cdot \tan \phi - \frac{D^2 \cdot \cot \beta \cdot c}{\left[1 + 2 \cdot \frac{t}{D} \right]} - \frac{c \cdot B \cdot D}{\left[1 + 2 \cdot \frac{t}{D} \right] \cdot \sin \beta}}{\tan \phi \cdot \sin \beta + \cos \beta}$$

$$E = \frac{\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot B \cdot \left\{ \left(\cos \beta \cdot \sin \beta - \cos^2 \beta \cdot \tan \phi \right) - \frac{2}{3} \cdot K \cdot \alpha \cdot n \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi - \frac{2 \cdot \cos \beta \cdot c}{\left[1 + 2 \cdot \frac{t}{D} \right] \cdot \gamma \cdot B} - \frac{2 \cdot c}{\left[1 + 2 \cdot \frac{t}{D} \right] \cdot \sin \beta \cdot \gamma \cdot D} \right\}}{\tan \phi \cdot \sin^2 \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta}$$

$$\Rightarrow K_{A3} = \frac{\cos \beta \cdot \sin \beta - \cos^2 \beta \cdot \tan \phi - \frac{K}{1,5} \cdot \alpha \cdot \frac{D}{B} \cdot \cos \beta \cdot \tan \phi - \frac{2 \cdot c \cdot \cos \beta}{\left(1 + 2 \cdot \frac{H}{D} \right) \cdot \gamma \cdot B} - \frac{2 \cdot c}{\left(1 + 2 \cdot \frac{H}{D} \right) \cdot \gamma \cdot D}}{\tan \phi \cdot \sin^2 \beta + \cos \beta \cdot \sin \beta}$$

G Modellerings vervormingen

Voor het bepalen van de waarde van i worden in de literatuur verschillende en uiteenlopende methoden beschreven welke kort worden beschreven:

G.1 Peck

Voor het bepalen van de i -waarde heeft Peck de volgende formule voorgesteld:

$$i = 0,2 \cdot (D + z_0) \quad (G.1)$$

waarin:

D	diameter tunnelbuis	[m]
z_0	dekking boven tunnelbuis	[m]

Deze formule heeft als nadeel dat zij onafhankelijk is van de grondgesteldheid. Aangezien de grondgesteldheid juist een belangrijke invloed heeft op de breedte van de trog is door Peck een grafiek (figuur G.1) opgesteld. Hierin is de waarde van i af te lezen en afhankelijk van de samenstelling van de grond, de diepteligging en afmeting van de tunnel. In een gebied met verschillende grondlagen is het moeilijk in te schatten welke lijn het beste als uitgangspunt kan dienen.

figuur G.1 - relatie tussen afmeting en diepteligging tunnel en de i -waarde

G.2 New & O'Reilly

New & O'Reilly hebben de relatie onderzocht tussen de grondgesteldheid en de zettingstrog. Opvallend is dat de i -waarde onafhankelijk wordt verondersteld van de diameter van de tunnel. Dit wordt onderbouwd door aan te nemen dat op een afstand van één maal de diameter van de tunnel, de diameter van de tunnel geen invloed heeft op de vorm van de zettingstrog.

De waarde van de buigpuntcoëfficiënt i kan volgens New & O'Reilly worden beschreven:

$$i = 0.43 \cdot (z_0 - z) + 1.1 \quad \text{voor cohesieve grond en } 3 \leq z_0 \leq 34 \quad (\text{G.2})$$

$$i = 0.28 \cdot (z_0 - z) - 0.1 \quad \text{voor cohesieve grond en } 6 \leq z_0 \leq 10 \quad (\text{G.3})$$

Vooralsnog werd steeds uitgegaan van een homogene grondopbouw.

Voor een tunnel in een kleilaag met daarboven een zandlaag wordt de volgende formule gegeven:

$$i = 0.43 \cdot z_a + 0.25 \cdot z_b + 1.1 \quad (\text{G.4})$$

Voor een tunnel in een zandlaag met daarboven een kleilaag wordt i met behulp van de volgende formule bepaald:

$$i = 0.28 \cdot z_a + 0.43 \cdot z_b - 0.1 \quad (\text{G.5})$$

G.3 Leach

Leach geeft ook formules voor de bepaling van de i -waarde:

$$i = 0.57 + 0.45 \cdot (z_0 - z) \pm 1.01 \quad \text{voor weinig consolidatie-gevoelige grond} \quad (\text{G.6})$$

$$i = 0.64 + 0.48 \cdot (z_0 - z) \pm 0.91 \quad \text{voor zeer consolidatie-gevoelige grond} \quad (\text{G.7})$$

H Risico-analyse

H.1 risico-analyse 2 x enkelsporig, slurry-schild

H.2 risico-analyse 2 x enkelsporig, EPB-schild

H.3 risico-analyse DOT-methode, slurry-schild

H.4 risico-analyse DOT-methode, EPB-schild

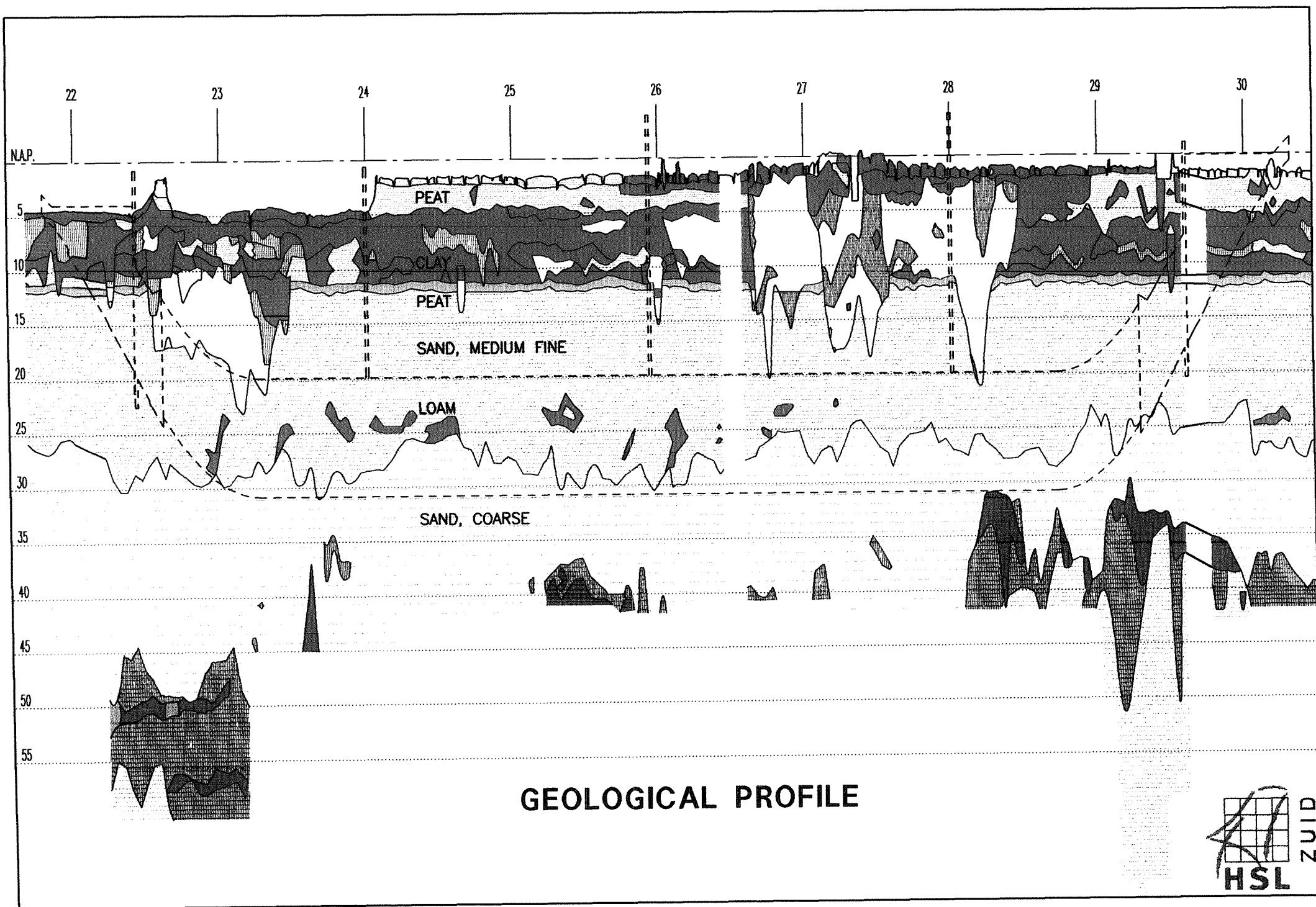
H.5 risico-analyse MF-methode, slurry-schild

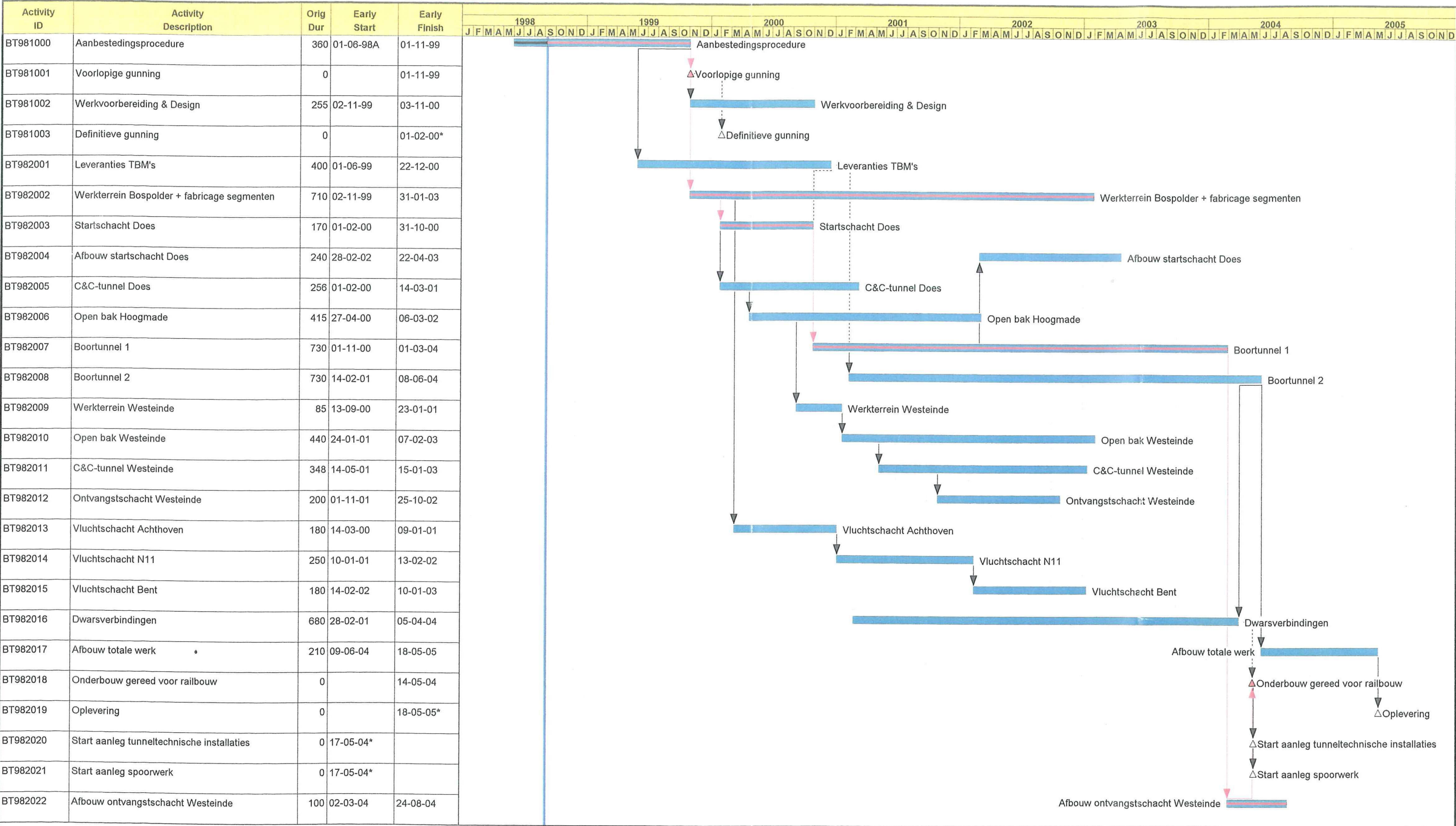
H.6 risico-analyse MF-methode, EPB-schild

I Uitvoeringsplanning

- I.1 Uitvoeringsplanning Referentie Ontwerp**
- I.2 Uitvoeringsplanning DOT - 5 dagen/week; 8 meter/dag**
- I.3 Uitvoeringsplanning DOT - 6 dagen/week; 10 meter/dag**
- I.4 Uitvoeringsplanning DOT - 5 werkdagen; kritiek**
- I.5 Uitvoeringsplanning DOT - 6 werkdagen; kritiek**

J Ontwerp vluchtschacht DOT





Project Start 01-01-96
Project Finish 18-05-05
Data Date 08-09-98
Run Date 05-11-98



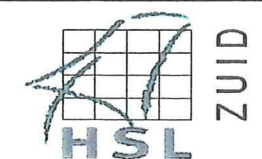
Activity ID	Activity Description	Orig Dur	Early Start	Early Finish	1998												1999												2000												2001												2002												2003												2004												2005																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
					J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N

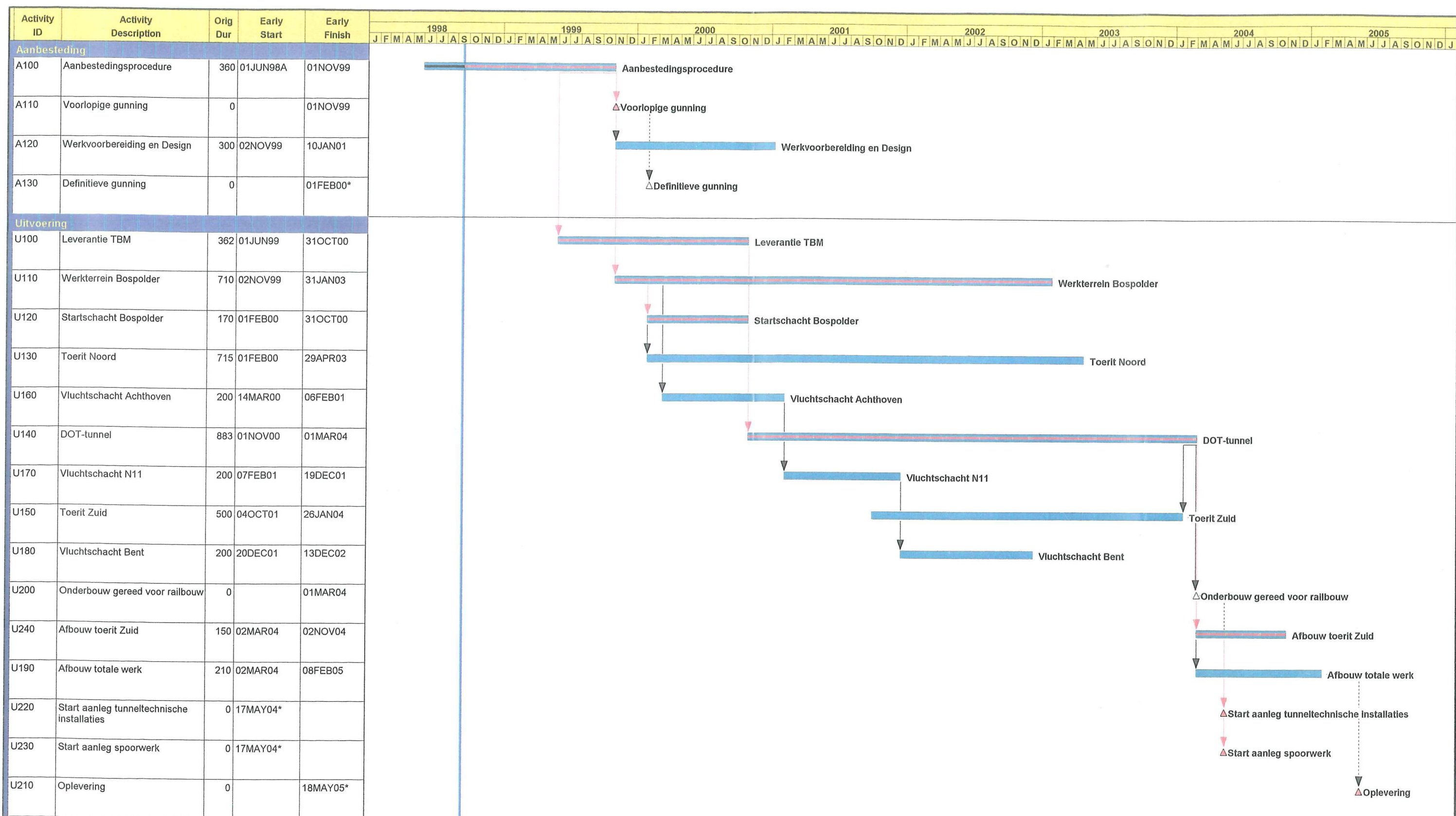
Project Start	01JAN96		Early Bar
Project Finish	18MAY06		Progress Bar
Data Date	18SEP98		Critical Activity
Run Date	26OCT98		

© Primavera Systems, Inc.

Projectorganisatie HSL-Zuid
Uitvoeringsplanning DOT-tunnel
5 dagen/week ; kritieke planning

Sheet 1 of 1





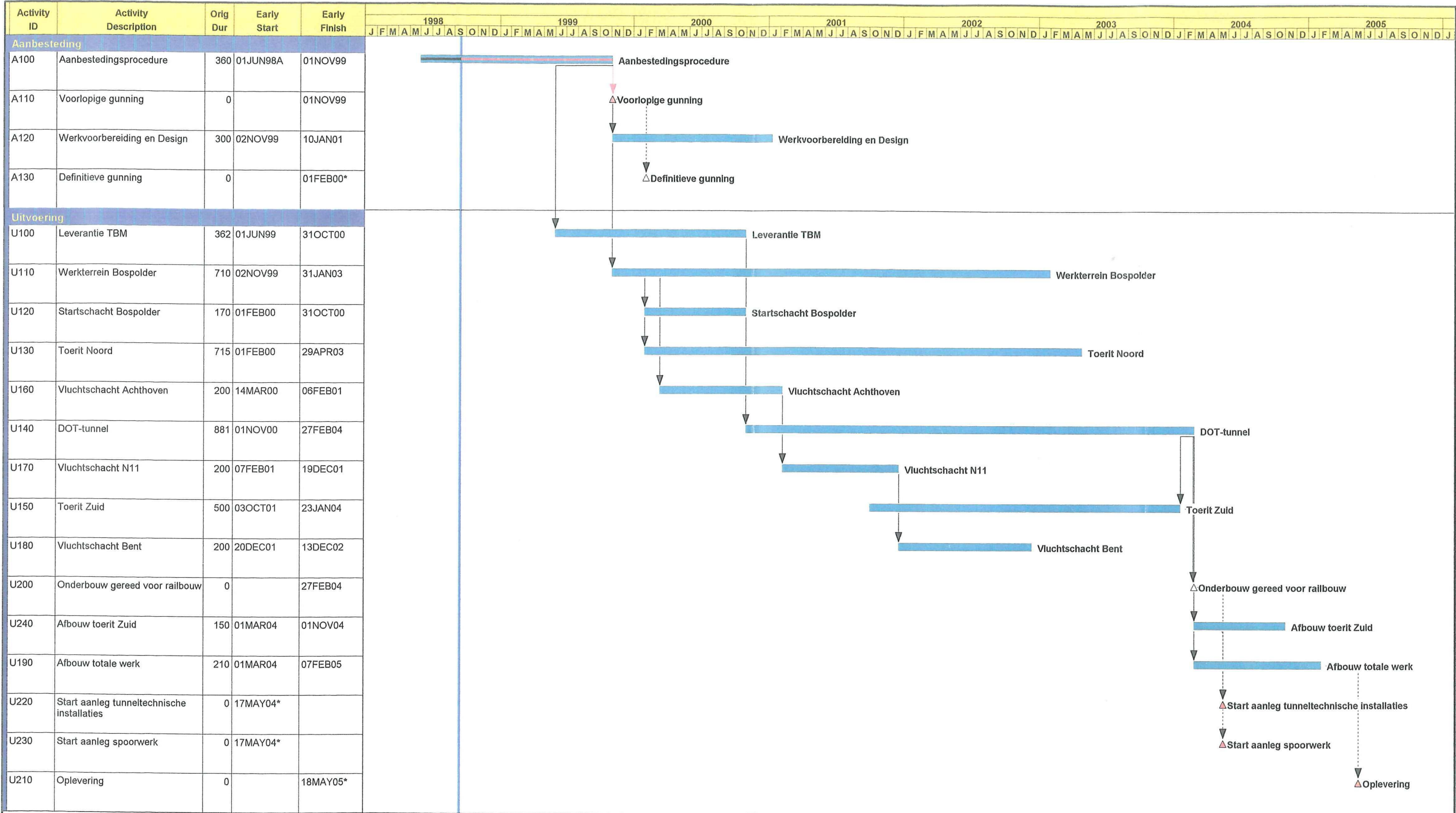
Project Start	01JAN96	 Early Bar
Project Finish	18MAY05	 Progress Bar
Data Date	18SEP98	 Critical Activity
Run Date	26OCT98	

© Primavera Systems, Inc.

Projectorganisatie HSL-Zuid
Uitvoeringsplanning DOT-tunnel
6 dagen/week ; kritieke planning

Sheet 1 of 1





Project Start 01JAN96
Project Finish 18MAY05
Data Date 18SEP98
Run Date 26OCT98

Early Bar
 Progress Bar
 Critical Activity

DOT5

Projectorganisatie HSL-Zuid
Uitvoeringsplanning DOT-tunnel
6 dagen/week ; 10 meter/dag

Sheet 1 of 1

