

HET BOREN VAN TUNNELS  
IN NEDERLAND:

*“Het bepalen van de besturingsparameters voor een  
Hydroschild tunnelboormachine”*

A.J. van Kessel

Februari 1995

## Het boren van tunnels in Nederland.

Het bepalen van de besturingsparameters voor een Hydroschild tunnelboormachine.

A.J. van Kessel

Afstudeercommissie:

prof. drs. ir. J.K. Vrijling  
prof. ir. A.F. van Tol  
prof. ir. W.J. Vlasblom  
ir. H.A. Greve

Februari 1996

TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek  
Stevinweg 1  
2600 GA Delft

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

# VOORWOORD

Dit rapport is een onderdeel van mijn afstuderen aan de Technische Universiteit te Delft, faculteit der Civiele Techniek. Het onderwerp volgt uit een gesprek met één van de leden van mijn afstudeercommissie, te weten prof. drs. ir. J.K. Vrijling, die tevens zitting heeft in de klankbordgroep "Praktijkonderzoek Boortunnels". De klankbordgroep, welke uitsluitend bestaat uit medewerkers van de Technische Universiteit Delft, geeft commentaar op de rapporten die worden opgesteld door de Werkgroep Praktijkonderzoek Boortunnels (K 100). Deze Werkgroep valt onder het Centrum Ondergronds Bouwen (COB), die als voornaamste doel heeft een structuur aan te brengen waarin alle disciplines van het ondergronds bouwen toe behoren, om zo de innovatie op dit gebied op een hoog peil te brengen c.q. houden. Het eerste thema binnen het COB is "Boren in zachte grond".

Tot heden heeft de werkgroep K 100 in dit kader twee rapporten opgesteld, het Instrumentatie en meetplan en het Predictieplan voor de praktijkprojecten boortunnels, de Tweede Heinenoordtunnel en de Botlekspoortunnel. Eén van de reacties van de klankbordgroep op deze rapporten was, dat er geen overzicht was van de variabelen tijdens het boorproces, zoals de vijzeldrukken, de boorvloeistofdruk, vermogen op het graafwiel etc. De vraag was of deze variabelen niet met elkaar in verband staan en zo ja ontwikkel dan een model dat dit weergeeft. Met deze vraag van de klankbordgroep ben ik aan de slag gegaan door te beginnen een overzicht te maken van de belastingen die op de boormachine werken om vervolgens de variabelen zoals eerder beschreven te kunnen bepalen en de relaties tot elkaar. Een soortgelijke studie wordt verricht door het ingenieursburo MTI Holland, lid van de IHC Holland groep. Door bij MTI als afstudeerder in dienst te treden, heb ik daardoor de kans gekregen begeleiding te krijgen die op mijn afstudeeronderwerp goed aansluit.

Omdat in (slappe) grondsoorten zoals in Nederland nog geen tunnels geboord zijn, is op dit gebied nog weinig literatuur beschikbaar. Daarom is gebruik gemaakt van literatuur op gebieden die veel lijken op de processen die zich bij het tunnelboren voordoen, zoals het baggeren en de aanleg van diep- en damwanden. In dit rapport zullen daarom veel bekende rekenmethoden in een aangepaste vorm verwerkt worden.

Zo is voor het snijproces van grond gebruik gemaakt van de snijmodellen van dr. ir. S.A. Miedema, die verbonden is aan de faculteit Werktuigbouwkunde aan de TU Delft. Vele goede suggesties zijn verkregen uit meerdere gesprekken met de heer Miedema, aan wie ik hiervoor veel dank ben verschuldigd.

Ook veel informatie is verkregen van het Projectbureau Boortunnels te Zoetermeer, met name drs. W. van Schelt, wie ik bij deze wil bedanken voor zijn medewerking.

In het kader van mijn afstudeerproject ben ik na mijn literatuur studie, als afstudeerder werkzaam geweest bij MTI Holland te Kinderdijk. Veel steun en begeleiding heb ik ondervonden van de medewerkers van MTI, in het bijzonder van mijn begeleiders ir. H.A. Greve en ir. M.W.P. van Lange, welke ik bij deze hiervoor wil bedanken.

Omdat mijn afstudeeronderwerp diverse technische disciplines raakt bestaat mijn afstudeercommissie uit personen van de faculteiten Civiele Techniek en Werktuigbouwkunde, alsmede uit het bedrijfsleven te weten MTI Holland. Deze personen zijn:

- prof. drs. ir. J.K. Vrijling van de faculteit Civiele Techniek aan de TU Delft.
- prof. ir. A.F. van Tol van de faculteit Civiele Techniek aan de TU Delft.
- prof. ir. W.J. Vlasblom van de faculteit Werktuigbouwkunde aan de TU Delft.
- ir. H.A. Greve van MTI Holland te Kinderdijk.

Vele goede ideeën zijn ontstaan uit gezamenlijke en individuele gesprekken met leden van mijn afstudeercommissie. Ik wil de genoemde commissie voor hun inzet en positieve bijdrage aan mijn afstudeerproject bij deze van harte dank zeggen.

Delft, 1995.

A.J. van Kessel

# INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	2
INHOUDSOPGAVE	4
SAMENVATTING	7
INLEIDING	8
1. HET BOREN VAN TUNNELS IN NEDERLAND	10
1.1 Algemeen	10
1.2 Tunnelbouw methoden	10
1.2.1 Vloeistofschild	11
1.2.2 Gronddrukbalansschild	13
1.2.3 Mixschild	15
1.2.4 De Industriële Tunnelbouw Methode	15
1.3 Toekomstige projecten in Nederland	16
2. DE HEINENOORDTUNNEL	18
2.1 Algemeen	18
2.2 De tunnelboormachine	18
2.3 Geotechnische parameters	19
2.3.1 Grondprofielen	19
2.3.2 Stijghoogte van het grondwater	20
3. BELASTINGEN OP DE TBM	21
3.1 Overzicht van de belastingen op de TBM	21
3.2 Beschrijving van de belastingen	21
3.2.1 Grondbelastingen op het boorfront	22
3.2.2 De vorming van een grondprop voor de as van het graafwiel	24
3.2.3 Belastingen op de mantel	25
3.3 Belastingen van de bovenliggende lagen	27
4. HET SNIJDEN VAN GROND	30
4.1 Het snijden van zand	30
4.1.1 Basistheorie voor het snijden van zand	30
4.1.2 Snijtheorie voor het ontgraven van een met bentoniet ondersteund graaffront	35
4.1.3 Vereenvoudiging snijtheorie graaffront	38
4.1.4 Snijtheorie voor grotere meshoeken	39
4.1.5 Snijkrachten volgens passief bezwijken	40
4.1.6 Evaluatie van de methoden om de snijkrachten te bepalen	42
4.2 Het snijden van klei	42
4.3 Het snijden van zandige klei of kleig zand	45
5. BEREKENING VAN DE VIJZELKRACHTEN	46
5.1 Inleiding	46
5.2 Steundruk	46

---

5.2.1 Ondergrens van de steundruk	47
5.2.2 Bovengrens van de steundruk	50
5.2.3 De horizontale grondspanning ?	51
5.3 Het verdringen van de grond voor de as van het graafwiel	53
5.4 Mantelwrijving	53
5.5 Tangentiële vijzelkracht	54
5.6 Snijkrachten	55
5.7 Overige krachten	55
5.7.1 Meeslepen van instalaties	55
5.7.2 Zwaartekracht	56
<b>6. BEREKENING AANDRIJFKOPPEL GRAAFWIEL</b>	<b>58</b>
6.1 Inleiding	58
6.2 Snijkrachten	58
6.2.1 Beitels	58
6.2.2 Overcutters	60
6.3 Het meedraaien van grond voor de as van het graafwiel	61
6.4 Stromingsweerstand graafwiel	61
<b>7. RESULTATEN VAN DE BEREKENINGEN</b>	<b>63</b>
7.1 Overzicht van de aannamen	63
7.2 Overzicht van de resultaten	63
7.2.1 Profiel 1	63
7.2.2 Profiel 2	67
7.2.3 Profiel 3	70
7.3 Evaluatie van de resultaten	73
7.3.1 Algemeen	73
7.3.2 Resultaten vergelijken met de krommen van Krause	74
<b>8. ZOEKEN NAAR EEN SIGARENDOOSMODEL</b>	<b>76</b>
8.1 Inleiding	76
8.2 Uitkomsten vergelijken met eenvoudige rekenmethoden	76
8.2.1 Inleiding	76
8.2.2 De steundruk	76
8.2.3 De mantelwrijving	78
8.2.4 De grondprop	79
8.2.5 De snijkrachten	79
8.3 Invloed van het veranderen van de grondparameters	80
8.3.1 Inleiding	80
8.3.2 Invloed op de steundruk	80
8.3.3 Invloed op de snijkrachten	81
8.4 Ontwerp-formules	83
8.4.1 Inleiding	83
8.4.2 Vijzelkrachten	83
8.4.3 Koppel	85
<b>9. HET METEN EN REGELLEN VAN DE BESTURINGSPARAMETERS</b>	<b>87</b>
9.1 Algemeen	87
9.2 Meten en regelen van de vijzelkrachten	88
9.3 Meten en regelen van het koppel	89

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	93
LITERATUURLIJST	96
SYMBOLENLIJST	98
BIJLAGEN	101

## SAMENVATTING

Voor het boren van tunnels in Nederland komen verschillende technieken in aanmerking, zoals het vloeistof- en het gronddrukbalansschild. De eerste tunnel die in Nederland geboord zal worden is de Tweede Heinenoordtunnel en deze zal tevens als onderzoeksproject dienen. Omdat het grootste gedeelte van het te boren traject uit zandige grondsoorten bestaat is gekozen voor de Hydroschild tunnelboormachine. Dit is een stalen cylinder die aan de voorkant de grond ontgraaft en tegelijkertijd de grond bij het boorfront met een vloeistof (bentonietsuspensie) ondersteunt.

Omdat een dergelijk tunnelboorproject in Nederland nog niet is uitgevoerd, is op het gebied van het boren van tunnels in Nederland weinig literatuur beschikbaar, waarin methoden beschreven staan waarmee de besturingsparameters van de tunnelboormachine (TBM) bepaald kunnen worden. Deze besturingsparameters zijn o.a.: de steundruk van de vloeistof om het boorfront te ondersteunen, de krachten om de machine voort te kunnen bewegen en het koppel dat nodig is om de grond te ontgraven.

In dit rapport is naar oplossingen gezocht om de besturingsparameters te bepalen. Gebruik is gemaakt van theoriën die toegepast worden bij andere vakgebieden, zoals het baggeren, diepwanden en grondkerende constructies. Deze bestaande theoriën zijn aangepast aan het tunnelboorproces. Voor drie grondprofielen op het tracé van de Heinenoordtunnel zijn berekeningen uitgevoerd. Tijdens de aanleg van de tunnel zal door metingen moeten blijken of de in dit rapport opgestelde rekenmethoden juist zijn.

Uit de berekeningen in dit rapport komt het volgende naar voren:

- de steundruk van de vloeistof, die nodig is om het boorfront te ondersteunen, is voornamelijk afhankelijk van de stijghoogte van het poriënwater in de grond waarin geboort wordt.
- de krachten die nodig zijn om de machine voort te bewegen, zijn voor het grootste deel afhankelijk zijn van de steundruk van de vloeistof.
- het koppel dat nodig is om de grond te ontgraven, is voornamelijk afhankelijk van de hoek van inwendige wrijving van de grond die ontgraven wordt.

Uit controle berekeningen lijkt dat de orde van grootte van de uitkomsten in dit rapport goed zijn. De berekeningen zullen echter pas getoetst kunnen worden als de tunnel geboord wordt. Tijdens het boren zullen talrijke metingen verricht worden, die gebruikt kunnen worden om de resultaten in dit rapport te toetsen. Afhankelijk van de grootte van de afwijkingen tussen de predicties (in dit rapport) en de metingen, zal aanvullend onderzoek nodig zijn.



# INLEIDING

Tot heden zijn in Nederland geen geboorde tunnels t.b.v. het weg- of treinverkeer aangelegd. De meeste tunnels in Nederland zijn afzinktunnels. Aangezien het afzinken van tunnels niet overall (economisch) mogelijk is, zal naar andere oplossingen gezocht moeten worden. Een oplossing die in onze buurlanden al is toegepast is het boren van tunnels. Aangezien deze techniek nieuw is in Nederland is een Impulsprogramma opgesteld om kennis en ervaring op dit gebied te vergaren (Impulsprogramma Kennisinfrastructuur Ondergronds Bouwen). De kern van de kennisinfrastructuur vormt het Centrum Ondergronds Bouwen (COB), dat onderzoek en ontwikkeling op het gebied van ondergronds bouwen initieert en coördineert. Zo is de CUR/COB-uitvoeringscommissie K-100 ontstaan. Het onderzoeksprogramma van de commissie K 100 concentreert zich op twee te boren tunnels namelijk de Tweede Heinenoordtunnel en de Botlekspoortunnel. Het onderzoek omvat globaal de volgende fasen:

- verkennen
- voorspellen
- monitoren
- evalueren

Door de commissie K 100 zijn in dit kader de volgende twee rapporten opgesteld; het Instrumentatie- en meetplan en het Predictieplan. In dit rapport zal onderzocht worden welke belastingen op een tunnelboormachine (TBM) werken en wat hier de gevolgen zijn voor besturingsparameters van de machine. Deze besturingsparameters zijn o.a.

- de steundruk van de steunvloeistof in de mengkamer van de TBM.
- de vieldrukken voor het voortbewegen en sturen van het schild.
- het aandrijfkoppel (c.q. vermogen) voor het ontgraven van de grond.

Van alle te boren tunnels in Nederland, zal de Tweede Heinenoordtunnel als eerste worden uitgevoerd en is daarom dan ook als case-study voor dit rapport gebruikt. Bij de Heinenoordtunnel is gekozen voor de vloeistofschild methode. Voor het boren van tunnels in met water verzadigde slappe grond kunnen diverse methoden worden toegepast. De methoden die hiervoor in aanmerking komen zullen in hoofdstuk 1 behandeld worden.

De technische gegevens van de toe te passen TBM alsmede de geotechnische informatie op de boorlocatie zijn gebruikt voor de berekeningen in dit rapport. Deze gegevens zijn in hoofdstuk 2 nader beschreven.

In hoofdstuk 3 is een overzicht gegeven van alle belastingen welke de grond uitoefent op de TBM, zoals de belastingen op het boorfront en die op de mantel van de TBM.

Voor het verkrijgen van een goed inzicht in de krachten die nodig zijn bij het boren van tunnels, is het noodzakelijk het ontgraven van grond door middel van beitels nader te onderzoeken. In hoofdstuk 4 zal hier nader op worden ingegaan. In dit hoofdstuk worden verschillende snijmodellen voor diverse grondsoorten behandeld, waaruit de krachten die nodig zijn voor het snijden van grond kunnen worden bepaald.

In de hoofdstukken 5 en 6 wordt specifiek ingegaan op respectievelijk de benodigde vieldkrachten en het aandrijfkoppel welke nodig zijn voor het boorproces van de TBM.

De in hoofdstuk 5 en 6 verkregen informatie is aangewend om met behulp van het computerprogramma 'Mathcad' de benodigde parameters voor de diverse grondprofielen te berekenen. De resultaten van deze berekeningen zijn in hoofdstuk 7 weergegeven.

Om de resultaten verkregen in hoofdstuk 7 te toetsen, is in hoofdstuk 8 met bekende eenvoudige relaties, getracht de orde van grootte van de diverse parameters te controleren. Voorts is globaal de invloed van de diverse parameters op het boorproces bepaald, door deze te laten variëren. Aan de hand van de resultaten is getracht ontwerp-formules op te stellen voor de berekening van de vijzelkrachten en het aandrijfkoppel van de TBM.

Ten einde de ontwerp-formules voor de berekeningen van de vijzelkrachten en het aandrijfkoppel te toetsen, wordt in hoofdstuk 9 een voorstel gedaan om tijdens het boren van de Heinenoordtunnel een aantal metingen te verrichten. In dit hoofdstuk wordt tevens een predictie gegeven hoe de parameters zullen variëren.

# 1. HET BOREN VAN TUNNELS IN NEDERLAND

## 1.1 Algemeen

Tot nu toe zijn grote (ondergrondse) infrastructurele voorzieningen (rail- en wegverbindingen) op de traditionele methoden aangelegd, dit zijn met name de cut en cover en de afzink methode. De laatste tijd komen geboorde tunnels steeds meer in de belangstelling in Nederland. Hier zijn enkele redenen voor aan te wijzen. Ten eerste lopen de bouwkosten van de traditionele bouwmethoden op, o.a. doordat de plaatsen, waar het afzinken van tunnels ideaal is, steeds beperkter worden.

Ten tweede worden er steeds striktere milieu eisen gesteld. Een geboorde tunnel zal de bodem minder roeren.

Als volgende oorzaak kan genoemd worden dat men zowel de onder- als de bovengrondse infrastructuur minder wil storen. In Amsterdam bijvoorbeeld wil men niet meer dat er vanaf het maaiveld wordt gebouwd, dit omdat dit teveel hinder geeft.

Als laatste oorzaak kan genoemd worden, dat het idee van het boren van tunnels bij de mensen begint te leven. Zowel bij de lagere overheden als bij de burger begint men zich te realiseren dat het boren van tunnels een reëel alternatief is.

In Nederland worden er al tunnels geboord, dit zijn tunnels met kleine diameters (micro tunnelling) voornamelijk t.b.v. leidingen. Denk hier aan diameters tot ca. 3,5 meter. Tot deze sleufloze technieken behoren o.a.: doorpersen en horizontaal gestuurd boren. Op deze manier is het kruisen van allerlei obstakels geen probleem. Bij obstakels kan men denken aan: (snel)wegen, vaarten, spoorwegen, vervuilde gronden, dijken etc. Ook kan het boren van leidingen een goedkoper alternatief voor de traditionele methode met een sleuf.

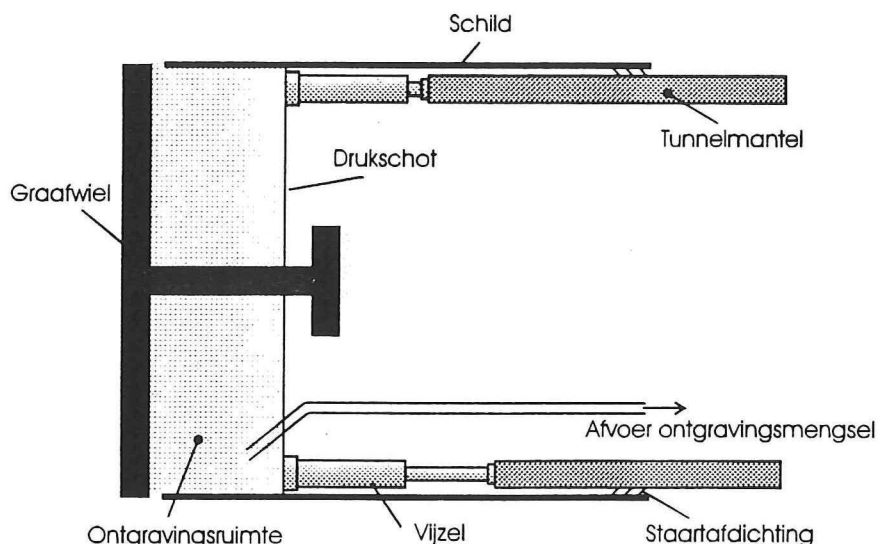
Deze technieken komen niet in aanmerking voor grote infrastructurele projecten. Alhoewel de doorpersmethode theoretisch grotere diameters aankan, zal deze toch plaats moeten maken voor andere methoden. Bij de doorpersmethode worden buizen vanuit de startschacht met vijzels vooruitgeduwd, de tunnel wordt van achteruit gebouwd. Het is ook mogelijk om tussenpersstations tussen de buizen te plaatsen. Omdat de tunnel van achteruit gebouwd wordt, zullen bij grotere diameters de vijzelkrachten erg groot moeten worden of zullen meer tussenpersstations gebruikt moeten worden.

Het boren van tunnels in Nederland t.b.v. weg- en railverkeer, zal moeten gebeuren m.b.v. moderne schildsystemen. Deze moderne schildsystemen kunnen de zettingen aan het maaiveld minimaliseren. Deze moderne schildsystemen hebben, elders in de wereld, bewezen in zachte grondsoorten (grind, zand, silt en klei) in grondwater, de grond aan het ontgravingsfront optimaal te kunnen ondersteunen.

## 1.2 Tunnelbouw methoden

Het boren van een tunnel met de schildtechniek zal tussen twee schachten plaatsvinden: begin- en eindpunt. De tunnelboormachine (TBM) zelf bestaat uit een stalen cylinder (het schild), die iets groter in diameter is dan de te maken tunnel. Aan de voorkant van het schild wordt de grond ontgraven en deze wordt naar achter via de al aangelegde tunnel afgevoerd naar het maaiveld. Aan de achterzijde van het schild wordt de tunnelmantel (lining) samengesteld. Dit kan op drie manieren gebeuren:

- De tunnelmantel kan opgebouwd zijn uit ringen die weer uit segmenten bestaat. Dit zijn prefab segmenten, die meestal van beton zijn, maar in moeilijke situaties komen ook gietijzeren segmenten voor.
- Een opbouw m.b.v. geëxtrudeerd staalvezelbeton, dus een ter plaatse (in-situ) gemaakte mantel.
- Een combinatie van de twee bovenstaande methoden namelijk: een ter plaatse gemaakte mantel met permanente betonnen segmenten als binnenbekisting.



Figuur .1.11.2 Schematisatie TBM

Het schild wordt voortbewogen door hydraulische vijzels. Als de mantel wordt samengesteld uit segmenten, dan zullen de vijzels zich tegen de net geplaatste segmenten afzetten. De ruimte buiten de tunnelmantel (staartspleet), die ontstaat door het ontgraven van de iets grotere doorsnede van het schild, wordt gelijktijdig met het voortschuiven gevuld met een groutmengsel.

Wordt de mantel in-situ vervaardigd, dan zullen de vijzels tegen de binnenkist kunnen afzetten.

In de volgende paragrafen worden enkele boor- en bouwmethoden kort toegelicht.

### 1.2.1 Vloeistofschild

Bij de vloeistofschilden geschiedt het ontgraven in een met steunvloeistof gevulde ruimte. Deze vloeistof verzorgt de ondersteuning van het ontgravingsfront en dient tevens als transportmedium voor de afgegraven grond. De steunvloeistof is meestal een bentoniet-watersuspensie, maar indien er voldoende klei in de grond aanwezig is, worden ook wel steunvloeistoffen van de plaatselijke klei en water gebruikt. Alleen bij uitzondering kan met alleen water volstaan worden. Het ontgraven gebeurt in de vloeistof door een graafspakenwiel, een graafschijf of een soort beweegbare cutter arm. In Europa is er nog weinig ervaring met vloeistofschilden met een graafschijf, waarvan de diameter groter is dan 4,5 meter [KIVI, 1993].

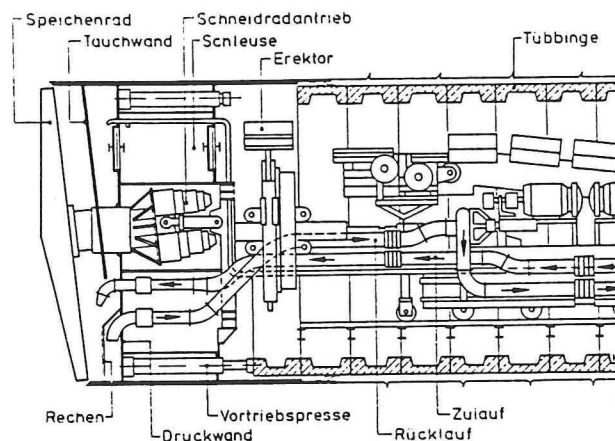
Tot de vloeistofschilden behoren: (Japanse) Slurry-shield, (Duitse) Hydroschild en het Thixschild. De Slurry-shieldmethode lijkt veel op de Hydroschildmethode; het enige

wezenlijke verschil is de manier waarop de druk van de steunvloeistof wordt geregeld. De steundruk wordt bij het Slurry-shield geregeld met pompen en ventielen, terwijl bij het Hydroschild de steundruk m.b.v. een luchtkussen instand gehouden wordt.

Zowel het Hydro- en het Thixschild zullen kort behandeld worden. Daar de slurrydruk bij de Japanse methode moeilijk te regelen is, komt deze voorlopig niet in aanmerking voor tunnelboorprojecten in Nederland en daarom zal deze methode buiten beschouwing gelaten worden.

#### 1.2.1.1 Het Hydroschild.

Dit type vloeistofschield is ontwikkeld door het aannemingsbedrijf Wayss & Freytag. De grond wordt afgegraven door een graafspakenwiel. Het schild is ideaal voor weinig tot niet cohesieve, korrelige grondsoorten, maar in cohesieve grondsoorten ook inzetbaar. Er is dan echter een omvangrijke grondscheidingsinstallatie nodig. De grondscheidingsinstallatie is nodig om de ontgraven grond van de steunvloeistof te scheiden om deze opnieuw te kunnen gebruiken. M.b.v. speciale hydrocyclonen en centrifuges kunnen zelfs korrels met een diameter van 0,015 mm gescheiden worden van de steunvloeistof. Dit brengt echter hoge kosten met zich mee en daarom zal er overwogen moeten worden of bij grondsoorten met een kleine korrelgrootte (bijvoorbeeld klei) niet een ander type schild gebruikt moet worden.



Figuur 1.3 Hydroschild [Maidl, 1995]

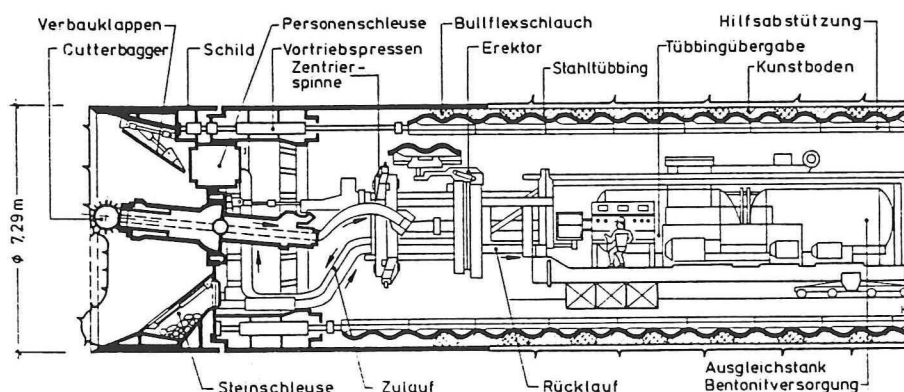
In het geval van voorkomen van grote keien kan in de ontgravingsruimte een stenenbreker geplaatst worden. De gebroken stenen kunnen dan makkelijk door de leiding, die een diameter van ongeveer 25-30 cm heeft, getransporteerd worden naar het maaiveld. Voor het verwijderen van grotere obstakels, zoals funderingsresten, of het vervangen van versleten onderdelen is het mogelijk de steunvloeistof weg te pompen en de ontgravingsruimte onder verhoogde luchtdruk te zetten. Bij het wegpompen van de bentonietsuspensie blijft er een betonietcake achter op het ontgravingsfront, die dan met de verhoogde luchtdruk wel de stabiliteit van het boorfront kan garanderen. Als extra veiligheid kunnen steunplaten (m.b.v. hydraulische vijzels) tussen de spaken van het graafwiel geplaatst worden. Later bij het verwijderen van de steunplaten moet er opgelet worden dat de grond niet mee wordt getrokken. Dit meetrekken van de grond kan gebeuren door de onderdruk die achter de platen ontstaat, waardoor de grond aan de steunplaten vast blijft zitten.

Typerend voor het Hydroschild is de manier waarop de steunvloeistofdruk gehandhaafd wordt. Er is een aparte kamer die onder druk wordt gehouden door lucht, dit is een soort

luchtkussen. Dit luchtkussen staat in verbinding met de steunvloeistof en dient om de drukschommelingen in de ontgravingsruimte op te vangen. Deze variaties ontstaan door een moeilijk te beheersen evenwicht tussen de vijzel-, graafwiel- en grondafvoersnelheid. De druk van het luchtkussen kan nauwkeurig geregeld worden, waardoor direct op veranderende omstandigheden gereageerd kan worden. Hierdoor is dit schildtype in vergelijking met andere schildtypen het beste wat betreft het beperken van de zettingen aan het maaiveld [KIVI, 1993].

### 1.2.1.2 Het Thixschild.

Deze machine is door Philip Holzman AG ontwikkeld en de tot heden maximaal toegepaste diameter is 7,29 meter [KIVI, 1993]. In de met steunvloeistof gevulde kamer zit een beweegbare cutter, die al dan niet computergestuurd de grond kan afgraven. De grond wordt direct afgezogen en dus niet intensief gemengd, waardoor de bentoniet suspensie langer schoon blijft. De bentoniet cake wordt alleen ter plaatse van de cutter verwijderd, dit komt de stabiliteit van het boorfront ten goede. Stenen tot een diameter van 25 cm kunnen door de cutter worden verwijderd en door de leidingen worden afgevoerd. Stenen met een grotere diameter worden in de ontgravingskamer opgevangen en worden via een steensluis afgevoerd. Grotere obstakels kunnen net als bij een Hydroschild onder verhoogde luchtdruk handmatig verwijderd worden.



Figuur 1.4 Thixschild [Maidl, 1995]

De druk in de boorkamer wordt op dezelfde wijze beheerst als bij het Hydroschild, alleen bevindt het luchtkussen zich nu in de toevoerleiding van de steunvloeistof.

Bij stabiliteitsverlies is het grondverlies relatief groot. Het wordt daarom aangeraden om deze methode alleen toe te passen op plaatsen waar grote zettingen weinig schade kunnen veroorzaken of de TBM moet op een grote diepte ingezet worden.

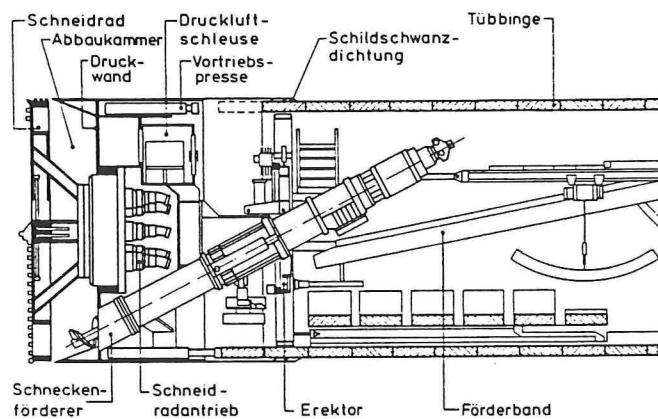
### 1.2.2 Gronddrukbalansschild

Bij de gronddrukbalansschilden, ook wel Earth Pressure Balance system (EPB) genoemd, wordt de stabiliteit van het boorfront niet beheerst door een steunvloeistof, maar door de ontgraven grond zelf. De door het graafwiel afgegraven grond wordt opgevangen in de werkkamer of de drukkamer, waar het door middel van armen gemengd wordt, eventueel onder toevoeging van een additief. Een in een buis ondergebrachte schroefvijzel, die tot in de werkkamer steekt, voert vervolgens de grond af. Via een instelbare opening in de buis

valt de grond bijvoorbeeld op een transportband. Door de opening te regelen kan de grond in de buis gecomprimeerd worden en zal er een waterdichte afsluiting ontstaan. Als de grond grof korrelig is en dus erg waterdoorlatend, dan zal een additief in de werkkamer bij de grond toegevoegd moeten worden om de doorlatendheid van de grond te verkleinen.

Door het schild naar voren te drukken met de vijzels zal het boorfront onder druk blijven. Het is dus van belang dat zekere procesparameters zoals de ontgravingsnelheid, de schroefvijzelsnelheid, de uitlaatopeningen en de vijzeldruk goed op elkaar zijn afgestemd.

Uit het voorgaande blijkt dat het EPB-systeem uitermate geschikt is in grondsoorten waar voldoende fijn materiaal in aanwezig is, zoals slib en matig vast klei, aangezien de grondmassa in de werkkamer slecht waterdoorlatend moet zijn. Dit systeem is ontwikkeld voor de Japanse kustgebieden, waar homogene lagen slappe klei voorkomen. Zijn er gebieden met waterdoorlatende grondsoorten zoals zand, dan zal men iets aan de waterdoorlatendheid moeten doen. Te denken is aan het toevoegen van bentoniet, slib, zachte klei of schuim. De additieven maken de grondmassa niet alleen minder waterdoorlatend, maar ook plastischer waardoor het proces makkelijker verloopt. Ook zullen door het toevoegen van additieven de snijdelen van het ontgravingsysteem minder snel slijten. De additieven zullen na het afvoeren niet meer gescheiden worden om opnieuw gebruikt te worden zoals bij de vloeistofschilden.



Figuur 1.5 Gronddrukbalansschild [Maidl, 1995]

Het toepassen van een afbreekbare foam (schuim) is een nieuwe ontwikkeling. De foams bestaan uit luchtbelletjes die een levensduur van enkele uren hebben, de grond hoeft dus niet meer gescheiden te worden, want het schuim breekt af, de grondstof is biologisch afbreekbaar. De foamcellen in de grond vormen een soort rolletjes, waardoor de grond plastischer wordt. Door de spanning die in de cellen zit wordt het water, dat in de poriën zit weggedrukt. Het foam neemt dus de plaats in van het water, waardoor de grond minder waterdoorlatend wordt. Door het toepassen van foam zal het aandrijfmoment kleiner worden en zal de boorsnelheid vergroten. Dit zijn allemaal voordelen, maar het foam brengt momenteel hoge kosten met zich mee. Het gebruik van foam kan gecombineerd worden met andere additieven zoals bentoniet. Dit kan nodig zijn als er heel grof korrelig materiaal in de bodem aanwezig is.

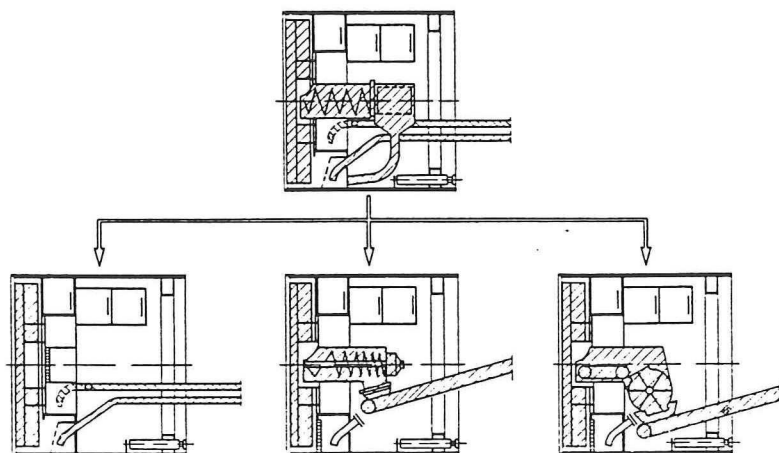
Omdat in de werkkamer geen steenbreker geplaatst kan worden, zal de maximaal te verwerken steendiameter bepaald worden door de afmetingen van de schroefvijzel. Door gebruik te maken van een as-loze schroefvijzel, kunnen de te verwerken stenen tot een diameter van 40 cm oplopen. Grotere obstakels zullen met de hand verwijderd moeten worden, dit kan door de werkkamer onder luchtdruk te zetten. Het onder luchtdruk zetten

van de werkkamer gaat bij de EPB-TBM een stuk moeilijker dan bij de vloeistofschilden. Bij vloeistofschilden kan gelijktijdig met het wegpompen van de steunvloeistof de vrijgekomen ruimte met luchtdruk ondersteund worden. Bij een EPB-schild is de mengkamer gevuld met een grondbrei i.p.v. een vloeistof. De grondbrei zal moeilijker te verwijderen zijn dan een vloeistof. Door de grondbrei plastischer te maken zal het ook makkelijker te verwijderen zijn, dit kan gedaan worden door extra foam aan de grondbrei toe te voegen. Door het schuim zal de grond plastischer worden en dus ook makkelijker inzakken naar beneden waar de grond via de schroefvijzel dan verwijderd kan worden. Tijdens het verwijderen van de grond kan de ruimte onder luchtdruk worden gezet.

### 1.2.3 Mixschild

Zoals uit de voorgaande paragrafen gebleken is, heeft ieder schild type zijn ideale inzetbereik. Over een te boren traject komen meestal veel verschillende grondsoorten voor. Als gevolg hiervan is er een schild ontwikkeld, dat omgebouwd kan worden tijdens het boorproces. Zo is het Mixschild ontstaan, dit is een schild dat werkt als een vloeistof-, een luchtdruk- of een gronddrukbalansschild. Het ombouwen kan binnen enkele dagen gebeuren. Wil men een voordeel halen uit dit type schild, dan zullen de verschillen in grondsoorten niet te snel achter elkaar moeten volgen.

Er zijn in Europa al verschillende tunnels geboord met dit type schild tot een diameter van 11,65 meter. Echter is er nog nooit gewerkt met het Mixschild in de gedaante van gronddrukbalansschild.



Figuur 1.6 Het principe van het Mixschild [Maidl, 1995]

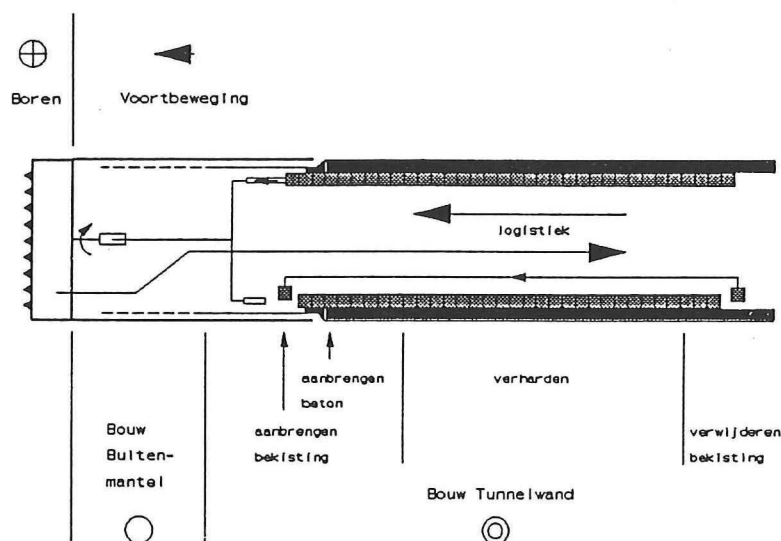
### 1.2.4 De Industriële Tunnelbouw Methode

De Industriële Tunnelbouw Methode (ITM) is geen alternatieve boor- maar een bouwmethode. Het is een initiatief van zeven Nederlandse bedrijven en één Duits bedrijf. Deze bedrijven zien de ITM als een nieuwe methode om in niet-samenhangende grond betonnen tunnelbuizen te kunnen vervaardigen. In de ontwikkeling van de ITM is de eerste fase (technische invulling gebruikerseisen) afgerond. Uit de eerste fase is geconcludeerd dat het haalbaar is om met de ITM tunnels te boren tegen een concurrerende prijs.

De tunnelwand wordt bij de ITM in situ aangebracht (industriële produktiemethode) en wordt gemaakt van staalvezelbeton. Voor het in situ aanbrengen van de tunnelwand zal er een bekisting nodig zijn. Binnen het schild van de TBM wordt van een dunne (2,5 mm) band



plaatstaal de buitenmantel van de tunnelwand vervaardigd. Dit wordt de permanente buitenkist van de tunnelwand. Deze buitenmantel heeft tevens als functie de betonnen tunnelwand waterdicht te maken. De binnenkist bestaat uit segmenten die steeds verplaatst worden. Als het beton voldoende sterkte heeft kunnen de segmenten van de binnenkist verwijderd worden en opnieuw gebruikt worden. Tussen de buitenmantel en de binnenkist wordt het staalvezelbeton onder druk aangebracht. Door de hoge druk zal de buitenmantel uittrekken waardoor de ruimte tussen de TBM en de grond wordt opgevuld (zowel het beton als de grond zijn onder spanning).



Figuur 1.7 Schematische weergave ITM-machine

### 1.3 Toekomstige projecten in Nederland

In grondsoorten vergelijkbaar met die in Nederland, zijn er elders in de wereld projecten uitgevoerd die aangeven dat boren van tunnels in Nederland technisch haalbaar is. Er zijn in Nederland al verschillende projecten waar boortunnels kunnen worden toegepast, zoals:

- de Westerschelde Oeververbinding
- de kruising van de HSL met het Hollandsch Diep
- de Noord-Zuid metro/sneltram-lijn in Amsterdam
- spoorverdubbeling in Delft
- tram/metro-lijnen in Rotterdam, Den Haag en Utrecht
- Tracé delen van de Betuwelijn
- de Botlektunnel
- en de langzaam verkeertunnel Heinenoord

De laatste twee projecten zullen (als eerste) gerealiseerd worden. Het zijn proefprojecten om in Nederland kennis en ervaring te verwerven op het gebied van het boren van tunnels. Voor meer informatie over de Heinenoordtunnel zie hoofdstuk 2. Verder zullen de Westerschelde Oeververbinding en de Noord-Zuid-lijn in Amsterdam op korte termijn ook gerealiseerd worden.

Naast de genoemde projecten, kan men ook denken aan verbindingen onder een natuurgebied door. Bij de uitbreiding van de Nederlandse infrastructuur, zal men steeds vaker de natuurgebieden als obstakel tegenkomen. I.p.v. om het gebied heen te gaan, kan er gewoon een tunnel onder het natuurgebied door geboord worden. De natuur zal hier geen hinder van ondervinden. Een goed voorbeeld hiervan is de stad Hilversum. Een uitbreiding van de toegangswegen zal gepaard moeten gaan met het verlies aan natuurgebieden, tenzij er tunnels onder de gebieden komen te liggen.

## 2. DE HEINENOORDTUNNEL

### 2.1 Algemeen

Eén van de verbindingen tussen de Randstad en de provincie Zeeland is de Heinenoordtunnel. Deze tunnel heeft de smalle Barendrechtse hefbrug over de Oude Maas vervangen, om de verbinding tussen Rotterdam en Numansdorp te verbeteren. Het dwarsprofiel van deze tunnel wijkt in zekere mate af van de overige rijksverkeerstunnels; ook het langzaam verkeer (tractoren, brommers, fietsers, voetgangers) moet van deze oeververbinding gebruik maken. Zodoende bezit iedere tunnelbuis naast twee rijstroken voor het snelverkeer ook een afgescheiden rijstrook voor het langzame verkeer. Door de toename van de verkeersintensiteit is een capaciteitsvergroting voor de tunnel noodzakelijk geworden. Dit wil men bereiken door de tunnelbuizen om te bouwen tot 2×3 rijstroken voor het snelverkeer. De eerste fase is voltooid in 1990, waarin de oostbuis naar drie rijstroken is getransformeerd. Al het langzame verkeer wordt sindsdien via de westbuis geleid. Ook de westbuis zal omgebouwd worden tot een 1×3 rijstroken verbinding. Voor het langzame verkeer zal er dan een alternatieve oeververbinding tot stand zijn gebracht. Dit zal gebeuren door twee geboorde tunnels, één voor de fietsers en de voetgangers en één voor het landbouwverkeer. Dit zal de eerste keer zijn dat er een tunnel niet voor utilitaire doeleinden geboord zal worden. Zodoende is dit project een groot studie project geworden om in Nederland het boren van tunnels onder de knie te krijgen. Voor deze studie heeft Rijkswaterstaat een werkgroep praktijkonderzoek boortunnels CUR/COB K-100 samengesteld.

De gegevens van deze tunnel zullen gebruikt worden bij de berekeningen verder in dit rapport, m.a.w. de tweede Heinenoordtunnel wordt als case-study gebruikt. Daarom volgen in de volgende paragrafen technische specificaties van de TBM en geotechnische gegevens van de bodem waar doorheen geboord zal worden.

### 2.2 De tunnelboormachine

Het type schild dat voor de Heinenoordtunnel gebruikt zal worden, is het Hydroschild. De machine zal geleverd worden door Herrenknecht GmbH. Op het moment van het schrijven van dit verslag werd nog aan de definitieve tekeningen van de TBM gewerkt. De gegevens die bekend zijn worden in deze paragraaf beschreven. Zie ook bijlage 7 en 8.

De diameter van de TBM aan het graaffront (8,56 m) is groter dan bij de staartspleet (8,53 m), maar bij de berekening wordt uitgegaan van een constante diameter (8,55 m). Het schild is 8,49 m lang en het totale gewicht van de machine is 640 ton. De lengte van de te boren tunnel is gelijk aan 2× 941 m. Onder de rivier zal de minimale dekking gelijk zijn aan 1× de diameter van de tunnel. Ter plaatse van het hart van de vaargeul zal de tunnel het diepste punt bereiken, de onderkant van de tunnel ligt dan op -26,47 m NAP.

Het graafspakenwiel bestaat uit vijf spaken waar de beitels over verdeeld zijn. De spaken hebben een (maximale) breedte en hoogte van 700 mm, daardoor ontstaat ter plaatse van de as van het graafwiel een groot vlak, waar de spaken bevestigd worden. Dit heeft als gevolg dat bij het snijden de grond ter plaatse van de as zich anders zal gedragen dan verder op de spaken, hier wordt later in hoofdstuk 3 op terug gekomen.

Op het graafwiel zijn 40 beitels bevestigd, daarvan zijn 6 ter plaatse van de as van het wiel bevestigd. De beitels hebben een breedte van 12 cm en ze kunnen beide kanten op snijden.

Iedere beitel beschrijft een eigen baan, maar de banen wordt deels overlapt door de volgende beitel. Dit volgt al uit een simpele berekening; door het aantal beitels met hun breedte te vermenigvuldigen zou de diameter van de TBM 9,60 m moeten zijn.

Aan het uiteinde van twee spaken zijn overcutters of copy-cutters bevestigd, die de oversnijding moeten verzorgen. De oversnijding is theoretisch 1 cm. De overcutters zijn uit te schuiven (radiaal), waardoor de oversnijding tot maximaal 16 cm kan oplopen.

Het graafwiel kan vooruit geschoven worden (axiaal) over een lengte van 40 cm. De rotatiesnelheid van het graafwiel zal tijdens het boren maximaal 2 omwentelingen per minuut zijn. Het is ook mogelijk het wiel onder een maximale helling van 11 graden te plaatsen.

De machine wordt door  $2 \times 14$  vijzels vooruit bewogen, die een maximale voorstuwingskracht van 50,4 MN hebben. De voortgangssnelheid tijdens het boren ligt tussen de 3 en 5 cm/min.

## 2.3 Geotechnische parameters

### 2.3.1 Grondprofielen

Er is uitgebreid grondonderzoek verricht door Grondmechanica Delft ter plaatse van de te boren tunnels. Alle gegevens uit deze paragraaf komen uit het rapport CO-349080/65 van Grondmechanica Delft. Langs- en dwarsprofielen zijn in de bijlagen te vinden.

De tunnel zal grotendeels in een pleistocene zandlaag komen te liggen. Ter plaatse van de schacht op de noord-oever komen dikke (holocene) klei- en zandlagen voor. Onder de Maas zal de tunnel gedeeltelijk in een (pleistocene) kleilaag liggen. Bij de schacht op de zuid-oever komen dunne lagen klei, veen en zand voor.

Over het hele traject is er dus geen dwarsprofiel identiek. Dit betekent dat voor ieder dwarsprofiel de belastingen op de TBM er anders uitzien. Voor de berekeningen betekent dit dat er heel veel verschillende situaties uitgerekend moeten worden. Om het rekenwerk te beperken zijn er een paar dwarsprofielen uitgekozen, waarop de berekeningen zullen worden toegepast. Deze grondprofielen zijn ter plaatse van het traject van de westelijke buis bepaald. De westelijke buis zal als eerste geboord worden; men zal vanaf de noordoever starten. De grondprofielen zijn in bijlage 6 te vinden. Er volgt nu een korte omschrijving van de grondprofielen.

- Profiel 1

Een profiel geheel bestaande uit een homogene zandlaag zou voor de berekeningen het meest eenvoudig zijn. Deze situatie komt over het gehele traject echter niet voor. Een situatie die wel voorkomt, is die waarbij de TBM geheel door een homogene zandlaag heen moet boren. Deze situatie komt voor ter plaatse van sondering 53 en 80. De TBM bevindt zich nu onder de Oude Maas in een pleistocene zandlaag. Het hart van de machine ligt op -20,8 m NAP.

- Profiel 2

Er komt ook een situatie voor dat de TBM door een holocene en een pleistocene zandlaag (en een dun laagje klei) moet boren. Dit komt ter plaatse van sondering 84 en 56 voor. De TBM bevindt zich nu onder de dijk van de noordoever. Het hart van de machine ligt op -14,9 m NAP.

- Profiel 3

Een homogene kleilaag zou ook interessant zijn om uit te rekenen. De TBM bevindt zich echter nooit helemaal in een homogene kleilaag, wel komt de situatie voor dat de machine zich half in een zand- en half in een kleilaag bevindt. In doorsnede D-D' is dit te zien. De TBM bevindt zich nu onder de Oude Maas.

Het hart van de machine ligt op -22,5 m NAP.

In profiel 1 en 3 is ook te zien dat er grondverbetering wordt toegepast. Dit zal in een gebied van ca. 280 bij 73 m boven de tunnel gebeuren. De bodem van de rivier komt op -10,70 m NAP, waaronder een anderhalve meter dikke bodembescherming (steenbestorting) komt. Onder de steenbestorting wordt tot -15,00 m NAP grondverbetering (zand) aangebracht.

### 2.3.2 Stijghoogte van het grondwater

De stijghoogte van het grondwater in de grondlaag, waarin wordt geboord is een belangrijke parameter voor het bepalen van de steundrukken aan het boorfront. Er worden lage veiligheidsfactoren bij waterspanningen gebruikt, dus moeten de stijghoogten nauwkeurig (of voldoende veilig) bepaald worden.

De stijghoogten van het grondwater zijn afgeleid uit peilbuiswaarnemingen. Zowel het freatische niveau alsmede de stijghoogte in de pleistocene zandlaag 32 zijn bepaald t.o.v. van 0 m NAP.

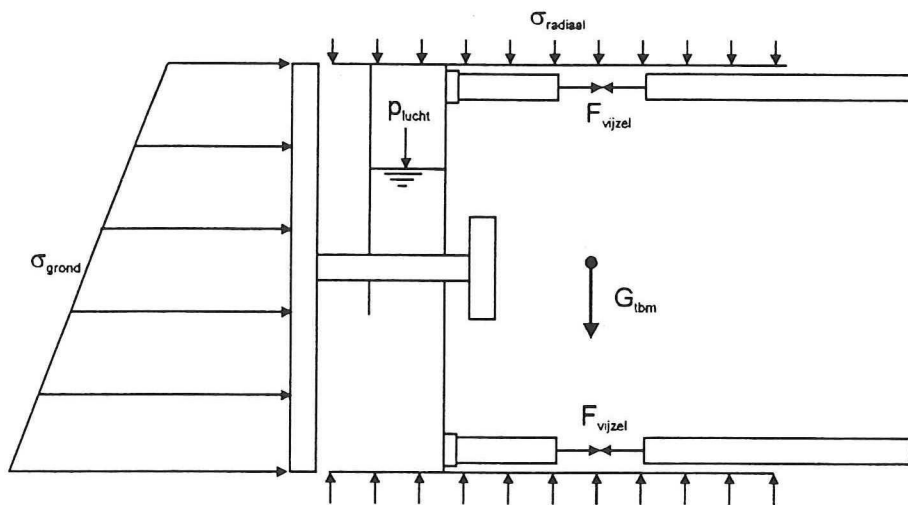
Een conclusie uit het rapport van GD is dat in het gebied onder de Oude Maas, dat zich uitstrekt tot circa 300 m vanaf de randen van het te ontgraven gebied, de gemiddelde stijghoogte in de pleistocene zandlaag 32 vrijwel gelijk is aan de gemiddelde rivierwaterstand in de Oude Maas. Er zou onder de noordoever een communicatiepunt aanwezig moeten zijn met de rivier.

In de berekeningen in hoofdstuk 4.3 en 6 wordt ervan uitgegaan dat de gemiddelde waterstand van de rivier op NAP ligt. Voor de stijghoogte in alle lagen wordt uitgegaan van deze waterstand. Er wordt dus geen rekening gehouden met het getij en de traagheidseffecten daarvan in de verschillende grondlagen.

### 3. BELASTINGEN OP DE TBM

#### 3.1 Overzicht van de belastingen op de TBM

De TBM is omgeven met grond, zowel aan het boorfront als op de mantel van de TBM zal de grond een belasting op de machine uitoefenen. De grondbelasting wordt over het algemeen onderverdeeld in de belasting als gevolg van de korrels en het poriënwater. In de onderstaande figuur zijn de belastingen schematisch weergegeven voor de statische situatie (het boorproces staat stil).



Figuur 3.1 Overzicht van de belastingen op de TBM (statisch).

In de machine zijn de variabelen zoals de luchtdruk in het luchtkussen alsmede de druk in de vijzels te regelen, deze zullen de regelparameters genoemd worden. Om de grondbelasting op het boorfront te ondersteunen, zal de ontgravingsruimte gevuld zijn met een vloeistof. De steundruk van deze vloeistof wordt geregeld door de luchtdruk in het luchtkussen. In de ontgravingsruimte heerst de steundruk en in de machine (aan de andere kant van het drukschot) heerst de atmosferische druk. De steundruk zal groter zijn dan de atmosferische druk, waardoor de machine terug (tegen de boorricting in) wordt geduwd. Er zal een kracht nodig zijn om de machine in rust te houden. Deze kracht zal geleverd worden door de vijzels.

Zowel voor het besturen als het dimensioneren van de TBM is een goed inzicht in de belastingen op de machine noodzakelijk.

#### 3.2 Beschrijving van de belastingen

In figuur 3.1 zijn belastingen die op de machine werken weergegeven voor de situatie dat de machine stil staat. Deze situatie komt voor als de segmenten van de tunnelmantel geplaatst worden. De dynamische situatie doet zich voor bij het ontgraven van de grond, het actieve boorproces. Het zal duidelijk zijn dat voor het boorproces extra krachten nodig zullen zijn

om de machine vooruit te duwen en om de grond los te snijden. Voor de twee verschillende situaties volgt nu een overzicht van de belastingen op de TBM.

Statisch (plaatsen segmenten):

- Grondbelasting op het boorfront (zie paragraaf 3.2.1)
- Grondbelasting op de mantel van de TBM (zie paragraaf 3.2.3)

Dynamisch (het actieve boorproces):

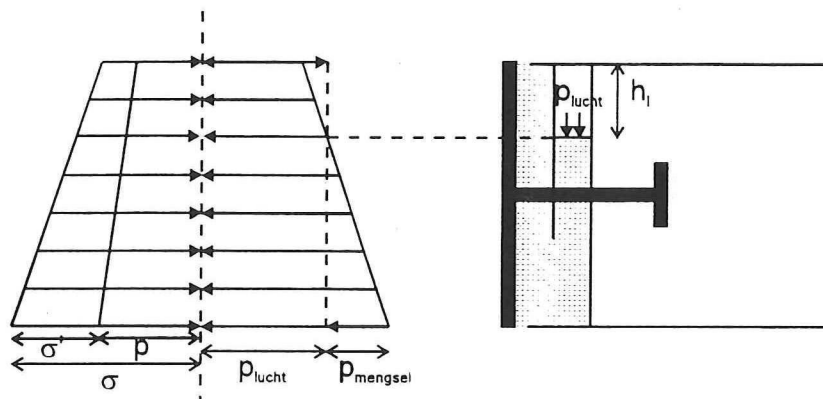
- Grondbelasting op het boorfront
- Belastingen als gevolg van het ontgraven van grond
  - het snijden van grond (zie hoofdstuk 4)
  - de grondprop die ter plaatse van de as van het graafwiel ontstaat (zie paragraaf 3.2.2)
- Belasting op de mantel van de TBM
  - normaalspanning
  - schuifspanning

Alle hier bovengenoemde belastingen behalve het snijden van grond zullen in de volgende paragraaf kort beschreven worden.

### 3.2.1 Grondbelastingen op het boorfront

#### 3.2.1.1 Algemeen

In het onderstaande figuur is het evenwicht op het boorfront weergegeven:



Figuur 3.2 Belastingen op het boorfront.

Het boorfront mag niet bezwijken, dus zal de vloeistof in de ontgravingsruimte de grond in evenwicht moeten houden. Het vullen van de ontgravingsruimte alleen met een bentoniet suspensie zal niet voldoende zijn om de grond in evenwicht te houden. Het zal nodig zijn om het ontgravingsmengsel (bentoniet suspensie plus ontgraven grond) onder druk te zetten. Dit kan met lucht gebeuren, zoals beschreven in paragraaf 1.2.1.1.

In de luchtkamer zal de vloeistofspiegel niet tot tegen de bovenkant van de TBM komen. Het luchtkussen vormt een slappe gas veer. Dit is om de drukschommelingen op te kunnen

vangen die ontstaan bij het boorproces. Deze drukschommelingen kunnen ontstaan doordat de voortgangs- en de ontgravingsnelheid moeilijk op elkaar af te stemmen zijn. Dit aspect wordt in een gesprek met de heer S. Babendererde als het belangrijkste aspect van het boorproces genoemd: "Volume beheersing!". Theoretisch zal alleen de grond verwijderd moeten worden over een doorsnede die net zo groot is als de diameter van de TBM. Bij een goede beheersing van dit proces zullen ook de zettingen minimaal zijn.

Bij de berekeningen zal uitgegaan worden van een constante dichtheid van het ontgravingsmengsel. De dichtheid van het ontgravingsmengsel zal over de hoogte niet zo sterk variëren, omdat de spaken de steunvloeistof vermengen. De variatie van de steundruk zal dus door de luchtdruk bepaald worden. Deze luchtdruk zal continue geregeld moeten worden tijdens het boren, om de variatie van de belastingen op het front op te kunnen vangen. Een grote steundruk zal het ontgraven van de grond moeilijker maken, omdat de korrels harder tegen elkaar zullen drukken. Verder kan een grote steundruk leiden tot verlies van bentoniet en zelfs het opbarsten van grond. Bij een kleine steundruk kan instabiliteit van het boorfront optreden en in het ergste geval zal het boorfront geheel instorten. Het is dus belangrijk een optimale waarde te vinden voor de steundruk.

### 3.2.1.2 Overbrengen van de steundruk op de grond

Voor de stabiliteit van het boorfront is de overdracht van de steundruk op het boorfront erg belangrijk. In de ontgravingsruimte heerst de druk van de steunvloeistof en in de grond de korrelspanning en het poriënwater. De druk in de mengkamer zal groter zijn dan de waterspanning in het grondmassief. Afhankelijk van de indringdiepte (van de druk) van de steunvloeistof zal de gradiënt (drukval over de indringing) van de steundruk bepaald worden. Hoe groter de gradiënt des te beter zal de ondersteuning zijn. Dit het beste als volgt voor te stellen: een verticaal grondvlak moet ondersteund worden. Door het aanbrengen van een membraam op het grondvlak, bijvoorbeeld een plastic folie, zal het makkelijk zijn een druk op het grondmassief aan te brengen. Afhankelijk van de doorlatendheid van het membraam zal bepaald moeten worden waarmee de grond ondersteund moet worden.

Bij het boren van tunnels met een vloeistofschild TBM wordt de grond meestal ondersteund met een bentonietsuspensie. Het aanbrengen van een plastic folie is niet logisch want dan kan de grond niet ontgraven worden. De processen die optreden bij het gebruik van een bentonietsuspensie kunnen onderscheiden worden in: de initiële indringing, het blokkeren van de poriën en de filtercake vorming (het *membraam*).

Bij het eerste proces dat zich voordoet, de *initiële indringing*, zal de gradient van de steundruk relatief klein zijn (zie figuur 3.3). De steunvloeistof zal over een grote indringdiepte invloed uitoefenen op de spanningen in het grondmassief. Dit proces vindt plaats over een lengte  $l$  in het maagdelijk grondmassief, over een tijdschaal van seconden. Voor de indringing  $l$  wordt in [Walz, 1983] de volgende relatie gevonden:

$$l = \alpha \frac{\Delta p d_s}{\tau_b} \quad (3.1)$$

Met:

$l$	: de indringdiepte	[m]
$\Delta p$	: de drukval over de indringdiepte	[kN/m <sup>2</sup> ]
$d_s$	: de karakteristieke korreldiameter ( $d_s = d_{10}$ )	[m]
$\tau_b$	: de vloeispanning van de boorvloeistof	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	: een evenredigheidsfactor	[-]

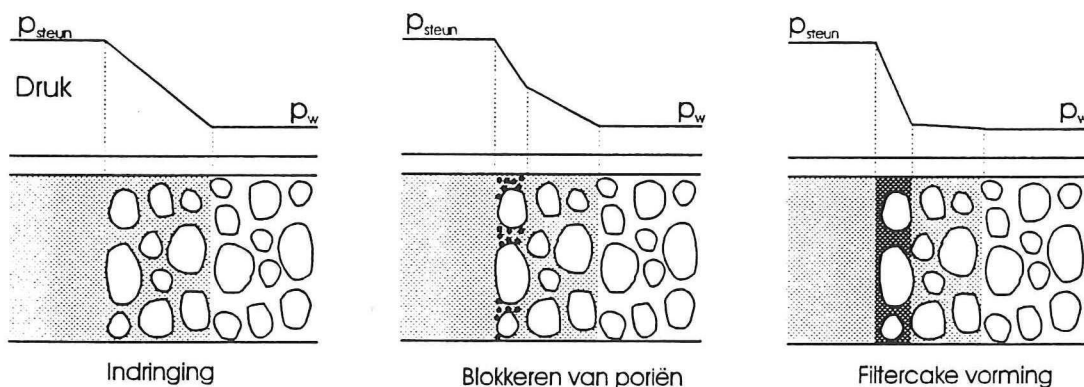


Voor de vloeispanning van de boorvloeistof kan de vloeispanning van bentoniet gebruikt worden, deze ligt in de orde van grootte van  $10 \text{ N/m}^2$ . De evenredigheidsfactor is een constante. In de literatuur worden voor deze evenredigheidsfactor echter verschillende waarden gevonden. De discussie over de exacte waarde van de evenredigheidsfactor is voor dit rapport niet interessant, omdat snel na de indringing andere processen zullen volgen.

De deeltjes in de suspensie (voornamelijk bentoniet) zullen de *poriën blokkeren* waardoor de indringdiepte zal afnemen. Bij grondsoorten met een grote gemiddelde korreldiameter (bijv. grind) zal de indringdiepte erg groot zijn. Dit probleem kan verholpen worden door deeltjes aan de boorvloeistof toe te voegen, zoals zaagsel of zand, waardoor de poriën verstopt raken. Dit zijn deeltjes met een kleinere diameter dan de te ondersteunen grond.

Het proces dat hierop volgt is de *vorming van de filtercake*. Het drukverschil in de mengkamer en het grondmassief zal altijd aanwezig zijn, waardoor steeds meer deeltjes bentoniet op het boorfront zullen neerslaan. Door het drukverschil wordt het water uit de laag met bentoniet deeltjes geperst, waardoor een membraam wordt gevormd dat blijft aangroeien in de tijd. De filtercake die gevormd is door de bentoniet deeltjes heeft de eigenschap dat het zeer slecht doorlatend is (in de orde van grootte van klei), zowel voor water als lucht. Door deze slechte doorlatendheid zal de drukval voor het grootste deel over deze laag plaatsvinden. Het doel is bereikt: de filtercake is het membraam dat het verticale grondvlak (boorfront) ondersteunt.

In de onderstaande figuur zijn de beschreven processen schematisch weergegeven.



Figuur 3.3 Deelprocessen afpleistering met de drukverdeling.

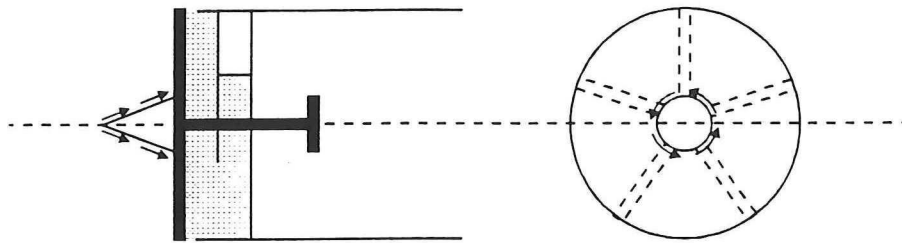
### 3.2.2 De vorming van een grondprop voor de as van het graafwiel

De tunnelboormachine fabrikant Herrenknecht heeft bij het project U-Stadtbahn Essen voor het eerst gebruikt gemaakt van een "Zentrumsschneider" [Haack, 1995]. Dit is een soort micro tunnelboormachine ter plaatse van de as van het graafwiel en opereert onafhankelijk van het graafwiel. De centrumsnijder draait sneller dan het graafwiel, respectievelijk 12 omw/min versus 1 à 2 omw/min. Het resultaat bij het gebruiken van de centrumsnijder is een reductie van 56 % van het koppel in vergelijking met de situatie zonder centrumsnijder. Het is dus duidelijk dat voor de as van het graafwiel er zich een ander proces voordoet dan op de rest van het graafwiel bij het ontgraven van grond. Dit heeft Herrenknecht uit ervaring opgemerkt en daarom is de centrumsnijder geïntroduceerd. Het bleek namelijk dat de messen dicht bij het hart van het wiel nauwelijks aan slijtage onderhevig waren, m.a.w. de beitels snijden niet. Dus de messen staan stil t.o.v. van de grond, dit kan alleen als de grond met het graafwiel meedraait.

Het meedraaien van de grond zou als volgt verklaard kunnen worden: de messen zullen de grond snijden, maar ter plaatse van de as van het graafwiel kan de grond niet afgevoerd worden naar de mengkamer. (De spaken moeten bevestigd worden op de as en aangezien de spaken breed zijn, zal de as dik worden.) De grond zal vast komen te zitten tussen de messen en tegen het graafwiel. Het graafwiel zal ook vooruit geduwd worden, waardoor de grond nog meer tegen het graafwiel aan wordt gedrukt. Door de hoge contactspanning zal bij het draaien van het graafwiel de grond dan meedraaien. Bij de vooruitgang van de TBM zal men de grond moeten verdringen. Het meedraaien en het verdringen (passief bezwijken) van de grond voor de as van het graafwiel heeft als gevolg dat zich daar een *grondprop* vormt.

Voor de vorm van de grondprop wordt aangenomen dat deze gelijk is aan de vorm van de punt van de conus (een kegelvorm) van een sondeerapparaat (CPT).

De grondprop beweegt dus t.o.v. de omringende grond. Op het grensvlak zal zich een schuifspanning ontwikkelen. Deze schuifspanning moet door krachten van het graafwiel overwonnen worden, m.a.w. naast krachten voor het snijden van de grond zijn ook krachten nodig als gevolg van de grondprop om het graafwiel te bewegen (roteren en vooruitduwen).



Figuur 3.4 Belastingen als gevolg van de grondprop.

Opmerking: over het vormen van de grondprop voor de as van de TBM is niet veel bekend. De schematisering in figuur 3.4 is een poging een methode te bedenken om de krachten uit te rekenen als gevolg van de grondprop.

### 3.2.3 Belastingen op de mantel

Om de machine te verplaatsen moet een axiale wrijving langs het oppervlak van het schild van de TBM overwonnen worden. De tangentiële wrijving langs het oppervlak moet voorkomen dat bij het ronddraaien van het graafwiel de TBM gaat meedraaien. Zowel de axiale als de tangentiële wrijving is afhankelijk van de normaalspanning op het schild van de TBM en de wrijvingseigenschappen grond-schild. De axiale en de tangentiële wrijving moeten vectorieel bij elkaar opgeteld worden, het resultaat is gelijk aan de totale wrijving langs het oppervlak van de machine.

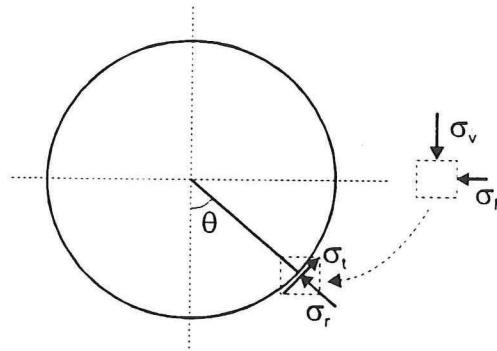
In de statische situatie is de normaalspanning de enige belasting op het schild van de TBM. De normaalspanning zal analytisch bepaald worden. De normaalspanning is gelijk aan de radiale korrelspanning op de mantel van de TBM. Voor de radiale korrelspanning geldt:

$$\sigma_r = \frac{(\sigma_v + \sigma_h)}{2} + \frac{(\sigma_v - \sigma_h)}{2} \cos(2\theta) \quad (3.2)$$

Met:

$\sigma_r$	: de radiale korrelspanning op de mantel van de TBM	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_v$	: de verticale korrelspanning op de mantel	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_h$	: de horizontale korrelspanning op de mantel	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\theta$	: hoekcoördinaat (zie figuur 3.5)	[rad]

Naast de radiale component zal er ook een tangentiële component van de korrelspanning op de mantel voorkomen, dit is in de volgende figuur weergegeven.



Figuur 3.5 Toelichting poolcoördinaten.

Bij het bepalen van de korrelspanning op de mantel van de TBM moet ook rekening gehouden worden met de effectieve massa van de machine, dus het gewicht van de machine onder water.

Aangenomen wordt dat als gevolg van de belastingen op de mantel de machine niet zal vervormen. Dit heeft als gevolg dat een neutrale gronddruk in horizontale richting op de mantel heerst. Voor het bepalen van de neutrale korrelspanning moet de coëfficiënt van de neutrale gronddruk ( $K_o$ ) bekend zijn. Voor alle lagen op het tunnel tracé is deze coëfficiënt bekend (zie bijlage 7). Voor de neutrale horizontale korrelspanning geldt:

$$\sigma_h = K_o \sigma_v \quad (3.3)$$

Met:

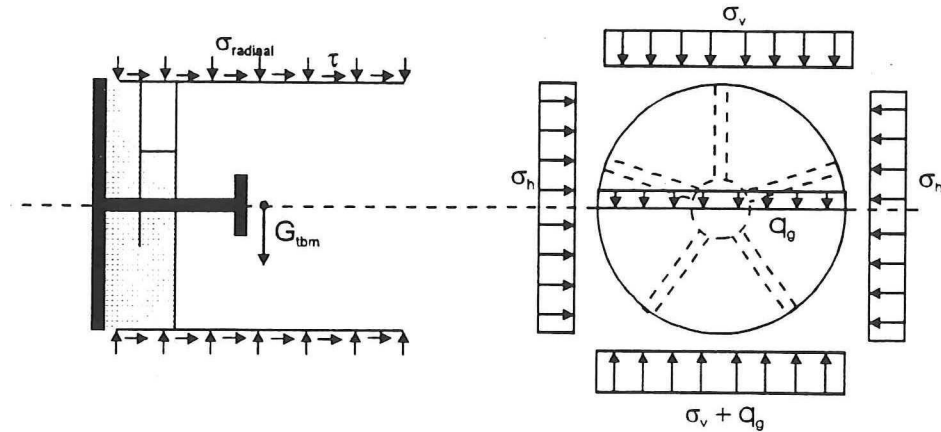
$K_o$  : de coëfficiënt van de neutrale gronddruk [-]

De wrijving langs de mantel is naast de radiale korrelspanning ook afhankelijk van de grond-staal wrijvingshoek en van de adhesie van de grond. Hiervoor is door Coulomb de volgende relatie gegeven:

$$\tau = a + \sigma_r \tan(\delta) \quad (3.4)$$

Met:

$\tau$  : de schuifspanning [kN/m<sup>2</sup>]  
 $a$  : de adhesie [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\delta$  : de grond-staal wrijvingshoek [rad]



Figuur 3.6 Belastingen op de mantel van de TBM.

### 3.3 Belastingen van de bovenliggende lagen

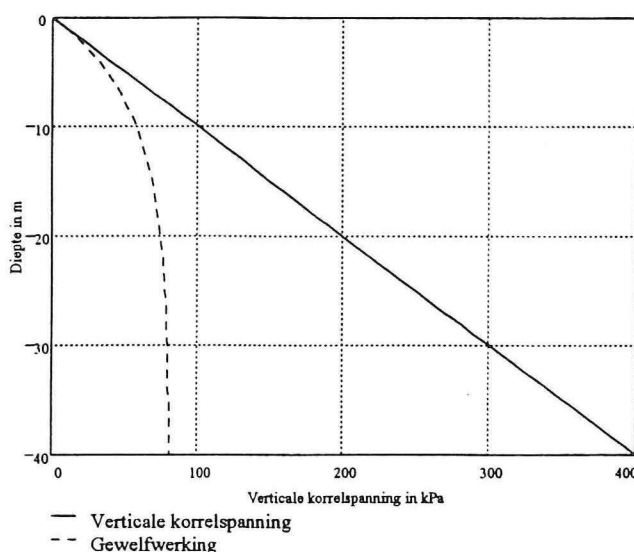
De verticale grondspanning aan de bovenkant van de TBM zal in principe gelijk zijn aan het gewicht van de bovenliggende lagen. De verticale grondspanning zal echter als gevolg van gewelfwerking (arching) kleiner worden. Omdat er altijd iets meer grond ontgraven zal worden dan nodig is, zal de grond boven de TBM willen zakken. Doordat een zuil van grond wil zakken t.o.v. de omringende grond, zal een schuifspanning optreden die tegengesteld is aan de bewegingsrichting van de grondzuil. Deze schuifspanning zal er dus voor zorgen dat het gewicht van de bovenliggende lagen kleiner wordt dan de verticale grondspanning. Terzaghi heeft voor dit effect de volgende formule afgeleid:

$$q_b(t) = \frac{F}{\lambda \tan(\phi)} \left( \frac{\gamma - c}{U} \left( 1 - \exp\left(-t \frac{U}{F} \lambda \tan(\phi)\right) \right) \right) \quad (3.5)$$

Waarin:

$q_b$	: belasting van de bovenliggende lagen als gevolg van gewelfwerking	[kPa]
$F$	: het oppervlak van de grondzuil	[m <sup>2</sup> ]
$U$	: omtrek van de grondzuil	[m]
$\lambda$	: de coëfficiënt van de actieve gronddruk	[-]
$\phi$	: hoek van inwendige wrijving	[rad]
$c$	: de cohesie	[kPa]
$\gamma$	: volume gewicht van de grond	[kN/m <sup>3</sup> ]
$t$	: dikte van de grondlaag boven de tunnel	[m]

Het effect van gewelfwerking wordt duidelijk door de verticale korrelspanning en de residuële optredende spanning als gevolg van gewelfwerking uit te zetten tegen de diepte. Dit is in figuur 3.7 gedaan voor een zandlaag tot 40 meter diep, waar de grondwaterspiegel gelijk valt met het maaiveld.



Figuur 3.7 Verticale korrelspanning en gewelfwerking.

Formule (3.5) geldt echter alleen voor een homogene grond en aangezien deze situatie in Nederland nauwelijks voorkomt, zal een formule afgeleid moeten worden, die gewelfwerking in een meer lagen systeem weergeeft. Voor de afleiding van deze formule wordt naar bijlage 9 verwezen. De formule ziet er volgt uit:

$$\sigma_{i+1} = \frac{F \left( 1 - \exp \left( -\frac{U}{F} dh_i K_i \tan(\phi_i) \right) \right) \left( \gamma_i - \frac{U}{F} c_i \right)}{U K_i \tan(\phi_i)} + \sigma_i \exp \left( -\frac{U}{F} dh_i K_i \tan(\phi_i) \right) \quad (3.6)$$

Waarin:

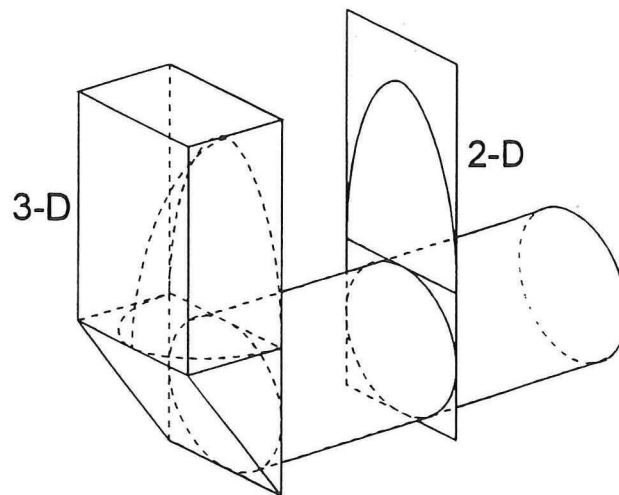
$\sigma_{i+1}$	: verticale belasting als gevolg van gewelfwerking	[kPa]
$\sigma_i$	: belasting op de grondlaag i	[kPa]
$dh_i$	: dikte van de laag i	[m]
$K_i$	: de coëfficiënt van de actieve gronddruk	[-]
$i$	: index voor de grondlaag	[-]

In de literatuur [Mohkam, 1991] wordt ook een formule gegeven voor gewelfwerking in een meer lagen systeem. De gegeven formule is echter niet juist. Naast waarschijnlijk een type fout komt de coëfficiënt van de actieve gronddruk in de formule niet voor. De formule ziet er volgt uit:

$$\sigma_{i+1} = \frac{B \left( 1 + \exp \left( -\frac{2}{B} (h_{i+1} - h_i) \tan(\phi_i) \right) \right) \left( \gamma_i - \frac{2}{B} c_i \right)}{2 \tan(\phi_i)} + \sigma_i \exp \left( -\frac{2}{B} (h_{i+1} - h_i) \tan(\phi_i) \right) \quad (3.7)$$

Met de formules (3.5) en (3.6) is het mogelijk zowel 2- als 3-dimensionale berekeningen te maken. Voor de omtrek (U) moet dat gedeelte genomen worden dat in contact is met de omringende grond en voor de oppervlakte (F) moet genomen worden het vlak waar de

belasting op werkt. Formule (3.7) is tevens een voorbeeld van een 2-dimensionale berekening.



Figuur 3.8 2-D versus 3-D gewelfwerking bij het tunnelboren

In de formules (3.5) en (3.6) komt steeds de verhouding tussen de omtrek en de oppervlakte voor. De eenheid hiervan is  $[m^{-1}]$ . Zolang hieraan voldaan wordt is er geen probleem. Dit blijkt uit formule (3.7), waar de omtrek en de oppervlakte vervangen zijn door 2 respectievelijk de breedte van de grondzuil.

## 4. HET SNIJDEN VAN GROND

Een belangrijk gedeelte van het boorproces is het ontgraven van grond. Dit ontgraven geschiedt middels beitels die ieder een laagje grond wegsnijden. Er zijn verschillende theoriën ontwikkeld die het snijden van grond beschrijven. Onderstaand zal een overzicht gegeven worden van snijmodellen in homogene grondlagen zoals zand en klei, alsook in niet homogene grondlagen zoals zandig klei en kleilig zand.

### 4.1 Het snijden van zand

Er zijn verschillende publikaties (o.a. [van Os en van Leuven, 1987]) te vinden waar het snijden van zand door baggerwerktuigen wordt beschreven. Het meest complete onderzoek is echter verricht door dr ir S.A. Miedema aan de Technische Universiteit Delft, faculteit Werktuigbouwkunde, vakgroep Baggertechniek.

Bij alle publikaties wordt gekeken naar het snijden van zand dat op de bodem van een waterloop ligt. De korrelspanningen zullen in deze situatie erg klein zijn. Bij het tunnelboorproces zullen de korrelspanningen groter zijn en worden de korrels ook nog eens onder spanning gehouden door de bentonietsuspensie. Vanuit de bestaande theoriën zal gezocht worden naar een juiste modellering voor dit probleem.

Voor een goed begrip van het snijden van zand zal eerst het snijmodel volgens Miedema beknopt toegelicht worden. Vanuit dit model zal een snijmodel voor het boorproces afgeleid worden.

Het snijden van grond lijkt erg veel op het passief bezwijken van grond (Coulomb), daarom is ook gekeken of met dit bekend fenomeen het snijden van grond te modelleren is.

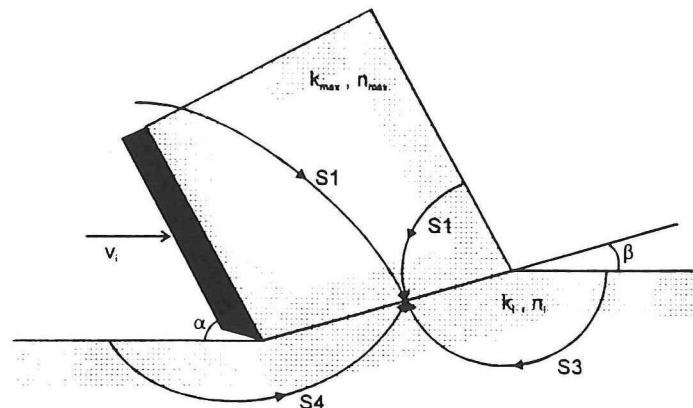
#### 4.1.1 Basistheorie voor het snijden van zand

Wanneer een dicht gepakt korrelskelet wordt belast op afschuiving, zoals bij het snijden van zand, dan zal het deze belasting alleen kunnen overbrengen door te vervormen. In geval van dicht gepakt zand leidt dat tot een volumevergroting. Dit proces staat bekend als dilatantie. De volumevergroting als gevolg van dilatantie, zal leiden tot een groter poriënvolume. In met water verzadigd zand betekent dit dat water zal worden aangezogen uit de omgeving en een onderdruk in het poriënwater ontstaat, die afhankelijk is van de doorlatendheid van de grond. Dit heeft als gevolg dat de korrelspanningen en dus ook de snijkrachten zullen toenemen.

De volumevergroting in de tijd (volumereksnelheid) is evenredig aan de snijsnelheid, m.a.w. bij een grotere snijsnelheid zal de onderdruk groter worden. De onderdruk kan niet eindeloos toenemen, bij het bereiken van de waterdampspanning zal de onderdruk niet verder kunnen toenemen en zal cavitatie plaatsvinden. Dit betekent dat de snijkrachten, als gevolg van dilatantie, boven de cavitatiegrens niet verder zullen toenemen.

Het bepalen van de wateronderdruk ter plaatse van het afschuifvlak is erg belangrijk voor de berekening van de snijkrachten. In [Miedema, 1987] worden de wateronderspanningen op het mes en het afschuifvlak bepaald aan de hand van tabellen. De waarden in de tabellen zijn numeriek bepaald met behulp van de eindige elementen methode. Er is nu echter een analytisch model ontwikkeld door Miedema die deze wateronderspanningen berekent (zie bijlage 12).

Bij het analytische model wordt het afschuifvlak in een aantal stukken verdeeld. Vervolgens worden de trajecten van het toestromende water als cirkelvormige banen beschreven (zie figuur 4.1).

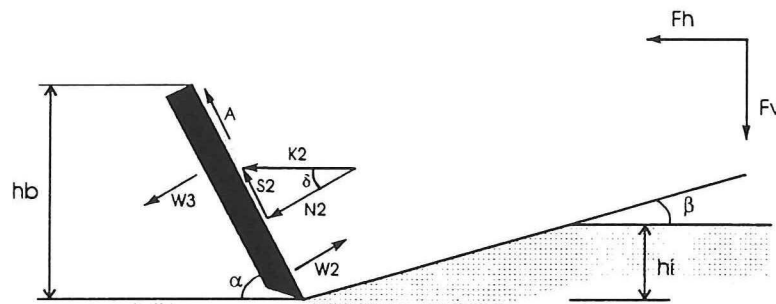


Figuur 4.1 Stroming van het porienwater naar de afschuifzone.

Voor ieder stukje van het afschuifvlak worden dan de waterunderspanningen bepaald. Het gemiddelde van deze spanningen is vervolgens de waterunderspanning op het afschuifvlak. Voor het bepalen van de spanningen op het mes wordt de waterunderspanning van het stukje grond bij het mes genomen en met een factor vermenigvuldigd. Deze factor moet de verdeling van de spanningen over het mes middelen.

Voor het modelleren van het snijproces zal een twee-dimensionaal model voldoende zijn. De beetel (mes) staat altijd loodrecht op de baan die beschreven wordt.

De krachten die op het mes werken zijn in de onderstaande figuur weergegeven (belastingen zijn omgerekend naar krachten):



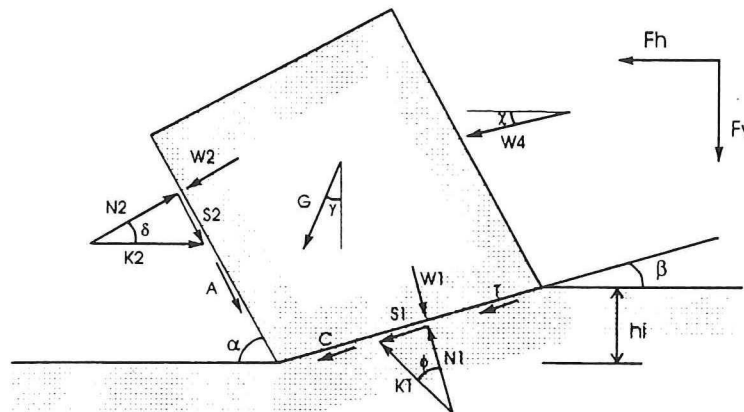
Figuur 4.2 Krachten werkend op het mes.

Deze krachten zijn:

- N2 : normaalspanning (korrelspanning) op het mes.
- S2 : schuifspanning t.g.v. de grond/staal wrijving.
- K2 : resultante van N2 en S2.
- W2 : waterunderspanning op het mes.
- A : schuifspanning t.g.v. adhesie grond en het mes.
- W3 : onderdruk achter het mes.



De krachten die op de gesneden schil werken zijn in de onderstaande figuur weergegeven:



Figuur 4.3 Krachten werkend op de gesneden schil.

Deze krachten zijn:

- N1 : normaalspanning (korrelspanning) op de afschuifzone.
- S1 : schuifspanning t.g.v. inwendige wrijving van het zand.
- K1 : resultante van N1 en S1.
- W1 : wateronderspanning op de afschuifzone.
- C : schuifspanning t.g.v. de cohesie van zand.
- G : gewicht van het gesneden zand.
- T : traagheidskracht als gevolg van het versnellen van het zand.
- W4 : stromingsweerstand.

De krachten K1 en K2 zijn onbekend. Door een verticaal en horizontaal krachtenevenwicht op te stellen zijn deze twee krachten af te leiden.

Voor het horizontaal krachtenevenwicht wordt dan gevonden:

$$K1 \sin(\beta + \phi) - W1 \sin(\beta) + C \cos(\beta) + T \cos(\beta) + G \sin(\gamma) + W4 \cos(\chi) - A \cos(\alpha) + W2 \sin(\alpha) - K2 \sin(\alpha + \delta) = 0 \quad (4.1)$$

Waarin:

- $\alpha$  : meshoek [rad]
- $\beta$  : afschuifhoek [rad]
- $\delta$  : wrijvingshoek zand-staal [rad]
- $\gamma$  : hoek snelheidsvector met de horizontaal [rad]
- $\chi$  : hoek stromingsweerstand [rad]

en voor het verticale krachtenevenwicht geldt:

$$-K1 \cos(\beta + \phi) + W1 \cos(\beta) + C \sin(\beta) + T \sin(\beta) + G \cos(\gamma) + W4 \sin(\chi) + A \sin(\alpha) + W2 \cos(\alpha) - K2 \cos(\alpha + \delta) = 0 \quad (4.2)$$

Voor de snijkrachten zijn de krachten op het mes van belang, m.a.w. de kracht K2 moet bepaald worden. Uit de vergelijkingen (2.22) en (2.23) is de kracht K2 te bepalen. De kracht K2 wordt in de krachten K21 en K22 opgesplitst ( $K2 = K21 + K22$ ):

$$K21 = \frac{W2 \sin(\alpha + \beta + \phi) + W1 \sin(\phi)}{\sin(\alpha + \beta + \delta + \phi)} \quad (4.3)$$

$$K22 = \frac{G \sin(\beta + \phi + \gamma) + T \cos(\phi) + C \cos(\phi) - A \cos(\alpha + \beta + \phi) + W4 \cos(\beta + \phi - \chi)}{\sin(\alpha + \beta + \delta + \phi)} \quad (4.4)$$

Met:

K21 : krachten als gevolg van de wateronderspanningen

K22 : alle overige krachten

De krachten op het mes zijn te verdelen in componenten in de verticale en horizontale richting. Voor de horizontale kracht  $F_h$  geldt:

$$F_h = -W2 \sin(\alpha) + K2 \sin(\alpha + \delta) + A \cos(\alpha) + W3 \sin(\alpha) \quad (4.5)$$

De verticale kracht  $F_v$ :

$$F_v = -W2 \cos(\alpha) + K2 \cos(\alpha + \delta) - A \sin(\alpha) + W3 \cos(\alpha) \quad (4.6)$$

Voor de krachten t.g.v. de wateronderspanningen  $W1$  en  $W2$  geldt:

$$W1 = P1m h_i \frac{b}{\sin(\beta)} \quad (4.7)$$

Waarin:

$P1m$  : wateronderspanning op het afschuifvlak [kN/m<sup>2</sup>]

$h_i$  : snijdiepte [m]

$b$  : mesbreedte [m]

$$W2 = P2m h_b \frac{b}{\sin(\alpha)} \quad (4.8)$$

Waarin:

$P2m$  : wateronderspanning op het mes [kN/m<sup>2</sup>]

$h_b$  : hoogte van het mes [m]

Voor  $W3$  is een empirische relatie gevonden:

$$W3 = 0,3 \cot(\alpha) W2 \quad (4.9)$$

Deze kracht mag niet groter worden dan de kracht  $W2$ : dit geldt voor meshoeken tussen de 30 en de 60 graden.

Voor de traagheidskracht geldt de volgende vergelijking:

$$T = \rho_g v_c^2 \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta)} h_i b \quad (4.10)$$

Waarin:

$\rho_g$  : de natte dichtheid van zand [kg/m<sup>3</sup>]  
 $v_c$  : de snelheid van het mes [m/s]

Voor de krachten als gevolg van de cohesie en de adhesie geldt:

$$C = c h_i \frac{b}{\sin(\beta)} \quad (4.11)$$

$$A = a h_b \frac{b}{\sin(\alpha)} \quad (4.12)$$

waarin:

$c$  : de cohesie [kPa]  
 $a$  : de adhesie [kPa]

Voor het gewicht van de gesneden schil geldt:

$$G = (\rho_s - \rho_w) g h_i b \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\beta)} \left( \frac{h_b}{\sin(\alpha)} + \frac{h_i}{2 \sin(\beta)} \cos(\alpha + \beta) \right) \quad (4.13)$$

Waarin:

$\rho_s$  : de droge dichtheid van zand [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  : de dichtheid van water [kg/m<sup>3</sup>]  
 $g$  : gravitatieversnelling [m/s<sup>2</sup>]

Voor de stromingsweerstand geldt:

$$W4 = c_w 0,5 \rho_w v_c^2 b \left( \frac{h_b}{\sin(\alpha)} + \frac{h_i}{\sin(\beta)} \cos(\alpha + \beta) \right) \quad (4.14)$$

waarin:

$c_w$  : coëfficiënt voor de stromingsweerstand [-]

In alle vergelijkingen komt de afschuifhoek  $\beta$  voor. De waarde voor  $\beta$  moet nog bepaald worden. Een methode die veel toegepast wordt is de methode van Coulomb. Het snijden van grond komt overeen met het passief bezwijken. Bij het passief bezwijken moet de hoek  $\beta$  bepaald worden waarbij de totale kracht op het mes minimaal is.

In de listing van Miedema (zie bijlage 12) wordt hier ook een empirische relatie voor gegeven, waaruit blijkt dat de hoek  $\beta$  afhankelijk is van de hoeken  $\phi$ ,  $\delta$  en  $\alpha$ .

$$\beta = 1 - \frac{\phi}{4} - \frac{\alpha}{3} - \frac{\delta}{3} \quad (4.15)$$

Bij de berekeningen zal deze relatie gebruikt worden.

#### 4.1.2 Snijtheorie voor het ontgraven van een met bentoniet ondersteund graaffront

Het snijmodel beschreven in paragraaf 4.1.1 zal gebruikt worden om een snijmodel te ontwikkelen voor het ontgraven van een met bentoniet ondersteund graaffront, zoals dat bij het tunnelboren voorkomt (vloeistofschild).

Opmerking: het ontgraven bij het tunnelboorproces geschiedt aan een verticaal front, terwijl bij de modellering in paragraaf 4.1.1 over een horizontaal vlak gesneden wordt. Dit betekent dat de nu volgende schematiseringen over een hoek van 90 graden gedraaid moeten worden in vergelijking met de eerdere schematiseringen. Dit wordt echter niet gedaan, zodat het model in paragraaf 4.1.1 steeds gebruikt kan worden als vergelijkings kader.

De verschillen tussen het snijden van zand bij de basistheorie van Miedema en bij het boren van tunnels zijn:

- Bij de basistheorie zijn de korrelspanningen erg klein (nagenoeg nul), terwijl bij het boorproces de korrelspanningen groot zullen zijn.
- Bij het boorproces wordt bentoniet gebruikt, waardoor het toestromen van water, als gevolg van dilatantie, naar het afschuifvlak een stuk moeilijker zal gaan.
- Het graaffront staat onder druk van de steunvloeistof.

De grotere korrelspanningen, die leiden tot grotere waarde voor  $K_1$ , zullen geen effect hebben op de berekeningen, omdat bij de bepaling van de kracht  $K_2$  de kracht  $K_1$  wordt weggedeeld (zie paragraaf 4.1.1).

Zoals in paragraaf 3.2.1.2 beschreven is, zal door de indringing van bentoniet een filtercake ontstaan tegen het graaffront. De toestroom van water uit de ontgravingsruimte wordt door filtercake verslechterd, waardoor de wateronderspanningen zullen toenemen tot aan de dampspanning. Daarboven zal cavitatie optreden.

In het analytische model, voor het bepalen van de wateronderspanningen, is dit te modelleren door het zand een kleinere doorlatendheid te geven.

Door de steundruk, die op het graaffront werkt, zullen er extra krachten op de gesneden schil ( $E_1$  en  $E_2$ ) en het mes ( $E_3$ ) werken. De grootte van de kracht op de gesneden schil hangt af van de indringdiepte van de boorvloeistof. Het grootste gedeelte van het drukverschil tussen de ontgravingsruimte en het grondmassief zal over de filtercake staan (zie paragraaf 3.2.1.2). De filtercake heeft een kleinere dikte dan de snijdiepte, waardoor aangenomen kan worden dat de totale steundruk in de ontgravingsruimte op de gesneden schil zal staan. Voor deze krachten gelden de volgende relaties:

$$E_1 = p_{\text{steun}} b \left( \frac{h_b}{\sin(\alpha)} + \frac{h_i}{\sin(\beta)} \cos(\alpha + \beta) \right) \quad (4.16)$$

$$E2 = p_{\text{steun}} b \left( \frac{h_i}{\sin(\beta)} \sin(\alpha + \beta) \right) \quad (4.17)$$

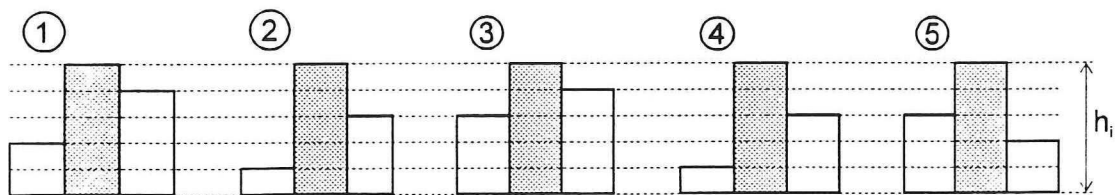
$$E3 = p_{\text{steun}} b \frac{h_b}{\sin(\alpha)} \quad (4.18)$$

Waarin:

$p_{\text{steun}}$  : de steundruk in de mengkamer [kN/m<sup>2</sup>]

Ook worden er nieuwe krachten ingevoerd als gevolg van de schuifspanningen aan de zijkanten van de gesneden schil (S3 en S4). De gesneden grond zal t.o.v. de omringende grond verplaatsen, op het grensvlak zullen dan schuifspanningen ontstaan. Op het grensvlak zullen door de vervormingen ook wateronderspanningen voorkomen. Door deze wateronderspanningen zullen de korrelspanningen op het grensvlak toenemen en de schuifspanningen dus ook. De korrelspanningen op het grensvlak moeten bekend zijn om de schuifspanningen te kunnen bepalen. Het moment voordat het mes de grond snijdt, is de grondspanning gelijk aan de korrelspanning plus de waterspanning. Omdat aan het boorfront de grond ondersteund wordt door een bentonietsuspensie, kan aangenomen worden dat daar de grondspanning ongeveer gelijk is aan de steundruk. Op het moment dat het mes de grond snijdt zullen wateronderspanningen optreden, maar de grondspanning blijft gelijk. Aangenomen kan worden dat de korrelspanning gelijk is aan de wateronderspanning plus de grondspanning (steundruk).

Om de kracht als gevolg van de schuifspanningen te bepalen moeten de oppervlakten bekend zijn waar de schuifspanningen optreden. De oppervlakten hebben een driehoekige vorm, die bepaald wordt door de afschuifhoek, de meshoek en de (snij)diepte. De diepte die beide zijkanten in de grond zitten is niet gelijk aan de snijdiepte, omdat de andere messen hier al een gedeelte van hebben weggehaald. In figuur 4.4 is per spaak te zien hoe diep de te snijden grond aan weerszijden in de grond zit (zie ook bijlage 8). In figuur 4.4 zijn de doorsneden van de snijbanen van de beitels op de verschillende spaken te zien. De grijze rechthoeken zijn die gedeelten die door de beitels gesneden wordt. De rechthoeken aan weerszijden van de grijze rechthoeken geeft de vorm van de grond aan die door de andere spaken gesneden is. Figuur 4.4 is een momentopname, waar duidelijk te zien is dat de beitels niet op een logische wijze over de spaken verdeeld zijn.



Figuur 4.4 Doorsnede te snijden schil per spaak.

Voor de schuifkrachten op de zijkanten van de gesneden schil gelden de volgende relaties:

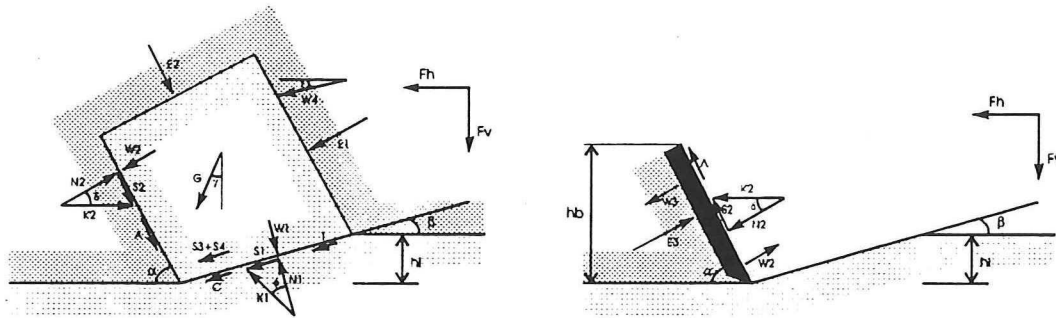
$$S3 = 0,5p_n \left( \frac{3}{5} h_i \right)^2 (\cot(\alpha) + \cot(\beta)) \tan(\phi) \quad (4.19)$$

$$S4 = 0,5p_n \left(\frac{2}{3} h_i\right)^2 (\cot(\alpha) + \cot(\beta)) \tan(\phi) \quad (4.20)$$

Met:

$p_n$  : benadering van de korrelspanning op de zijkant van de gesneden schil [kN/m<sup>2</sup>]

De schematisering van het snijmodel voor het ontgraven van een met bentoniet ondersteund graaffront ziet er als volgt uit:



Figuur 4.5 Krachten werkend op het mes en de gesneden schil.

Door deze nieuwe krachten zal de kracht K2 veranderen. Er komt een extra kracht K23 als gevolg van de steundrukken en de schuifkrachten bij ( $K2 = K21 + K22 + K23$ ):

$$K23 = \frac{E1 \sin(\alpha + \beta + \phi) - E2 \cos(\alpha + \beta + \phi) + S3 \cos(\phi) + S4 \cos(\phi)}{\sin(\alpha + \beta + \delta + \phi)} \quad (4.21)$$

Dit betekent dat de krachten die op het mes werken ook zullen veranderen:

$$F_h = -W2 \sin(\alpha) + K2 \sin(\alpha + \delta) + A \cos(\alpha) + W3 \sin(\alpha) - E3 \sin(\alpha) \quad (4.22)$$

$$F_v = -W2 \cos(\alpha) + K2 \cos(\alpha + \delta) - A \sin(\alpha) + W3 \cos(\alpha) - E3 \cos(\alpha) \quad (4.23)$$

Omdat de messen een cirkelvormige beweging maken, zijn de twee krachten niet horizontaal en verticaal, maar evenwijdig aan en loodrecht op de snijrichting. Voor de eenvoud worden ze nog wel  $F_h$  en  $F_v$  genoemd.

De kracht voor het gewicht van de gesneden schil (G) zal er anders uit gaan zien dan vergelijking (4.13). Niet het gehele gewicht zal werken op het mes, maar slechts een component daarvan, dit komt door de cirkelbeweging die het mes maakt.

$$G = (\rho_s - \rho_w) g \sin(\theta) h_i b \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\beta)} \left( \frac{h_b}{\sin(\alpha)} + \frac{h_i}{2 \sin(\beta)} \cos(\alpha + \beta) \right) \quad (4.24)$$

Ook zal de formule voor de kracht W4 in vergelijking (4.14) veranderen, dit komt omdat de stromingsweerstand in een met bentoniet gevulde ruimte anders zal zijn dan in een met

water gevulde ruimte. In plaats van de dichtheid van water moet de dichtheid van het ontgravingsmengsel gebruikt worden:

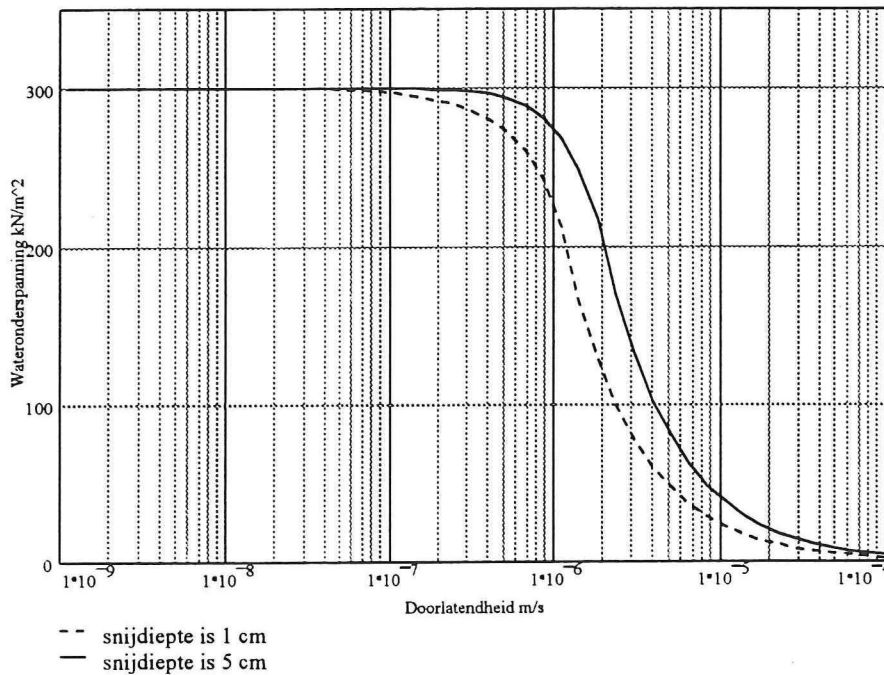
$$W4 = c_w 0,5 \rho_o v_c^2 b \left( \frac{h_b}{\sin(\alpha)} + \frac{h_i}{\sin(\beta)} \cos(\alpha + \beta) \right) \quad (4.25)$$

Met:

$\rho_o$  : de dichtheid van het ontgravingsmengsel [kg/m<sup>3</sup>]

#### 4.1.3 Vereenvoudiging snijtheorie graaffront

In de vorige paragraaf is ervan uitgegaan dat de grond een kleinere doorlatendheid krijgt door de aanwezigheid van bentoniet. Dit is niet helemaal juist maar wel een manier om het te berekenen. De wateronderspanning op het afschuifvlak is uit te rekenen voor verschillende doorlatendheden van zand. De wateronderspanning zal afhankelijk zijn van de snelheid van het mes en de stijghoogte van het grondwater ter plaatse van het mes. Representatief voor de wateronderspanningen is mes nummer 20 (zie bijlage 8). In figuur 4.6 is de wateronderspanning voor dit mes bij profiel 1 (zie bijlage 6) uitgezet tegen de doorlatendheid van de gesneden grond.



Figuur 4.6 Waterunderspanning uitgezet tegen de doorlatendheid van zand

Uit de figuur 4.6 blijkt dat bij een doorlatendheid van  $1.10^{-7}$  m/s cavitatie optreedt. De doorlatendheid van zand is in de orde van grootte van  $1.10^{-4}$  m/s en die van de filtercake in de orde van grootte van  $1.10^{-9}$  m/s. De gemiddelde doorlatendheid van het zand met een filtercake zal sterk bepaald worden door de doorlatendheid van de filtercake. Dus een gemiddelde doorlatendheid van  $1.10^{-7}$  en kleiner zal niet vreemd zijn. Het komt er op neer dat de toestroom van water naar het afschuifvlak niet uit de ontgravingsruimte kan komen

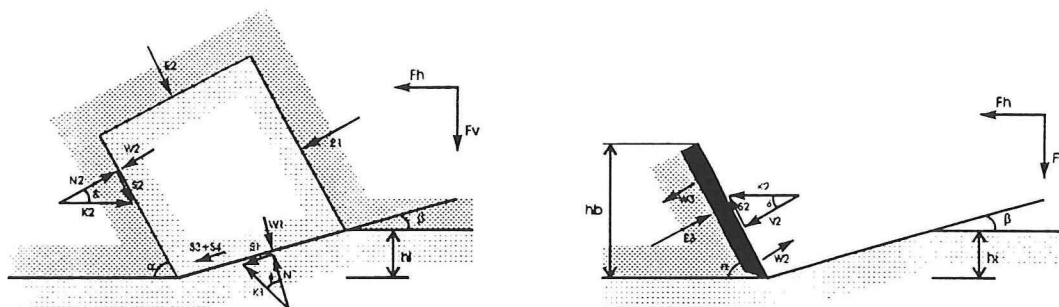
(door de kleine doorlatendheid en een kort tijdsinterval), dit heeft tot gevolg dat aangenomen kan worden dat er cavitatie op zal treden. Dit zorgt voor een vereenvoudiging van de berekeningen, want de wateronderspanningen  $P_{1m}$  en  $P_{2m}$  uit vergelijking (4.7) en (4.8) hoeven niet meer uitgerekend te worden.

Omdat zand geen (of een hele kleine) cohesie en adhesie heeft, hoeft er met deze krachten geen rekening gehouden te worden.

Ook de traagheidskrachten zullen klein blijven, omdat de snijsnelheden nooit echt groot zullen worden.

Ook de kracht t.g.v. het gewicht van de gesneden schil kan verwaarloosd worden, omdat deze erg klein is t.o.v. de waterkrachten en de externe krachten.

De vereenvoudiging is in figuur 4.7 schematisch weergegeven.



Figuur 4.7 Krachten op het mes en de gesneden schil, vereenvoudigd model.

Dit alles heeft als resultaat dat de kracht  $K_2$  nu volgt uit vergelijking (4.3) en (4.21):

$$K_2 = K_{21} + K_{23} \quad (4.26)$$

Voor de krachten op het mes betekent dit:

$$F_h = -W_2 \sin(\alpha) + K_2 \sin(\alpha + \delta) + W_3 \sin(\alpha) - E_3 \sin(\alpha) \quad (4.27)$$

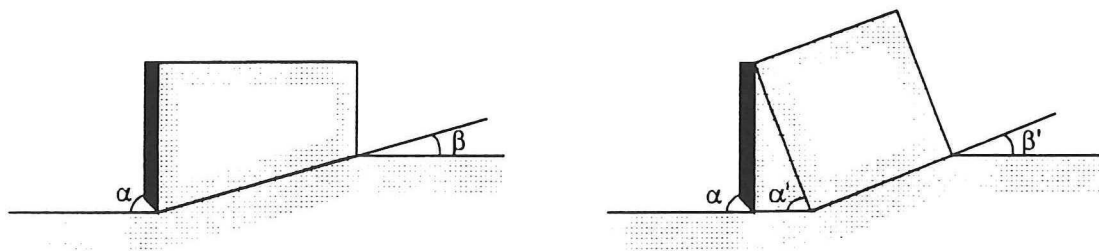
$$F_v = -W_2 \cos(\alpha) + K_2 \cos(\alpha + \delta) + W_3 \cos(\alpha) - E_3 \cos(\alpha) \quad (4.28)$$

#### 4.1.4 Snijtheorie voor grotere meshoeken

Bij het bepalen van de kracht  $K_2$  wordt in de vergelijkingen gedeeld door een sinusterm. In deze sinusterm worden de meshoek, de hoek van inwendige wrijving, de zand-staal wrijvingshoek en de afschuifhoek bij elkaar opgeteld. Als de meshoek groter wordt, zal de som van de hoeken naar 180 graden oplopen. Dit betekent dat de noemer van de vergelijking naar nul toe gaat en de kracht dus naar oneindig gaat. Als deze berekeningsmethode wordt toegepast wordt een overschatting van de snijkrachten gemaakt. M.a.w. bij grotere meshoeken zal het geschematiseerde bezwijkmechanisme uit de vorige paragrafen niet meer gelden. Het geldigheidsgebied van de theorie van Miedema ligt tussen meshoeken van 30 en 60 graden en de theorieën die hiervan zijn afgeleid dus ook.

Uit een gesprek met de heer Miedema is gebleken dat bij grote meshoeken een ander bezwijkmechanisme optreedt. een ander bezwijkmechanisme is bij het snijden van glas gesignaleerd en is in figuur 4.8 weergegeven.

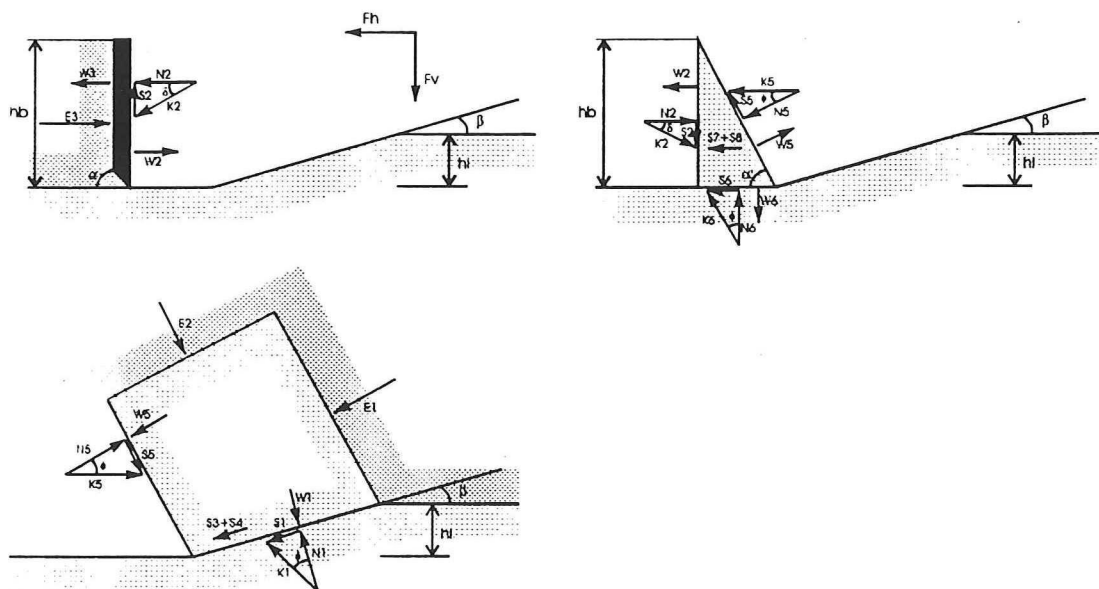




Figuur 4.8 Twee verschillende bezwijkmechanismen voor een meshoek van 90 graden.

Voor het mes zal zich een driehoekvormige wig vormen die zal fungeren als een fictief mes met een fictieve meshoek ( $\alpha'$ ). De grond in de wig zal met het mes meebewegen. Deze wig ontstaat omdat de grond de weg met de minste weerstand neemt.

Het krachterevenwicht is voor drie verschillende onderdelen op te stellen; de afschuivende schil, de wig en het mes. Zowel voor de schil als de wig zal moeten gelden dat de resultante kracht gelijk aan nul is. De krachten verdeling op de drie verschillende delen kan er als volgt uit zien:



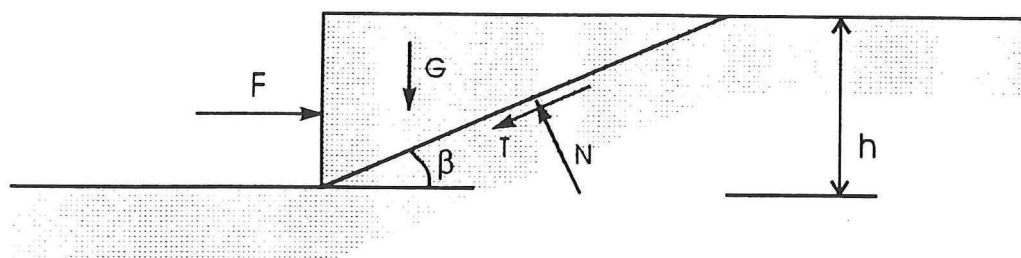
Figuur 4.9 Krachten op het mes, wig en gesneden schil, alternatief bezwijkmechanisme.

Voor het uitwerken van dit mechanisme was geen ruimte meer in dit afstudeerproject.

#### 4.1.5 Snijkrachten volgens passief bezwijken

Een bekend bezwijkmodel voor grond is het passief bezwijken volgens Coulomb. Deze methode wordt gebruikt bij het bepalen van de belastingen op een grondkerende constructie, zoals een damwand.

Passief bezwijken betekent het opdrukken van de grond (in figuur 4.8 is dit naar rechts bewegen). Een driehoekige moot grond zal afschuiven over een hoek  $\beta$ . De kracht die nodig is voor het verschuiven van de wig wordt bepaald uit het krachterevenwicht op de wig.



Figuur 4.10 Passieve gronddruk volgens Coulomb.

De hoek  $\beta$  is niet bekend, maar deze kan bepaald worden door de minimale kracht uit te rekenen waarbij de wig zal gaan verschuiven. Coulomb vindt voor deze hoek de volgende relatie:

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \quad (4.29)$$

In de theorie van Coulomb wordt uitgegaan van een oneindig brede wig, dus worden de krachten als gevolg van de schuifspanning op de zijkanten van de wig niet meegenomen. Ook wordt in de figuur uitgegaan van een gladde wand, waardoor de wrijvingshoek tussen de grond en de wand nul is. Vergelijking (4.29) voor de afschuifhoek geldt alleen voor de situatie zoals is weergegeven in figuur 4.10.

Het snijden van zand kan ook gezien worden als het passief bezwijken van een wig zoals in figuur 4.8 is weergegeven. Bij het snijden van zand zal echter met nog een paar extra aspecten rekening gehouden worden, zoals:

- Nu geen gladde wand, dus wrijving tussen zand en mes.
- Wateronderspanningen op het afschuifvlak en het mes.
- Ondersteuning door de steunvloeistof.
- Wig is niet oneindig breed, wrijving aan de zijkanten van de wig.

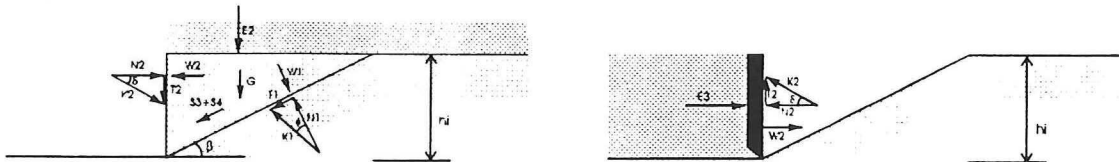
Als gevolg van de *wrijving tussen zand en het mes* zal naast de normaalspanning ook een schuifspanning op het mes aanwezig zijn. De richting van de kracht  $F$  zal nu niet meer loodrecht op het mes zijn, maar daar een hoek  $\delta$  mee maken. De hoek  $\delta$  wordt de zand-staal wrijvingshoek genoemd. De wrijvingshoek zal afhankelijk zijn van het materiaal van het mes, voor staal kan algemeen aangenomen worden dat geldt:  $\delta = \frac{2}{3}\phi$  [Verruijt, 1990].

Als gevolg van dilatantie zullen *wateronderspanningen* optreden, zoals al in paragraaf 4.1.1 besproken is. Het bepalen van deze wateronderspanningen is niet makkelijk. In [Verruijt, 1995] wordt het bepalen van de wateronderspanning gemodelleerd als een put met een imaginaire bron. Net als in paragraaf 4.1.3 kan aangenomen worden dat door de filtercake cavitatie op zal treden. De wateronderspanning is dan bekend.

De ontgravingsruimte is gevuld met een *steunvloeistof*, die de stabiliteit van het boorfront moet garanderen. Dit gebeurt door de steunvloeistof onder druk te zetten. De druk van de steunvloeistof zal een belasting op de wig uitoefenen. Door de aanwezigheid van een slecht doorlatende filtercake op het boorfront zal de belasting van de steunvloeistof volledig op de wig werken (zie paragraaf 3.2.1.2). De steunvloeistof zal ook een belasting op het mes uitoefenen.

In figuur 4.10 wordt uitgegaan van een oneindig brede wig, terwijl een mes wel een eindige breedte heeft. Door uit te gaan van een eindige breedte, zal ook rekening gehouden moeten worden met *wrijvingskrachten aan de zijkanten van de wig*. De gesneden grond zal zich t.o.v. de omringende grond verplaatsen, op het grensvlak zullen dan schuifspanningen ontstaan. Op het grensvlak zullen door de vervormingen ook wateronderspanningen voorkomen. Hier kan ook aangenomen worden dat cavitatie zal optreden. Door deze wateronderspanningen zullen de korrelspanningen op het grensvlak toenemen en de schuifspanningen dus ook.

Al deze krachten zijn in figuur 4.11 te zien.



Figuur 4.11 Coulomb aangepast voor het snijproces.

In figuur 4.11 is geen rekening gehouden met de beweging van de ontgraven grond over het mes. De vorm van de wig zal er anders uit komen te zien als hier wel rekening mee gehouden zou worden, zoals in paragraaf 4.1.2 gedaan is. In principe geeft de schematisering volgens figuur 4.11 een 'statische' situatie weer.

Vergelijking (4.29) geldt voor de schematisering in figuur 4.10. Voor de schematisering volgens figuur 4.11 zal een andere relatie gelden voor de afschuifhoek. De afschuifhoek is die hoek waarbij de kracht om de wig te bezwijken minimaal is.

#### 4.1.6 Evaluatie van de methoden om de snijkrachten te bepalen

Wat opvalt is dat na de aanname dat er caverend gesneden wordt, alle modellen gewoon krachterevenwichten zijn die alleen anders zijn gemodelleerd. Wat er wel of niet wordt meegenomen in de berekeningen hangt van de situatie af. Zo kan de traagheidskracht verwaarloosd worden omdat de snijsnelheden relatief laag blijven.

De modellen beschreven in paragraaf 4.1.2 en 4.1.3 zullen gebruikt worden voor het berekenen van de snijkrachten. Door uit te gaan van een simpel model (passief bezwijken) en deze aan te passen voor het snijproces, wordt een bijna gelijkwaardig model gevonden (in paragraaf 4.1.5) om de snijkrachten te berekenen.

In het tijdsbestek van dit afstudeerproject was niet genoeg tijd om het model uit paragraaf 4.1.4 uit te werken. Dit kwam omdat pas in een laat stadium bekend werd hoe de beitels er precies uit zullen zien. In eerste instantie was uitgegaan van een meshoek van 60 graden en hiervoor gelden de modellen die zijn uitgewerkt wel voor.

## 4.2 Het snijden van klei

Bij het snijden van klei is het van belang te weten of het bezwijken van de grond gedraineerd dan wel ongedraineerd plaatsvindt. Van gedraineerd gedrag is sprake als tijdens het bezwijken het porienwater naar het gebied met een lagere porienwaterspanning stroomt, zonder dat de volumeverandering van de grond gehinderd wordt. Bij ongedraineerd bezwijken zal er geen stroming van porienwater plaatsvinden, met als gevolg dat er geen

volumeverandering zal optreden. De overgang van gedraineerd naar ongedraineerd snijden wordt beschreven met het kental van Peclet:

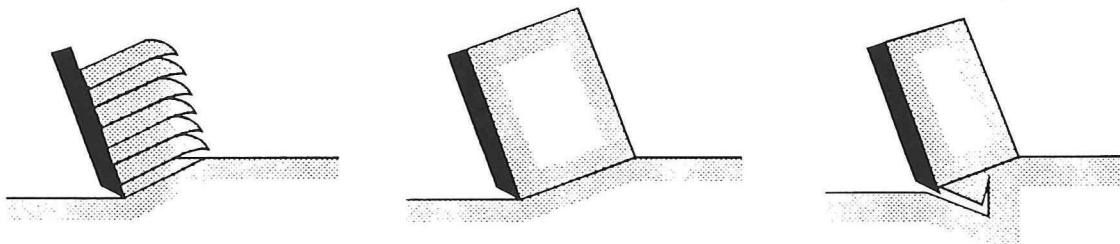
$$\xi_{pc} = \frac{v_s l}{c_v} \quad (4.30)$$

Met:

$\xi_{pe}$	: het kental van Peclet	[-]
$l$	: karakteristieke lengtemaat (snijdiepte)	[m]
$v_s$	: snijsnelheid snij-element	[m/s]
$c_v$	: consolidatiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]

Volledig gedraineerd snijden vindt plaats als het Peclet-getal kleiner is dan 1. Als het Peclet-getal groter is dan 10 is er sprake van ongedraineerd snijden. Het gebied hiertussen is een overgangsgebied. Bij een consolidatiecoëfficiënt van  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, een snijdiepte van 0.01 m en een snijsnelheid van 0.1 m/s is  $\xi_{pe} = 1000$ . Dit zijn reële waarden voor het boren in klei. Er kan dus aangenomen worden dat bij het boorproces altijd sprake is van ongedraineerd snijden.

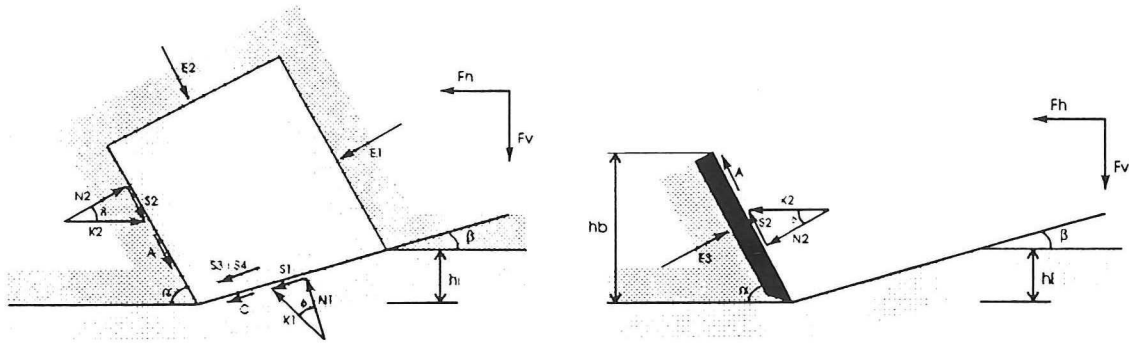
Bij het snijden van cohesieve materialen zijn drie verschillende bezwijkvormen te onderscheiden; schuifvlakvormend, plastisch bezwijken en scheurvorming. De bezwijkvormen zijn in de onderstaande figuur weergegeven.



Figuur 4.12 Bezwijkvormen; schuifvlakvormend, plastisch en scheurvormend.

Welke van de drie bezwijkvormen op zullen treden is afhankelijk van de mineralogische samenstelling, sterkte, operationele parameters en de vorm van het mes. Heel globaal kan aangenomen worden dat bij het toenemen van de snijdiepte de bezwijkvormen overgaan van schuifvlakvormend, naar plastisch bezwijken naar scheurvormend. De overgang van plastisch bezwijken naar scheurvorming wordt ook bepaald door de meshoek, bij een grotere meshoek zal plastisch bezwijken optreden. Bij het boorproces kan aangenomen worden dat het bezwijkgedrag plastisch zal zijn.

Het plastisch bezwijken van klei heeft dan hetzelfde bezwijkmechanisme als het snijden van zand. Dus de basistheorie van Miedema kan gebruikt worden voor het afleiden van een snijmodel voor klei.



Figuur 4.13 Krachten op de gesneden schil en het mes, snijden van klei.

Zoals uit deze paragraaf blijkt zal klei bij het snijden een ongedraineerd gedrag vertonen. Doordat het poriënwater niet kan ontsnappen zullen bij het belasten van een mootje klei de spanningen opgenomen worden door de waterspanningen. De korrelspanningen zullen constant blijven. De schuifspanning wordt niet bepaald door de korrelspanningen maar door de cohesie: dit wordt de ongedraineerde schuifsterkte genoemd. In de vergelijking van Coulomb is dit weer te geven door voor de hoek van inwendige wrijving nul te nemen ( $\phi = 0$ ).

De vergelijkingen in paragraaf 4.1.1 kunnen nu aangepast worden. Doordat het snijden van klei ongedraineerd is, zullen de krachten  $W1$  en  $W2$  uit de vergelijking gehaald moeten worden. Verder moeten de hoek van inwendige wrijving en de klei-staal wrijvingshoek tot nul gereduceerd worden. De schuifkrachten  $S3$  en  $S4$  zullen door de cohesie er nu als volgt uit zien:

$$S3 = 0,5\left(\frac{3}{5}h_i\right)^2 (\cot(\alpha) + \cot(\beta))(c + p_n \tan(\phi)) \quad (4.31)$$

$$S4 = 0,5\left(\frac{2}{5}h_i\right)^2 (\cot(\alpha) + \cot(\beta))(c + p_n \tan(\phi)) \quad (4.32)$$

De kracht  $K2$  volgt nu uit (4.4) aangepast en (4.21).

$$K22 = \frac{C \cos(\phi) - A \cos(\alpha + \beta + \phi)}{\sin(\alpha + \beta + \delta + \phi)} \quad (\text{aangepast}) \quad (4.33)$$

$$K2 = K22 + K23 \quad (4.34)$$

Voor de krachten op het mes betekent dit:

$$F_h = K2 \sin(\alpha + \delta) + A \cos(\alpha) - E3 \sin(\alpha) \quad (4.35)$$

$$F_v = K2 \cos(\alpha + \delta) - A \sin(\alpha) - E3 \cos(\alpha) \quad (4.36)$$

Een aspect dat zich voordoet bij klei is het dynamische gedrag van de cohesie. De cohesie zal toenemen bij een grotere bezwijknelheid. Voor dit gedrag is in [Miedema, 1992] de volgende relatie gegeven voor de schuifsterkte:

$$\tau = \tau_y + \tau_0 \ln \left[ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right] \quad (4.37)$$

Met:

$\tau$	: schuifspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\tau_y$	: statische schuifspanning (= de ongedraineerde schuifsterkte)	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\tau_0$	: een constante waarde	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	: vervormingssnelheid bij het snijden	[m/s]
$\varepsilon_0$	: vervormingssnelheid in het lab bij het bepalen van $\tau_y$	[m/s]

Dit aspect is in de berekeningen echter niet meegenomen.

### 4.3 Het snijden van zandige klei of kleilig zand

In de Nederlandse bodem komen weinig homogene grondlagen voor. Zo komen zandlagen voor met dunne kleilagen. In de grondparameters is dit terug te vinden door de cohesie die deze zandlaag heeft. Hetzelfde geldt voor de kleilagen waarin zand voorkomt. Deze lagen zullen een grote hoek van inwendige wrijving hebben. Als zand een cohesie heeft en klei een grote hoek van inwendige wrijving, dan zou men denken dat de grondsoorten een zelfde gedrag zullen vertonen. Dit is echter niet juist. Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat klei zich anders gedraagt dan zand. Dit komt omdat het snijden van klei ongedraineerd gebeurt. Dit wordt bepaald door het getal van Peclet (zie paragraaf 4.2).

Als het getal van Peclet kleiner is dan 1, dan zal het model voor het snijden van zand gebruikt moeten worden. Nu moet wel rekening worden gehouden met de cohesie en adhesie. Dit heeft als gevolg dat de kracht K2 er nu als volgt uit komt te zien (K2 volgt uit (4.3), (4.21) en (4.33)):

$$K2 = K21 + K22 + K23 \quad (4.38)$$

Op het mes moet nu ook de adhesie worden meegenomen in de berekeningen van de krachten op het mes. Voor de krachten op het mes gelden nu de vergelijkingen (4.22) en (4.23).

Is het getal van Peclet groter dan 10, dan zal het model voor het snijden van klei gebruikt moeten worden. Nu moet wel rekening gehouden worden met de hoek van inwendige wrijving. Door de aanwezigheid van de zandkorrels zal de hoek van inwendige wrijving niet op nul gesteld kunnen worden.

## 5. BEREKENING VAN DE VIJZELKRACHTEN

### 5.1 Inleiding

De vijzels moeten de TBM vooruit duwen. De vijzels kunnen in series van twee afzonderlijk bediend worden, zo is het mogelijk de machine te sturen.

De meeste krachten werken in de axiale richting op de vijzels. Het is mogelijk dat de wrijvingskrachten langs de mantel niet groot genoeg zijn om het totale koppel op het graafwiel op te nemen. Door de vijzels onder een hoek te zetten is het ook mogelijk deze tangentiële krachten op te nemen.

In de volgende paragrafen zijn de krachten bepaald welke samen de totale vijzelkrachten beïnvloeden. De berekeningen in de bijlagen zijn uitgevoerd m.b.v. het computer programma Mathcad.

### 5.2 Steundruk

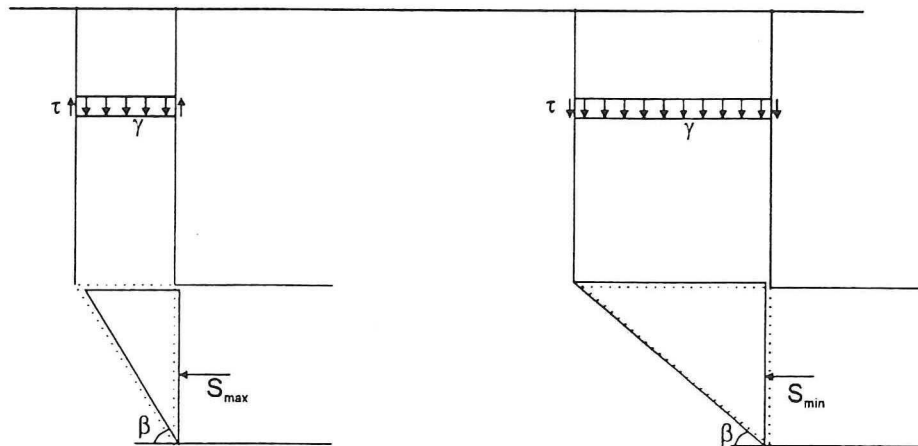
De ontgravingsruimte is met een steunvloeistof gevuld. De druk van deze vloeistof moet ervoor zorgen dat het boorfront niet zal bezwijken. De druk die op het front wordt gezet komt ook op de TBM te staan (via het drukschot). Het is dus niet de gronddruk die de vijzelkrachten beïnvloedt, maar de druk van de steunvloeistof. De druk van de steunvloeistof wordt op zijn beurt bepaald door de gronddruk, voornamelijk de waterdruk. Bepaald moet worden de steundruk zodanig dat het boorfront niet bezwijkt. In [Projectbureau Boortunnels, Supplement, 1995] is formule (5.1) gegeven voor het bepalen van de steundruk.

$$\sigma_{\text{front}} \approx K_a \sigma_{k,v} + 1,05\sigma_w \quad (5.1)$$

Waarin:

$\sigma_{\text{front}}$	: De steundruk	[kPa]
$\sigma_{k,v}$	: De verticale korrelspanning	[kPa]
$\sigma_w$	: De waterspanning	[kPa]
$K_a$	: De coëfficiënt van de actieve gronddruk	[-]

De waarde voor de korrelspanning en de waterspanning worden ter hoogte van het hart van de TBM bepaald. Een soortgelijke formule is door Coulomb gebruikt om de (statische) spanningen op een (oneindig brede) grondkerende constructie uit te rekenen. Voor een buis in de grond zal een ander mechanisme optreden dan bij een grondkerende constructie. Gezocht zal moeten worden naar de belastingen die het boorfront zullen laten bezwijken, zowel instorten als opdrukken. Voor het bezwijken zal een bezwijkmechanisme moeten optreden. Er zijn twee bezwijkmechanismen te onderscheiden; actief en passief. Het actief bezwijken van het boorfront is de situatie dat het front instort. Het passief bezwijken zal zich voordoen als de steundruk zo groot is dat de grond omhoog wordt gedrukt. De beide mechanismen zijn in figuur 5.1 weergegeven.

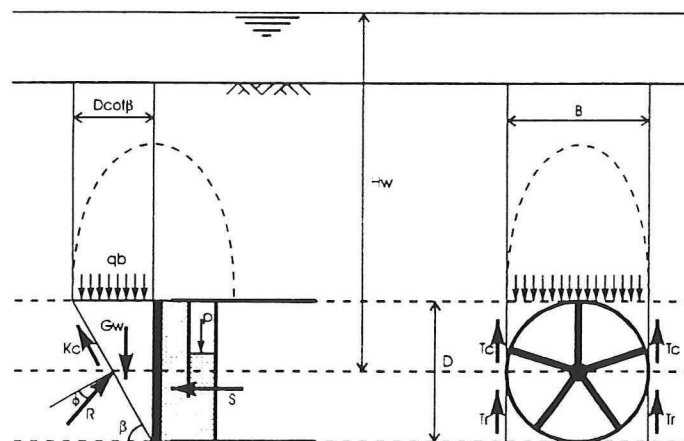


Figuur 5.1 Bezwijkmechanismen: actief en passief.

Het bezwijkmechanisme bestaat uit een grondzuil en een wig. De grondzuil zorgt voor de bovenbelasting (zie paragraaf 3.3) en de wig zal over een afschuielhoek bezwijken. Het zal duidelijk zijn dat beide mechanismen een onder- en een bovengrens van de steundruk geven. Deze grenzen zullen bepaald worden.

### 5.2.1 Ondergrens van de steundruk

Uit de literatuur [Jancsecz, 1994] en [Walz, 1983] kan voor het actieve bezwijkmechanisme de volgende schematisering worden gemaakt.



Figuur 5.2 Schematisering bezwijkmechanisme boorfront (actief)

De belasting die de grondzuil op de wig uitoefent wordt bepaald volgens de methode zoals in paragraaf 3.3 beschreven, er wordt dus rekening gehouden met gewelfwerking. Voor de wig kan een krachtenevenwicht worden opgesteld en hieruit kan de kracht bepaald worden die de grond (effectief) op het front uitoefent. Voor deze kracht geldt de volgende relatie:



$$E = \frac{(G_b + G_w)(\sin(\beta) - \cos(\beta) \tan(\phi)) - (K_c + 2(T_c + T_r))}{\sin(\beta) \tan(\phi) + \cos(\beta)} \quad (5.2)$$

Met:

E	: de totale kracht als gevolg van de korrels	[kN]
G <sub>b</sub>	: het gewicht van de bovenliggende lagen	[kN]
G <sub>w</sub>	: het gewicht van de wig.	[kN]
K <sub>c</sub>	: de kracht als gevolg van de cohesie aan de voorkant van de wig	[kN]
T <sub>c</sub>	: de kracht van de cohesie aan de zijkant van de wig	[kN]
T <sub>r</sub>	: de wrijvingkracht aan de zijkant van de wig	[kN]
β	: de afschuifhoek	[rad]
φ	: hoek van inwendige wrijving	[rad]

en voor de totale steunkracht geldt:

$$S = E + W \quad (5.3)$$

Met:

S	: de totale steunkracht	[kN]
W	: de kracht als gevolg van de waterdruk	[kN]

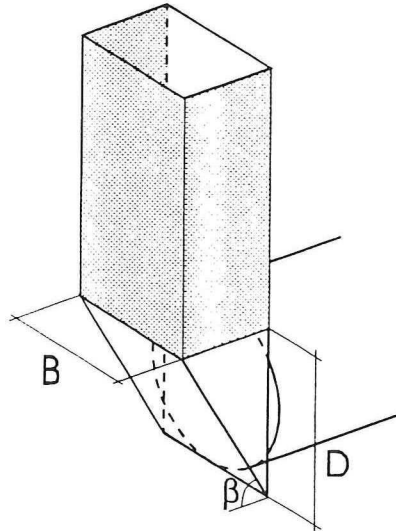
De afschuifhoek is onbekend. Bij actief bezwijken moet de hoek bepaald worden waarbij de steunkracht maximaal is (Coulomb). De afschuifhoek gegeven door Coulomb voor actief bezwijken, zal kleiner zijn dan de afschuifhoek die uit de bovenstaande formule wordt gevonden. Dit komt door de krachten die op de zijkanten van de wig werken. Bij het bepalen van de wrijvingskracht op deze zijkanten is het belangrijk te weten hoe groot de (horizontale) korrelspanningen zijn die op de zijkanten van de wig werken. Hoe de horizontale korrelspanning bepaald wordt, wordt in paragraaf 5.2.3 beschreven. Uit die paragraaf blijkt dat om aan de veilige kant te zitten, de coëfficiënt van actieve korrelspanning gebruikt wordt bij de berekeningen voor de schuifspanningen aan de zijkant van de wig.

De afschuifhoek bepaalt de grootte van de oppervlakten waar de krachten op werken. Dit geldt o.a. ook voor de kracht als gevolg van het gewicht van de bovenliggende lagen. Bij het bepalen van het gewicht van de bovenliggende lagen wordt uitgegaan van gewelfwerking (zie paragraaf 3.3). Gewelfwerking: het gewicht van de grond wordt behalve door het volumegewicht ook bepaald door de schuifspanning. Bij het bezwijkmechanisme in figuur 5.2 heeft de grondzuil de vorm van een balk met een oppervlakte en een omtrek. In de berekeningen wordt voor de omtrek dat gedeelte genomen dat in contact is met de omringende grond. Aangenomen wordt dat voor dit bezwijkmechanisme de gereduceerde omtrek van de grondzuil gebruikt moet worden in de berekeningen. Schuifspanningen treden op als vlakken ten opzichte van elkaar verschuiven. Voor de omtrek wordt daarom dat deel van de totale omtrek genomen dat t.o.v. de omringende grond verplaatst, dit geldt alleen voor de zijkanten en de voorkant van de grondzuil. Dit is het gearceerde gebied in figuur 5.3. Doordat boven het schild van de TBM de grond blijft zakken (consolidatie en conische vorm van de TBM), zal de achterkant van de grondzuil niet t.o.v. deze grond verplaatsen. Hier zullen dus geen schuifspanningen voorkomen. Voor de omtrek U (zie vergelijking (3.5) en (3.6)) geldt nu:

$$U = B + 2 \cdot D \cot(\beta) \quad (5.4)$$

Met:

- B : De breedte van de wig [m]  
 D : De diameter van de TBM [m]  
 $\beta$  : De afschuifhoek van de wig [rad]



Figuur 5.3 Omtrek van de grondzuil waar schuifspanningen optreden

Voor de wig is een rechthoekige vorm gekozen, dit zal in werkelijkheid niet zo zijn. Het blijkt echter dat deze benadering goede resultaten oplevert [Jancsecz, 1994] en dat een verdere verbetering van de vorm van de wig niet noodzakelijk is. Omdat de wig een rechthoekige vorm heeft, zal de steunkracht op een rechthoekig vlak werken. De doorsnede van de TBM heeft een cirkelvorm. Aangezien de steundruk bepaald wordt uit de steunkracht (steundruk = steunkracht/oppervlakte), zal de oppervlakte waar de rechthoekige wig op steunt even groot moeten zijn als de oppervlakte van de doorsnede van de TBM. Voor de breedte van de wig geldt (bij een hoogte D) dan:

$$B = \frac{\pi D}{4} \quad (5.5)$$

Met:

- B : breedte van de wig [m]  
 D : de diameter van de TBM [m]

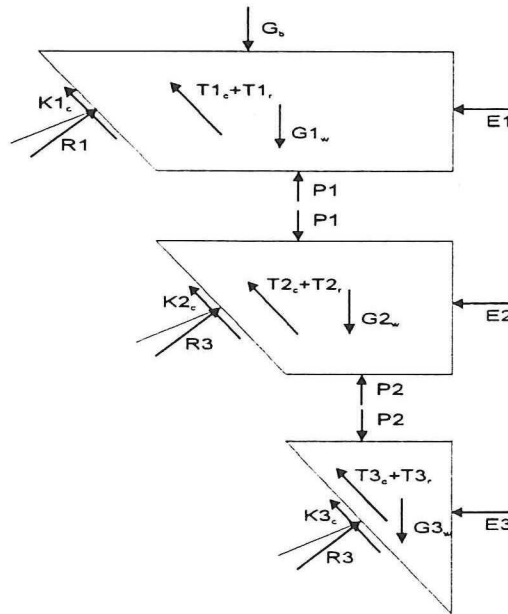
De steundruk wordt opgebouwd uit de luchtdruk en de steunvloeistofdruk. Voor het bepalen van de steunvloeistofdruk is de dichtheid van de steunvloeistof nodig. Hoe de dichtheidsverdeling over de hoogte in de ontgravingsruimte er precies uit ziet is niet bekend, wel zijn de grenzen waar de dichtheid tussen varieert bekend. De bentoniet-suspensie die de ontgravingsruimte in wordt gepompt heeft een dichtheid van  $1050 \text{ kg/m}^3$  en de vloeistof die weggepompt wordt zal maximaal een dichtheid van  $1200 \text{ kg/m}^3$  hebben. De dichtheid in de ontgravingsruimte zal tussen deze twee waarden in liggen. Voor het bepalen van de ondergrens van de luchtdruk zal uitgegaan worden van de maximale dichtheid. Dit is niet

erg onwaarschijnlijk omdat de vloeistof in de ontgravingsruimte door het graafwiel continue omgewoeld wordt.

Uit de berekeningen blijkt dat het verschil in de benodigde luchtdruk bij de twee verschillende dichtheden kleiner is dan de nauwkeurigheid waarmee de luchtdruk geregeld kan worden (0.05 bar), [KIVI, 1993].

Vergelijking (5.2) geldt voor een homogene grondsoort, zoals bij profiel 1. Bij de grondprofielen 2 en 3 wordt de berekening van de steundruk iets complexer i.v.m. de verschillende lagen die bij het front voorkomen. De wig zal een andere vorm krijgen omdat iedere laag een specifieke afschuifhoek zal hebben. Om de berekeningen te vereenvoudigen wordt echter voor iedere laag dezelfde afschuifhoek genomen.

De krachten die werken op de verschillende lagen zien er als volgt uit:



Figuur 5.4 Krachten op de wig met verschillende lagen.

De krachten  $P_1$  en  $P_2$  zijn de krachten die de lagen op elkaar uitoefenen. Hoe groot deze krachten precies zijn is niet bekend. Aangenomen wordt dat de kracht gelijk is aan de verticale korrelspanning maal de oppervlakte waar de spanning op werkt. Dit is niet helemaal juist, maar uit controle berekeningen (bijlage 10.1.2) blijkt dat de fout voor de steunkracht kleiner is dan 2 %.

### 5.2.2 Bovengrens van de steundruk

Het is ook denkbaar dat de steundruk zo groot wordt dat de grond opgedrukt wordt. De druk waarbij dit optreedt kan de bovengrens van de steundruk zijn. Het is mogelijk dat een ander bezwijkmechanisme eerder optreedt dan is weergegeven in figuur 5.1. Bij het bepalen van de bovengrens van de steundruk in deze paragraaf wordt echter uitgegaan van de passieve bezwijkvorm uit figuur 5.1.

Doordat de richting van het bezwijken verandert, zullen ook de krachten als gevolg van de wrijving ( $T_r$ ) en de cohesie ( $K_c$  en  $T_c$ ) van richting veranderen. Dit heeft als gevolg dat de vergelijking (5.2) er nu als volgt uit komt te zien:

$$E = \frac{(G_b + G_w)(\sin(\beta) + \cos(\beta) \tan(\phi)) + (K_c + 2(T_c + T_r))}{-\sin(\beta) \tan(\phi) + \cos(\beta)} \quad (5.6)$$

Voor het bepalen van de steunkracht moet nu echter uitgegaan worden van de minimale kracht waarbij bezwijken zal optreden. Dus de afschuifhoek moet bepaald worden waarbij de steunkracht minimaal is.

Net als in de vorige paragraaf is het nu weer belangrijk te weten hoe groot de korrelspanningen zijn die op de zijkant van de wig werken. Om aan de veilige kant te zitten met de berekeningen wordt uitgegaan van de neutrale korrelspanning (zie paragraaf 5.2.3).

Bij het opdrukken van de grondzuil zal de schuifkracht in dezelfde richting werken als het gewicht, de grondzuil wordt zwaarder dan het gewicht van de grondzuil alleen. In paragraaf 5.2.1 wordt bij het bepalen van de belasting van de bovenliggende lagen de gereduceerde omtrek gebruikt waar de schuifspanning op werkt. De omtrek ( $U$ ) is afhankelijk van de vlakken die t.o.v. elkaar verschuiven. Bij het passief bezwijken zal de totale omtrek van de grondzuil t.o.v. van de omringende grond verschuiven. In de berekeningen moet dan ook de totale omtrek gebruikt worden.

De steundruk wordt geregeld met de luchtdruk in het luchtkussen. De bovengrens van de steundruk bepaalt dus ook de bovengrens van de luchtdruk. De luchtdruk is afhankelijk van de dichtheid van de steunvloeistof. Het extreme geval doet zich voor als de dichtheid van de steunvloeistof gelijk is aan  $0 \text{ kN/m}^3$ , de ontgravingsruimte is nu alleen gevuld met lucht. De ontgravingsruimte zal met lucht gevuld worden als bijvoorbeeld obstakels verwijderd moeten worden of als de beitels vervangen moeten worden. Volgens de Nederlandse wetgeving mag er niet gewerkt worden bij een luchtdruk die groter is dan 3,5 bar (zie Caissonbesluit en de beschikking 'Uitvoering Caissonbesluit' van resp. 1968 en 1970). Uit de berekeningen blijkt dat het bezwijken pas optreedt bij grotere drukken dan 3,5 bar.

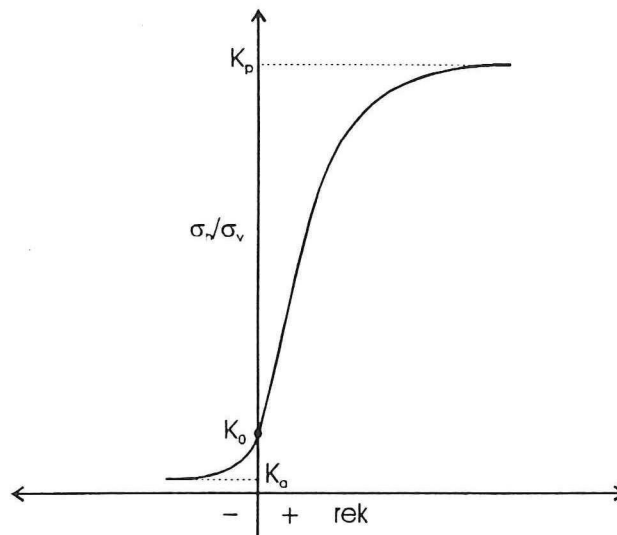
Verder zal er zich ook geen andere situatie voordoen waarbij het opdrukken van de grond zal optreden. Er wordt altijd bij het ontwerp van een tunnel rekening gehouden met dit aspect. Hier komt de minimale dekking van 1 maal de diameter vandaan. Het is ook niet logisch om met grote steundrukken te werken, want grotere steundrukken geven grotere vijzelkrachten en het ontgraven van de grond met het graafwiel zal een hoger koppel (vermogen) met zich mee brengen.

Ook nu geldt zoals in de vorige paragraaf voor profielen 2 en 3 dat de afschuifhoeken verschillend zullen zijn. Er wordt weer uitgegaan van dezelfde afschuifhoek voor alle lagen. Voor de krachten tussen de lagen geldt hetzelfde als in de vorige paragraaf. De korrelspanning zal nu echter wel een grotere waarde hebben; dit komt door het passief bezwijken. Het gewicht van de bovenliggende lagen zal groter worden, waardoor ook de korrelspanningen groter worden.

### 5.2.3 De horizontale grondspanning ?

Voor het bepalen van de wrijvingskracht op de zijkant van de wig ( $T_r$ ) in vergelijking (5.2) en (5.6) moet de horizontale korrelspanning op de zijkant van de wig bekend zijn. Afhankelijk van het gedrag van de grond zal de horizontale korrelspanning bepaald kunnen worden. Bekend zijn de actieve, de neutrale en de passieve korrelspanningen. Afhankelijk van de vervorming zal de korrelspanning bepaald worden. De vervorming is afhankelijk van de spanningen in de wig en de omringende grond. Als de korrelspanningen in de wig even

groot zijn als in het grondmassief dan zullen er geen vervormingen optreden en zal de horizontale korrelspanning de neutrale korrelspanning zijn. De horizontale korrelspanning is gelijk aan het produkt van de verticale korrelspanning en een coëfficiënt. In figuur 5.5 is de verhouding tussen de horizontale en de verticale korrelspanning uitgezet tegen deze coëfficiënt.



Figuur 5.5 Coëfficiënt van de gronddruk uitgezet tegen de rek.

Welke coëfficiënt van de gronddruk gebruikt moet worden hangt af van van het gedrag van de wig.

#### Actief bezwijken (paragraaf 5.2.1)

Bij het actief bezwijken van de wig zijn de korrelspanningen in de wig kleiner dan in de omringende grond. Het gewicht van de bovenliggende lagen is kleiner bij de wig dan in de omringende grond (gewelfwerking), waardoor ook de korrelspanningen kleiner zijn. De vervorming is nu negatief en dit betekent (zie figuur 5.5) dat de coëfficiënt tussen de actieve en de neutrale waarde in ligt. Het is niet nodig om de vervorming te bepalen om zo de exacte waarde van de coëfficiënt te weten te komen. Bij het bepalen van de afschuifhoek moet de maximale waarde van de steundrukkracht bepaald worden (het ergste geval). Hoe kleiner de wrijvingskracht op de zijkant van de wig des te groter wordt de steundrukkracht. De kleinste wrijvingskracht wordt gevonden in het geval van de *actieve korrelspanning* op de zijkant van de wig.

Dezelfde redenering geldt ook voor de horizontale korrelspanningen op de zijkanten van de grondzuil bij het bepalen van het gewicht van de bovenliggende lagen (gewelfwerking). Zie paragraaf 3.3 en bijlage 9 voor de formule voor de belasting van de bovenliggende lagen bij actief bezwijken.

#### Passief Bezwijken (paragraaf 5.2.2)

Bij het passief bezwijken van de wig zijn de korrelspanningen in de wig groter dan in de omringende grond (gewelfwerking). De vervorming (zie figuur 5.5) zal nu positief zijn, waardoor de coëfficiënt van de gronddruk tussen de neutrale en de passieve waarde in ligt. Nu geldt echter bij het bepalen van de afschuifhoek dat de minimale kracht (het eerste moment) bepaald moet worden waarbij bezwijken optreedt. Door de verandering van de richting van bezwijken is ook de richting van de wrijvingskracht veranderd. Nu geldt dat de

steundrukkracht kleiner wordt naarmate de wrijvingskracht op de zijkant van de wig kleiner wordt. De wrijvingskracht is minimaal bij een *neutrale korrelspanning* op de zijkant van de wig.

Dezelfde redenering geldt ook voor de horizontale korrelspanningen op de zijkanten van de grondzuil bij het bepalen van het gewicht van de bovenliggende lagen (gewelfwerking) bij passief bezwijken. Zie bijlage 9 voor de formule voor het gewicht van de bovenliggende lagen bij passief bezwijken.

### 5.3 Het verdringen van de grond voor de as van het graafwiel

Zoals in paragraaf 3.2.2 is beschreven zal voor de as van het graafwiel zich een grondprop vormen. Voor de grondprop is een kegelvorm aangenomen, hiervan zal de straal van het grondvlak van de kegel ongeveer gelijk zijn aan de straal van de as van het graafwiel. Voor de Heinenoordtunnel wordt voor deze straal 0,75 m genomen.

Het verdringen van grond werd vergeleken met het passief bezwijken van grond, voor de afschuifhoek bij passief bezwijken (2-D) is door Coulomb de volgende relatie gevonden:

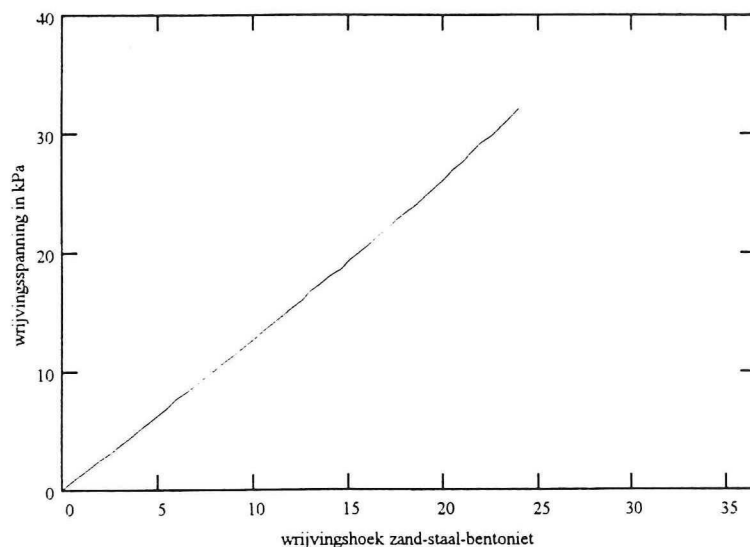
$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \quad (5.7)$$

Bij de profielen 2 en 3 komen er meer lagen voor, hier zal de bovenstaande relatie niet meer gelden. Eerder in paragraaf 3.2.2 is de vergelijking met de vorm van de conus van een sondeer apparaat gemaakt, hier is de hoek 30 graden. Deze hoek kan gebruikt worden als de afschuifhoek.

De kracht die overwonnen moet worden is de schuifspanning over het oppervlak van de kegel. Hiervoor zal de radiale korrelspanning op de kegel bepaald moeten worden. Aangezien de voortgangssnelheid van de TBM erg klein is, worden de effecten op het afschuifvlak als gevolg van wateronderspanningen verwaarloosd.

### 5.4 Mantelwrijving

In paragraaf 3.2.3 is de formule gegeven voor het bepalen van de radiale korrelspanning werkend op de mantel van de TBM. In dezelfde paragraaf is er ook een formule gegeven waarmee de schuifspanning bepaald kan worden. Uit deze twee formules is de wrijvingskracht te bepalen die op de mantel werkt. Er is echter een probleem: de wrijvingshoek tussen zand, bentoniet en staal is niet bekend. Doordat er oversneden wordt bij het ontgraven, zal zich tussen de grond en de mantel een dun laagje bentonietsuspensie bevinden. Omdat het bentoniet ook de grond indringt zal naast het dunne laagje bentoniet ook de grond over een geringe dikte gemengd zijn met bentoniet. Beide aspecten zullen voor een kleinere wrijvingshoek zorgen dan de grond/staalwrijvinghoek. De grond zal de suspensie echter wegdrücken waardoor een mix van zand, water en bentoniet om de mantel aanwezig zal zijn. Het is niet bekend hoe groot de wrijvingshoek nu wordt, in ieder geval zal de wrijvingshoek kleiner of maximaal gelijk zijn aan de zand-staal wrijvingshoek. In de figuur 5.6 is voor profiel 1 de spanning op de mantel als gevolg van de wrijving uitgezet tegen de wrijvingshoek.



Figuur 5.6 De wrijvingsspanning als functie van de zand-staal-bentoniet wrijvingshoek

Bij de berekeningen is bij het bepalen van de bovenbelasting, uitgegaan van 2-D gewelfwerking. Dit betekent dat alleen de schuifspanning aan de zijkanten van de grond wordt meegenomen in de berekeningen. Dit kan gedaan worden omdat de grond zich boven de TBM alleen t.o.v. het grondmassief aan beide zijkanten verplaatst. Dat de grond zich verplaatst komt door het oversnijden, de conische vorm van de TBM en in mindere mate door consolidatie. Nu geldt voor de omtrek ( $U$ ) en de oppervlakte ( $F$ ) in de formules van paragraaf 3.3:

$$U = 2 \quad (5.8)$$

$$F = D \quad (5.9)$$

De berekeningen voor profiel 2 en 3 zijn niet gecompliceerder dan voor profiel 1. Er moet alleen rekening gehouden worden met verschillende grondeigenschappen over de omtrek van de mantel.

Het enige probleem doet zich voor bij cohesieve grondsoorten. Bij profiel 3 bevindt de machine zich grotendeels in een kleilaag. Door de slechte doorlatendheid van klei zal de bentoniet niet in de poriën van de klei dringen. Dit betekent dat de klei de bentoniet zal moeten verdringen om contact te kunnen maken met het schild. Er zullen plaatsen voorkomen waar of bentoniet of klei contact met de mantel heeft. Wat dit precies betekent voor de wrijvingskrachten is nog onbekend, hier zullen metingen in de praktijk uitkomst moeten bieden.

## 5.5 Tangentiële vijzelkracht

Het koppel dat als gevolg van het ontgraven op de TBM komt te staan, moet afgedragen kunnen worden om te voorkomen dat de machine mee gaat draaien. De schuifspanning op de mantel van de TBM moet deze kracht kunnen opvangen.

Als de wrijving te klein is zullen de vijzels de krachten moeten opvangen. Het is mogelijk de vijzels onder een hoek te zetten, waardoor deze tangentiële belasting opgevangen kan worden.

Uit de vorige paragraaf is gebleken dat het berekenen van de mantelwrijving vanwege vele onzekerheden niet goed uitgevoerd kan worden. Wat zeker is, is dat het totale koppel dat op de TBM komt te staan door de mantelwrijving en de vijzels moet kunnen worden afgedragen. Aangenomen wordt dat de kracht als gevolg van het koppel aangrijpt ter plaatse van de mantel. Er geldt dus:

$$T = \frac{D}{2} (F_{\text{wrijving}} + F_{\text{tangentiaal}}) \quad (5.10)$$

Met:

T	: het totale koppel op de TBM	[kNm]
D	: de diameter van de TBM	[m]
$F_{\text{wrijving}}$	: de wrijvingskracht	[kN]
$F_{\text{tangentiaal}}$	: de tangentiële vijzelkracht	[kN]

Uit de berekeningen van het totale koppel en de mantelwrijving zal blijken hoe groot de tangentiële vijzelkracht moet zijn.

De berekeningen bij profiel 2 en 3 zullen op dezelfde manier gedaan worden.

De tangentiële vijzelkracht werkt loodrecht op alle andere (axiale) vijzelkrachten, dit betekent dat de totale vijzelkracht een scalaire grootheid is. De vectoriële som van de axiale en de tangentiële vijzelkrachten zal de totale vijzelkracht opleveren.

## 5.6 Snijkrachten

Uit de berekening van de snijkrachten (zie bijlage 13 t/m 15) zal ook een component in de bewegingsrichting (axiaal) van de TBM volgen. Dit is in de berekeningen de kracht  $F_v$ . De richting van de kracht zal bepalen of het mes zich ingraaft of dat het mes de grond in gedrukt moet worden. In vergelijking met de kracht  $F_h$  (evenwijdig met de snijrichting) zal deze kracht klein zijn.

In de verschillende modellen komt een kracht  $W_3$  (wateronderspanning achter het mes) voor. Over deze kracht is nog weinig bekend. De empirische relatie gegeven in paragraaf 4.1.1 geldt niet voor meshoeken groter dan 60 graden. Omdat over deze kracht nog weinig bekend is, zal deze niet in de berekeningen meegenomen worden.

De snijkrachten worden in het volgende hoofdstuk uitgebreider beschreven.

## 5.7 Overige krachten

Op de machine werken nog meer krachten dan beschreven in de vorige paragrafen. Het is niet mogelijk alle krachten uit te werken. Nu volgen nog een paar krachten die niet groot, maar wel aanwezig zijn.

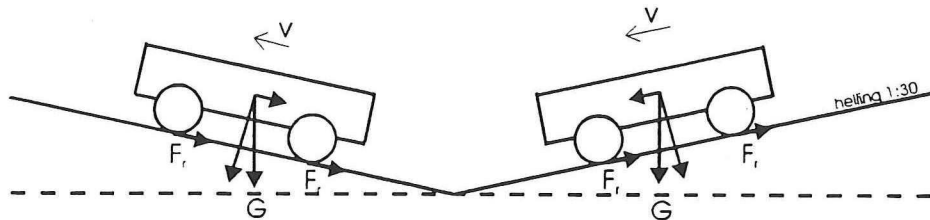
### 5.7.1 Meeslepen van installaties

Achter de machine is er nog een trein met installaties die moet worden meegesleept tijdens het vooruit gaan. Op deze trein zal o.a. een opslag voor de segmenten zijn en een kraan om ze te kunnen verplaatsen. Ook zal hier een pomp aanwezig zijn om het ontgravingsmengsel te verpompen. Omdat de tunnel steeds langer wordt moeten ook de aan- en afvoerbuizen verlengd worden. Deze buizen en een kraan om deze buizen te plaatsten zullen ook op de



trein aanwezig zijn. Verder zullen transformatoren aanwezig zijn voor de electriciteit die nodig is voor het hydrauliek, zoals de vjzjels en het graafwiel.

De kracht die nodig is voor het meeslepen, is afhankelijk van de helling van de tunnel en de rolweerstand. De maximale helling van de tunnel is 1:30. Het zal duidelijk zijn dat bij het boren naar het diepste punt toe de trein de TBM vooruit zal duwen en anders om zal de trein meegetrokken moeten worden. Een krachtenoverzicht is in de volgende figuur weergegeven:



Figuur 5.7 Krachten op de trein met installaties.

De trein met de installaties heeft een totaal gewicht van 174 ton.  $G$  is dus bekend. Voor de kracht als gevolg van de rolweerstand geldt de volgende relatie:

$$F_r = G_{\text{trein}} \cos(\alpha) \frac{c_r}{r} \quad (5.11)$$

Waarin:

$F_r$	: rolweerstandkracht	[kN]
$G_{\text{trein}}$	: het totale gewicht van de trein	[kN]
$\alpha$	: de hellingshoek	[rad]
$c_r$	: rolweerstandscoefficiënt	[-]
$r$	: straal van de wielen van de trein	[m]

Voor de rolweerstandscoefficiënt kan een waarde genomen worden tussen 0,1 en 0,25 [Polytechnisch zakboekje, 1995]. De straal van de wielen is niet bekend. De straal zal tussen de 5 en de 10 cm in liggen.

Voor de totale sleepkracht geldt nu:

$$F_{\text{sleep}} = F_r \pm G_{\text{trein}} \sin(\alpha) \quad (5.12)$$

### 5.7.2 Zwaartekracht

Net als voor de trein met installaties zal de TBM ook een component in axiale richting hebben als gevolg van de zwaartekracht. Een zelfde soort schematisering als bij de trein is nu van toepassing, alleen wordt de wrijvingskracht apart uitgerekend (zie paragraaf 5.4). Voor de kracht als gevolg van het gewicht van de TBM geldt:

$$F_{\text{gewicht}} = \pm G_{\text{tbn}} \sin(\alpha) \quad (5.13)$$

Met:

$G_{\text{tbn}}$	: het gewicht van de TBM	[kN]
------------------	--------------------------	------

Het gewicht van de TBM is bij elkaar gelijk aan 466 ton. In paragraaf 2.2 staat dat het gewicht van de TBM gelijk is aan 640 ton, maar dit is het gewicht van de TBM inclusief de trein met de installaties. Aangezien dit gewicht al wordt meegenomen in formule (5.12), zal in formule (5.13) het gewicht van de TBM exclusief de trein met installaties gebruikt moeten worden. Zie ook bijlage 7, tabel 4.

De kracht  $F_{\text{gewicht}}$  blijkt ook bij een maximale helling van 1:30 nog klein te zijn.

## 6. BEREKENING AANDRIJFKOPPEL GRAAFWIEL

### 6.1 Inleiding

Om de grond te kunnen ontgraven zal het graafwiel moeten draaien. Hier is een aandrieffkoppel voor nodig. Het graafwiel levert niet alleen krachten om te snijden. Ook het fenomeen van de grondprop (paragraaf 3.2.2) die voor de as van het wiel ontstaat zal krachten op het wiel uitoefenen. Verder zullen voor het bewegen van de spaken door de steunvloeistof ook krachten nodig zijn.

Het totaal te leveren koppel aan de as van het graafwiel bestaat uit:

- Koppel als gevolg van de snijkrachten
  - beitels
  - overcutters
- Koppel als gevolg van de grondprop tegen het graafwiel
- Koppel als gevolg van de stromingsweerstand langs de spaken

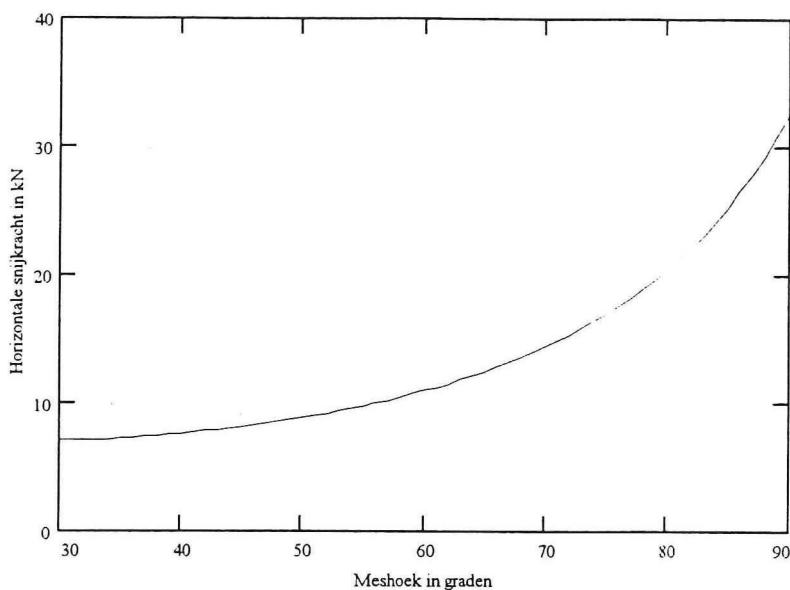
### 6.2 Snijkrachten

Het snijden van de grond zal het grootste aandeel in het aandrieffkoppel hebben. In hoofdstuk 4 zijn verschillende modellen beschreven waarmee de snijkrachten bepaald kunnen worden. Wat het effect is op de snijkrachten als gevolg van de aanwezigheid van bentoniet, is niet precies bekend. Door middel van aannamen is geprobeert een logische oplossing te bedenken voor dit probleem.

Bij het snijden kan onderscheid worden gemaakt tussen de beitels en de overcutters. De beitels zorgen voor het ontgraven aan het verticale vlak, terwijl de overcutters de oversnijding verzorgen. Omdat de beitels het grootste deel van het boorfront ontgraven hebben zij het grootste aandeel in het aandrieffkoppel.

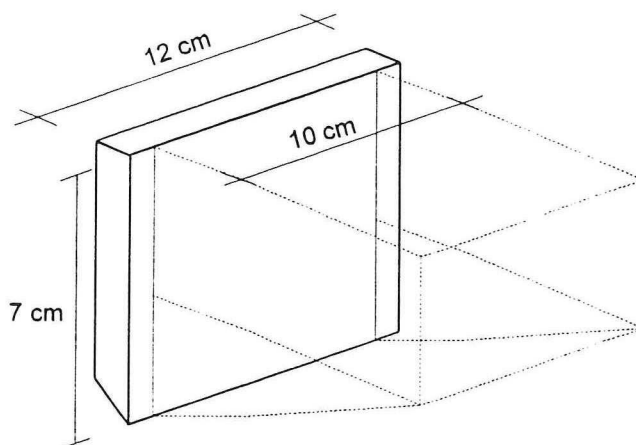
#### 6.2.1 Beitels

De beitels blijken een meshoek te hebben van 90 graden (zie bijlage 8). Het model dat gebruikt is bij de berekeningen (paragraaf 4.1.2 en 4.1.3) geeft een overschatting van de krachten voor beitels met grote meshoeken. Het geldigheidsgebied van de gebruikte modellen ligt tussen meshoeken van 30 en 60 graden. Om dit duidelijk te maken is voor profiel 1 de snijkracht uitgezet tegen de meshoek, zie figuur 6.1. Er is gekozen dit te doen voor beitel nummer 20 (zie bijlage 8), omdat deze de gemiddelde kracht op alle beitels weergeeft. In figuur 6.1 is duidelijk te zien dat het verschil in de horizontale snijkracht tussen meshoeken van 30 en 60 graden veel kleiner is dan het verschil tussen 60 en 90 graden. Het verschil hoeft niet gelijk te zijn, maar een toename van 200 % in vergelijking met 54 % is wel erg groot. Bij grotere meshoeken dan 60 graden zal de grond een ander bezwijkmechanisme hebben dan is gebruikt bij deze berekeningen (grond zoekt de weg met de minste weerstand). Een mechnisme dat hiervoor in aanmerking komt wordt in paragraaf 4.1.4 kort beschreven, dit model is echter niet uitgewerkt en dus ook niet gebruikt bij de berekeningen.



Figuur 6.1 De horizontale snijkraft uitgezet tegen de meshoek

De breedte van de beitels is 12 cm en de hoogte van de beitels is 7 cm. Voor de snijbreedte wordt echter 10 cm aangehouden, dit komt door het deels overlappen van de snijbanen van de beitels (zie figuur 6.2). Gegeven is dat de snijdiepte nooit groter zal zijn dan 5 cm. Beitel nummer 7 tot en met 40 zullen snijden, de binnenste beitels snijden niet i.v.m. met de vorming van een grondprop voor de as van het graafwiel.



Figuur 6.2 Maten van de beitels.

#### 6.2.1.1 Compleet model

Voor het model dat is beschreven in paragraaf 4.1.2 is een berekening gemaakt voor profiel 1. De rekentijd van dit model is erg groot. O.a. het berekenen van de wateronderspanningen op het afschuifvlak en op het mes neemt veel tijd in beslag. Bij deze berekeningen wordt het afschuifvlak in kleine delen verdeeld. Het aantal delen bepaalt de nauwkeurigheid van de

uitkomsten van de wateronderspanningen. Dus het aantal delen waarin het afschuifvlak wordt verdeeld beïnvloedt grotendeels de rekentijd.

Om de rekentijd te verkorten wordt voor de afschuifhoek ( $\beta$ ) de relatie gebruikt, zoals gegeven is in formule (4.15).

Omdat de beitels op de spaken op verschillende afstanden t.o.v. de as van het graafwiel zijn geplaatst, zal het totale koppel op het graafwiel afhankelijk zijn van de stand van het wiel. In de berekeningen wordt het koppel per spaak bepaald en door rekening te houden met de hoekverdraaiing kan het totale koppel op het wiel bepaald worden. Het totale koppel uitgezet tegen de stand van het wiel heeft een sinus vorm. De amplitude blijkt echter klein te zijn t.o.v. van de gemiddelde waarde van het totale koppel.

Aangezien uit de berekeningen voor profiel 1 blijkt dat de resultaten uit de vereenvoudigde berekeningen, zoals beschreven in paragraaf 4.1.3 niet veel afwijken van die verkregen uit het complete model, zijn voor profiel 2 en 3 alleen de vereenvoudigde berekeningen uitgevoerd.

### 6.2.1.2 Vereenvoudigd model

Door de vereenvoudigingen in het model toe te passen zoals beschreven is in paragraaf 4.1.3 wordt de rekentijd aanzienlijk korter in vergelijking met het complete model. In het vereenvoudigde model is nu ruimte om de afschuifhoek nauwkeurig te bepalen. De afschuifhoek is die hoek waarbij de totale kracht op het mes minimaal is. De afschuifhoek blijkt niet alleen af te hangen van de meshoek, de hoek van inwendige wrijving en de zandstaal wrijvingshoek, maar ook van de snijdiepte.

Om het koppel uit te kunnen zetten tegen de snijdiepte, wordt de gemiddelde afschuifhoek bepaald. Het vereenvoudigde model geldt niet voor kleine snijdiepten. Voor het extreme geval dat de snijdiepte 0 cm is, zou uit de berekeningen moeten volgen dat de snijkrachten 0 kN zijn. Dit gebeurt echter niet omdat het model altijd een wateronderspanning op het mes meeneemt in de berekeningen. Dit is voor dit geval niet juist. Bij kleine snijdiepten klopt de modellering van de steundruk op de gesneden schil ook niet meer. Aangenomen is dat de totale steundruk op de schil werkt, dit kan zolang de snijdiepte groter is dan de dikte van de filtercake. Aangenomen wordt dat het model nog nauwkeurig is tot een snijdiepte van 1 cm. Bij kleinere snijdiepten treedt er geen cavitatie meer op en zal niet de gehele filtercake weggesneden worden, waardoor de vereenvoudigingen beschreven in paragraaf 4.1.3 niet meer gelden.

Het komt er op neer dat het vereenvoudigde model de rekentijd aanzienlijk verkort, maar met de kanttekening dat goed gelet moet worden of het model voor de verschillende situaties nog wel geldig is.

### 6.2.2 Overcutters

De machine telt twee overcutters, die op de spaken 1 en 4 zijn bevestigd. De overcutters bevinden zich op de uiteinden van de spaken waar ze over een afstand van 16 cm uitgeschoven kunnen worden in radiale richting. De overcutters zullen de oversnijding verzorgen, die theoretisch altijd gelijk is aan 1 cm. In deze situatie zullen de overcutters 14,5 cm uitgeschoven zijn. Dit zou betekenen dat de maximale oversnijding 2,5 cm zou zijn, dit is echter niet het geval. Het graafwiel is onder een hoek van maximaal 11 graden te zetten, hierdoor is het mogelijk om een maximale oversnijding (lokaal) van 6 cm te verwezenlijken. In de berekeningen wordt uitgegaan van een oversnijding van 1 cm.

Naast het oversnijden zullen de overcutters ook aan het graaffront grond verwijderen. De beitels kunnen namelijk alleen over een straal van 4,15 m de grond ontgraven. Ter plaatse

van het boorfront heeft de TBM een straal van 4,28 m. De ruimte tussen het bereik van de beitels en de buitenkant van het schild (dit is 13 cm) zal dus ook door de overcutters ontgraven moeten worden.

De overcutters snijden dus in twee richtingen: het ruimen van het boorgat en het ontgraven aan het boorfront. Dit zorgt voor een ingewikkelde beweging van de grond over het mes. Om dit proces te vereenvoudigen wordt uitgegaan van een recht mes met een totale breedte die gelijk is aan de som van beide afzonderlijke snijbreedtes. De snijbreedte voor het oversnijden is dan gelijk aan de snijdiepte en de snijbreedte voor het ontgraven van het boorfront is dan gelijk aan de eerder genoemde 13 cm plus de oversnijding.

De twee overcutters beschrijven dezelfde baan, dit heeft tot gevolg dat de snijdieptes kleiner zullen zijn dan die van de beitels (resp.  $\frac{3}{5} h_i$  en  $\frac{2}{5} h_i$ ). Hoe groot de snijdiepte van de overcutters op spaak 1 en 4 is, is afhankelijk van de draairichting. Voor de berekeningen maakt het niet uit welke richting gekozen wordt, het maakt wel uit voor de totale krachten per spaak.

Voor het berekenen van de snijkrachten van de overcutters wordt het vereenvoudigde snijmodel (voor de beitels) uit paragraaf 4.1.3 aangepast. Het belangrijkste verschil is dat de snijbreedte nu afhankelijk is van de snijdiepte. De meshoek van de overcutters is altijd 90 graden. Ook nu geldt net als in paragraaf 6.2.1 dat bij de berekeningen een overschatting wordt gemaakt van de snijkrachten, omdat het verkeerde bezwijkmodel wordt gebruikt.

### 6.3 Het meedraaien van grond voor de as van het graafwiel

De kegelvormige grondprop (zie paragraaf 3.2.2) voor de as van het graafwiel zal met het graafwiel meedraaien. Voor het meedraaien van de grondprop zal als gevolg van de schuifspanningen tussen de grondprop en de omringende grond een koppel op het wiel nodig zijn. Dit koppel is groter dan in het geval dat de beitels de grond zouden snijden.

Het is denkbaar dat het koppel een maximum heeft bij grotere rotatiesnelheden. Bij grotere rotatiesnelheden zullen de schuifspanningen toenemen, door het optreden van wateronderspanningen. Het is denkbaar dat als de schuifspanningen groter worden dan de contactspanning tussen de grond en het wiel, waardoor de prop kan gaan slippen. Dus bij grotere snelheden is het mogelijk dat de prop niet meer meedraait, dan heeft het wiel alleen nog de contactspanning op de grondvlak van de kegel voor de as van het wiel. Bij welke snelheden dit precies optreedt is niet onderzocht. Aangenomen wordt dat het wiel zo langzaam draait dat dit niet zal optreden.

### 6.4 Stromingsweerstand graafwiel

De ontgraven grond komt in suspensie in de steunvloeistof, waardoor de dichtheid van de steunvloeistof groter wordt. Hoe de dichtheidsverdeling in de mengkamer precies is, is niet bekend. Eerder is aangenomen dat de dichtheid constant is. Bij de berekening (zie bijlage 10.1.1 t/m 10.3) van de steundruk blijkt de dichtheidsverdeling niet van belang te zijn voor het bepalen van de luchtdruk. Voor de eenvoud zal deze aanname gehandhaafd blijven.

Zonder dat gesneden wordt zal voor het ronddraaien van het graafwiel een koppel nodig zijn. Dit zou ook gelden als de steunvloeistof alleen uit water zou bestaan en hiervan is de stromingsweerstandcoëfficiënt bekend. In het geval van een vloeistof met een grotere dichtheid en viscositeit (bentoniet) zal de stromingsweerstand nog groter worden.

Voor de kracht als gevolg van de stromingsweerstand wordt de volgende relatie gevonden (voor een zwak viskeuze stroming;  $Re \gg 1$ ):

$$F_w = c_w \frac{1}{2} \rho U^2 A \quad (6.1)$$

Met:

$F_w$	: de stromingsweerstand	[kN]
$c_w$	: weerstandscoëfficiënt	[-]
$\rho$	: dichtheid van de vloeistof	[kg/m <sup>3</sup> ]
$U$	: relatieve snelheid vloeistof langs spaak	[m/s]
$A$	: oppervlakte	[m <sup>2</sup> ]

Uit de bovenstaande formule blijkt dat de stromingsweerstand evenredig is met het kwadraat van de snelheid waarmee de steunvloeistof langs de spaken beweegt. Hoe groot deze snelheid zal zijn is niet bekend, want de vloeistof zal in de mengkamer niet stil staan, maar meebewegen (denk aan het roeren van een kop koffie). In het uiterste geval zal de snelheid gelijk zijn aan de snelheid waarmee de spaken door de vloeistof heen bewegen, nu staat de vloeistof in de mengkamer stil. Dit is een bovengrens.

Omdat de spaken een cirkelbeweging maken, zal de snelheid aan het uiteinden van de spaken groter zijn dan ter plaatse van de as. Voor het totale koppel per spaak betekent dit dat geïntegreerd moet worden over de lengte van de spaak. Dit resulteert in de volgende vergelijking:

$$T_{\text{stroming}} = \frac{1}{2} c_w \rho_o h_{\text{spaa}} \omega \int r^3 dr \quad (6.2)$$

Met:

$T_{\text{stroming}}$	: het koppel als gevolg van de stromingsweerstand	[kNm]
$\rho_o$	: dichtheid van de steunvloeistof	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	: hoeksnelheid graafwiel	[rad/s]
$h_{\text{spaa}}$	: hoogte van de spaak	[m]
$r$	: straal van de spaak	[m]

De integraal wordt genomen van 0,75 m en 4,15 m.

Door het draaien van de spaken zal de steunvloeistof meedraaien. Door dit meedraaien zal de steunvloeistof ook een wrijvingskracht op de binnenkant van de ontgravingsruimte (op het duikschot en de binnenkant van het schild) uitoefenen. Als aangenomen wordt dat de totale energie van het bewegen van de vloeistof bepaald wordt door de stromingsweerstand en de wrijvingskracht, dan zal het berekenen van de bovengrens van de stromingsweerstand deze de totale energie weergeven. Dus door bovengrens van de stromingsweerstand te berekenen is het niet nodig nog rekening te houden met de wrijvingskrachten van de vloeistof in de ontgravingsruimte.

## 7. RESULTATEN VAN DE BEREKENINGEN

### 7.1 Overzicht van de aannamen

De parameters die bij de berekeningen in dit hoofdstuk gebruikt worden zijn in bijlage 7 terug te vinden. Niet alle gegevens zijn bekend of door aannamen zijn de berekeningen te vereenvoudigen. Er volgt nu een overzicht van de aannamen die bij de berekeningen gebruikt worden.

- De wrijvingshoek grond-staal is gelijk aan  $\frac{2}{3} \cdot \phi$ .
- De adhesie is gelijk aan de cohesie.
- De stijghoogte in alle grondlagen ligt op NAP.
- De diameter van de TBM is constant (8,55 m) over de lengte.
- De machine boort recht vooruit, geen bochten dus.
- Het peil van de vloeistofspiegel in het luchtkussen is 2 m vanaf de bovenkant van de TBM.
- Het snijmodel uit paragraaf 4.1.3 is geldig voor snijdiepten groter dan 1 cm.
- De snijdiepte is groter dan de dikte van de filtercake.
- Bij het snijden van zand treedt cavitatie op.
- De horizontale korrelspanning ter plaatse van het boorfront is gelijk aan de caverende wateronderspanning met daarbij opgeteld de steundruk in de ontgravingsruimte.

### 7.2 Overzicht van de resultaten

Er zijn drie profielen (zie bijlage 6) uitgekozen waarvoor de berekeningen zijn uitgevoerd. Profiel 1 is uitgekozen omdat de machine daar helemaal in één zandlaag ligt, waardoor de berekeningen relatief eenvoudig zijn. Bij profiel 2 ligt de machine in twee zandlagen (holoceen en pleistoceen) die gescheiden zijn door een dunne kleilaag. Een profiel waar de machine volledig in klei ligt is op het tracé niet te vinden. Wel komt de situatie voor dat de machine half in klei en half in zand ligt, zoals in profiel 3.

Bij de berekeningen is uitgegaan van de situatie waarbij de machine een constante voortgangssnelheid heeft en het graafwiel een constante rotatiesnelheid heeft. De opstartkrachten (vanuit stilstand beginnen met boren na het plaatsen van de segmenten) worden buiten beschouwing gelaten. Ook wordt bij alle berekeningen geen rekening gehouden met veiligheidsfactoren.

De resultaten van de berekeningen voor alle drie profielen zijn in de volgende paragrafen beschreven.

#### 7.2.1 Profiel 1

De TBM ligt in profiel 1 volledig in een pleistocene zandlaag. Het hart van de machine ligt op een diepte van -20,8 m NAP.



## 7.2.1.1 De steundruk en de grondprop (bijlage 10.1.1)

De berekeningen voor het bepalen van de steunkracht zijn als eerste uitgevoerd. Voor de steunkracht is een onder- en een bovengrens uitgerekend. De ondergrens is de kleinste kracht waarbij het front nog stabiel is, en de bovengrens is de kracht waarbij de grond zal opbreken.

Tabel 7-1

	Ondergrens	Bovengrens
Steunkracht [MN]	12,6	100

Deze steunkracht moet geleverd worden door de steunvloeistof, die door een luchtkussen op druk gehouden wordt. De kracht als gevolg van de steunvloeistofdruk zal afhankelijk zijn van de dichtheid. De dichtheid van de steunvloeistof zal tussen  $1050 \text{ kg/m}^3$  en  $1200 \text{ kg/m}^3$  liggen. Door uit te gaan van beide situaties waarbij de dichtheid constant is, is het gebied waartussen de luchtdruk zal liggen te bepalen. In de onderstaande tabel zijn ook de situaties zonder steunvloeistof weergegeven: de ontgravingsruimte is dan met lucht gevuld.

Tabel 7-2

	Druk van luchtkussen [kPa]	
	Ondergrens	Bovengrens
Dichtheid: $1200 \text{ kg/m}^3$	192 <sup>1)</sup>	1714
Dichtheid: $1050 \text{ kg/m}^3$	195	1718
Geen steunvloeistof	252 <sup>2)</sup>	1742 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> zie bijlage 10.1.1

<sup>2)</sup> De waarde hier gegeven voor de luchtdruk is gelijk aan de waterdruk aan de onderkant van het front.

Het verschil tussen de luchtdrukken bij de twee verschillende dichtheden is kleiner dan 5 kPa en dit is de nauwkeurigheid waarmee de luchtdruk te regelen is.

Bij het bezwijkmechnisme dat gebruikt is in de berekeningen, zal opbarsten pas bij drukken boven de 1700 kPa plaatsvinden. Deze drukken zullen niet voorkomen, omdat bij zulke grote drukken de TBM niet kan functioneren, want de totale vijzelkrachten ( $50,4 \text{ MN}$  in vergelijking met de  $100 \text{ MN}$  in tabel 7.1) zullen nu te klein zijn om de TBM vooruit te kunnen duwen. Ook zal bij het betreden van de ontgravingsruimte de luchtdruk niet groter mogen zijn dan 350 kPa (voorschrift Nederlandse wetgeving).

De grondprop wordt geschematiseerd als een kegel die voor de as van het graafwiel ronddraait. Zowel bij het vooruit bewegen als bij het ronddraaien van het graafwiel zal de grondprop en kracht respectievelijk een koppel op het wiel uitoefenen.

Tabel 7-3

	$F_{\text{prop}}$ [MN]	$T_{\text{prop}}$ [MNm]
Grondprop	0,978	0,489

## 7.2.1.2 De snijkrachten, het snijkoppel en de stromingsweerstand (bijlagen 13, 14.1 en 15.1)

De steundruk die bepaald is in de vorige paragraaf is nodig bij de berekening van de *snijkrachten*. Bij de berekeningen wordt de ondergrens van de steundruk gebruikt.

Bij de berekeningen van de snijkrachten wordt het model gebruikt, zoals beschreven in paragraaf 4.1.3. In de volgende tabel is de totale verticale snijkracht en het totale koppel op het wiel als gevolg van het snijden van de beitels weergegeven voor een snijdiepte van 5 cm (dit is de maximale snijdiepte):

Tabel 7-4

	totale verticale snijkracht <sup>2)</sup> [MN]	totale snijkoppel [MNm]
Compleet model	0,472	2,408
Vereenvoudigd model <sup>1)</sup>	0,542	2,609
Vereenvoudigd model	0,516	2,468

<sup>1)</sup> vereenvoudigd model met afschuifhoek als bij het complete model.

<sup>2)</sup> dit zijn de krachten op de vijzels, in de bijlagen zijn deze krachten negatief omdat een drukkracht negatief wordt beschouwd.

De waarden in tabel 7-4 zijn gemiddelden, want de werkelijke waarden variëren met de stand van het wiel (zie bijlage 14.1). Om het complete model te vergelijken met het vereenvoudigde model is dit laatste model aangepast. Voor de afschuifhoek is dezelfde relatie gebruikt als bij het complete model (zie vergelijking (4.15)).

De *overcutters* zitten aan de uiteinden van de spaken en zullen dus al snel een groot koppel vragen. Het vereenvoudigde snijmodel kan aangepast worden om de snijkrachten van de overcutters te bepalen. Een verandering in het model is de breedte van de schil, deze wordt afhankelijk van de snijdiepte (zie paragraaf 6.2.2). Het resultaat van de berekeningen is (voor een snijdiepte van 5 cm en een oversnijding van 1 cm):

Tabel 7-5

	verticale snijkracht [MN]	snijkoppel [MNm]
Overcutters	0,040	0,273

De *stromingsweerstandkracht* is afhankelijk van de snelheid waarmee de vloeistof om de spaak heen stroomt, de dichtheid van de steunvloeistof, het aanstroom oppervlak en de weerstandscoefficiënt. Voor de weerstandscoefficiënt wordt genomen:  $c_w = 2$ . De dichtheid van de steunvloeistof wordt constant verondersteld (1200 kg/m<sup>3</sup>). De snelheid waarmee de steunvloeistof langs de spaken stroomt is maximaal gelijk aan de snelheid waarmee de spaken bewegen door die vloeistof (bovengrens). De vloeistof zal mee gaan bewegen waardoor de snelheid tussen de vloeistof en de spaken kleiner zal worden. Het koppel als gevolg van de stromingsweerstand is rechtevenredig aan de hoeksnelheid van het graafwiel, zie formule (6.2). In de volgende tabel wordt de bovengrens van het totale koppel als gevolg van de stromingsweerstand voor verschillende rotatiesnelheden gegeven.

Tabel 7-6

	n = 0,5 omw/min	1	1,5	2
T <sub>stroming</sub> [MNm]	0,001	0,003	0,008	0,014

### 7.2.1.3 Mantelwrijving en tangentiële vijzelkrachten (bijlage 11.1)

De belastingen op de mantel van de TBM zullen bij het voortbewegen *wrijvingskrachten* opleveren. Door de oversnijding en de druk van de bentoniet in de ontgravingsruimte zal tussen de mantel en de grond een zekere hoeveelheid bentoniet aanwezig zijn. Door de aanwezigheid van bentoniet zal de wrijving tussen de mantel en de grond gereduceerd

worden. Hoe groot dit effect is, is niet bekend. In profiel 1 ligt de machine geheel in een zandlaag. Deze laag heeft geen cohesie, dus de schuifspanning zal alleen bepaald worden door de korrelspanningen. De zand-bentoniet-staal wrijvingshoek is niet bekend, maar de wrijvingshoek zal maximaal gelijk zijn aan de hoek van inwendige wrijving van het zand.

In de praktijk wordt gerekend met een wrijvingsspanning (wrijvingskracht per vierkante meter tunnelbuis oppervlak). Bij het doorpersen van leidingen wordt voor de wrijvingsspanning een maximum aangenomen van  $10 \text{ kN/m}^2$ . Deze waarde is voor het tunnelboren mogelijk te laag omdat bij het doorpersen de mantel intensief wordt gesmeerd met bentoniet [brochure Visser en Smit Hanab, 1995]. Bij het tunnelboren is de aanwezigheid van bentoniet op de mantel geen doelstelling maar een gevolg van het oversnijden. In de volgende tabel zijn voor verschillende wrijvingshoeken de wrijvingskracht en -spanning gegeven.

Tabel 7-7

	$1/10\phi$	$1/3\phi$	$1/2\phi$	$2/3\phi$	$\phi$
wrijvingskracht [MN]	1,049	3,546	5,424	7,439	12,172
wrijvingsspanning [ $\text{kN/m}^2$ ]	4,601	15,551	23,785	32,619	53,373

Het totale koppel dat op het graafwiel wordt gezet moet afgedragen kunnen worden door de machine op de omringende grond, om te voorkomen dat de machine gaat roteren. De wrijving op de mantel zal deze belasting moeten opvangen. Als de wrijvingskracht te klein is, dan zullen de vijzels onder een hoek (in tangentiële richting) gezet moeten worden om de resterende kracht op de vangen.

Het totale koppel op het graafwiel is bekend (bij een snijdiepte van 5 cm):

Snijkoppel beitels	2,468 MNm	
Snijkoppel overcutters	0,273 MNm	
Koppel grondprop	0,489 MNm	
Koppel stromingsweerstand (1 omw/min)	0,003 MNm	+
Totaal	3,233 MNm	

De totale kracht die moet worden opgenomen is:

$$F_{\text{koppel}} = \frac{2T_{\text{totaal}}}{D} = 0,756 \text{ MN}$$

Uit de bovenstaande berekening blijkt dat zelfs voor een wrijvingshoek van  $1/10\phi$ , de kracht als gevolg van het totale koppel afgedragen kan worden door de wrijving langs de mantel. Er zal geen tangentiële kracht door de vijzels opgenomen hoeven te worden.

#### 7.2.1.4 Overige

Het *meeslepen van de installaties* moet ook door de vijzels gedaan worden. De installaties zijn op een trein geplaatst, die over rails rijdt. De weerstand als gevolg van het rollen van de wielen wordt bepaald door de kracht die de wielen op de rails drukt, de diameter van de wielen en de weerstandscoefficiënt. De diameter van de wielen zal niet zo groot zijn, hiervoor wordt 10 cm genomen en voor de coëfficiënt wordt 0,20 genomen (zie paragraaf 5.7.1). De kracht waarmee de wielen op de rails gedrukt worden is afhankelijk van het

gewicht van de trein en de hellingshoek. Het gewicht van de trein is 174 ton en de maximale helling is 1:30. Voor de totale sleepkracht geldt:

Tabel 7-8

	omhoog	omlaag
Sleepkracht [MN]	0,068	-0,054

Net als bij de trein met installaties zal ook het *gewicht van de machine* de helling op of af geduwd moeten worden. Het gewicht van de machine is 466 ton.

Tabel 7-9

	omhoog	omlaag
Gewicht TBM [MN]	0,163	-0,163

De eerste buis zal van de noordoever naar de zuidoever geboord worden. Bij profiel 1 is de machine nog op weg naar het diepste punt, dus de machine boort omlaag. De berekende kracht levert dus een negatieve bijdrage aan de vijzelkrachten.

#### 7.2.1.5 Totaal profiel 1

Tabel 7-10

Vijzelkrachten	[MN]	%
Steunkracht	12,600	72,2
Grondprop	0,978	5,6
Snijden beitels	0,516	2,9
Snijden overcutters	0,040	0,2
Wrijvingskracht	3,546	20,3
Sleepkracht	-0,054	-0,3
Gewicht	-0,163	-0,9
Totaal	17,463	100

Tabel 7-11

Koppel	[MNm]	%
Snijden beitels	2,468	76,3
Snijden overcutters	0,273	8,4
Grondprop	0,489	15,1
Stromingsweerstand (n = 1)	0,003	0,1
Totaal	3,233	100

#### 7.2.2 Profiel 2

De TBM ligt in twee zandlagen die door een dunne kleilaag gescheiden zijn. Het hart van de machine ligt op -14,9 m NAP.

## 7.2.2.1 De steundruk en de grondprop (bijlage 10.2)

Net als bij profiel 1 is een onder- en een bovengrens van de steundruk berekend. De tunnel heeft nu drie verschillende lagen aan het boorfront. De gebruikte methode om de steundruk te bepalen is niet helemaal correct, maar de uitkomsten zullen niet veel schelen van de exacte oplossing (zie bijlage 10.1.2).

Tabel 7-12

	Ondergrens	Bovengrens
Steunkracht [MN]	9,1	198

In de onderstaande tabel is de luchtdruk gegeven voor verschillende situaties.

Tabel 7-13

	Druk van luchtkussen [kPa]	
	Ondergrens	Bovengrens
Dichtheid: 1200 kg/m <sup>3</sup>	132 <sup>1)</sup>	3423
Dichtheid: 1050 kg/m <sup>3</sup>	135	3427
geen steunvloeistof	193 <sup>2)</sup>	3451 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> zie bijlage 10.2

<sup>2)</sup> De waarde hier gegeven voor de luchtdruk is gelijk aan de waterdruk aan de onderkant van het front.

De ondergrens ligt lager dan bij profiel 1, dit komt door de stijghoogte van het poriënwater die hier lager is. De bovengrens van het opbarsten ligt nu veel hoger dan bij profiel 1. Dit komt omdat de gronddekking groter is dan bij profiel 1.

Voor de grondprop worden nu de volgende waarden gevonden:

Tabel 7-14

	F <sub>prop</sub> [MN]	T <sub>prop</sub> [MNm]
Grondprop	1,249	0,621

## 7.2.2.2 De snijkrachten, het snijkoppel en de stromingsweerstand (bijlage 14.2 en 15.2)

De steundruk die bepaald is in de vorige paragraaf is nodig bij de berekening van de *snijkrachten*. Bij de berekeningen wordt de ondergrens van de steundruk gebruikt.

Het model dat gebruikt wordt bij de berekeningen geeft een overschatting van de snijkrachten. In de volgende tabel is de totale verticale snijkracht en het totale koppel op het wiel als gevolg van het snijden van de beitels weergegeven voor een snijdiepte van 5 cm:

Tabel 7-15

	totale verticale snijkracht <sup>1)</sup> [MN]	totale snijkoppel [MNm]
Vereenvoudigd model	0,380	1,840

<sup>1)</sup> dit is de kracht op de vijzels, in de bijlagen is deze kracht negatief omdat een drukkracht negatief wordt beschouwd.

De bovenstaande waarden zijn gemiddelden, want de werkelijke waarde varieert met de stand van het wiel.

Voor de overcutters zijn de waarden gevonden die in tabel 7-16 weergegeven zijn (met een snijdiepte van 5 cm en een oversnijding van 1 cm).

Tabel 7-16

	verticale snijkraft [MN]	snijkoppel [MNm]
Overcutters	0,031	0,209

Bij profiel 1 is gebleken dat het koppel als gevolg van de *stromingsweerstand* heel klein is, ongeveer 1 ‰ van het totale koppel. Dit koppel mag dus verwaarloosd worden. De berekeningen zouden overigens dezelfde uitkomsten opleveren als voor profiel 1.

### 7.2.2.3 Mantelwrijving en tangentiële vijzelkrachten (bijlage 11.2)

De belastingen op de mantel van de TBM zullen bij het voortbewegen *wrijvingskrachten* opleveren. Bij profiel 1 is niet bekend wat precies het gedrag van de wrijvingshoek is. Dit geldt ook voor profiel 2. De aanwezigheid van bentoniet wordt gemodelleerd door een reductie van de hoek van inwendige wrijving. In profiel 2 komen ook lagen voor met een cohesie, dit brengt nog een probleem met zich mee. Cohesieve grondsoorten hebben meestal een kleine doorlatenheid, waardoor de bentoniet niet de grond in zal dringen. Dit betekent dat of de grond of de bentoniet in contact komt met de mantel. Hoe dit precies in zijn werk gaat is niet bekend. Aangenomen wordt dat de schuifspanning bestaat uit een deel cohesie en een deel wrijving met een gereduceerde hoek van inwendige wrijving.

In de volgende tabel is voor verschillende wrijvingshoeken de wrijvingskrachten en spanningen gegeven.

Tabel 7-17

	$1/10\phi$	$1/3\phi$	$1/2\phi$	$2/3\phi$	$\phi$
wrijvingskracht [MN]	1,468	4,877	7,441	10,187	16,645
wrijvingsspanning [kN/m <sup>2</sup> ]	6,438	21,387	32,631	44,672	72,989

Het totale koppel op het graafwiel is bekend (bij een snijdiepte van 5 cm):

Snijkoppel beitels	1,840 MNm
Snijkoppel overcutters	0,209 MNm
Koppel grondprop	0,621 MNm
Totaal	2,670 MNm

De totale kracht die moet worden opgenomen is:

$$F_{\text{koppel}} = \frac{2T_{\text{totaal}}}{D} = 0,625 \text{ MN}$$

Uit de bovenstaande berekening blijkt dat zelfs voor een wrijvingshoek van  $1/10\phi$ , de kracht als gevolg van het totale koppel afgedragen kan worden door de wrijving langs de mantel. Er zullen geen *tangentiële vijzelkrachten* voorkomen.

#### 7.2.2.4 Overige

Voor de sleepkracht en de kracht als gevolg van het gewicht van de machine gelden de zelfde uitkomsten als voor profiel 1 (ze zijn niet grondsoort gebonden).

De machine werkt nu ook naar beneden, richting het diepste punt, de trein en het gewicht van de machine zullen de TBM aanduwen.

#### 7.2.2.5 Totaal profiel 2

Tabel 7-18

Vijzelkrachten	[MN]	%
Steunkracht	9,100	59,0
Grondprop	1,249	8,1
Snijden beitels	0,380	2,5
Snijden overcutters	0,031	0,2
Wrijvingskracht	4,877	31,6
Sleepkracht	-0,054	-0,4
Gewicht	-0,163	-1,0
Totaal	15,420	100

Tabel 7-19

Koppel	[MNm]	%
Snijden beitels	1,840	68,9
Snijden overcutters	0,209	7,8
Grondprop	0,621	23,3
Totaal	2,670	100

#### 7.2.3 Profiel 3

De machine ligt in een dikke zandlaag, een dunne kleiige zandlaag en in een dikke zandige kleilaag. Het hart van de TBM ligt op -22,5 m NAP.

##### 7.2.3.1 De steundruk en de grondprop (bijlage 10.3)

Net als bij de voorgaande profielen is een onder- en een bovengrens van de steundruk uitgerekend. Bij dit profiel bevindt de machine zich in drie verschillende lagen.

Tabel 7-20

	Ondergrens	Bovengrens
Steunkracht[MN]	13,4	86

In tabel 7-21 is de luchtdruk gegeven voor verschillende situaties.

Tabel 7-21

	Druk van luchtkussen [kPa]	
	Ondergrens	Bovengrens
Dichtheid: 1200 kg/m <sup>3</sup>	206 <sup>1)</sup>	1470
Dichtheid: 1050 kg/m <sup>3</sup>	209	1473
geen steunvloeistof	268 <sup>2)</sup>	1497 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> zie bijlage 10.3

<sup>2)</sup> De waarde hier gegeven voor de luchtdruk is gelijk aan de waterdruk aan de onderkant van het front.

De ondergrens van de steundruk is hier voor alle profielen het grootst, dit komt omdat de machine hier de grootste stijghoogte heeft voor het poriënwater.

Voor de grondprop worden nu de volgende waarden gevonden:

Tabel 7-22

	F <sub>prop</sub> [MN]	T <sub>prop</sub> [MNm]
Grondprop	0,678	0,338

### 7.2.3.2 De snijkrachten, het snijkoppel en de stromingsweerstand (bijlagen 14.3 en 15.3)

In de volgende tabel is de totale verticale snijkracht en het totale koppel op het wiel als gevolg van het snijden van de beitels weergegeven voor een snijdiepte van 5 cm (dit is de maximale snijdiepte):

Tabel 7-23

	totale verticale snijkracht <sup>1)</sup> [MN]	totale snijkoppel [MNm]
Vereenvoudigd model	0,411	2,039

<sup>1)</sup> dit is de kracht op de vijzels, in de bijlagen is deze kracht negatief omdat een drukkracht negatief wordt beschouwd.

Voor de overcutters zijn de volgende waarden gevonden (met een snijdiepte van 5 cm en een oversnijding van 1 cm):

Tabel 7-24

	verticale snijkracht [MN]	snijkoppel [MNm]
Overcutters	0,037	0,254

### 7.2.3.3 Mantelwrijving en tangentiële vijzelkrachten (bijlage 11.3)

Voor de wrijvingskrachten geldt hetzelfde als voor profiel 2.

Tabel 7-25

	$\frac{1}{10}\phi$	$\frac{1}{3}\phi$	$\frac{1}{2}\phi$	$\frac{2}{3}\phi$	$\phi$
wrijvingskracht [MN]	1,472	3,362	5,657	7,583	12,107
wrijvingsspanning [kN/m <sup>2</sup> ]	6,457	16,935	24,806	33,250	53,090



Het totale koppel op het graafwiel is bekend (bij een snijdiepte van 5 cm):

Snikkoppel beitels	2,039 MNm
Snikkoppel overcutters	0,254 MNm
Koppel grondprop	0,338 MNm
Totaal	2,631 MNm

De totale kracht die moet worden opgenomen wordt:

$$F_{\text{koppel}} = \frac{2T_{\text{totaal}}}{D} = 0,615 \text{ MN}$$

Uit de bovenstaande berekening blijkt dat zelfs voor een wrijvingshoek van  $1/10\phi$ , de kracht als gevolg van het totale koppel afgedragen kan worden door de wrijving langs de mantel. Er zullen geen *tangentiële vijzelkrachten* voorkomen.

#### 7.2.3.4 Overige

Voor de sleepkracht en de kracht als gevolg van het gewicht van de machine gelden de zelfde uitkomsten als voor profiel 1 (ze zijn niet grondsoort gebonden).

Bij profiel 3 is het diepste punt gepasseerd, dus zal de machine omhoog boren en zal het dus de trein met installaties moeten meeslepen.

#### 7.2.3.5 Totaal profiel 3

Tabel 7-26

Vijzelkrachten	[MN]	%
Steunkracht	13,400	74,0
Grondprop	0,678	3,7
Snijden beitels	0,411	2,3
Snijden overcutters	0,037	0,2
Wrijvingskracht	3,362	18,5
Sleepkracht	0,068	0,4
Gewicht	0,163	0,9
Totaal	18,119	100

Tabel 7-27

Koppel	[MNm]	%
Snijden beitels	2,039	77,5
Snijden overcutters	0,254	9,7
Grondprop	0,338	12,8
Totaal	2,631	100

## 7.3 Evaluatie van de resultaten

### 7.3.1 Algemeen

Voor alle profielen zijn de resultaten van de berekeningen in deze paragraaf samengevat. De resultaten gelden voor:

- een snijdiepte van 5 cm (dit is de maximale snijdiepte)
- een oversnijding van 1 cm.
- een grond-bentoniet-staal wrijvingshoek van  $\frac{1}{3}\phi$ .

#### Profiel 1

	n = 0,5 rpm	1	1,5	2
Vijzelkracht [MN]	17,463	17,463	17,463	17,463
Koppel [MNm]	3,231	3,233	3,238	3,244
Vermogen graafwiel [kW]	169	339	509	679

#### Profiel 2

	n = 0,5 rpm	1	1,5	2
Vijzelkracht [MN]	15,420	15,420	15,420	15,420
Koppel [MNm]	2,670	2,670	2,670	2,670
Vermogen graafwiel [kW]	140	280	419	559

#### Profiel 3

	n = 0,5 rpm	1	1,5	2
Vijzelkracht [MN]	18,119	18,119	18,119	18,119
Koppel [MNm]	2,631	2,631	2,631	2,631
Vermogen graafwiel [kW]	138	276	413	551

Uit de resultaten in de voorgaande paragrafen komt duidelijk naar voren dat de *vijzelkrachten* sterk afhankelijk zijn van de diepteligging van de machine. Hoe dieper de machine ligt des te groter worden de vijzelkrachten. Dit komt omdat de grootste component van de vijzelkrachten de steundrukkracht is. Deze kracht wordt voornamelijk door de waterspanningen op het boorfront bepaald.

Het *koppel* is afhankelijk van de grondsoort en de diepteligging. Het snijden van de grond staat voor de grootste component van het koppel. Het snijden van zandige grondsoorten geeft de grootste krachten, de snijkrachten zijn nl. sterk afhankelijk van de hoek van inwendige wrijving. De snijkrachten worden verder bepaald door de steundruk en de wateronderspanningen (cavitatie). De steundrukken en de wateronderspanningen nemen toe met de diepte. Vergelijk hiervoor de profielen 2 en 3. Voor beide profielen is ongeveer

hetzelfde koppel nodig. In profiel 2 ligt de TBM een stuk ondieper dan in profiel 3, maar in profiel 3 komt een dikke laag zandige klei voor.

Het *vermogen* (op de as van het graafwiel) is alleen afhankelijk aan de rotatiesnelheid van het graafwiel alsmede het koppel dat nodig is om het wiel te laten roteren.

### 7.3.2 Resultaten vergelijken met de krommen van Krause

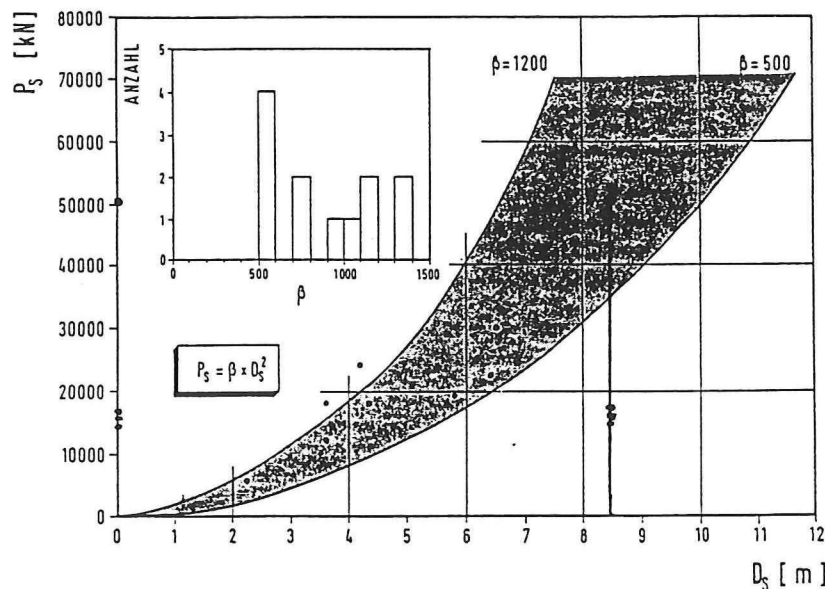
Aan de hand van praktijk gegevens is in [Krause, 1987] zowel voor de vijzelkrachten als het koppel een empirische relatie gegeven. Voor alle in Duitsland geboorde tunnels heeft Krause de vijzelkrachten en het koppel uitgezet tegen de diameter. Voor de vijzelkrachten is de maximale vijzelkracht gebruikt. De empirische relatie voor de vijzelkrachten ziet er als volgt uit:

$$P_v = \beta \cdot D^2 \quad (7.1)$$

Met:

$P_v$	: de totale voortstuwingskracht van de vijzels	[kN]
$D$	: de diameter van de tunnel	[m]
$\beta$	: een empirische coëfficiënt	[kN/m <sup>2</sup> ]

De coëfficiënt is afhankelijk van de grondsoort waar doorheen geboord wordt. Voor het Duitse Hydroschild ligt  $\beta$  tussen 500 en 1200 kN/m<sup>2</sup>. De figuur die hierbij hoort ziet er volgt uit:



Figuur 7.1 De maximale vijzelkrachten van een TBM uitgezet tegen de diameter [Krause, 1987]

Uit de bovenstaande figuur blijkt dat de machine voor de Heinenoordtunnel aan de empirische relatie (7.1) voldoet. De maximale voortstuwingskracht (50,4 MN) ligt in figuur 7.1 voor een diameter van 8,55 m in het gearceerde gebied. De berekende vijzelkrachten in dit hoofdstuk zijn met deze figuur echter niet te toetsen, want de maximale

voortstuwingskracht van de vijzels zal altijd groter zijn dan de vijzelkrachten die tijdens het boren optreden. Het mag niet voorkomen dat de machine vast komt te zitten. Als daarom uitgegaan wordt van een veiligheidsfactor van 2, dan komen de berekende waarden wel goed uit.

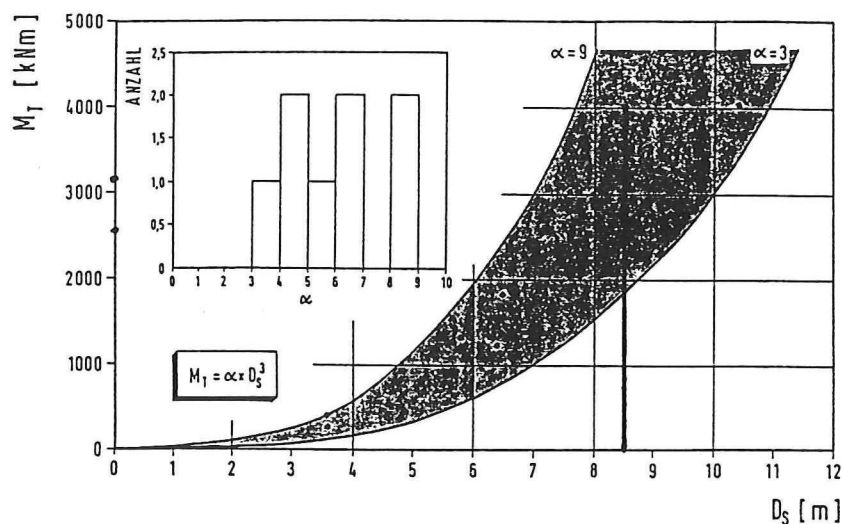
Voor het koppel heeft Krause ook een relatie gevonden:

$$M_t = \alpha \cdot D^3 \quad (7.2)$$

Met:

$M_t$  : Het maximale aandrijfkoppel [kNm]  
 $\alpha$  : empirische coëfficiënt voor het koppel [kN/m<sup>2</sup>]

De relatie is gevonden op basis van alle gegevens van tunnels die geboord zijn in Duitsland. Dit is in figuur 7.2 weergegeven.



Figuur 7.2 Het maximale leverbaar koppel uitgezet tegen de diameter [Krause, 1987]

De bovenstaande figuur bevestigt de vermoedens dat bij de gebruikte snijmodellen te grote snijkrachten worden uitgerekend. Als de resultaten van de berekeningen van het koppel op het graafwiel in figuur 7.2 worden geplaatst, dan blijken de waarden in het gebied van het maximaal leverbaar koppel te liggen. Van een veiligheidsmarge is nu geen sprake. Dit lijkt erg onlogisch, dus er kan aangenomen worden dat de resultaten van de berekeningen te hoog uitvallen.

## 8. ZOEKEN NAAR EEN SIGARENDOOSMODEL

### 8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt gezocht naar ontwerp-formules, die gebruikt zouden kunnen worden in de boortecnologie. Als eerste wordt bestudeerd of bestaande eenvoudige rekenmethoden de complexe rekenmethoden, die in hoofdstuk 7 zijn gebruikt, kunnen evenaren. Wat voor invloed de verschillende parameters hebben op de uitkomsten van de berekeningen uit hoofdstuk 7, wordt in paragraaf 8.3 beschreven. Dit wordt gedaan door de voornaamste grondparameters te varieëren. Tot slot wordt met de verworven kennis en een beetje gevoel geprobeert ontwerp-formule op te stellen, die bij toekomstige tunnelboorprojecten gebruikt kunnen worden om een orde grootte van de besturingsparameters te kunnen voorspellen.

### 8.2 Uitkomsten vergelijken met eenvoudige rekenmethoden

#### 8.2.1 Inleiding

De uitkomsten uit het vorige hoofdstuk zijn allemaal verkregen m.b.v. een computer programma. In de berekeningen is geprobeerd alle aspecten die bekend zijn mee te nemen. Met als gevolg: ingewikkelde modellen, bezwijkmechanismen, integralen ect. In deze paragraaf zal gekeken worden of bestaande eenvoudige rekenmethoden de complexe rekenmodellen kunnen evenaren. Als de eenvoudige rekenmethoden dezelfde uitkomsten geven, zal dit veel rekentijd schelen. Vaak geven eenvoudige methoden ook een beter inzicht in de berekeningen.

De eenvoudige rekenmethoden worden vergeleken met met de resultaten verkregen in hoofdstuk 7 voor profiel 1.

#### 8.2.2 De steundruk

De steundruk is bepaald aan de hand van een bezwijkmechanisme, dat te modelleren is als een grondzuil en een wig. Bij het bepalen van de belasting die de grondzuil op de wig uitoefent is rekening gehouden met gewelfwerking. Uit een krachterevenwicht op de wig is de belasting van de korrels op het graaffront uit te rekenen. Samen met de belasting van het poriënwater wordt dan de steundruk bepaald. Zolang de tegendruk in de mengkamer groter is dan de druk die volgt uit het bezwijkmechanisme, zal het front stabiel zijn.

De korrelspanningen nemen toe met de diepte. De verticale korrelspanning is gelijk aan het effectieve gewicht van de bovenliggende grond. De horizontale korrelspanning is afhankelijk van het vervormingsgedrag (zie paragraaf 5.2.3). Gesproken wordt over actieve, neutrale en passieve korrelspanningen. Dit is de methode die bij grondkerende constructies wordt gebruikt. Als de constructie de grond wil wegduwen wordt gesproken van het passief willen bezwijken van de grond. Bij een terugwijkende constructie wordt gesproken van actief bezwijken. Van de neutrale situatie wordt gesproken als de constructie in rust is.

Nu zou deze methode ook gebruikt kunnen worden voor het bepalen van de steundruk op het boorfront (zie bijlage 10.1.1). Voor de horizontale korrelspanning wordt de situatie van

actief bezwijken gebruikt. De horizontale korrelspanning wordt bepaald door de verticale korrelspanning met een coëfficiënt van de actieve gronddruk te vermenigvuldigen. Coulomb heeft voor deze coëfficiënt de volgende relatie gevonden:

$$K_a = \frac{1 - \sin(\beta)}{1 + \sin(\beta)} \quad (8.1)$$

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (8.2)$$

Met:

$K_a$	: de coëfficiënt van de actieve gronddruk	[-]
$\beta$	: de afschuifhoek (hoek met de horizontaal)	[rad]
$\phi$	: de hoek van inwendige wrijving	[rad]

Deze coëfficiënt geldt echter voor de situatie met een grondkerende constructie die oneindig breed is. De (gemiddelde) steundruk in de ontgravingsruimte moet minimaal even groot zijn aan de horizontale grondspanning ter plaatse van het hart van de TBM. De uitkomsten bij het rekenen met de actieve gronddruk (zie bijlage 10.1.1) geven een hogere waarden voor de steundruk dan de berekeningen met het bezwijkmechanisme beschreven in paragraaf 5.2.1.

In [Jancsecz, 1994] wordt een coëfficiënt van de actieve gronddruk bepaald voor de situatie bij een tunnel. De coëfficiënt wordt de driedimensionale coëfficiënt van de horizontale gronddruk genoemd. De volgende relatie wordt hiervoor gegeven:

$$K_{A3} = \frac{\sin(\beta) \cos(\beta) - \cos^2(\beta) \tan(\phi) - \frac{K\alpha}{1,5} \cos(\beta) \tan(\phi)}{\cos(\beta) \sin(\beta) + \tan(\phi) \sin^2(\beta)} \quad (8.3)$$

Met:

$$K \approx \frac{1 - \sin(\phi) + \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)}{2} \quad (8.4)$$

en

$$\alpha = \frac{1 + 3 \frac{t}{D}}{1 + 2 \frac{t}{D}} \quad (8.5)$$

Waarin:

$K_{A3}$	: Drie driedimensionale coëfficiënt van de horizontale gronddruk	[-]
$t$	: De gronddekking	[m]
$\beta$	: De afschuifhoek	[rad]
$\phi$	: De hoek van inwendige wrijving	[rad]

Het blijkt dat de driedimensionale coëfficiënt (vergelijking (8.3)) een kleinere waarde heeft dan de coëfficiënt volgens Coulomb (vergelijking (8.1)), met als gevolg dat de uitkomsten voor de steundruk dichter liggen bij de uitkomsten volgens het model met het bezwijkmechninsme uit paragraaf 5.2.1. Dit is niet vreemd want de driedimensionale coëfficiënt is bepaald aan de hand van dit bezwijkmechanisme. Dit is dus geen alternatieve rekenmethode, omdat hiervoor ook de afschuifhoek bepaald moet worden net als in de methode die in paragraaf 5.2.1 beschreven is. De resultaten voor de verschillende rekenmethoden zijn in tabel 8-1 weergegeven.

Tabel 8-1

	methode § 5.2.1	Coulomb	Jancsecz
Steunkracht [MN]	12,6	14,2	13,4

### 8.2.3 De mantelwrijving

Bij de berekeningen van de mantelwrijving is rekening gehouden met gewelfwerking. Verder is de radiale korrelspanning tegen de mantel bepaald en hiermee is de schuifspanning te bepalen. Een vereenvoudigde formule voor het bepalen van de wrijvingskracht in zand ziet er als volgt uit [Milligan, 1993]:

$$F_{\text{wrijving}} = \frac{\pi DL}{2} (\sigma_v + \sigma_h) \tan(\delta) \quad (8.6)$$

Met:

$$\sigma_h = K(\sigma_v + \frac{1}{2} \gamma D) \quad (8.7)$$

Waarin:

$F_{\text{wrijving}}$	: De wrijvingskracht op de mantel van de TBM	[kN]
$\sigma_v$	: De verticale korrelspanning aan de bovenkant van de TBM	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_h$	: De horizontale korrelspanning ter plaatse van het hart van de TBM	[kN/m <sup>2</sup> ]
D	: De diameter van de TBM	[m]
L	: De lengte van de TBM	[m]
K	: De coëfficiënt van de horizontale gronddruk	[-]
$\delta$	: Wrijvingshoek	[rad]

Hetzelfde probleem doet zich hier voor zoals beschreven is in paragraaf 5.4 namelijk de zand-bentoniet-staal wrijvingshoek is niet bekend. Bij het kiezen van dezelfde wrijvingshoek zoals bij de berekening in bijlage 11.1, blijkt het dat de resultaten niet veel afwijken. Dit is daarom een goed alternatief om de berekeningen te vereenvoudigen. De resultaten volgens vergelijking (8.6) en volgens bijlage 11.1 voor een zand-bentoniet-staal wrijvingshoek van  $\frac{1}{3}\phi$  zijn in de volgende tabel te vinden.

Tabel 8-2

	volgens bijlage 11.1	volgens verg. (8.6)
Wrijvingskracht [MN]	3,5	4,7

Dat de waarden in de bovenstaande tabel toch nog ver uit elkaar liggen, komt voornamelijk doordat bij de berekeningen volgens vergelijking (8.6) geen rekening is gehouden met gewelfwerking, terwijl bij de berekening volgens bijlage 11.1 daarmee wel rekening gehouden is.

#### 8.2.4 De grondprop

De berekeningsmethoden voor de grondprop zijn al vrij eenvoudig. Alleen komen er nog integralen in de berekeningen voor (zie bijlage 10.1.1). Na het wegwerken van de integralen ziet de vereenvoudiging er als volgt uit:

$$F_{\text{prop}} = \pi(\sigma_v + \sigma_h) \tan(\phi) \frac{\Gamma_{\text{prop}}^2}{2} \cot\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \quad (8.8)$$

$$T_{\text{prop}} = \pi(\sigma_v + \sigma_h) \tan(\phi) \frac{\Gamma_{\text{prop}}^3}{3} \cot\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \quad (8.9)$$

Waarin:

$F_{\text{prop}}$	: De axiale kracht op het graafwiel als gevolg van de grondprop	[kN]
$T_{\text{prop}}$	: Het koppel als gevolg van de grondprop	[kNm]
$\Gamma_{\text{prop}}$	: De straal van het grondvlak van de prop ( $\approx$ de straal van de as)	[m]

#### 8.2.5 De snijkrachten

Het snijmodel beschreven in paragraaf 4.1.5 is gebruikt om de berekeningen van de snijkrachten van de beitels te toetsen. Het probleem is dat dit model echter niet veel eenvoudiger is dan de andere twee modellen die gebruikt zijn (zie paragraaf 4.1.2 en 4.1.3) bij de berekeningen in hoofdstuk 7.

De uitkomsten van de berekeningen met het model volgens passief bezwijken liggen in de zelfde orde van grootte als de andere berekeningen. Dat de uitkomsten niet precies hetzelfde zijn ligt aan de modellering van de vorm van de gesneden schil. In de volgende tabel zijn de resultaten te zien van de berekening van de horizontale snijkrachten volgens passief bezwijken (zie paragraaf 4.1.5) en volgens het vereenvoudigd snijmodel (zie paragraaf 4.1.3). Er is gekozen de berekeningen uit te voeren voor beitel nummer 20 (zie bijlage 8), omdat deze de gemiddelde snijkracht op de beitels weergeeft.

Tabel 8-3

	vereenvoudigd snijmodel § 4.1.3	passief bezwijken § 4.1.5
Horizontale snijkracht [kN]	29,9	28,6



## 8.3 Invloed van het veranderen van de grondparameters

### 8.3.1 Inleiding

De vijzelkrachten en het koppel op het graafwiel worden bepaald door de grondparameters zoals:

- Het volume gewicht ( $\gamma$ ).
- De hoek van inwendige wrijving ( $\phi$ ).
- De cohesie ( $c$ ).
- en de stijghoogte van het poriënwater ( $h_w$ ).

Uit hoofdstuk 7 is gebleken dat de vijzelkrachten hoofdzakelijk door de steundruk en het koppel op het graafwiel door de snijkrachten bepaald worden. Het is daarom interessant om te weten hoe sterk de steundruk en de snijkrachten beïnvloed worden door de grondparameters. Dit wordt gedaan door de waarden van de grondparameters te variëren. Als eerste moet een referentiekader gesteld worden. Om het overzicht te krijgen zal de machine door een homogene grondlaag boren. De grondparameters die gekozen zijn, zijn niet de grondparameters die op het traject van de Heinenoordtunnel voorkomen, maar ze zouden wel elders in Nederland voor kunnen komen. De waarden die in deze paragraaf uitgerekend worden zeggen niets over de Heinenoordtunnel, maar ze worden gebruikt om met elkaar te vergelijken. Omdat bij profiel 1 de machine zich volledig in één laag bevindt, zal uitgaan worden van dit profiel, alleen de parameters van de laag waar de machine zich in bevindt worden verandert.

### 8.3.2 Invloed op de steundruk

Met een bezwijkmechanisme zoals beschreven is in paragraaf 5.2.1 kan de steundruk bepaald worden die nodig is om het boorfront stabiel te houden. De luchtdruk en de steunvloeistofdruk vormen samen de steundruk. De steunvloeistofdruk wordt bepaald door de dichtheid van de vloeistof in de mengkamer. De dichtheid zal maximaal gelijk zijn aan  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Door uit te gaan van de situatie met deze maximale dichtheid, wordt de ondergrens van de luchtdruk bepaald. De berekeningen die uitgevoerd zijn voor het bepalen van de steundruk zullen weer uitgevoerd worden (zie bijlage 10.1.1), maar nu zullen de grondparameters steeds veranderd worden.

Er kunnen twee situaties onderscheiden worden; boren in een zandige dan wel in een kleiige grondlaag. Voor de zandige grondlaag worden de volgende begin parameters gekozen:

Volumegewicht	: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
Hoek van inwendige wrijving	: $\phi = 35^\circ$
De cohesie	: $c = 0$ en $10 \text{ kPa}$
Stijghoogte poriënwater	: $h_w = 20,8 \text{ m}$

Zowel de hoek van inwendige wrijving als de stijghoogte van het poriënwater zal veranderd worden, door een variatie van plus of min 20%. Ook is weergegeven wat het effect is als het zand een cohesie heeft (kleiig zand). In tabel 8-6 is de luchtdruk weergegeven die voor de verschillende situaties geldt.

Tabel 8-4

		$h_w -20\%$		$h_w \pm 0\%$		$h_w +20\%$	
		$c = 0$	$c = 10 \text{ kPa}$	$c = 0$	$c = 10 \text{ kPa}$	$c = 0$	$c = 10 \text{ kPa}$
$p_{\text{lucht}} \text{ [kPa]}$	$\phi -20\%$	160	150	200	190	240	235
	$\phi \pm 0\%$	155	150	195	190	235	235
	$\phi +20\%$	150	150	190	190	235	235

Uit tabel 8-4 blijkt dat de verandering van de stijghoogte het grootste effect op de luchtdruk heeft. Wat ook opvalt is dat iedere stijghoogte een minimale luchtdruk heeft. Bij grotere hoeken en of grond met een grotere cohesie zal de component van de korreldruk klein en zelfs negatief worden. Negatief betekent dat de grond blijft staan en dus geen ondersteuning nodig heeft. De component van de waterdruk zal altijd aanwezig zijn, dit zal dan de minimale steundruk bepalen.

Voor een kleiige grondsoort worden de volgende grondparameters gekozen:

Het volumegewicht	: $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$
Hoek van inwendige wrijving	: $\phi = 25^\circ$
De cohesie	: $c = 5 \text{ en } 10 \text{ kPa}$
Stijghoogte poriënwater	: $h_w = 20,8 \text{ m}$

In tabel 8-7 is de luchtdruk weergegeven die voor de verschillende situaties geldt.

Tabel 8-5

		$h_w -20\%$		$h_w \pm 0\%$		$h_w +20\%$	
		$c = 5$	$c = 10 \text{ kPa}$	$c = 5$	$c = 10 \text{ kPa}$	$c = 5$	$c = 10 \text{ kPa}$
$p_{\text{lucht}} \text{ [kPa]}$	$\phi -20\%$	150	140	190	190	235	225
	$\phi \pm 0\%$	145	140	190	190	230	225
	$\phi +20\%$	145	140	190	190	230	225

Hier geldt hetzelfde als voor een zandige grondsoort: de variatie van de stijghoogte heeft het meeste effect op de luchtdruk.

### 8.3.3 Invloed op de snijkrachten

De snijkrachten hebben het grootste aandeel in het totale koppel op het graafwiel. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen het snijden van zandige dan wel kleiige grondsoorten. Voor beide grondsoorten zoals beschreven in de vorige paragraaf, zullen de snijkrachten bepaald worden. De snijkrachten worden ook door de snijdiepte beïnvloed, dit effect zal ook meegenomen worden in de berekeningen.

#### 8.3.3.1 Snijden van zand en kleiig zand

Zoals gebleken is uit paragraaf 8.3.2 heeft de steundruk bij iedere situatie een andere waarde. Bij het bepalen van de snijkrachten wordt per stijghoogte echter de luchtdruk constant gehouden. Zie tabel 8-6 voor de luchtdrukken per stijghoogte. Op deze manier kunnen de uitkomsten beter vergeleken worden. Voor de snijdiepte wordt gekozen:  $h_i = 0,03$

m. De resultaten van het koppel (in MNm) op het graafwiel als gevolg van de snijkrachten zijn in tabel 8-8 weergegeven. Voor de begin parameters geldt:

Volumegegewicht :  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$   
 Hoek van inwendige wrijving :  $\phi = 35^\circ$   
 De cohesie :  $c = 0$  en  $10 \text{ kPa}$   
 Stijghoogte poriënwater :  $h_w = 20,8 \text{ m}$   
 De snijdiepte :  $h_i = 0,03 \text{ m}$

Tabel 8-6

		koppel als gevolg van het snijden met de beitels [MNm]					
		$h_w -20\%$		$h_w \pm 0\%$		$h_w +20\%$	
		$p_{\text{lucht}} = 160 \text{ kPa}$		$p_{\text{lucht}} = 200 \text{ kPa}$		$p_{\text{lucht}} = 240 \text{ kPa}$	
		$c = 0$	$c = 10 \text{ kPa}$	$c = 0$	$c = 10 \text{ kPa}$	$c = 0$	$c = 10 \text{ kPa}$
$\phi -20\%$	$h_i -20\%$	0,509	0,515	0,551	0,556	0,592	0,597
	$h_i \pm 0\%$	0,607	0,616	0,656	0,665	0,705	0,714
	$h_i +20\%$	0,708	0,720	0,765	0,777	0,822	0,834
$\phi \pm 0\%$	$h_i -20\%$	1,039	1,051	1,123	1,135	1,207	1,219
	$h_i \pm 0\%$	1,251	1,267	<b>1,351</b>	1,368	1,452	1,469
	$h_i +20\%$	1,465	1,488	1,583	1,606	1,702	1,724
$\phi +20\%$	$h_i -20\%$	2,650	2,680	2,863	2,894	3,077	3,108
	$h_i \pm 0\%$	3,224	3,267	3,484	3,527	3,744	3,787
	$h_i +20\%$	3,818	3,874	4,126	4,182	4,434	4,491

Uit de tabel blijkt dat de variatie van de hoek van inwendige wrijving het grootste effect heeft op het koppel van het graafwiel.

### 8.3.3.2 Snijden van zandige klei

Voor het snijden van zandige klei zijn ook berekeningen uitgevoerd voor het bepalen van het koppel op het graafwiel. De berekeningen zijn niet voor puur klei uitgevoerd, omdat op het traject van de Heinenoordtunnel geen grondlaag wordt aangetroffen die zich als puur klei gedraagt. Het koppel (in MNm) op het graafwiel is in tabel 8-9 weergegeven. Voor de begin parameters geldt:

Het volumegegewicht :  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$   
 Hoek van inwendige wrijving :  $\phi = 25^\circ$   
 De cohesie :  $c = 5$  en  $10 \text{ kPa}$   
 Stijghoogte poriënwater :  $h_w = 20,8 \text{ m}$   
 De snijdiepte :  $h_i = 0,03 \text{ m}$

De tabel met de uitkomsten is op de volgende pagina te vinden.

Tabel 8-7

		koppel als gevolg van het snijden met de beitels [MNm]					
		$h_w -20\%$ $p_{lucht} = 150 \text{ kPa}$		$h_w \pm 0\%$ $p_{lucht} = 190 \text{ kPa}$		$h_w +20\%$ $p_{lucht} = 235 \text{ kPa}$	
		$c = 5$	$c = 10 \text{ kPa}$	$c = 5$	$c = 10 \text{ kPa}$	$c = 5$	$c = 10 \text{ kPa}$
$\phi -20\%$	$h_i -20\%$	0,095	0,096	0,114	0,115	0,136	0,137
	$h_i \pm 0\%$	0,116	0,118	0,139	0,141	0,165	0,167
	$h_i +20\%$	0,138	0,141	0,165	0,168	0,195	0,198
$\phi \pm 0\%$	$h_i -20\%$	0,151	0,153	0,184	0,184	0,217	0,219
	$h_i \pm 0\%$	0,185	0,188	<b>0,222</b>	0,225	0,263	0,267
	$h_i +20\%$	0,220	0,225	0,263	0,268	0,312	0,316
$\phi +20\%$	$h_i -20\%$	0,243	0,246	0,293	0,296	0,349	0,352
	$h_i \pm 0\%$	0,299	0,304	0,358	0,363	0,425	0,430
	$h_i +20\%$	0,358	0,365	0,427	0,434	0,506	0,513

Voor het snijden van zandige klei gelden dezelfde relaties als voor het snijden van zandige grondsoorten: de hoek van inwendige wrijving heeft het grootste effect op het koppel. Het koppel is veel kleiner dan van de berekeningen uit de vorige paragraaf, dit heeft twee redenen. Als eerste zullen bij het snijden van kleiige grondsoorten geen wateronderspanningen voorkomen. En ten tweede is de hoek van inwendige wrijving voor de kleilaag veel kleiner dan bij de berekeningen van de zandlaag (zie tabel 8-8) en aangezien dat deze wrijvingshoek het grootste effect heeft op het koppel zullen de uitkomsten daarom veel lager uitkomen.

## 8.4 Ontwerp-formules

### 8.4.1 Inleiding

Aan de hand van de verkregen resultaten (zie hoofdstuk 7) en de vereenvoudigde relaties eerder in dit hoofdstuk worden ontwerp-formules opgesteld voor het boren van tunnels in Nederland. Dit wordt voor alle drie besturingsparameters gedaan. Bedenk wel dat de resultaten uit deze paragraaf zijn verkregen uit de kennis die is opgedaan uit de berekeningen van de drie grondprofielen. Bij de ontwerp-formules is een beetje naar de antwoorden toe gewerkt, dit geldt voornamelijk voor de vijzelkrachten. In hoeverre de ontwerp-formules een juiste benadering geven zal moeten blijken tijdens het boren van de Heinenoordtunnel.

### 8.4.2 Vijzelkrachten

Zoals gebleken is in paragraaf 7.2 heeft de steundruk het grootste aandeel in de vijzelkrachten. Een goede tweede is de kracht als gevolg van de mantelwrijving, echter het probleem is dat deze moeilijk te voorspellen is, omdat het effect van de aanwezigheid van bentoniet langs de mantel niet goed bekend is.

De steundruk blijkt sterk afhankelijk te zijn van de stijghoogte van het poriënwater. Voor de berekening van de steundruk geldt globaal, voor de drie profielen die gekozen zijn voor de berekening in hoofdstuk 7, de volgende relatie:

$$p_{\text{steun}} = p_{\text{water}} + 20 \text{ kPa} \quad (8.10)$$

Met:

$p_{\text{steun}}$  : De gemiddelde steundruk in de ontgravingsruimte [kPa]  
 $p_{\text{water}}$  : De grondwaterspanning ter plaatse van het hart van de TBM [kPa]

De steundruk uit de bovenstaande relatie is de gemiddelde steundruk op het boorfront, hiervoor wordt de druk ter plaatse van het hart van de TBM gebruikt. Voor de grondwaterspanning ter plaatse van het hart van de TBM geldt:

$$p_{\text{water}} = h_w \cdot \gamma_w \quad (8.11)$$

Met:

$h_w$  : De stijghoogte van het poriënwater t.o.v. van het hart van de TBM [m]  
 $\gamma_w$  : Het volume gewicht van water (10 kN/m<sup>3</sup>) [kN/m<sup>3</sup>]

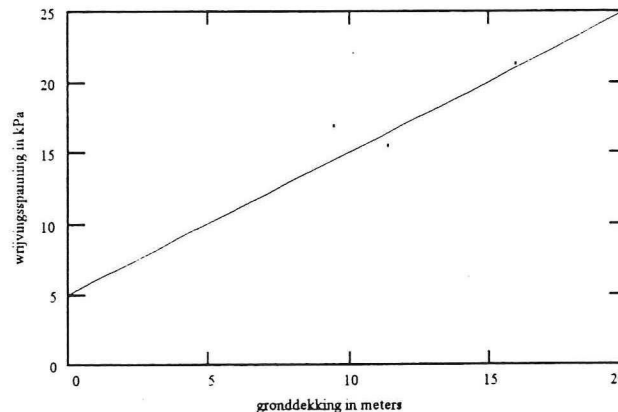
De kracht die de steundruk op de TBM uitoefent kan als volgt worden bepaald:

$$F_{\text{steun}} = (h_w \cdot 10 \text{ kN/m}^3 + 20 \text{ kPa}) \frac{\pi D^2}{4} \quad (8.12)$$

Met:

$F_{\text{steun}}$  : De steunkracht [kN]  
 $D$  : De diameter van de TBM [m]

De mantelwrijving wordt sterk bepaald door de grond-bentoniet-staal wrijvingshoek en de gronddekking. Voor de wrijvingshoek was in hoofdstuk 7 genomen dat deze gelijk is aan  $\frac{1}{3}\phi$ , zolang er niets meer bekend is over deze wrijvingshoek zal dit aangehouden worden in alle berekeningen. In figuur 8.1 is de wrijvingsspanning uitgezet tegen de gronddekking voor de drie grondprofielen. De lijn die door de punten getrokken is, is een empirische relatie die gevonden is voor de drie grondprofielen.



Figuur 8.1 De wrijvingsspanning op de mantel uitgezet tegen de gronddekking

Voor de wrijvingsspanning kan voor de drie profielen globaal de volgende relatie gebruikt worden (zie rechte lijn in figuur 8.1):

$$\sigma_{\text{wrijving}} = t \cdot 1 \text{ kN/m}^3 + 5 \text{ kPa} \quad (8.13)$$

Met:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{wrijving}} &: \text{De wrijvingsspanning op de mantel van de TBM} && [\text{kN/m}^2] \\ t &: \text{De gronddekking} && [\text{m}] \end{aligned}$$

De kracht die nodig is door de vijzels als gevolg van deze schuifspanning op de mantel is dan gelijk aan:

$$F_{\text{wrijving}} = (t \cdot 1 \text{ kN/m}^3 + 5 \text{ kPa})\pi DL \quad (8.14)$$

Met:

$$\begin{aligned} F_{\text{wrijving}} &: \text{De wrijvingskracht} && [\text{kN}] \\ L &: \text{De lengte van de TBM} && [\text{m}] \end{aligned}$$

Voor de vloeistofschild machines geldt globaal dat de lengte van het schild ongeveer gelijk is aan de diameter, dit betekent dat in vergelijking (8.14) L vervangen kan worden door D. Uit de bovenstaande formules en correcties voor het niet meenemen van de krachten van de grondprop en het snijden van de grond, is de totale kracht op de vijzels uit te rekenen:

$$F_{\text{vijzel}} = (h_w \cdot 2,6 \text{ kN/m}^3 + t \cdot 1,2 \text{ kN/m}^3 + 10 \text{ kPa})\pi D^2 \quad (8.15)$$

De bovenstaande formule geldt voor de drie profielen waar de berekeningen in hoofdstuk 7 voor zijn uitgevoerd. Uit de praktijk zal moeten blijken of een dergelijke relatie algemeen ook geldig is voor de andere profielen op het traject van de Heinenoordtunnel. De resultaten uit hoofdstuk 7 en de uitkomsten uit vergelijking (8.15) voor de drie profielen is in de volgende tabel weergegeven.

Tabel 8-8

		resultaten uit hoofdstuk 7	uitkomsten verg. (8.15)
Vijzelkracht [MN]	profiel 1	17,5	17,9
	profiel 2	15,4	15,6
	profiel 3	18,1	18,4

### 8.4.3 Koppel

Het koppel als gevolg van het snijden van de grond, zal afhankelijk zijn van de snijdiepte, de diameter van de TBM, de stijghoogte van het poriënwater en de hoek van inwendige wrijving. Wat gebeurt er bij het ontgraven van grond: een volume grond moet uit zijn korrelskelet gehaald worden. Dit zal iets met schuifspanningen te maken hebben. Voor het snijden van zand geldt dat de korrelspanningen gelijk zijn aan de grondspanning plus de caverende wateronderspanning. De grondspanning zal in de orde van grootte zijn van de steundruk in de ontgravingsruimte, hiervoor geldt:

$$\sigma \approx p_{\text{steun}} = h_w \cdot 10 \text{ kN/m}^3 + 20 \text{ kPa} \quad (8.16)$$

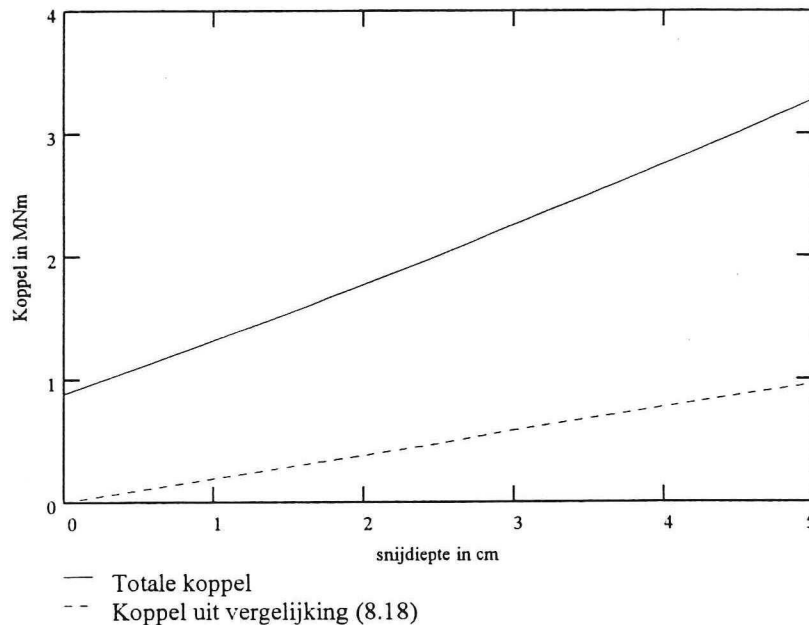
Voor de cavitierende wateronderspanning geldt:

$$p_{\text{caviteren}} = h_w \cdot 10 \text{ kN/m}^3 + 10 \text{ kPa} \quad (8.17)$$

Eenvoudig kan dan gesteld worden dat voor het koppel (bij het snijden van zand) geldt:

$$T = \frac{h_i \pi D^2}{4} (p_{\text{steun}} + p_{\text{caviteren}}) \tan(\phi) \quad (8.18)$$

In de bovenstaande formule wordt uitgegaan van de ideale situatie dat de vorm van het mes geen invloed heeft op de snijkrachten en dat er zich geen grondprop vormt voor de as van het graafwiel. In de volgende figuur is het koppel volgens vergelijking (8.18) en het totale koppel zoals in hoofdstuk 7 is uitgerekend, uitgezet tegen de snijdiepte.



Figuur 8.2 Het koppel uitgezet tegen de snijdiepte voor profiel 1

Beide lijnen in figuur 8.2 geven de werkelijk niet goed weer. Als eerste kan opgemerkt worden dat het lineaire verband tussen de snijdiepte en het koppel niet meer opgaat voor kleine snijdiepten. Ten tweede geeft de gestippelde lijn waarschijnlijk te kleine waarden en de getrokken lijn te grote waarden voor het koppel.

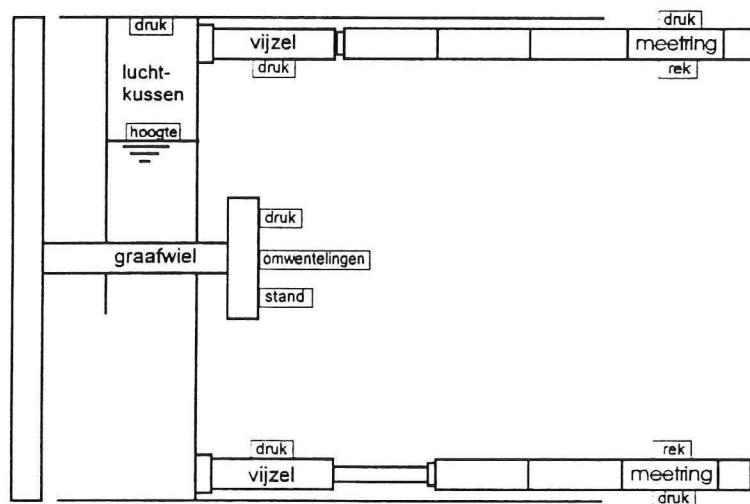
Dat de gestippelde lijn in de oorsprong begint is niet juist. Bij een snijdiepte van nul centimeter is er altijd nog de grondprop die voor een koppel op het graafwiel zorgt. Dus de gestippelde lijn zal niet in de oorsprong moeten beginnen, maar bij die waarde die overeenkomt met het koppel als gevolg van de grondprop.

In hoofdstuk 7 is al beweert dat de uitkomsten van de berekeningen te hoge waarden opleveren. Dit geldt dan ook voor de getrokken lijn uit figuur 8.2. De werkelijkheid zal daarom ergens tussen de twee lijnen in liggen.

# 9. HET METEN EN REGELEN VAN DE BESTURINGSPARAMETERS

## 9.1 Algemeen

De resultaten in hoofdstuk 7 zijn verkregen door profielen op het traject van de nog te boren Heinenoordtunnel als invoer te gebruiken. In hoofdstuk 8 zijn met behulp van bekende eenvoudige berekeningen de resultaten uit hoofdstuk 7 getoetst (zie paragraaf 8.1). De beste methode om de berekeningen te toetsen is echter het meten tijdens het boren. De Heinenoordtunnel dient ook als een studieproject, waarvan één van de onderdelen het monitoren is. Door de commissie K 100 is een 'Instrumentatie en meetplan' opgesteld, waarin beschreven wordt welke metingen en experimenten tijdens het boren uitgevoerd zullen worden. Metingen die interessant zijn voor de studie in dit rapport bevinden zich hoofdzakelijk in de TBM, deze zijn in de onderstaande figuur weergegeven:



Figuur 9.1 Metingen in de TBM.

In de bovenstaande figuur is te zien dat ook in de tunnelmantel gemeten zal worden. Enkele ringen van de tunnel worden voorzien van betondrukdozen en rekopnemers. Per tunnelbuis zullen er drie meetringen geplaatst worden. Het is nog niet precies bekend waar deze ringen geplaatst zullen worden. Voor de studie in dit rapport is het interessant deze ringen ter plaatse van profiel 1 en 3 te plaatsen. De drukdozen kunnen een beeld geven van de grondspanning op de tunnelmantel, de vraag is echter of deze spanning gelijk is aan de grondspanning op de schild van de TBM. De spanning op het schild is interessant omdat deze invloed heeft op de schuifspanning tussen de grond en het schild. Uit paragraaf 5.4 blijkt namelijk dat de mantelwrijving nog niet goed te voorspellen is en daarom is verder onderzoek hiernaar gewenst.



## 9.2 Meten en regelen van de vijzelkrachten

Tijdens het boren zal om de machine vooruit te krijgen de machine belast worden door de vijzels. Deze vijzelkrachten (althans de drukken in de vijzels) zullen tijdens het boorproces geregistreerd worden. De totale vijzelkracht wordt gevormd door:

- Steundrukkracht
- Mantelwrijving
- Kracht als gevolg van de grondprop
- Snijkrachten
- Overige

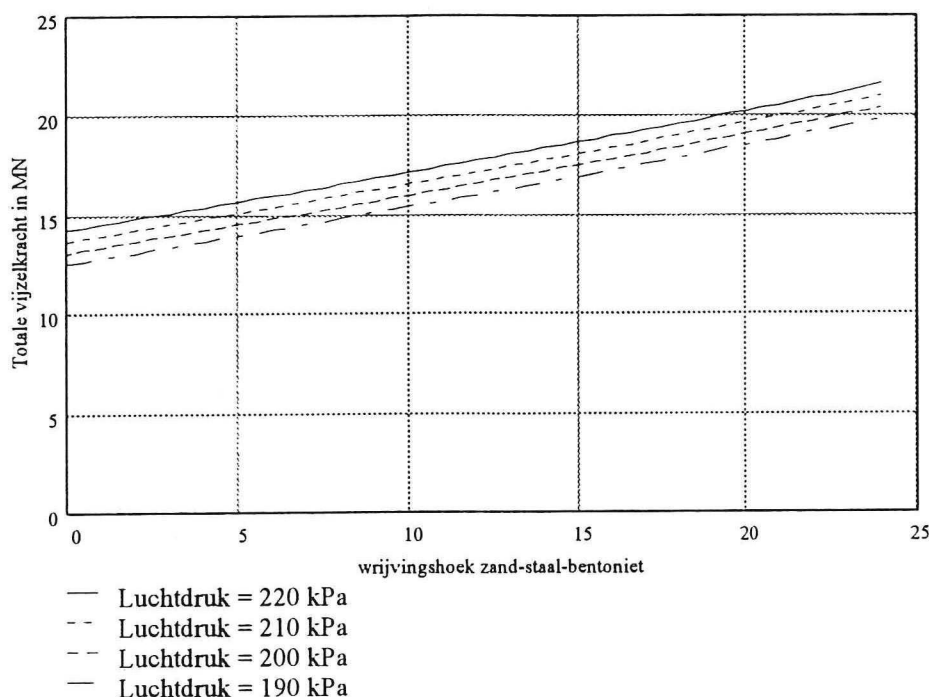
Vooral de eerste twee krachten zullen een groot aandeel hebben in het totaal (zie hoofdstuk 7). De steunkracht is te bepalen uit de luchtdruk in het luchtkussen en de hoogte van de vloeistofspiegel. Door aan te nemen dat de dichtheid van de steunvloeistof gelijk is aan  $1200 \text{ kg/m}^3$ , is de totale kracht te bepalen als gevolg van de steunvloeistof op het drukschot.

Het verschil tussen de totale vijzelkracht en de steunkracht, zal door de rest van de krachten verdeeld moeten worden. Van deze krachten zal de kracht als gevolg van de mantelwrijving het grootste aandeel hebben. Uit paragraaf 3.2.3 blijkt dat de mantelwrijving niet precies bekend is. Deze zal, om inzicht te krijgen in het proces dat zich op de mantel voordoet, gemeten moeten worden.

Volgens experiment E-07 'Mantelwrijving en frontdruk na passage boorinstallatie' uit het 'Instrumentatie en meetplan' worden er metingen gebruikt om de mantelwrijving te bepalen. De drukdozen zullen de spanning op de mantel van de tunnelbuis meten en niet de spanning op de mantel van de TBM. Als de spanning op de tunnelmantel bekend is, dan zegt dat nog niets over de schuifspanning. Door de aanwezigheid van bentoniet zal de wrijving tussen grond en staal vermoedelijk reduceren. En ook al is de spanning op de tunnelmantel bekend, dan wil dat nog niets zeggen over de spanning op de mantel van de TBM. De mantelwrijving zal op een andere manier bepaald moeten worden.

Een methode om de mantelwrijving te bepalen kan als volgt beschreven worden. Het graafwiel van de TBM wordt gezet stil. Vervolgens wordt gelijktijdig met het voort duwen van het schild het graafwiel in het schild teruggetrokken. De vijzelkracht die dan gemeten wordt, is gelijk aan de som van de steunkracht, de mantelwrijving en de overige krachten. De overige krachten zoals het meeslepen van de installaties zijn klein in vergelijking met de totale vijzelkracht (zie paragraaf 7.2). Overigens is de kracht voor het meeslepen van de installaties makkelijk te meten. Omdat de steunkracht te bepalen is (uit de luchtdruk) en de overige krachten te verwaarlozen zijn, is de kracht als gevolg van de wrijving langs de mantel van de TBM voor dit experiment te bepalen. Omdat de wrijvingshoek zand-bentoniet-staal niet bekend is, is in paragraaf 5.4 de wrijvingsspanning op de mantel uitgezet tegen de wrijvingshoek voor profiel 1. Voor het hierboven beschreven experiment is een figuur gemaakt (figuur 9.2). Door de steundrukkracht (bij een bepaalde luchtdruk) bij de mantelwrijving (als functie van de wrijvingshoek) op te tellen wordt het resultaat de totale vijzelkracht verkregen. Door de gemeten waarden in deze figuur (figuur 9.2) te plaatsen zal blijken welke waarde de wrijvingshoek zal hebben. Dus er wordt een theoretische lijn getrokken met als variabele de wrijvingshoek en uit de metingen zal in deze figuur de praktijk waarde geplaatst worden waaruit de wrijvingshoek bepaald kan worden. Omdat de steundruk afhankelijk is van de luchtdruk, zullen in de figuur meerdere lijnen te vinden zijn. In figuur 9.2 is de vijzelkracht uitgezet tegen de wrijvingshoek voor verschillende luchtdrukken voor profiel 1.

vijzelkracht uitgezet tegen de wrijvingshoek voor verschillende luchtdrukken voor profiel 1.



Figuur 9.2 De totale vijzelkrachten als functie van de wrijvingshoek (profiel 1)

Het experiment zoals hierboven beschreven zal op verschillende plaatsen uitgevoerd moeten worden om het gedrag van de bentoniet op de mantel van de TBM goed te kunnen bestuderen. Vooral bij het boren door kleiige lagen is interessant wat de invloed van de bentoniet op de mantelwrijving zal zijn.

### 9.3 Meten en regelen van het koppel

Ook het totale koppel op het graafwiel wordt geregistreerd. Omdat ook de rotatiesnelheid van het graafwiel geregistreerd wordt, is het vermogen op de as van het wiel te bepalen. In de berekeningen van hoofdstuk 7 is het totale koppel opgedeeld in:

- Koppel als gevolg van het snijden van de beitels
- Koppel als gevolg van het oversnijden
- Koppel als gevolg van de grondprop ter plaatse van de as van het graafwiel
- Koppel als gevolg van de stromingsweerstand

Het koppel als gevolg van het snijden van de beitels heeft het grootste aandeel in het totale koppel en het koppel als gevolg van de stromingsweerstand is te verwaarlozen (zie paragraaf 7.2). Aangezien de snijkrachten afhankelijk zijn van de snijdiepte, zal ook het totale koppel afhankelijk zijn van de snijdiepte van de beitels. De snijdiepte is afhankelijk van de relatie tussen de voortgangssnelheid van de machine en de rotatiesnelheid van het graafwiel. Deze relatie ziet er als volgt uit:

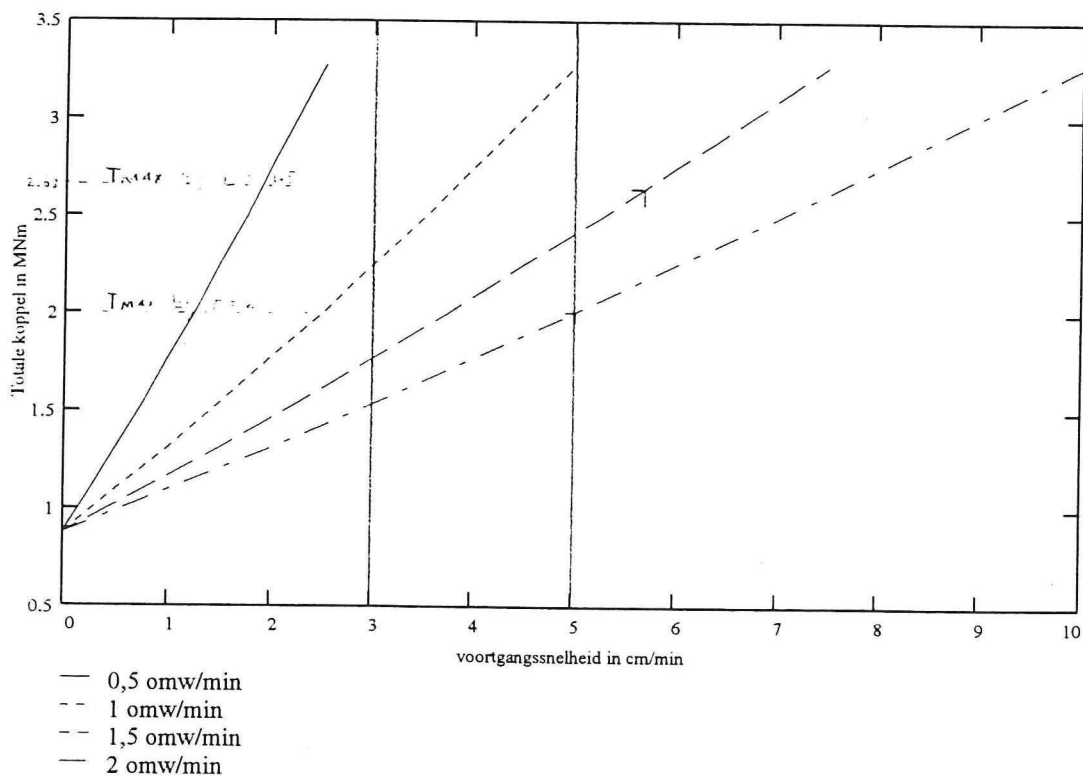
$$h_i = \frac{2\pi v}{\omega} \quad (9.1)$$

Met:

$h_i$	: De snijdiepte	[m]
$v$	: De voortgangssnelheid van de TBM	[m/s]
$\omega$	: De rotatiesnelheid van het graafwiel	[rad/s]

Het koppel als gevolg van het snijden met de beitels en de overcutters zal variëren met de stand van het wiel (zie bijlagen 14.1 t/m 14.3), dit komt door de asymmetrische verdeling van de beitels en de overcutters over de spaken van het wiel (zie bijlage 8). Bij de berekeningen wordt gerekend met de gemiddelde waarde van het koppel.

Voor profiel 1 is het mogelijk het totale koppel uit te zetten tegen de voortgangssnelheid (de productie) van de TBM, dit is in de volgende figuur te zien.



Figuur 9.3 Het totale koppel uitgezet tegen de voortgangssnelheid (profiel 1)

In figuur 9.3 is te zien dat als de machine stilstaat, dus de snijdiepte is gelijk aan nul, dan nog wel een koppel nodig is om het graafwiel te laten roteren. In principe moet het koppel nu gelijk zijn aan het koppel als gevolg van de grondprop, maar het koppel is groter. Doordat het vereenvoudigde snijmodel uit paragraaf 4.1.3 gebruikt wordt bij de berekeningen van de snijkrachten, zijn de uitkomsten voor het koppel bij een kleine snijdiepte niet correct. Dit komt omdat bij kleine snijdiepten geen cavitatie op zal treden, terwijl in de berekeningen hier wel vanuit is gegaan.

In het supplement van de 'Parameterset voor de predicties' van het Projectbureau Boortunnels zijn de volgende parameters gegeven (zie ook bijlage 7, tabel 5):

Tabel 9-1

<i>omschrijving</i>	<i>eenheid</i>	<i>waarde</i>	<i>opmerking</i>
voortgangssnelheid	[cm/min]	3 - 5	effectieve boortijd
aandrijvend moment snijrad	[MNm]	4,0 bij 1 omw/min 2,0 bij 2 omw/min	aandrukkkracht 3 MN
snijdiepte van snijelementen	[m]	0 - 0,05	

Als deze parameters voor de TBM aangehouden worden tijdens het boren, betekent dit dat het toerental van het graafwiel minimaal 0,6 omw/min moet zijn. In figuur 9.3 is duidelijk te zien dat bij een toerental van 0,5 omw/min het gebied voor de voortgangssnelheid tussen de 3 en de 5 cm/min niet gehaald wordt.

Verder blijkt uit tabel 9-1 dat bij een toerental van 2 omw/min het koppel maximaal 2 MNm kan zijn, dit volgt uit het maximaal leverbare vermogen op de as van het graafwiel. Dit maximale vermogen ligt rond de 420 kW. Te zien is in figuur 9.3 dat voor het gebied voor de voortgangssnelheid tussen de 3 en de 5 cm/min het maximale koppel net op de grens valt. Voor een toerental van 1,5 omw/min geldt dat het maximale koppel gelijk is aan 2,67 Mnm, deze valt buiten het gebied waarin de voortgangssnelheid zal variëren.

Voor het vermogen kan eenzelfde soort figuur gemaakt worden als figuur 9.3. Voor het vermogen geldt:

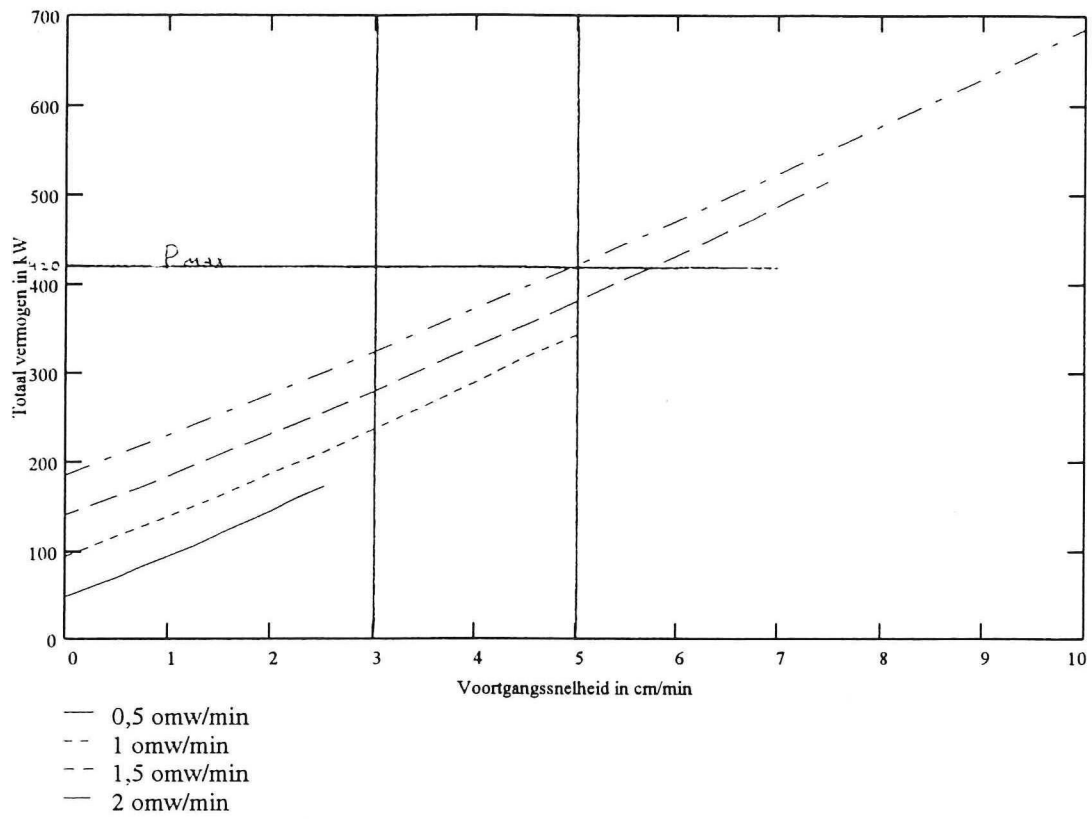
$$P = 2\pi \cdot \omega \cdot T \quad (9.2)$$

Met:

P	: Het vermogen op de as van het graafwiel	[kW]
T	: Het totale koppel op het graafwiel	[kNm]
$\omega$	: de hoeksnelheid van het graafwiel	[rad/s]

Voor profiel 1 is in figuur 9.4 het vermogen op de as van het graafwiel uitgezet tegen de voortgangssnelheid. Het maximaal leverbare vermogen op de as van het graafwiel is ongeveer gelijk aan 420 kW. Ook nu weer blijkt dat de resultaten te hoog uitkomen, zoals al in hoofdstuk 7 is opgemerkt. Het is erg onwaarschijnlijk dat de machine zo wordt ontworpen dat er geen veiligheidsmarge zit tussen het maximale vermogen en het te verwachten vermogen tijdens het boorproces. Dit geldt o.a. voor de situatie waarbij het toerental gelijk is aan 2 omw/min en de voortgangssnelheid gelijk is aan 5 cm/min.

Uit figuur 9.4 blijkt ook dat bij eenzelfde voortgangssnelheid (de productie), er beter met een lager toerental en een grotere snijdiepte gewerkt kan worden dan met een groot toerental en een kleine snijdiepte. Dit zal de energiekosten besparen bij dezelfde productie. De aannemer zal een zo groot mogelijke productie willen maken en zal daarom geneigd zijn het toerental zo groot mogelijk te houden. Terwijl bij een lager toerental en een grotere snijdiepte dezelfde productie gehaald kan worden met nog eens een kosten besparing en daar zit dan de winstmarge voor de aannemer.



Figuur 9.4 Het vermogen op de as uitgezet tegen de voortgangssnelheid (profiel 1)

# CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

## Conclusies

### Algemeen

- Het is mogelijk de besturingsparameters, zoals de steundruk van de steunvloeistof, de vijzelkrachten en het koppel op het graafwiel voor een Hydroschild tunnelboormachine te bepalen. Hiervoor zijn methoden uit andere vakgebieden gebruikt, zoals het baggeren, diepwanden en grondkerende constructies aangepast aan het tunnelboorproces.
- Uit de berekeningen voor het bepalen van de steundruk van de steunvloeistof komen ongeveer dezelfde resultaten als in de praktijk worden gebruikt.
- Een grotere steundruk geeft een grotere veiligheid tegen het bezwijken van het boorfront, maar bemoeilijkt het ontgraven van de grond op dit boorfront.
- Alle grondbelastingen die op de machine werken zijn goed uit te rekenen, behalve de wrijving tussen de mantel van de TBM en de grond. Dit komt omdat het effect van de aanwezigheid van bentoniet op de mantel en in de grond op de schuifspanning niet bekend is.
- De resultaten uit de berekeningen voor het koppel op het graafwiel komen te hoog uit. Dit komt waarschijnlijk omdat bij de berekeningen het verkeerde bezwijkmechanisme voor het snijden van grond is gebruikt.
- Er is een nagenoeg lineair verband tussen de snijdiepte en het koppel op het graafwiel. Aangezien het vermogen op de as van het graafwiel afhankelijk is van het koppel en het toerental van het graafwiel, is het vermogen ook nagenoeg lineair evenredig met de snijdiepte.

### De vijzelkrachten en de steundruk

- De steunkracht van de steunvloeistof in de ontgravingsruimte op het drukschot heeft het grootste aandeel in de totale vijzelkracht. (zie § 7.2)
- De waarde die gevonden wordt voor de steundruk is kleiner dan de waarde die gevonden wordt als gerekend wordt met de actieve gronddruk.
- De steundruk is niet afhankelijk van de dichtheidsverdeling van de steunvloeistof in de ontgravingsruimte. Het verschil in steundruk bij verschillende dichtheden is kleiner dan de nauwkeurigheid waarmee de steundruk geregeld wordt. De steundruk wordt door de luchtdruk in het luchtkussen geregeld en de nauwkeurigheid weermee dit gebeurt is 5 kPa.
- De steundruk is kleiner in cohesieve grondsoorten (klei) dan in niet cohesieve grondsoorten (zand).

### Het snijden van grond

- Het geldigheidsgebied voor de snijtheorie van Miedema geldt ook voor de modellen die hiervan zijn afgeleid (§ 4.1.2 en § 4.1.3). De theorie van Miedema geldt voor meshoeken tussen 30 en 60 graden. Bij grotere meshoeken (bijvoorbeeld 90 graden)

moet een ander snijmodel worden gebruikt bij de berekening van de snijkrachten. Een model dat gebruikt kan worden is beschreven in paragraaf 4.1.4.

- De snijkrachten bij een meshoek van 60 graden zijn kleiner dan bij een meshoek van 90 graden. Bij de machine, die gebruikt wordt bij de Heinenoordtunnel, zijn de meshoeken echter 90 graden. Dit is waarschijnlijk gedaan uit praktische overwegingen.
- Het snijmodel beschreven in paragraaf 4.1.2 kan vereenvoudigd worden (zie § 4.1.3) door uit te gaan dat bij het snijden van zand cavitatie optreedt. Dit geldt echter niet voor kleine snijdiepten. Aangenomen wordt dat bij snijdiepten kleiner dan 1 cm geen cavitatie optreedt.
- Bij het snijden van klei is sprake van ongedraineerd snijden.
- De snijkrachten zijn sterk afhankelijk van de hoek van inwendige wrijving van de grond die ontgraven wordt (zie § 8.2.3).
- De snijkrachten zijn bij het snijden van zand groter dan bij het snijden van klei.
- De snijkrachten nemen rechtevenredig toe met de snijdiepte.

#### Het koppel

- Het ontgraven van de grond met de beitels heeft het grootste aandeel in het totale aandrijfkoppel van het graafwiel.
- Het koppel varieert met de stand van het graafwiel. Bij de berekeningen van het totale koppel wordt echter uitgegaan van het gemiddelde koppel.
- Voor de as van het graafwiel vormt zich waarschijnlijk een grondprop (zie § 3.2.2). De grondprop zorgt voor een groter koppel op het graafwiel dan je zou verwachten als er geen rekening gehouden zou worden met dit fenomeen.
- Het koppel als gevolg van de grondprop voor de as van het graafwiel is niet afhankelijk van de rotatiesnelheid van het graafwiel.

#### Overige

- De parameters van de TBM gegeven door het Projectbureau Boortunnels sluiten niet op elkaar aan. Bij de gegeven voortgangssnelheid van de TBM en bij de gegeven maximale snijdiepte van de beitels (zie bijlage 7), zal het toerental van het graafwiel minimaal gelijk moeten zijn aan 0,6 omw/min (zie § 9.3).
- Door het fenomeen gewelfwerking (zie § 3.3) zijn de verticale korrelspanningen niet gelijk aan het gewicht van de bovenliggende grondlagen (zie figuur 3.7).

## Aanbevelingen

### Algemeen

- Tijdens het boorproces moet ter plaatse van in dit rapport beschreven profielen nauwkeurig gemeten worden: de luchtdruk in de luchtkussen, de drukken in de vijzels, de drukken op het graafwiel en de hoeksnelheid van het graafwiel. Hierdoor kunnen de uitkomsten in dit rapport getoetst worden.
- De productie van de TBM wordt bepaald door de voortgangssnelheid. De voortgangssnelheid wordt bepaald door het toerental van het graafwiel en de snijdiepte van de beitels (zie formule (9.1)). Het is aan te bevelen een laag toerental met een grote snijdiepte te kiezen boven een groot toerental met een kleine snijdiepte. In beide situaties kan de voortgangssnelheid even groot zijn, maar bij een laag toerental met een grote snijdiepte is het vermogen op het graafwiel kleiner en dus ook goedkoper.
- Bij beitels met meshoeken van 60 graden zijn de snijkrachten kleiner dan bij 90 graden. Bij het gebruik van duurzame beitels kan het vermogen van het graafwiel gereduceerd worden als gekozen wordt voor een kleinere meshoek dan 90 graden.
- Bij de berekeningen in dit rapport is gewerkt met het computerprogramma Mathcad. De rekentijd met dit programma werd al snel groot, daarom is het verstandig over te stappen naar een ander computerprogramma bij verdere studies op dit gebied.

### Aanvullend onderzoek

- Er zal onderzocht moeten worden wat precies het effect is van de aanwezigheid van de bentoniet in de grond en op de mantel. Dit om de kracht als gevolg van de wrijving op de mantel te kunnen voorspellen. In paragraaf 9.2 is een experiment beschreven waarmee dit onderzocht zou kunnen worden.
- Snijproeven van grond met een laagje bentoniet zouden een beter inzicht kunnen geven in de snijkrachten die optreden tijdens het boorproces.
- Een ander snijmodel, zoals in paragraaf 4.1.4 moet uitgewerkt worden om de snijkrachten op de beitels met een meshoek van 90 graden te kunnen berekenen.
- In de berekeningen in dit rapport is geen rekening gehouden met schuifspanningen op het slijtvlak van de beitels. In verdere studies zal dit wel gedaan moeten worden.



## LITERATUURLIJST

- [1] Anagnostou, G. en Kovári, K.: The face stability of slurry-shield-driven tunnels. *Tunnelling and underground space technology*, nr. 2, april, 1994.
- [2] Babendererde, S.: Tunnelling machines in soft ground: a comparison of slurry and EPB shield systems. *Tunnels and underground space technology*, nr. 2, april, 1991.
- [3] Babendererde, S.: Conceptual requirements for soft ground tunnel boring machines. *Options for tunnelling '93*, Elsevier, Amsterdam, 1993.
- [4] Barrett, N.: Digging through difficult ground. *Tunnels and Tunnelling*, december, 1993.
- [5] Brink, F.: Geboorde tunnels voor infrastructuurprojecten in Nederland. *De ingenieur*, nr. 11, 1992.
- [6] Broere, W.: Risico's en storingen bij geboorde tunnels. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Delft, februari, 1995.
- [7] CUR: Instrumentatie- en meetplan. Werkgroep CUR/COB-uitvoeringscommissie K100 "Praktijkonderzoek Boortunnels", CUR/COB, Gouda, maart, 1995.
- [8] CUR: Predictieplan. Werkgroep CUR/COB-uitvoeringscommissie K100 "Praktijkonderzoek Boortunnels", CUR/COB, Gouda, maart, 1995.
- [9] Dowden, P.B. en Cass, D.T.: Shielded TBM's: Matching the machine to the job. *Proceedings 1991 rapid excavation and tunnelling conference. American institute of mining, metallurgy and petroleum engineers*, Littleton, Colorado, 1991.
- [10] Haack, A.: Unterirdisches bauen in Deutschland. *STUVA-/ITA-Tagung '95*, Stuttgart, 8-11 mei 1995. STUVA, Köln, mei 1995.
- [11] Hertsenberg, A.F.: Slow traffic tunnel Heinenoord, comparing 5 tunnelling methods. *Options for tunnelling '93*, Elsevier, Amsterdam, 1993.
- [12] Jancsecz, S. en Steiner, W.: Face support for a large Mix-shield in heterogeneous ground conditions. *Tunnelling '94, the institution of mining and metallurgy and the British tunnelling society*, London, 1994.
- [13] Joanknecht L.W.F. en Lobanov V.A.: Linear cutting tests in clay. *Third international symposium on dredging technology. Bordeaux*, 1980.
- [14] Jonker, J.H. en Nieuwenhuis, T.J.: Preliminary study of alternative crossings of the Dutch High Speed Railway Line with the waterways Hollands Diep and Oude Maas; tunnels versus bridges. *Options for tunnelling '93*, Elsevier, Amsterdam, 1993.
- [15] Jonker, J.H. en Topper, A.M.: Technical feasibility, costs and planning of drilled tunnels in Western Holland. *Options for tunnelling '93*, Elsevier, Amsterdam, 1993.
- [16] Kawaeda, M.: The control of tunnel face with compressive minute foam and high density slurry. *Towards worlds in tunnelling*, Balkema, Rotterdam, 1992.
- [17] KIVI: Boren van tunnels voor rail- en wegverbindingen. Eindrapportage KIVI, afdeling tunneltechniek en ondergrondse werken, 1993.
- [18] Koreman, W.J.C. en Nonneman, D.J.: North-South light rail in Amsterdam; building from surface or bored tunnelling? *Options for tunnelling '93*, Elsevier, Amsterdam, 1993.
- [19] Krause, Th.: Schildvortrieb mit flüssigkeits- und erdgestützter ortbrüst. *Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig*, 1987.

- 
- [20] Kurosawa, S.: Up to date state of the art of Japanese shield: the selection criteria of slurry shield and earth pressure balanced shield. Tunnelling in soft and water-bearing grounds, Association Française des travaux en souterrain (AFTES), Lyon, 1984; Balkema, Rotterdam, 1985.
- [21] Leblais, Y. en Bochon, A.: Villejust tunnel: slurry shield effects on soil and lining behaviour and comments on monitoring requirement. Tunnelling '91, the institution of mining and metallurgy, Elsevier, London, 1991.
- [22] Maidl, B., Herrenknecht, M. en Anheuser, L.: Machineller tunnelbau im schildvortrieb. Ernst & Sohn, Berlin, 1995.
- [23] Miedema, S.A.: Berekening van de snijkrachten bij het snijden van volledig met water verzadigd zand. Proefschrift, Technische Universiteit Delft, Delft, 1987.
- [24] Miedema S.A.: New developments of cutting theories with respect to dredging. The cutting of clay. 13<sup>th</sup> World dredging congress; dredging for development. Bombay, 1992.
- [25] Miedema, S.A.: On the snow-plough effect when cutting water saturated sand with inclined straight blades. Dredging '94, proceedings of the second international conference on dredging and dredged material placement. Florida, 1994.
- [26] Milligan, G. en Norris, P.: Pipe jacking, research results and recommendations. Pipe jacking association, London.
- [27] Mohkam, M.: Combining proper confinement pressure and adequate slurry for passing beneath existing structures securely with slurry shield, case study. Proceedings 1991 rapid excavation and tunnelling conference. American institute of mining, metallurgy and petroleum engineers, Littleton, Colorado, 1991.
- [28] Mori, A., Tamura, M., Kurihara, K. en Shibata, H.: A suitable slurry pressure in slurry-type shield tunnelling. Tunnelling '91, the institution of mining and metallurgy, Elsevier, London, 1991.
- [29] N.N.: Brochure Visser en Smit Hanab: Doorpersen en horizontaal gestuurd boren, 1995.
- [30] N.N.: PAO-CB cursus: Boortechnieken voor tunnels in Nederland. Stichting postacademisch onderwijs civiele techniek en bouwtechniek, 1992.
- [31] Os van, A.G. en Leussen van, W.: Basic research on cutting forces in saturated sand. Journal of Geotechnical Engineering, 113, p. 1501-1516, 1987.
- [32] Projectbureau Boortunnels: Parameterset voor de predicties. 21 juni 1995.
- [33] Projectbureau Boortunnels: Supplement Parameterset voor de predicties. 1995.
- [34] Scheidegger, P., Schmid, M. en Steiner, W.: Erfahrungen mit einem Mix-schild beim Bau des Grauholtztunnels. Tunnel, nr. 3, 1993.
- [35] Steiner, W. en Becker, C.: Grauholz tunnel in Switzerland: Large Mixed-face slurry shield. Proceedings 1991 rapid excavation and tunnelling conference. American institute of mining, metallurgy and petroleum engineers, Littleton, Colorado, 1991.
- [36] Stiksma, K.: Tunnels in Nederland: Ondergrondse transportschakels. 1992.
- [37] Tol van, A.F.: Diktaat: Fundering en constructie. Technische Universiteit Delft, faculteit der civiele techniek, sectie geotechniek, 22 februari 1994.
- [38] Verruijt, A.: Grondmechanica. Delftse uitgevers maatschappij, Delft, 1990.
- [39] Verruijt, A.: Diktaat: Offshore soil mechanics. Technische Universiteit Delft, faculteit der civiele techniek, sectie geotechniek, Delft, juni 1995.
- [40] Wallis, S.: UK EPB machine conquers Bordeaux's karstic limestone. Tunnels and Tunnelling, juli, 1994.
- [41] Walz B., Gerlach J. en Pulsfort M.: Skript zum seminar; Schlitzwandbauweise. Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, 1983.
-

## SYMBOLENLIJST

a	adhesie	[kPa]
A	adhesie kracht	[kN]
b	breedte van het mes (beitel)	[m]
c	cohesie	[kPa]
C	cohesie kracht	[kN]
$c_r$	rolweerstandscoefficiënt	[-]
$c_v$	consolidatiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
$c_w$	coëfficiënt voor de stromingsweerstand	[-]
D	diameter van de TBM	[m]
$d_s$	karacteristieke korreldiameter	[m]
e	poriëngetal	[-]
E	korrel kracht	[kN]
$E_1$	steundruk kracht op gesneden schil	[kN]
$E_2$	steundruk kracht op gesneden schil	[kN]
$E_3$	steundruk kracht op het mes	[kN]
$E_{sp}$	specifieke energie	[kN/m <sup>2</sup> ]
F	oppervlak van de grondzuil	[m <sup>2</sup> ]
$F_h$	horizontale snijkracht (evenwijdig aan snijsnelheid)	[kN]
$F_{prop}$	De axiale kracht op het graafwiel als gevolg van de grondprop	[kN]
$F_r$	de rolweerstandkracht	[kN]
$F_{sleep}$	de totale kracht om de trein met installaties mee te slepen	[kN]
$F_{steun}$	de steunkracht	[kN]
$F_{tangentiaal}$	de tangentiële vijzelkrachten	[kN]
$F_v$	verticale snijkracht (loodrecht op snijsnelheid)	[kN]
$F_w$	de stromingsweerstandskracht	[kN]
$F_{wrijving}$	de wrijvingskracht	[kN]
g	gravitatieversnelling	[m/s <sup>2</sup> ]
G	gravitatie kracht	[kN]
$G_b$	gewicht silo	[kN]
$G_{tbm}$	gewicht van de TBM	[kN]
$G_{trein}$	gewicht van de trein met installaties	[kN]
$G_w$	gewicht wig	[kN]
$h_i$	schildikte	[m]
$h_b$	mes hoogte	[m]
$h_l$	waterspiegel in luchtkamer t.o.v. bovenkant TBM	[m]
$h_{spaak}$	hoogte van de spaken	[m]
$h_w$	diepte ligging hartlijn van de TBM t.o.v. de waterstand	[m]
i	beitel nummer	[-]
$K_0$	coefficient van de neutrale gronddruk	[-]
$K_1$	korrel kracht op de afschuifzone	[kN]
$K_2$	korrel kracht op het mes	[kN]
$K_a$	coefficient van de actieve gronddruk	[-]
$K_{A3}$	de driedimensionale coëfficiënt van de horizontale gronddruk	[-]
$K_c$	cohesie kracht voorkant wig	[kN]
$k_i$	initiele doorlatendheid	[m/s]
$k_{max}$	maximale doorlatendheid	[m/s]

$K_p$	coefficient van de passieve gronddruk	[-]
$l$	indringdiepte	[m]
$L_t$	lengte van de TBM	[m]
$N_1$	normaal kracht op de afschuifzone	[kN]
$N_2$	normaal kracht op het mes	[kN]
$n_i$	initiele porositeit	[-]
$n_{max}$	maximale porositeit	[-]
$p_{gv}$	verticale grondspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$p_{kv}$	verticale korrelspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$p_{kha}$	actieve horizontale korrelspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$p_{kh0}$	neutrale horizontale korrelspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$p_{kr}$	radiale korrelspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$p_{lucht}$	luchtdruk	[kN/m <sup>2</sup> ]
$p_m$	bentonietmengseldruk	[kN/m <sup>2</sup> ]
$p_{steun}$	steundruk	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\Delta p$	de drukval over de indringdiepte	[kPa]
$q_b$	belasting bovenliggende lagen	[kN/m <sup>2</sup> ]
$r$	de straal van de wielen van de trein met installaties	[m]
$S$	steun kracht	[kN]
$S_1$	schuifkracht op de afschuifzone	[kN]
$S_2$	schuifkracht op het mes	[kN]
$S_3$	schuifkracht op de zijkant van de gesneden schil	[kN]
$S_4$	schuifkracht op de zijkant van de gesneden schil	[kN]
$t$	de gronddekking	[m]
$T$	traagheids kracht (hoofdstuk 4)	[kN]
$T$	het totale koppel op de TBM	[kNm]
$T_c$	cohesie kracht zijkant wig	[kN]
$T_{prop}$	het koppel als gevolg van de grondprop	[kNm]
$T_{stroming}$	het koppel als gevolg van de stromingsweerstand	[kN]
$T_r$	schuifspannings kracht zijkant wig	[kN]
$U$	omtrek van de grondzuil	[m]
$v$	voortgangssnelheid van de TBM	[m/s]
$v_c$	snelheid van het mes	[m/s]
$W$	waterspanningskracht	[kN]
$W_1$	waterspanningskracht op de afschuifzone	[kN]
$W_2$	waterspanningskracht op het mes	[kN]
$W_3$	waterspanningskracht achter het mes	[kN]
$W_4$	waterweerstand op de gesneden schil	[kN]
$\alpha$	meshoek	[rad]
$\beta$	afschuifhoek	[rad]
$\chi$	hoek stromingsweerstand	[rad]
$\phi$	hoek van inwendige wrijving	[rad]
$\delta$	grond/staal wrijvingshoek	[rad]
$\theta$	doorlopen hoek (graafwiel)	[rad]
$\gamma$	hoek snelheidsvector met de horizontaal	[rad]
$\gamma_s$	volumegewicht grond	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_w$	volumegewicht water	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\rho_b$	dichtheid bentoniet	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	natte dichtheid grond	[kg/m <sup>3</sup> ]

---

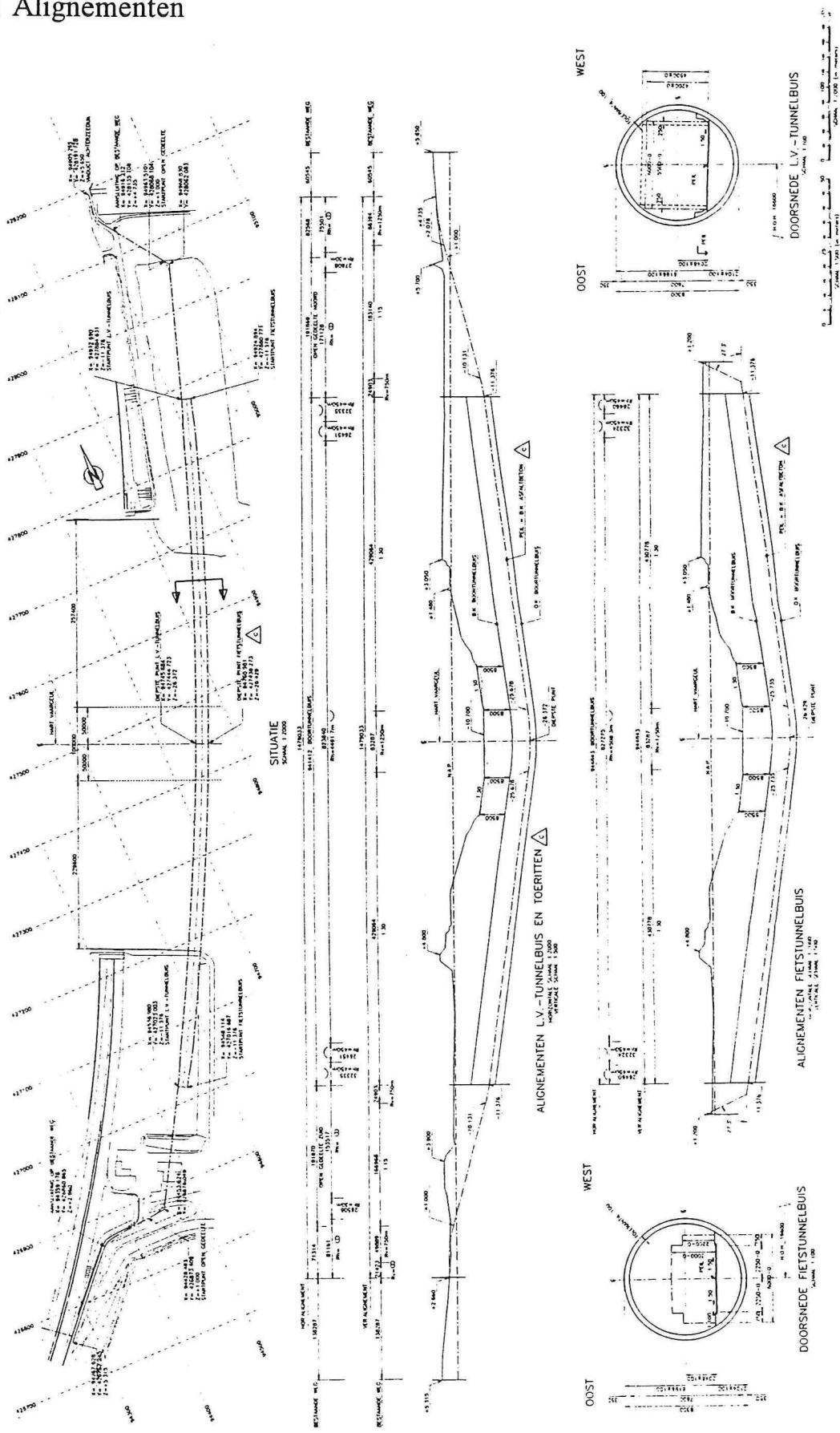
$\rho_k$	dichtheid korrelmateriaal	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_o$	dichtheid ontgravingsmengsel	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	droge dichtheid grond	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	dichtheid water	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_h$	horizontale korrelspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_r$	radiale korrelspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_v$	verticale korrelspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\tau$	schuifspanning	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\tau_b$	vloeispanning bentoniet	[N/m <sup>2</sup> ]
$\omega$	rotatiesnelheid van het graafwiel	[rad/s]
$\xi_{pe}$	het kental van Peclet	[-]

## BIJLAGEN

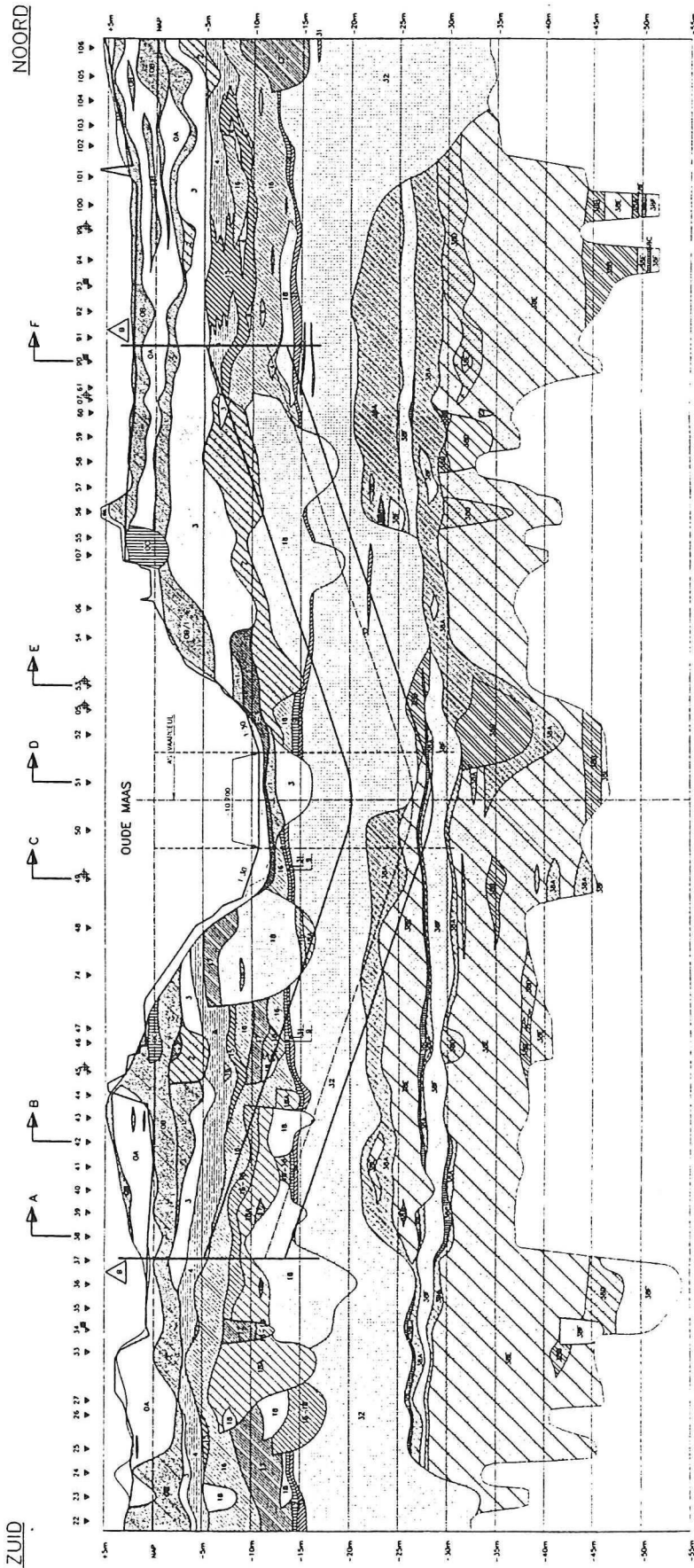
Bijlage 1	Alignment tunnel
Bijlage 2	Langsprofiel A-A'
Bijlage 3	Langsprofiel AA-AA'
Bijlage 4	Dwarsprofielen
Bijlage 5	Overzicht sonderingen
Bijlage 6	De grondprofielen
Bijlage 7	Parameters tunnelconstructie en tunnelboormachine
Bijlage 8	Schetsen van de tunnelboormachine
Bijlage 9	Afleiding formule gewelfwerking (actief en passief)
Bijlage 10.1.1	Bepalen van de steundruk en de grondprop voor profiel 1*
Bijlage 10.1.2	Controle berekening voor de steundruk voor profiel 1 met meerlagen*
Bijlage 10.2	Bepalen van de steundruk en de grondprop voor profiel 2*
Bijlage 10.3	Bepalen van de steundruk en de grondprop voor profiel 3*
Bijlage 11.1	Bepalen van de krachten als gevolg van de mantelwrijving voor profiel 1*
Bijlage 11.2	Bepalen van de krachten als gevolg van de mantelwrijving voor profiel 2*
Bijlage 11.3	Bepalen van de krachten als gevolg van de mantelwrijving voor profiel 3*
Bijlage 12	Listing Miedema: wateronderspanningen analytisch berekenen
Bijlage 13	Berekening snijkrachten voor profiel 1: het complete model*
Bijlage 14.1	Berekening snijkrachten voor profiel 1: het eenvoudige model*
Bijlage 14.2	Berekening snijkrachten voor profiel 2: het eenvoudige model*
Bijlage 14.3	Berekening snijkrachten voor profiel 3: het eenvoudige model*
Bijlage 15.1	Berekening snijkrachten van de overcutters voor profiel 1*
Bijlage 15.2	Berekening snijkrachten van de overcutters voor profiel 2*
Bijlage 15.3	Berekening snijkrachten van de overcutters voor profiel 3*

\* deze bijlagen zijn niet aanwezig in deze versie van dit afstudeerverslag, dit in verband met een embargo opgelegd door MTI Holland.

Bijlage 1 Aligementen



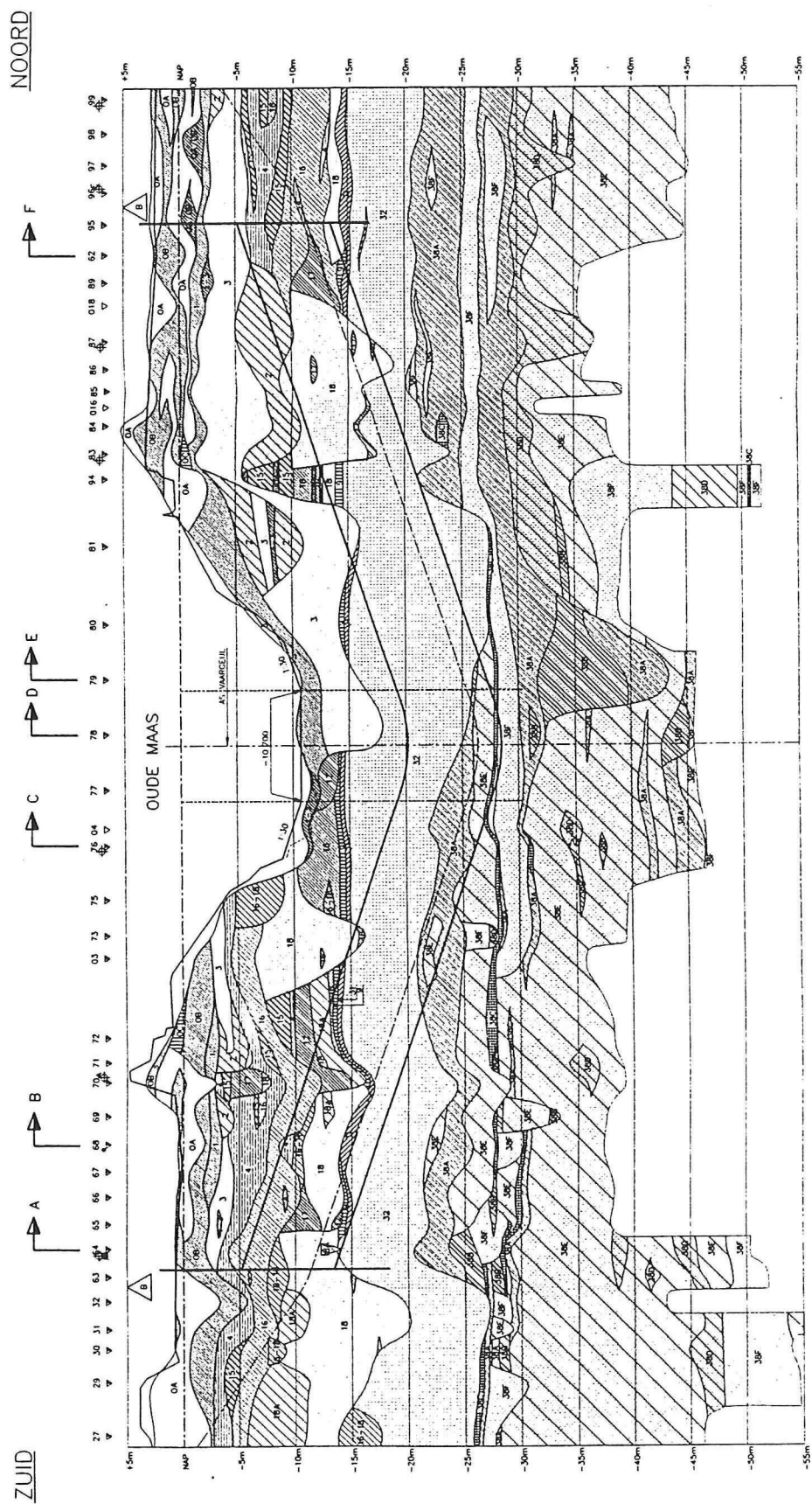
Bijlage 2 Geotechnisch langprofiel oost



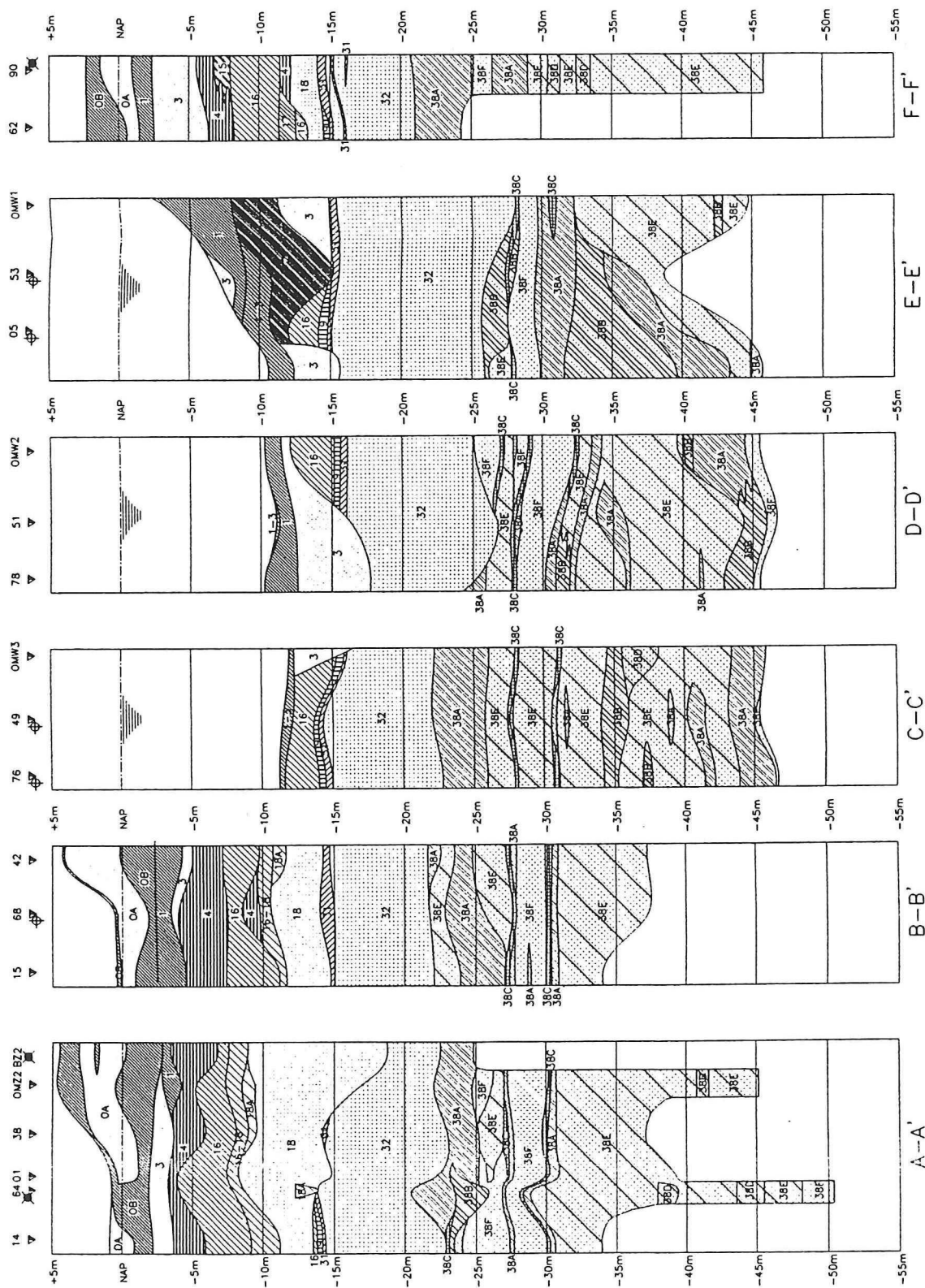
LITHOSTRATIGRAFISCHE LEGENDA	
01	Horizontale zone
02	Horizontale zone met
03	Horizontale zone met
04	Horizontale zone met
05	Horizontale zone met
06	Horizontale zone met
07	Horizontale zone met
08	Horizontale zone met
09	Horizontale zone met
10	Horizontale zone met
11	Horizontale zone met
12	Horizontale zone met
13	Horizontale zone met
14	Horizontale zone met
15	Horizontale zone met
16	Horizontale zone met
17	Horizontale zone met
18	Horizontale zone met
19	Horizontale zone met
20	Horizontale zone met
21	Horizontale zone met
22	Horizontale zone met
23	Horizontale zone met
24	Horizontale zone met
25	Horizontale zone met
26	Horizontale zone met
27	Horizontale zone met
28	Horizontale zone met
29	Horizontale zone met
30	Horizontale zone met
31	Horizontale zone met
32	Horizontale zone met
33	Horizontale zone met
34	Horizontale zone met
35	Horizontale zone met
36	Horizontale zone met
37	Horizontale zone met
38	Horizontale zone met
39	Horizontale zone met
40	Horizontale zone met
41	Horizontale zone met
42	Horizontale zone met
43	Horizontale zone met
44	Horizontale zone met
45	Horizontale zone met
46	Horizontale zone met
47	Horizontale zone met
48	Horizontale zone met
49	Horizontale zone met
50	Horizontale zone met
51	Horizontale zone met
52	Horizontale zone met
53	Horizontale zone met
54	Horizontale zone met
55	Horizontale zone met
56	Horizontale zone met
57	Horizontale zone met
58	Horizontale zone met
59	Horizontale zone met
60	Horizontale zone met
61	Horizontale zone met
62	Horizontale zone met
63	Horizontale zone met
64	Horizontale zone met
65	Horizontale zone met
66	Horizontale zone met
67	Horizontale zone met
68	Horizontale zone met
69	Horizontale zone met
70	Horizontale zone met
71	Horizontale zone met
72	Horizontale zone met
73	Horizontale zone met
74	Horizontale zone met
75	Horizontale zone met
76	Horizontale zone met
77	Horizontale zone met
78	Horizontale zone met
79	Horizontale zone met
80	Horizontale zone met
81	Horizontale zone met
82	Horizontale zone met
83	Horizontale zone met
84	Horizontale zone met
85	Horizontale zone met
86	Horizontale zone met
87	Horizontale zone met
88	Horizontale zone met
89	Horizontale zone met
90	Horizontale zone met
91	Horizontale zone met
92	Horizontale zone met
93	Horizontale zone met
94	Horizontale zone met
95	Horizontale zone met
96	Horizontale zone met
97	Horizontale zone met
98	Horizontale zone met
99	Horizontale zone met
100	Horizontale zone met
101	Horizontale zone met
102	Horizontale zone met
103	Horizontale zone met
104	Horizontale zone met
105	Horizontale zone met
106	Horizontale zone met



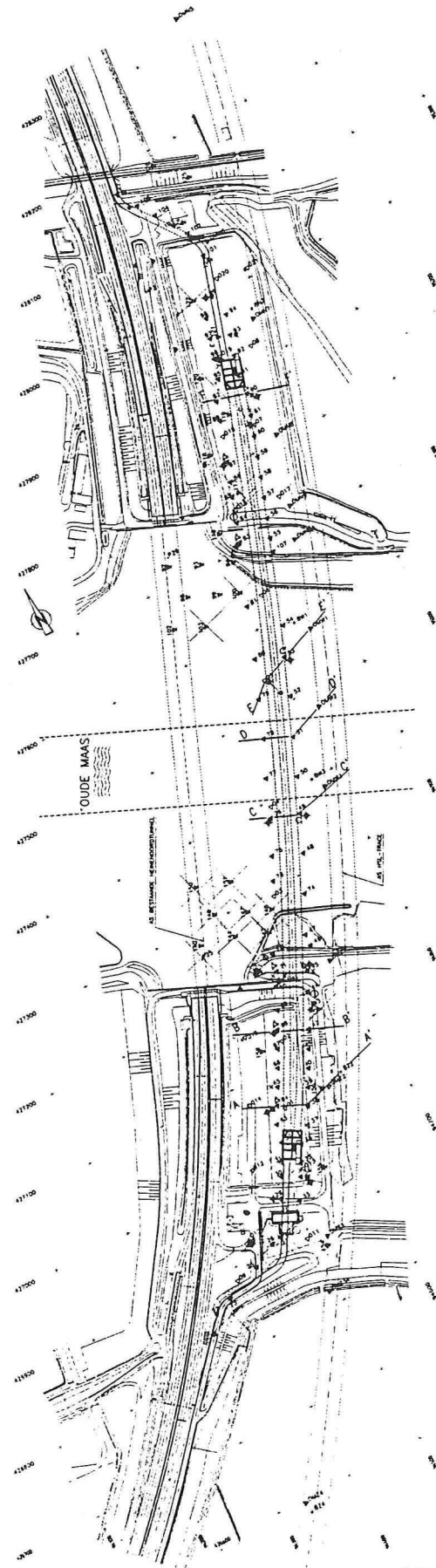
# Bijlage 3 Geotechnisch langprofiel west



# Bijlage 4 Geotechnische dwarsprofielen

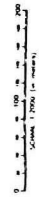


Bijlage 5 Situatie grondonderzoek

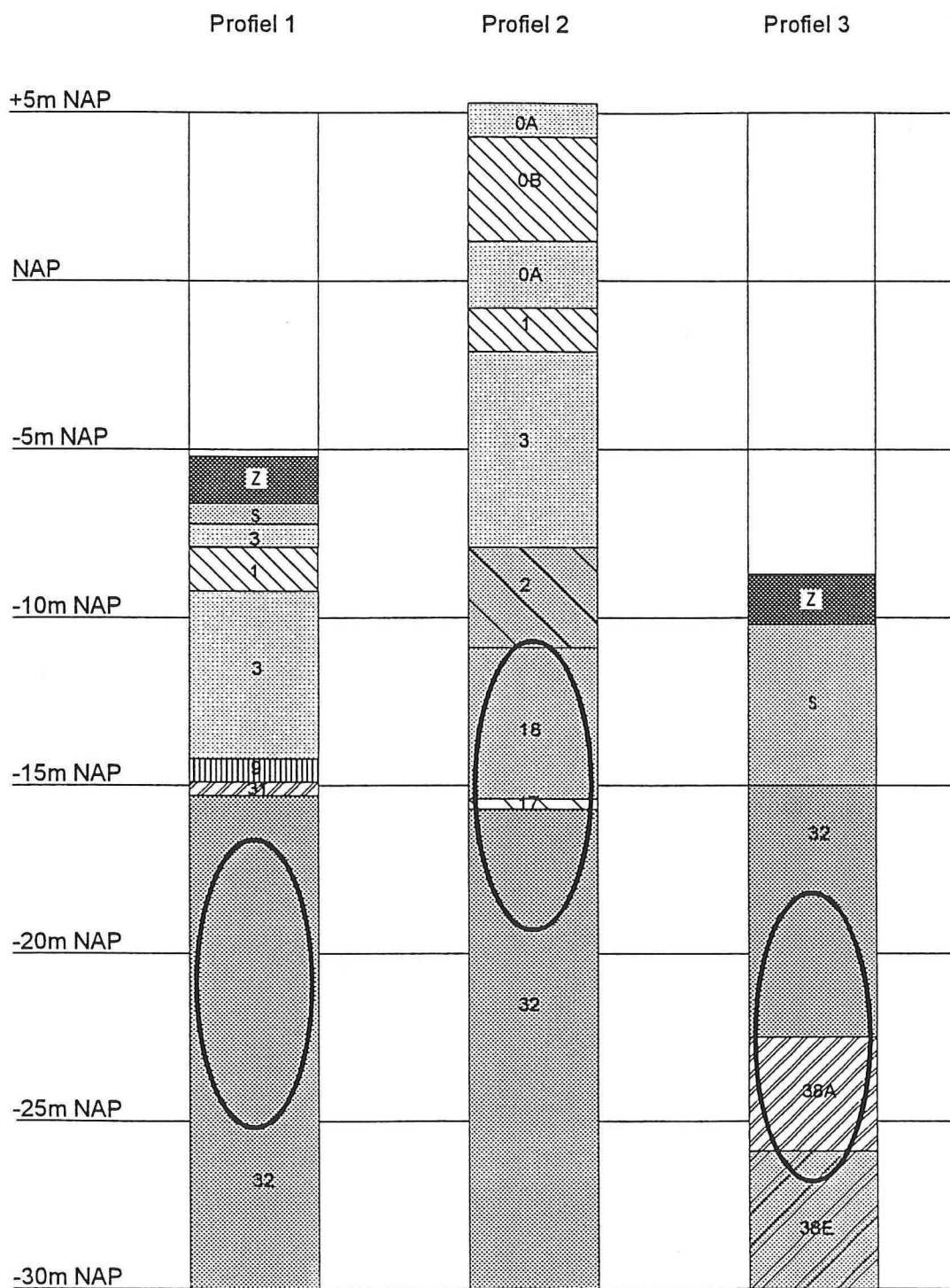


**LEGENDA**

V	sonderingen OZ-10070
O	elektrische sonderingen
P	peilbus
⊙	schroef
▽	peilsondertje / buislocatie
⊕	peilsondering
⊞	peilsondering 14 mm
X	in situ
▽	sonderingen OZ-11000 (198) en OZ-10000 (193)
⊕	peilsondering
⊞	peilbus
X	in situ
▽	sonderingen OZ-11100 (193)
▽	sonderingen OZ-11200 voor 193



Bijlage 6 De grondprofielen



## Legenda:

Z	zand	Grondverbetering	
S	steenbestorting		
0A	hoofdzakelijk zand	antropogene gronden	
0B	hoofdzakelijk klei		
1	klei, siltig	Afzetting van Duinkerke	Westland- formatie
2	zand met kleilaagjes		
3	zand plaatselijk enkele kleilaagjes		
9	veen	basisveen	
17	klei met dunne zandlaagjes	Afzetting van Gorkum	
18	zand, plaatselijk dunne kleilaagjes		
31	klei, siltig, zandig	Formatie van Kreftenheye	
32	zand, middel tot grof, vaak grindig		
38A	klei, plaatselijk zandig en/of met dunne zandlaagjes	Formatie van Kedichem/Tegelen	
38E	zand plaatselijk met dunne kleilaagjes		

## Geotechnische parameters:

Laag	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	c [kPa]	$\phi$ [°]	$c_v$ [m <sup>2</sup> /s]	$K_0$ [-]	k [m/s]
Z		21,0					
S		20,0					
0A	16,5	19,5	0	32	$\infty$	0,50	$5 \cdot 10^{-6}$
0B	16,5	16,5	4	25	$8 \cdot 10^{-8}$	0,60	$1 \cdot 10^{-7}$
1		17,0 (prfl 1) 16,0 (prfl 2)	7 (prfl 1) 4 (prfl 2)	27,5 (prfl 1) 25,0 (prfl 2)	$8 \cdot 10^{-8}$	0,60	$1 \cdot 10^{-7}$
2		19,0	0	33,0	$\infty$	0,47	$5 \cdot 10^{-5}$
3		20,0 (prfl 1) 19,5 (prfl 2)	0	33,0 (prfl 1) 35,0 (prfl 2)	$\infty$	0,47	$5 \cdot 10^{-5}$ (prfl 1) $8 \cdot 10^{-5}$ (prfl 2)
9		14,0	7	25,0	$1 \cdot 10^{-7}$	0,55	$5 \cdot 10^{-9}$
17		17,0	7	28,5	$2 \cdot 10^{-7}$	0,55	$1 \cdot 10^{-7}$
18		20,5	0	36,5	$\infty$	0,45	$1 \cdot 10^{-4}$
31		16,0	5	25,0	$6 \cdot 10^{-8}$	0,60	$1 \cdot 10^{-7}$
32		20,5	0	36,5	$\infty$	0,55 (prfl 1/3)	$4 \cdot 10^{-4}$ (prfl 1/3)
38A		20,0	7	31,0	$\infty$	0,55	$1 \cdot 10^{-6}$
38E		20,5	0	36,5	$\infty$	0,55	$2 \cdot 10^{-4}$

## Bijlage 7 Parameters tunnelconstructie en tunnelboormachine

Door het Projectbureau Boortunnels is een document samengesteld (Parameterset voor de predicties) waarin de parameters zijn opgenomen die gebruikt dienen te worden bij de predicties. De gegevens uit dit document zijn in de onderstaande tabellen verwerkt.

In de onderstaande tabel zijn enkele parameters m.b.t. de tunnelconstructie opgenomen.

<i>omschrijving</i>	<i>eenheid</i>	<i>waarde</i>	<i>opmerking</i>
buitendiameter tunnelbuis	[m]	8,28	
buitenstraal tunnelbuis	[m]	4,14	
binnendiameter tunnelbuis	[m]	7,58	
binnenstraal tunnelbuis	[m]	3,79	definitief ontwerp van de elementen is nog niet gereed <sup>(1)</sup>
systeemstraal tunnelbuis	[m]	3,97	
lengte tunnelbuis	[m]	942,8	
ringbreedte	[m]	1,50	
dikte segment	[m]	0,35	
afstand tussen zijkanten tunnelbuizen	[m]	8,30	<sup>(2)</sup>
aantal elemnten per ring	[-]	7 + 1	1 sluitelement
soortelijk gewicht beton	[kN/m <sup>3</sup> ]	23,5	exclusief wapening
betonkwaliteit	[-]	B45	sterkte parameters volgens NEN 6720, VCB 1990
wapeningsstaal FeB 500	[N/mm <sup>2</sup> ]	500	volgens NEN 6720

<sup>(1)</sup> De informatie uit deze tabel dateert van 21 juni 1995

<sup>(2)</sup> Ter plaatse van de start en ontvangtschacht is de afstand tussen beide tunnelbuizen 4,30 m.

Tabel 1 Parameters tunnelconstructie

In de onderstaande tabel is de vormgeving van de TBM weergegeven.

<i>omschrijving</i>	<i>eenheid</i>	<i>waarde</i>	<i>opmerking</i>
buitendiameter TBM	[m]	8,55	zie tabel 3
lengte TBM	[m]	8,49	zie tabel 3
oversnijding	[m]	0,01	theoretisch
staartspleet	[m]	0,135	theoretisch
ovalisatie	[m]	onbekend	
wrijving staal-grond	[-]	0,6 - 0,8	gebruikt wordt: 0,67

Tabel 2 Vormgeving TBM

De TBM is opgebouwd uit een drietal delen. De afmetingen staan in de onderstaande tabel.

diameter	cutting edge with hard facing	8560 mm
	front shield	8550
	center shield	8540
	tailskin	8530
lengte	front shield	2810 mm
	center shield	3200
	tailskin	2480
	totale lengte	8490 mm

Tabel 3 Afmetingen TBM

De gewichten van de diverse onderdelen van de TBM zijn bij benadering bekend en weergegeven in de onderstaande tabel.

operating weights	front shield approx.	1500 kN
	center shield approx.	1750
	tailskin approx.	360
	erector approx.	280
	cutting wheel approx.	380
	cutting wheel drive approx.	370
	backup system approx.	1550
	segment crane approx.	60
	hydraulic 'drive assembly' approx.	80
pipe crane etc. approx.	50	
total operating weight	circa	6400 kN

Tabel 4 Opbouw van het totale gewicht van de TBM

Zie volgende pagina voor tabel 5.

In de volgende tabel zijn de operationele parameters van de TBM opgenomen.

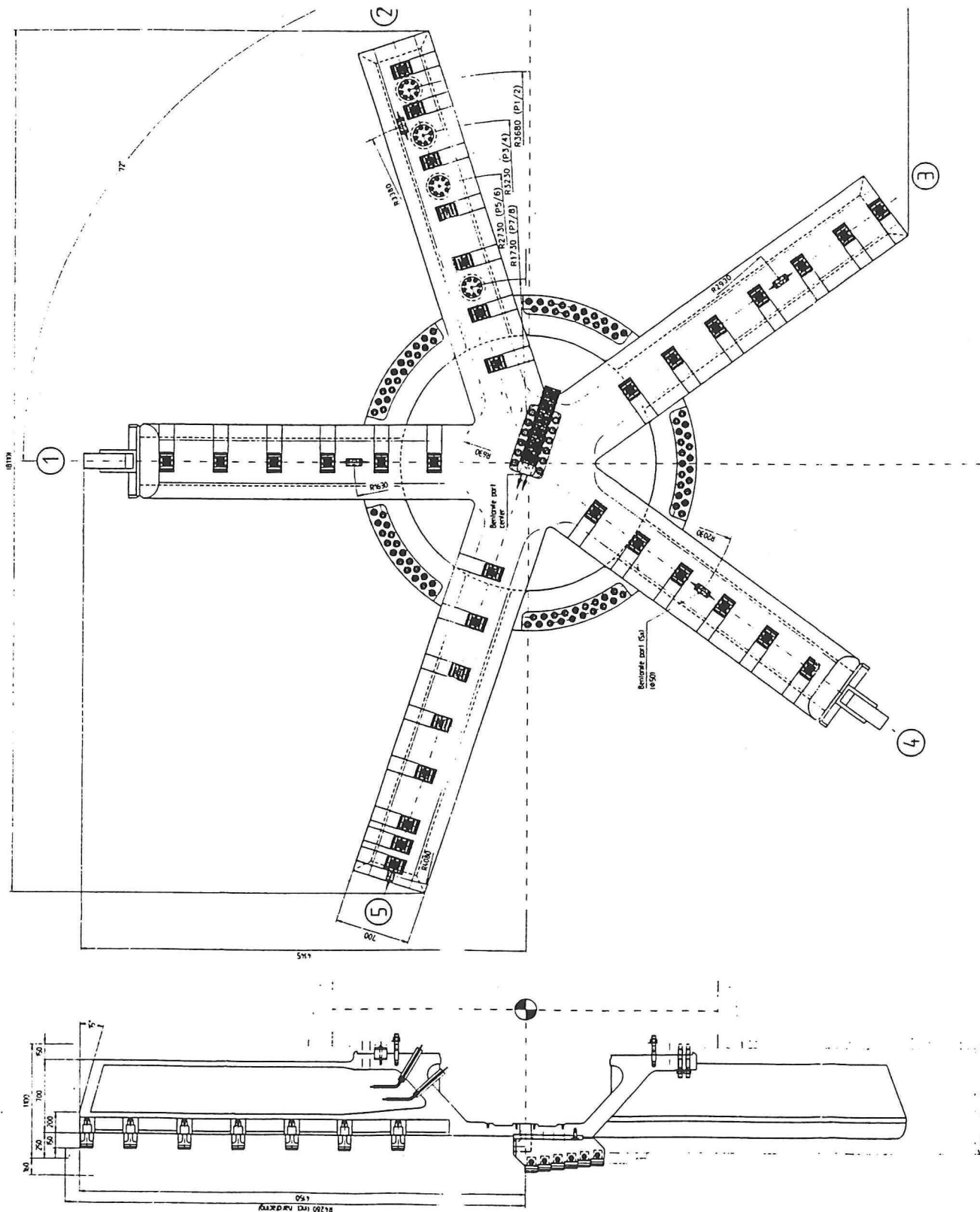
<i>omschrijving</i>	<i>eenheid</i>	<i>waarde</i>	<i>opmerking</i>
voortgangssnelheid	[cm/min]	3 - 5	effectieve boortijd
totale voortstuwingskracht vijzels	[MN]	50,4	14*2*1,8 MN (maximaal)
rotatiesnelheid snijrad	[rad/min]	2 - 4	tijdens boren
aandrijvend moment snijrad	[MNm]	4,0 bij 1 omw/min 2,0 bij 2 omw/min	aandrukkraft 3 MN
snijdiepte van snijelementen	[m]	0 - 0,05	
manoeuvrbaarheid snijrad in axiale richting	[m]	0 - 0,4	snijrad kan 0,4 m axiaal verplaatst worden
helling snijrad	[°]	0 - 11	snijrad kan circa 11° draaien om de as
instroomdebiet boorvloeistof	[m <sup>3</sup> /s]	0 - 0,3	0,2 - 0,4 m <sup>3</sup> /s tijdens boren
uitstroomdebiet ontgravingsmengsel	[m <sup>3</sup> /s]	0 - 0,3	0,2 - 0,4 m <sup>3</sup> /s tijdens boren
dichtheid boorvloeistof	[kg/m <sup>3</sup> ]	1050	
dichtheid ontgravingsmengsel	[kg/m <sup>3</sup> ]	1200	
debiet groutmengsel	[m <sup>3</sup> /s]	vrije ruimte achter TBM maal voortgangssnelheid	

Tabel 5 Operationele parameters TBM

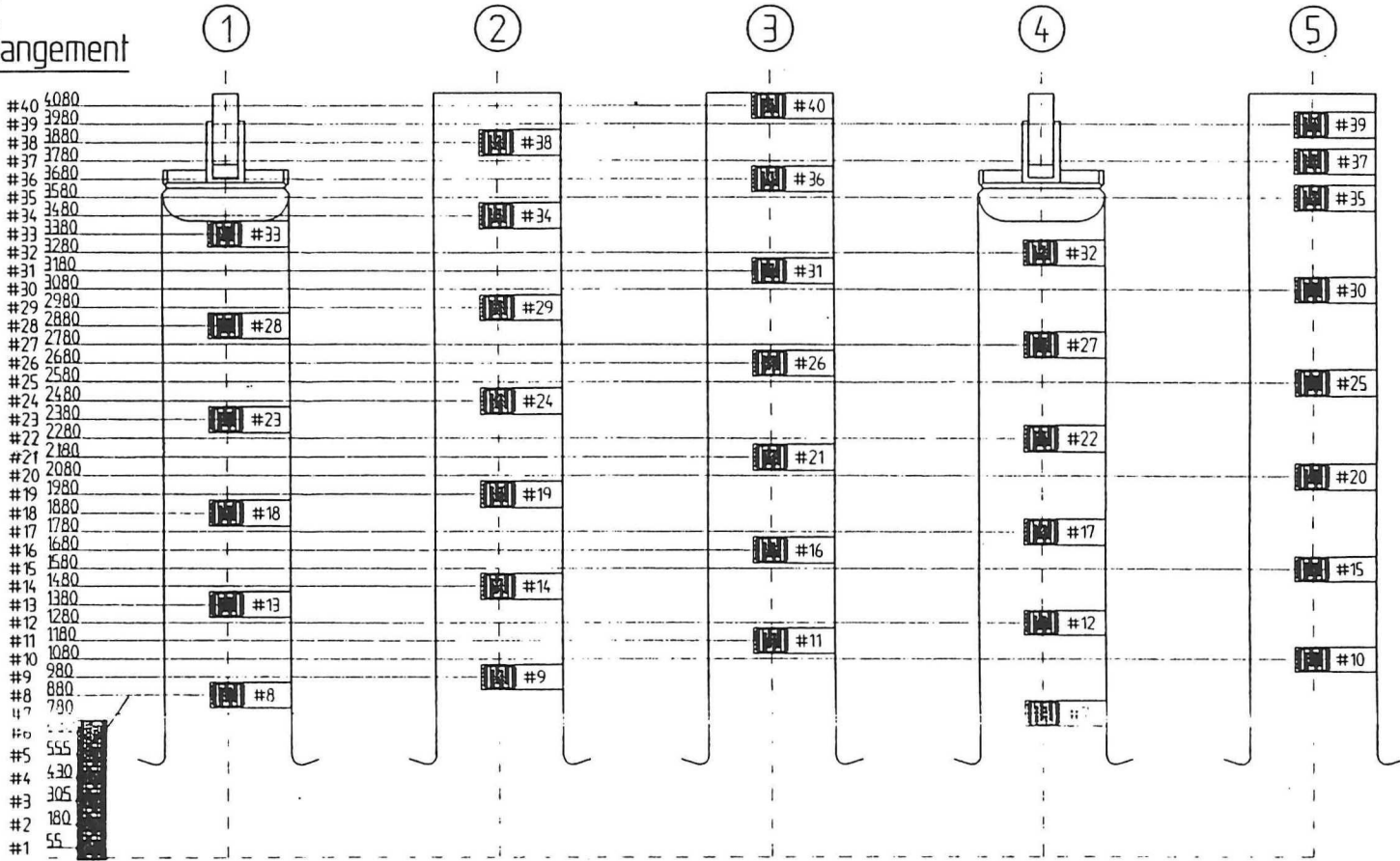


# Bijlage 8 Schetsen van de tunnelboormachine

Voor- en zijaanzicht van het graafspakenwiel.

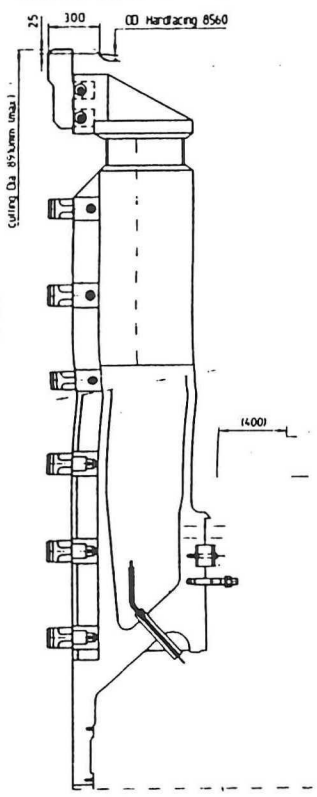


Schematic  
Tool arrangement

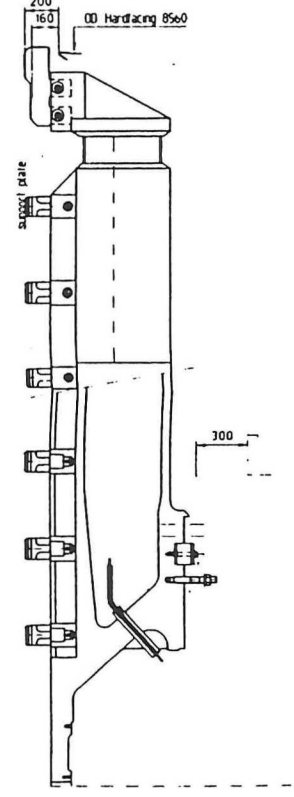


Overcutting Details:

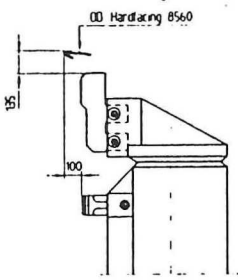
Cuttingwheel stroke 400mm (max)  
Overcutter stroke 160mm (max)



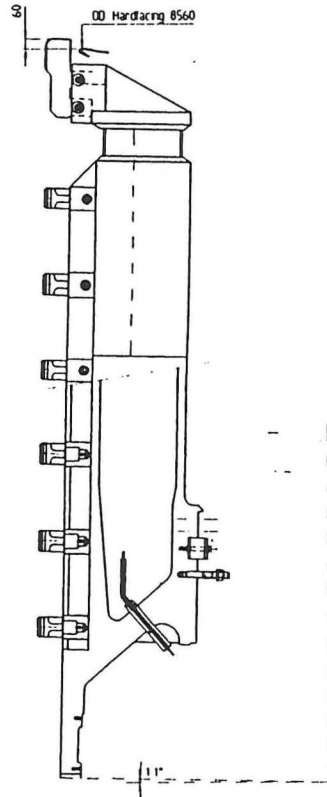
Cuttingwheel stroke 300mm  
Overcutter stroke 160mm



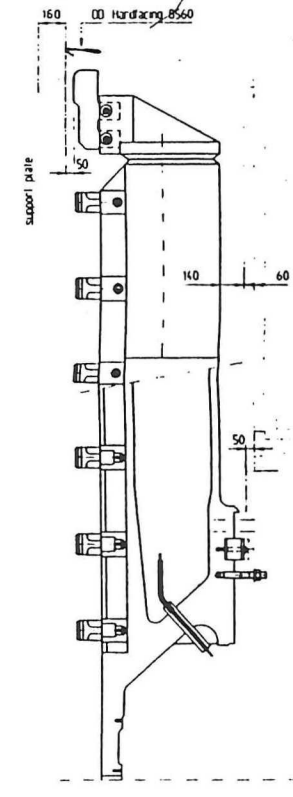
Cuttingwheel retracted  
Overcutter retracted



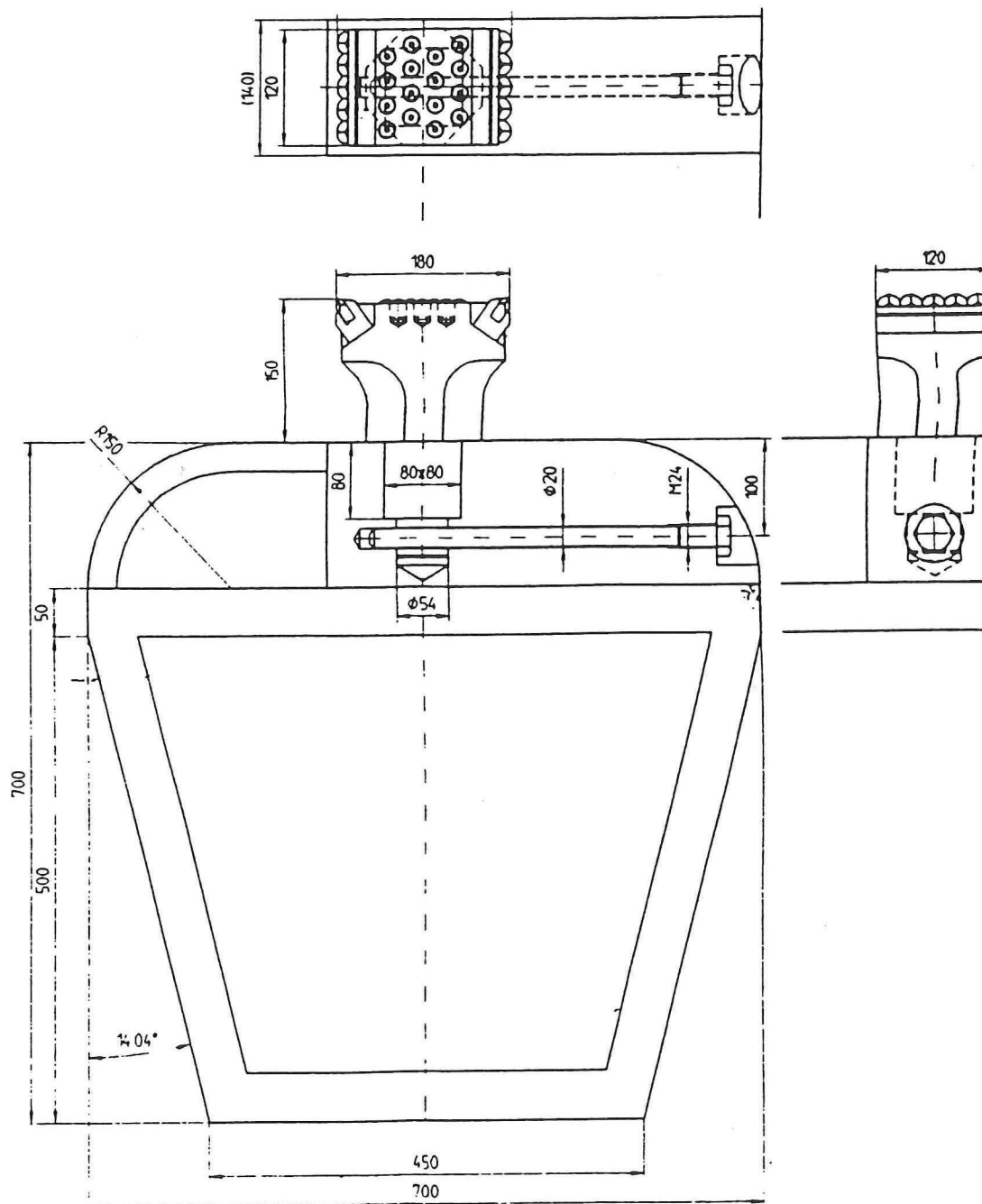
Cuttingwheel stroke 375mm  
Overcutter stroke 160mm, sperical bearing 1,1"



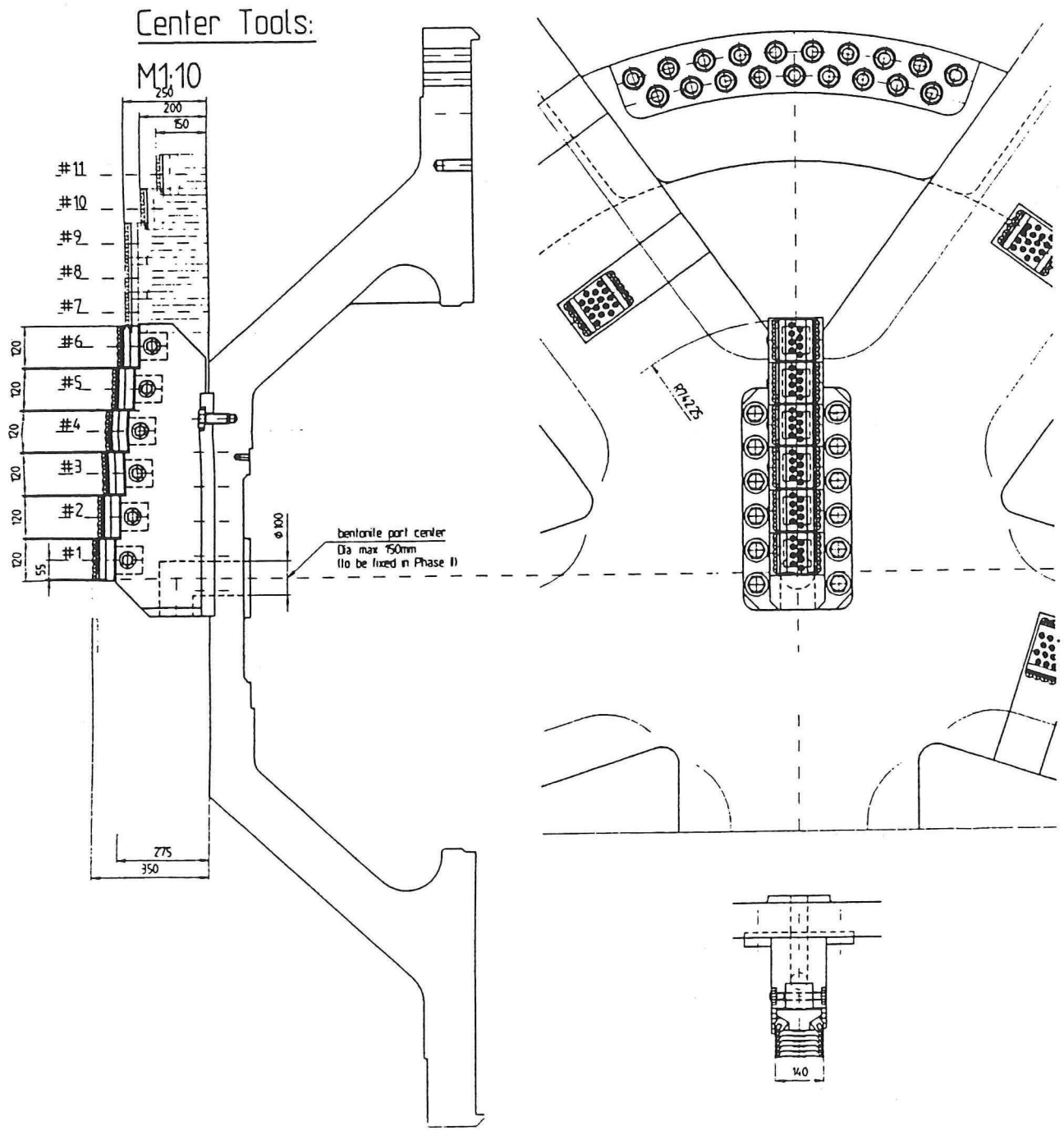
Working Position  
Cuttingwheel stroke 50mm



Doorsnede van een spaak met boven- en zijaanzicht van de beitel



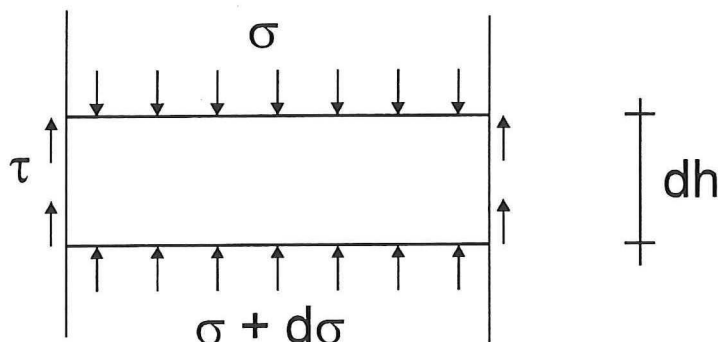
Detail as van het graafwiel



## Bijlage 9 Afleiding formules gewelfwerking.

### Actief.

Voor een laag grond met een dikte  $dh$  geldt het volgende evenwicht:



De evenwichtsvoorwaarde luidt:

$$\sigma = \sigma + d\sigma \quad (1)$$

Met:

$$d\sigma = \gamma dh - \tau \frac{U}{F} dh \quad (2)$$

Waarin:

$\gamma$	: Volumegewicht grond	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	: De schuifspanning	[kPa]
$U$	: Omtrek van de grondzuil	[m]
$F$	: De oppervlakte van de grondzuil	[m <sup>2</sup> ]

Voor schuifspanning geldt:

$$\tau = c + K\sigma \tan(\phi) \quad (3)$$

Waarin:

$c$	: De cohesie	[kPa]
$K$	: Coëfficiënt van de horizontale gronddruk	[-]
$\phi$	: Hoek van inwendige wrijving	[rad]

Door de coëfficiënt van de actieve gronddruk te gebruiken voor  $K$  wordt een bovengrens van de belasting als gevolg van gewelfwerking uitgerekend. Als  $K_1$  klein is dan is de schuifspanning  $\tau$  in vergelijking (3) klein en dit betekent dat het spanningsverschil  $d\sigma$  groot is.

Uit (2) en (3) volgt nu:

$$\frac{d\sigma}{dh} = \gamma - \frac{U}{F} (c + K_a \sigma \tan(\phi)) \quad (4)$$

De eerste orde differentiaal vergelijking ziet er als volgt uit:

$$\frac{d\sigma}{dh} + \left( \frac{U}{F} K_a \tan(\phi) \right) \sigma = \gamma - \frac{U}{F} c \quad (5)$$

De homogene oplossing van de d.v. ziet er als volgt uit:

$$\frac{d\sigma}{dh} + \left( \frac{U}{F} K_a \tan(\phi) \right) \sigma = 0 \quad (6)$$

Stel als oplossing:

$$\sigma(h) = e^{\lambda h} \quad (7)$$

Substitutie in de d.v. levert:

$$\left( \lambda + \frac{U}{F} K_a \tan(\phi) \right) e^{\lambda h} = 0 \quad (8)$$

Waaruit volgt:

$$\lambda = -\frac{U}{F} K_a \tan(\phi) \quad (9)$$

De homogene oplossing ziet er als volgt uit:

$$\sigma_h(h) = C e^{-\frac{U}{F} K_a \tan(\phi) h} \quad (10)$$

Neem voor de particuliere oplossing:

$$\sigma_p(h) = \frac{\gamma - \frac{U}{F} c}{\frac{U}{F} K_a \tan(\phi)} \quad (11)$$

Voor de volledige oplossing geldt:

$$\sigma(h) = C e^{-\frac{U}{F} K_a \tan(\phi) h} + \frac{\gamma - \frac{U}{F} c}{\frac{U}{F} K_a \tan(\phi)} \quad (12)$$

De enige onbekende is de constante C, deze zal uit de randvoorwaarden moeten volgen. Als op het maaiveld geen belasting op de grondzuil werkt dan geldt:

$$\sigma(0) = 0 \quad (13)$$

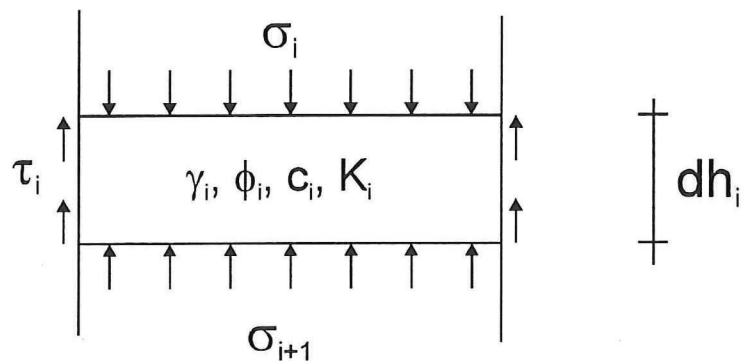
Hieruit geldt:

$$C = -\frac{\gamma - \frac{U}{F}c}{\frac{U}{F}K_a \tan(\phi)} \quad (14)$$

Dit substitueren in vergelijking (12) levert:

$$\sigma(h) = \frac{F}{K_a \tan(\phi)} \left( 1 - e^{-\frac{U}{F}K_a \tan(\phi) h} \right) \quad (15)$$

Vergelijking (15) geldt voor een homogene grondlaag. Door figuur aan te passen voor een meer lagen systeem, dan ziet dit het als volgt uit:



Vergelijking (12) kan herschreven worden:

$$\sigma_{i+1}(h) = C \exp\left(-dh_i \frac{U}{F} K_{ai} \tan(\phi_i)\right) + \frac{\gamma_i - \frac{U}{F}c_i}{\frac{U}{F}K_{ai} \tan(\phi_i)} \quad (16)$$

De volgende randvoorwaarde geldt:

$$\sigma_{i+1}(0) = \sigma_i \quad (17)$$

Hieruit geldt:

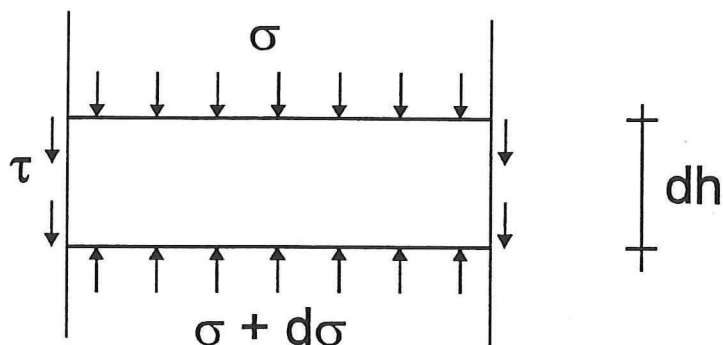
$$C = \sigma_i - \frac{\gamma_i - \frac{U}{F}c_i}{\frac{U}{F}K_{ai} \tan(\phi_i)} \quad (18)$$



Dit invullen in vergelijking (16) geeft:

$$\sigma_{i+1} = \frac{\frac{F}{U} \gamma_i - c_i}{K_{ai} \tan(\phi_i)} \left( 1 - \exp\left(-dh_i \frac{U}{F} \tan(\phi_i)\right) \right) + \sigma_i \exp\left(-dh_i \frac{U}{F} \tan(\phi_i)\right) \quad (19)$$

Passief



Vergelijking (2) ziet er nu als volgt uit:

$$d\sigma = \gamma dh + \tau \frac{U}{F} dh \quad (20)$$

Uit vergelijking (3) en (20) volgt:

$$\frac{d\sigma}{dh} = \gamma + \frac{U}{F} (c + K\sigma \tan(\phi)) \quad (21)$$

Door de neutrale coëfficiënt van de gronddruk te gebruiken wordt de ondergrens bepaald voor de passieve belasting als gevolg van gewelfwerking.

Nu geldt voor de homogene oplossing:

$$\sigma_h(h) = C e^{\frac{U}{F} K_0 \tan(\phi) h} \quad (22)$$

Voor de particuliere oplossing kan genomen worden:

$$\sigma_p(h) = -\frac{\gamma + \frac{U}{F} c}{\frac{U}{F} K_0 \tan(\phi)} \quad (23)$$

De volledige oplossing ziet er nu als volgt uit:

$$\sigma(h) = C e^{\frac{U}{F} K_0 \tan(\phi)} - \frac{\gamma + \frac{U}{F} c}{\frac{U}{F} K_0 \tan(\phi)} \quad (24)$$

Vergelijking (24) is ook voor een meerlagen systeem te schrijven:

$$\sigma_{i+1}(h) = C \exp\left(dh_i \frac{U}{F} K_{0i} \tan(\phi_i)\right) - \frac{\gamma_i + \frac{U}{F} c_i}{\frac{U}{F} K_{0i} \tan(\phi_i)} \quad (25)$$

Met de randvoorwaarde (17) is de oplossing als volgt te schrijven:

$$\sigma_{i+1} = -\frac{F}{U} \frac{\gamma_i + c_i}{K_{0i} \tan(\phi_i)} \left( \exp\left(-dh_i \frac{U}{F} \tan(\phi_i)\right) - 1 \right) + \sigma_i \exp\left(dh_i \frac{U}{F} \tan(\phi_i)\right) \quad (26)$$

## Bijlage 10.1.1 Bepalen van de steundruk en de grondprop voor profiel 1

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

Bijlage 10.1.2 Controle berekening voor de steundruk voor profiel 1 met  
meerlagen

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

## Bijlage 10.2 Bepalen van de steundruk en de grondprop voor profiel 2

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

## Bijlage 10.3 Bepalen van de steundruk en de grondprop voor profiel 3

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

Bijlage 11.1 Bepalen van de krachten als gevolg van de mantelwrijving  
voor profiel 1

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

Bijlage 11.2 Bepalen van de krachten als gevolg van de mantelwrijving  
voor profiel 2

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk



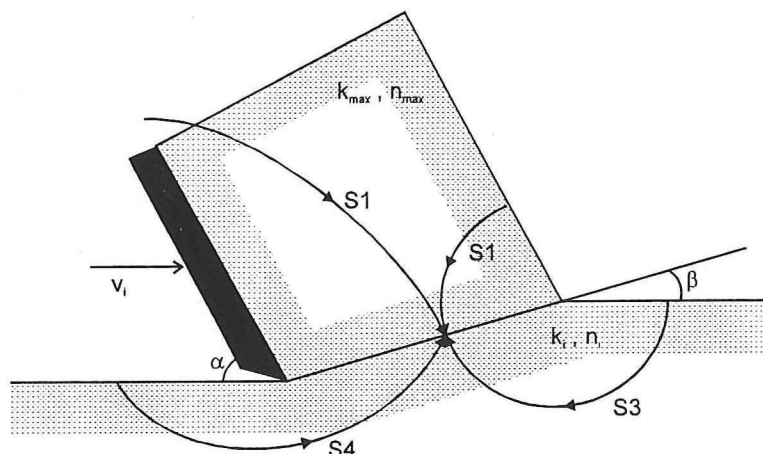
Bijlage 11.3 Bepalen van de krachten als gevolg van de mantelwrijving  
voor profiel 3

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

## Bijlage 12 Listing Miedema: wateronderspanningen analytisch berekenen

Bij de berekening van de snijkrachten is van groot belang te weten hoe groot de wateronderspanningen op het afschuifvlak en het mes zijn. Voor het berekenen van deze wateronderspanningen heeft dr. ir. S.A. Miedema een analytisch model ontwikkeld. Bij het model wordt het afschuifvlak in kleine stukjes verdeeld waarvoor ieder apart de wateronderspanningen berekend worden. Het water kan via 4 stroombanen het stukje naar het afschuifvlak toestromen, zoals in de onderstaande figuur is weergegeven.



Het gemiddelde van alle spanningen is dan de spanning op het afschuifvlak. De spanning op het mes is gelijk aan de spanning van het stukje op het afschuifvlak nabij het mes vermenigvuldigd met een correctie factor.

Voor de berekening van deze wateronderspanningen heeft de heer Miedema de volgende listing opgesteld:

```

cls
Pi=4*atn(1)
RhoW=1.025
G=9.81
B=.3
Vc=2
E=.15
Z=0.6
Alpha=60*Pi/180
Phi=40*Pi/180
Delta=Atn(1)-Phi/2
H1=.1
Hb=0.173
Ki=6.2E-5
Kmax=1.7E-4
Open"C:\CSDS\DATA\Cut.dat" For Output as#1
For Vc=0.0 to 5.01 Step 0.01
  Hi=.025
  Call Pressure(RhoW,G,B,Vc,Z,E,Alpha,Phi,Delta,Hi,Hb,Ki,Kmax,FH,FV,Number)
  Print #1, Using"###.###.###.###.###.###";Vc,FH,FV;
  Hi=.05
  Call Pressure(RhoW,G,B,Vc,Z,E,Alpha,Phi,Delta,Hi,Hb,Ki,Kmax,FH,FV,Number)

```

```

Print #1, Using"###.### ###.### ";FH,FV;
Hi=.1
Call Pressure(RhoW,G,B,Vc,Z,E,Alpha,Phi,Delta,Hi,Hb,Ki,Kmax,FH,FV,Number)
Print #1, Using"###.### ###.### ";FH,FV;
Print Using "##.### ###.### ###.### ###.###";Vc,FH,FV,number
Next Vc
Close #1
print "ready"
end
Sub Pressure(RhoW,G,B,Vc,Z,E,Alpha,Phi,Delta,Hi,Hb,Ki,Kmax,FH,FV,factor)
  Number=100
  Pi=4*atn(1)
  Beta=1-Pi/4-Alpha/3-Delta/3
  MaxR=Hi/Sin(Beta)
  StepR=MaxR/Number
  P=0
  DPMax=RhoW*G*(Z+10)
  Flag=0
  For I=0 to Number
    R=I*StepR+1E-10
    S1=(MaxR-R)*Sin(Pi/2-Alpha-Beta)+Hb/sin(Alpha)
    S2=(Alpha+Beta)*R
    S3=(Pi-Beta)*R
    S4=(Pi+Beta)*((MaxR-R)+.3*Hi*Cos(Alpha))
    R1=S1/KMax
    R2=S2/KMax
    R3=S3/Ki
    R4=S4/Ki
    RT=1/(1/R1+1/R2+1/R3+1/R4)
    DP=RhoW*G*Vc*E*Sin(Beta)*RT
    if I=Number then DP0=DP
    if DP>DPMax then
      DP=DPMAX
      Flag=-1
    end if
    P=P+DP
  Next I
  P1m=(P-DP/2)/Number
  P0=(P0-DP0/2)/Number
  Factor=Hi*Sin(Alpha+Beta)/Sin(Beta)/Hb*Sin(Alpha)/2
  if Factor>1 then Factor=1
  if Flag then
    Argument=-2*Factor*(P0-P1m)/P1m
    Factor=Factor*Exp(Argument)+(1-Exp(Argument))
  End if
  P2m=DP*Factor
  if P2m>DPMax then P2m=DPMax
  W1=P1m*Hi*B/sin(Beta)
  W2=P2m*Hb*B/Sin(Alpha)
  K2=(W1*Sin(phi)+W2*Sin(Alpha+Beta+Phi))/Sin(Alpha+Beta+Phi+Delta)
  FH=K2*Sin(Alpha+Delta)-W2*Sin(Alpha)
  FV=K2*Cos(Alpha+Delta)-W2*Cos(Alpha)
End Sub

```

## Bijlage 13 Berekening snijkrachten voor profiel 1: het complete model

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

## Bijlage 14.1 Berekening snijkrachten voor profiel 1: het eenvoudige model

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

## Bijlage 14.2 Berekening snijkrachten voor profiel 2: het eenvoudige model

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

## Bijlage 14.3 Berekening snijkrachten voor profiel 3: het eenvoudige model

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

## Bijlage 15.1 Berekening snijkrachten van de overcutters voor profiel 1

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk



## Bijlage 15.2 Berekening snijkrachten van de overcutters voor profiel 2

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk

## Bijlage 15.3 Berekening snijkrachten van de overcutters voor profiel 3

EMBARGO 

MTI Holland BV  
Smitweg 6  
2961 AW Kinderdijk