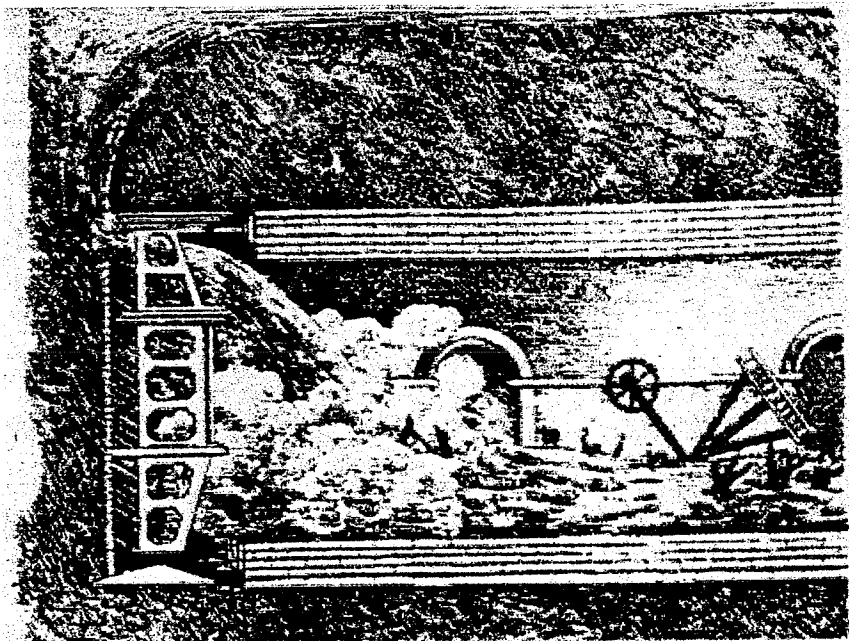

Risicoanalyse van het ontgravingsproces van een hydro- en een EPB-schild

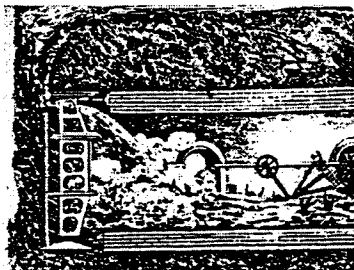


Eindrapport

I.G.H. Piet
juli 1998

Gegevens afstudeeropdracht

Titel	Risicoanalyse van het ontgravingsproces van een hydro- en een EPB-schild		
Startdatum	22 september 1997		
Beoogde einddatum	17 juli 1998		
Bedrijf	Ballast Nedam Engineering (BNE) Afdeling Civiele Techniek Laan van Kronenburg 2 postbus 2118 1180 EC Amstelveen		
Uitvoering opdracht	I.G.H. Piet Rietveld 89 2611 LH Delft	Faculteit Sectie Studienummer	Civiele Techniek, TU Delft Waterbouwkunde 652187
Begeleiding	prof.dr.s ir. J.K. Vrijling prof.ir. E. Horvat ir. W. Broere ir. S.B. de Vries	(TU Delft, waterbouwkunde) (TU Delft, ondergronds bouwen) (TU Delft, geotechniek) (Ballast Nedam N.V.)	



Voorwoord

Voor u ligt het onderzoeksrapport dat het resultaat is van mijn afstudeerproject, uitgevoerd bij Ballast Nedam Engineering, ter afronding van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

Bij het opstellen van mijn probleemstelling ben ik uitgegaan van het rapport van A.E.A de Groot, "Afweging voor het gebruik van het slurry- of EPB-schild". Dit heeft geleid tot de titel die de voorkant van het rapport draagt: "Risikoanalyse van het ontgravingsproces van een hydro- en een EPB-schild." Het neven doel van mijn onderzoek was een link te leggen tussen de wetenschap en de praktijk; door het toepassen van theoretische kennis te komen tot een antwoord dat bruikbaar is in de praktijk.

Graag wil ik mijn afstudeercommissie, bestaande uit prof.dr.ir. J.K. Vrijling, prof.ir. E. Horvat, ir. W. Broere en ir. S.B. de Vries van harte bedanken voor het mogelijk maken van deze opdracht, hun begeleiding en hun opbouwende kritiek

Via deze weg wil ik tevens alle medewerkers en afstudeerders van Ballast Nedam Engineering bedanken voor hun adviezen, collegialiteit en de prettige werksfeer waaraan zij hebben bijgedragen. Met name de lunches met de YEP (Young Engineers Platform) en deelname in het gemengde team Ballast Nedam - Citibank hebben mij de mogelijkheid gegeven nader kennis te maken met het bedrijf. In het bijzonder wil ik nog diegenen bedanken die bij het project betrokken waren, Adamfo de Groot, William van Niekerk, Joost Joustra en de geënuqueterden voor hun inhoudelijke bijdrage aan het onderzoek.

Amstelveen, juli 1998
Isolde Piet

SAMENVATTING

De fascinatie voor de ondergrondse ruimte heeft reeds menigeen geïnspireerd tot het verrichten van onderzoeken of praktijkproeven en het schrijven van artikelen of boekwerken. Deze scriptie haakt in op een eerder uitgevoerd onderzoek door A.E.A. de Groot, getiteld "Afweging voor het gebruik van het slurry- of EPB-schild". In dat onderzoek heeft hij een model opgesteld op basis waarvan men een afweging kan maken en tot een keuze voor een boormethode kan komen door toetsing aan de aspecten: boorfrontondersteuning, gronddeformaties, afgraafbaarheid, instroming van water, scheiding, hergebruik en energie.

Uit dit eerdere onderzoek blijkt dat beide methodes elkaar qua inzetbaarheid voor een groot deel overlappen. In een dergelijke situatie rijst de vraag welk schild het best ingezet kan worden. Het doel van het onderzoek is een bijdrage te leveren aan het antwoord op deze vraag.

Om tot een keuze van een boormethode te komen wordt in eerste instantie gewogen op de technische inzetbaarheid. Indien beide methodes inzetbaar zijn zal een tweede afweging worden gedaan, die gebaseerd is op de totale kosten. Hieronder wordt verstaan de directe kosten, als bijvoorbeeld ruwbouw en de indirecte kosten, zoals risico's. Dit laatste aspect is verder uitgediept door het uitvoeren van een risicoanalyse.

Voor de risicoanalyse zijn als uitgangspunten genomen:

- Er wordt alleen een analyse gemaakt van de bouwfase,
- Als topgebeurtenis is gekozen om het aspect zettingen verder uit te werken,
- Van de zettingen zal alleen gekeken worden naar incidenteel optredende zettingen t.g.v. het boorfront,

Van de zettingen zijn foutenbomen opgesteld, waaruit een risico-itemlijst naar voren is gekomen. In deze lijst wordt per aspect aangegeven wat de afwijking is die op kan treden, wat de gevolgen ervan zijn en welke maatregelen men zou kunnen nemen om de afwijking te voorkomen of het effect ervan te minimaliseren.

Om een analyse te maken en een waardering te geven aan risico's is gekozen voor het betrekken van een case bij het onderzoek: de Noordzuidlijn. Er is gekozen voor deze case, omdat dit een traject is waarop beide methodes inzetbaar zijn en erg actueel is. Daarnaast is het tracé risicoteknisch gezien interessant om verder uit te werken.

Om een afweging te maken kan men gebruik maken van een combinatie van meningen van experts, raadplegen van literatuur en het uitvoeren van computersimulaties. De risico-itemlijst is verwerkt tot een enquête. Deze enquête is voorgelegd aan experts. Aan hun is gevraagd kansen in te schatten dat een bepaalde gebeurtenis optreedt en daarbij schade aan het maaiveld tot gevolg heeft. Deze gegevens zijn vervolgens verwerkt met het programma @RISK. Als resultaat is naar voren gekomen, dat het hydroschild de grootste kans heeft, namelijk 30% tegenover 10% voor het EPB-schild, op geheel geen schade aan het maaiveld en dat indien men uitgaat van kans op enkele schadegevallen ook dit het gunstigste is bij het hydroschild. Het blijkt echter wel dat de resultaten sterk afhankelijk zijn van de toegepaste rekenmethode.

Aspecten die uit de enquête naar voren zijn gekomen bij het hydroschild (in volgorde van belangrijkheid):

- onregelmatigheden in boorproces, die variatie in steundruk tot gevolg hebben
- een onnauwkeurig controle- en regelsysteem:
- passage van een grenslaag
- verkleving aan graafwiel
- toename waterspanningen voor boorfront
- aanwezigheid van een onbekend gangenstelsel

Aspecten die uit de enquête naar voren zijn gekomen bij het EPB-schild (in volgorde van belangrijkheid):

- een onnauwkeurig controle- en regelsysteem
- onregelmatigheden in boorproces, die variatie in steundruk tot gevolg hebben
- problemen bij het verkrijgen van een goede vervormbare brij
- verkleving aan graafwiel
- toename waterspanningen voor boorfront (bij schuiminjectie)
- passage van een grenslaag

Problemen die de aandacht verdienen en waar onderzoek naar kan worden gedaan zijn beheersing van de steundrukken en nauwkeurigheid van de metingen. De oplossing kan gezocht worden in verbetering van de huidige methodes of het opstellen/aanbrengen van mitigerende maatregelen.

Bij nadere bestudering van de verschillende aspecten is gebleken dat de minste risico's optreden indien men het schild in die grond inzet, waarin hij het best functioneert. Daarnaast bleek uit de enquête dat de kans op schade tijdens stilstand zeer klein is. Het huidige idee van projectbureau Noordzuidlijn voor de ontwikkeling van een zgn. varioschild¹ (figuur 6.7, figuur 6.8) sluit hierbij aan.

N.B.: Men zou deze enquête direct voor uitvoering en na uitvoering van het project nog eens moeten doen om de betrouwbaarheid van de gebruikte methode te bepalen. Daarnaast zullen door toename van ervaring in het tunnelboren in de toekomst de resultaten van het onderzoek waarschijnlijk veranderen.

Tot slot zijn er nog alternatieven aangedragen waarmee de analyse zou kunnen worden aangevuld. Deze zijn kort toegelicht: een afweging op basis van meetgegevens en het opstellen van een driedimensionaal computermodel.

¹ Een varioschild is een schild dat tijdens het boren kan worden omgebouwd van EPB naar hydro mode

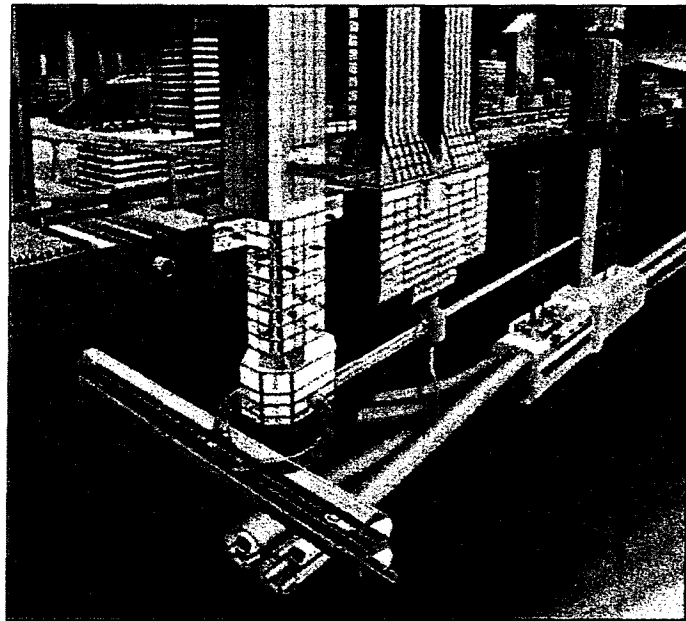
Inhoudsopgave

GEGEVENS AFSTUDEEROPDRACHT	i
VOORWOORD.....	iii
SAMENVATTING.....	v
HOOFDSTUK 1 INLEIDING.....	2
1.1 WAAROM ONDERGRONDS.....	2
1.2 PROBLEEMSTELLING.....	3
1.3 DOELSTELLING	3
1.4 RAPPORTINDELING	4
HOOFDSTUK 2 BOORTUNNELS IN NEDERLANDSE ONDERGROND.....	6
2.1 PRINCIPE VAN DE BOORTUNNEL.....	6
2.1.1 <i>Inleiding</i>	6
2.1.2 <i>De bouw van de tunnel</i>	8
2.1.3 <i>Boren in Nederlandse bodem</i>	12
2.2 TOEPASSING STEUNDRUK	13
2.2.1 <i>Grenzen van de steundruk</i>	13
2.2.2 <i>Boorfrontondersteuning hydroschild</i>	18
2.2.3 <i>Boorfrontondersteuning EPB-schild</i>	20
2.3 AFWEGINGSMODEL HYDRO-EPB	23
2.3.1 <i>Inzetgebied hydroschild</i>	24
2.3.2 <i>Inzetgebied EPB-schild</i>	25
2.3.3 <i>Keuze EPB-/hydro-schild</i>	26
2.4 VOORTZETTING VAN HET ONDERZOEK	30
HOOFDSTUK 3 ONTGRAVINGSPROCES HYDRO-SCHILD	34
3.1 WERKING EN EIGENSCHAPPEN VAN DE BENTONIET	34
3.1.1 <i>Opbouw van bentoniet</i>	34
3.1.2 <i>Eigenschappen van bentoniet</i>	35
3.1.3 <i>Ladingseigenschappen van bentoniet</i>	37
3.2 INDRINGING VAN DE BOORVLOEISTOF	38
3.2.1 <i>Indringingsproces</i>	38
3.2.2 <i>Toevoegingen aan de bentoniet</i>	40
3.3 TRANSPORT VAN DE SLURRY	42
3.3.1 <i>Het ontgraafproces</i>	42
3.3.2 <i>Afvoer van de slurry</i>	43
3.3.3 <i>Scheiding van de slurry</i>	43
HOOFDSTUK 4 ONTGRAVINGSPROCES EPB-SCHILD	46
4.1 CONDITIONERING VAN DE GROND IN EEN EPB-SCHILD.....	46
4.1.1 <i>Conditioneringsmiddelen</i>	46
4.1.2 <i>Eigenschappen van schuim, tensiden</i>	49
4.1.3 <i>Schuim als conditioneermiddel</i>	52

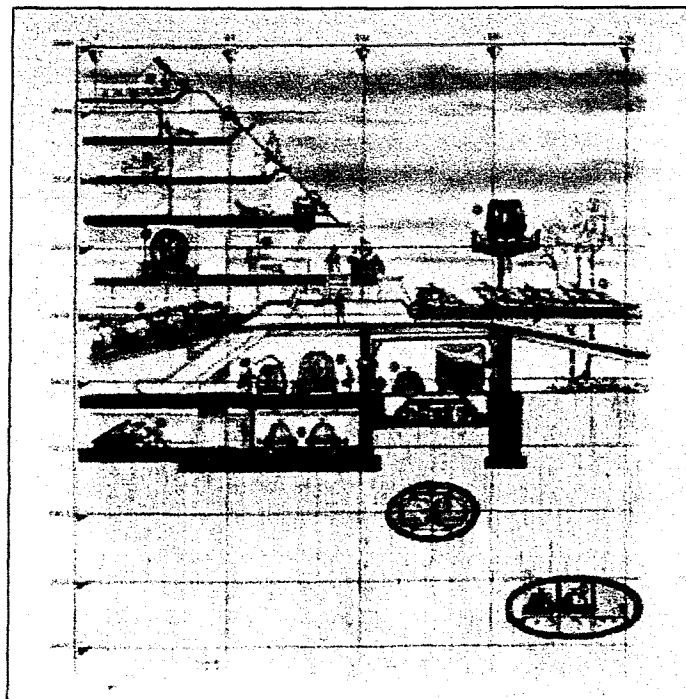
4.2 TRANSPORT VAN DE GRONDBRIJ	54
4.2.1 Het graafproces	54
4.2.2 Afvoer van de grondbrij.....	55
4.2.3 Verwerking van de grondbrij.....	57
HOOFDSTUK 5 DE RISICOANALYSE.....	58
5.1 INLEIDING.....	58
5.2 RISICOANALYSE	59
5.2.1 Wat is risico ?.....	59
5.2.2 Wat is risicoanalyse?	60
5.3 DE UITWERKING VAN DE RISICOANALYSE.....	64
5.3.1 Inleiding	64
5.3.2 Risicoanalyse van het noord/zuid-lijn project	65
5.3.3 Stappenproces (1 ^e fase)	67
5.3.4 Foutenboom (2 ^e fase).....	69
5.3.5 Risico-itemlijst (3 ^e fase).....	78
6 ENQUÊTE	80
6.1 TOPGEBEURTENIS "ZETTINGEN"	80
6.1.1 Zettingen van gebouwen.....	80
6.1.2 Zettingen t.g.v. het boren.....	81
6.2 OPZET VAN DE ENQUÊTE.....	83
6.2.1 Waarderingsstelsel.....	84
6.2.2 Enquêteresultaten.....	85
6.3 CONCLUSIE/ AANBEVELING	89
HOOFDSTUK 7 ALTERNATIEVE / AANVULLENDE AFWEGINGSMETHODEN	92
7.1 INLEIDING.....	92
7.2 STREEFWAARDE VAN DE STEUNDRUK.....	92
7.2.1 Streefwaarde vanuit meetgegevens.....	94
7.2.2 Streefwaarde m.b.v een model.....	96
7.3 ONZEKERHEDEN EN TOEPASBAARHEID VAN EEN STREEFWAARDE.....	99
7.3.1 Onzekerheden.....	99
7.3.2 Toepasbaarheid.....	102
HOOFDSTUK 8 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	104
HOOFDSTUK 9 DISCUSSIE	106
LITERATUURLIJST	108
VERKLARENDE WOORDENLIJST.....	111

BIJLAGEN:

Bijlage I: Tracébeschrijving NZ-lijn	B 2
Bijlage II: Stappenproces	B 6
Bijlage III: Schema globale risicoanalyse	B 12
Bijlage IV: Enquête	B 20
Bijlage V: Resultaat enquête	B 26



figuur 1.1: artist impression van ondergronds ruimtegebruik I [44]



figuur 1.2: artist impression van ondergronds ruimtegebruik II [44]

HOOFDSTUK 1 Inleiding

1.1 Waarom ondergronds

Nederland is groeiende, zowel op het gebied van het aantal inwoners en de economie als op het vlak van technologische ontwikkelingen. Het groeiende inwonertal brengt de nodige planologische problemen met zich mee. De infrastructuur en de ruimtelijke ordening dienen voortdurend te worden aangepast aan de behoeftes van de bevolking. Nieuwe gebouwen en woningen verrijzen en bestaande infrastructuur wordt geherstructureerd en uitgebreid. Deze bouw gaat gepaard met de vraag in hoeverre men door kan bouwen zonder dat de kwaliteit van milieu en leefbaarheid wordt aangetast. Deze houding heeft geleid tot een toenemende belangstelling voor ondergronds bouwen.

Uit onderzoek¹ [8] is gebleken dat met name infrastructuur en opslag zich lenen voor ondergrondse toepassingen. Vooral drukke stedelijke gebieden en landschappelijk waardevolle gebieden worden aangedragen als projectgebieden voor ondergronds bouwen. (Zie figuur 1.1 en figuur 1.2). Voorbeelden van projecten zijn de Koningstunnel in Den Haag, ondergronds station Rotterdam Blaak en de "winkelgoot" in Rotterdam.

Met de start van de tweede Heinenoordtunnel is een stap gezet naar een moderne uitvoeringstechniek van de tunnels: de boormethode. Sinds de eerste toepassing van een luchtdrukschild door Greathead in 1869 heeft de ondergrondse graaftechniek een ontwikkelingsproces ondergaan, waardoor het in deze tijd mogelijk is onder moeilijke omstandigheden te boren zoals in slappe gronden onder het grondwaterniveau en te voldoen aan de minimale zettingseisen. In het buitenland, bijvoorbeeld Frankrijk en Japan, zijn reeds meerdere geboorde tunnels gerealiseerd en heeft men al een behoorlijke dosis ervaring op dit gebied verkregen. Om deze ervaring ons eigen te maken zijn in Nederland twee pilotprojecten aangewezen: de Tweede Heinenoord is het eerste proefproject in Nederlandse bodem; binnenkort zal met de Botlektunnel worden gestart. Beide projecten hebben als doel ervaring op te doen in de boortechniek voor toekomstig uit te voeren projecten.

De fascinatie voor de ondergrondse ruimte heeft reeds menigeen geïnspireerd tot het verrichten van onderzoeken of praktijkproeven en het schrijven van artikelen of boekwerken. Deze scriptie haakt in op een onderzoek dat eerder is verricht door A.E.A. de Groot, getiteld "Afweging voor het gebruik van het slurry- of EPB-schild. [4]. In dat onderzoek heeft hij een aanzet gegeven tot een afwegingsmodel voor het gebruik van het hydro- en EPB-schild in de Nederlandse bodem op basis van technische aspecten. De factoren waarop de afweging kan worden gemaakt zijn: boorfrontondersteuning, gronddeformaties, afgraafbaarheid (snijden, obstakels en verkleving), instroming van water, scheiding, hergebruik en energie. Het model is vervolgens getoetst aan een praktijkgeval, de 2^e Heinenoord tunnel. Uit onderzoek is gebleken dat beide methodes elkaar qua inzetbaarheid voor een groot deel overlappen. In een dergelijke situatie rijst de vraag voor welke methode men kiest en op basis van welke aspecten men die keuze maakt. De achtergronden hiervan zijn uitgewerkt in paragraaf 2.4.

¹ Strategische studie, TUD-COB, Rijksplanologische Dienst

1.2 Probleemstelling

Een conclusie uit het onderzoek van De Groot [2] is dat er een groot gebied bestaat binnen het model, waarin beide boormethodes toepasbaar zijn op grond van de onderzochte aspecten. Er is slechts globaal gekeken naar de technische aspecten, waardoor enkele technische problemen, die van doorslaggevende betekenis zouden kunnen zijn, niet zijn behandeld. Tevens is er binnen het model geen rekening gehouden met de kosten en de maatschappelijke aspecten. Het resultaat is dat het model in zijn huidige vorm niet voldoet om een keuze te maken voor een Hydro- of een EPB-schild.

Welk schild zet men in, indien beide boormethodes technisch inzetbaar zijn?

1.3 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het analyseren van de risico's die de keuze voor een hydroschild of een EPB-schild met zich meebrengt. Er zal naar het ondersteuningsmechanisme, het transport en de verwerking van de grondbrij worden gekeken van zowel het EPB- als het hydroschild voor een grondsoort, die in het overlappende deel van het inzetgebied van beide schilden valt. Eén aspect zal worden uitgelicht en verder worden uitgewerkt.

De resultaten van het onderzoek zullen een bijdrage leveren aan de keuze voor de inzet van een EPB- of hydro-schild. Daarnaast zal worden aangetoond welke mogelijkheden er zijn tot gebruik van een risicoanalyse als afwegingsmethode en stuurmiddel in het proces.

1.4 Rapportindeling

Dit onderzoek haakt in op een eerder uitgevoerd onderzoek, dat tot de ontwikkeling van een afwegingsmodel voor beide boormethodes heeft geleid. In hoofdstuk 2 zal eerst de basisprincipes van de boortechniek worden toegelicht. Tevens zullen de hoofdlijnen van dat afwegingsmodel worden behandeld. Dit bestaat uit een opsomming van de afwegingsfactoren met een korte uitleg van wat de invloed van de factor is binnen de afweging. Het geheel heeft geresulteerd in een korrelverdelingsdiagram, waarin aangegeven is binnen welke grenzen de methodes toepasbaar zijn voor verschillende grondsoorten.

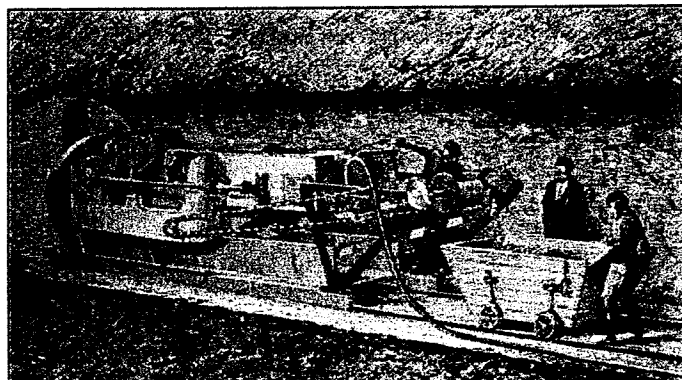
In paragraaf 2.4 is uitgelegd hoe het onderzoek van het afwegingsmodel zal worden voortgezet: Na de eerste afweging op basis van globale technische aspecten, wordt een afweging op basis van kosten en risico's gemaakt. De motieven achter de keuze om de risico's uit te werken worden uiteengezet en nader toegelicht in hoofdstuk 5.

In de tussenliggende hoofdstukken 3 en 4 worden de twee boormethodes behandeld om een idee te geven van de processen. Eerst wordt het werkingsprincipe van het schild behandeld. Hierbij zal uitgebreid worden ingegaan op de methode van conditionering: voor het hydroschild zal het bentoniet worden behandeld, voor het EPB-schild zal werking van het schuim worden uitgelegd. Vervolgens zal de ontgravingswijze worden behandeld.

In hoofdstuk 5 zijn de processen van beide boormethoden stapsgewijs opgesplitst tot stappenschema's. Vervolgens wordt een risicoanalyse van de twee schildtypen gemaakt. Dit resulteert in een cascade van foutenbomen, waaruit een risico-itemlijst gedestilleerd kan worden.

De risico-itemlijst dient als basis voor de enquête, die gebruikt zal worden om een vergelijking te maken tussen EPB- en hydroschild. Om de risico's een waardering te kunnen geven is gekozen voor een case-studie: de Noord-Zuidlijn. De meest ongewenste gebeurtenis in deze case is zettingen. De resultaten van de enquête zijn verwerkt in hoofdstuk 6.

In hoofdstuk 7 worden alternatieve methoden aangestipt om tot een afweging te komen, waarbij wordt uitgegaan van zettingen als ongewenste gebeurtenis. Tot slot worden in hoofdstuk 8 de conclusies en aanbevelingen gegeven. Ter afronding van het onderzoek wordt in hoofdstuk 9 een terugkoppeling gemaakt naar de doelstelling die in hoofdstuk 1 is gedefinieerd.



figuur 2.1: t.b.m. anno 1860 [44]



figuur 2.2: t.b.m. anno 1995 [44]

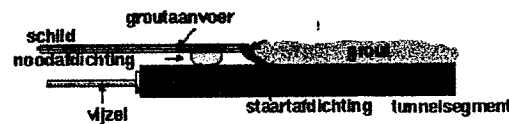
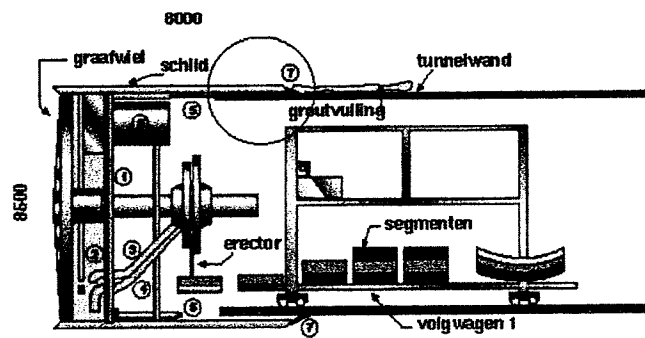
HOOFDSTUK 2 Boortunnels in Nederlandse ondergrond

2.1 Principe van de boortunnel

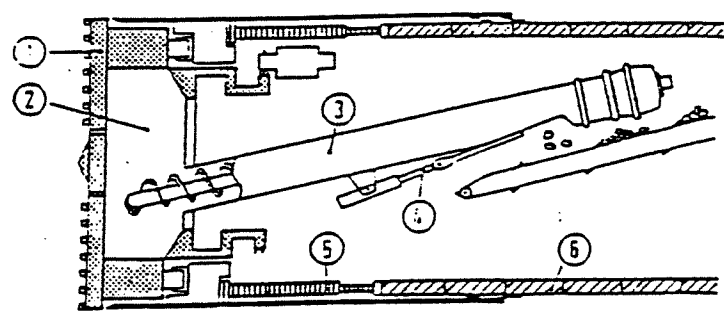
2.1.1 Inleiding

TBM's bestaan er in verschillende uitvoeringen, die ontwikkeld zijn in de loop der jaren. (Zie *figuur 2.1 en figuur 2.2*). De eerste grondslagen van het **vloeistofschild** zijn gelegd door Greathead. Hij stelde voor om het boorfront te ondersteunen met water, de grond te verwijderen door het losspuiten van de grond met water en het vervolgens hydraulisch te transporteren. Pas in de jaren zestig is het idee ontstaan het water te vervangen door bentoniet om een betere ondersteuning te krijgen aan het front. Het eerste slurryschild werd in 1967 ingezet in Japan, het eerste hydroschild in Duitsland zes jaar later. [34] Het hydroschild maakt gebruik van een bentoniet-suspensie om het boorfront te ondersteunen. Terwijl de bentoniet in het boorfront dringt en een afsluitende laag vormt, graaft de machine zich naar voren en wordt de ontgraven grond afgevoerd. Het hydroschild onderscheidt zich van het slurryschild door de luchtkamer. Deze luchtkamer werkt als een grote veer, die de variaties in de steundruk aan het boorfront dempt. (zie *figuur 2.3: boven*) De druk kan gemakkelijk en nauwkeurig worden aangepast en op constante waarde worden gehouden zonder grote schommelingen in de druk. Ter vergelijking: lucht is 15.000 maal zo compressibel als water.

De **gronddrukbalansschilden**, ook wel Earth-Pressure-Balance-shield (EPB) genoemd, zijn voor het eerst ontwikkeld in Japan. De EPB-schilden hebben er de voorkeur boven slurryschilden, dit in tegenstelling tot Europa, waar het slurryschild zich in een grotere belangstelling mag verheugen. Hoewel de Nederlandse grondcondities meer op de Japanse grond lijken dan bijvoorbeeld de Duitse bodem, is voor de eerste geboorde tunnel gekozen voor een hydro-schild. Voor het tweede proefproject, de Botlektunnel is gekozen voor het EPB-schild. Het EPB-schild gebruikt de ontgraven grond als ondersteuningsmiddel van het boorfront. (*figuur 2.3: onder*). De steundruk aan het boorfront kan worden gereguleerd met de ingaande en uitgaande grondhoeveelheid, dus door de graafsnelheid en de rotatiesnelheid van de transporteur.



- druk wand
- duik wand
- loevoer bentoniet
- zuigmond; afvoer
- bentoniet/grond
- aandrukvijzels
- luchtsluis
- staartafichting
- luchtkussens



- ① Graafwiel
- ② Grondbrij
- ③ Schroefvijzel
- ④ Afsluitklep
- ⑤ Hydraulische vijzels
- ⑥ Tunnelmantel

figuur 2.3: Hydroschild (boven) [44]²

EPB-schild (onder) [34]

² Foto toont hydroschild, geen slurryschild

2.1.2 De bouw van de tunnel

Het bouwproces

Geboorde tunnels worden in het algemeen gebouwd in trajectdelen, die steeds tussen toegangen als schachten of voldoende diep gelegen open inritten zijn gesitueerd. (Zie figuur 2.4). De schachten kunnen worden gebouwd als bouwput, als open caisson of als luchtdrukcaisson. De afmetingen van de schacht worden in eerste instantie bepaald door de gebruiksfase. Meestal zal echter de in de bouwfase benodigde ruimte groter zijn en daarmee de schachtafmeting bepalen.[15]

Een TBM heeft vier hoofdfuncties om de tunnel te realiseren [4]:

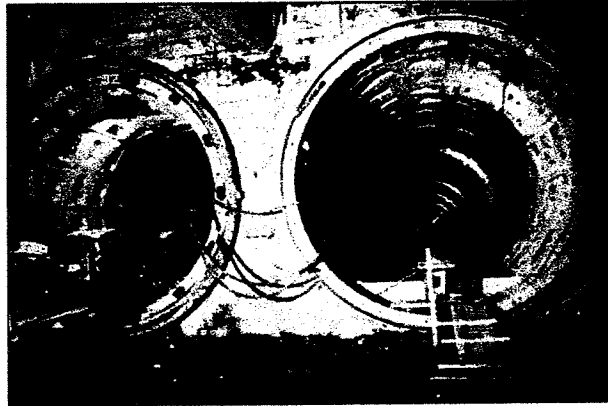
- de ontgravings- en afvoerfunctie:
- de tijdelijke grondondersteuningsfunctie
- de tunnelbouwfunctie
- de waterdichtingsfunctie:

Aan de voorkant van het schild wordt de grond ontgraven en afgevoerd tot naar het maaiveld. (figuur 2.5). Tevens wordt aan het front de grond en het grondwater gekeerd, typerend voor de Nederlandse condities. Het hydroschild en het EPB-schild zijn hiertoe beide voorzien van een gesloten graaffront. De machine bestaat verder uit een stalen omhulsel ter kering van de grond en grondwater. Aan de achterkant van het schild wordt de tunnelmantel samengesteld. De tunnelmantel is meestal circelvormig, zodat de segmenten voornamelijk alleen op druk worden belast. De segmenten kunnen worden gemaakt van staalvezelversterkt beton, maar over het algemeen worden ze gemaakt van gewapend beton. De segmenten worden aangevoerd vanuit het reeds gerealiseerde tunneldeel en worden direct achter het schild geplaatst. Voordat de elementen kunnen worden geplaatst dienen de vijzels te worden ingetrokken. Nadat een complete ring is aangebracht kunnen de vijzels worden afgezet tegen de nieuw gevormde ring. De ruimte buiten de mantel die door oversnijding is ontstaan wordt opgevuld met grout.

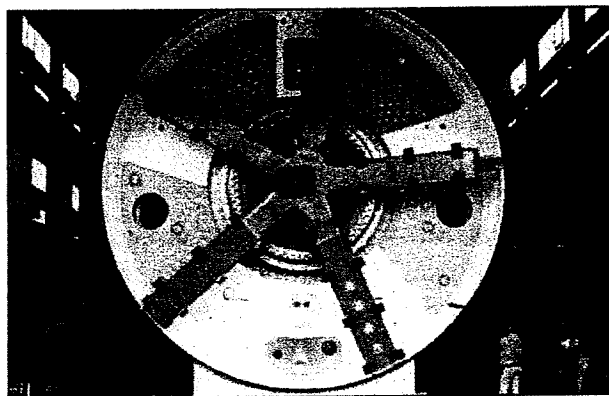
De functie van het ondersteuningsmedium is tweeledig: naast de waterafdichtende functie, die moet voorkomen dat het grondwater naar binnen kan dringen, heeft het ondersteuningsmedium een grondkerende functie. Door de steundruk aan het boorfront zoveel mogelijk overeen te laten komen met de initiële gronddruk kunnen de volgende bezwijkmechanismen worden voorkomen:

- lokaal bezwijken van het front: instorten korrelskelet
- globaal bezwijken: afschuiven van de grondwig
- blow-out: piping
- oplichten van de dekking; vervorming van de grond op maaiveld

De toepassing van de steundruk wordt uitgelegd in de volgende paragraaf.



figuur 2.4: tunnel gezien vanuit schacht [44]



figuur 2.5: vooraanzicht schild [44]

Tunnel ontwerp

Het constructieve ontwerp van de boortunnel wordt bepaald door de functionele en technische eisen. [4]. De functionele eisen worden bepaald door de gebruiker, de technische eisen worden opgelegd door de randvoorwaarden. De functionele eisen bepalen de maatvoering van de tunnel in tracéverloop, in dwarsdoorsnede en in diepteligging. Daarnaast kunnen verscheidene factoren voor het tracé van invloed zijn: boormethode, bebouwing, paalfunderingen, natuurlijke randvoorwaarden (een waterloop bijvoorbeeld) of bestaande (ondergrondse) infrastructuur. De technische eisen zijn van belang voor de diepteligging van de tunnel. De diepteligging bepaalt de lengte van de op- en afritten en daarmee de totale lengte van de tunnel en de totale kosten. De minimale dekking van de tunnel wordt bepaald door de mechanismen:

		<i>bouwfase</i>	<i>gebruiksfase</i>
1. opdrijven	(figuur 2.6)	+	+
2. blow-out	(figuur 2.7)	+	-
3. ovaliseren		+	+

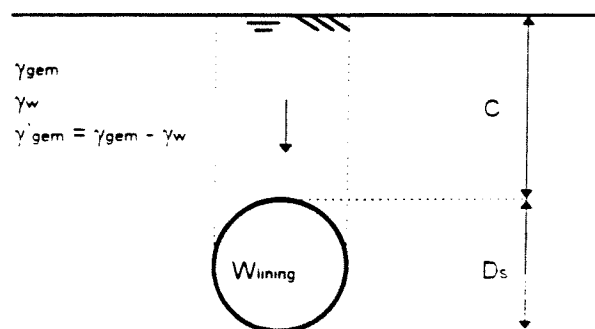
ad 1) Opdrijven (figuur 2.6)

Het gewicht van de bovenliggende grond, tezamen met het gewicht van de lining moet de oprijvende kracht tegengaan. De oprijvende kracht wordt bepaald m.b.v. de wet van Archimedes, eventueel vermeerderd met een wateroverspanning ter plaatse van de tunnel ten opzichte van freatisch vlak:

$$\frac{\frac{1}{1,1} [(CD_s + (D_s^2 \frac{1}{8} (4 - \pi))) \gamma_{gem} + 0,9 W_{lining}]}{\frac{1}{4} \pi D_s^2 \gamma_w + \sigma_{w,sp} D_d} \geq 1,0$$

waarin:

C	= gronddekking boven schild	[m]
D_d	= tunneldoorsnede tpv afsluitende laag	[m]
D_s	= diameter van het schild	[m]
γ_{gem}	= gemiddeld volumegewicht gronddekking	[kN/m ³]
γ_w	= volumegewicht grondwater	[kN/m ³]
$\sigma_{w,sp}$	= wateroverspanning	[kN/m ³]
W_{lining}	= gewicht van de lining	[m]



figuur 2.6: Oprijfmechanisme tunnel

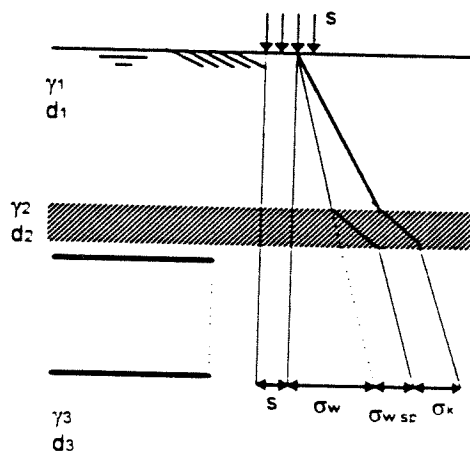
ad 2) Blow-out (figuur 2.7)

Wanneer de steundruk aan het boorfront groter is dan de verticale grondspanning, vermeerderd met de bovenbelasting, aan de bovenzijde van het schild, ontstaat er een blow-out. Bij een water ondoorlatende laag wordt de maximale steundruk verminderd met de wateroverdruk: [4]

$$\sigma_{\text{steun,max}} = \frac{1}{1,1} \sum [\gamma_i \delta_i] + 0,9 S - \sigma_{w,sp}$$

waarin

d_i	=	dikte grondlaag i	[-]
S	=	belasting op maaiveld	[kN/m ²]
γ_i	=	volumiek gewicht grondlaag i	[kN/m ³]
$\sigma_{\text{steun,max}}$	=	maximale steundruk	[kN/m ²]
$\sigma_{w,sp}$	=	spanningswaterdruk	[kN/m ²]



figuur 2.7: maximale steundruk [4]

Naast overschrijding van de steundruk kan een blow-out optreden door een perforatie. Ter plaatse van een zwakke plek in de ondergrond t.g.v. bijvoorbeeld een sondering zoekt de bentoniet de weg van de minste weerstand: naar boven.

Ad 3) Ovaliseren

Ovaliseren ontstaat als er geen evenwicht bestaat tussen de spatkrachten in de lining ten gevolge van de normaalkracht (O_{tot}) en de resulterende grondbelasting op de lining. De lining wordt ovaal van vorm en bezwijkt. Er kan zowel horizontale als verticale ovale vervorming optreden. In de praktijk blijkt dat deze vorm van bezwijken niet maatgevend is voor het ontwerp van de tunnel, indien een dekking wordt gerealiseerd welke voldoende is om opdrijven te voorkomen. [29]. Slechts in uitzonderingssituaties dient een controleberekening te worden gedaan.

2.1.3 Boren in Nederlandse bodem

Een belangrijke randvoorwaarde voor de tunnel wordt opgelegd door de geotechnische condities. Indien men in Nederlandse bodem een tunnel aanlegt, bevindt deze zich in het holoceen en/of pleistoceen. Beide afzettingen zijn ontstaan tijdens de kwartaire periode. Deze periode werd gekarakteriseerd door warme en koude perioden. Onder invloed van de afwisselende werking van landijs, sneeuw, wind, rivieren en/of zee zijn dikke pakketten gevormd, bestaande uit grind, zand, klei, leem enz. Het bovenste deel van het pleistocene pakket bestaat voornamelijk uit zandlagen, waaraan de meeste funderingen hun draagkracht ontlenuen. Het holoceen kenmerkt zich door de vaak slappe, samendrukbare kleilagen, soms afgewisseld met een zand- en/of veenlaag, ontstaan door diverse sedimentafzettingen van zee en rivieren. Deze wisselingen in grondopbouw en grondeigenschappen maken een grondonderzoek voor aanvang van constructiewerkzaamheden noodzakelijk. Onverwachte grondcondities kunnen het functioneren van een TBM verstoren of bemoeilijken. Een gedegen grondonderzoek zegt veel over de samenstelling en gedragingen van de grond en kan verrassingen voorkomen.

De Nederlandse bodem kenmerkt zich naast een **gelaagdheid van slappe gronden door een hoge grondwaterstand**. Toch zijn dit geen belemmeringen voor het aanleggen van ondergrondse constructies. Door het bepalen van de overload factor (OF), kan snel worden bepaald of het front al dan niet ondersteund dient te worden. (Zie tabel 2.1 [1]). De overload factor is een maat voor de **standtijd** van de grond; dit is de tijd waarin ongesteunde grond aan het boorfront niet bezwijkt.

Tabel 2.1: Overload Factor [29]

Overload Factor: $O.F. = \sigma_v / C_u$	Vereiste ondersteuning
1-2	ongesteunde ontgraving
2-5	alleen ondersteuning tunnelgat
>5	volledige ondersteuning, incl. graaffront

De Nederlandse grondcondities, een combinatie van een hoge grondwaterstand en een lage ongedraineerde schuifsterkte leiden tot een hoge overload factor. Voor de holocene en pleistocene zanden geldt dat er in het geheel geen samenhang is, vooral als deze zanden verzadigd zijn met water. In zand is ondersteuning dan ook altijd noodzakelijk. Omdat de kleien over het algemeen onvoldoende sterk en stijf zijn en de zandlagen watervoerend, kan geconstateerd worden dat in Nederlandse bodem altijd een schild nodig zal zijn bij het boren. Slechts de homogene, diep gelegen pleistocene lagen zouden een standtijd kunnen hebben die groot genoeg is om met een open schild te boren.

2.2 Toepassing steundruk

2.2.1 Grenzen van de steundruk

De toe te passen steundruk is belangrijk voor de stabiliteit van het boorfront. Een boorfront is stabiel zolang de grenzen van minimale en maximale steundruk niet worden overschreden. Voor het bepalen van de maximale en minimale steundruk zijn veel verschillende rekenmethodes ontwikkeld, gebaseerd op verschillende aannamen en uitgangspunten. Een algemeen toepasbaar model is nog niet opgesteld en van de reeds ontwikkelde modellen is niet duidelijk in hoeverre ze juist zijn. Naar beide zaken wordt op dit moment onderzoek gedaan aan de TU Delft. Om echter in een later stadium van dit onderzoek maximale en minimale steundrukken te bepalen, zal worden uitgegaan van reeds ontwikkelde theorieën.

De maximale steundruk aan het boorfront wordt bepaald door de verticale grondspanning aan de bovenzijde van het schild. Indien de steundruk groter is dan de maximaal toegestane, ontstaat er een kans op een blow-out of het oplichten van de grond. (zie ook paragraaf 2.1 ad blow-out) De minimale steundruk wordt bepaald door de verticale grondspanning aan de onderzijde van het schild. Indien de steundruk lager is dan de minimale is er kans op het optreden van een cave-in. Onder een cave-in wordt verstaan het bezwijken van het boorfront naar de machine toe.

Maximale steundruk voor model

Er zijn driedimensionale modellen ontwikkeld, die al dan niet de wrijving en cohesie van de bovenliggende grondlagen meenemen. Om echter een veilige bovengrens te stellen voor de steundruk, wordt de wrijving en het driedimensionale aspect verwaarloosd. Om de wrijving te activeren moet de grond aan het maaiveld namelijk reeds vervormd zijn. Slechts het gewicht van de bovenliggende grondlagen en de waterdrukken dienen te worden gekeerd. Dit resulteert in de volgende formule:

$$\sigma_{\max} = 1\sigma_w + \sigma_{kv} \quad \phi$$

Minimale steundruk

De minimale steundruk wordt berekend aan de hand van een driedimensionaal model dat is weergegeven in *figuur 2.8: bezwijkmechanisme boorfront*. In dit model wordt de belasting van een rechthoekige zuil grond en een wigvormig stuk voor de tunnel berekend en resulterende belasting op het tunnelfront. De grond wordt geïdealiseerd volgens het Mohr-Coulomb criterium met cohesie c en een hoek van inwendige wrijving ϕ . Voor ieder punt op het afschuifoppervlak geldt een schuifspanning: [9]

$$\tau = \frac{c}{F} + \sigma \frac{\tan \phi}{F}$$

waarin σ de normaalspanning is en de factor F een veiligheidsfactor is. Op de wig zijn de volgende krachten werkzaam: kracht neerwaarts gericht door het eigen gewicht, de normaalkrachten en schuifkrachten langs het bezwijkoppervlak ADE, BCF, ABFE, de steundruk door de slurry en de verticale kracht op het prisma.

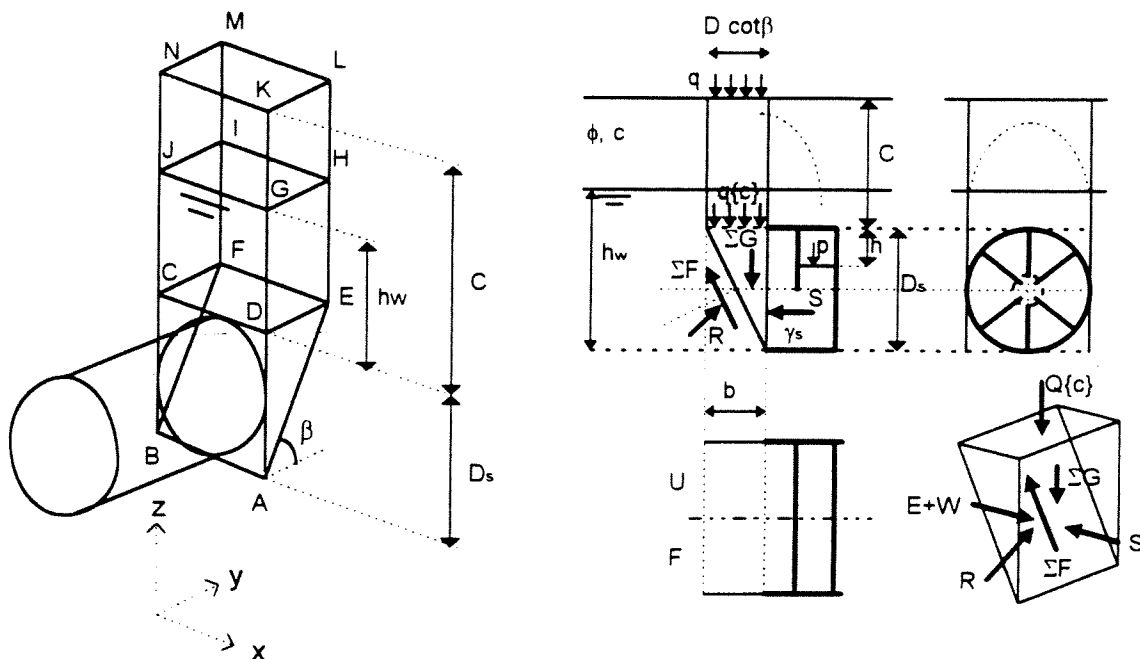
De verticale belasting van de grondkolom op het horizontale vlak van de grondwig kan worden berekend met behulp van Terzaghi's benadering: [24]

$$q_s(t) = \frac{F\gamma - c}{K \tan \phi} \left[1 - e^{-\frac{U}{F} K \tan \phi} \right]$$

waarin:

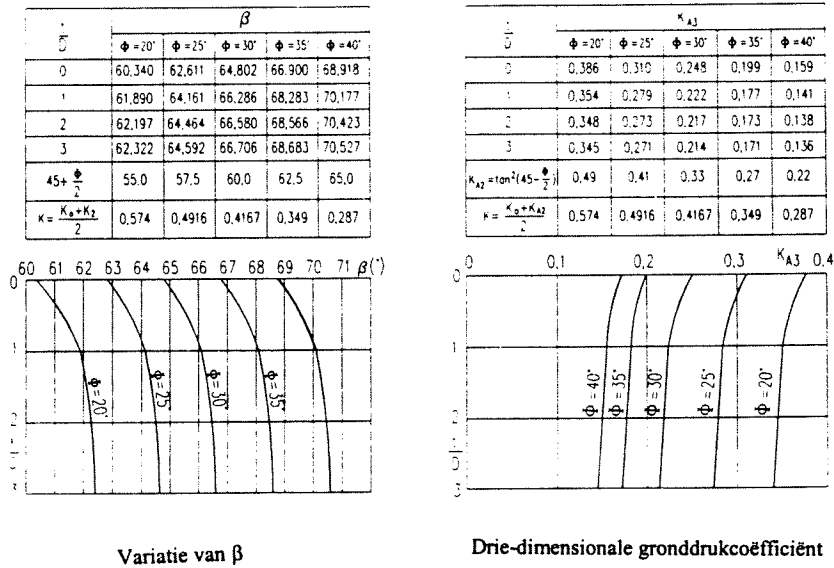
c	=	cohesie	[kN/m ²]
K	=	grondrukcoëfficiënt	[-]
F	=	horizontale oppervlak van de grondwig	[m ²]
q _s	=	verticale belasting op horizontale oppervlak grondwig	[kN/m ²]
t	=	dekking boven tunnel	[m]
U	=	omtrek horizontale oppervlak grondwig	[m]
γ	=	volume gewicht grond	[kN/m ³]
φ	=	hoek van inwendige wrijving	[°]

De afmetingen van de grondwig zijn afhankelijk van de grootte van de afschuifhoek β.[4]. Met een numerieke methode wordt berekend voor welke hoek de benodigde druk aan het front maximaal is. Resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 2.2, waarin de hoek β is berekend als functie van φ en C/D. Vervolgens kan met de berekende waarde van β een drie dimensionale grondrukcoëfficiënt worden afgeleid, K_{a,3D}. Dit is de verhouding tussen de verticale spanning als berekend met bovenstaande formule en de horizontale spanning op het boorfront.[24]



figuur 2.8: Bezwijkmechanisme boorfront

tabel 2.2: variatie afschuifhoek β als functie van C/D en ϕ



Voor de minimale steundruk wordt ervan uitgegaan dat er boogwerking in de grond optreedt. Alleen bij een dekking kleiner of gelijk aan 2D is het niet zeker of er boogwerking optreedt en of deze formule van Jancsecz mag worden toegepast. [7]

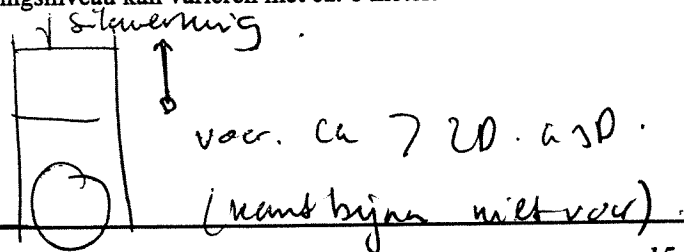
De minimale waarde voor de steundruk volgens bovenstaand model kan nu berekend worden met de volgende formule: [7]

$$\sigma_{steun, min} = \eta_g K_{a-3D} \sigma_{kv} + \eta_w \sigma_w$$

waarin:

- K_{a-3D} = actieve drie-dimensionale gronddrukcoëfficiënt [-]
- η_g = veiligheid afschuiven grondwig [-]
- η_w = veiligheid instromen water [-]
- σ_{kv} = verticale korrelspanning ($\leq \gamma H$) [kN/m²]
- $\sigma_{steun, min}$ = minimale steundruk [kN/m²]
- σ_w = waterspanning [kN/m²]

In de praktijk, bij de Heinenoordtunnel, worden steundrukken toegepast die worden berekend met bovenstaande formule. Bij dit project heeft men met de drie-dimensionale gronddrukcoëfficiënt gerekend. Voor deze coëfficiënt is een waarde gebruikt van 0,22. De veiligheidsfactoren bedragen $\eta_g=1,5$ en $\eta_w=1,05$. Bij de bepaling van de waterspanningen moet men er rekening houden dat men in getijgebied zit, dus dat het waterspanningsniveau kan variëren met ca. 1 meter.



Bij deze formule wordt geen rekening gehouden met silowerking. Dit fenomeen treedt op bij een dekking van ca. 2 à 3 maal de diameter. Over het algemeen liggen tunnels niet veel dieper dan deze waarde en kan men uitgaan van de formule zoals is aangegeven

Daarnaast komt men ook wel de volgende formule tegen voor minimale steundruk in de literatuur:

$$\sigma_{\min} = 1,05p + 20 \text{ kPa}$$

Deze formule brengt een nog lagere waarde voor de steundruk met zich mee.

Voor de minimale steundruk in cohesieve gronden is een formule opgesteld door Broms en Bennermark [3]. Bij deze methode wordt eerst de Stability Ratio N bepaald. (Deze dient niet verward te worden met Overload Factor!!). Voor $N < 6$ wordt het front stabiel genoemd. (Zie tabel 2.3)

$$N = \frac{(\gamma(C+R) + \sigma_s) - \sigma_T}{c_u} = \frac{\sigma_0}{c_u}$$

waarin

N	= stability ratio	[-]
$\gamma(C+R)$	= gronddruk t.p.v. tunnelas	[kN/m ²]
σ_s	= bovenbelasting	[kN/m ²]
σ_T	= gemiddelde steundruk	[kN/m ²]
c_u	= ongedraineerde schuifsterkte	[kN/m ²]

tabel 2.3: Stability Ratio N [3]

N	Deformatie
< 1	verwaarloosbaar
1-2	elastisch
2-4	elasto-plastisch
4-6	plastisch
> 6	bezwijken

De onderste grenswaarde van de steundruk wordt dan: [3]

$$\sigma_T \geq \gamma(C+R) + \sigma_s - N \cdot c_u$$

minimale steundruk voor model

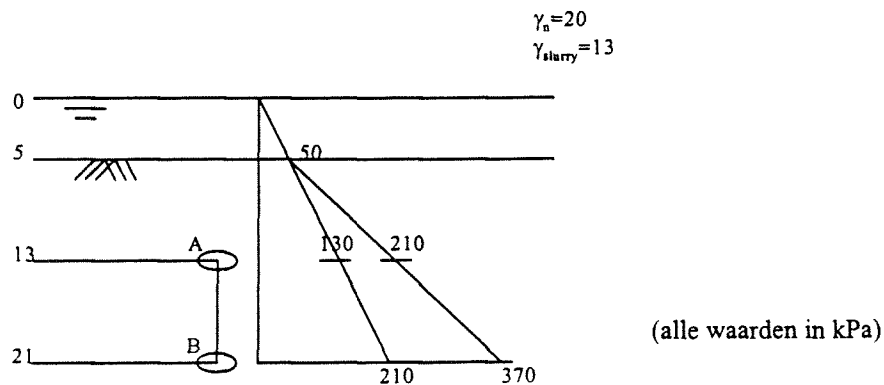
Bij drukken die berekend zijn volgens bovenstaande formules is er sprake van bezwijken van het boorfront en ontstaan er grote vervormingen aan het oppervlak. Wanneer de eis gesteld wordt, dat er geen enkele plastische vervorming op mag treden, moet de druk groter zijn dan de actieve gronddruk. Daarnaast kan er pas boogwerking optreden vanaf het moment dat de grond enigszins gedeformeerd is. Omdat het uitgangspunt verderop in het onderzoek is zo min mogelijk zettingen te verkrijgen, is het logischer ervan uit te gaan dat er geen boogwerking aanwezig is. Ook voor deze grenswaarde van de steundruk wordt een veilige waarde aangenomen, berekend met de tweedimensionale gronddrukcoëfficiënt: [27]

$$K_{a-2D} = \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)^2$$

Steundrukken berekend met een drie-dimensionale gronddrukcoëfficiënt zijn ten gevolge van de boogwerking van de grond lager dan steundrukken, die met de drie-dimensionale gronddrukcoëfficiënt zijn berekend. [4]

Maatgevende punten

Een eenvoudige rekensom laat zien dat de bovenkant maatgevend is voor de maximale steundruk en de onderkant voor de minimale steundruk.



Stel:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \sigma_w + \sigma_{kv} \\ \sigma_{\min} &= 1.05p + 20 \text{ kPa}\end{aligned}$$

Voor maximale steundruk:

$$A: 130 + 80 = 210$$

$$B: 210 + 160 = 370$$

$$\frac{370 - 210}{8} = 20 > \gamma_{\text{slurry}}$$

Voor minimale steundruk:

A: $1,05 \cdot 130 + 20 = 156,5$

B: $1,05 \cdot 210 + 20 = 240,5$

$$\frac{240,5 - 156,5}{8} = 10,5 < \gamma_{slurry}$$

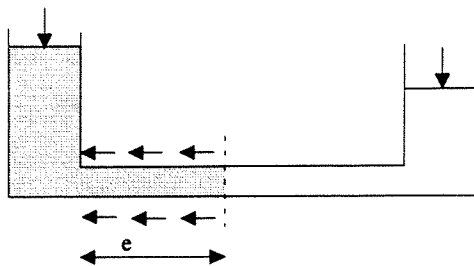
Ergo:

Punt A is maatgevend voor de maximale steundruk en punt B is maatgevend voor de minimale steundruk.

2.2.2 Boorfrontondersteuning hydroschild

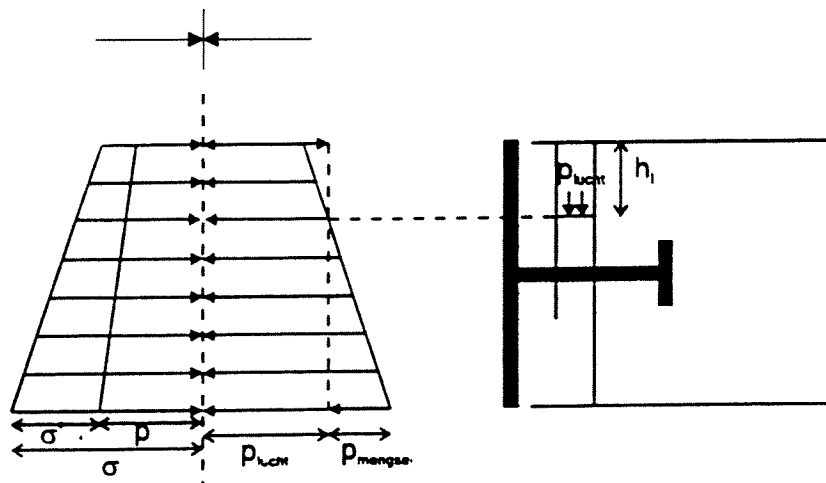
Voor de stabiliteit van het boorfront is de overdracht van de steundruk op het boorfront belangrijk. Het vullen van de ontgravingskamer alleen is niet voldoende om het front in evenwicht te houden. De druk in de graafkamer, die opgebouwd wordt door de steunvloeistof, zal naast het water ook de grond aan het boorfront moeten keren.

Door het verschil in dichtheid tussen bentoniet en water en door de overdruk dringt de bentoniet de poriën in en ontstaat er een afpleisterlaag. [39]. De vorming van deze laag, en daarmee de inzetbaarheid van het hydroschild, is sterk afhankelijk van de grondsoort, waarin men boort.



$$\gamma_F h_F \frac{\pi D^2}{4} = \gamma_w h_w \frac{\pi D^2}{4} + \pi D e \tau_F$$

$$e = \frac{(\gamma_F h_F - \gamma_w h_w) D}{4 \tau_F}$$



membran tijd langer.

figuur 2.9: indringing van de vloeistof [13]

Volgens de formule behorende bij *figuur 2.9* en de capillaire werking is de druk van de steunvloeistof in de mengkamer groter dan de waterdruk buiten de machine. Dit heeft tot gevolg dat de vloeistof het grondmassief indringt. De infiltratiediepte e is afhankelijk van het drukverschil tussen de steun- en de waterdruk. Met behulp van de evenwichtsvergelijking kan de infiltratiediepte worden berekend: [39]

$$e = \frac{\Delta p d_c}{4\tau_f}$$

met:

- e = de indringdiepte
- Δp = het drukverschil tussen de slurrydruk en waterdruk
- d_c = diameter capillaire buis
- τ_f = vloeispanning van de boorvloeistof

De slurrydruk neemt lineair met de afstand e af, totdat deze de druk van het waterniveau heeft bereikt. Uit de formule voor de capillaire werking kan de gradiënt, ook wel stagnatiegradiënt f_{so} genoemd, worden bepaald. Hoe groter deze gradiënt is, des te beter zal de ondersteuning zijn. [39]

$$f_{so} = \frac{\Delta p}{e} = \frac{4\tau_f}{d_c}$$

Omdat de capillairbuis in de praktijk nooit mooi rond is moet deze formule nog gedeeld worden door een factor α , met $\alpha > 1,0$. Men komt daarom ook wel de volgende formule tegen voor de indringingsdiepte: [17]

$$e = \alpha \frac{\Delta p d_s}{\tau_b}$$

met:

- α = een evenredigheidsfactor
- d_s = de karakteristieke korreldiameter ($d_s = d_{10}$).

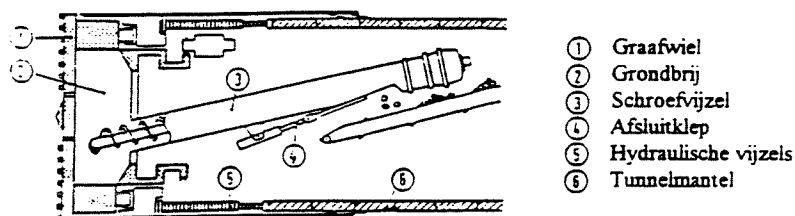
De in de literatuur vermelde waarden voor de evenredigheidsfactor lopen uiteen van 2,5 tot 4. [39,17,41].

In de laatste formule wordt de indringing afhankelijk gesteld van de waarde voor d_{10} . Deze waarde is ook terug te vinden in de formule voor permeabiliteit: de doorlatendheid is namelijk afhankelijk van de effectieve grootte d_{10} , en de uniformiteitscoëfficiënt ($C_u = d_{60}/d_{10}$) [27]. (zie ook paragraaf 2.3).

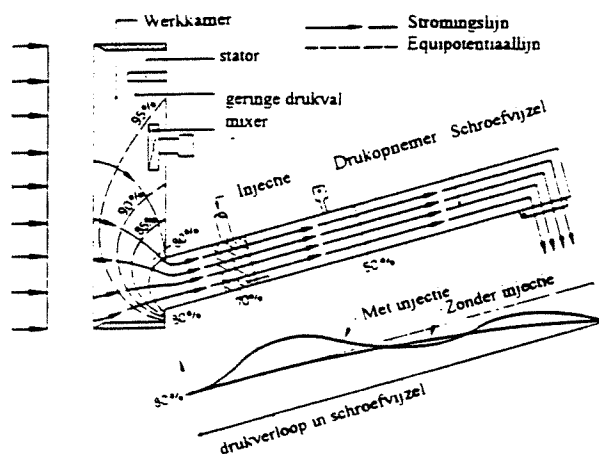
2.2.3 Boorfrontondersteuning EPB-schild³

De werking van het EPB-schild is gebaseerd op het gebruik van de ontgraven grond om een waterdichte ondersteuning te creëren. Daarnaast moet het ondersteuningsmedium voor een makkelijk transport door graafwiel, schroefvijzel en transportbanden zorgen. De afgegraven grond, grondwater en eventueel conditioneringsmiddel worden in de graafkamer vermengd tot een homogene grondbrij. De functies van de grondbrij zijn het overbrengen van de steundruk en de kering van het grondwater. Een algemene regel voor de stabiliteit van het boorfront luidt: hoe hoger het volumegewicht en de viscositeit van het ondersteuningsmedium, hoe stabiel het boorfront. Ter vergelijking: de viscositeit van de grondpasta is ca. 1500 maal zo groot als die van de bentonietslurry.

In *figuur 2.10* is de machine-opbouw en de stroming van de grondbrij door de machine aangegeven. De druk in de graafkamer kan worden gereguleerd door controle van het volume in de graafkamer, dat wordt bepaald door het in- en uitgaand volume. Het verloop van de stromings- en equipotentiaalijnen in de mengkamer is afhankelijk van de plaats van de schroeftransporteur. (Zoals te zien is in *figuur 2.11*). De grond valt uit de vijzel op de lopende band. Deze transporteert de grond tot boven het maaiveld. De grond is vrijwel direct geschikt voor hergebruik en hoeft niet zoals bij het hydroschild gescheiden te worden van de bentoniet.



figuur 2.10: machine-opbouw



figuur 2.11: stromingsverloop in de graafkamer

³ gebruikte literatuur in deze paragraaf: [4,34,21]

Werking en eigenschappen van de grondbrij⁴

De grondbrij, fungerend als steunmedium, is een homogeen mengsel van ontgraven grond en water. De gewenste eigenschappen zijn reeds aanwezig in de grond of kunnen kunstmatig worden gecreëerd middels toevoegen van additieven als schuim en polymeren.

Voor de eigenschappen van de grondbrij in de kamer zijn de volgende parameters van belang: [34,21]

1. permeabiliteit
2. vervormbaarheid of consistentie
3. compressibiliteit of elasticiteit
4. abrasiviteit
5. kleverigheid

De eigenschappen van de grondbrij worden met name bepaald door de ontgraven grondsoort. Hiervoor zijn van belang:

- a) korrelgrootteverdeling
- b) mineralogie
- c) elektrische eigenschappen van het oppervlak van de gronddeeltjes
- d) eigenschappen van het grondwater en daarin opgeloste ionen
- e) interactie van de deeltjes, grondwater en opgeloste ionen

ad 1) permeabiliteit

Om waterdoorstroming te voorkomen dient de permeabiliteit voldoende laag te zijn. De permeabiliteit is afhankelijk van de korrelgrootteverdeling, opbouw en structuur, porositeit, verzadigingsgraad en van de viscositeit van de doorstromende vloeistof. Als het aantal fijne deeltjes (korrels < 0,06 mm) van een bodem groter is dan 30% dan is de permeabiliteit laag genoeg.

ad 2) vervormbaarheid

Goede vervormbaarheid is belangrijk voor een gelijkmatige overbrenging van de steundruk. Daarnaast is de vervormbaarheid van belang voor het transport. Er zijn verschillende manieren om de vervormbaarheid van een vaste stof en een vloeistof uit te drukken.

Voor vloeistoffen zijn het de viscositeit en zwichtspanning die een idee geven over de vervormbaarheid. De viscositeit geeft de kracht weer die nodig is voor toename in de stroomsnelheid. De zwichtspanning is de schuifspanning die nodig is om een suspensie in rust zodanig te vervormen dat deze zich als een vloeistof gaat gedragen. Voor de vaste stof is de elasticiteitsmodulus (opgebouwd uit een plastische en een elastische vervorming) een maat voor de vervorming.

De grondbrij gedraagt zich plastisch, wat qua gedrag het midden tussen vaste stof en vloeistof inhoudt. Het vervormingsgedrag van plastische materialen kan worden bepaald met viscositeitsmetingen. In deze meting wordt de schuifspanning en de schuifhoeksnelheid gemeten. Hieruit kunnen de zwichtspanning en de viscositeit worden bepaald.

⁴ voornamelijk literatuur [21] gebruikt

Consistentie is een kwalitatief begrip dat een idee geeft over de vervormbaarheid van plastische materialen. Het begrip is echter niet geschikt om de vervormbaarheidseigenschappen goed te beschrijven en is verschillend gedefinieerd voor cohesieve gronden en niet-cohesieve gronden.

De consistentie is de mate van cohesie tussen de gronddeeltjes en dus de weerstand tegen vervorming of verscheuring. In de grondmechanica wordt de consistentie index I_c gebruikt voor cohesieve materialen. De "geotechnische consistentie" van cohesieve materialen wordt bepaald door het watergehalte en de Atterbergse grenzen. (Zie ook paragraaf 2.3) met behulp van de formule: [21]

$$I_c = \frac{w_L - w_p}{I_p}$$

met:

- I_c = consistentie index
- w = watergehalte van de bodem
- w_L = vloeigrens
- w_p = plasticiteitsgrens
- I_p = het plasticiteitsgetal

Er zijn kwantitatieve waarden verbonden aan de index I_c (zie tabel 2.4): [34]

tabel 2.4: consistentie index

I_c	Consistentie
<0	vloeibaar
0-0.5	half plastisch
0.5-0.75	plastisch
0.75-1.0	stijf
>1.0	aardvochtig



De grondbrij heeft een optimale vervormbaarheid als de I_c tussen 0,4 en 0,75 ligt. Door toevoeging van water of andere conditionerstoffen kan de grondbrij in dit gebied worden gebracht.

Ad 3) compressibiliteit / elasticiteit

Samendrukbaarheid is een belangrijke eigenschap voor zanderige grondbrij. Bij drukfluctuaties in de werkkamer zal bij een watergeconditioneerde brij geen mogelijkheid zijn om deze druk te herverdelen in de brij. Bij grond geconditioneerd met schuim kan dit echter wel. De schuimbellen in de grond fungeren als de luchtkamer bij een hydroschild. Door een toename van de druk zullen de bellen samengedrukt worden, bij een drukafname zullen de bellen uitzetten. Deze eigenschappen maakt het ingrijpen bij plotselinge drukveranderingen in de werkkamer makkelijker.

Cohesieve gronden met ideale consistentie hebben een goede vervormbaarheid, waardoor de samendrukbaarheid minder van belang is.

Ad 4) Abrasiviteit

Abrasiviteit geeft aan of een materiaal slijtage op kan leveren bij een ander materiaal. De druk, de temperatuur en de grootte van de korrels van invloed op de mate van slijtage. Voor staal zijn mineralen met een hardheid die hoger dan of gelijk is aan die van kwarts abrasief voor staal. (hardheid ≥ 7 op schaal van Mohs). Bij het ontgraven geldt de abrasiviteit van de grond t.o.v. de boorkop en mengkamer.

Ad 5) Kleverigheid

Verkleving treedt op als de adhesie groter is dan de cohesie. Verkleving is ongewenst, omdat dit een groter aandrijfmoment van de machine met zich meebrengt en het transport bemoeilijkt. Bij een grote mate van verkleving kan het ontgravingsproces stagneren: er kan een grote samenballing ontstaan bij het graafwiel dat als een grote schijf meedraait of de transporteur is verstopt geraakt.

2.3 Afwegingsmodel Hydro-EPB⁵

Van de ontwikkelde tunnelboormachines komen alleen het vloeistofdruk- (slurry-/hydro-) en het gronddrukbalansschild (EPB-schild) in aanmerking voor gebruik in de Nederlandse gronden. De grondsamenstelling op de locatie is een belangrijke factor in de keuze van het type tunnelboormachine (TBM). De **eigenschappen van de grond** kunnen door de volgende drie aspecten worden bepaald:

- toestands onafhankelijk: korrelverdeling
 - ⇒ structuur: de elementen waaruit de samenstelling is opgebouwd
 - ⇒ textuur: de mate van fijnheid en uniformiteit van de grond
- toestands afhankelijk: watergehalte, dichtheid, consistentie (= de mate van cohesie tussen de gronddeeltjes en de weerstand tegen vervorming of verscheuring)
- dynamisch: menging in graafkamer.

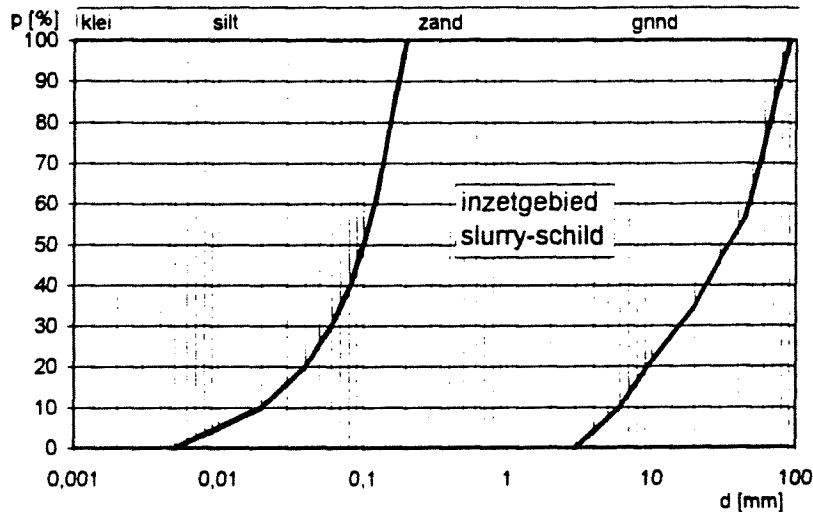
De toestandsonafhankelijke eigenschappen blijven in de regel onveranderd, dus ook in dynamische toestand.

In het ontwikkelde model wordt een afweging gemaakt op de volgende aspecten: boorfrontondersteuning, gronddeformaties, afgraafbaarheid (snijden, obstakels en verkleving), instroming van water, scheiding, hergebruik, energieverbruik en inzetgebied, om tot een keuze te komen voor een hydro- of EPB-schild.

⁵ afwegingsmodel als in literatuur [4]

2.3.1 Inzetgebied hydroschild

Het inzetgebied van het hydroschild wordt met name bepaald door het vermogen van de combinatie bentoniet en grond om voldoende steundruk aan het boorfront op te bouwen en daarmee stabiliteit van het boorfront te garanderen. Volgens Krause [17] is het inzetgebied als volgt:



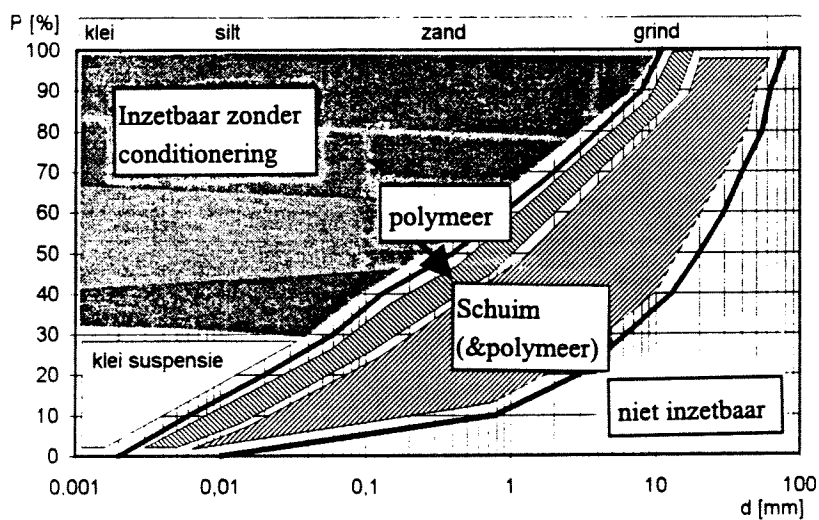
figuur 2.12: Inzetgebied hydroschild volgens Krause [17]

De ondergrens wordt bepaald door het vermogen van water om met klei een suspensie te vormen welke stabiliteit van het boorfront garandeert. Maatgevend hierbij is lokale stabiliteit en de cohesie van klei. De lokale stabiliteit komt in het gedrang als kleilagen worden afgewisseld met zandlagen, omdat de zandlaag uit de kleilaag wordt gespoeld. Bij een hoog aandeel van klei, kan dit gaan samenballen en de leidingen verstoppen. Volgens Krause [17] wordt de regel gehanteerd dat het aandeel klei en silt kleiner is dan 10%.

De bovengrens wordt bepaald door de permeabiliteit van grond. Bij een hoge permeabiliteit kan het bentonietmengsel geen membraan meer vormen en zal de vloeistof wegstromen. Er ontstaat instabiliteit aan het boorfront. Het inzetgebied kan echter worden vergroot door de eigenschappen van het bentoniet aan te passen d.m.v. toevoegingen, zoals CMC en zand. (zie ook paragraaf 3.2.2)

2.3.2 Inzetgebied EPB-schild

Het inzetgebied van een EPB-schild wordt met name bepaald door het vermogen een ideale groundbrij te vormen, welke voldoende plastische en vervormingseigenschappen bezit. Voor korrelfracties met een $d \leq 63 \mu\text{m}$ wordt de inzetbaarheid bepaald door Atterbergse limiet en liquiditeitsindex. In de andere gevallen zijn vooral permeabiliteit, consistentie, plasticiteit en kleverigheid belangrijk. Met behulp van conditionerstoffen als High Density Slurry, polymeren en schuimen kan een ideale groundbrij worden gevormd. Het inzetgebied volgens Maidl is:



figuur 2.13: Inzetgebied EPB-schild volgens Maidl [21]

2.3.3 Keuze EPB-/hydro-schild

Met name de grondsamenstelling, de dekking en de mate van scheiding zijn bepalende voorwaarden gebleken in de keuze voor de toepassing van een EPB- of een hydro-schild. De technische uitvoerbaarheid bleek af te hangen van de technische specificaties van de machine, de risico's ten aanzien van de boorfrontondersteuning, de afgraafbaarheid, de waterdichting en scheiding. In onderstaande tabel 2.5 zijn de randvoorwaarden gegeven voor beide boormethodes.

Tabel 2.5 Toepasbaarheid hydro- en EPB-schild [4]

steunmedium	C (*D _s)	k [m/s]	d ₁₀ [mm]	d ₉₀ [mm]	C _u [-]	d ₉₀ [m]	I _p [%]	I _c [-]
hydro	>1,0-1,5	<10 ⁻²	0,02 ≤ d ₁₀ ≤ 2,5	6,0 ≤ d ₉₀ ≤ 90	6 - 2200	< 1,5	≤ 15-25	> 1,0
EPB	>1,0D _s	<10 ⁻³	≤ 0,05 en 30% d ≤ 0,063	≤ 8,0 30% d ≤ 0,063	< 150	< 0,2	> 7	0,3 < I _c < 1,0
EPB+ conditioner	>1,0D _s	??	≤ 0,8	≤ 60	< 5000	< 0,2	> 7	< 1,0

Dekking C:

De minimale dekking wordt bepaald door opdrijven en ovaliseren. Daarnaast is voor het hydro-schild de blow-out van belang. De veiligheidscoëfficiënt α is afhankelijk van de grondsoort boven de tunnel.

$$\alpha > \gamma_w / \gamma_d$$

Permeabiliteit k:

Voor het hydro-schild is de doorlatendheid maatgevend voor de vorming van het membraan. Voor het EPB-schild is het maatgevend voor de waterafdichting van het boorfront en voor het wel/niet toevoeging van additieven om de waterdoorlatendheid te minimaliseren.

Korrelgrootte d₁₀ en d₉₀

Geven de grenzen weer van de inzetbaarheid van beide schilden

Uniformiteitsindex C_u

Geeft aan binnen welk gebied de ideale zeefkromme voor gebruik van het hydro- en EPB-schild ontstaat. $C_u = d_{60} / d_{10}$. De steilheid van de grafiek geeft de verdeling aan van de korrels: Een steile grafiek kent een overwegend uniforme verdeling. Indien men kijkt naar de waarden behorende bij het hydroschild, dan blijken deze zo ruim te zijn, dat men kan stellen dat deze waarden weinig van invloed zijn op de inzetbaarheid. Daartegenover staat dat het EPB-schild wel een grens heeft. Dit heeft te maken met de vermengbaarheid van het mengsel teneinde een waterdichte laag te creëren. Uniform zand is namelijk moeilijk te vermengen.

Liquiditeitsindex I_l

Geeft de hoedanigheid van het steunmedium weer. Is $I_l > 1,0$ dan is het steunmedium een vloeistof, is $I_l < 0,3$ dan gedraagt het steunmedium als "vaste stof".

Atterbergse grenzen

Deze grens is zowel voor EPB- als hydro-schild belangrijk. Voor het hydro-schild i.v.m. de vorming van kleiballen, voor het EPB-schild in combinatie met het watergehalte i.v.m. voldoende plasticiteit.

(zie figuren 2.14 en 2.15)

De Atterbergse limiet maakt een scheiding tussen de hoeveelheid klei- en siltdeeltjes in een grondsoort, omdat klei een grote adhesie heeft en silt geen adhesie heeft. De Atterbergse grenzen van een grondsoort zijn gerelateerd aan de hoeveelheid water die aan de oppervlakte van de korrels is geadsorbeerd. Omdat de oppervlakte per massa-eenheid sterk toeneemt bij kleinere korrelgrootte, mag worden verwacht dat de hoeveelheid geadsorbeerd water in hoge mate wordt bepaald door de hoeveelheid kleideeltjes in de grond.

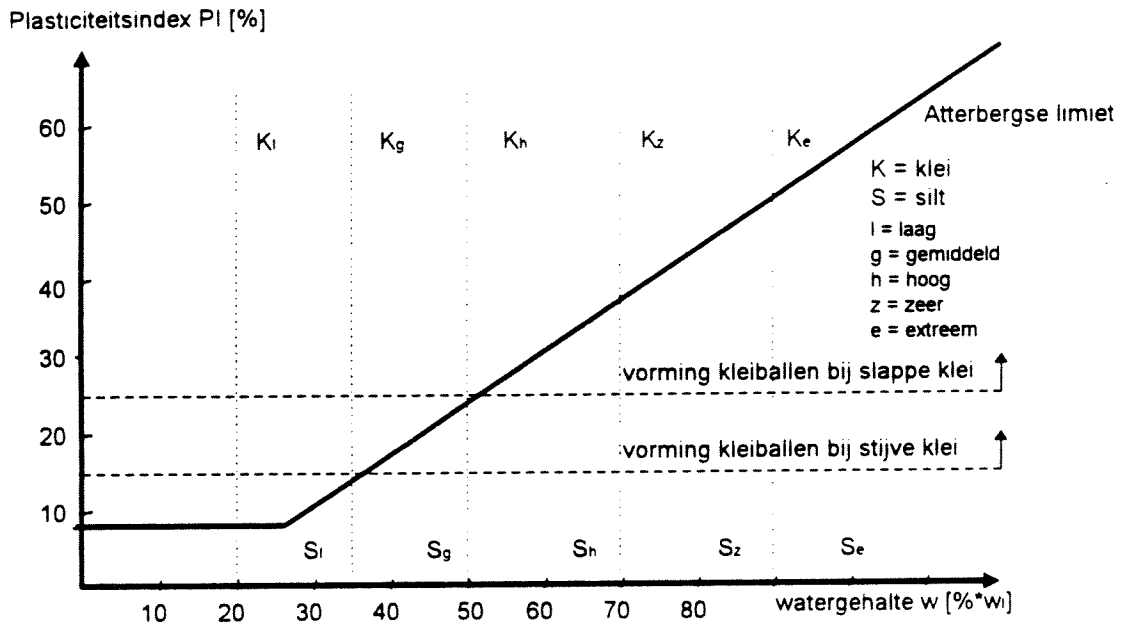
Verstopping systeem

Bij beide schilden bestaat kans op verkleaving van kleiformaties aan het graafwiel. In het geval van bodemconditionering bij het EPB-schild m.b.v. oppervlakte actieve stoffen (schuimen) en polymeren wordt de kans op verkleaving aanzienlijk gereduceerd.

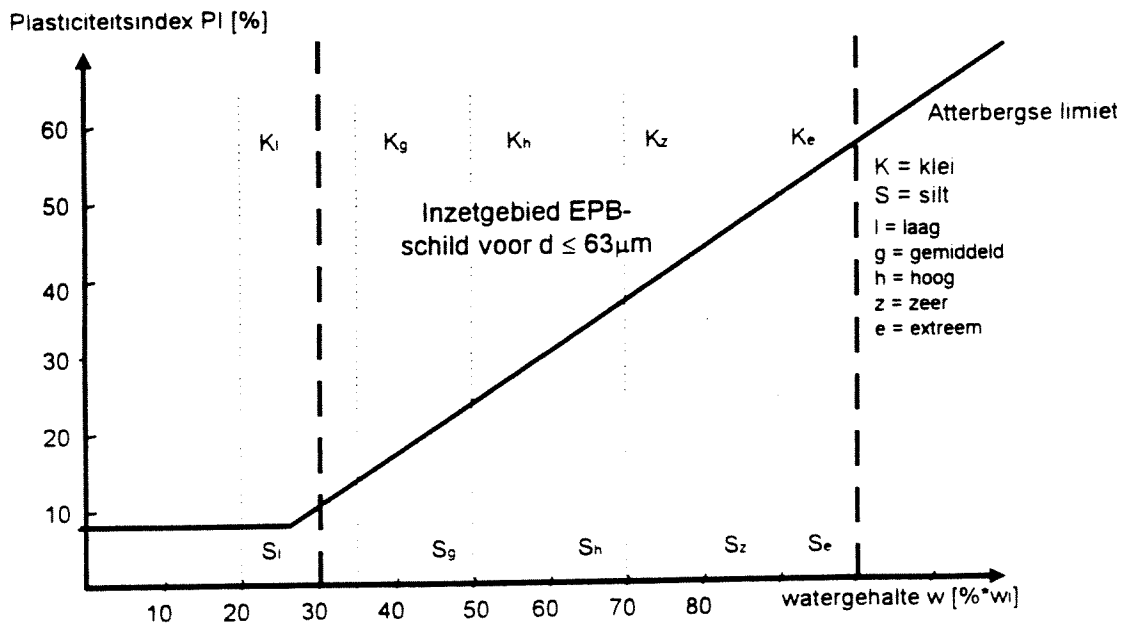
Tabel 2.6: Verstopping transportsysteem

	<i>hydro-schild</i>	<i>EPB-schild</i>
probleem	kleibalvorming in transportleidingen	propvorming in schroeftransporteur
wanneer	<ul style="list-style-type: none"> ■ stijve klei $PI > 15\%$ ■ slappe klei $PI > 25\%$ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ wrijving transporteur-grond te groot; er gaat meer grond in de transporteur dan eruit → verdichting grond → meedraaien grond in transporteur

Indien bij een EPB de hoek van inwendige wrijving te groot is kan er achter de boorkop boogwerking ontstaan bij de avegaaringang. Hierdoor kan ontgraven materiaal en water ongehinderd in de avegaar stromen. [43]



figuur 2.14: Atterbergse limiet voor de vorming van kleiballen [4]

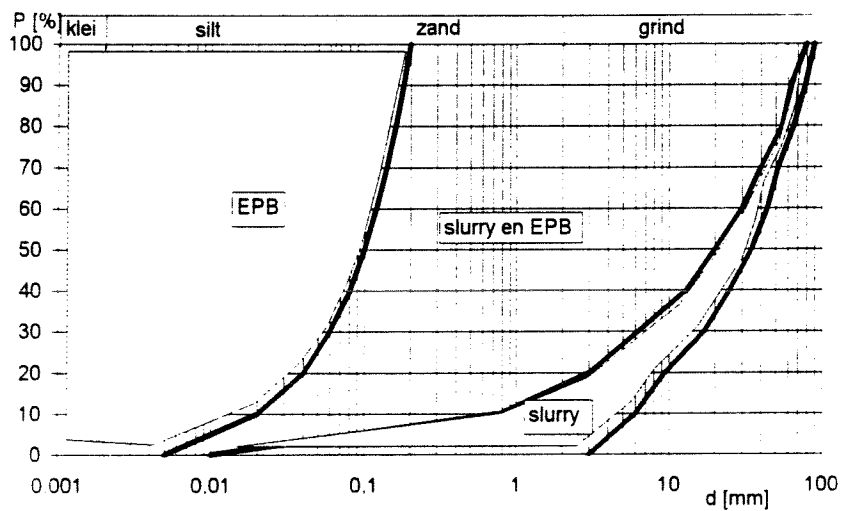


figuur 2.15: Inzetbaarheid EPB-schild in fijnkorrelige grond [4]

Model:

Deze gegevens kunnen in een grafiek worden gezet, waardoor een beeld van het inzetgebied wordt verkregen (figuur 2.16). In deze figuur is te zien dat er een grote overlap aanwezig is wat betreft inzetgebied van EPB- en hydroschild. **Kanttekeningen** bij deze figuur zijn echter:

- Het is de vraag in hoeverre de lijnen die de grenzen aangeven van de inzetgebieden, de werkelijkheid benaderen. Er worden daarom vraagtekens gezet bij de betrouwbaarheid (en daarmee absolute bruikbaarheid) van deze grenzen. Het is bijvoorbeeld de vraag of het deel, waarin alleen slurryschild staat vermeld ook daadwerkelijk te conditioneren is met een slurryschild. Indien men naar de korrelverdeling kijkt, blijkt men zich op dat punt in de grafiek te bevinden in grindgronden.
- Men kan zich voorstellen dat er zich in de "linkerkant" van het gebied andere problemen voordoen bij beide boormethoden dan aan de "rechterkant" van het gebied. De vraag die hier dan speelt is dan niet meer de inzetbaarheid van een boormethode, maar de uitvoerbaarheid van die methode.



figuur 2.16: inzetbaarheid EPB- hydroschild [4]

2.4 Voortzetting van het onderzoek

Motivatie

Een conclusie die kan worden getrokken vanuit het verrichte onderzoek is dat er een groot gebied bestaat binnen het model, waarin beide boormethodes toepasbaar zijn op basis van de onderzochte aspecten, die met name van technische aard waren. Hieruit is een grafiek voortgevloeid voor het inzetgebied van het hydroschild en het EPB-schild. (figuur 2.16). In deze grafiek kan men drie gebieden onderscheiden. Eén waarin alleen het EPB-schild inzetbaar is en één waarin alleen het hydroschild inzetbaar. Daarnaast is er echter een groot overlappend gebied, waarin beide methodes inzetbaar zijn. (Dit is alleen gebaseerd op de technische aspecten). Waar binnen het model geen rekening mee is gehouden, zijn de kosten en de maatschappelijke aspecten. De conclusie die men hieruit kan trekken is dat het model in zijn huidige vorm niet voldoet om een keuze te maken voor een Hydro- of een EPB-schild.

De keuze voor een toe te passen boortechniek blijkt van meerdere factoren afhankelijk te zijn dan alleen de technische. De eerste keuze wordt weliswaar gemaakt op **technische inzetbaarheid**. Indien blijkt dat slechts één methode technisch inzetbaar is, is er geen sprake van een keuze. In het geval de keuzemogelijkheid er wel is, dan is het onmogelijk om puur een keuze te baseren op een grafiek en enkele randvoorwaarden. Omdat de keuze voor een machine altijd afhankelijk is van een gegeven situatie met zijn specifieke randvoorwaarden, kenmerken en factoren is het ontwikkelen van een compleet en toepasbaar afwegingsmodel niet reëel.

Er zal altijd per gegeven situatie moeten worden bekeken, welke machine het best inzetbaar is. Zo zal een geologisch profiel op het eerste gezicht bijvoorbeeld leiden tot de keuze voor een EPB-machine, totdat men alle aspecten heeft doorgelopen en eventuele problemen zijn gesignaleerd, die tot een verandering van de keuze kunnen leiden.

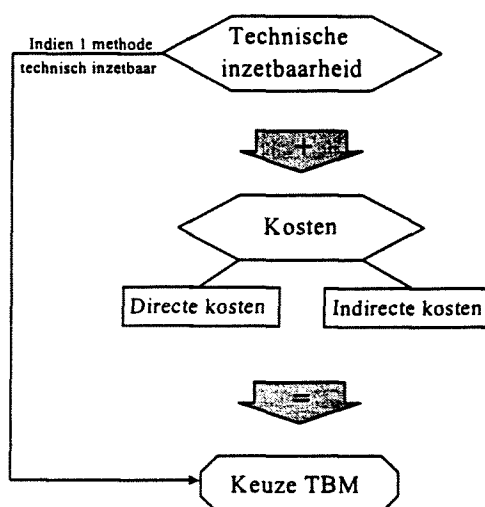
Een voorbeeld hiervan is de nieuw aan te leggen tunnel onder de Westerschelde. In eerste instantie verwachtte men een EPB-schild te gebruiken vanwege de geologische condities, namelijk boomse klei. Een optie was zelfs om een EPB toe te passen in open-mode. Er bleek echter dat de kans aanwezig was dat tijdens het boren op verschillende plaatsen zandlenzen zouden kunnen worden aangetroffen, bestaande uit zeer grof en waterdoorlatend materiaal. Daarnaast was men niet overtuigd van de waterkerende capaciteit van een EPB-machine onder dergelijke hoge waterdrukken. Een hydroschild daarentegen zou te kampen krijgen met vorming van kleiballen met het gevaar de leiding te verstopen. Uiteindelijk werden na afweging de problemen van een hydroschild verkozen boven de problemen van het EPB en zou voor de te verwachten problemen een oplossing worden gezocht.

Een ander voorbeeld is de ligne 2, section F, metro de Lille. [35]. Een groot deel van het traject gaat door grond die typisch geschikt is voor toepassing van een EPB-schild, namelijk silt (les terrains quaternaires), fijn zand afgewisseld met kleilaagjes. Het overige deel bestaat echter uit tufkrijt, gedeeltelijk verweerd. Deze laatste grondsoort heeft door kans op grote waterdoorlatende lenzen, variërend tussen 1,5 en 2 bar waterdruk, tezamen met een reeds aanwezige voorkeur geleid tot de keuze van een hydro-schild. Men heeft hier de moeilijke herwinning van het bentoniet verkozen boven de conditionering van een EPB-schild. De aannemer die een ander deel van het traject uitvoerde, koos voor een EPB-schild, daarmee het risico nemende een probleem op te moeten lossen van een moeilijk te ondersteunen front. Tijdens de uitvoering bleek bovendien, vanwege onvoldoende kennis van de interactie tussen ondergrond en EPB bij Japanse participanten, dat er een veel te laag vermogen was

geïnstalleerd voor de TBM. Een oplossing voor de uitvoering van deze tunnel zou een schild in multi-mode kunnen zijn, een andere oplossing was geweest gewoon in eenzelfde laag te blijven boren.

Als nu sec gekeken wordt naar de bouw van de tunnel vanuit aannemer en opdrachtgever kan het volgende worden gesteld. De opdrachtgever is geïnteresseerd in het resultaat van de werkzaamheden, een tunnel die voldoet aan gestelde eisen en functies. De aannemer, die de tunnel bouwt, zal daarvoor een methode gebruiken, die ten eerste goedkoop in aanleg is ook nadat de risico's zijn verwerkt en ten tweede de aflevering van een waterdichte tunnel als resultaat heeft.

De keuze van de machine zal dus in eerste instantie op technische aspecten worden gemaakt. Indien beide methodes inzetbaar zijn, zal een tweede afweging worden gedaan, die wordt gebaseerd op de totale kosten, waarin tevens de risico's zijn verwerkt. Logischerwijs zal de aannemer de goedkoopste methode toepassen, tenzij de opdrachtgever expliciet om een bepaalde methode vraagt. Tot slot speelt de subjectieve voorkeur van de aannemer / partner van een aannemerscombinatie een kleine rol in de keuze. Deze is echter moeilijk uit te drukken in een getalswaarde. In figuur 2.17 is de invloed aangegeven van de risico's op de kosten. Deze figuur zal in hoofdstuk 5 uitgelegd worden.



figuur 2.17: invloedsfactoren keuze TBM

Onderwerp afstudeeronderzoek

Er zal binnen het onderzoek niet naar verdere uitbreiding van het bestaande keuzemodel worden gestreefd, omdat in de praktijk de keuze afhankelijk is van meer dan alleen de technische details: bijvoorbeeld de gegeven situatie (kosten + risico) en de aannemer.

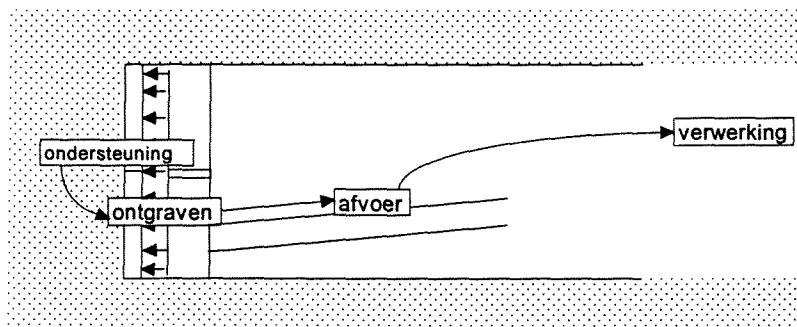
Een belangrijke keuze die bij de bouw van een boortunnel zal worden gemaakt is het verloop van het tracé en (daarmee) de wijze van ondersteuning van het boorfront. Deze zijn medebepalend voor de totale kosten en bepalen tevens welke risico's men tegen zou kunnen komen en wat voor kosten dat met zich mee brengt. Daarnaast wordt de keuze bepaald door de complexiteit van uitvoering; dit hangt samen met de kennis en ervaring van een aannemer met een bepaalde methode en de uit te voeren kunstgrepen. Tot slot is van belang welke invloed de boormethode op de omgeving heeft.

Tijdens het literatuuronderzoek is gekeken naar beide boormethodes. In eerste instantie is er gekeken of er overeenkomsten zijn tussen beide boormethodes met het volgende doel: Indien blijkt dat bepaalde mechanismen overeenkomen, kan men dezelfde risico's en gevolgen aan de mechanismen koppelen. Het bleek echter dat beide ondersteuningsmethodes niet of nauwelijks met elkaar te vergelijken zijn. Na deze conclusie is in een latere fase gekeken of op een andere wijze de theorie van het boorfront gekoppeld kan worden aan de praktijk.

Omdat voornamelijk het kostenplaatje de keuze bepaalt van de boormethode is het interessant de risico's van het boorfront te analyseren, omdat deze gekoppeld kunnen worden aan de kosten. De keuze voor één van beide methodes bepaalt welke risico's men aangaat en welke gevolgen de omgeving ervan zal ondervinden. Hierbij denkt men in de eerste plaats aan zettingen, maar er spelen meerdere aspecten mee, hetgeen nog zal blijken. Voor de twee inzetbare methodes zal een risicoanalyse worden uitgevoerd.

Er zal worden gekeken naar overeenkomsten en verschillen tussen beide methodes, naar optredende situaties al of niet afhankelijk van de boormethode en de gevolgen die een gebeurtenis met zich meedraagt. Typische problemen optredend bij een boormethode zullen worden uitgelicht door het uitvoeren van een risicoanalyse. Een groot probleem zal verder worden uitgewerkt met de achterliggende gedachte van twee verschillende boortechnieken.

Het onderzoeksgebied zal worden afgebakend met het traject van ondersteuning tot verwerking van de grond. (figuur 2.18). Er zal dus niet naar zaken gekeken worden als directe machinerie, de lining, afwerking etc. De resultaten van het onderzoek zullen inzicht geven hoe de keuze voor het ondersteuningsmedium van invloed is op het risico- en kostenaspect.



figuur 2.18: te onderzoeken proces

HOOFDSTUK 3 Ontgravingsproces Hydro-schild⁶

3.1 Werking en eigenschappen van de bentoniet

De naam bentoniet is afkomstig van de oorspronkelijke vindplaats Fort Benton in Wyoming (USA). Bentoniesuspensies worden al lange tijd als boorspoeling gebruikt in de diepboringsindustrie. Bij hydroschilden worden bentoniesuspensies gebruikt als ondersteuningsvloeistof, bij EPB-schilden als conditionerstof. Bentoniet wordt toegepast om een waterdoorlatende laag op te bouwen aan het boorfront bij een slurryschild, bij een EPB-schild om de plasticiteit te vergroten.

3.1.1 Opbouw van bentoniet

Bentoniet is een kleilig materiaal dat is ontstaan door chemische en geologische processen (verwerking) uit afzettingen van vulkanische asregens in zoute binnenmeren. Het bentoniet is een tixotrope vloeistof, d.w.z. dat de materie vloeibaar blijft zolang ze in beweging gehouden wordt, maar opstijft als ze in rust is. Het materiaal kent veel toepassingen die vrijwel allemaal gebaseerd zijn op zijn waterabsorberend vermogen, zwellende eigenschappen. Deze eigenschappen zijn toe te schrijven aan de kleimineralen die behoren tot de hoofdgroep van de smectieten, waaruit het bentoniet grotendeels bestaat. Het hoofdbestanddeel van bentoniet wordt gevormd door het smectietmateriaal montmorilloniet. Montmorilloniet is een kleimineraal met een gelaagde structuur. De fysische eigenschappen ervan worden in belangrijke mate bepaald door de structuur van het kristalrooster van het kleimineraal en niet door de chemische samenstelling.

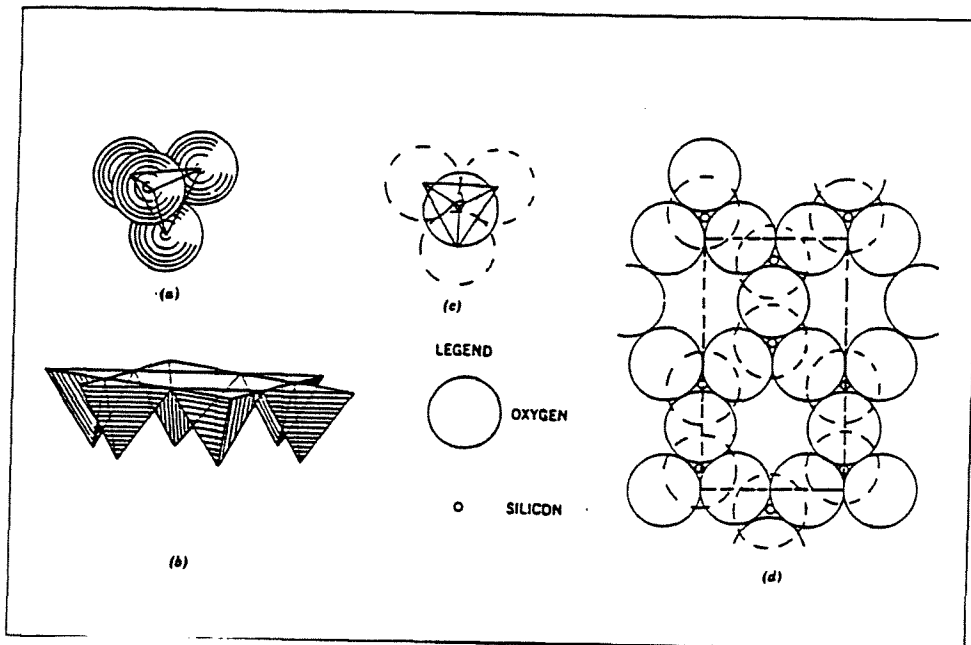
⁶ Theorie in dit hoofdstuk voornamelijk uit literatuur [17,34]

3.1.2 Eigenschappen van bentoniet

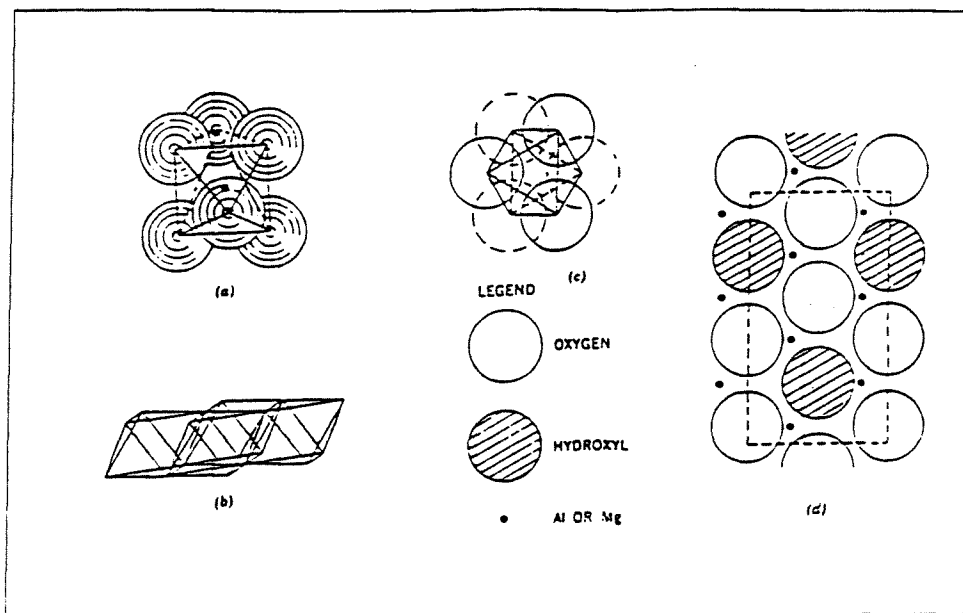
Bentoniet is een kleimineraal en om de eigenschappen van bentoniet te kunnen begrijpen, zal dus eerst gekeken worden naar de samenstelling van een kleimineraal. Kleimineralen zijn aluminiumsilicaten met gelaagde opbouw. De verschillende kleimineralen ontstaan door opeenstapelingen van octaëderlagen (O) en tetraëderlagen (T) en vormen een neutrale hoofdstructuur. De tetraëderlaag heeft als basismolecuul het SiO_4 -tetraëder. In deze laag zijn 3 van de 4 O-atomen gebonden, waardoor een tweedimensionale tetraëderlaag ontstaat. (Zie figuur 3.1). Het basismolecuul van de octaëderlaag is het $\text{Al}(\text{O}/\text{OH})_6$ -octaëder. Hierin worden O-/OH-groepen met elkaar gedeeld. (Zie figuur 3.2). De ongedeelde oxyde-atomen kunnen zich aan de octaëder binden, waardoor twee hoofdstructuren kunnen ontstaan.

1. De T-O structuur (Kaolinetgroep)
2. De T-O-T structuur (Smectiet- en Illietgroep)

Stapeling van deze mineralen levert respectievelijk T-O-T-O-T-... en T-O-T-T-O-T-T-.... op. De elektrostatische krachten in de gedeelde OH- of O- groep zorgen voor een sterke binding. De VanderWaalskrachten die de tetraëder bij elkaar moeten houden zijn veel kleiner.



figuur 3.1: Structuur van de tetraëderlaag. a) tetraëder SiO_4 , b) perspectief tetraëder zesring
 [34] c) projectie van een tetraëder d) bovenaanzicht tetraëder



figuur 3.2: structuur van de octaëderlaag a) octaëder $Al(OH)_6$, b) perspectiefschets octaëder
 [34] c) projectie octaëder d) bovenaanzicht octaëderlaag

3.1.3 Ladingseigenschappen van bentoniet

Bentonietdeeltjes gedispergeerd in water hebben in eerste instantie de neiging aan elkaar te kleven. Dit gebeurt onder invloed van fysische krachten, de VanderWaalskrachten. Hierdoor klitten deeltjes samen tot in het water zwevende vlokken, soms verklevend tot hele netwerken. Dit verschijnsel wordt coagulatie genoemd.

De algemene structuurformule van montmorilloniet is $4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Door isomorfe substitutie, waarbij atomen in het kristalrooster worden vervangen door andere atomen met nagenoeg dezelfde afmeting, maar met een lagere valentie. (Bijvoorbeeld Si^{4+} door aluminium Al^{3+}), ontstaat een overschot aan negatieve lading. Aan het oppervlak van het bentonietplaatje wordt deze negatieve lading door kationen, zoals Na^+ en Ca^{2+} , gecompenseerd. In dat geval is sprake van natrium-respectievelijk calciumbentoniet. Door de compensatie ionen drijven de tetraëder en octaëderlagen uit elkaar, waardoor de afstand tussen de lagen zo groot wordt dat er water kan indringen. De watermoleculen absorberen aan de kationen. Het soort kation bepaalt het zwelvermogen van het bentoniet. De wateropnamecapaciteit van natriumbentoniet is in water ca. 3 keer zo groot als van calciumbentoniet, maar is gevoeliger voor de PH-waarde van het water. Het totaal aantal vervangbare kationen wordt uitgedrukt in milli equivalent per 100 gram droge klei, ook wel kationen uitwisselingscapaciteit (CEC) genoemd.

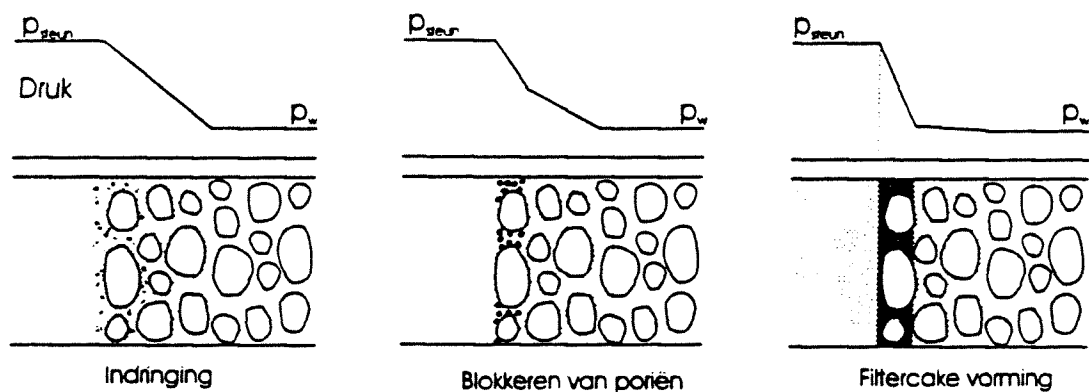
Het bentoniet behoort tot de smectietmineralen, zwellende mineralen. Smectietmineralen hebben een T-O-T-structuur. In elke laag kan uitwisseling van kationen plaatsvinden. Smectieten kenmerken zich door een hoge CEC waarde. De compensatie kationen zijn voornamelijk Natrium (Na^+) en Calcium. In water gedispergeerde deeltjes zijn echter vaak ook elektrisch geladen (Ca^{2+}). Als men kleien met isomorfe vervanging in water suspendeert dan vormt zich een dubbellaag,. Doordat compensatie ionen gedeeltelijk in oplossing gaan in water, krijgt het deeltje een negatieve lading. Gelijksoortige deeltjes hebben dan een gelijke lading, waardoor deeltjes elkaar afstoten. Afhankelijk van de sterkte van de afstoting kan de sterkte van de Van der Waalskrachten zodanig worden gecompenseerd, dat coagulatie onmogelijk wordt: De deeltjes zweven als het ware in het water. De grootte van de elektrische lading wordt vooral beïnvloedt door de pH en de in het water opgeloste zouten. Een andere benaming voor de elektrische lading is de zèta-potentiaal. Bij een hoge zèta-potentiaal zal er geen coagulatie meer plaatsvinden.

Bentonietdeeltjes zijn in water sterk negatief. In gedispergeerde toestand zal dan ook geen coagulatie optreden. Toch hebben bentonietsuspensies een zekere mate van samenhang. Waarschijnlijk is er door een ongelijkmatige verdeling van positieve en negatieve ionen een interactief netwerk gevormd, waaraan de suspensie zijn stevigheid ontleent.

3.2 Indringing van de boorvloeistof

3.2.1 Indringingsproces

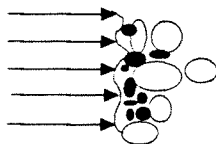
De processen die optreden bij het gebruik van bentoniet als ondersteuningsvloeistof kunnen verdeeld worden in: de initiële indringing, het blokkeren van de poriën en de filtercake vorming (het membraan.) (Zie figuur 3.3)



figuur 3.3: Deelprocessen afpleistering [36]

Voor de drie processen zijn de functies en eigenschappen van de boorvloeistof weergegeven in tabel 3.1.

Tijdens de initiële indringing zal de gradiënt klein zijn. De steunvloeistof zal over een grote diepte spanningen uitoefenen op het grondmassief. De deeltjes in de suspensie, voornamelijk het bentoniet, zullen vervolgens de poriën blokkeren en de indringdiepte zal afnemen. Bij grondsoorten met een relatief grote gemiddelde korreldiameter zal de indringdiepte groot zijn. Deze indringing kan soms zo groot worden dat grote, niet gewenste boorverliezen kunnen optreden. Ook is de vorming van een membraan moeilijk. Dit kan worden verholpen door de vloeispanning van de boorvloeistof te verhogen of de poriën van de grond te blokkeren door toevoegingen aan de bentoniet.



De tijdschaal, waarover indringing van de boorvloeistof plaatsvindt is in de orde van seconden. Dit proces gaat door totdat er een membraan wordt opgebouwd. De vorming van dit membraan is afhankelijk van de poriëngrootte in de grond. Deze wordt bepaald door de grootte van de fijne deeltjes, d_{10} . In het geval $d_{10} \leq 0,2$ mm, wordt er in ieder geval een membraan opgebouwd. De vloeistof wordt door het drukverschil uit het membraan geperst en het membraan groeit geleidelijk. De filtercake heeft als eigenschap zeer slecht doorlatend te zijn, zowel voor water als voor lucht. De overdruk in de suspensievloeistof kan daardoor direct via het membraan aan het korrelskelet afgedragen. Door ontgraving wordt de filtercake voortdurend weggehaald en weer opnieuw opgebouwd. Het voordeel van het membraan is dat de kamer met luchtdruk ondersteund kan worden, zodat de waterdoorlatendheid gewaarborgd is tijdens stilstand van de machine.

Het boorfront is makkelijk stabiel te krijgen in gronden met een kleinere doorlatendheid. Echter blijkt uit testresultaten [22] dat de effectieve slurrydruk afneemt met de toename in de waterdruk in de poriën door slurryinfiltratie.

tabel 3.1: functies en eigenschappen boorvloeistof

Functie	Proces	Eigenschappen Boorvloeistof	Eigenschappen grond	Operationele parameters
Ontgraving	oppervlakte erosie	dichtheid	korreldiameter doorlatendheid	debiet boorvloeistof, stroomsnelheid, diameter
	bulkerosie		schuifsterkte	aantal nozzles, pompdruk,
	verdringing		schuifsterkte	voortgangssnelheid
Afleistering	indringing	vloeispanning	poriëngrootte- verdeling	drukverschil tussen boorvloeistof en grondwater
	blokking poriën	korrelgrootteverdeling zand in boorvloeistof	poriëngrootte- verdeling	-
	opbouw filterkoek	consolidatiecoëfficiënt	-	drukverschil tussen boorvloeistof en grondwater
Transport	plug-flow	vloeispanning	korreldiameter	debiet boorvloeistof (stroomsnelheid), voortgangssnelheid (debiet grond), transportleidingdiameter, \varnothing boorgat
	bodemtransport	viscositeit	korreldiameter	
	suspensietransport	viscositeit	korreldiameter	en pompdruk
	degeneratie boorvloeistof	vloeigrens, dichtheid	vloeigrens, kleifractie, consolidatie	debiet boorvloeistof, voortgangs-snelheid, boorgat-/tunneldiameter, mate van recycling
Scheiding	zeven	-	korreldiameter	zeefgrootte
	hydrocyclonen	deeltjesgrootte	korreldiameter	gewichtsverschil deeltjes, rotatiesnelheid cycloon

Het mechanisme van slurry-infiltratie in het boorfront

Door het drukverschil tussen water en slurry ($p_r - p_w$) dringt de slurry in in het boorfront. Indien men stelt dat de slurry-infiltratie de lengte l_s bereikt na t seconden, dan wordt er voor de indringingssnelheid van de slurry, v_s , gesteld: [22]

$$v_s = \frac{dl_s}{dt} = \alpha k \frac{(p_0 - \Delta p)}{l_s}$$

Voor de indringdiepte en de indringsnelheid na t seconden geldt (tot de poriën blokkeren): [22]

$$l_s = \sqrt{\frac{2\alpha k (p_0 - \Delta p)}{\gamma_w}}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\alpha k (p_0 - \Delta p)}{2t\gamma_w}}$$

met

- l_s = indringdiepte
- p_0 = aanvankelijk drukverschil slurry-water
- Δp = toename van de waterspanningen voor de infiltratiezone
- v_s = indringingssnelheid slurry
- t = indringtijd
- αk = permeabiliteitscoëfficiënt slurry
- k = permeabiliteitscoëfficiënt grond
- α = correctiefactor slurryeigenschappen
- γ_w = soortelijk gewicht water

Uit de vergelijkingen is op te maken dat de indringsnelheid van de slurry verlaagd kan worden door de slurrydruk te verlagen en door slurry te gebruiken met een lagere doorlatendheidscoëfficiënt.

3.2.2 Toevoegingen aan de bentoniet

Blokkering van de poriën is mogelijk door deeltjes aan de steunvloeistof toe te voegen, waardoor de poriën verstopt raken. Dit kan bijvoorbeeld zaagsel, mica, zand of CMC (CarboxyMethylCellulose) zijn. Is de indringing van de boorvloeistof in het grondmassief klein, dan is de kans op instabiliteit klein. CMC is een halfsynthetische polymeer, welke gewonnen wordt uit cellulose. Het verhoogt de vloeispanning van de bentoniet door de kleideeltjes te omhullen en coagulatie te verhinderen. Het zand en mica werken op basis van het verstopping van de poriën; zand door de juiste korrelgrootteverdeling, mica door de plaatjesvormige structuur. Indien deze toevoegingen niet meer toereikend zijn, is de inzet van cement nog mogelijk.

Indien er geen membraan wordt opgebouwd, kan men toevoegingen gebruiken. Een formule voor het wel of niet opbouwen van het membraan bij gebruik van toevoegingen is gebaseerd op het ontwerpen van filterconstructies volgens Terzaghi/Peck. [17]

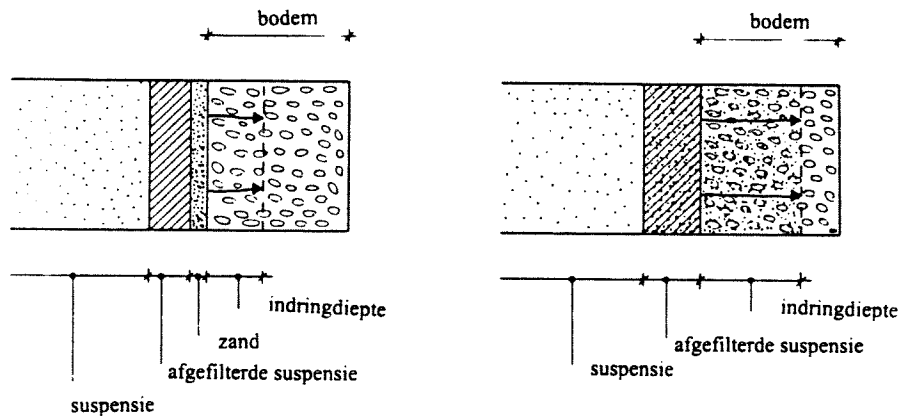
$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4$$

Met

D_{15} = Korreldiameter van het filtermateriaal bij 15% zeefdoorgang (vergelijkbaar met de toevoeging)

d_{85} = Korreldiameter van de af te filteren bodem (vergelijkbaar met de bentoniet)

Voor de keuze van het toe te voegen zand kan bovenstaande formule worden gebruikt. De invloed van het toevoegingsmiddel is vrij groot, als de zandkorrels nauwelijks in de bodem indringen en voldoen aan bovenstaande formule. In dat geval hoeft men slechts een geringe zandhoeveelheid toe te voegen aan de suspensie om een membraan op te bouwen. Voor suspensies, waarbij niet voldaan wordt aan het criterium, moet men grotere hoeveelheden zand toevoegen. Het patroon dat bij indringing ontstaat bij een suspensie met zand dat wel aan het criterium voldoet is anders dan bij een suspensie die er niet aan voldoet. Bij het opbouwen van een filter is duidelijk twee lagen te onderscheiden in het membraan, een zandlaag en een gesuspenderde laag. Bij de suspensie die niet aan het criterium voldoet, ontstaat een homogene filterkoek bestaande uit suspensie en zand. (Zie figuur 3.4). In de praktijk is een dergelijke vorming van een zandlaag niet gewenst, omdat de kans bestaat dat hierdoor de filterkoek loslaat van het boorfront.



figuur 3.4: links: voldaan aan filterregel

rechts: niet voldaan aan filterregel [17]

Voor de kwaliteit van de filterkoek wat betreft de luchtdichtheid zijn naast de randvoorwaarde grond de parameters vloeispanning en het drukverschil maatgevend. Toevoegingsmiddelen in de bentoniet suspensie verminderen de luchtdoorlatendheid. De permeabiliteit van bentoniet is afhankelijk van de viscositeit in de poriën, dus van het waterabsorberend vermogen. De permeabiliteit van grond voor een zekere vloeistof is uit de intrinsieke permeabiliteit of de permeabiliteit voor water te berekenen. Voor een bentoniet spoeling met een volumegewicht van $10,35 \text{ kN/m}^3$ geldt een viscositeit van ca. $0,05 \text{ Pa s}$, terwijl voor water bij 20° en 1 bar een viscositeit van $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$ geldt. De permeabiliteit van bentoniet ligt dus een factor 50 lager.

3.3 Transport van de slurry

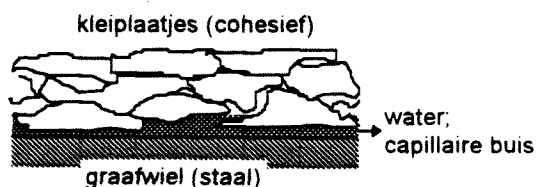
3.3.1 Het ontgraafproces

Het ontgraven van de grond gebeurt d.m.v. een graafspakenwiel met een centrale as. Dit wiel kan drie tot zeven spaken bevatten. De as van het wiel maakt een kleine hoek met de lengte-as van de TBM, waardoor het boorfront niet haaks op de TBM staat. De graafspaken zijn van snijdelen voorzien, die zodanig zijn gerangschikt dat het boorfront gelijkmatig ontgraven wordt. De snijdelen kunnen vanuit de ontgravingskamer vanaf de achterzijde van het graafwiel vervangen worden. Tijdens het boren wordt de filtercake ontgraven, waarna de bentoniet opnieuw een filtercake opbouwt. Het wiel kan zowel links- als rechtsom draaien. Het wiel is voorzien van zgn. oversnijders waardoor het mogelijk is excentrisch te ontgraven. De vloeistof wordt in de bovenkant van de kamer ingebracht, het grond/suspensiemengsel wordt onttrokken aan de onderkant van de graafkamer. Om bezinking te voorkomen en homogeen transport te bevorderen wordt een mixmechanisme ingebouwd.

De Japanse vloeistofschilden, de slurry-schilden, hebben geen luchtkussen, waardoor de druk aan het boorfront moeilijker te reguleren is dan bij het hydroschild. Daarom zijn deze schilden over het algemeen voorzien van een graafschijf (een relatief gesloten graafwiel). Deze geven een hogere mate van mechanische ondersteuning dan het graafwiel.

→ D met eregelsysteem.

Het voordeel van een graafwiel t.o.v. een vrijwel gesloten graafschijf, is dat de toegankelijkheid van eventuele obstakels groter is. Daarnaast is het contactoppervlak van een graafschijf met het boorfront groter dan bij een graafwiel, waardoor de wrijving groter wordt en het aandrijfkoppel toeneemt. In cohesieve gronden kan het graafwiel in het centrum worden uitgerust met een afzonderlijk klein snijwiel. Dit om te voorkomen dat een plak grond mee gaat draaien aan het graaffront. Deze wordt veroorzaakt door het aanhechten van kleiformaties aan het staal door de sterke capillaire kracht van een waterlaagje tussen het staal en de kleiformatie. De kleiformaties worden door cohesie van de kleideeltjes onderling gevormd. (zie figuur 3.5)



figuur 3.5: verkleving van klei aan staal [4]

Het breken van stenen en andere obstakels in de grond en voor het schild gebeurt in eerste instantie door de snijelementen. Grotere stenen die uit het boorfront vallen kunnen door een steenbreker in de ontgravingsruimte worden gebroken. Bij een graafschijf kunnen de grotere stenen de ontgravingskamer niet bereiken. Deze moeten aan het front worden verbrijzeld of door de TBM opzij worden geduwd. Is dit niet mogelijk dan zullen de stenen handmatig verwijderd moeten worden. Bij deze handeling zullen de stalen platen van de graafschijf verwijderd moeten worden.

Het is mogelijk de ontgravingsruimte te betreden. Dit kan noodzakelijk zijn om snijelementen te vervangen, inspectie aan het boorfront te verrichten, of om ondergrondse obstakels te verwijderen. Het boorfront kan betreden worden door het boorfront onder luchtdruk te zetten. Door de filtercake wordt de stabiliteit van het boor front vergroot en worden de luchtdrukverliezen verminderd.

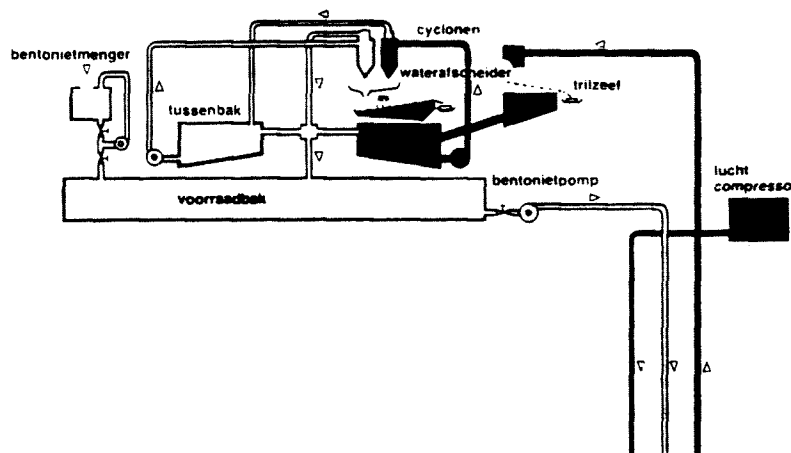
Het gebruik van de bentonietvloeistof heeft nog een bijkomend voordeel: Het werkt als een soort smeermiddel, waardoor wrijving wordt verminderd tussen het ontgraven materiaal en de machine. Het gevolg hiervan is een afname van het aandrijfmoment en een vermindering van de slijtage aan de machine.

3.3.2 Afvoer van de slurry

Naast de ondersteunende functie van de bentonietvloeistof, dient de bentonietvloeistof als transportmiddel voor de ontgraven grond. Het transport wordt mogelijk gemaakt door aanvoer van schone steunvloeistof onder het gelijktijdig afpompen van de met grond vermengde steunvloeistof. Door middel van een pomp wordt het materiaal naar boven getransporteerd. De bovengrens van de inzetbaarheid bleek vastgelegd te zijn door de verpompbaarheid. Door een turbulente stroom in de leiding is het namelijk mogelijk dat kleideeltjes tot kleiballen gaan verkleven. Dit is hetzelfde verschijnsel dat optreedt bij het graafwiel. De grootte van de kleiballen wordt bepaald door de grootte van de gronddeeltjes, de afvoersnelheid van de suspensie door de leiding, de afmetingen van de leiding in doorsnede en lengterichting. In paragraaf 2.3 is met behulp van de grafiek Atterbergse limiet weergegeven wanneer er kans is op het ontstaan van kleiballen.

3.3.3 Scheiding van de slurry

Bovengronds wordt de bentoniet van de grond gescheiden. In de eerste plaats om het bentoniet te kunnen hergebruiken., in de tweede plaats om milieuredenen. De eerste scheiding vindt al plaats in de graafkamer. Voor de afvoer van de boorspoeling zit een rooster, om te voorkomen dat niet transporteerbare brokken in de afvoerleiding zouden komen. De slurry wordt bovengronds gescheiden middels een scheidingsinstallatie, bestaande uit zeven en cyclonen, eventueel uitgebreid met een centrifuge. De eerste scheiding vindt hier plaats door trillende zeven, in zeefgrootte variërend. In de praktijk worden deeltjes gescheiden van 0,2 mm. De kleinere deeltjes worden met behulp van een hydrocycloon gescheiden. De slurry wordt onder zeer hoge druk in een cilinder gespoten. Door de centripetale kracht scheiden de zware deeltjes zich van de lichtere: de zware deeltjes zakken naar beneden en de fijne deeltjes naar boven. Hydrocyclonen scheiden deeltjes tot een grootte van 0,05 mm. Deeltjes, die nog kleiner zijn dan 0,05 mm kunnen worden gescheiden in de centrifuge. Vervolgens wordt de herwonnen bentoniet gemengd met schone bentoniet. (Zie figuur 3.6)



figuur 3.6: scheidingsinstallatie [8]

De grootte van een scheidingsinstallatie wordt bepaald door:

- de gewenste samenstelling van het herwonnen bentoniet: Deze hangt af van de grond waarin wordt geboord. Ten eerste bepaalt deze de samenstelling van het bentoniet, ten tweede de intensiteit waarin men moet scheiden. In groffe gronden met weinig aandeel kleine deeltjes zal de scheiding eenvoudiger zijn dan in gronden met een hoog aandeel fijn materiaal. De complexiteit van het scheidingsproces is voornamelijk het scheiden van de bentonietdeeltjes van de fijne deeltjes.
- de mate van zuiverheid van de afgegraven grond: Hoewel bentoniet een natuurlijke grondstof is, wordt grond met bentoniet gezien als "vervuilde" grond. Deze grond kan niet willekeurig worden hergebruikt, vanwege de waterbindende eigenschappen van het bentoniet. Na dumping zal grond, die vervuild is met bentoniet, de capaciteit hebben plastisch te gedragen door opname van water door het bentoniet. Om grond te kunnen hergebruiken zal het geheel van de bentoniet gescheiden moeten zijn. Dit houdt in dat de grond ook gescheiden is van veen en ander organisch materiaal. Men zou nog een laatste scheidingstrap kunnen toevoegen om het bentoniet te verwijderen. Dit is het toevoegen van een overmaat indifferent electrolyt, waardoor uitvloeking optreedt. [23]
- door de beschikbare ruimte op de werkplaats: een scheidingsinstallatie is vrij groot van omvang en neemt veel ruimte van de bouwplaats in: Om de lengte van het ontgraven transport te beperken, dient de installatie dicht bij de startschacht gesitueerd te zijn.
- door economische redenen: het scheidingsproces wordt duurder naarmate de grond beter gescheiden moet worden. Er zal gekeken moeten worden naar economische afweging tussen hergebruik afgegraven grond + hergebruik bentoniet versus dumping van minder schoon afgegraven materiaal.

HOOFDSTUK 4 Ontgravingsproces EPB-schild

4.1 Conditionering van de grond in een EPB-schild⁷

4.1.1 Conditioneringsmiddelen

In de vorige paragraaf is reeds gezegd voor welke gronden het EPB-schild inzetbaar is zonder additieven. Dit bleek te gelden voor gronden met een aandeel kleine deeltjes (0,063 mm) groter dan 30%, gelegen boven de Atterbergse limiet en binnen de liquiditeitsgrenzen. Door mechanische conditionering, het samenkneden van de deeltjes tot een homogene grondbrij door het mengen, kan een grondbrij worden verkregen die voldoet aan de voorwaarden van plasticiteit, permeabiliteit etc. Het graafwiel en de mengarmen verstoren de verbindingen tussen de deeltjes en reduceren de afstand de afstand tussen de deeltjes, waardoor de bindende krachten verder toenemen.

Overige gronden kunnen worden geconditioneerd. Voor gronden die slechts niet voldoen aan het watergehalte criterium, kan toevoeging van water voldoende zijn om de vervormbaarheid te vergroten. De overige gronden worden geconditioneerd met additieven als schuim, HDS en polymeergel om de gewenste grondcondities te verkrijgen. (zie tabel 4.1)

In eerder onderzoek⁸ zijn reeds experimenten uitgevoerd met het conditioneren van zand, en wel Maaszand, één van de moeilijkste zandgronden om te conditioneren. Uit dit onderzoek zijn enkele constateringingen gedaan over de mogelijkheden van de conditioneringsmiddelen.

Doel van conditioneren:

- het creëren van een pasta: een lage cohesie, een lage inwendige wrijvingshoek en een lage elasticiteitsmodulus
- verminderen van de doorlatendheid

Methode conditioneren:

- mechanisch: het veranderen van de bodemstructuur door ronddraaiende afgraaf- en menginstallaties
- injectie van water, klei, polymeer, schuim.

Voor cohesieve grond is mechanische conditionering voldoende voor het vormen van een goede grondbrij. Het graafwiel en de mengarmen in de graafkamer verstoren de bindingen van de deeltjes, waardoor de afstand tussen de deeltjes reduceert en de bindende krachten verder toenemen. Bij niet cohesieve grond neemt tijdens het ontgraven het poriënvolume toe en kan door de verandering in het korrelskelet de conditioneerstof in het korrelskelet worden vermengd.

⁷ Theorie in dit hoofdstuk voornamelijk afgeleid van [3,13,21]

⁸ Conditionering van zandgrond voor uitbreiding van de inzetbaarheid van het gronddrukbalansschild, S. van der Woude

Tabel 4.1: Inzet van conditioneermiddelen [2]

Conditioneermiddel	eigenschap	niet-cohesieve grond	cohesieve grond
water	- reductie inwendige wrijvingshoek ϕ - verhoging watergehalte - reductie cohesie	- - -	♦ ♦ ♦
kleisuspensies (bentoniet en hoge dichtheids suspensies (HDS))	- reductie inwendige wrijvingshoek ϕ - verhoging aantal fijne deeltjes - reductie waterdoorlatendheid - verhoging cohesie - verhoging consistentie - verdringing poriënwater - binding restporiënwater - reductie slijtage	♦ ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ ♦	- - - ♦ - - - ♦
polymeer	- reductie inwendige wrijvingshoek ϕ - reductie waterdoorlatendheid - verhoging cohesie - verhoging consistentie - verdringing poriënwater - binding restporiënwater - reductie slijtage - vermindering verkleaving	♦ ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ -	- - - - - - ♦ ♦
schuim	- reductie inwendige wrijvingshoek ϕ - reductie waterdoorlatendheid - verhoging cohesie - verhoging consistentie - verdringing poriënwater - reductie slijtage - vermindering van verkleaving	♦ ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ -	- - - - - ♦ ♦

High Density Suspension

HDS dringt niet in de formatie en verdringt geen grondwater. Al het grondwater in de ontgraven grond moet worden gebonden door de in de HDS aanwezige waterabsorberende stoffen. HDS-conditionering is erg gevoelig voor variaties in het watergehalte van de grond. Om de consistentie in het plastische gebied te houden moet de concentratie van de waterbindende delen in de conditioneerstof worden aangepast. In de praktijk is de concentratie niet snel te veranderen. Voor verzadigde zandgrond is een hoge concentratie vaste stof noodzakelijk, waardoor problemen ontstaan tijdens menging en verpomping. Het ander nadeel is dat de grond na ontgraven zeer lang plastisch blijft en weer plastisch wordt na toevoeging van water. De grond zal ook in speciale afvaldepots moeten worden opgeslagen.

Schuim

Schuim penetreert in de formatie en verdringt grondwater. De indringdiepte en de indringsnelheid zijn afhankelijk van de poriëngrootte en de permeabiliteit. Schuim is echter gevoelig voor variaties in de poriëngrootte en de permeabiliteit van de oorspronkelijke grond. Schuim maakt de grond in de kamer samendrukbaar, waardoor fluctuaties in de aangebrachte steundruk worden gedempt. Een ander voordeel van het gebruik van schuim is dat de afgegraven grond zijn oorspronkelijke samenstelling en volume terugkrijgt, omdat in open lucht de lucht uit het schuim ontsnapt. Het risico van te kleine poriën is dat het een onvolledige verdringing van het grondwater veroorzaakt. Hierdoor wordt niet al het water buiten de groundbrij gehouden en kan de groundbrij te vloeibaar worden.

Polymeergel

Polymeergel dringt in de poriëruimte. Bij conditionering met polymeergel moet een optimum worden gevonden tussen lage zwichtspanning voor diepe indringing en hoge viscositeit om de groundbrij plastisch te laten vervormen. Polymeergel vraagt juist een hoge concentratie polymeren als al het grondwater in de groundbrij wordt opgenomen, terwijl conditioneren met lage concentratie polymeergel vraagt om nauwkeurige afstelling en voortdurende aanpassing van de concentratie van polymeren. Kostentechnisch gezien is het polymeergel te duur in gebruik.

Tabel 4.2: inzetbaarheid met conditioneringsmiddelen

Bereik	Randvoorwaarden	Conditioneerstof
1	$I_c = 0,4 - 0,75$	water, bentonietsuspensies, tensidschuim, polymeergel
2	$k < 10^{-5}$ m/s waterdruk < 2 bar	bentonietsuspensies, polymeerschuim
3	$k < 10^{-4}$ m/s geen waterdruk	HDS, sterk geconcentreerde polymeerschuim, polymeergel

Algemene constatering

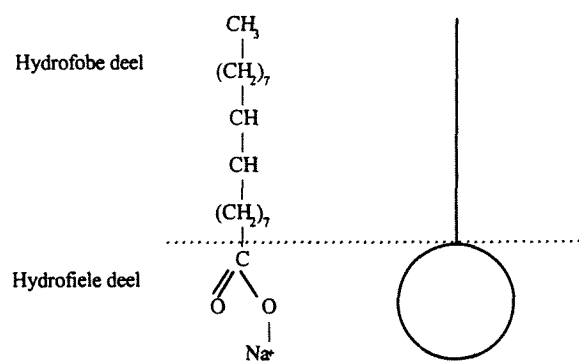
Verscheidene projecten, die zich kenmerken door het ontgraven van afwisselend cohesieve grond en niet cohesieve grondsoorten, zijn met behulp van schuimconditionering met succes uitgevoerd. Gezien de brede inzetbaarheid (Zie tabel 4.2) en de vele voordelen van het schuim ten opzichte van de overige conditioneermiddelen, is het interessant het schuim als conditioneringsmiddel van het EPB-schild bij de vergelijking te betrekken.

4.1.2 Eigenschappen van schuim, tensiden

Schuim kan worden opgevat als een dispersie van gas in een vloeistof. De schuimvloeistof bestaat uit een bipolaire schuimvormer en een polymere stabilisator.

Schuimvormer

Een schuimvormer bestaat uit een organische verbinding van koolstoffen (ook wel grensvlakactieve stof of tensid genoemd). Het tensid of zeepmolecuul is een oppervlakte actieve stof met grensvlak actieve eigenschappen. Het molecuul van een tensid heeft een hydrofiele kop (polaire deel) en een hydrofobe staart (apolaire deel).



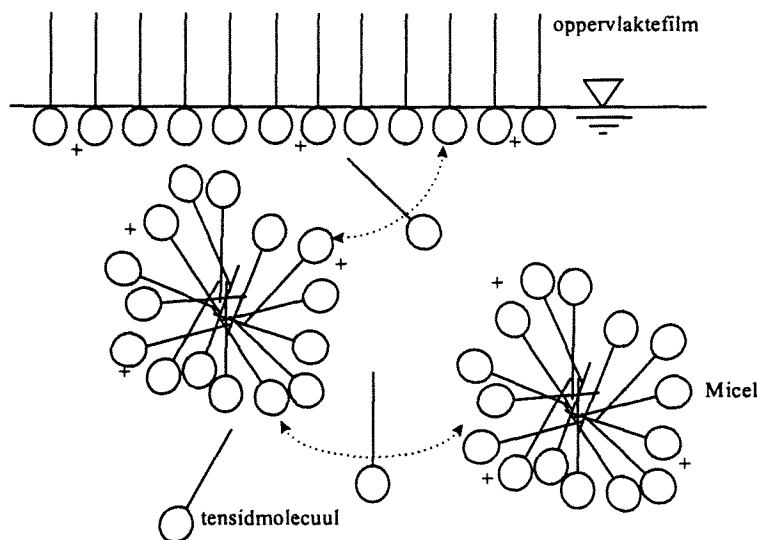
figuur 4.1: moleculaire opbouw (l) en schematische weergave tensid (r) [21]

Fysische eigenschappen m.b.t. grensvlakactiviteit: **grensvlakactiviteit:** zijn in een vloeistof grensvlakactieve stoffen opgelost dan verandert de vloeistofstructuur als volgt:

- er wordt een filmlaagje met andere eigenschappen aan het oppervlak gevormd
- de oppervlaktespanning van de vloeistof wordt gereduceerd
- de vaste deeltjes worden beter omringd
- binnen de vloeistof ontstaan micellen

Oppervlaktefilm: Soort zoekt soort: polaire krachten zoeken elkaar op, zoals ook apolaire delen elkaar opzoeken. De polaire kop wordt aangetrokken door het water, een watermolecuul is polair. De apolaire staart wordt afgestoten. Tussen de apolaire staarten werken wel de Van der Waalskrachten, echter deze zijn ondergeschikt aan de bipolaire krachten. De moleculen aan het oppervlak worden alleen aan de onderkant naar beneden getrokken. Het oppervlak heeft dus potentiële energie: Er is een bepaald de energie aanwezig die de twee media van elkaar gescheiden houdt.

Micellenvorming: Door hetzelfde verschijnsel als net kunnen bij een zekere concentratie micellen ontstaan. Hierbij zijn de staarten naar binnen gericht en de koppen naar de vloeistof toe. Er vindt onderlinge uitwisseling tussen micellen en oppervlaktefilm plaats van tensidmoleculen. (figuur 4.2)



figuur 4.2: micellen en oppervlaktefilm [21]

Aanhechting aan het korreloppervlak:

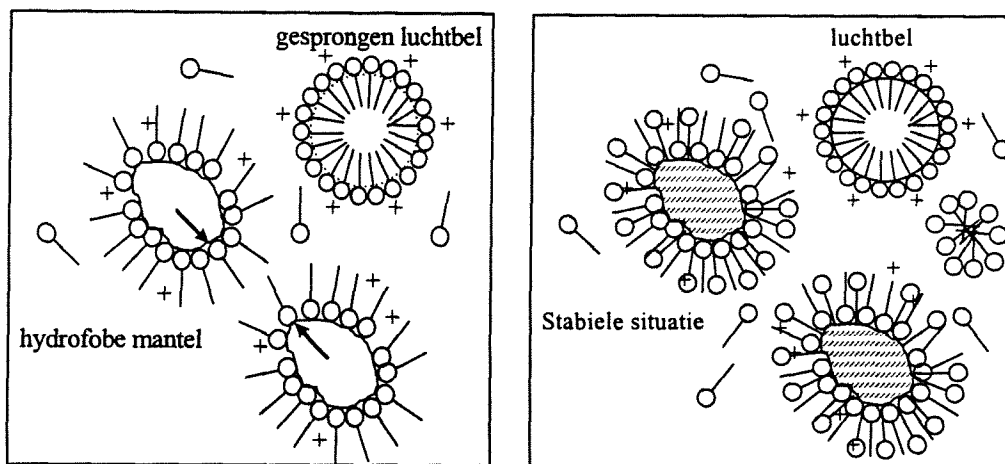
Met afnemende oppervlaktespanning neemt de aanhechtingshoek van de vaste vloeistof met het vaste deeltje af, waardoor in een tensidhoudende vloeistof het korreltje beter omringd wordt.

Schuimstabilisatoren

De kwaliteit en levensduur van schuim in het korrelskelet kan door toevoeging van schuimstabilisatoren zoals polymeren verbeterd worden. Bevat de schuimvloeistof een te kleine concentratie aan oppervlakreactieve substanties dan wordt er geen werkzame oppervlaktefilm opgebouwd en draineert de lamel binnen korte tijd. Bij een te hoge concentratie aan oppervlakreactieve substanties nemen de oppervlaktespanning en de oppervlaktespanningsgradiënt van de film tot een kritieke maat af.

tensidschuim

Het proces gaat als volgt: De korrels hebben een hydrofiele aantrekkingskracht. De tensidmoleculen hechten zich met hun kop aan de korrels. Er is nu een korrel ontstaan met een hydrofoob gedrag. Hierdoor trekken de korrels elkaar aan en klonteren ze juist samen. Bij een hogere concentratie van de tensidmoleculen leidt dit hydrofobe karakter tot het knappen van de luchtbelllen en trekken de hydrofobe korrels de hydrofobe staarten aan. Er ontstaan nu hydrofiele korrels die vrij kunnen bewegen. (figuur 4.3)

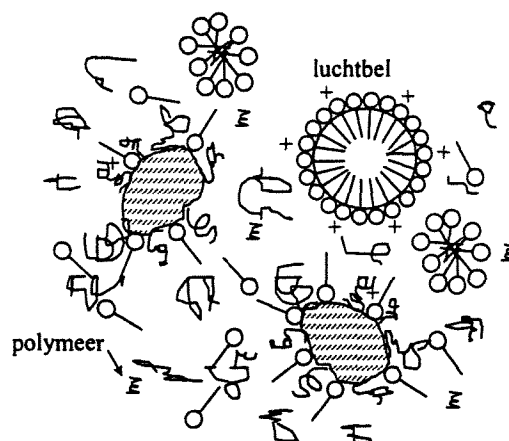


figuur 4.3: geringe concentratie (l)

geschikte concentratie (r) [21]

Polymeerschuim

De dynamische wisselwerking tussen de tensidmoleculen van de oppervlaktefilm, de schuimbellen en het korreloppervlak zijn geringer, waardoor de stabiliteit van het schuim in het korrelskelet verhoogd wordt. (figuur 4.4). De polymeer-tensid omhulling werkt als een isolator en beschermt de korrel tegen elektrische invloeden. De polymeer-tensid vloeistof vermindert de wrijving tussen de korrels onderling en geeft minder snel aanleiding voor de versterking van een luchtbel door het ruwe oppervlak. Het oplossend vermogen van de interlamillaire schuimvloeistof in het polymeer-tensid mengsel zorgt voor een eenheid door verkleefing van het mengsel met de korrels. Hierdoor neemt het waterdoorlatend vermogen sterk af.



figuur 4.4: hechting van polymeerschuim aan bodemdeeltjes [21]

4.1.3 Schuim als conditioneermiddel

Het drie-fasen systeem: de grondbrij

Geïnjecteerde grond kan worden geschematiseerd tot een drie-fasensysteem:

grond (vaste stof) + water (vloeistof) + lucht (gas)

De eigenschappen worden bepaald door de volumeverhouding van de vaste, vloeï- en gasfase. De volumeverdeling is niet constant, maar tijdsafhankelijk.

$$\rho_{brij} = \frac{m_{ds} + m_w + m_{sch}}{\frac{m_{ds}}{\rho_s} + V_l + V_w + V_{sch}}$$

In paragraaf 2.2 is beschreven aan welke eigenschappen de grondbrij moest voldoen. Dit waren:

1. permeabiliteit
2. vervormbaarheid en consistentie
3. compressibiliteit
4. abrasiviteit
5. verkleving

De optimalisering van de grondbrij door het schuim op deze factoren:

ad 1) permeabiliteit

Om tot een waterdichte afdichting te kunnen komen, wordt het schuim onder een overdruk geïnjecteerd, waardoor het schuim het grondwater verdringt. De standtijd van het schuim is echter niet eindeloos, namelijk 30-40 minuten. Hierna zal de permeabiliteit afnemen. Er zal continue schuimtoevoer moeten plaatsvinden om het afgebroken schuim te vervangen. Bij langdurige stilstand is sluiting van de avegaar aan te raden.

ad 2) vervormbaarheid

Het schuim zal het grondwater uit de poriën verdringen, maar zal in eerste instantie zich aan de korrels gaan hechten. (Zie ook paragraaf 5.2.1) Hierdoor zullen korrels makkelijker over elkaar heen gaan glijden, m.a.w. de hoek van inwendige wrijving ϕ wordt gereduceerd en de vervormbaarheid neemt toe.

ad 3) compressibiliteit

De grondbrij bestaat uit grond, water en lucht. Hiervan heeft lucht als enige een goede samendrukbaarheid. De lucht in het mengsel treedt op als een luchtbuffer, net als de luchtkamer in het hydroschild. Bij het verdichten van de grond zullen de schuimbellen het eerst vervormen. Bij verdere verdichting gaan ook de schuifkrachten tussen de korrels onderling meewerken. De samenhang tussen druk en volume kan beschreven worden met de gaswet van Boyle-Mariotte: Hierin wordt de lucht in de mengkamer voorgesteld als een ideaal gas, dat alle druk- en volumeschommelingen opvangt. Indien wrijvingskrachten tussen de korrels optreden, hetzij door een toegenomen druk hetzij door vermenging van de grond, vindt er een gecombineerd samendrukingsproces van schuim en korrelskelet plaats

ad 4) abrasiviteit

De slijtage aan het materiaal wordt toegeschreven aan de wrijving tussen het zand en het materiaal. De parameter die de slijtage in grote mate bepaalt is de wrijvingshoek δ , die hier een waarde heeft van $\delta = \frac{2}{3}\varphi$. Door de film van schuim rond de korrels wordt de hoek van inwendige wrijving verlaagd en wordt de abrasiviteit verminderd.

Ad 5) verkleving

Verkleving treedt niet op in zandige gronden.

Het grote verschil van het drie-fasensysteem met een twee-fasensysteem is dat het bodemschuimmengsel een zekere samenhang heeft. In grond, waarvan de poriën met water of lucht gevuld zijn zal bij een overdruk het water of de lucht weglopen. Door de adhesie, capillaire krachten en de hoge viscositeit van het schuim worden binnen bepaalde grenzen van druk het ontsnappen van een fase tegengegaan.

Het schuim moet een stabiele positie tussen de korrels innemen om de steundruk van de drukwand over te dragen aan het boorfront. Het schuim blijkt echter vergankelijk te zijn in de tijd, m.a.w. de standtijd van het schuim is beperkt. Uit experimenteel onderzoek [21] zijn de volgende parameters naar voren gekomen die van invloed zijn op de kwaliteit van het schuim:

Invloedsparameters op de schuimkwaliteit

- **Productiewijze:** Naast de samenstelling van het schuim is de wijze waarop het schuim wordt geproduceerd van invloed op de uiteindelijke kwaliteit van het schuim.
- **Bellengrootte:** De bellen moeten klein zijn en met elkaar "in verbinding staan". Hierdoor stijgt het aantal verbindingpunten per volume-eenheid en stijgt hiermee de vloeispanning.
- **Tensid:** Na het omhullen van de bodemdeeltjes is er geen noemenswaardig verlies van schuim te waarnemen tijdens het mixproces.
- **Polymeer:** Door het toevoegen van een polymeer wordt de schuimkwaliteit ten aanzien van de standtijd aanzienlijk verbeterd. Een polymeer is niet compressibel, maar heeft een grote indringdiepte. Tensidschuim heeft een korte standheid en een kleine indringdiepte. Het toevoegen van een polymeer aan het schuim verbetert de standtijd van het schuim. Een te hoge concentratie aan polymeren brengt als nadeel met zich mee dat de mobiliteit van de schuimmolekulen afneemt.
- **Tijd:** In het verloop van de tijd neemt de kwaliteit van het schuim af. Binnen de parameter tijd kan men nog onderscheid maken tussen drie tijdspannen: Tijdens het boren van de machine, korte stilstand (nl. voor het zetten van een ring), lange stilstand (weekend, onderhoud, reparatie)
- **Dynamisch mixen:** Hoogstwaarschijnlijk neemt de kwaliteit van het schuim af tijdens het mixen.

Invloed van het schuim op het boorfront:

- Schuim verdringt het poriënwater
- Overdracht van de steundruk door
 - Normaalspanningen op het “membraanvlak” van het boorfront
 - door stromingsweerstand/schuifspanningen van de grondbrij

Het boorfront kan niet onder luchtdruk gezet worden zonder dat de lucht het schuim gaat verdringen. Daarnaast zal de lucht een ongunstige invloed hebben op de standtijd van het schuim. Van een afsluitende laag kan in dit geval niet gesproken worden.

4.2 Transport van de grondbrij

4.2.1 Het graafproces

Qua inzet van schild, gesloten of open, geldt hetzelfde principe als bij het hydroschild. Gesloten schilden worden voornamelijk gebruikt in niet standvaste, cohesieloze gronden om te voorkomen dat grote delen grond ongecontroleerd in de kamer kunnen glijden. De grootte van de doorlaatopeningen moet men zodanig kiezen dat de door te laten stenen geen kans zien om de afvoer te verstoppen. Het schild biedt enige mechanische ondersteuning in geval dat de graafkamer betreden moet worden, voor bijvoorbeeld reparatie, het verwisselen van snijtanden. Om de graafkamer te kunnen betreden moet de ruimte onder hoge luchtdruk worden gezet. Omdat het boorfront niet of nauwelijks verzegeld is door een boorfront kan de lucht de poriën indringen en het grondwater verdringen, waardoor de bodem zijn standvastheid verliest.

Een nadeel van het **gesloten** rad t.o.v. het open rad is dat de druk ongelijkmatiger verdeeld wordt. Daarnaast zijn de wrijvingskrachten hoger en is het aandrijfmoment groter. Het voordeel van een **open** rad is dat het gevaar van verklevens geringer is, een gelijkmatigere drukverdeling op het boorfront wordt bereikt. Daartegenover zijn de risico's groter indien de graafkamer betreden moet worden. De graafkamer wordt als dat deel gerekend dat tussen voorkant schild en drukwand zit. In deze kamer wordt het ontgraven materiaal vermengd tot een plastische brij. Indien het rad niet een voldoende grote knedende werking heeft kan men het volgende doen:

- Inbouwen van agitators aan het snijrad
- Inbouwen van statoren aan de drukwand
- Inbouwen van een roermechanisme in het centrum aan de drukwand

De verblijftijd van de grond in de kamer is afhankelijk van de lengte van de kamer en de boorsnelheid.

Bij een geconditioneerd EPB-schild wordt er aan het boorfront schuim geïnjecteerd. Dit schuim wordt geproduceerd door schuimgenerator. De vloeistof wordt door een ruimte gevuld met knickers geperst, waardoor er turbulentie ontstaat en het schuim wordt gevormd. Vervolgens wordt het schuim gelijkmatig over het boorfront aangebracht via schuiminjectiepunten die zijn verdeeld over het graafwiel. De grond wordt verder geconditioneerd in de graafkamer en de schroeftransporteur door schuim te injecteren.

De **hoeveelheid** te injecteren schuim is afhankelijk van de porositeit en de grondsoort waarin wordt gegraven. Tijdens het snijden van de grond dilateert het zand en zal de meest losse pakking aannemen in de kamer. Het totale volume van de korrels verandert uiteraard niet. Voor toename van de porositeit van in situ porositeit tot maximale porositeit wordt de volgende formule gegeven:

$$\Delta n = \frac{n_{\max} - n_{in\ situ}}{1 - n_{\max}}$$

De ontstane ruimte wordt opgevuld met schuim om het grondwater tegen te houden. Voor de hoeveelheid extra toe te voegen schuim geldt dan:

$$q = \frac{n_{\max} - n_{in\ situ}}{1 - n_{\max}} \cdot v_{TBM}$$

waarin q de **hoeveelheid schuim** is die men extra toe moet voegen per vierkante meter graafwiel. Bij het installeren van de schuiminjectoren moet men dus rekening houden met de diameter van het schild: In een korte tijd dient het hele oppervlak geïnjecteerd te worden en moet het geïnjecteerde schuim de heersende grondwaterdrukken weerstaan. Het te injecteren volume dient te worden aangepast aan de parameters graafsnelheid, steundruk, plotselinge stilstand van bijvoorbeeld de schroeftransporteur. De samenstelling van het schuim dient te worden aangepast aan de bodemsamenstelling.

4.2.2 Afvoer van de grondbrij

De **schroeftransporteur** (figuur 4.5) is het volgende onderdeel in de transportketen. Deze heeft de volgende functies:

- Grondverwijdering uit de onder druk staande graafkamer naar de onder atmosferische druk staande tunnel
- Waterafdichtende werking bij waterdoorlatende bodems
- Regeling van de steundruk door gecontroleerde afvoer



figuur 4.5: schroeftransporteur

De plaats en positie van de schroeftransporteur kan variëren. Ten eerste in de lengterichting: De transporteur kan reeds beginnen in de graafkamer of kan pas beginnen bij de drukwand. Bevindt de schroeftransporteur zich in de graafkamer dan bevordert dit de afvoer. Ten tweede kan de vijzel in het centrum of onder in de machine worden aangebracht. Bij een transporteur die in het centrum is aangebracht moet een groot deel van de grondbrij tegen de zwaartekracht in worden gedrukt. Daarnaast kan alleen de gehele graafkamer betreden worden, als men het boorfront onder luchtdruk houdt en men handmatig de grond onderuit de graafkamer heeft verwijderen. Hieruit volgt voor de onderin geplaatste schroeftransporteur dat het betreden van de graafkamer makkelijker is en dat de grondbrij onder zijn eigen zwaartekracht in de schroeftransporteur wordt gedrukt. Meestal ziet men dat de transporteur niet geheel onderin is geplaatst om te voorkomen dat de transporteur verstopt raakt door stenen of obstakels die zich bevinden in de graafkamer. Deze stenen dienen of reeds voor de schroefvijzel klein genoeg te zijn gesneden of er kan een steenvang in de transporteur worden ingebouwd, opdat niet bij iedere verstopping het boorfront onder druk moet worden gezet.

Om voldoende **steundruk** te kunnen creëren moet worden verhinderd dat de grondbrij of het water ongecontroleerd naar buiten komt. Door het verdichten van de grondbrij in de transporteur of het toepassen van een sluizensysteem kan een waterdichte afsluiting worden verkregen. Verdichting van de grondbrij in de transporteur kan worden verkregen door een afsluiter aan het einde van de transporteur. Daarnaast heeft de **wrijving van de grond met de avegaar en buismantel** een gunstige invloed op het grondtransport. Als de grond te vloeibaar is, kan men met deze afsluiter de ontstane stroom van grond stoppen. Door het toe- of af laten nemen van het toerental van de schroeftransporteur kan het volume in de graafkamer gereguleerd worden.

De steundruk kan worden bepaald aan de hand van de uitgaande massa en het meten van de gronddruk. Bij massacontrole wordt m.b.v. de diameter en de voortgangssnelheid van de machine de massa/gewicht bepaald die uit de transporteur moet komen. Deze theoretische hoeveelheid wordt vergeleken met de hoeveelheid die er in werkelijkheid ontgraven wordt. Het **gevaar** bij deze methode is dat:

- Men geen zekerheid heeft aangaande het theoretisch bepaalde volume
- De bepaling van de massa is onnauwkeurig en duur
- Men kan pas na een tijd een kwalitatieve uitspraak doen, dus niet over de momentane toestand
- Indien additieven worden toegepast is de herkomst van het materiaal niet duidelijk
- Zwelling en verdichting van de grondbrij is onbekend

Bij drukmeting wordt de druk in de graafkamer vergeleken met de theoretische druk. Het nadeel van deze methode is dat in de praktijk is gebleken dat de druk bij de drukwand en aan het boorfront aan schommelingen onderhevig zijn.

Nadat het grondbrijmengsel door de schroeftransporteur uit de graafkamer is afgevoerd wordt de grond op een transportband gestort. Deze band transporteert de grond naar de volgtrein, waar men met behulp van een trein of i.d. naar de startschacht wordt vervoerd.

4.2.3 Verwerking van de grondbrij

Eén van de voordelen die het EPB-schild heeft ten opzichte van het hydroschild is zijn droge afvoer. De grond is schoon tot vrij schoon, afhankelijk van of er al dan niet conditioneermiddelen gebruikt zijn en of er reeds vervuilde stoffen in de grond zaten. De grond is vrijwel meteen geschikt voor hergebruik en behoeft niet eerst een uitvoerig scheidingsproces te doorlopen, hetgeen bij gebruik van bentoniet wel het geval is.

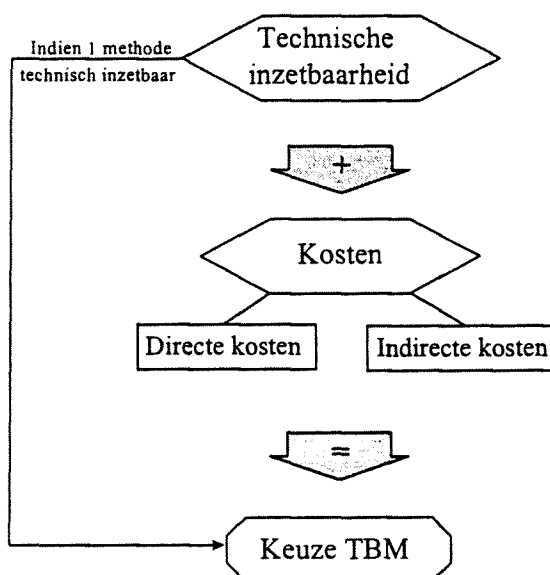
Volgens de schuimproducenten is hun product biologisch afbreekbaar. Zowel schuimstoffen als tensiden zijn onschadelijk. Organische stoffen oxideren tot de natuurlijke producten CO₂ en H₂O. Ook al zijn de stoffen onschadelijk in verdunde oplossingen en zijn ze biologisch afbreekbaar, toch legt het gebruik ervan bepaalde beperkingen op.

De biologische afbraak van halfsynthetische polymeren (dus ook CMC) duurt vaak zeer lang. Ook grond die bewerkt is met schuim wordt niet beschouwd als schone grond. In veel landen zijn limieten gesteld aan de zuurstof opname van de te storten grond. Indien de grond te veel schuim bevat kan deze limiet overschreden worden. De grond zal moeten worden opgeslagen in speciale afvaldepots of worden behandeld voor hergebruik van de grond. Men zou bijvoorbeeld de grond tijdelijk kunnen opslaan tot de tensiden zover biologisch is afgebroken dat de grond zuiver kan worden genoemd. Een andere methode is om de grond schoon te spoelen met water, waarna het spoelwater gezuiverd wordt. Afhankelijk van de samenstelling van de ontgraven grond kan de grond worden hergebruikt voor verschillende doeleinden, bijvoorbeeld zandsuppletie voor landaanwinning. De mate waarin de grond moet zijn gereinigd is afhankelijk van het doel waarvoor het wordt gebruikt. Door het IPO (Inter Provinciaal Overleg) worden in Nederland geen eisen gesteld aan de maximaal toelaatbare percentages tensiden en polymeren. Het IPO is tot 1998, als het bouwstoffenbesluit in werking treedt, verantwoordelijk voor de regelgeving. [21]

HOOFDSTUK 5 De risicoanalyse

5.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 is de geotechnische inzetbaarheid van het hydroschild en het EPB-schild behandeld. Het blijkt dat de inzetgebieden van de boormethodes elkaar voor een groot deel overlappen. Indien beide methoden inzetbaar zijn, zal, gezien uit het oogpunt van een aannemer, een afweging gemaakt worden op basis van de kosten van het project, zie *figuur 5.1*.



figuur 5.1: invloedsfactoren keuze TBM

De kosten kunnen worden verdeeld in:

- directe kosten
 - vast
 - variabel
- indirecte kosten.

Onder directe kosten wordt verstaan de aanlegkosten van een project: bouwplaatsinrichting, aanschaf boorinstallatie, transport van grond, scheiding van grond, lining, grout, loonkosten, energie, conditioneermiddel en engineering. Directe kosten kunnen worden onderverdeeld in vaste en variabele kosten: een tbm is een éénmalige vaste uitgave, engineeringkosten zijn variabel. De indirecte kosten zijn kosten die niet noodzakelijk zijn voor de aanleg van het project sec, zoals risico's van het project. Tevens kan men een aspect als maatschappelijke afweging meenemen in de indirecte kosten. Eventuele hinder in de vorm van geluidshinder of visuele hinder kunnen een rol spelen.

5.2 Risicoanalyse

5.2.1 Wat is risico ?

De grootte van het risico wordt gedefinieerd door:

$$\text{Risico} = \text{kans van optreden} \times \text{gevolg van een gebeurtenis}$$

Ten aanzien van de **oorzaken** van een risico kan men denken aan:

- ontwerpfout
- menselijke fout
- sterkte kleiner dan toelaatbare belasting
- externe factoren

De **gevolgen** kan men onderscheiden in verschillende categorieën:

- kostenverhoging: alle werkelijk gemaakte extra kosten, ontstaan door ongewenste en niet geplande gebeurtenissen
- vertraging: elke vorm van tijdverlies
- kwaliteitsverlies: zaken die niet via extra tijd en geld hersteld kunnen worden
- milieu- en omgevingsschade: alle negatieve gevolgen voor de omgeving. Deze hangt uiteraard af van de omgeving
- slachtoffer(s) en gezondheidsschade: aantal doden en gewonden die bij het personeel/ buitenstaanders kunnen vallen, alsmede gezondheidsproblemen op lange termijn.

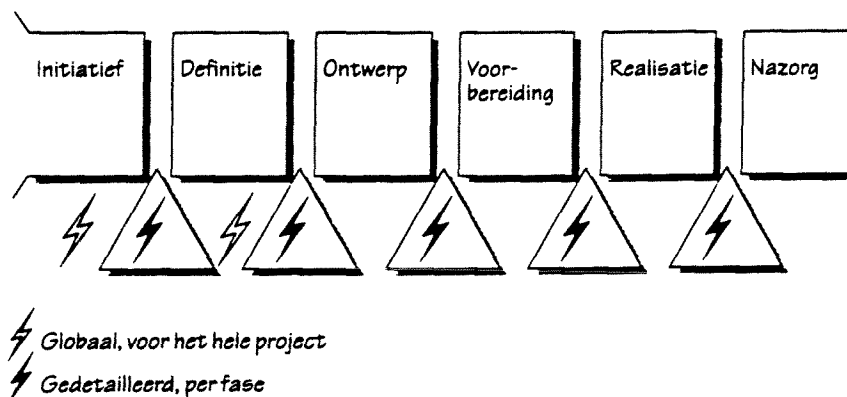
De grootte van de faalkansen zijn afhankelijk van verschillende factoren:

- **Ervaring/voorkeur van de aannemer:** Er kan gesteld worden dat, hoe meer ervaring men heeft, hoe meer men de risico's in de uitvoering kan verkleinen; men weet welke problemen men kan verwachten en wat de gevolgen ervan zijn. Ervaring hangt direct samen met voorkeur. Een aannemer die reeds goede ervaring heeft opgedaan met een bouwmethode, zal eerder kiezen voor deze methode. Dit is met name van invloed, indien men werkt in een aannemerscombinatie.
- **Grondonderzoek** zegt al veel over het gedrag tijdens het boren; moeilijke situaties kunnen worden getraceerd, waardoor men vooraf reeds de mogelijkheid heeft hierop te anticiperen. Grondonderzoek kan gedaan worden door boringen, steekproeven, sonderingen. Een vrij nieuwe techniek is een zgn. speurder: een kleine boormachine die de weg vast verkent. Hierbij kunnen grote obstakels reeds tevoren worden geïdentificeerd.

- **Het tracé** bepaalt in eerste instantie de directe kosten. De randvoorwaarden van de omgeving bepalen het verloop, zoals lengte, diepte en bochten in het tracé. In de tweede plaats legt het de risico's vast: Blijft het in dezelfde grondlaag, wat zijn de te keren gronddrukken, welke moeilijkheden kom het onderweg tegen, kunnen risico's worden geminimaliseerd door wijzigingen in het tracé aan te brengen? De bouw van een tunnel onder een rivier stelt nu eenmaal andere eisen dan de aanleg van een tunnel onder bebouwing. Hierbij dient echter te worden benadrukt dat men alleen wijzigingen in het tracé kan aanbrengen als men niet met een tracé werkt, dat reeds is vastgelegd in het bestek

5.2.2 Wat is risicoanalyse?

De risicoanalyse is een gestructureerde werkwijze om mogelijke problemen in een project boven tafel te krijgen en voorzorgsmaatregelen te nemen om die problemen te voorkomen. In alle fasen van een project en op twee niveaus kan risicoanalyse gebruikt worden bij de voorbereiding van een project. Een schematische weergave hiervan is weergegeven in *figuur 5.2 [5]*. Dit schema is vrijwel op elk project toepasbaar en kan ook worden toegepast voor een boortunnelproject.



figuur 5.2: Plaats van de risicoanalyse in de fasen [5]

In de praktijk wordt een risicoanalyse opgezet vanuit een overall plan voor risico-management [11]. Hieruit volgt een identificatie van alle mogelijke risico dragende factoren. Het resultaat is een lijst met risico's van het project, veelal variërend van 10 tot 50 risico's. Tijdens de hierop volgende fase worden de belangrijkste gebeurtenissen (risico items) geselecteerd en op verschillende manieren geanalyseerd en gedetailleerd. Dit uitwerken kan gebeuren door een combinatie van:

- het raadplegen van experts, die kosten en risico's kunnen inschatten
- het raadplegen van literatuur, gegevens verzamelen vanuit eerder uitgevoerde projecten, metingen
- het uitvoeren van computersimulaties

Het eindresultaat geeft inzicht in de kansen op en de gevolgen van gebeurtenissen binnen een project. Hieraan kunnen kosten worden verbonden. De grootte van de risico's bepaalt zo de grootte van de indirecte kosten. Als praktijkonderzoek binnen dit rapport zal met name gebruik worden gemaakt van de eerste methode, het raadplegen van experts. Er zal gekeken worden welke **beperkingen en mogelijkheden** deze methode heeft.

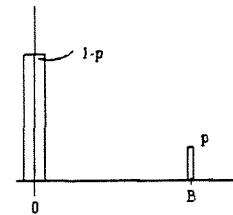
De drager van de risico's

Het resultaat van de risicoanalyse wordt in de praktijk voornamelijk meegenomen in de kostenafweging, waarna het rapport veelal een plaats in de kast krijgt. De risicoanalyse zou echter ook uitermate geschikt zijn om vooraf beperkingen aan te brengen in de risico's door het opstellen van **risico-beheersingsmaatregelen**. Risico-beheersingsmaatregelen betreffen die maatregelen die het risico ten aanzien van bijzondere gebeurtenissen (calamiteiten) beperken.[30]

Doordat de risicobronnen uit de risicoanalyse volgen, kunnen risico-beheersingsmaatregelen worden opgesteld om een aanvaardbaar risiconiveau te bereiken. Er zijn twee hoofdcategorieën van risico-beheersings-maatregelen: [30]

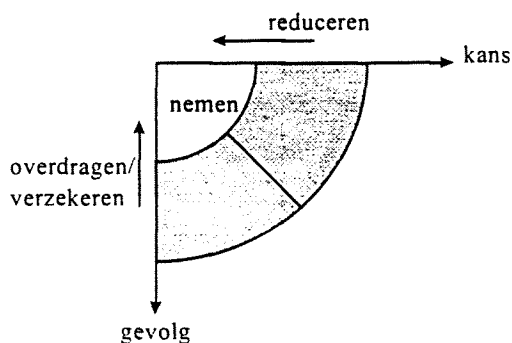
1. zelf het risico dragen (na eventuele reductie ervan)
2. het risico overdragen aan anderen voor een vast bedrag

ad 1) Er blijft onzekerheid. Men kan echter overwegen met een investering I de totale situatie aanvaardbaar te maken. Het project kan worden aangepast, hetgeen extra investeringen I met zich meebrengt. Men heeft dan niet meer een kans (p) op een schade van (B), en een kans ($1-p$) op een schade van nul, maar een kans p_{red} op schade kleiner dan B (en wellicht een kleinere standaardafwijking) en een kans ($1-p_{red}$) op het "verlies" van de investering I .



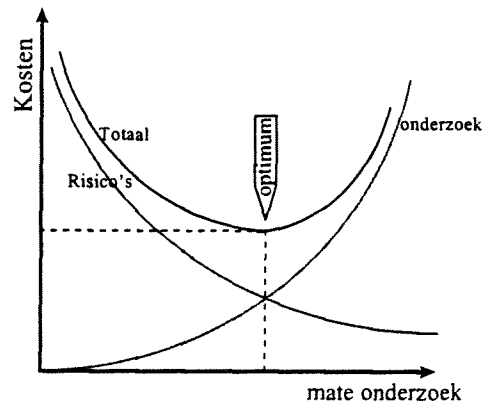
ad 2) De onzekerheid wordt in dit geval vervangen door de zekerheid van een uitgave I . Deze nagestreefde zekerheid wordt begrensd door de juridische hardheid van de betreffende overeenkomst.

In het geval men de keuze voor een bouwmethode bekijkt kan men het gevolg en de kans tegen elkaar uitzetten. (figuur 5.3). In de situatie dat zowel het gevolg als de kans klein is, zou men het risico kunnen nemen. (1) Voor het geval dat de kans klein is en het gevolg groot kan men het risico overdragen door je te verzekeren, bijvoorbeeld voor een aardbeving of door het risico over te dragen c.q. bij een andere partij te leggen (2). Bij een grote kans en een klein gevolg zal men proberen de kans te verkleinen. (1).



figuur 5.3: kans-gevolg

Door het doen van een investering in de vorm van een risicoanalyse kan men de risico's tijdens uitvoering beperken, maar nemen de kosten van het onderzoek toe. (figuur 5.4) Voor de som van kosten en risico's kan een optimum worden bepaald.



figuur 5.4: kosten-risico's

Zoals gezegd, is na het opstellen van de risico-itemlijst en het waarderen van de risico's bekend welke risico's maatgevend zijn voor de kosten. Met name voor deze risico's is het interessant te onderzoeken of er wellicht structurele maatregelen zijn op te stellen of dat er berekeningen van preventieve aard kunnen worden gedaan om de risico's en daarmee de kosten te minimaliseren. Aan de hand van een risico-item dat in het vorige hoofdstuk is gesignaleerd, zal in dit hoofdstuk een voorbeeld van een dergelijke aanpak worden uiteengezet.

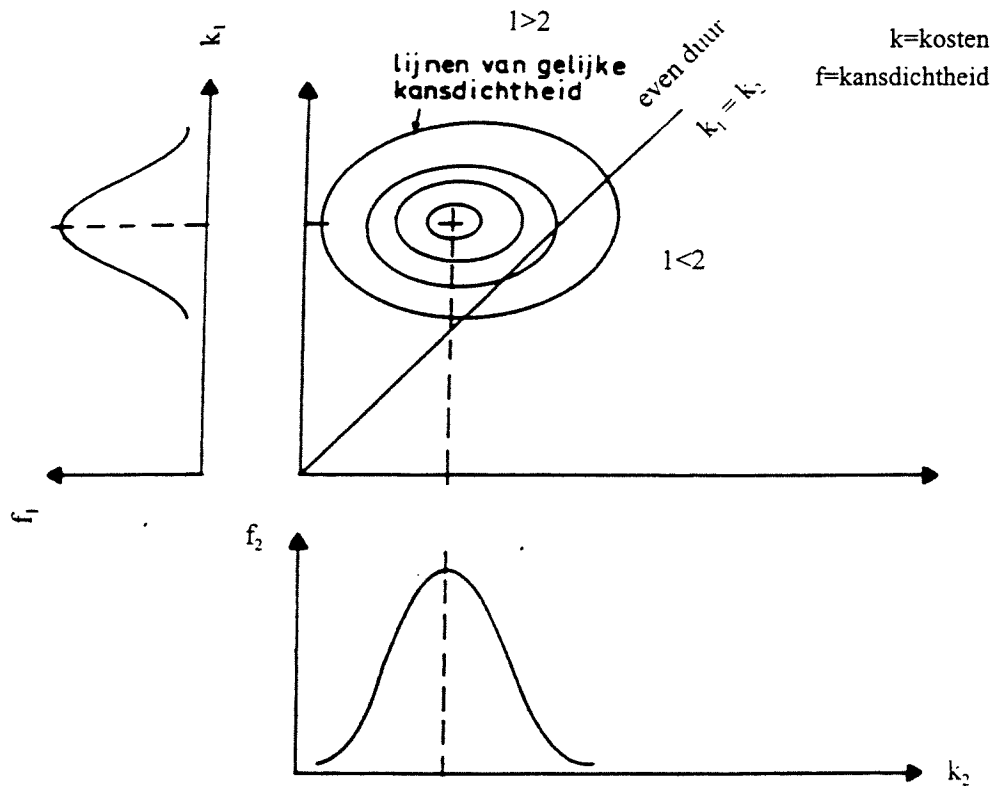
Kosten

De keuze voor de TBM wordt gebaseerd op de **totale kosten** van het project; de som van directe en indirecte kosten. Door simulaties met bijvoorbeeld een monte carlo methode kan men de kansdichtheidsfunctie (k.d.f.) verkrijgen van de totale kosten.

$$f_1(1) = \text{kansdichtheid project 1}$$

$$f_2(2) = \text{kansdichtheid project 2}$$

Indien de stochastische variabelen onafhankelijk zijn kan men de gezamenlijke k.d.f. verkrijgen door vermenigvuldiging. [31]. Deze gezamenlijke k.d.f. kan d.m.v. een hoogtelijnenkaart worden getekend. (figuur 5.5).



figuur 5.5: Bepalen kans $1 > 2$ / kans $1 < 2$

M.b.v. deze figuur is eenvoudig in te zien welke methode goedkoper is door de inhoud van de gezamenlijke kansdichtheidsfuncties te bepalen. Men zal over het algemeen voor de methode kiezen, waarvan men verwacht dat deze uiteindelijk de minste kosten met zich meebrengt.

5.3 De uitwerking van de risicoanalyse

5.3.1 Inleiding

Bij het opstellen van de risicoanalyse moet het doel van de risicoanalyse duidelijk zijn. In dit geval betreft het het onderscheid tussen de twee boommethodes naar voren brengen. Met de uitgevoerde analyse zal inzicht moeten worden verkregen welke risico's er aan een methode verbonden zijn en hoe groot deze risico's zijn.

De risicoanalyse bestaat uit een aantal door te lopen fasen. In de **eerste fase** vindt een beschrijving plaats van het proces. De mate van gedetailleerdheid van de beschrijving wordt bepaald door de vereiste diepgang van de risicoanalyse.[31] De theorie van het proces is beschreven in hoofdstukken 2 t/m 4. Vervolgens is het boorproces geschematiseerd in de stappenprocessen.

In de **tweede fase** tracht men inzicht te krijgen in alle ongewenste begingebourtenissen, die de werking van het proces zouden kunnen beïnvloeden. Daarnaast worden alle mogelijke reacties van het proces op de ongewenste gebeurtenis onderzocht. Als instrument kan hiervoor een **foutenboom** worden opgesteld, die het verband weergeeft tussen één begingebourtenis en alle hierop volgende reacties: De foutenboom is dus een schematische weergave van de opeenvolging van alle gebeurtenissen die leiden tot één zeer ongewenste reactie van het systeem. Deze ongewenste reactie staat (meestal) bovenaan de boom en wordt "**topgeburtenis**" genoemd.

Omdat het aantal risico's die kunnen optreden binnen het onderzoeksgebied vrij groot is, is ervoor gekozen om in de **derde fase** een risico-item lijst op te stellen. Hierin zijn alle risico's verwerkt en gegroepeerd binnen een aspect. Deze risico's zijn te herleiden tot de foutenboom, echter het verband tussen de gebeurtenissen is losgelaten. Daarentegen is aangegeven wat de gevolgen van het optreden van een aspect zijn en met welke maatregelen men de gevolgen kan beperken.

Tot slot wordt getracht de kans op optreden van de ongewenste topgeburtenis te bepalen. Hiertoe wordt een selectie gemaakt uit de risico-itemlijst. Het verschil in topgeburtenis van de twee boommethodes wordt gekwantificeerd door het bepalen van de afzonderlijke faalkansen en deze te vergelijken.

5.3.2 Risicoanalyse van het noord/zuid-lijn project

De noord/zuidlijn

Amsterdam is in de afgelopen decennia in snel tempo uitgegroeid tot een stadsgewest met meerdere kernen. Deze ontwikkeling ging en gaat gepaard met een sterke groei van de mobiliteit.[2] Een groot deel van de automobilititeit is op de centrale stad gericht en veroorzaakt files aan de stadsrand, verkeersdruk in de stad en parkeerproblemen. Om een deel van deze drukte te ondervangen heeft de gemeente het plan opgevat het o.v.-net uit te breiden met een metro, die van noord naar zuid loopt. Op basis van stedenbouwkundige inpassing, consequenties van de tunnelaanleg voor de bebouwing, bouwhinder tijdens de aanleg en bouwkosten heeft men gekozen voor de geboorde variant en niet voor een cut and cover methode. Met name maaiveldhinder was hiervoor een belangrijke wegingsfactor.

Het plan is uitvoeringstechnisch gezien vrij gecompliceerd en financieel gezien is het de vraag of het plan wel haalbaar is. Deze vraag zal hier niet ter discussie worden gesteld. Wel is het interessant om nader naar de uitvoerbaarheid van het plan te kijken. Punten die met name om diepere uitwerking vragen zijn de aanleg van de stations en het boren onder bebouwing in de Amsterdamse bodem. In dit rapport zal slechts het geboorde tracé worden behandeld.

Keuze voor de noord/zuidlijn als case

Omdat risico's afhankelijk zijn van de grondsoort waarin wordt gewerkt, zal, om de risico's te kunnen kwantificeren, eerst een indicatie moeten worden gegeven om wat voor grondsamenstelling het gaat. Een eerste voorwaarde is dat er van een grondsoort of een combinatie van grondsoorten moet worden uitgegaan, waarin beide methodes inzetbaar zijn, ten tweede moet het een grondsoort zijn die regelmatig voorkomt in Nederland. De noord/zuidlijn is een traject dat aan beide gewenste eisen voldoet en actueel is. Voor de grondsoorten in dit tracé wordt een representatieve boring gebruikt als is weergegeven in bijlage I.

Doelstellingen

De doelstellingen van de risicoanalyse zijn:

- inzicht krijgen in de wijze waarop elk van de boorprocessen kan falen
- inzicht krijgen in de kans op falen van het proces
- inzicht verkrijgen in de verschillen in risico's tussen beide methoden aan de hand van een kwantitatieve analyse
- het evalueren van de knelpunten, waarop aanbevelingen kunnen worden gedaan omtrent de te kiezen boormethode

Tot slot zal de vergelijking een ondersteuning zijn voor de prijsvorming/-vergelijking van beide boormethodes voor het te boren tracé. De foutenbomen en het foutenschema kunnen fungeren als communicatiemiddel en managementhulpmiddel

De projectgegevens:

De noord/zuidlijn wordt in eerste aanleg ruim negen kilometer lang. Hiervan ligt zes kilometer ondergronds: Het deel tussen de Sixhaven en de aansluiting op de Ringlijn naar Zuid/WTC. In het IJ zal de afzinkmethode worden toegepast. In de binnenstad, vanaf het Damrak tot de RAI zal de boortechniek worden toegepast.

De lijn moet uit juridische en bestuurlijke overwegingen zoveel mogelijk bestaande straten en pleinen volgen. Er komen in totaal acht stations. Een meer gedetailleerde beschrijving van het tracé is gegeven in bijlage I.

Kenmerken geboord tracé [10]:

- lengte: 3,8 km geboord
- diameter tunnel 6,5 meter
- niet standvastige grondlagen onder grondwatervlucht met een wisselende grondsamenstelling
- omgeving: historische binnenstad Amsterdam
- funderingen op 14 en 20 meter
- hindernissen: doorgeslagen fundering
- bochtstralen soms 190 m (evt. 150m)
- door de smalle straten liggen beide tunnelbuizen dicht bij elkaar: 0,5D (op een gedeelte moeten de buizen zelfs boven elkaar)

Omgevingseisen

Door het tracé zijn de volgende omgevingseisen gesteld:

- **Stedenbouwkundige omgeving:** De bestaande stedenbouwkundige situatie inclusief het stedelijk leven wordt zo min mogelijk aangetast c.q. beïnvloedt.
- **Bodem:** De huidige bodemopbouw in Amsterdam geldt als randvoorwaarde. De aanwezige geohydrologische bodemstructuur moet gehandhaafd worden.
- **Milieu:**
 - Verontreiniging van de bodem alsmede de verspreiding van aanwezige verontreiniging als gevolg van werkzaamheden moet worden voorkomen.
 - Uitkomende grond /boorspecie moet getoetst worden aan de wettelijke norm (circulaire DBO/074940 d.d. 9 mei 1994) ten aanzien van aanwezige concentraties
- **Gebouwen:**
 - Er wordt in principe niet gesloopt.
 - De beïnvloeding van bebouwing moet beperkt blijven tot een minimum. Ten aanzien hiervan moet onderscheid gemaakt worden in architectonische, functionele en constructieve schade. Laatstgenoemde schade zal te allen tijde worden vermeden; dit betekent dat altijd de standzekerheid van gebouwen moet worden gegarandeerd. Om aan deze eis te voldoen moeten waar nodig mitigerende maatregelen worden toegepast.
 - Ten aanzien van schade-acceptatie zijn een tweetal invalshoeken mogelijk. Deze invalshoeken komen neer op:

1. Enige mate van architectonische schade wordt geaccepteerd en achteraf hersteld, terwijl functionele schade moet worden voorkomen. Daar waar nodig worden mitigerende maatregelen toegepast.
2. Enige mate van functionele schade wordt geaccepteerd in geval van excessieve kosten en/of hinder van de mitigerende maatregelen. Deze schade zal achteraf worden hersteld.

De volgende eis is van belang bij de uitvoering:

De meeste belendingen hebben een grote historische waarde en om het stadsbeeld te behouden is slopen niet toegestaan. **Potentiële schade moet zoveel mogelijk worden geminimaliseerd.** [10] De grootst verwachte schade zal ten gevolge van zettingen zijn. Het zettingspatroon ten gevolge van het boorproces op funderingsniveau is maatgevend voor de inschatting van eventuele schade aan bebouwing.

Beperkingen:

Van alle onderdelen in de uitvoering:

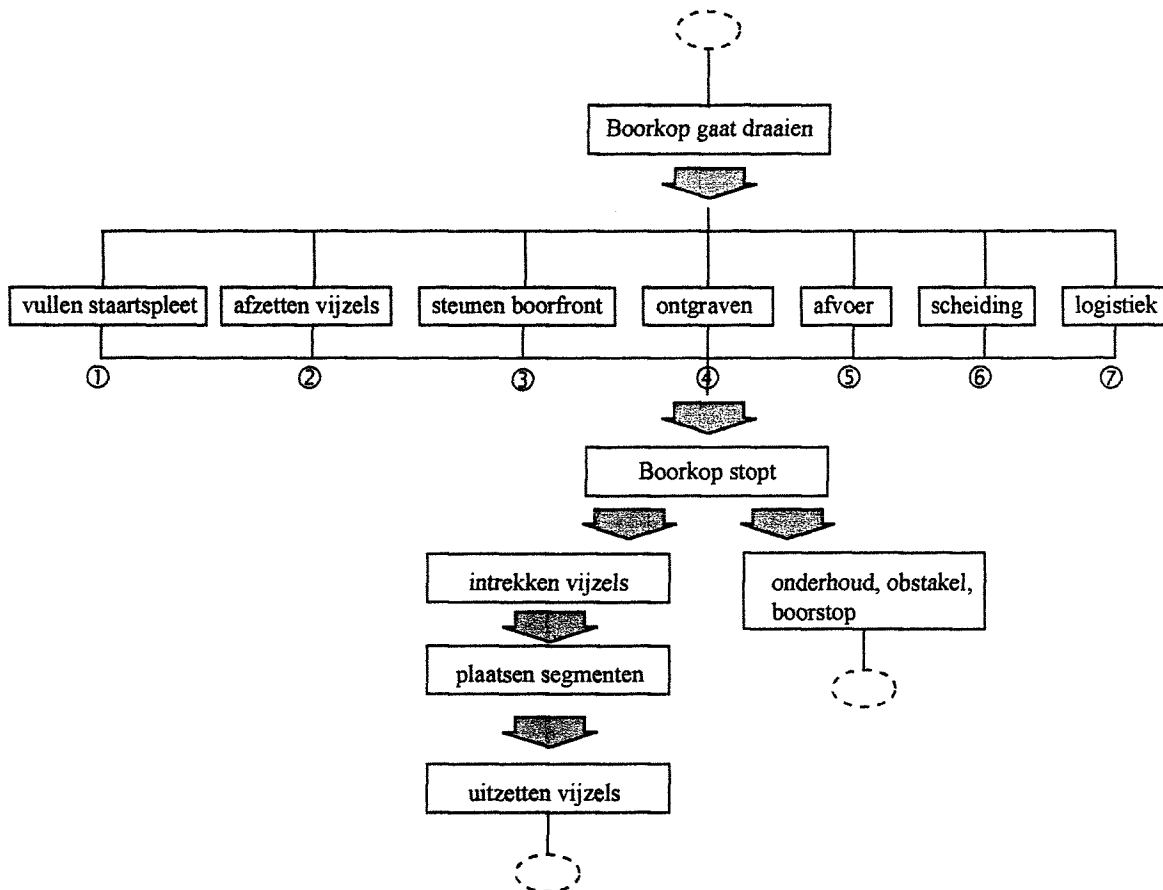
- * algemeen/voorbereiding
- * randwerkzaamheden (heien, grondverbetering, inrichting)
- * toeritten
- * startschacht
- * te boren tunneldeel
- * afwerking
- * onderhoud

zal alleen het "te boren tunneldeel" worden behandeld. Qua risico's wordt alleen het traject ondersteuning-ontgraven-transport-verwerking uitgewerkt. Overige risico's worden voor beide methodes gelijk verondersteld.

5.3.3 Stappenproces (1^e fase)

Het stappenproces is de eerste fase binnen de risicoanalyse (Zie paragraaf 5.3.1). Het is bedoeld om inzicht te geven in wat er nu eigenlijk voor acties plaatsvinden tijdens het boren. Er wordt één onderdeel van het gehele boorproject, de uitvoering, onder de loep genomen, omdat in dit onderdeel de risico's van de twee boormethodes het meest verschillen. Voor de uitvoeringsfase van het project wordt een gedetailleerde inventarisatie van de risico's gedaan om mogelijke problemen bij het uitvoeren van de activiteiten te lokaliseren. Vervolgens kunnen de risico's gegroepeerd worden naar functieonderdeel/ aspect.

Het **boorproces** is een cyclisch proces, dat voor beide boormethoden in grote lijnen hetzelfde is (figuur 5.6). Het cyclische proces is te onderscheiden in een serieel voortbewegingsproces en een parallel proces van ondersteunende functies. Het voortbewegingsproces bestaat uit het naar voren bewegen van het schild, het verschuiven van de vijzels en het plaatsen van segmenten. De procesondersteunende functies zijn het vullen van de staartspleet, het onder druk houden van het boorfront, de scheiding en de logistiek. Voor deze functies kan een apart stappenproces worden opgesteld. Hierbinnen wordt duidelijk welke mechanismen nodig zijn tijdens het boorproces, zodat een volledige inventarisatie van de risico's kan worden gemaakt. De uitgewerkte stappenprocessen zijn te vinden in *bijlage II: Stappenprocessen*.



figuur 5.6: Stappenproces aanleg boortunnel¹

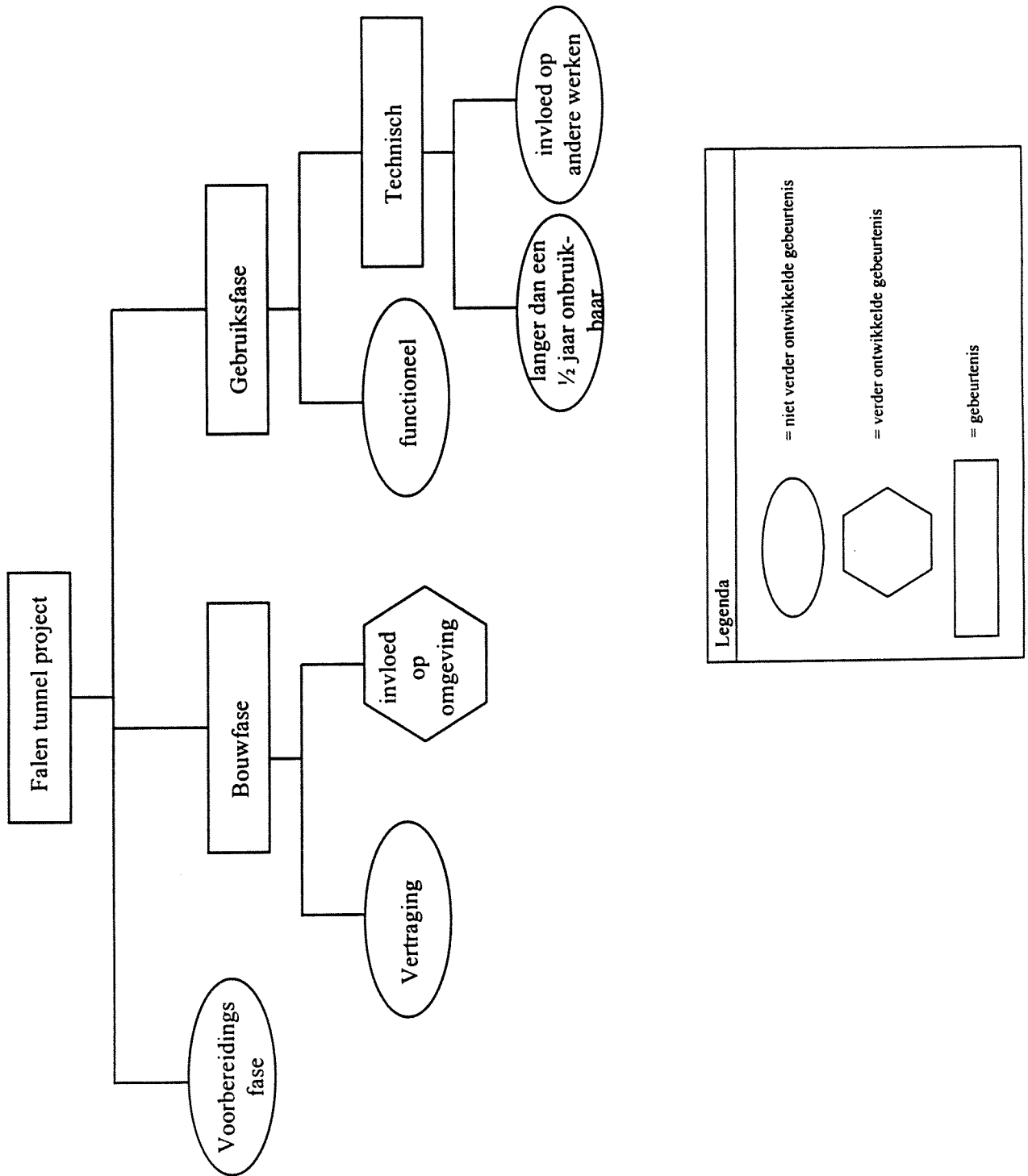
¹ Figuren stappenproces zijn gebaseerd op literatuur [36]

5.3.4 Foutenboom (2^e fase)

De meest ongewenste gebeurtenis van het totale project is het **falen van de tunnel**. De topgebeurtenis kan in de voorbereidingsfase, de bouwfase en in de gebruiksfase optreden. In de bouwfase faalt de tunnel als de bouw ernstige vertraging oploopt of als de invloed op de omgeving te groot is. Het falen van de tunnel in de gebruiksfase kan een technische oorzaak hebben of van functionele aard zijn. De tunnel faalt technisch als hij langer dan een half jaar onbruikbaar is of als de invloed ervan op andere werken te groot is. Functioneel falen houdt in dat de tunnel niet aan de gebruikerseisen voldoet. [14] Indien deze gegevens worden vertaald naar een foutenboom, wordt *figuur 5.7* verkregen.

Omdat het uitgangspunt van het onderzoek het vergelijken van de twee bouwmethodes is wordt alleen **de bouwfase** verder uitgewerkt. Binnen de bouwfase zal de foutenboom in cascade worden toegepast. Van een gemaakte foutenboom wordt het belangrijkste punt uitgelicht, waarvoor een nieuwe foutenboom gemaakt wordt, enz.

De bouwfase kan in twee ongewenste gebeurtenissen worden verdeeld: Vertragingen en invloed op de omgeving. Bij de aanbesteding van het Noord/Zuidlijn - project zal door de opdrachtgever vooral gekeken worden naar de gevolgen van het boren op de omgeving en in hoeverre de uitvoerder in staat is om deze gevolgen te beperken.

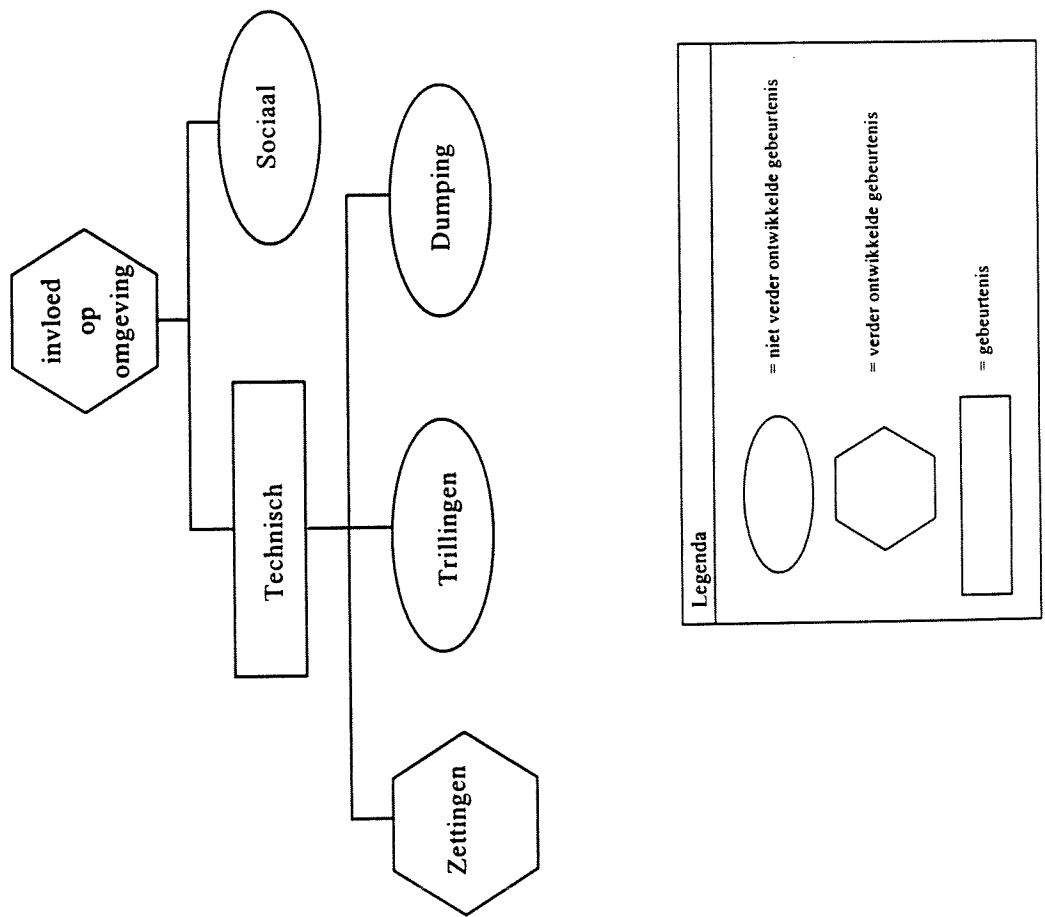


figuur 5.7: foutenboom van het boorproces²

² foutenbomen zijn gebaseerd op literatuur [14]

Invloed op de omgeving (figuur 5.8)

De invloed op de omgeving kan onderverdeeld worden in risico's van technische en van sociale aard. Binnen het Noord/Zuid-lijn project wordt de invloed op de omgeving als belangrijk punt gezien, waarop de uitvoeringsmethode wordt bepaald. Geluidshinder, grote weerstand tegen de bouw en ruimtegebruik zijn voorbeelden van sociaal falen. Een tunnel faalt technisch als funderingen worden doorkruist, er door zettingen schade aan het maaiveld optreedt, als er ontoelaatbare trillingen optreden of als de vrijgekomen grond niet genoeg gescheiden wordt, waardoor dumping (eigenlijk) niet mogelijk is. Met name zettingen vormen een probleem dat grote gevolgen kan hebben. Daarom gaat de cascade verder met zettingen.



figuur 5.8: foutenboom van "invloed op omgeving".

Zettingen (figuur 5.9)

Zettingen kunnen ontstaan door het niet toepassen van de juiste steundruk, vervormen van de tunnelwand en de grond, te weinig grouten van de staartspleet, oversnijding en herverdeling van spanningen.

Cave-in/blow-out

Beide veroorzaken zettingen door verandering in de druk aan het boorfront. In het geval van een neutrale gronddruk zijn de vervormingen nihil. Komt men onder deze druk (om wat voor reden dan ook) dan zal de grond zich richting machine willen bewegen. Komt men boven die druk dan wordt de grond voor de machine weggedrukt en in het ergste geval wordt een hele grondwig naar boven gedrukt.

Vervormen tunnelwand

Door uitwendige krachten op de segmenten wordt de tunnelring vervormd. Tijdens de bouw gebeurt dit voornamelijk door gronddrukken en het eigen gewicht van de volgwagens en -installaties van de tbm binnen de tunnelring.

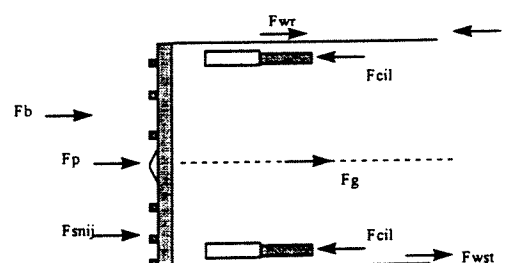
Te weinig (of teveel) grout

De ruimte die is ontstaan door de conische vorm van de machine kan gedeeltelijk worden ondervangen door het grouten bij de staartspleet. Het hoofddoel van het grouten is echter het vullen van de staartspleet. Deze ontstaat doordat de machine groter is dan de aangelegde lining. Op het moment dat de ontstane ruimte slechts gedeeltelijk wordt opgevuld, zal de grond gaan verzakken. In het geval er teveel grout wordt toegediend, vervormt de grond.

Wegvallen vijzeldruk

Bij een constante boorsnelheid of bij stilstand van de boor geldt een krachterevenwicht in horizontale richting. De horizontale krachten die op de machine werken zijn de volgende:

F_{wr}	=	mantelwrijving: grond-mantel
F_g	=	kracht tgv de zwaartekracht
F_b	=	gronddruk
F_p	=	kracht voor het verdringen van de grondprop
F_{snij}	=	snijkrachten (te verwaarlozen)
F_{wst}	=	wrijvingskracht door de staartaafdichting
F_{cil}	=	cilinderkracht in de vijzel
F_{gr}	=	axiale kracht door het grout



De enige twee krachten die in de boorricting werken zijn de kracht door het grouten en de vijzelkracht. Zou ineens de vijzelkracht wegvallen, dan schiet de machine naar achteren en de mantelwrijving wisselt van teken. Er ontstaat een loze ruimte die met grond vanaf het boorfront wordt aangevuld. Dit heeft zettingen tot gevolg.

Oversnijding

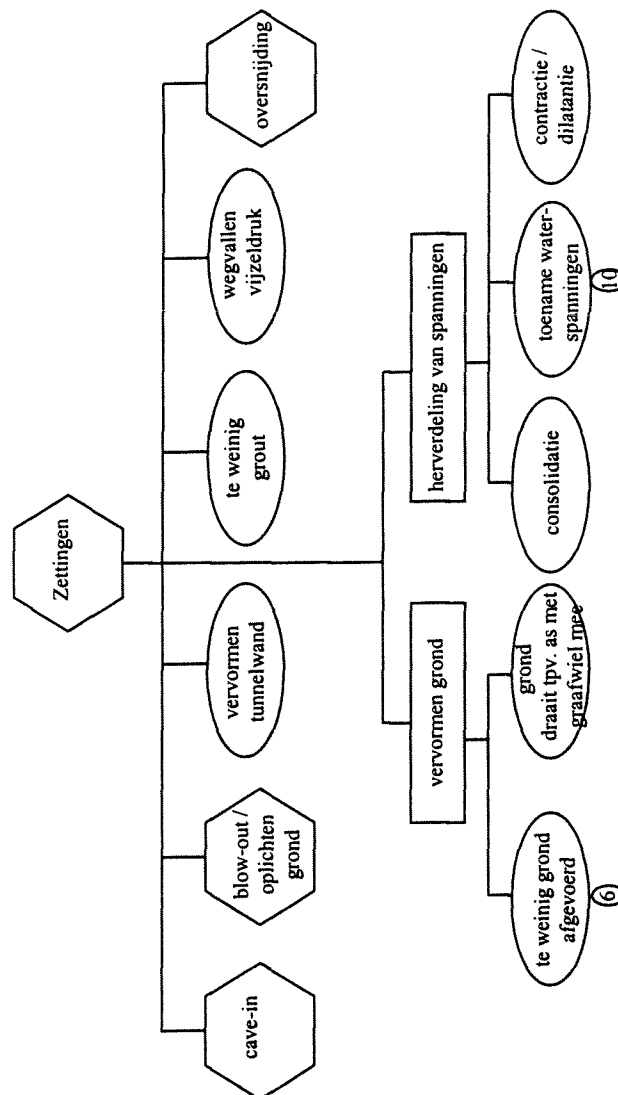
Door het meer verwijderen van grond dan er nodig is voor de lining ontstaat er loze ruimte. Deze ruimte wordt weer opgevuld met grond. Dit aspect zal verder worden uitgewerkt.

Vervormen grond

Vervormen van de grond kan in de eerste plaats doordat grond ter plaatse van de as meedraait met het graafwiel. Vanaf deze plaats is het ontgraven van grond niet mogelijk, waardoor bij voortbewegen van de tbm de grond ter hoogte van de as vooruitgedrukt wordt. In de tweede plaats kan de grond worden vervormd, doordat er te weinig grond wordt afgevoerd.

Herverdeling van spanningen

Door het ontgravingsproces wordt de grond rondom de machine ontspannen. De grond zal zich rangschikken naar de nieuwe spanningstoestand. (consolidatie & contractie). Een ander fenomeen is een toename van de waterspanningen, waarbij een drukgolf voor het front uitloopt. Dit veroorzaakt een tijdelijke afname van de korrelspanningen.



figuur 5.9: foutenboom van de zettingen tijdens bouwfase

Cave-in (figuur 5.10)

Hieronder vallen alle vormen van ongewenste bewegingen van het boorfront naar de machine toe. Alle grond die meer naar de machine beweegt dan nodig is veroorzaakt zettingen. Het bewegen van het front naar machine kan verschillende redenen hebben.

Onvoldoende steundruk

Door een steundruk toe te passen die beneden de oorspronkelijke spanningssituatie ligt, zal de grond gaan vervormen.

Passage grenslaag

Tijdens de passage van een overgang van verschillende grondsoorten is kan de benodigde steundruk een sprong vertonen in het verticale spanningsdiagram. Dergelijke steundrukken zijn echter in praktijk niet toepasbaar. De toe te passen steundruk zal op enkele plaatsen van de optimale druk afwijken, waardoor op sommige plaatsen beneden de gewenste steundruk zal liggen. (Naar dit probleem wordt op dit moment onderzoek verricht aan de TU Delft)

Uitvallen luchtdruk

Het boorfront wordt door luchtdruk gesteund indien onderhoud moet worden gepleegd of er handmatig een obstakel moet worden verwijderd. Indien in zo'n geval de luchtdruk wegvalt, zal de grond richting graafkamer stromen. Bij het hydroschild kan een dergelijk verschijnsel optreden door het wegvallen van de luchtkussendruk.

Blow-out/oplichten grond (figuur 5.11)

Blow-out is niet hetzelfde als het oplichten van de grond. Bij het oplichten van de grond ontstaat er enkel vervorming aan het maaiveld. Bij een blow-out wordt een totale grondwig weggedrukt. Dit kan ontstaan door het optreden van zowel horizontale als verticale piping.

Langdurige stilstand

Indien de machine langdurig onder luchtdruk stilstaat, zal de luchtdoorlatendheid van de filterkoek toenemen. Bij een schuimgeconditioneerd EPB-schild neemt het aandeel schuimbellen af met de tijd, waardoor de luchtdoorlatendheid toe zal nemen. Beide processen kunnen leiden tot een blow-out; dit is afhankelijk van de toegepaste luchtdruk en de toegepaste dekking

passage grenslaag

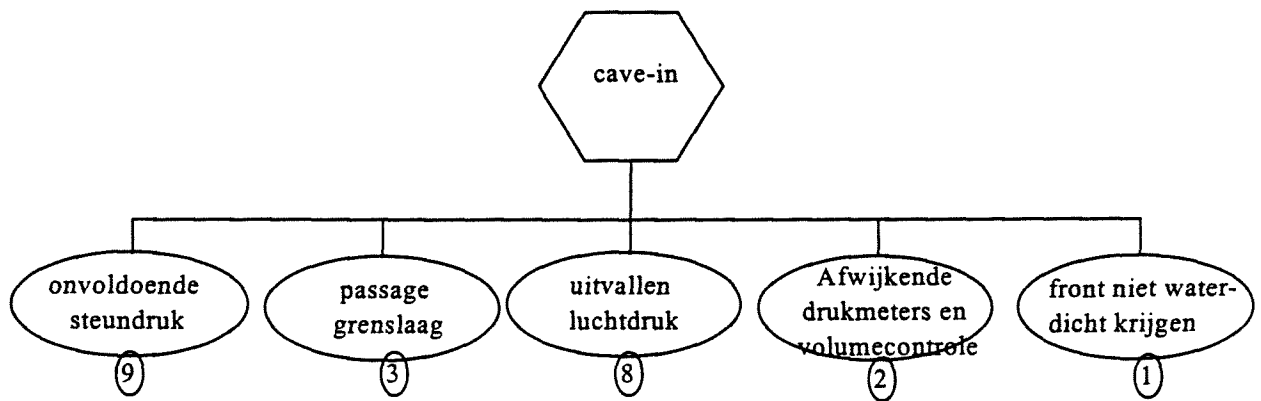
Als genoemd bij Cave-in. Hierbij is de kans bijvoorbeeld dat een bovenliggende laag van de onderliggende laag wordt weggedrukt; er ontstaat een lokale afschuifwig

Te grote steundruk

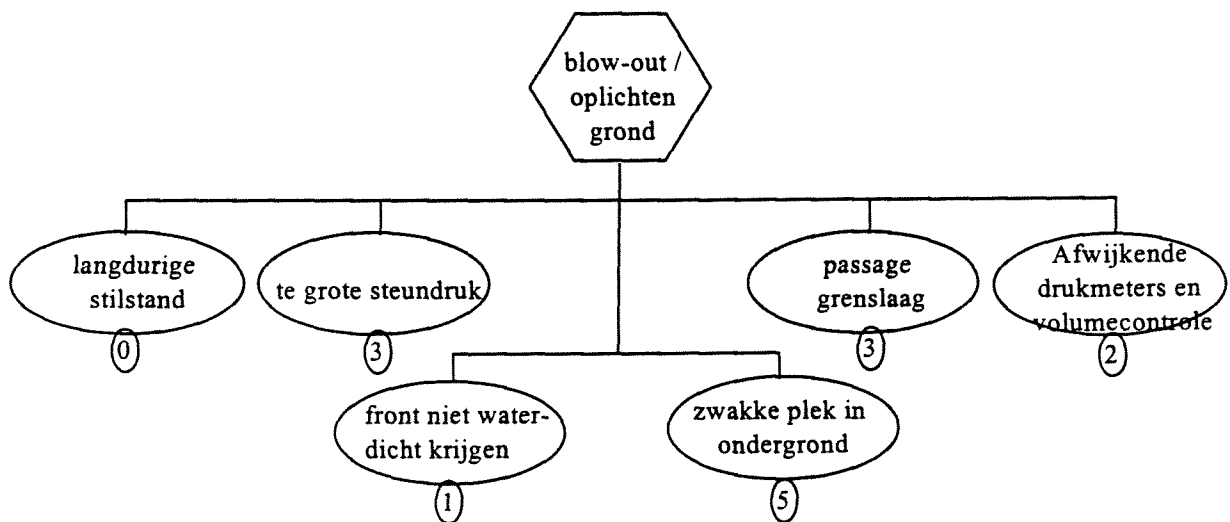
Als genoemd bij te lage steundruk, cave-in. Hierbij is de toegepaste steundruk echter te hoog.

Zwakke plek in de ondergrond

Zwakke plekken in de ondergrond kunnen zijn aangebracht door mensenwerk, zoals oude boor- of sondeergaten. Bij het hydroschild zal het bentoniet weglopen en grond meenemen; de steundruk zal afnemen. Een zwakke plek voor het EPB-schild kan een grind-/zandlens zijn, waardoor er de schroeftransporteur geen waterafsluitende werking kan handhaven en afgesloten dient te worden.



figuur 5.10: foutenboom "cave-in"



figuur 5.11: foutenboom "blow-out"

Oversnijding (figuur 5.12)

Boren onder een verticale hoek

Omdat de machine topzwaar is bij het snijrad zal de machine tijdens het boren de neiging krijgen naar voren te hellen. Om toch een rechte boorgang te krijgen zal de machine lichtelijk naar boven boren.

Coniciteit tbm

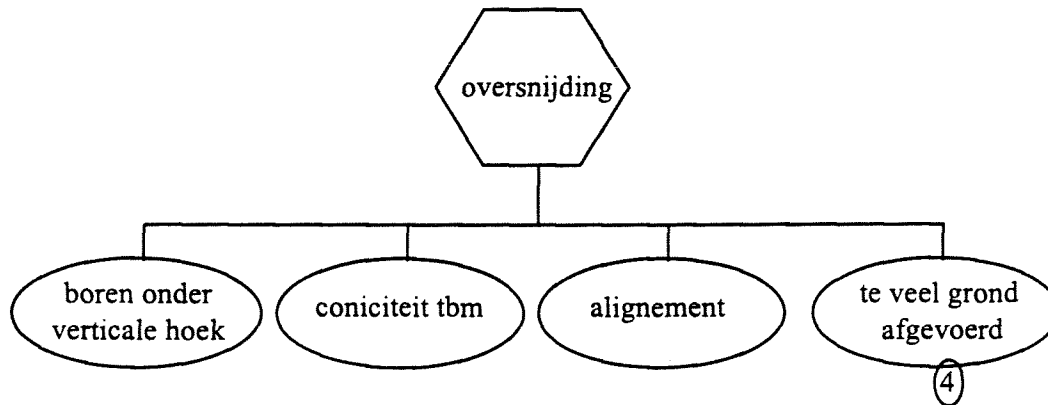
Om te voorkomen dat de machine klem komt te zitten tijdens het boren heeft de stalen cilinder een taps toelopende vorm gekregen. Hierdoor wordt extra manoeuvreerruimte gecreëerd, maar daarmee ook extra ruimte om zettingen teweeg te brengen. De hoeveelheid ontstane ruimte is afhankelijk van de mate van coniciteit en de lengte van de cilinder

Alignement

Afhankelijk van het tracé zal de machine horizontale en verticale bochten moeten maken. Hiervoor is een uitschuifbare snijder aangebracht op het rad, die de extra ruimte in de bochten moet maken.

Te veel grond afgevoerd

Dit geldt voor het EPB schild, waarbij het volume in de graafkamer gereguleerd wordt door de in- en uitgaande grondstroom. Door het afvoeren van teveel grond ontstaat er loze ruimte in de graafkamer die zal worden opgevuld met grond vanaf het boorfront.



figuur 5.12: foutenboom "oversnijding"

5.3.5 Risico-itemlijst (3^e fase) (Zie Bijlage III)

Door het systematisch doorlopen van het boorproces, van ontgraving tot verwerking, zijn de risico's voor beide boormethodes geïdentificeerd. Alle risico's in de lijst zijn afgeleid vanuit de foutenboom, echter wel zodanig gespecificeerd dat er een oordeel over gegeven kan worden. (De nummering voor de aspecten komt overeen met de nummering in de foutenbomen uit 5.3.4.)

In Bijlage III is de volledige lijst opgenomen. Hierin zijn de volgende kolommen opgenomen:

Aspect

Welk onderdeel of proces wordt bekeken?

Afwijking

Hieronder wordt verstaan de afwijking ten opzichte van de gewenste situatie. Door het optreden van die afwijking wordt de functie of het onderdeel niet (goed) verricht. Per functiegroep/aspect is een analyse gemaakt:

- * ontgraving
- * transport
- * scheiding
- * afvoer/verwerking
- * obstakels
- * onderhoud en reparatie
- * boorgang
- * boorfront

Daarnaast wordt er onderscheid gemaakt binnen de boormethode, of het risico wel of niet afhankelijk is van een bepaalde boormethode.

Gevolgen

Per afwijking en per boormethode is aangegeven wat de gevolgen (kunnen) zijn, indien een afwijking optreedt.

Potentiële maatregelen

Om de kans op een afwijking te verkleinen of de ongewenste gevolgen van een afwijking te verkleinen (of de spreiding ervan te verkleinen) kunnen maatregelen worden genomen. Hierbij kan men denken aan een andere uitvoeringsmethode, andere eisen aan materieel/materiaal, andere voorzorgsmaatregelen. Binnen deze maatregelen wordt weer onderscheid gemaakt tussen beide boortechnieken. De maatregelen kunnen zowel preventief als correctief van aard zijn. Preventieve maatregelen worden vooraf genomen en dienen om de kans van optreden te verkleinen of de gevolgen te beperken. Correctieve maatregelen worden genomen indien een afwijking is opgetreden, zodat de schade beperkt wordt.

Voor de enquête is hieruit een selectie gemaakt van die zaken die van belang kunnen zijn. In het volgende hoofdstuk zal de enquête worden besproken.

6 Enquête

6.1 Topgebeurtenis “zettingen”

Als topgebeurtenis van de foutenboom is gekozen voor de gebeurtenis zettingen tijdens de bouwphase. Dit aspect zal het zwaarst meewegen bij de gunning, omdat er onder bebouwde omgeving wordt geboord. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen structurele en incidentele zettingen. Onder structurele zettingen worden onvermijdelijke zettingen t.g.v. het boorproces bedoeld. Deze zettingen zijn afhankelijk van de beheersing van het proces. Onder incidentele zettingen worden die zettingen verstaan die ad hoc plaatsvinden t.g.v. een (onverwachte) gebeurtenis. Omdat men in Nederland slechts één methode heeft beproefd, zijn er nog geen meetgegevens ter vergelijking van zettingen direct voor handen. Om een vergelijking te kunnen maken vergt een andere aanpak.

Het doel is het verkrijgen van inzicht in het aandeel van een gebeurtenis in de zettingen. Hiertoe zijn alle risico's uit de risico-itemlijst geselecteerd die zettingen tot gevolg (kunnen) hebben. Om het gewenste resultaat te krijgen wordt een scorelijst gemaakt, die moet worden ingevuld aan de hand van een nog op te stellen scoresysteem. Deze scorelijst heeft de vorm van een enquête gekregen. De waardering van de items zal gebeuren door personen die praktische ervaring en kennis hebben op het gebied van boren van tunnels. De vorm en het gebruik van de enquête zal in paragraaf 6.2 besproken worden.

6.1.1 Zettingen van gebouwen

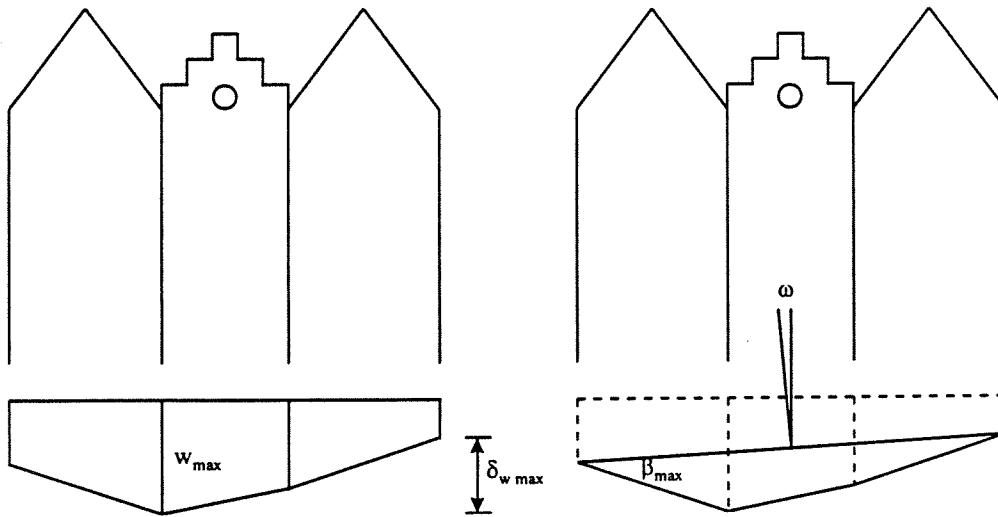
Binnen de enquête wordt alleen gerefereerd naar zettingen. Echter niet alleen de totale zakking kan schade veroorzaken aan de bebouwing maar ook de relatieve rotatie.

In figuur 6.1 [25] staat aangegeven wat zakking en relatieve hoekverdraaiing inhouden. Om schade aan de bebouwing te voorkomen tijdens het boren, zijn er globaal eisen gesteld aan de vervormingen op paalpuntniveau:

totale zakking: $w < 15 \text{ mm}$

relatieve hoekverdraaiing: $\beta < 1/750$

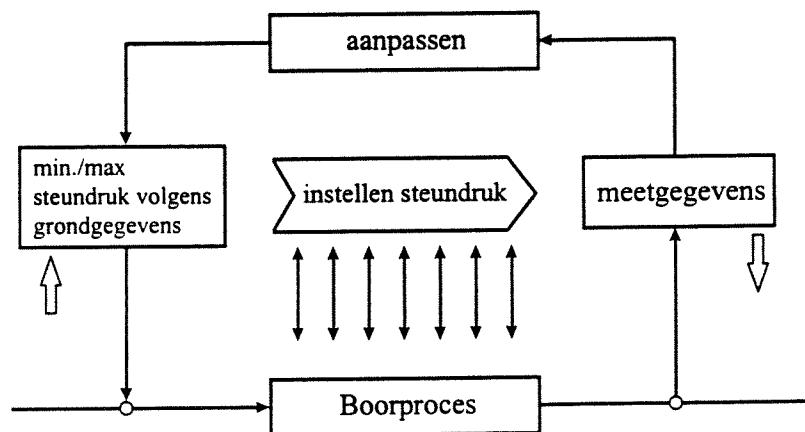
Daarnaast zijn ook de schuinstand (ω) en de relatieve zakking (δ_w) aangegeven. Deze grootheden zijn met name interessant, indien er geboord wordt in eenzelfde grondlaag als waarin de palen gefundeerd zijn.



figuur 6.1 definities van vervormingen

6.1.2 Zettingen t.g.v. het boren

Gedurende het proces worden de steundrukken ter plekke ingesteld en aangepast:

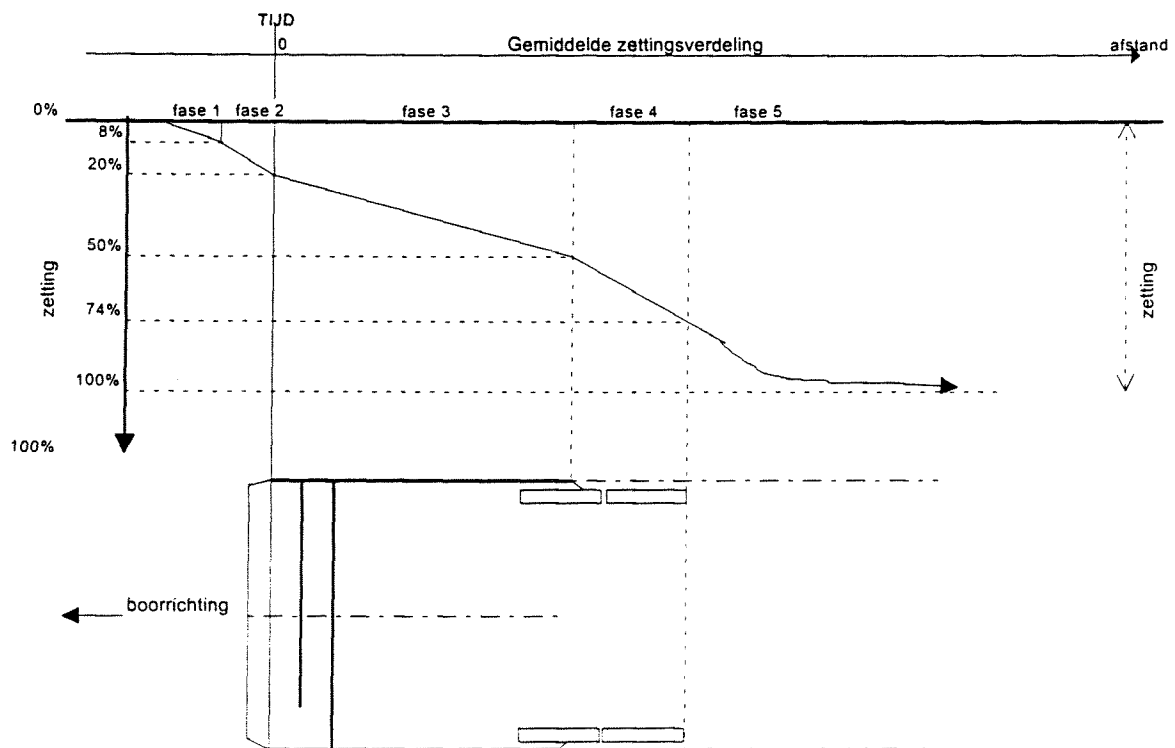


figuur 6.2: regulering van de steundruk

Binnen de omgevingsinvloeden is de beheersing van het boorproces met het oog op het optreden van zettingen een belangrijk criterium, waarop zal worden geselecteerd voor de gunning. (Zie paragraaf 5.3.3). Ongewenste effecten die hier op kunnen treden zijn effecten op funderingen en op maaiveld niveau: zettingen. Daarom zal niet het ontwerp waarbij de machine het snelst de tunnellengete heeft afgelegd, maar het ontwerp waarbij de minste omgevingsinvloeden worden verwacht de voorkeur krijgen.

Het boren veroorzaakt veranderingen in de spanningstoestand in de ondergrond. Hierdoor ontwikkelen zich korte en lange termijnzettingen, waarbij men globaal vijf fasen kan onderscheiden. (figuur 6.3) [10]

- Fase 1: vóór het boorfront
- Fase 2: ter plaatse van het boorfront
- Fase 3: door imperfecties aan het boorschild, bochten, koerscorrecties en driftbewegingen
- Fase 4: bij de staartspleetvulling
- Fase 5: lange termijnzettingen door vervormingen van de ring en door naconsolidatie van de grond



figuur 6.3: zettingsgolf t.g.v. boorproces [10]

Met name in vervormingsgevoelige gronden kan de zetting van grote invloed zijn op vervormingen van gebouwen. De zetting moet niet alleen in langsrichting maar ook in dwarsrichting worden bepaald. In dwarsrichting ontstaat t.g.v. het boren een zettingstrog. Voor de invloed van de zettingstrog gelden dezelfde criteria als voor de langsgolf.

Om de invloed te bepalen moet de ontwikkeling van de zettingen niet alleen op maaiveld-, maar ook op paalpuntniveau worden beschouwd:

Testen [6] hebben aangegeven dat voor relatief kleine volumeverliezen, (kleiner dan 1% van het tunnelvolume) de zettingen aan het grondoppervlak groter waren dan de paalpuntzettingen, waardoor negatieve wrijving ontstond. Voor grotere volumeverliezen, ongeveer 1% tot 6% van het tunnelvolume werd de draagcapaciteit van de palen zodanig gereduceerd dat de paalpunt zich sneller verplaatst dan het maaiveld. In dit stadium trad er positieve wrijving van de paal op. Echter bij volumeverliezen groter dan 10% bleek er weer negatieve kleeft te ontstaan.

Om een afweging te kunnen maken tussen beide bouwmethoden, wordt gekeken naar fase 1 en 2, omdat het boorfront het wezenlijke verschil bepaalt in het veroorzaken van zettingen. De verwachting is dat er in fase 3 en 4 een marginaal verschil te ontdekken is voor beide methoden; er zal binnen dit onderzoek geen verdere aandacht worden besteed aan fase 3 en 4. Fase 5 is afhankelijk van de voorgaande fasen, ook deze zal niet verder worden uitgewerkt.

Om schade door zettingen te reduceren kan men verschillende maatregelen treffen. In dit hoofdstuk zal dieper worden ingegaan op een analyse om de kans op het optreden van en de grootte van zettingen in te schatten. Aan de hand van deze analyse kan men beide boormethodes tegen elkaar uitzetten en tegen elkaar afwegen. Binnen deze analyse zal dus alleen naar incidentele zettingen (risico's) worden gekeken en niet naar de beheersing van de structurele zettingen.

6.2 Opzet van de enquête

Een voorbeeld van de enquête is te zien in bijlage IV. De enquête heeft het uiterlijk van een schema, waarin zes kolommen ingevuld dienen te worden. De kolommen staan voor:

Kans hydro:	“Hoe groot is de kans dat deze gebeurtenis optreedt bij een hydroschild?”
Kans EPB:	“Hoe groot is de kans dat deze gebeurtenis optreedt bij een EPB-schild?”

Onder de optredende gebeurtenis wordt verstaan:

<p>“Hoe groot is de kans dat deze gebeurtenis optreedt en een zetting tot gevolg heeft die:</p> <p style="text-align: center;">$w < 10 \text{ mm}$</p> <p style="text-align: center;">$10 \text{ mm} < w < 20 \text{ mm}$</p> <p style="text-align: center;">$w > 20 \text{ mm} \dots \dots \dots \text{is?}”$</p>

In elk vakje heeft men de keuze uit de getallen 1 t/m 6. Eén van deze getallen dient te worden aangekruist. In de volgende paragraaf wordt uitgelegd, wat deze getallen inhouden. Bij de enquête was een doorsnede van het tracé, een tracébeschrijving en representatieve grondgegevens (Bijlage I) van de noord/zuidlijn bijgevoegd.

6.2.1 Waarderingsysteem

Kans

tabel 6.1: te hanteren kansklassen [36]

klasse	omschrijving	orde
1	goed voorstelbaar	0,5-1
2	zou wel eens voor kunnen komen	10^{-1}
3	kleine kans dat het voorkomt	10^{-2}
4	zeer kleine kans	10^{-3}
5	vrijwel verwaarloosbaar	10^{-4}
6	geheel verwaarloosbaar	10^{-5}

Er zal op basis van het gegeven tracé voor zowel het hydroschild als het EPB-schild een verwachting van de kans van optreden van de betreffende gebeurtenis gegeven moeten worden met een waardering volgens tabel 6.1.

De schattingen van de experts moeten worden gemiddeld. Dit kan op twee manieren:

1. Middeling van kansen:
$$p = \frac{1}{n} \sum p_i = \frac{1}{n} \sum 10^{-x_i}$$

2. Middeling van de exponenten (=log(kans))
$$x = \frac{1}{n} \sum x_i$$

hierin is:

- p = kans
- n = aantal experts
- x_i = gegeven waardering door expert i

Voorbeeld: Twee experts A en B geven hun schatting als respectievelijk $x_A = 2$ en $x_B = 3$.

- Middeling van de kansen geeft: $\frac{1}{2}(0,01+0,001) = 0.0055$
- Middeling van de exponenten geeft: $\frac{1}{2}(2+3) = 2.5$ ofwel een kans van 0.003

De middeling van de kansen is theoretisch zuiver, maar heeft wel het nadeel dat de pessimistische expert zijn stempel drukt op het eindresultaat. Daar staat tegenover dat men wel aan de veilige kant rekent. Er zal voor berekening daarom worden uitgegaan van middeling van kansen. Ter vergelijking zal echter ook een berekening worden gemaakt van middeling van exponenten.

Gevolg

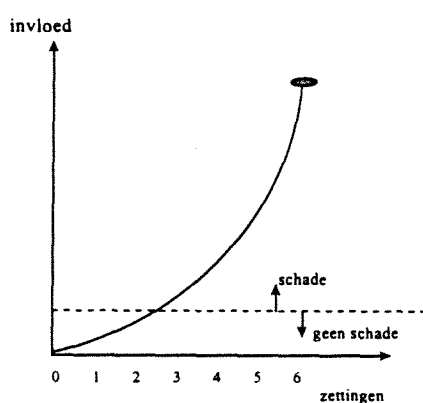
Voor de gevolgen wordt alleen gekeken naar de omgevingsinvloeden t.g.v. zettingen, indien een gebeurtenis optreedt. De waardering die men hieraan kan verbinden is reeds verwerkt in de vraag.

Voor het noord/zuid lijn project worden de volgende eisen gesteld:

totale zakking: $w < 15 \text{ mm}$

rotatie $\phi < 1/750$

Het schadebeeld zal er ongeveer als volgt uitzien:



Indien de zetting 0 is, is de schade 0. Tot het punt waarop men aan de gestelde eisen voldoet, zal de schade toenemen (zetting = 3 in figuur 6.4). Deze schade is echter marginaal en kan worden verwaarloosd. Vanaf dit punt zal ongewenste schade optreden en neemt het verloop van de schade exponentieel toe, onder meer omdat het invloedsgebied toeneemt. Op een gegeven moment zal het maximaal haalbare, totale schadebeeld bereikt zijn. (zetting = 6 in figuur 6.4)

figuur 6.4: schade t.g.v. zettingen

6.2.2 Enquêteresultaten

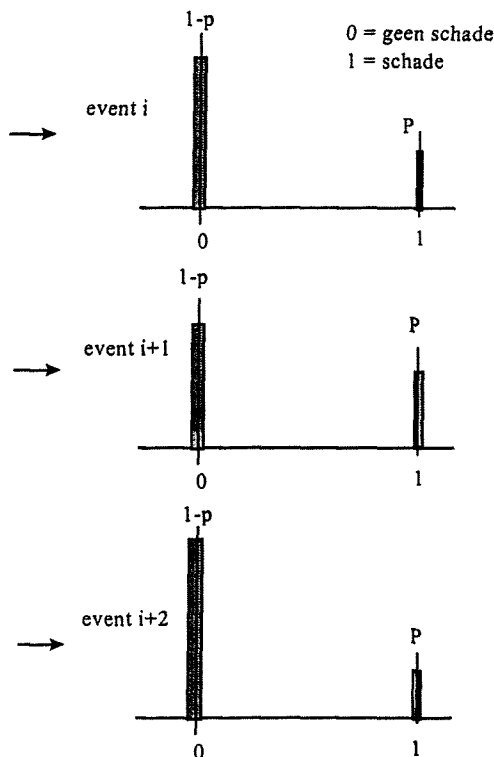
Gebruikte programmatuur

De resultaten van de enquête zijn verwerkt met het programma @Risk. @Risk is een programma dat werkt als een add-in in Excel. Het programma biedt de mogelijkheid voor het opzetten van een model, berekenen en verwerken van gegevens tot resultaten.

De gegevens uit de enquête zijn gemiddeld tot één score per aspect. De som van deze gegevens geven het totale risico weer. Om nu de onzekerheid in het totale risico van het project in te bouwen worden aan de waarden een functie toegekend. De volgende formule is hiervoor gebruikt:

$$\text{RISKDiscrete}(\{x\};\{p\}).$$

Hierin is 'x' de waarde 1 of 0. De waarde 1 staat voor het optreden van de gebeurtenis, de waarde 0 staat voor het niet optreden van de gebeurtenis, 'p' is de kans van optreden van 'x'. Bijvoorbeeld: $\text{RISKDiscrete}(\{0,1\};\{0,93,0,07\})$ geeft een discrete distributie weer met twee mogelijke uitkomsten: De kans op het optreden van de gebeurtenis is 7%, de kans dat de gebeurtenis niet optreedt is 93%.



Alle gebeurtenissen zijn onafhankelijk, waardoor invoer van een correlatiecoëfficiënt niet nodig is. Een simulatie van het project wordt gedaan door trekking uit de verschillende situaties. De som van alle trekkingen is de totale schade van dat project. Dit proces wordt per gesimuleerd project herhaald tot een totaal van in dit geval 250 simulaties. Dit is zowel voor een EPB- als voor een hydroschild gedaan.

Het resultaat hiervan is een kansverdeling van het zetting-, c.q. schade verloop. Indien deze resultaten in een figuur worden gezet wordt een grafiek in de vorm van een histogram verkregen (figuur 6.5). Op de horizontale as staat het aantal schadegevallen aangegeven, op de verticale as staat de kans op dat aantal schadegevallen. In de figuur zijn de gegevens van beide methoden verwerkt, zodat een vergelijking kan worden gemaakt. (Invoergegevens zijn vermeld in bijlage V).

Constateringen op basis van de grafiek, figuur 6.5:

In figuur 6.5 zijn twee k.d.f's gegeven: De paarse kleur geeft het verloop van een hydroschild, de bruine kleur geeft het verloop van een EPB-schild. Op de horizontale as is het aantal malen schade van een project t.g.v. zettingen >20 mm. uitgezet. Op de verticale as staat de kans aangegeven op een schaal van 0 tot 1. De k.d.f. van de totale schade aan het maaiveld kan men direct koppelen aan de meerkosten die t.g.v. die schade ontstaat. De grafiek kan men nu op twee manieren gebruiken om een afweging te maken:

- **keuze op basis van geen risico:** Uit de grafiek kan men opmaken dat de kans op geen enkele schade in het totale project bij een hydroschild ongeveer 30 % is en bij een EPB-schild ca. 10%. Indien men stelt dat men geen schade wil, is de keuze voor een hydroschild de meest logische.

Controleberekening: De waarde voor geen enkele schade kan gecontroleerd worden door de kans van niet optreden van elke gebeurtenis met elkaar te vermenigvuldigen.

$$\prod_{i=1}^n \{1 - P(event_i)\}$$

met:

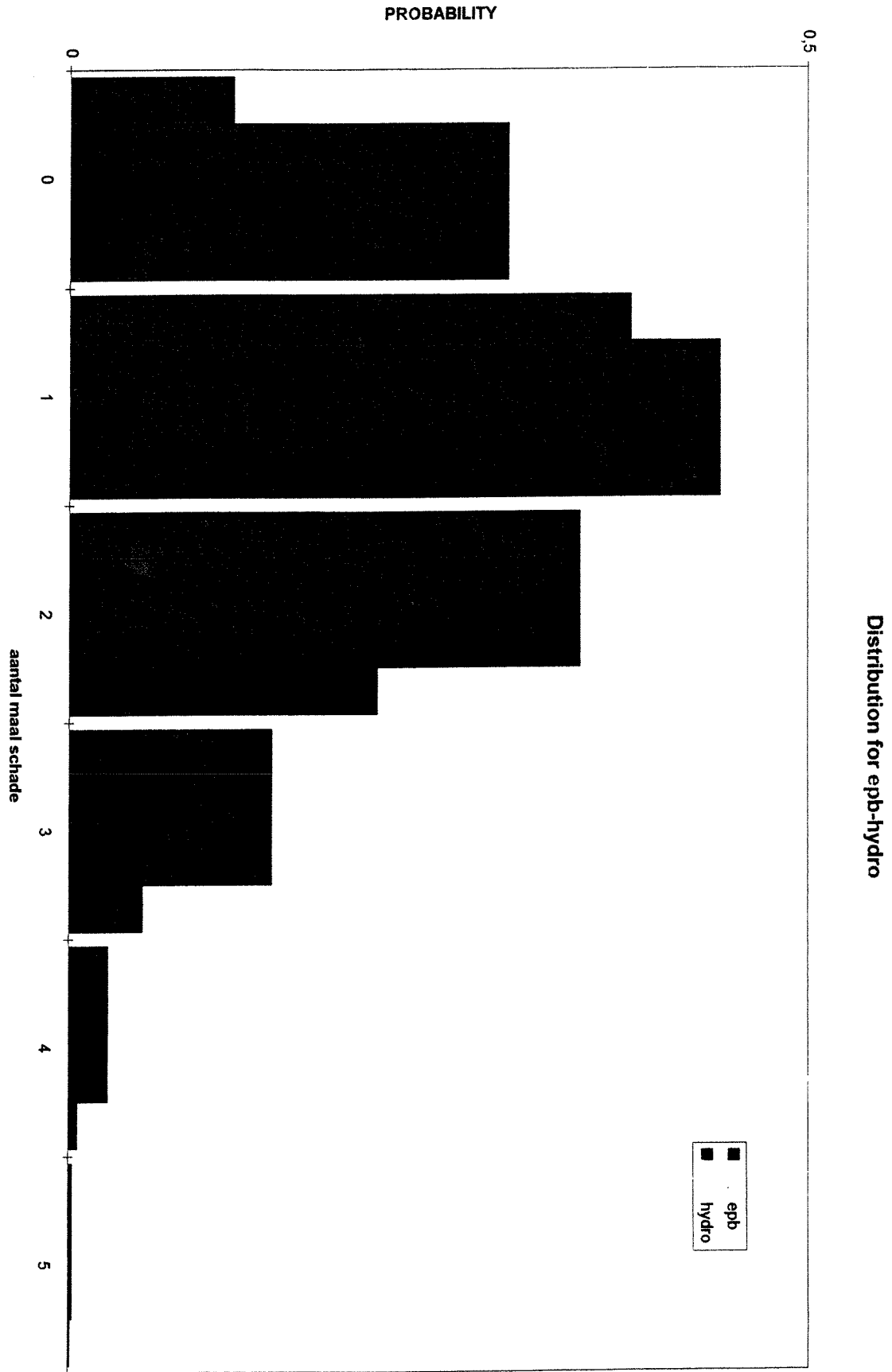
P = kans

event_i = gebeurtenis i

n = totaal aantal mogelijke gebeurtenissen

Hydro = 30 % kans op nul maal schade

EPB = 11% kans op nul maal schade



figuur 6.5: Kansverdeling van het schadeverloop

- **keuze op basis van totaal risico:** Indien men als uitgangspunt neemt dat de totale schade binnen een bepaalde grens moet blijven, kan men de oppervlakte onder de grafiek (van gebeurtenissen 1 t/m 5) beschouwen als de totale kans op meerkosten van het project. Gezien het verschil tussen EPB en hydro is de kans op schade bij een EPB altijd groter, behalve bij het optreden van 1 gebeurtenis. Dus bij het bepalen van de overschrijdingskans kan men constateren dat de totale meerkosten t.g.v. schade aan het maaiveld bij de hydro-methode in alle gevallen het laagst is.

De keuze ligt op het eerste gezicht vrij voor de hand. Op basis van bovenstaande gegevens is een keuze voor een hydroschild de meest voor de hand liggende.

Constateringen op basis van de enquête:

Aspecten die uit de enquête naar voren zijn gekomen bij het **hydroschild** (in volgorde van belangrijkheid):

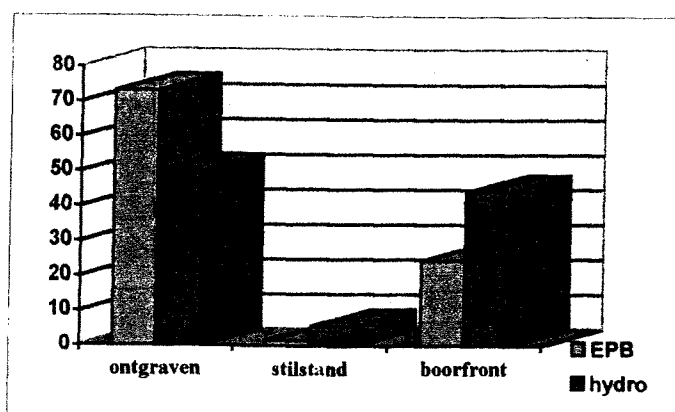
- onregelmatigheden in boorproces, die variatie in steundruk tot gevolg hebben: Dit is ook naar voren gekomen uit metingen van de Heinenoord onder het palenveld
- een onnauwkeurig controle- en regelsysteem:
- passage van een grenslaag
- verkleving aan graafwiel
- toename waterspanningen voor boorfront
- aanwezigheid van een onbekend gangenstelsel

Aspecten die uit de enquête naar voren zijn gekomen bij het **EPB-schild** (in volgorde van belangrijkheid):

- een onnauwkeurig controle- en regelsysteem
- onregelmatigheden in boorproces, die variatie in steundruk tot gevolg hebben
- problemen bij het verkrijgen van een goede vervormbare brij. Echte grindlagen worden niet verwacht in Amsterdam
- verkleving aan graafwiel
- toename waterspanningen voor boorfront
- passage van een grenslaag

Problemen die de aandacht verdienen en waar onderzoek naar kan worden gedaan zijn beheersing van de steundrukken en nauwkeurigheid van de metingen. De oplossing kan gezocht worden in verbetering van de huidige methodes of het opstellen/aanbrengen van mitigerende maatregelen.

Door het splitsen van de schade in de aspecten ontgraven, stilstand en boorfront kan men de aspecten onderling met elkaar vergelijken. Het resultaat van eerder uitgevoerde simulatie geeft een tabel als in *figuur 6.6*. Hieruit volgt dat een eventuele stilstand weinig schade zal veroorzaken aan het maaiveld.



figuur 6.6: schadeverdeling naar aspecten

6.3 Conclusie/ aanbeveling

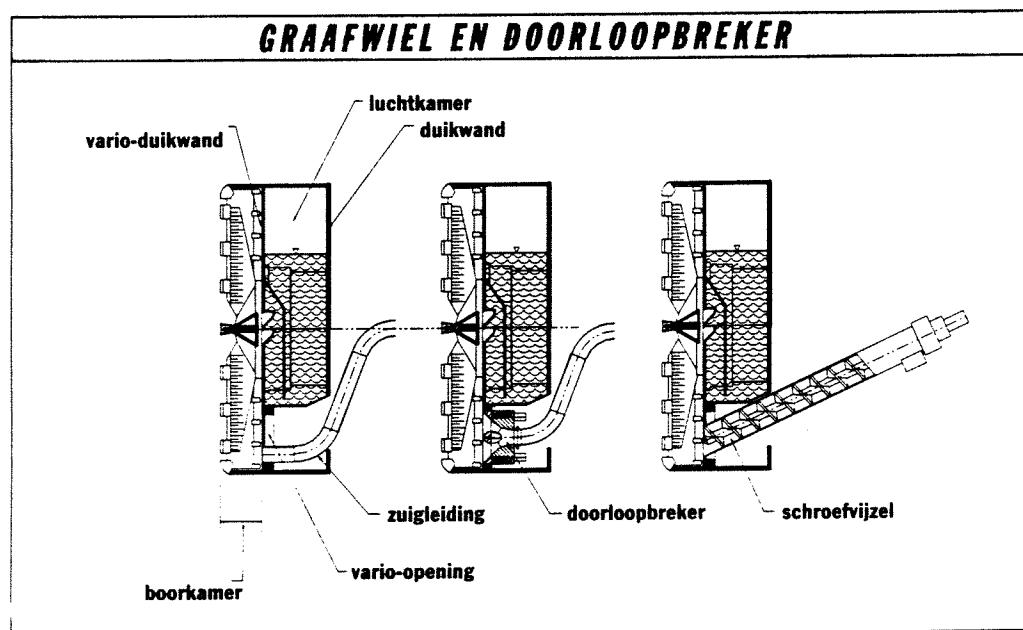
Op basis van de resultaten van de enquête is inzicht verkregen in de schade per boormethode d.m.v. een kansverdeling. Wat de incidentele zettingen betreft kan gesteld worden dat de kans op geen schade groter en het totale schadebeeld kleiner is bij een **hydroschild** dan bij een **EPB-schild**. Op basis van de te verwachten schade aan het maaiveld ligt de keuze voor een hydroschild het meest voor de hand.

Daarnaast kan men tijdens het ontwerp rekening houden met belangrijke knelpunten zoals die naar voren zijn gekomen uit de enquête: problemen omtrent de nauwkeurigheid van het controle- en regelsysteem, fluctuaties van de steundruk. Tijdens het ontwerp zou de aandacht kunnen worden gericht op deze aspecten.

Kanttekeningen:

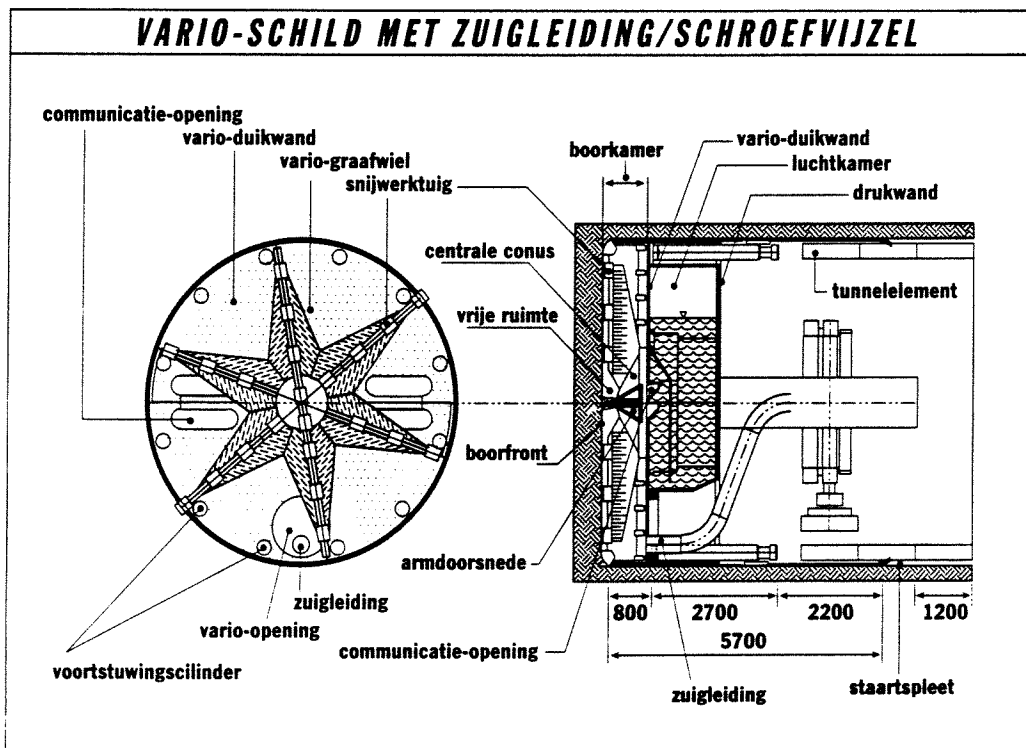
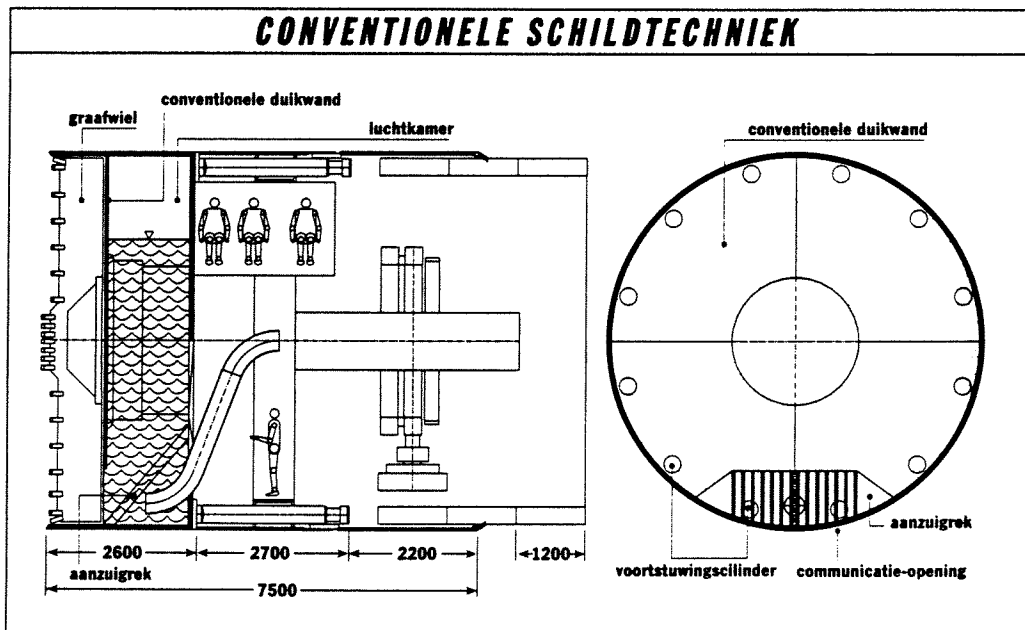
- De k.d.f. geeft een gekleurd beeld van de schade, omdat de waarden in de enquête subjectief zijn. Ze geven echter wel een bepaald verwachtingspatroon, waarop een keuze kan worden gebaseerd.
- Een waarde oordeel geven bleek moeilijk te zijn. Een verbetering van de enquête zou gezocht kunnen worden in het enkel vragen van een kans op schade.
- Wegens tijdgebrek van enkele proefpersonen is slechts een evaluatie gedaan van vier enquêtes. Om een betrouwbaardere k.d.f. te krijgen, zouden eigenlijk meer experts moeten worden ondervraagd.
- Bij de waardering is alleen gevraagd naar zettingen als gevolg. De relatieve hoekverdraaiing is niet meegenomen in de enquête, terwijl deze wel van invloed is op het schadepatroon.
- Bij de berekening is uitgegaan van middeling van kansen. Indien middeling van exponenten wordt toegepast veranderen de cijfers van hydro en epb respectievelijk van 30% en 11% naar 76% en 57% voor geen schade. (zie bijlage V). Het absolute verschil blijft gelijk, maar het relatieve verschil wordt aanzienlijk kleiner. Dit geeft een gunstiger beeld voor beide methodes aan, met name voor het EPB-schild.
- In de toekomst zal nog de nodige ervaring worden opgedaan met beide methoden bij de Westerschelde Oever Verbinding (hydroschild) en Botlektunnel (EPB). De verwachting is dat door het opdoen van die ervaring de kans op nul schade toe zal nemen en de kans op n maal schade zal afnemen. Waarschijnlijk zal de kans op geen schade voor een EPB sterker stijgen dan voor een hydroschild, omdat de ervaring en kennis relatief en absoluut gezien sterker toenemen.

Wat opvalt, maar eigenlijk ook heel logisch is, is dat de aspecten die de grootste schade veroorzaken, optreden op het moment dat een EPB zich in zandgronden bevindt en het hydroschild zich in kleigronden bevindt. Het huidige idee (binnen het voorlopig ontwerp door projectbureau Noordzuidlijn) voor een zgn. **varioschild*** (figuur 6.7, figuur 6.8) sluit aan bij het resultaat van het onderzoek: het gebruik van een boormethode op de plek waar hij het beste functioneert. Dit kan door het ombouwen van de machine tijdens de uitvoering en wel onder de grond. (figuur 6.7) Indien men daaraan de constatering koppelt dat de kans op grote zettingen tijdens stilstand marginaal is, zou de ontwikkeling van een varieschild voor een dergelijk project erg geschikt zijn. Bij het ontwerpen van een varieschild zou echter weer een risicoanalyse moeten worden gedaan om te zien hoe effectief de inzet van een dergelijke machine kan zijn en welke problemen zijn te verwachten. Een knelpunt bijvoorbeeld bij deze machine is dat men nooit precies weet op welk moment de machine omgeschakeld dient te worden.



figuur 6.7: ombouwen van een varieschild [10]

* Een varieschild is een schild dat tijdens het boren kan worden omgebouwd van EPB naar hydro mode.



figuur 6.8: conventioneel schild versus varioschild [10]

HOOFDSTUK 7 Alternatieve / aanvullende afwegingsmethoden

7.1 Inleiding

De risico's wat betreft zettingen zijn te verdelen in incidentele en structurele zettingen. In de vorige twee hoofdstukken is gekeken naar de mogelijke redenen en de mate van optreden van incidentele zettingen. Om echter een volledig onderbouwde afweging te kunnen maken, zou echter ook het volledige zettingspatroon bekeken moeten worden.

De structurele zetting, een indicator voor de beheersbaarheid van het proces, kan op verschillende manieren worden bepaald:

- **Meetgegevens:** Vanuit meetgegevens kan men de afwijking van de ideale steundruk bepalen per grondsoort. (klei, zand of zand en klei). Daarnaast kan bepaald worden hoe groot de bandbreedte is waarbinnen gewerkt wordt of kan worden.
- **Computersimulatie:** Via computersimulatie kan men het boorproces nabootsen en de veranderingen van de grondspanningen volgen.

Wat men bij deze methoden eigenlijk doet is het bepalen van de ideale in te stellen steundruk, opdat er zo weinig mogelijk risico's zijn. In dit hoofdstuk zal worden aangegeven wat de theoretische achtergronden zijn en hoe men ze kan gebruiken als afwegingsmethode ter minimalisatie van de risico's..

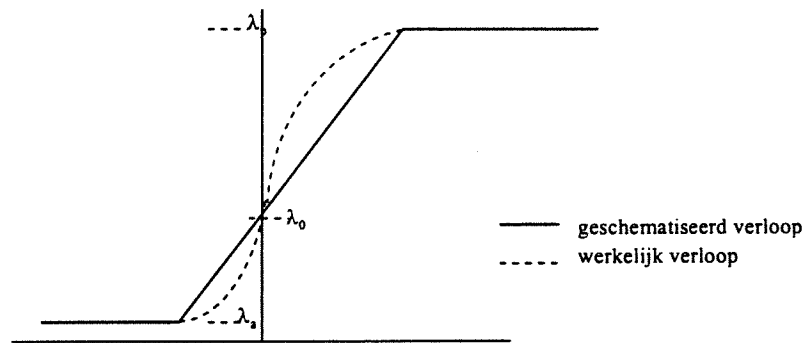
7.2 Streefwaarde van de steundruk

Binnen het bereik van de steundruk kan men verschillende waarden onderscheiden:

- **maximale steundruk** steundruk waarbij de grond plastisch vervormt van de machine af. Dit is de waarde waarbij het systeem **bezwijkt**.
- **neutrale steundruk** steundruk waarbij de grondspanningen gelijk blijven aan die in de initiële toestand
- **streefwaarde** steundruk waarbij de kans op optreden van maximaal toegestane zettingen (+ δ) even groot is als de kans op - δ .
- **minimale steundruk** steundruk waarbij de grond plastisch vervormt naar de machine toe. Dit is de waarde waarbij het systeem **bezwijkt**.
- **operationele steundruk** grenzen waarbinnen de steundruk moet blijven om te voldoen aan de gestelde eisen. Indien deze waarde overschreden wordt, **faalt** het systeem.

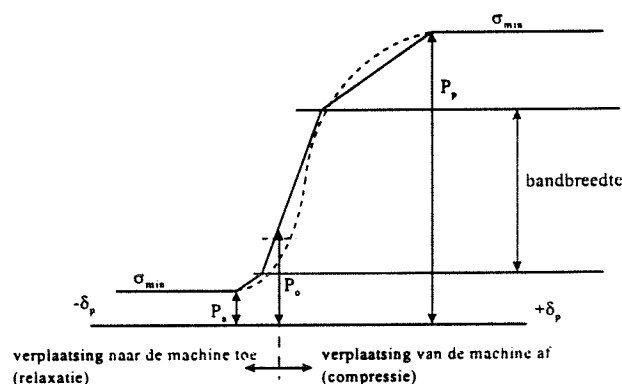
Ter minimalisatie van de risico's kan van tevoren een aan te houden steundruk worden bepaald, de zgn. streefwaarde en de bandbreedtes waarbinnen moet worden gewerkt om binnen de gestelde zettingseisen te blijven.

De vervorming van grond wordt in de grondmechanica beschreven als in *figuur 7.2*. Vanuit deze figuur kan de relatie steundruk-vervormingen worden afgeleid.



figuur 7.2: verloop vervorming - gronddruk

De grondmechanica leert dat de gronddruk actief wordt als de grond richting het boorfront beweegt en dat de gronddruk passief wordt als de grond van het front af beweegt. Hierbij neemt men als referentie de neutrale gronddruk; de druk waarbij de initiële gronddrukken gehandhaafd worden. De verwachting is dat de relatie steundrukken-vervorming een vergelijkbaar verloop zal geven. (figuur 7.3). [31].



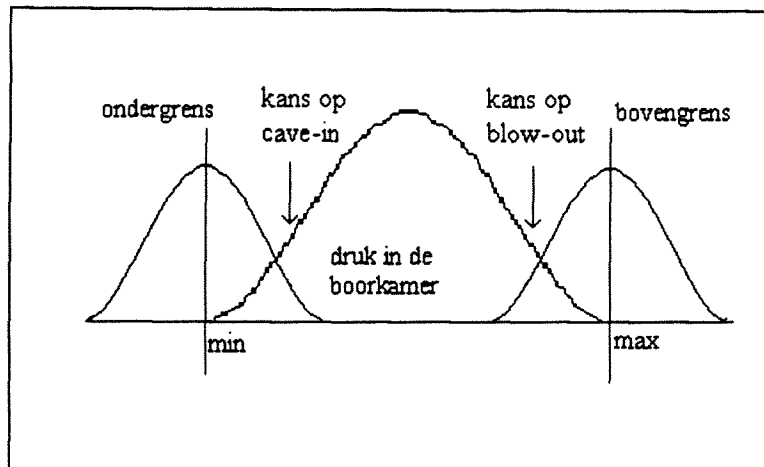
figuur 7.3: verwacht verloop vervorming -steundruk in model

Men kan in de figuur de grenzen van bezwijken aangeven middels σ_{min} en σ_{max} . Deze parameters zijn reeds eerder als volgt geformuleerd. (Deze formules zijn terug te vinden in paragraaf 2.3):

$$\sigma_{max} = 1\sigma_w + 1\sigma_{kv}$$

$$\sigma_{min} = \eta_g K_{a-3D} \sigma_{kv} + \eta_w \sigma_w$$

Daarnaast is een bandbreedte aangeven waarbinnen gewerkt moet worden om aan de zettingseisen te voldoen. Ook deze parameter is aangegeven in figuur 7.3. Om zo klein mogelijke zettingen te creëren moet men de neutrale gronddruk volgen. In de praktijk kiest men ervoor om iets boven deze neutrale gronddruk te werken, omdat men zo het risico verkleint de maximaal toegestane zetting te overschrijden. Uit figuur 7.3 blijkt dat de marge waarmee met steundruk kan worden gevarieerd naar de maximale steundruk groter is dan die naar de minimale steundruk. De streefwaarde wil men vervolgens zo groot hebben dat het risico (dus kans*gevolg) van te grote positieve deformaties even groot is als van negatieve deformaties. Dit is dan ook de reden dat men in de praktijk vaak, afhankelijk van de situatie boven of onder de neutrale gronddruk werkt. Voor de steundruk betekent dit een verloop als in figuur 7.4.



figuur 7.4: variatie van steundrukken

In de figuur is tevens de onzekerheid aangegeven die er is omtrent de maximale en minimale steundruk.

7.2.1 Streefwaarde vanuit meetgegevens

Vanuit meetgegevens kan men de beheersbaarheid van het boorproces bepalen. Men kan bepalen in hoeverre de gestelde streefwaarde voor de steundruk aangehouden kan worden door de standaarddeviatie en gemiddelde waarde te bepalen. Uit deze gegevens kan men de kans berekenen of het gestelde maximum/ minimum wordt overschreden.

Voorbeeld uitwerking:

Ten eerste moet worden vastgesteld in wat voor omgeving men werkzaam is: het risico is namelijk kans*gevolg. Indien men onder bebouwing werkt zijn de gevolgen van een cave-in groter dan bijvoorbeeld onder een rivier. In het geval van de rivier is een blow-out juist minder gunstig.

Aanwezige gegevens:

R	= straal van de tunnel	φ	= hoek inwendige wrijving grond
γ_{slurry}	= soortelijk gewicht slurry	K	= gronddrukcoëfficiënt
γ	= soortelijk gewicht grond		positie tbm.

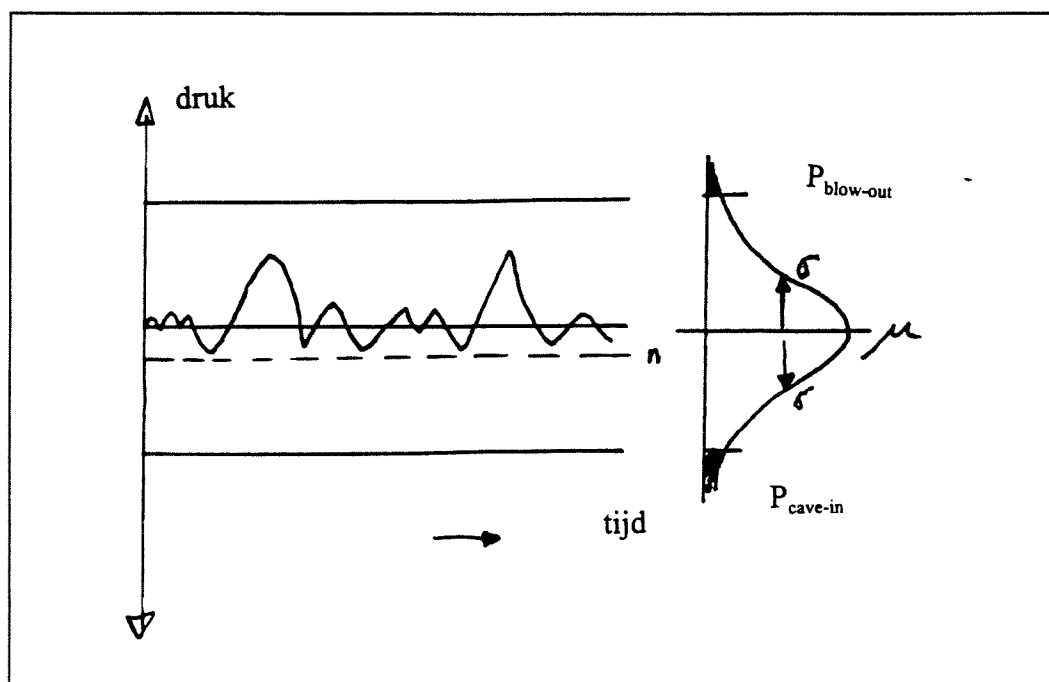
M.b.v de volgende formules kunnen onder-/bovengrenzen en neutrale waarden van de steundruk worden bepaald aan de boven- en onderkant van de tbm.

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= 1\sigma_w + 1\sigma_{kv} \\ \sigma_{min} &= \eta_g K_{a-3D} \sigma_{kv} + \eta_w \sigma_w \\ \sigma_n &= 1\sigma_w + K_n \sigma_{kv} \end{aligned}$$

Vanuit een insteldruk (μ) kan de slurrydruk aan onder- en bovenkant worden bepaald. Hieruit is de marge te bepalen, waarbinnen men nog kan variëren met de druk

$$P_{\text{res, onderkant}} = P_{\text{slurry, onderkant}} - P_{\text{min, onderkant}}$$

$$P_{\text{res, bovenkant}} = - P_{\text{slurry, bovenkant}} + P_{\text{max, bovenkant}}$$



figuur 7.5: kansverdeling steundrukken

Door de standaard afwijking vast te stellen uit de meetwaarden (figuur 7.5) kan men de kans voor blow-out en cave-in vervolgens bepalen met:

Een normale verdeling: (Gauss-verdeling als in schets)

$$\begin{aligned} \text{Blow-out:} \quad P(\text{insteldruk bovenkant} > \text{max bovenkant druk}) &= P(\mu + \sigma u > \text{max druk}) \\ &= P(\sigma u > \text{reserve}) \end{aligned}$$

De reservedruk is bekend, μ en σ kunnen worden bepaald uit de meetwaarden. Vervolgens kan men of met een rekenprogramma of met behulp van een reeds bekende verdelingsfunctie voor de standaardnormaleverdeling de overschrijdingskans bepalen.

Cave-in: Hiervoor kan dezelfde berekening worden gedaan. Hiervoor geldt echter een overschrijding van de reservedruk, die op de minimale druk zit, door de ingestelde druk

Voor beide methodes kan men een dergelijke analyse doen aan de hand van meetgegevens. Het uiteindelijke resultaat waar men op kan afwegen is de grootte van de kans op een over/onderschrijding van een steundruk, behorende bij de zettingseis, gedurende het boorproces. Een dergelijke berekening kan ook worden gedaan m.b.v. een lognormale verdeling.

Zoals gezegd kunnen meetgegevens verzameld worden uit eerder uitgevoerde projecten. Echter zou men ook naar de mogelijkheid van een proefproject moeten kijken. Hierbij boort men over een proeftracé van ca. 50 meter, waarna men met de verzamelde gegevens aan de slag kan. Voor aanvang moet gekeken worden of de investering in een dergelijk proefproject rendabel is. (zie paragraaf 7.1). Bij een keuze voor een nieuw ontwikkelde machine zou men tot een dergelijke investering over kunnen gaan.

7.2.2 Streefwaarde m.b.v een model

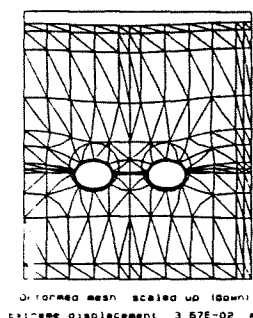
Bij het opstellen van een model kan men verschillende resultaten verkrijgen door binnen het model onderscheid te maken tussen:

- grondsoorten waarin men werkt
- maatgevende doorsneden
- boormethode

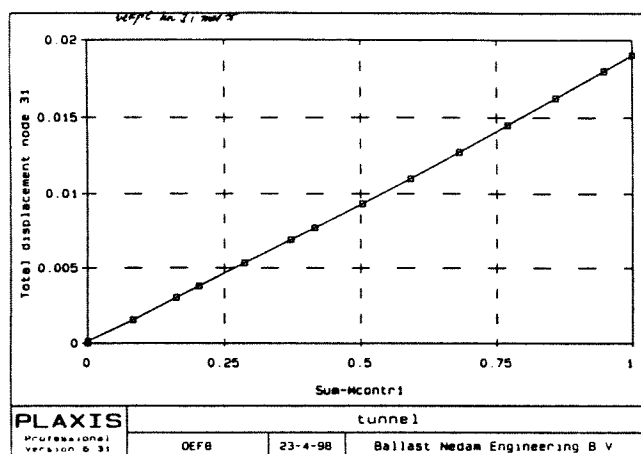
Bij het opstellen van een model heeft men de keuze uit een tweedimensionaal model (PLAXIS) of een driedimensionaal model. (ANSYS, Diana). Er zal in deze paragraaf aangegeven worden wat de mogelijkheden zijn van een model zijn en hoe een tweedimensionaal of driedimensionaal model opgesteld kan worden.

PLAXIS is een tweedimensionaal grondmechanica programma dat vervormingen berekent die het gevolg zijn van een ingevoerd volumeverlies. In het programma kan de aanleg van twee tunnelbuizen in een maatgevende doorsnede worden gesimuleerd. Zie figuur 7.5 en bijlage I. In de berekening kan men enkele belangrijke variabelen aangeven: Grondparameters, vervorming door volumeverlies, stijfheid tunnelementen.

Bij de berekening zelf ontgraft men de grond en haalt men het water vervolgens uit de tunnel. Het resultaat zijn de horizontale en verticale vervormingen per roosterpunt. Men kan dan de zakking van een paalpunt berekenen als functie van volumeverliezen. (figuur 7.6)



figuur 7.6: vervormingen berekend met PLAXIS



figuur 7.7: zakking paalpunt als functie van volumeverliezen.

Om een overzicht van de optredende zettingen tijdens het boorproces te krijgen moet ook de tunnel in langsrichting worden bekeken.. Om een goed beeld te krijgen van wat er zich nu eigenlijk afspeelt aan het front, zal men gebruik moeten maken van een driedimensionaal model. Hierin kan men zowel de zettingen in langsrichting als in dwarsrichting berekenen.

Voordelen van een driedimensionaal model t.o.v. een tweedimensionaal model:

- Zettingsberekening in langsrichting en dwarsrichting gecombineerd in één berekening
- Plaxis kent alleen de "plain-strain" situatie: men kan alleen een situatie invoeren die oneindig doorloopt, loodrecht op het beeld. In een driedimensionale vorm kan de cilinder met front worden gesimuleerd.
- Alle elementen die van belang zijn voor de berekening kunnen in de maatgevende doorsnede worden ingevoerd. Zo kan men bijvoorbeeld de zakking van een paalpunt in ieder punt t.o.v. het boorfront bepalen.
- Zettingen die met een driedimensionaal programma zijn berekend geven een betere benadering van de werkelijkheid; de berekende zettingen zijn kleiner dan bij een tweedimensionaal programma. Het verschil tussen de maximum verplaatsingen van een 2D en een 3D model wordt veroorzaakt doordat bij de 3D berekeningen ook in de richting loodrecht op de tunnelas boogwerking op kan treden. Er is dus sprake van een meerassige spanningstoestand, waarin tevens de dwarscontractie wordt meegenomen.

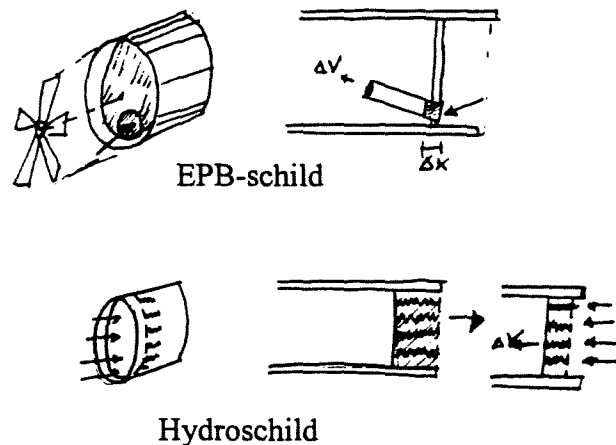
Nadelen van een driedimensionaal model t.o.v. een tweedimensionaal model:

- Het invoeren van een driedimensionaal model is tijdrovend en specialistisch. Om slechts een globale indruk van de vervormingen te krijgen volstaat een tweedimensionaal model
- De programma's kosten veel geld en nemen veel geheugen in van de computer

Een nadeel dat voor huidige 3D programma's geldt is dat ze niet in staat zijn dynamische en tijdsafhankelijke aspecten te verwerken in de berekening. Daarnaast laat het resultaat te wensen over, omdat er geen onderscheid wordt gemaakt tussen een boormethode en omdat de zettingen alleen door een opgelegd volumeverlies worden gesimuleerd.

Een verbetering in het programma zou kunnen bestaan uit simulatie van vervormingen door de wijze van ontgraving die inherent is aan een bepaalde boormethode. Daarbij zou eens kunnen worden gekeken welke zettingswinsten men kan behalen door het kleiner maken van de lengte en de coniciteit van een tbm.

Men zou een hydroschild kunnen simuleren door het als een grote veer te beschrijven. Door de slurry in de machine als een kussen te modelleren, kan men een teveel afgevoerde hoeveelheid grond opvangen met de veerkracht van het kussen. De grond in een EPB heeft niet tot nauwelijks veerkracht: het effect van een vervorming door ontgraving zou men kunnen simuleren door een klein deel te ontgraven door de avegaar, waardoor de ontstane ruimte opgevuld wordt door grond uit de omgeving. (Zie figuur 7.8)



figuur 7.8: model van ontgraving in een computerprogramma

Om een goedwerkend model te krijgen moet het model worden vergeleken met de werkelijke situatie. Bij een verschil wordt het model aangepast, waarna opnieuw een vergelijking plaatsvindt. Door dit proces te herhalen kan men het model zodanig optimaliseren kan een betrouwbaar model worden verkregen dat toepasbaar is op iedere situatie.

Een bepaalde variatie binnen de steundrukken is toegestaan. Binnen het model kan gekeken worden naar het effect van verandering van steundrukken, waaruit men een streefwaarde en bandbreedte kan bepalen. Er spelen echter onzekerheden mee, waardoor er geen 100% betrouwbaar eindresultaat kan worden verkregen.

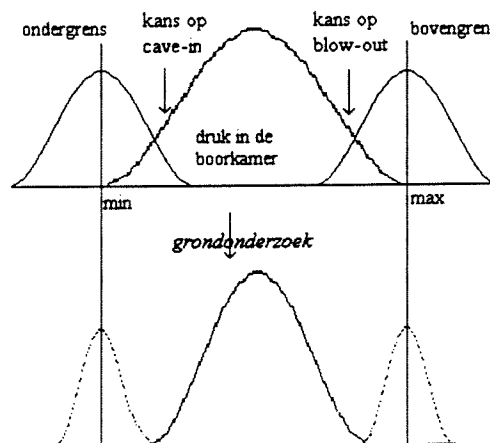
7.3 Onzekerheden en toepasbaarheid van een streefwaarde

7.3.1 Onzekerheden

- **grondgegevens**

Zoals reeds in hoofdstuk 5 is gesignaleerd, is de grondsamenstelling een belangrijke parameter. Niet alleen geldt dit voor het vroegtijdig signaleren van risico's, maar ook voor modelberekeningen. Tijdens het boren is niet 100% nauwkeurig bekend wat de situatie van de grond aan en voor het front is. Dit speelt een rol voor de grond vóór de tunnel i.v.m. de boorfrontondersteuning en voor de grond boven de tunnel i.v.m. de toe te passen steundruk. Indien de onzekerheid van de aanwezige gronddekking wordt meegenomen kan figuur 7.4 worden uitgebreid tot de volgende figuur:

Een absolute zekerheid van de grondsamenstelling is dus niet te geven. Wel kan men het risico dat men een bepaalde grenswaarde overschrijdt verkleinen door het aantal grondonderzoeken uit te breiden. (figuur 7.9). Deze dieptesonderingen leveren echter informatie van één bepaalde plek op. Tussen twee meetlocaties ontbreekt die informatie. Daarom is het idee ontstaan enige intelligentie mee te geven aan de boormachine. [43]. Door een meetsonde bij wijze van spreken een kwartslag te draaien en deze vervolgens ondergronds vanuit de tbm horizontaal de bodem in te drukken kan men grondgegevens verkrijgen over het horizontale vlak. Men kan deze meetsonde naar voren drukken op het moment dat de segmenten worden geplaatst en het graafwiel niet ronddraait. Op dat moment is er een klein half uur tijd om te meten. Uit onderzoek vorig jaar in een bouwput in Amsterdam blijkt dat een horizontale sondering soortgelijke informatie oplevert als de gebruikelijke vanaf het maaiveld.



figuur 7.9: risicobeperking door uitbreiding grondonderzoek

De volgende stap is een praktijkproef. Die begint eind juni 1998 in Antwerpen bij de aanleg van een kleine servicetunnel. In de tbm is een pers gebouwd waarmee de meetsonde onder hoge druk in de bodem kan worden gedrukt. Aan de hand van deze gegevens kan men de steundruk, groutdruk en snijsnelheid bepalen. De resultaten van een meting met zo'n priksonde levert geen dekkende informatie op over het hele boorfront. Grondmechanica werkt daarom aan de ontwikkeling van een Speurheus: een sonde met een radarantenne erin om de omgeving te scannen. De kosten van een proeftunnel zijn beperkt, ongeveer 1 promille van de aanlegkosten van de werkelijke tunnel. Met de verkregen informatie is de tbm beter te besturen (beheersbaarheid). Bovendien wordt inzicht verkregen in eventuele obstakels onderweg. (incidenten)

• **Metingen**

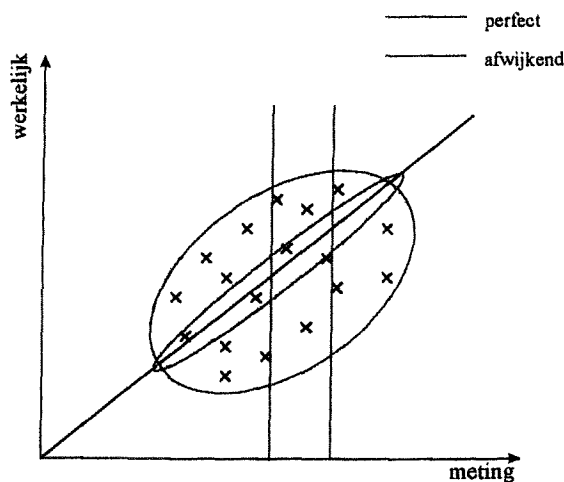
Er kan niet altijd een meting worden verricht om de beoogde meetgegevens te verkrijgen. Daarnaast vertonen de metingen altijd een bepaalde orde grootte onnauwkeurigheid.

Het hydroschild wordt momenteel op druk gestuurd. Hiertoe worden druk- en dichtheidsmetingen verricht. De eerste onzekere factor bij een drukmeting is de vraag of het meetinstrument op de juiste plaats geïnstalleerd is en dus een goed beeld geeft van de werkelijke situatie. Een tweede onzekere factor is de interpretatie van de gegevens, die persoonsafhankelijk is.

Bij een dichtheidsmeting in de afvoerleiding kan men de hoeveelheid ontgraven grond bepalen. Deze meting is evenwel nog onnauwkeuriger dan een drukmeting, omdat de hoeveelheid deeltjes zeer moeilijk te meten is. Daarnaast worden de waardes vertekend door sedimentatie in de leiding.

Het EPB-schild wordt druk- en volumegestuurd. Voor deze methode gelden dezelfde onzekerheden als voor het hydroschild. Ook bij deze methode blijkt het moeilijk te zijn een redelijke schatting van het ontgraven volume te kunnen maken. De reden hiervan is dat de grond pas gemeten wordt nadat de grond gemengd en vervormd is in de graafkamer en de schroeftransporteur.

In *figuur 7.10* staan twee verdelingen voor de metingen t.o.v. de werkelijkheid. In de praktijk ziet men graag het verloop volgens de rode lijn, in werkelijkheid volgt het verloop van de metingen meer de blauwe lijn.



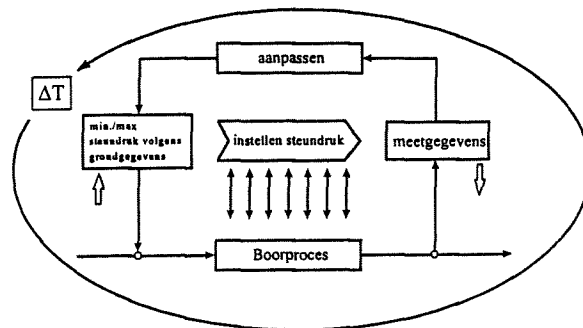
figuur 7.10: meetfout

- **Positie**

De gemeten positie van de tbm kan enigszins afwijken van de werkelijke positie. In de praktijk geeft dit echter een marginaal verschil; de invloed van deze onzekerheid kan worden verwaarloosd.

- **Reactietijd**

In nevenstaande figuur is te zien dat het instellen van de steundruk een proces is dat gedurende het hele boorproces plaatsvindt. Het instellen van de steundruk vergt enige tijd. Het toepassen van de juiste in te stellen steundruk is een reactie van het gedrag van de grond. Deze reactie wordt bepaald aan de hand van steundrukmetingen. De metingen kunnen vervolgens worden getoetst aan de verwachte waarde. Tot slot wordt de juiste steundruk ingesteld. Deze opeenvolgende acties leiden tot een vertraging in de regulering van de steundruk, waardoor het verloop van de steundruk een oscillerend karakter krijgt. De reactietijd en de grootte van de drukvariaties veroorzaken onzekerheid omtrent de mogelijkheid op variaties te reageren en binnen de bandbreedte te blijven.



Deze opeenvolgende acties leiden tot een vertraging in de regulering van de steundruk, waardoor het verloop van de steundruk een oscillerend karakter krijgt. De reactietijd en de grootte van de drukvariaties veroorzaken onzekerheid omtrent de mogelijkheid op variaties te reageren en binnen de bandbreedte te blijven.

- **Gevolg**

In de gestelde eisen kunnen verborgen veiligheids- en onveiligheidsfactoren verscholen zitten, waardoor in de praktijk hogere vervormingen eventueel ook toelaatbaar kunnen zijn of berekende vervormingen niet toelaatbaar zijn.

- **Schematisatie**

Bij het bepalen van de streefwaarde van de steundruk middels een simulatie, moet rekening gehouden worden met het feit dat het om een model gaat, een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid. Om tot een verwerkbaar model te komen zullen aannamen moeten worden gedaan en details worden verwaarloosd. De onzekerheid die schuilt in de resultaten van het model hangt af van de schematisatiegraad en het gebruikte simulatieprogramma.

7.3.2 Toepasbaarheid

- **Maatgevende situatie:**

De maatgevende situatie is afhankelijk van de grondsamenstelling, de dekking en de afstand tot fundering/ dekking. Deze situatie doet zich slechts op een kort gedeelte van het tracé voor. Het resultaat van een doorsnede kan niet direct op een ander deel worden toegepast. Hiervoor zou men kleine gedeeltes van het tracé moeten analyseren, waarvan men weer een kansverdeling van de streefwaarden van het gehele tracé zou kunnen maken.

- **Werkterrein**

Het gedrag van de steundrukken is afhankelijk van de grondlaag waarin men opereert. Daarnaast zal een proces in de ene grondsoort beter controleerbaar zijn in de andere. Het is bekend dat de steundrukken bij een hydroschild beter te beheersen zijn dan in zand dan in klei. Echter op de vraag of al dan niet kan worden voldaan aan die drukken kan en zal geen antwoord gegeven worden binnen dit onderzoek.

- **Competentie**

De berekende waarden van toegestane variantie moeten ook daadwerkelijk kunnen worden nagestreefd door de uitvoerder. Factoren die hierbij meespelen zijn de ervaring en de deskundigheid van de aanvoerder om zo veel mogelijk de streefwaarde te volgen tijdens de uitvoering. Op bepaalde gedeeltes van het traject zal met uiterste zorgvuldigheid moeten worden gewerkt om te zorgen dat men steeds aan de eisen voldoet.

HOOFDSTUK 8 Conclusies en aanbevelingen

t.a.v. de gebruikte afwegingsmethode

Met de gevolgde onderzoeksmethode kan snel resultaat worden verkregen op basis waarvan een aanbeveling kan worden gedaan aangaande de keuze voor een boormethode. Daarnaast worden in korte tijd de knelpunten geanalyseerd, zodat reeds voor aanvang van het project kan worden geanticipeerd op eventuele problemen.

Zaken die in acht dienen te worden genomen bij deze methode:

- Een waarde oordeel geven is moeilijk: De vraag dient zodoende duidelijk te zijn geformuleerd en het te geven antwoord moet niet te gecompliceerd zijn
- Om een betrouwbaar beeld te krijgen dienen er vakkundige personen te worden gebruikt voor de enquête.
- Er kan niet op elk aspect worden gewogen, omdat sommige parameters nu eenmaal moeilijk of niet zijn in te schatten
- De resultaten dienen ter afweging en ter analyse. Uit de verschillende berekeningsmethoden is gebleken dat de waardes van de resultaten niet absoluut moeten worden genomen. (gemiddelde waarden vs. exponentiële waarden, 30% vs. 76% , 11% vs. 57%)

De afweging is met dit onderzoek nog niet compleet. Omdat de kosten gerelateerd zijn aan de risico's waarop de eigenlijke afweging plaatsvindt, zou pas een afweging plaats kunnen vinden op het moment dat men zicht heeft op de totale kosten.

Zoals gezegd is alleen gewogen op incidentele zettingen t.g.v. het boorfront. Voor de complete afweging zouden ten eerste alle oorzaken van zettingen meegenomen moeten worden, dus ook zettingen t.g.v. grouten. Ten tweede zouden ook de te verwachten structurele zettingen in kaart te moeten worden gebracht m.b.v. onderzoeksmethoden zoals omschreven in hoofdstuk 7:

- (Ontwerp en) Gebruik van een driedimensionaal computerprogramma (Dit is echter duur en tijdrovend)
- Evaluatie van boorgegevens van Heinenoord, Botlek en WOV
- Eventuele proefboring in vergelijkbare omstandigheden om boorgedrag te analyseren, hierbij kan men kiezen voor een 1:1 proef of een schaalproef. (met name toepasbaar indien een nieuw ontworpen machine wordt gebruikt)

Nota bene: Men zou deze enquête direct voor uitvoering en na uitvoering van het project nog eens moeten doen om de betrouwbaarheid van de gebruikte methode te bepalen.

t.a.v. de case: de Noordzuidlijn

Op basis van de resultaten van de enquête is inzicht verkregen in de kansverdeling van het schadeverloop per boormethode. Er kan geconcludeerd worden dat de kans op geen schade groter is en het totale schadebeeld kleiner is bij een hydroschild. Als uitgangspunt is de schade aan het maaiveld gekozen en er is alleen beoordeeld op schade t.g.v. incidentele zettingen. Op basis van de resultaten ligt de keuze voor een hydroschild het meest voor de hand.

Aspecten die uit de enquête naar voren zijn gekomen bij het hydroschild (in volgorde van belangrijkheid):

- onregelmatigheden in boorproces, die variatie in steundruk tot gevolg hebben
- een onnauwkeurig controle- en regelsysteem:
- passage van een grenslaag
- verkleving aan graafwiel
- toename waterspanningen voor boorfront
- aanwezigheid van een onbekend gangenstelsel

Aspecten die uit de enquête naar voren zijn gekomen bij het EPB-schild (in volgorde van belangrijkheid):

- een onnauwkeurig controle- en regelsysteem
- onregelmatigheden in boorproces, die variatie in steundruk tot gevolg hebben
- problemen bij het verkrijgen van een goede vervormbare brij
- verkleving aan graafwiel
- toename waterspanningen voor boorfront (bij schuiminjectie)
- passage van een grenslaag

Problemen die de aandacht verdienen en waar onderzoek naar kan worden gedaan zijn beheersing van de steundrukken en nauwkeurigheid van de metingen. De oplossing kan gezocht worden in verbetering van de huidige methodes of het opstellen/aanbrengen van mitigerende maatregelen.

Nota bene: In de toekomst zal nog de nodige ervaring worden opgedaan met beide methoden bij de Westerschelde Oever Verbinding (hydroschild) en Botlektunnel (EPB). De verwachting is dat door het opdoen van die ervaring de kans op nul schade toe zal nemen en de kans op n maal schade zal afnemen. Waarschijnlijk zal de kans op geen schade voor een EPB sterker stijgen dan voor een hydroschild, omdat de ervaring en kennis relatief en absoluut gezien sterker toenemen. Men zou opnieuw een enquête moeten houden na voltooiing van deze projecten om nauwkeurigere resultaten te krijgen.

Middels groepering van de verschillende oorzaken, blijkt dat de aspecten die de grootste schade veroorzaken, optreden op het moment dat een EPB zich in zandgronden bevindt en het hydroschild zich in kleigronden bevindt. Het huidige idee van projectbureau Noordzuidlijn voor de ontwikkeling van een zgn. varioschild¹ (figuur 6.7, figuur 6.8) sluit aan bij het resultaat van het onderzoek: het gebruik van een boormethode op de plek waar hij het beste functioneert. Indien men daaraan de constatering koppelt dat de kans op grote zettingen tijdens stilstand marginaal is, zou de ontwikkeling van een varioschild voor een dergelijk project erg geschikt zijn.

Bij het ontwerpen van een dergelijk varioschild, zou opnieuw een risicoanalyse moeten worden gedaan om te zien hoe effectief de inzet van een dergelijke machine kan zijn. Daarnaast kan men tijdens het ontwerp rekening houden met belangrijke knelpunten zoals die naar voren zijn gekomen uit de enquête, zoals: problemen omtrent de nauwkeurigheid van het controle- en regelsysteem, fluctuaties van de steundruk. Tijdens het ontwerp zou de aandacht kunnen worden gericht op deze aspecten. Daartegenover zullen nieuwe knelpunten naar voren komen als wanneer het geschikte moment daar is om de machine om te bouwen.

¹ Een varioschild is een schild dat tijdens het boren kan worden omgebouwd van EPB naar hydro mode.

HOOFDSTUK 9 Discussie

Hierin wordt het onderzoek teruggekoppeld naar de probleem- en doelstelling. Er zal antwoord gegeven worden op de vraag in hoeverre het beoogde doel is bereikt en op welke punten niet? Hieruit volgen mogelijke onderwerpen voor verder onderzoek.

In hoeverre is er antwoord gegeven op de probleemstelling?

De probleemstelling was: *“Welk schild zet ik in, indien beide methodes inzetbaar zijn?”*

Er is in het onderzoek globaal aangegeven hoe men vanuit het standpunt van een aannemer een keuze maakt voor een uitvoeringsmethode. Van dit keuzeproces is alleen de keuze op basis van schade gedetailleerd uitgewerkt. Anders geformuleerd: er is dus wel antwoord gegeven op de vraag hoe de keuze wordt gemaakt, echter niet het totale keuzeproces is uitgewerkt. Een totaal antwoord op de vraag in de doelstelling is niet gegeven.

In hoeverre is er voldaan aan de doelstelling?

De doelstelling was: *“De resultaten van het onderzoek leveren een bijdrage aan de keuze voor de inzet van een EPB- of hydroschild. Daarnaast wordt getoond welke mogelijkheden er zijn tot gebruik van een risicoanalyse als afwegingsmethode en stuurmiddel in het proces.”*

Middels de uitgevoerde enquête is getoond dat het mogelijk is op basis van een risicoanalyse een afweging te maken. Hiertoe is als uitgangspunt schade aan het maaiveld gekozen, omdat dit op de totale kosten een grote invloed kan hebben. Dit laatste is ook hetgeen dat mist in het onderzoek om een volledige afweging te maken. De afwezigheid van een kostenberekening is een direct gevolg van de omvang van het opstellen ervan. Er was geen tijd voor beschikbaar.

Het aspect stuurmiddel is niet aan bod gekomen binnen het onderzoek. Een stap in de richting hiervan is wel gemaakt middels een analyse van de knelpunten, waarna men verder aandacht kan besteden aan de belangrijkste knelpunten. Er is in de risico-itemlijst wel aangegeven wat je zou kunnen doen aan preventieve maatregelen, echter een lijst van wat te doen bij calamiteiten is niet opgesteld. Dit laatste zou als handboek kunnen dienen bij rampscenario's tijdens de uitvoering. Daarnaast is het idee van het projectbureau om een varieschild te ontwikkelen versterkt met de resultaten.

Mogelijkheden tot verder onderzoek:

- Het berekenen van de totale kosten, waarin tevens de variatie van planning, kosten en eventuele vertragingen zitten verwerkt.
- Het verder uitwerken van het principe van een varieschild in combinatie met opdrachtgever, werktuigbouwkundige en aannemer
- Het verbeteren van meet -en regelsystemen t.b.v. drukinstelling. Dit werd als belangrijkste knelpunt gesignaleerd
- Een risicoanalyse van de structurele zettingen ter bepaling van de beheersbaarheid van beide boorprocessen door:
- Het ontwikkelen van een driedimensionaal model, waarin de verschillen in ontgravingsmethode zitten verwerkt
- Het analyseren, vergelijken en evalueren van metingen van projecten als Botlektunnel, Heinenoordtunnel, WOV-verbinding

Literatuurlijst

- [1] Anagnostou, G., Kovári K. Face Stability in slurry and EPB shield tunnelling, International Symposium of Technical Committee TC28: Underground Construction in Soft Ground, April 15-17 1996
- [2] Bontje, L. plan Amsterdam, nr 5., juni 1997
- [3] Davis E. , Gunn M., Mair R. & Seneviratne H. Géotechnique 30, no.4, 1980, pag. 397-416.
- [4] Groot, A.E.A. de Afweging voor het gebruik van het slurry- of EPB-schild, afstudeerverslag, aug. 1997
- [5] Groote G.P., Slikker P., Hugenholtz-Sasse C.J. e.a. Projecten leiden, 1990
- [6] Hergarden A.M., Poel J.T van der & J Schrier S. van der "Ground movements due to tunnelling; Influence on pile foundations", Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Mair & Taylor, Balkema Rotterdam, 1996
- [7] Hergarden, ir H.J.A.M. Ruim 5 km schildboringen in typisch Nederlandse ondergrond; Ervaringen uit de geotechniek, Grondmechanica Delft, Delft
- [8] Horvat, Prof.ir. E. Ondergronds Bouwen (e18), Delft, mei 1997
- [9] Jancsecz, S. & Steiner, W. Face support for a large Mix-shield in heterogeneous ground conditions, proceedings of Tunneling '94, 7th symposium Tunnelling'94, London 5-7 july '94, p 531-550
- [10] Kaalberg, Ir. F. Hentschel, Dipl.-Ing. V. Specifieke randvoorwaarden tunnelboormachine in Amsterdam, Land + Water no. 12 1997
- [11] Kähkönen K. & Huovila P. "Systematic risk management in construction projects", VTT Building Technology, Finland
- [12] Kanayasu S., Kubota I., Shikibu N. Stability of face during shield tunneling, Underground Construction in Soft Ground, Balkema Rotterdam, 1995
- [13] Kessel, A.J. van Het boren van tunnels in Nederland, Het bepalen van de besturingsparameters voor een Hydroschild tunnelboormachine, afstudeerverslag, Faculteit der Civiele Techniek, Delft, februari 1996
- [14] Kinderen, S. van Risicoanalyse van een geboorde tunnel, eindrapport afstudeerproject, Faculteit der Civiele Techniek, TU Delft, juni 1995
- [15] KIVI Boren van tunnels voor rail- en wegverbindingen, eindrapportage, 29 augustus 1993, Afdeling Tunneltechniek en Ondergrondse Werken
- [16] Krikhaar, H.M.M. Vries ing. J. de Fundamenteel gedrag van cement-bentoniet, Cement 1993 nr.12
- [17] Krause, Dr.-Ing. Thomas Schildvortrieb mit flussigkeits- und erdgestützter Ortsbrust, 1987
- [18] Kuesel T.R., King E.H. Tunnel engineering handbook, 1996

- [19] Maidl B., Herrenknecht M., Anheuser L. Mechanised Shield Tunneling, Berlijn 1996
- [20] Maidl, U. Einsatz von schaum für Erddruckschilde-Theoretische Grundlagen der Verfahrenstechnik, Bauingenieur 70, 487-495, Springer Verlag, 1995
- [21] Maidl, Dr. U. Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenconditionierung mit Schaum, 1995
- [22] Mori A., Kurihara K., Mori H. A study on face stability during slurry-type shield tunnelling, Underground Construction in Soft Ground, Fujita & Kusabe, 1995
- [23] Sandwijk, Dr. A. van Mijnbouwchemie II (mp2200), Delft, 1993/1994
- [24] Teunissen, ir. E.A.H. Boren van Tunnels en Leidingen, Stabiliteit van het boorfront, Grondmechanica Delft, augustus 1994
- [25] Tol, Prof.ir. A.F. van Funderingstechnieken (g80), Faculteit der Civiele Techniek, Delft, sep 1996
- [26] Vermeer, P.A. Brinkgreve, R.B.J. PLAXIS, Finite Element Code for Soil and Rock analysis version 6, Balkema Rotterdam, 1995
- [27] Verruijt, A. Grondmechanica, Delft, vierde druk 1993
- [28] Visser, G.A. Beïnvloeding van een bestaande paalfundering door ondergronds bouwen, afstudeerverslag TU Delft, mei 1995
- [29] Vrijling, Prof. drs. ir. J.K. Bezuijen, ir. K.G. Waterbouwkundige Kunstwerken B.O. (f9c), Delft, 1997
- [30] Vrijling, Prof. drs. ir. J.K. Probabilistisch ontwerpen in de waterbouw, Faculteit der Civiele Techniek, Delft, 1996
- [31] Vrouwenvelder, Ir. A.C.W.M. Probabilistisch ontwerpen (b3), Faculteit der Civiele Techniek, Delft Vrijling, ir. J.K.
- [32] Wermer, Ing. F.J. "Tweede Heinenoordtunnel, eerste geboorde tunnel in Nederland", funderingstechnologie
- [33] Whittaker B.N., Frith R.C. Tunnelling: design, stability and construction, The institution of Mining and Metallurgy
- [34] Woude, S. van der Conditionering van zandgrond voor uitbreiding van de inzetbaarheid van het gronddrukbalansschild, COB GOR-rapport 03, augustus 1996
- [35] n.n. Métro de Lille, Ligne 2, section F, Travaux nr 720, mei 1996
- [36] n.n. N 510-01, Risico-analyse bouwfase boortunnels, werkrapport CUR/COB
- [37] n.n. Raadsbesluit 27 november 1996, Definitief PvE, Kerntracé Noord/ Zuidlijn, Ontwerpbureau Noord/ Zuidlijn
- [38] n.n. Risico-analyse Tweede Heinenoord Tunnel, Fase 2, 1995
- [39] n.n. Untererdisches Bauen Grundbau, Arbeitblätter SE Schlitzwandbauweise, Bergische Universität, Gesamthochschule Wuppertal
- [40] @RISK, advanced risk analysis for spreadsheets, Palisade, july, 1997

- [41] COB rapport, K100-W-014, predicties boortechnologie, juni 1996
- [42] Scanner gaat voor tunnelboorder vooruit, artikel Volkskrant, Bijlage wetenschap, 6 juni 1998
- [43] Stand van zaken boorspoelingen en addities, monitoring tunnelboormachines, januari 1995
- [44] <http://www.cob.nl> - fotoboek

Verklarende woordenlijst

Boorfront	Raakvlak tussen nog af te graven grond en graafwiel
Drukwand	Scheiding tussen de onder druk staande ontgravingskamer en de tunnel, die onder atmosferische druk staat
Duikwand	Scheiding tussen de ontgravingskamer en luchtkamer (alleen bij hydroschild)
EPB-schild	Schild, waarbij de ontgraven grond als waterkerende werking en ondersteuning van het boorfront wordt gebruikt tijdens het boren en waarbij de grond middels een schroefvijzel wordt afgevoerd
Filterkoek	Ondoorlatende laag op het boorfront bestaande uit bentoniet. De filterkoek ontstaat door indringen van de steunvloeistof in de grond
Grout	Mengsel van water en cement
Hydroschild	Soort Slurryschild; de druk van de ondersteuningsvloeistof wordt hier echter geregeld door een aparte luchtkamer in de ontgravingskamer
Lining	Tunnelwand
Mengkamer	Ruimte waar de net ontgraven grond terecht komt en gemengd wordt met bentoniet of een ander additief om afgevoerd te kunnen worden
Ontgravingskamer	Ruimte waar de net ontgraven ontgraven grond terecht komt
Scheidingsinstallatie	Installatie die de bentonietsuspensie van de ontgraven grond scheidt
Schroefvijzel	Vijzel waarmee grond kan worden verpompt
Segment	Onderdelen van beton/staal waaruit de lining bestaat
Slurryschild	Schild, waarbij men gebruik maakt van een bentonietsuspensie om voldoende steundruk te leveren tegen het grodmassief. De grond wordt gemengd met de boorvloeistof hydraulisch afgevoerd
Staartafdichting	Afdichting om de ruimte tussen het schild en de buitenkant van de net geplaatste lining af te sluiten
Staartspleet	Spleet tussen de buitenkant van de tunnelboormachinemantel en de buitenkant van de lining. Deze ontstaat doordat de diameter van de tbm groter is dan de diameter van de tunnel
Startschacht	Bouwput van waaruit het boorproces start
Steenbreker	Apparaat dat stenen van niet transporteerbare grootte terugbrengt tot een transporteerbare grootte
Steundruk	Druk om de stabiliteit van het boorfront te regelen. Wordt opgebouwd door steunvloeistof (hydroschild) of net ontgraven grond (EPB-schild)
Steunvloeistof	Vloeistof, die onder druk de ondersteuning en dus de stabiliteit van het boorfront verzorgt
TBM	TunnelBoorMachine; Schild, ontgravingswiel of -schijf, alle apparatuur die binnen het schild gemonteerd is, de volgtrein

BIJLAGEN:

Bijlage I: Tracébeschrijving NZ-lijn	B 2
Bijlage II: Stappenproces	B 6
Bijlage III: Schema globale risicoanalyse	B 12
Bijlage IV: Enquête	B 20
Bijlage V: Resultaat enquête	B 26

Bijlage Ia Tracébeschrijving NZ-lijn

Het geboorde tracé

Beschrijving tracé: [37]

Het tracédeel begint met de startschacht van het boorproces gelegen in het noordoostelijke deel van het Damrak met BS op NAP -19,0 m. Vanuit de schacht wordt overgegaan op twee enkelsporige buizen met een uitwendige diameter van 6,5 elk. De buizen zijn op een onderlinge afstand van 0,5-D de buisdiameter van elkaar gelegen. Het spoor daalt onder een helling van ca. 1:27 tot een niveau van NAP -21,5 m. De buizen buigen met ruime boogstralen tot een ligging midden onder het Damrak wordt bereikt. Vervolgens buigt het tracé met een boogstraal van 240 m. over de Dam het Rokin in langs het gebouw Industria tot aan het station Rokin.

Zuidelijk van het station Rokin daalt het tracé onder een helling van 1:28 tot een niveau van NAP -31,0 m. om obstakelvrij onder de diepe stalen palen van de brug bij de Munttoren door te gaan. In het Rokin is sprake van een S-vormig tracé met boogstralen variërend van 190 tot 235m. In de Vijzelstraat wordt vervolgens het diepste punt bereikt: -32,6 m. bereikt. Station Vijzelgracht is gelegen op NAP -26,0 m.

De oostelijke tunnelbuis vervolgt het tracé op NAP-26 onder de Ferdinand Bolstraat, de westelijke tunnelbuis komt op een afstand van 35m te liggen vanwege ruimtegebrek. Ter plaatse van de Albert Cuypstraat buigen beide tunnels weer boven elkaar. Bij het station Ceintuurbaan liggen de buizen op een hoogte van NAP -16,5 m. en NAP -26,5 m. De tunnelbuizen blijven boven elkaar en dalen nog tot NAP -19,0 m. en NAP -32 m. Bij het Scheldeplein zijn beide buizen naast elkaar gelegen en bereiken op ca. NAP -15 m. de eindschacht van het boorproces.

Bouwmethode [37]:

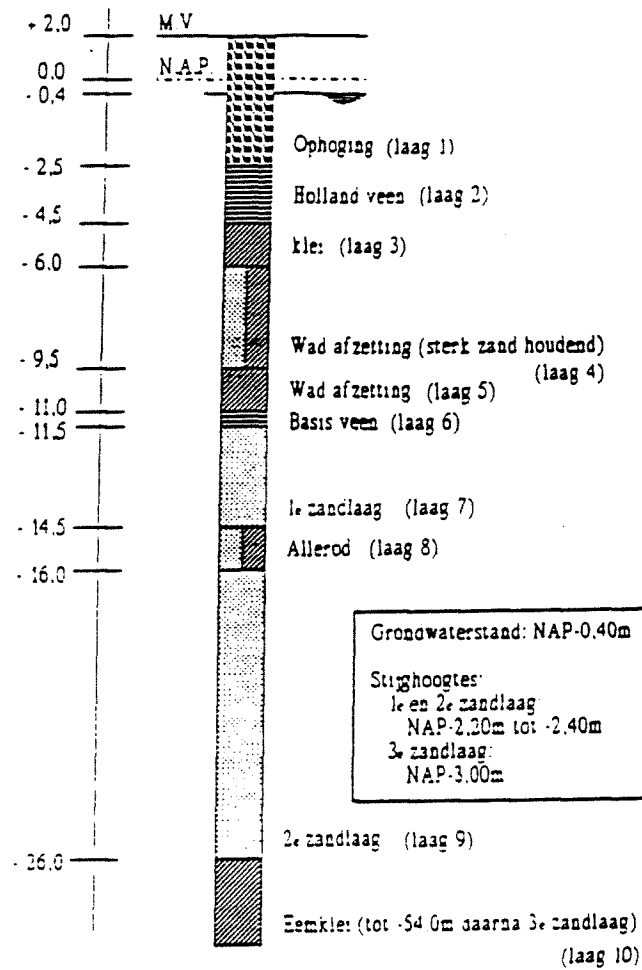
Het te boren tracé bestaat uit een tweetal enkelsporige buizen, naast elkaar gelegene met een tussenruimte van circa 0,5-diameter. Vanaf de startschacht op het Damrak boort de tbm tot aan de stationsbouwput van het Rokin. De boor wordt vervolgens door de ruwbouw van het station geleid en vervolgt zijn weg na het doorboren van de kopse wand. Hetzelfde proces herhaalt zich bij de volgende stations.

Om schade aan de bebouwing te voorkomen zullen lokaal mitigerende maatregelen worden toegepast ter plaatse van het Beursgebouw, het gebouw Industria, de Munttoren en het Muntplein. Daarnaast worden lokaal mitigerende maatregelen toegepast bij de Bijenkorf, de hoek Langebrugsteeg-Rokin en aan de zuidzijde van de Vijzelstraat en de brug over de Prinsengracht uitgevoerd.

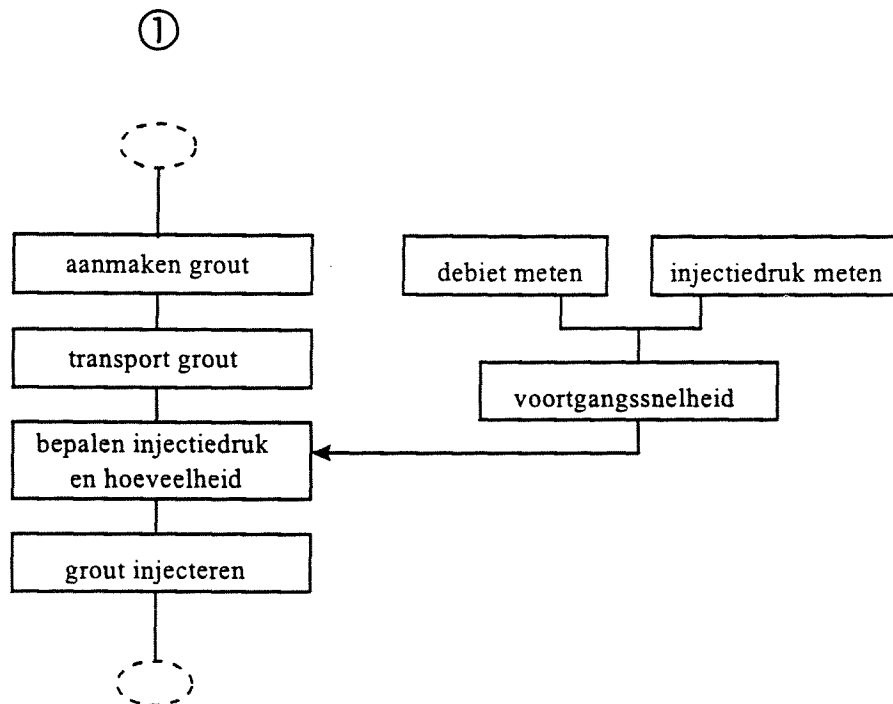
De oostelijke tunnelbuis gaat onder de brug over de Singelgracht. De fundering van deze brug zal moeten worden aangepast. De mitigerende maatregelen in het noordelijke deel van de Ferdinand Bolstraat kunnen beperkt blijven tot grondverstijving rond de oostelijke tunnel nabij de "Heineken Toren". Daarnaast geldt dat mitigerende maatregelen bij de oostelijke tunnel ter hoogte van de Albert Cuypstraat noodzakelijk zijn. Hier zal lokaal tijdens het boren grout geïnjecteerd worden. Tussen de Ceintuurbaan en het Cornelis Troostplein zal grondversteving worden toegepast. De fundering van de brug over het Amstelkanaal wordt versterkt.

Tussen beide buizen zullen nooddoorgangen worden aangelegd. De stations worden aangelegd volgens de wanden-dakmethode.

Grondgegevens NZ-lijn



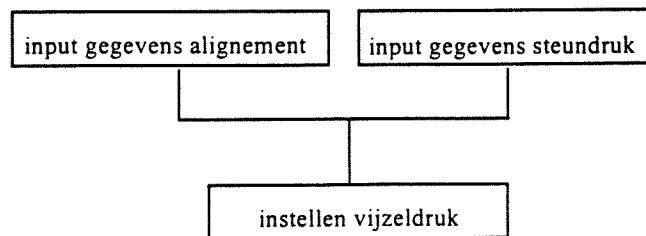
laagnr.	ϕ [°]	ν	E_{50} [kN/m ²]	c' (gedr.) [kN/m ²]	G_{droog} [kN/m ³]	G_{nat} [kN/m ³]	k_{bed} [kN/m ²]
1	30	0.3	3000	0	16	20	7500
2	20	0.35	500	2	-	10.5	1000
3	22.5	0.35	1200	3	-	15	2000
4	30	0.35	7500	2	-	18	10000
5	27.5	0.3	4500	2	-	17	2000
6	20	0.35	1500	5	-	11	1000
7	32.5	0.3	30000	0	-	20	15000
8	30	0.35	7500	2	-	19	10000
9	35	0.3	70000	0	-	20	35000
10	27.5	0.35	15000	20	-	17	7500

Bijlage II: Stappenproces van de procesondersteunende functies**stappenproces vullen staartspleet**

Door de conische vorm van de tbm en oversnijding ontstaat een ruimte achter het schild. Deze ruimte dient te worden opgevuld met grout om grote zettingen te voorkomen. Voordat de grout wordt geïnjecteerd wordt de druk bepaald. Dit gebeurt op basis van de gemeten injectiedruk en het gemeten debiet, die beide worden bepaald door de voortgangssnelheid van de tbm. Om de maximale voortgangssnelheid te bereiken dient een optimum te worden gezocht tussen de voortgangssnelheid en het groutproces.

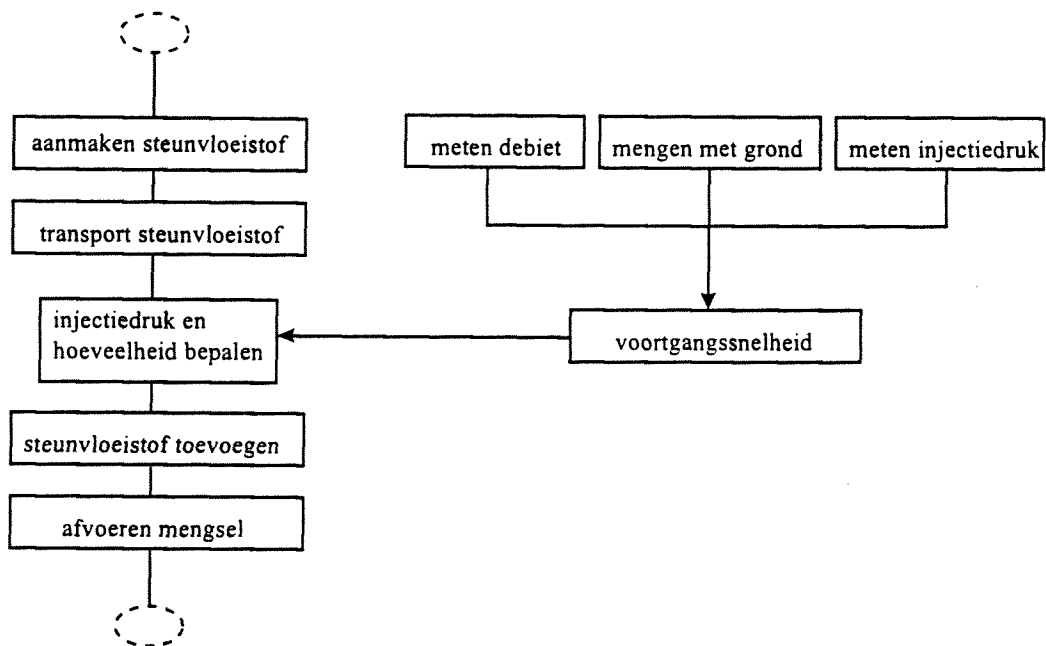
stappenproces afzetten vijzels

②



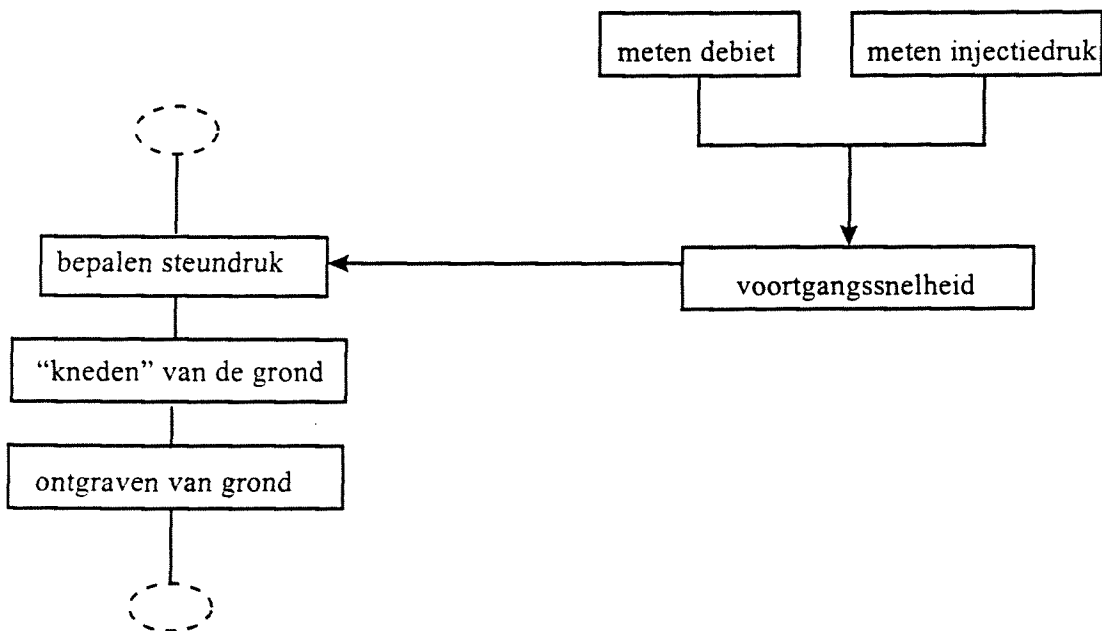
De horizontale kracht die op het boorfront werkt zal naar de lining moeten worden afgedragen. Dit wordt gedaan via de vijzels. Daarnaast is tijdens de voortgaande beweging een horizontaal krachtenevenwicht gewenst tussen krachten als mantelwrijving, steundruk aan het boorfront

③

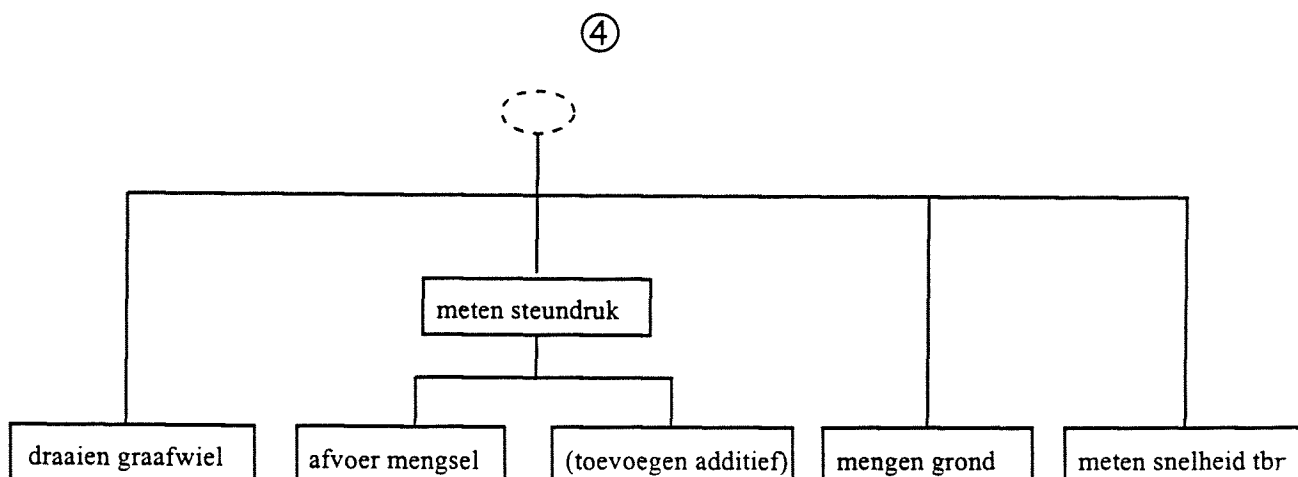


stappenproces steunen boorfront[38] (hydro ↑ EPB ↓)

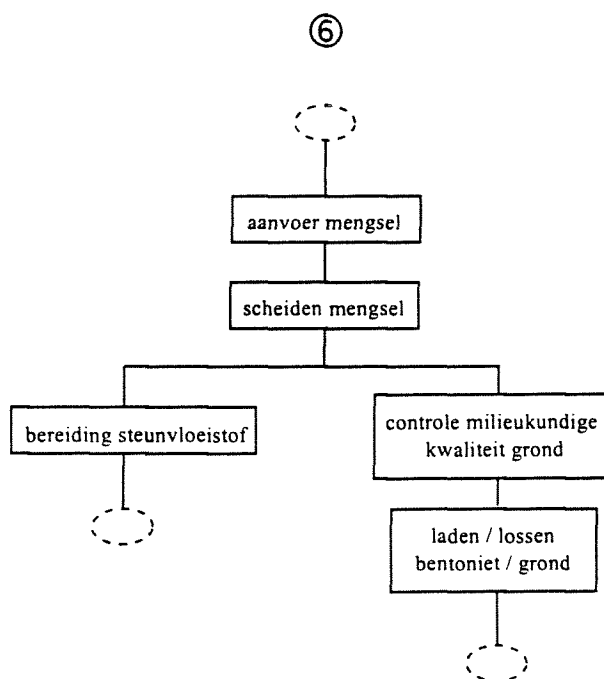
De toe te passen steundruk wordt bepaald door de aanwezige grondsoort. Men kan de steundruk reguleren door de voortgangssnelheid van de tbm, de hoeveelheid aangevoerde steunvloeistof, de luchtdruk en de hoeveelheid afgevoerd mengsel.



ontgravingsproces

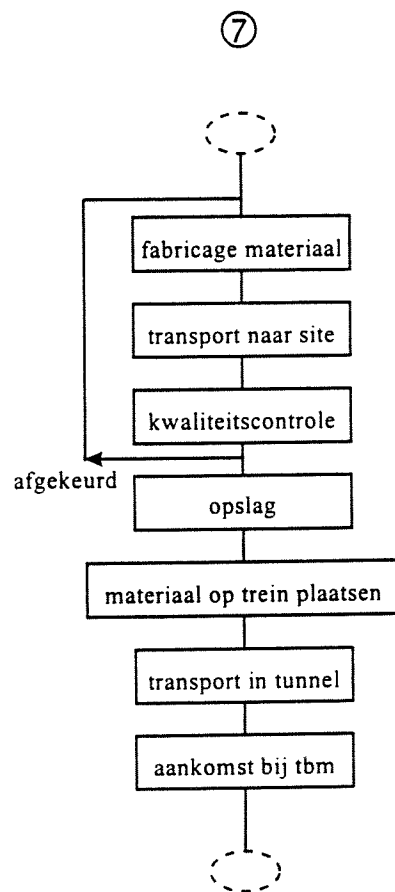


stappenproces scheiding



De mate van scheiding is afhankelijk van de ontgraven grond. Bij het hydroschild moet het bentoniet worden gescheiden van de grond in de scheidingsinstallatie, zodat het weer kan worden hergebruikt. Bij het EPB-schild zal alleen in geval er met conditionering gewerkt wordt een scheidingsproces plaats hebben.

logistiek proces [38]



Voor beide boormethoden is dit logistiek proces van toepassing.

Bijlage III: Schema globale risicoanalyse

ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	POTENTIËLE MAATREGELEN
Ontgraving	Verkleving ter plaatse van as, instroom grond langs schild vanaf niet gewilde plaats	- grond voor graafwiel wordt verdrongen vervorming van grond ter plekke van de verplaatste grond ⇒ gronddeformaties	- TBM stopzetten en aanpassen ⇒ waterjets, beitels aanpassen Hydro: - bentoniet in graafwiel spuiten EPB: - schuim toepassen
	grondslag harder dan aangenomen	- slijtage beitels - lagere voortgangssnelheid ⇒ vertraging - slijtage rad	- beitels aanpassen/vervangen bij voorkeur bij aankomst station
	- meer grove fractie - grovere fracties dan aangegeven volgens grondonderzoek	Hydro: - problemen waterafsluitend maken grond, bentoniet "loopt" weg EPB: - Problemen waterdicht maken grond m.b.v. schuim	Hydro: - toevoegingen aan bentoniet als CMC en zand EPB: - langere avegaar - schuim/additieven-samenstelling veranderen - bij langdurige stilstand bentoniet toepassen voor stabilisatie - tracé wijzigen / andere boordiepte
	- meer fijne fractie - fijnere fracties	Hydro: - problemen met scheiding grond/bentoniet - toename bentonietverbruik	Hydro: - meer verse bentoniet toevoegen - extra scheidingstrap opnemen
	grondslag uniformer dan verwacht volgens grondonderzoek	EPB: - problemen met verkrijgen goede vervormbare brij	EPB: conditioneren met: - fijn materiaal - bentoniet - schuim

ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	POTENTIËLE MAATREGELEN
	aanwezigheid van iogene stoffen, die van invloed zijn op de conditionering - bentoniet - schuim (op basis van grondonderzoek niet aanwezig)	Hydro: - vlokken van de bentoniet ⇒ lokale instabiliteit EPB: - afname standtijd van het schuim ⇒	Hydro: - toevoegen ander soort bentoniet EPB: - veranderen verhouding schuim/polymeer - ander type schuim/polymeer
	onnauwkeurig controle- en regelsysteem	afwijkingen drukmeters en volumecontrole ⇒ zettingen/ boorfrontinstabiliteit	- predicties opstellen n.a.v. eerdere gegevens. - vooraf opstellen systeem voor juiste uitleg meetwaarden Hydro: - inbouwen dichtheidsmeter (alleen op lange afstanden) EPB - inbouwen plunjepomp
	problemen bij het passeren van een grenslaag	- mogelijke instabiliteit boorfront - grotere zettingen	- protocol, draaiboek Hydro: - luchtkamer vangt fluctuaties op EPB: - schuim vangt fluctuaties op
	meer grond ontgraven dan met groutinjectie kan worden gecompenseerd	- mogelijke zettingen - mengsel kan niet worden verwerkt	- (extra) controle op volume afvoer - verhogen steundruk - zorgen voor ruime verwerkingscapaciteit
	grond ter plaatse van as van graafwiel draait mee	- grond voor graafwiel wordt verdrongen ⇒ gronddeformaties	aanbrengen van een centrum snijder (uitstekende vincontractie)
	niet voorzien moerasgas op basis van grondonderzoek	- opeenhoping gas voor tunnel ⇒ lokale instabiliteit boorfront. In uiterste geval kans ontploffen gas of een blow-out	- monitoring t.b.v. gasdetectie

ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	POTENTIËLE MAATREGELEN
Transport	verstopping van leidingen, schroeftransporteur door obstakels	Hydro: - stilstand TBM⇒ vertraging EPB: - stilstand TBM⇒ vertraging	inlaatrooster controleren Hydro: - voldoende debiet creëren EPB: - steenvang inbouwen in transporteur
	te hoge dichtheid in de leidingen	Hydro: - leiding verstopt - pomp verstopt	Hydro: - controle van dichtheid - spoelen van de leidingen
	propvorming in de schroeftransporteur t.g.v. boogwerking	EPB: - afvoer stagneert	EPB: - injecteren van conditioneringsmiddel aan mond/ in schroeftransporteur
	verlies van grond in tunnel van lopende band	- extra onderhoud - rommel in tunnel⇒ grotere kans op ongelukken	- regelmatig schoonmaken - groter band toepassen/ schotten aanbrengen langs band
Scheiding	te veel fijne deeltjes aanwezig	Hydro: - vervuiling bentoniet met fijne deeltjes⇒ hoger bentonietverbruik	Hydro: - inbouwen extra scheidingstrap, bijvoorbeeld fijnere cyclonen, centrifuge - voldoende voorraad bentoniet aanwezig
Afvoer/ verwerking	grond niet schoon genoeg Hydro: - te veel bentoniet EPB: - schuim niet biologisch afbreekbaar	- hogere stortkosten - reiniging van de grond (nog nader uit te zoeken: mate van scheiding en hergebruikseisen)	Hydro: - inbouwen extra scheidingstrap EPB: - biologisch afbreekbaar schuim kiezen - beluchting toepassen in depot - schoonspoelen grond, vervolgens indampen water
	afvoercapaciteit bovengronds te klein	- vertraging	- aanleggen depot - ruime afvoercapaciteit inplannen

ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	POTENTIËLE MAATREGELEN
Obstakels	grote obstakels - zwerfkeien - palen/ (oude) funderingen - oude dukdalven - bomen	- TBM loopt vast⇒ stilstand - eventueel schade aan schild - overmatige slijtage⇒ aanvullend onderhoud - absenkung: obstakel is moeilijk te verwijderen - ontsnapping steunvloeistof	- vooraf obstakels detecteren en verwijderen indien nodig - ter plekke verkleinen obstakel door kapotvriezen, laser, verpulvering door een lans vanuit de machine - bij gevaar voor blow-out: - injectielichaam - bevriezen
	onbekend gangenstelsel in ondergrond door: - oude boor-/ sondeergaten - oude zinksleuven -	- ontsnappen steundruk/ steunvloeistof - instabiliteit boorfront	- bij klein verlies doorboren - stopzetten machine en gat dichtmaken
Onderhoud en Reparatie	niet gepland onderhoud/reparatie	- stilstand, extra kosten - herverdeling grondspanningen	- verwisselen van onderdelen bij voorkeur bij aankomst station
Boorgang	storingen in: - stroomvoorziening - groutsysteem - scheidingsinstallatie -	- stilstand - gevaar voor personeel	- noodaggregaat voor stroomvoorziening - personeel uitsluizen
	meer voortgangsvermogen benodigd dan berekend op basis van de grondslag	- stilstand⇒ zettingen	- verminderen wrijving schildmantel-grond door injectie smeermiddel - verminderen schildwrijving-grond door injectie smeermiddel - (voortijdig) installeren van voldoende vermogen
	te grote zettingen in de omgeving door: - problemen met steundruk - calamiteiten - storingen - problemen met grouting	kans op schade aan gebouwen, funderingen, wegen, kabels en leidingen	- goede procesbeheersing (zie storingen/ onregelmatigheden in boorproces) - zettingsmetingen aan maaiveld

ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	POTENTIËLE MAATREGELEN
Boorfront	uitvallen luchtdruk tijdens absenkung Hydro: luchtkamer druk valt weg	afname steundruk boorfront ⇒ zettingen	- veiligheidsklep inbouwen (principe van autogordelbescherming) - machine controle vooraf
	blow-out	- instorten boorfront ⇒ zettingen grond - gevaar voor personeel - vertraging	- luchtverbruik meten - opstellen noodscenario - grondverbetering toepassen - ondergronds "station" aanleggen d.m.v. injectie, grouten of bevriezen
	onregelmatigheden in boorproces/ variatie in steundruk	- ontspanning van de grond ⇒ zettingen (cave-in) - opspannen van de grond ⇒ mogelijke blow-out	Hydro - drukschommelingen (gedeeltelijk) op te vangen met luchtkamer EPB: - drukschommelingen (gedeeltelijk) op te vangen met verend vermogen schuim
	onregelmatigheden in boorproces/ langdurige stilstand	Hydro: - toename luchtdoorlatendheid filterkoek ⇒ toename kans op blow-out - toename gronddeel dat met bentoniet is verzadigd ⇒ effectieve boorfrontondersteuning neemt af ⇒ toename kans op lokale instabiliteit EPB: - afname waterverdringende werking ⇒ water stroomt door avegaar de tunnel binnen	Hydro: - aanpassen samenstelling bentoniet - additieven toevoegen die luchtdoorlatendheid verminderen. (polymeren) - opnieuw vullen graafkamer met bentoniet ⇒ hierna weer leegpompen graafkamer EPB: - schuimproeven doen ⇒ aanpassen samenstelling schuim-additieven - gebruik van bentoniet bij langdurige stilstand - gebruik extra (lange) avegaar
	Hydro: opbouw bentoniet-membraan niet voldoende	Hydro: - druk wordt niet overgedragen	Hydro: - aanpassen boorsnelheid - aanpassen samenstelling bentoniet

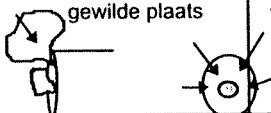
ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	POTENTIËLE MAATREGELEN
	toename van waterspanningen voor boorfront	mogelijke invloed op draagkracht funderingspalen ⇒ zakking fundering	<ul style="list-style-type: none"> - verminderen van de boorsnelheid - verminderen steundruk - aanpassen dichtheid/ samenstelling steunvloeistof
	boorfront bij absenkung lokaal instabiel (kleine glijcirkel)	<ul style="list-style-type: none"> - snijwiel kan niet meer roteren - water en grond stromen mengkamer binnen ⇒ zettingen 	<ul style="list-style-type: none"> - snijwiel terugtrekken en draaien, gelijktijdig afpompen grond ⇒ boorfront opnieuw afpleisteren met (aangepaste) bentoniet - inzetten van steunplaten (mechanische ondersteuning) <p>hydro:</p> <ul style="list-style-type: none"> - aanpassen suspensie <p>EPB:</p> <ul style="list-style-type: none"> - snelheid avegaar aanpassen aan snijsnelheid
	boorfront bij absenkung globaal instabiel (grote glijcirkel)	<ul style="list-style-type: none"> - luchtdrukverlies te groot ⇒ water en grond stromen mengkamer binnen ⇒ zettingen - snijwiel kan niet meer roteren 	<ul style="list-style-type: none"> - grondverbetering - verder als bij lokale instabiliteit

Bijlage IV: Enquête

ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	HYDRO			EPB			OPMERKINGEN	
			P (w<10)*	P (10<w<20)	P (w>20)	P (w<10)	P (10<w<20)	P (w>20)		
Ontgraving	①	- meer grove fractie - grovere fracties dan aangegeven volgens grondonderzoek	Hydro: - problemen waterafsluitend maken grond, bentoniet "loopt" weg	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----
			EPB: - Problemen waterdicht maken grond m.b.v. schuim	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----
				3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----
				4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----
			5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----	
			6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----	
	①	grondslag uniformer dan verwacht volgens grondonderzoek	EPB: - problemen met verkrijgen goede vervormbare brij	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----	
				2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----	
				3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----	
				4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----	
				5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----	
				6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----	
	①	aanwezigheid van onverwachte* (iogene) stoffen, die van invloed zijn op de conditionering - bentoniet - schuim (Hydro/geconditioneerd EPB) *(op basis van grondonderzoek niet aanwezig)	Hydro: - vlokken van de bentoniet ⇒ lokale instabiliteit	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----	
			EPB: - afname standtijd van het schuim ⇒ lokale instabiliteit	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----	
				3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----	
				4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----	
				5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----	
				6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----	
	②	onnauwkeurig controle- en regelsysteem	afwijkingen drukmeters en volumecontrole ⇒ zettingen/ boorfrontinstabiliteit	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----	
				2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----	
				3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----	
				4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----	
				5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----	
				6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----	

* Gegeven getalswaarden voor w in [mm]

ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	HYDRO			EPB			OPMERKINGEN
			P (w<10)	P (10<w<20)	P (w>20)	P (w<10)	P (10<w<20)	P (w>20)	
Ontgraving	problemen bij het passeren van een grenslaag	- mogelijke instabiliteit boorfront - grotere zettingen	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----
	③		2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----
			3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----
			4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----
			5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----	
			6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----	
	meer grond ontgraven dan met groutinjectie kan worden gecompenseerd	- mogelijke zettingen - mengsel kan niet worden verwerkt	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----
④			2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----	
			3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----	
			4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----	
			5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----	
			6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----	
	niet voorzien moerasgas op basis van grondonderzoek	- opeenhoping gas voor/in tunnel ⇒ lokale instabiliteit boorfront. In uiterste geval kans ontploffen gas of een blow-out	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----
⑤			2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----	
			3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----	
			4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----	
			5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----	
			6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----	
	Verkleving ter plaatse van as, instroom grond langs schild vanaf niet gewilde plaats	- grond voor graafwiel wordt verdrongen vervorming van grond ter plekke van de verplaatste grond ⇒ gronddeformaties	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----
⑥			2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----	
			3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----	
			4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----	
			5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----	
			6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----	



ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	HYDRO			EPB			OPMERKINGEN
			P (w<10)	P (10<w<20)	P (w>20)	P (w<10)	P (10<w<20)	P (w>20)	
Obstakels ⑦	grote obstakels - zwerfkeien - palen/ (oude) funderingen - oude dukdalven - bomen	- TBM loopt vast⇒ stilstand	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----
		- eventueel schade aan schild	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----
		- overmatige slijtage⇒ aanvullend onderhoud	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----
		- absenkung: (obstakel is moeilijk te verwijderen)	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----
		- ontsnapping steunvloeistof	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----
			6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----
⑤	onbekend gangenstelsel in ondergrond door: - oude boor-/ sondeergaten - oude zinksleuven -	- ontsnappen steundruk/ steunvloeistof	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----
		- instabiliteit boorfront	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----
			3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----
			4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----
			5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----
			6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----

ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	HYDRO			EPB			OPMERKINGEN
			P (w<10)	P (10<w<20)	P (w>20)	P (w<10)	P (10<w<20)	P (w>20)	
Boorfront	uitvallen luchtdruk tijdens absenkung	afname steundruk boorfront ⇒ zettingen	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	-----
	⑧ Hydro:luchtkamer druk valt weg		2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	-----
⑦ + ⑧	onregelmatigheden in boorproces/ variatie in steundruk	- ontspanning van de grond ⇒ zettingen (cave-in) - opspanning van de grond ⇒ mogelijke blow-out	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	-----
			4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	-----
⑩	toename van waterspanningen voor boorfront	mogelijke invloed op draagkracht funderingspalen ⇒ zakking fundering	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	-----
			6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	-----

ASPECT	AFWIJKING	GEVOLGEN	HYDRO			EPB			OPMERKINGEN
			P (w<10)	P (10<w<20)	P (w>20)	P (w<10)	P (10<w<20)	P (w>20)	
Stilstand ⊙	niet gepland onderhoud/ reparatie	- stilstand, extra kosten - herverdeling grondspanningen	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	----- ----- -----
⊙	meer voortgangsvormogen benodigd dan berekend op basis van de grondslag	stilstand⇒ zettingen	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	----- ----- -----
⊙	onregelmatigheden in boorproces/ langdurige stilstand	Hydro: - toename luchtdoorlatendheid filterkoek ⇒ toename kans op blow-out - toename gronddeel dat met bentoniet is verzadigd ⇒ effectieve boorfrontonder- steuning neemt af ⇒ lokale instabiliteit EPB: - afname waterverdringende werking⇒ water stroomt door avegaar de tunnel binnen	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/>	

Bijlage V: Resultaten enquête

Resultaat middeling van kansen:

aspect	hydro	1-kans	epb	1-kans
grove fractie	0,00055	0,99945	0,001	0,999
grondslag uniform	0	1	0,255	0,745
iogene stoffen	0,0001	0,9999	0,001	0,999
controle	0,34	0,66	0,67	0,33
grenslaag	0,07	0,93	0,06667	0,93333
meer grond	0,004	0,996	0,034	0,966
moerasgas	0,0004	0,9996	0,0004	0,9996
verkleving	0,0667	0,9333	0,1	0,9
grote obstakels	0,001	0,999	0,007	0,993
perforatie	0,04	0,96	0,0007	0,9993
uitvallen luchtdruk	0,055	0,945	0,005	0,995
onregelmatigheden	0,37	0,63	0,37	0,63
toename	0,06667	0,93333	0,06667	0,93333
onderhoud	0,0007	0,9993	0,0007	0,9993
meer voortgang	0,0034	0,9966	0,004	0,996
onregelm. langd	0,0037	0,9963	0,0067	0,9933
storingen	0,0055	0,9945	0,00505	0,99495
	1,02772	0,29971423	1,59389	0,113648

Resultaat middeling van exponenten:

aspect	hydro	1-kans	epb	1-kans
grove fractie	0,000316	0,999684	0,001	0,999
grondslag uniform	0	1	0,070795	0,929205
iogene stoffen	0,0001	0,9999	0,001	0,999
controle	0,046774	0,953226	0,215278	0,784722
grenslaag	0,046774	0,953226	0,004677	0,995323
meer grond	0,002153	0,997847	0,004677	0,995323
moerasgas	0,000215	0,999785	0,000215	0,999785
verkleving	0,01	0,99	0,1	0,9
grote obstakels	0,001	0,999	0,004677	0,995323
onbekend gangenstelsel	0,02138	0,97862	0,000468	0,999532
uitvallen luchtdruk	0,031623	0,968377	0,0001	0,9999
onregelmatigheden	0,1	0,9	0,1	0,9
toename	0,004677	0,995323	0,004677	0,995323
onderhoud	0,000468	0,999532	0,000468	0,999532
meer voortgang	0,000468	0,999532	0,002153	0,997847
onregelm. langd	0,001	0,999	0,002153	0,997847
storingen	0,003162	0,996838	0,001	0,999
		0,756888		0,574711