

rapportnr: 396750.0004		datum rapport: augustus 2000			
titel en subtitel: Fase 1 analyse geotechnische oorzaken vervormingen TBM WST		behandelende afdeling: Funderingstechniek En Ondergrondse Werken			
		projectnaam: Fase 1 analyse geotechnische oorzaken vervormingen TBM-WST			
projectleider(s): ir. J. Brinkman		projectbegeleider(s): ir. H.J.A.M. Hergarden			
naam en adres opdrachtgever: NV Westerscheldetunnel Postbus 20000 3502 LA Utrecht		referentie opdrachtgever: opdrachtbon 006672 d.d. 25 juli 2000			
		verzenden in: 1-voud			
		type rapport: concept			
samenvatting rapport: Beide boorschilden van de WST vertonen sterke vervormingen. Rond 10 mei zijn in 1 week tijd de vervormingen aan de achterzijde van één van de boorschilden met circa 35 mm toegenomen. De totale vervormingen komen hierbij op circa 53 mm. De TBM bevond zich op circa NAP - 60 m onder de Pas van Terneuzen. Ter plaatse van de veronderstelde maatgevende doorsnede onder de dijk zijn destijds (1996) voor het ontwerp vervormingen van circa 30 mm berekend. Dit is de doorsnede met de hoogste verticale gronddruk op de TBM. De TBM bevindt zich ter plaatse van deze locatie op circa NAP -45 m. Onder de Pas van Terneuzen is de verticale korrelspanning aanzienlijk lager terwijl, naar nu blijkt (zie bijlage 2 en 3) de vervormingen circa 50 % groter zijn dan de berekende waarde in de als maatgevend veronderstelde doorsnede. Er is een kwalitatieve beschouwing gemaakt naar mogelijke oorzaken vanuit de ondergrond (glauconietzand), die kunnen resulteren in de gemeten vervormingen. In de analyse is integraal naar geologische, geotechnische en boortechnische oorzaken gezocht. De hoofdconclusie is dat verwacht wordt dat de geconstateerde vervormingen met name het gevolg zijn van overconsolidatie (OCR = 9) van de grond en in mindere mate het gevolg zijn van de aanwezigheid van glauconiet in het zand.					
opmerkingen:					
trefwoorden: TBM, tunnel, vervormingen Westerschelde overconsolidatie, glauconiet en zand.		verspreiding:			
opgeslagen op: onder titel: N:\projecten.afd\396750 - Analyse vervormingen TBM WST\fw\Rapport\396750.0004 .doc			aantal blz.: 25		
versie: 01	datum: augustus 2000	opgesteld door: ir. J. Brinkman	paraaf: 	gecontroleerd door: ir. H.J.A.M. Hergarden	paraaf: 

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	1
2	WERKWIJZE	3
3	ANALYSE MOGELIJKE OORZAKEN	5
3.1	Krachtenwerking	5
3.1.1	Algemeen	5
3.1.2	TBM als ring	5
3.2	Initiële grondspanningen	7
3.2.1	Normaal geconsolideerd	7
3.2.2	Horizontale spanning overgeconsolideerde grond	8
3.2.3	Schattingen voor horizontale spanningen	9
3.2.4	Invloed van de Pas van Terneuzen op spanningen in de grond	10
3.3	Anisotropie in sterkte en stijfheid	10
3.4	Locale afwijking van geotechnische eigenschappen GZ2	11
3.5	Glaucaniet	11
3.5.1	Genese en voorkomen	11
3.5.2	Geotechnische eigenschappen van glauconiet	12
3.5.3	Invloed van glauconiet op het tunnelboren	12
3.6	Zwel ten gevolge van overconsolidatie	13
3.7	Initiële geometrische imperfecties aan schild	14
3.8	Boren	14
3.8.1	Boorfront	14
3.8.2	Boorgat	14
3.8.3	Staartspleet en grouten	17
3.8.4	Stuurcorrecties	17
3.8.5	Invloed eerste tunnelbuis op twee de TBM	17
4	BEVINDINGEN VAN DE HEER HASHIMOTO	19
5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	21
5.1	Conclusies	21
5.2	Aanbevelingen	21

LITERATUUR	23
------------	----

SYMBOLEN	25
----------	----

BIJLAGEN:

- Staartspleet detail, met meetraaien	1
- Vervorming aan TBM west	2
- Vervorming aan TBM oost	3
- Geotechnisch profiel met positie TBM	4
- Relatie tussen grensspanning (P_g) in Boomse klei en de diepte	5
- Relatie tussen K20-gehalten van Glaconiet en percentage zwellende lagen	6
- Relatie tussen kationen uitwisselingscapaciteiten (CEC) van Glaconiet en het percentage zwellende lage kristalstructuur	7
- Vragen aan Mr. Hashimoto	8
- Antwoorden van Mr Hashimoto	9

1 INLEIDING

Rond 10 mei zijn in 1 week tijd de vervormingen aan de achterzijde van een van de boorschilden met circa 35 mm toegenomen. De totale vervormingen komen hierbij op circa 53 mm. De TBM bevond zich op circa NAP - 60 m onder de Pas van Terneuzen. Ter plaatse van de veronderstelde maatgevende doorsnede. Op circa NAP - 45 m onder de dijk zijn destijds (1996) voor het ontwerp vervormingen van circa 30 mm berekend. Dit is de doorsnede met de hoogste verticale gronddruk op de TBM. De TBM bevindt zich ter plaatse van deze locatie op circa NAP -45 m. Onder de Pas van Terneuzen is de verticale korrelspanning aanzienlijk lager terwijl, naar nu blijkt, de vervormingen circa 50 % groter zijn dan de berekende waarde in de als maatgevend veronderstelde doorsnede (zie bijlage 2 en 3).

Beide TBM's zijn stilgezet na het vaststellen van de grote vervormingen. De TBM West boort inmiddels weer verder, nadat grotere ruimers (overcutters) zijn geplaatst (20 en 30 mm in plaats van 10 mm). De TBM Oost staat nog stil.

De NV Westerscheldetunnel wil meer inzicht hebben in de mogelijke oorzaken van de grotere vervormingen, ondanks het feit dat de aannemer na het nemen van de genoemde praktische maatregelen verder boort. Dit om te anticiperen op gelijksoortige problemen verderop in het tunneltracé.

2 WERKWIJZE

In de voor u liggende rapportage wordt verslag gedaan van een kwalitatieve beschouwing die is gemaakt naar mogelijke oorzaken vanuit de ondergrond (glauconietzand), die kunnen resulteren in de gemeten vervormingen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de operationele kennis binnen GeoDelft en Geo Research Institute te Osaka, Japan. Dr. P.N.W. Verhoef (TU-Delft) welke wij tevens wilden consulteren is tijdens het opstellen van dit advies niet beschikbaar. Mogelijk dat dit een latere fase alsnog plaatsvindt.

In de analyse wordt integraal naar geologische, geotechnische en boortechnische oorzaken gezocht. Als eerste wordt globaal de mechanica van een cilinder (TBM) besproken. Vervolgens worden de diverse krachten die vanuit de grond op de TBM werken beschouwd. Hierbij wordt als eerste de initiële situatie beschouwd en vervolgens worden de effecten van het boren op de spanningstoestand in de grond behandeld. Afsluitend wordt over de diverse verschijnselen beknopt gediscussieerd en geëvalueerd waarna conclusies worden getrokken en aanbevelingen gedaan.

3 ANALYSE MOGELIJKE OORZAKEN

3.1 Krachtswerking

3.1.1 Algemeen

De vervormingen van het schild die optreden vinden per definitie haar oorzaak in de krachten/ belastingen die op de TBM werken. Bij de krachtswerking wordt een onderscheid gemaakt tussen eerste en tweede orde effecten. Eerste orde effecten zijn de directe gevolgen van belastingen op de constructie uitgaande van een onvervormde geometrie. Tweede orde effecten zijn de gevolgen voor de krachtswerking in een constructie ten gevolge van de vervormde geometrie van een constructie. Het meeste bekende voorbeeld van een tweede orde effect in de mechanica is het knikken van een staaf.

De volgende krachten/ spanningen werken op de TBM:

- grondspanning op het schild: schuif- en normaalspanningen
- slurry-druk op het boorfront
- staalborstels/ vetdrukken
- groutdrukken
- snijrad krachten (torsie en drukkracht)
- vijzelkrachten.

Het schild kan worden gezien als een stalen cilinder met enige verstijvingsringen.

3.1.2 TBM als ring

Over het algemeen kan worden gesteld dat vervormingen afhankelijk zijn van de stijfheid. Op plaatsen waar de stijfheid lager is zullen de vervormingen groter zijn. Daarnaast zal op plekken waar plasticiteit in het staal optreedt meer vervormingen optreden. Locaties waar plasticiteit optreedt komen bij dunwandige ringen het eerste voor op locaties waar verzwakkingen aanwezig zijn en bij hoge momenten.

Eerste orde vervormingen

Ten aanzien van de grootte van vervormingen in een ronde cilinder kan worden gesteld dat de eerste orde vervormingen kunnen worden opgesplitst in twee delen ten eerste de vervormingen ten gevolge van normaalkracht en ten tweede ten gevolge van de dwarskracht. Van dunwandige perfect ronde ringen is bekend dat de eerste orde vervormingen gedomineerd worden door de dwarskrachten, hetgeen in dit geval de radiale grondspanningsgradiënt is en daarnaast zijn voor de niet perfect ronde ringen de initiële imperfecties van de cilinder van belang. Dit betekent hoe grotere de radiale grondspanningsverschillen des te groter de vervormingen en ditzelfde geldt voor initiële imperfecties.

Tweede orde vervormingen

Ten aanzien van de grootte van vervormingen van een ronde cilinder kan worden gesteld dat ook de tweede orde vervormingen kunnen worden opgesplitst in twee delen ten eerste de vervormingen tengevolge van normaalkracht en ten tweede ten gevolge van de dwarskracht. Van dunwandige ringen

is bekend dat de tweede orde vervormingen gedomineerd worden door de normaal spanningen maar dat ze een initiële excentriciteit behoeven. Deze normaalspanning is afhankelijk van de grondspanningen die op de tunnel werken. Dit betekent hoe groter de grondspanningen des te groter de vervormingen. Daarnaast zijn bij de tweede orde effecten natuurlijk de initiële imperfecties van belang en de eerste orde vervormingen.

Geconcludeerd kan worden dat zowel de grootte van de spanningen en de grootte van de spanningsgradiënten alsmede de grootte van de imperfecties van het schild van belang zijn voor de grootte van de vervormingen. Hierbij kunnen de initiële imperfecties en de grote van de spanningsgradiënt als initiator worden gezien voor het optreden van tweede orde effecten welke worden gedomineerd door de grootte van de spanningen.

Indicatieve schatting knikbelasting

Uitgaande van een ring, dus met verwaarlozing van allerlei verstijvingen en enkele verzwakkingen die in de TBM aanwezig zijn kan een schatting voor de (plooi) knikbelasting worden gemaakt. Dit kan op basis van de formule uit de ASTM voor de knikbelasting van een relining de wordt belast door een uniforme druk. Geanalyseerd is een stalen ring in een oneindig stijf gat met:

Diameter	$D = 11,35$	[m].
Wandikte	$t = 0,07$	[m].
Standaard dimensie ratio	$SDR = D/t$	[-].
Stijfheid van het staal	$E_L = 210 \cdot 10^6$	[kPa].
Dwarscontractiecoëfficiënt	$\nu = 0,2$	[-].
Veiligheidsfactor	$N = 1$	[-].
Ovaliteitsreductiefactor	$C = 1$	[-].
Vergrotingsfactor voor de grond grenzend aan de relining	$K = 7$	[-].
Uniforme knikbelasting	$P = ?$	[kPa].

Voor K wordt in de ASTM een minimum waarde van 7 aanbevolen voor die gevallen waarbij er sprake is van een volledige starre ondersteuning. Echter in de grond is geen sprake van een volledig starre ondersteuning. Hierdoor zal de K lager worden. Opgemerkt wordt dat bij de keuze van de waarde 7 in de ASTM er door de makers waarschijnlijk een veilige benadering is aangehouden.

$$P = \frac{2KE_L}{(1-\nu^2)} \frac{1}{(SDR-1)^3} \cdot \frac{C}{N}$$

Hieruit volgt een uniforme knikbelasting $P = 732$ kPa, voor $K=7$. Dit ligt in de orde van de aanwezige grondspanningen. Dit is een indicatie dat er een significante invloed van de grondspanning uit kan gaan. Dit is slechts een indicatie met verwaarlozing van allerlei verstijvingen en enkele verzwakkingen die in de TBM aanwezig zijn. Daarnaast zijn de werkelijke belastingen niet uniform, zoals de hydrostatische gradiënt van de grondwaterdruk, hetgeen voor knik minder gunstig is.

3.2 Initiele grondspanningen

3.2.1 Normaal geconsolideerd

Ten behoeve van de analyse zijn de grondspanningen van belang. Voor twee doorsneden zijn als eerste de grondspanningen voor normaal geconsolideerde grond bepaald. Verderop in paragraaf 3.2.2 zal worden ingegaan op overconsolidatie. De volgende doorsneden zijn gehanteerd:

- de doorsnede waar de TBM's zich op dit moment bevinden (circa de locatie waar de grootste vervormingen zijn opgetreden). Zie voor de laagopbouw en de volumieke gewichten tabel 3.1 en voor de spanningen tabel 3.2
- voor de doorsnede die als maatgevend is verondersteld in het ontwerp, de verticaal (bijlage 4) direct onder de dijk. Zie voor de laagopbouw en de volumieke gewichten tabel 3.3 en voor de spanningen tabel 3.4.

De laagindeling is gemaakt op basis van het westelijke geotechnisch profiel. De aangehouden volumieke gewichten zijn afgerond. Daarnaast is voor BK2 een $K_0 = 0,5$ en voor GZ2: $K_0 = 0,46$ voor een normaal geconsolideerde situatie aangehouden.

Grondlaag	bovenzijde [ca. m NAP]	γ_{sat} [kN/m ³]
Westerschelde water	0,0	10
Z1	-31,0	20
BK2	-38,4	19
GZ2	-44,0	20
K2	-62,8	20

Tabel 3.1 Grondopbouw op huidige locatie (bijlage 4)

	niveau [ca. m NAP]	σ_v [kPa]	σ'_v [kPa]	σ'_h [kPa]	$\sigma'_{h,inc}$ [kPa]	$\sigma_{h,inc}$ [kPa]
Bovenzijde TBM	-50,3	493	148	641	79	641
Midden TBM	-54,35	543	228	771	105	648
Onderzijde TBM	-60,6	606	261	867	131	867

Tabel 3.2 Spanningen op huidige locatie (bijlage 4)

gemiddelde P_g circa 1200 kPa (bijlage 5). Op basis hiervan kan worden gesteld dat de minimaal aanwezige POP voor de daar onderliggende lagen minimaal 1200 kPa is. Echter moeten de grensvlakken tussen de Boomse klei en GZ1 als erosie vlakken worden beschouwd kan het theoretisch zo zijn dat de POP voor GZ1 nog hoger is.

Over Consolidatie Ratio (OCR)

De grote van het verschil tussen de huidige verticale spanning en de hoogste verticale korrelspanning die de grond ooit heeft gekend wordt Over Consolidatie Ratio (OCR) genoemd. De grote van de OCR is aan de hand van de huidige verticale korrelspanningen en de POP bepaald.

3.2.3 Schattingen voor horizontale spanningen

Op basis van de hierboven genoemde invloeden zijn de initiële horizontale spanningen geschat die voor het boren aanwezig waren. Voor het bepalen van de horizontale spanning van overgeconsolideerde grond zijn diverse methode beschikbaar. Twee van deze methode zijn hier toegepast:

- ontlasten en herbelasten van grond geschiedt elastisch met een lagere dwarscontractie coëfficiënt dan belasten (in de hogere maagdelijke belasting dwarscontractie coëfficiënt zit namelijk een ook plasticiteit). De range van dwarscontractie coëfficiënten ligt tussen de 0,1 en 0,2
- ontlasting volgens een machtregeel waarbij de neutrale gronddruk bij overconsolidatie wordt berekend door een $K_{0,nc}$ die vermenigvuldigd wordt met de OCR-waarde tot een macht α . Waarbij α een factor is die ligt tussen de 0 en de 1. Voor α worden in de literatuur diverse relaties gegeven. Smidt [Smidt 1966] stelt een volledige afhankelijkheid van α van ϕ' voor. Door Mayne [Mayne 1982] wordt op basis van een uitgebreide statistische analyse een empirische relatie $\alpha = \sin \phi'$ voorgesteld. Als hoek van inwendige wrijving is voor GZ2, $\phi' = 32,5^\circ$ aangehouden en voor BK2, $\phi' = 30^\circ$.

	niveau [ca. m NAP]	OCR [-]	$K_{0,OCR}$				
			elastisch ν			machts- regel	Gemiddelde van de gemiddelde van de 2 methoden
			$\nu=0,1$	$\nu=0,15$	$\nu=0,2$		
Bovenzijde TBM	-50,3	9,2	2,93	2,47	1,95	1,52	1,99
Midden TBM	-54,35	7,9	2,32	1,97	1,58	1,40	1,68
Onderzijde TBM	-60,6	6,5	1,95	1,67	1,36	1,27	1,46

Tabel 3.5 Bepalingen K_0 -waarde (bijlage 4)

	niveau [ca. m NAP]	σ_w [kPa]	σ'_v [kPa]	$\sigma'_{h,oc}$ [kPa]	$\sigma_{g,oc}$ [kPa]	$\sigma_{g,inc}$ [kPa]
Bovenzijde TBM	-50,3	493	148	340	641	641
Midden TBM	-54,35	543	228	383	926	648
Onderzijde TBM	-60,6	606	261	416	867	867

Tabel 3.6 Spanningen op huidige locatie (bijlage 4)

gemiddelde P_g circa 1200 kPa (bijlage 5). Op basis hiervan kan worden gesteld dat de minimaal aanwezige POP voor de daar onderliggende lagen minimaal 1200 kPa is. Echter moeten de grensvlakken tussen de Boomse klei en GZ1 als erosie vlakken worden beschouwd kan het theoretisch zo zijn dat de POP voor GZ1 nog hoger is.

Over Consolidatie Ratio (OCR)

De grote van het verschil tussen de huidige verticale spanning en de hoogste verticale korrelspanning die de grond ooit heeft gekend wordt Over Consolidatie Ratio (OCR) genoemd. De grote van de OCR is aan de hand van de huidige verticale korrelspanningen en de POP bepaald.

3.2.3 Schattingen voor horizontale spanningen

Op basis van de hierboven genoemde invloeden zijn de initiële horizontale spanningen geschat die voor het boren aanwezig waren. Voor het bepalen van de horizontale spanning van overgeconsolideerde grond zijn diverse methode beschikbaar. Twee van deze methode zijn hier toegepast:

- ontlasten en herbelasten van grond geschiedt elastisch met een lagere dwarscontractie coëfficiënt dan belasten (in de hogere maagdelijke belasting dwarscontractie coëfficiënt zit namelijk een ook plasticiteit). De range van dwarscontractie coëfficiënten ligt tussen de 0,1 en 0,2
- ontlasting volgens een machregel waarbij de neutrale gronddruk bij overconsolidatie wordt berekend door een $K_{0,nc}$ die vermenigvuldigd wordt met de OCR-waarde tot een macht α . Waarbij α een factor is die ligt tussen de 0 en de 1. Voor α worden in de literatuur diverse relaties gegeven. Smidt [Smidt 1966] stelt een volledige afhankelijkheid van α van ϕ' voor. Door Mayne [Mayne 1982] wordt op basis van een uitgebreide statistische analyse een empirische relatie $\alpha = \sin \phi'$ voorgesteld. Als hoek van inwendige wrijving is voor GZ2, $\phi' = 32,5^\circ$ aangehouden en voor BK2, $\phi' = 30^\circ$.

	niveau [ca. m NAP]	OCR [-]	$K_{0,OCR}$				
			elastisch ν			mach- regel	Gemiddelde van de gemiddelde van de 2 methoden
			$\nu=0,1$	$\nu=0,15$	$\nu=0,2$		
Bovenzijde TBM	-50,3	9,2	2,93	2,47	1,95	1,52	1,99
Midden TBM	-54,35	7,9	2,32	1,97	1,58	1,40	1,68
Onderzijde TBM	-60,6	6,5	1,95	1,67	1,36	1,27	1,46

Tabel 3.5 Bepalingen K_0 -waarde (bijlage 4)

	niveau [ca. m NAP]	σ_v [kPa]	σ_v' [kPa]	$\sigma_{gr,oe}'$ [kPa]	$\sigma_{gr,oe}$ [kPa]	$\sigma_{gr,nc}$ [kPa]
Bovenzijde TBM	-50,3	493	148	340	641	641
Midden TBM	-54,35	543	228	383	926	648
Onderzijde TBM	-60,6	606	261	416	867	867

Tabel 3.6 Spanningen op huidige locatie (bijlage 4)

	niveau [ca. m NAP]	OCR [-]	K ₀ ; OCR				
			elastisch			nachts rust	Gemiddelde van Bepaalde van vrij als 2 methoden
			ν				
			ν=0,1	ν=0,15	ν=0,2		
Bovenzijde TBM	-30,7	5,0	2,06	1,80	1,51	1,12	1,46
Midden TBM	-36.35	4,4	1,84	1,61	1,36	1,05	1,33
Onderzijde TBM	-42	4,0	1,50	1,31	1,09	0,97	1,14

Tabel 3.7 Bepalingen K_0 -waarde in verondersteld maatgevende verticaal (bijlage 4)

	niveau [m. m NAB]	σ_v [kPa]	σ'_v [kPa]	σ'^2_{max} [kPa]	σ_{grind} [kPa]	σ_{grind} [kPa]
Bovenzijde TBM	-30,7	307	298	434	605	605
Midden TBM	-36,35	364	349	464	827	539
Onderzijde TBM	-42	420	402	460	822	822

Tabel 3.8 Spanningen in de verondersteld het ontwerp op maatgevende verticaal (bijlage 4)

3.2.4 Invloed van de Pas van Terneuzen op spanningen in de grond

De opgemeten helling van het zuidelijke onderwatertalud van de Pas van Terneuzen is circa 1:4. De opgemeten helling van het noordelijke onderwatertalud van Pas van Terneuzen is circa 1:12. In een materiaal met een constante elasticiteitsmodulus en een lage dwarscontractie coëfficiënt ($\nu = 0,1$ à $0,2$ ontlasting/ herbelasting) wordt relatief weinig horizontale spanningsverhoging verwacht in de richting loodrecht op de tunnel (circa 15 kPa). Echter in een gelaagd en anisotroop systeem zal dit hoger zijn. Door het stijfheidsverschil tussen de Boomse klei en de zanden van Berg zal het stijvere zand meer spanning naar zich toe trekken.

3.3 Anisotropie in sterkte en stijfheid

In de meeste gronden is sprake van een anisotropie in de stijfheid, de verticale stijfheid en horizontale zijn niet gelijk. Dit is het gevolg van het soort materiaal (korrels, plaatjes en staafjes) het afzettingsmilieu en de belastingsgeschiedenis. In de glaconiet houdende zanden zal oriëntatie van fabrik (korrels, plaatjes en staafjes) ook aanwezig zijn en tevens een mogelijke cementatie. Ten gevolge van het afzettingsmilieu met een langzame afzetting in water met een lage stroomsnelheden, zal er sprake zijn van een horizontale gelaagdheid. Daarnaast zal er tengevolge van de voormalige hoge spanningen het materiaal in verticale zin zijn samengeperst. Dit heeft tot gevolg dat het materiaal een anisotrope stijfheid en spanning zal bezitten. Over de grootte van de anisotropie is op basis van het huidige grondonderzoek geen uitspraak te doen.

Een direct gevolg van anisotropie is dat het mechanisch gedrag niet met de conventionele materiaalmodellen is te beschrijven. Deze gaan namelijk uit van een homogeen materiaal. Er zijn wel materiaalmodellen beschikbaar die anisotropie beschrijven. De ervaring bij het gebruik van deze

materiaalmodellen is dat deze een soms sterk afwijkend mechanisch gedrag te zien kunnen geven. Een zwak punt van deze modellen is enerzijds dat ze vaak gebaseerd zijn op hypothesen welke in de praktijk slecht te meten zijn. En anderzijds dat ze van fysische grootheden uitgaan welke moeilijk of niet te bepalen zijn. Kortom voor de grondmechanica staan deze modellen nog in de kinderschoenen. Met dit soort modellen kunnen op dit moment dus alleen verkennende berekeningen worden gemaakt welke een indicatie kunnen geven over een mogelijk gedrag van de grond.

Ten aanzien van de WST kan moeilijk een kwalitatieve uitspraak worden gedaan wat de gevolgen zijn van de mogelijk aanwezige anisotropie. Wel kan worden gesteld dat bij toepassing van de "normale" modellen die van een homogene E en ν uitgaan voorzichtigheid dient te worden betracht ten aanzien van de geldigheid van gevonden resultaten.

3.4 Locale afwijking van geotechnische eigenschappen GZ2

Gezien het afzettingsmilieu worden in het horizontale vlak geen noemenswaardige verschillen in geotechnische eigenschappen verwacht. In verticale zin kunnen wel verschillen optreden in dichtheid en glauconiet percentage.

3.5 Glauconiet

3.5.1 Genese en voorkomen

Glauconiet is meestal groen gekleurd, waterhoudend K-Mg-Fe-Al-silicaat, waarbij het ijzer haast al het aluminium kan vervangen. In de literatuur zijn 82 structuurformules voor het mineraal bekend. Glauconiet slaat neer in de vorm van gelklontjes (ter grootte van zandkorrels), o.a. als omzettingsproduct van kleiig materiaal. Het kan zijn dat het in het begin een colloïdale neerslag is, dat later kristallijn (plaatjes, micagroep die tot de phyllosilicaten behoort) wordt (waarschijnlijk door diagenese). Het mineraal behoort structureel tot de kleimineralen en wel tot de familie van de illieten. Daardoor heeft het op microschaal een bladderige structuur, al komt het voor in de vorm van groene korrels. Door zijn specifieke korrelvorm gedraagt dit kleimineraal zich sedimentologisch als zand.

Het mineraal ontstaat uitsluitend in marien milieu, wanneer het zeewater veel ijzerionen en kleine hoeveelheden kleimineralen bevat. Het mineraal wordt gevormd op matige diepten (tussen de 15 en 1000 m), in gebieden met zeer langzame sedimentatie, in enigszins bewegend water met een temperatuur range van 15 tot 20°C. Het meeste glauconiet is waarschijnlijk ontstaan uit faecel pellets en uit klei-invullingen van foraminiferenschalen.

De term glauconiet wordt vaak op twee manieren gebruikt. Meestal als morfologische term voor groene ronde tot sub-ronde korreltjes, maar ook als naam van een specifiek materiaal, een gehydrateerd ijzerrijk illiet-type klei mineraal. Deze twee termen zijn niet synoniem, omdat niet alle glauconiet korreltjes puur bestaan uit het mineraal glauconiet, en omdat het mineraal ook buiten de korreltjes kan voorkomen.

lagen in de kristalstructuur toe (bij 3 % K_2O bedraagt het aantal zwellende lagen 50 %). Voor verder informatie wordt verwezen naar grafiek 1 in bijlage 6 (naar Manghnani et al. 1964).

Bij verwerking van glauconiet gaat glauconiet uiteindelijk over in een smectiet klei (een zwellende klei o.a. montmorilloniet) en Fe-oxyhydroxide mengsel via illiet/smectiet gemengd gelaagde mineralen (illiet is ook een zwellende klei, maar in mindere mate dan montmorilloniet).

Lambe et al. (1969) geeft aan dat het zwellend vermogen afhankelijk is van het type klei en dat het afneemt in de volgorde montmorilloniet, illiet en kaoliniet (laatste geen zwellend, bv. porselein). Verder is de chemie van het grondwater van belang voor de potentiële grootte van de zwel.

3.4.2 Geotechnische eigenschappen van glauconiet

Zoals gezegd gedraagt glauconiet zich sedimentologisch als zand, echter als de glauconiet korrels worden beschadigd (of door toevoeging van water), kan colloïdale fragmentatie (door versmering, chrushing of verpulveren) plaatsvinden waardoor er klei vrijkomt en het gedrag van de grond verandert (o.a. de schuifsterkte neemt af, soms zelfs gelijk aan schuifsterkte van klei (Chen 1995), en de cohesie neemt toe). Om het fenomeen van het kleilig worden van glauconiet zanden te onderzoeken, kunnen methyleen-blauw adsorptie proeven (MBA) worden uitgevoerd. Met deze proeven kunnen kationen uitwisselingscapaciteiten (CEC Cation Exchange Capacity) van grondmonsters worden bepaald (Verhoef 1992). Uit proeven is gebleken dat bij toenemende vermalings van de grondmonsters een duidelijke toename van adsorptie door klei is te zien.

In onderzoek van Manghnani et al. (1964) is een relatie aangetoond tussen de kationen uitwisselingscapaciteiten van Glauconiet en het percentage zwellende lagen in de kristalstructuur. Voor meer informatie wordt verwezen naar grafiek 2 in bijlage 7.

Bellmann (1981) heeft aangetoond dat bij een toename van het percentage glauconiet in kwartzsand, het wateropnemend vermogen toeneemt.

Glauconiet heeft een laag soortelijk gewicht. Verklaring hiervoor wordt gevonden in het feit dat glauconiet korrels een samenstelling zijn van verschillende mineralen met daartussen ruimte. Vaak zijn glauconiet korrels ook met de hand makkelijk te breken, en bezitten ze een zekere mate van flexibiliteit of zelfs elasticiteit (Hurlbut et al. 1971). Compressibiliteit van glauconiet zanden ter plaatse van Cabinda, Kongo blijkt vergelijkbaar met kalkzanden, echter bij drukken van 800 kPa neemt de void-ratio van deze laatst genoemde zanden niet meer af, terwijl dit bij de glauconiet zanden wel het geval is (Chen et al. 1995).

3.4.3 Invloed van glauconiet op het tunnelboren

Toename wandwrijving langs TBM door toename contactoppervlak

Tijdens het sonderen in zowel zone GZ1 (glauconiet gehalte 30 %) als GZ2 (glauconiet gehalte 6 %) is afwijkend mechanisch gedrag opgetreden [GD 1995]. Dit afwijkende gedrag uit zich in (zeer) hoge conusweerstand, (zeer) hoge plaatselijke wrijvingen en hoge wrijvingsgetallen ten opzichte van de waarden die in het algemeen in soortgelijke kwartzzanden worden gemeten tijdens het sonderen. Mogelijk kan een (gedeeltelijke) verklaring hiervoor gevonden worden in de aanwezigheid van glauconiet. Bij de deformatie van glauconiet houdende zanden zullen de glauconietkorrels significant

vervormen of mogelijk bezwijken (versmering, chrushing of verpulveren) in tegenstelling tot de kwartskorrels. De contactoppervlakken tussen kwartskorrels, glauconietkorrels en conusmantel zullen daardoor toenemen. Voor de TBM zou dit dus ook gevolgen kunnen hebben. Door significante vervorming of zelfs bezwijken van de glauconietkorrels kan het contactoppervlak tussen kwartskorrels, glauconiet en de TBM-mantel toenemen. Door deze toename van contactoppervlak en het cohesief gedrag van 'beschadigde' glauconiet korrels zou de wrijving op de TBM-mantel sterk kunnen toenemen.

Chemische zwel door ontlasting

Tijdens en na passage van de TBM is het mogelijk dat door (geringe) ontlasting (loodrecht op de tunnelmantel) meer ruimte komt tussen de zandkorrels rondom de TBM. Doordat er meer ruimte tussen de korrels komt, ontstaan er negatieve waterspanningen waardoor water wordt aangezogen. Glauconietkorrels hebben hierdoor de mogelijkheid om te zwellen. Mogelijkerwijs, afhankelijk van de krachten die vrij komen door de swelling, zouden de normaalkrachten op de tunnelmantel kunnen toenemen. Echter van zwellende kleien is bekend dat onder een druk van 50 kPa de zwel stopt. Het zwellen van glauconiet zal dus in kwartszanden onder de heersende terreinspanningen in GZ2 niet tot een noemenswaardige vergroting van spanningen leiden.

Ongedraineerd gedrag t.g.v. verlaging van doorlatendheid door chemische zwel

De opname van water zorgt ervoor dat de bindingen tussen de moleculen onderling worden verzwakt. Hierdoor komen er meer glauconietdeeltjes met colloïdale afmetingen met als gevolg dat de permeabiliteit van het kwartszand afneemt. Door de negatieve waterspanningen door dilatantie en de afname van permeabiliteit rondom de TBM, zullen de effectieve spanningen in het kwartszand toenemen. Mogelijkerwijs neemt hierdoor de wrijving tussen TBM en de omringende grond toe. Echter het omgekeerde is ook mogelijk. Door het ontstaan van wateronderspanningen is het ook mogelijk dat het boorgat juist beter blijft staan en dus de radiale spanning en de wrijving lager is.

Reactie tussen boorvloeistof en glauconiet

Bentoniet dat gebruikt wordt in de boorspoeling kan ook nog van invloed zijn op het glauconiet. Bentoniet (voor het overgrote deel bestaand uit Montmorilloniet) kan dienen als leverancier van kationen. Mogelijke kationen zijn Na, K, Ca, Mg en Fe. Uitwisselingen van kationen met het glauconiet zijn goed mogelijk. Afhankelijk van welke kationen er worden uitgewisseld kan het glauconiet inkrimpen of uitzetten (naast het zwellend vermogen). Of er uitwisselingen plaatsvinden hangt af van de affiniteit van Bentoniet en glauconiet tot het binden van bepaalde kationen.

3.5 Zwel ten gevolge van overconsolidatie

Van overgeconsolideerde gronden zijn bekend dat op het moment dat deze plastisch worden en dat deze gaan zwellen. De gedachte is dat het materiaal dan bij doorgaande vervorming terug gaat naar haar evenwichtsdichtheid die hoort bij een specifiek spanningsniveau. Op basis van het grondonderzoek van de WST kunnen voor de GZ2 laag geen kwalitatieve uitspraken worden gedaan over de grootte van en wijze waarop de zwel plaats vindt. Wel kan worden gesteld dat dit voor overgeconsolideerde gronden "gewone" verschijnsel zal optreden.

3.6 Initieële geometrische imperfecties aan schild

Bij de westelijke TBM is vanaf het begin 20% bijsturingskracht nodig geweest ten behoeve van stuurcorrecties. De westelijke TBM heeft de neiging om naar het oosten af te wijken. Voor dat de grootte van de oversnijding is bijgesteld was de correctie over de lengte van de TBM 16 mm. Nadat de oversnijding van ca 0,01 m naar 0,02 m is vergroot is de benodigde correctie toegenomen naar 30 mm.

Van TBM's is bekend dat deze nooit perfecte cilindervormig kunnen zijn. Bij afwijkingen van de symmetrische vorm zullen er ook afwijkingen van de stuurkracht optreden. Dit betekent dat er verschillen tussen de belastingen op het schild optreden en dat dit mogelijk kan leiden tot stuurcorrecties.

3.7 Boren

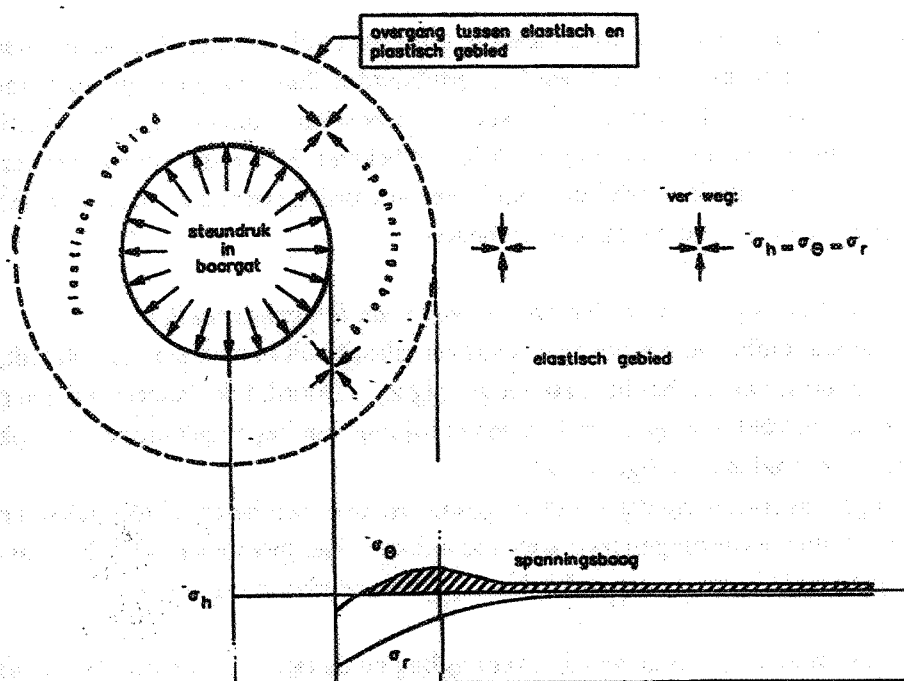
3.7.1 Boorfront

Aan het boorfront worden in dit overgeconsolideerde glauconiethoudende zand geen bijzonderheden verwacht. Verwacht wordt dat er met dezelfde steundrukken als in normaalgeconsolideerde grond kan worden gewerkt. Daarnaast wordt uitgaande van een normale beheersing van het boorfront verwacht dat geen grote verstoringen in het zand zullen optreden.

3.7.2 Boorgat

Radiale en tangentiële spanningen

De diameter van het schild van de TBM is kleiner dan de diameter van het boorgat. Dit komt door de zogenaamde overcut/ oversnijding en de tapsheid naar achter toe van de TBM. Opgemerkt wordt dat de oversnijding die gemaakt wordt niet mag worden gezien als een echt "gat" in dit gat zal zich initieel een slurry-mengsel bevinden met een hoog zand gehalte. Door deze oversnijding en tapsheid zal de grond in radiale zin kunnen vervormen (uitzetten). De grond zal in eerste instantie elastisch terugveren. Bij verdere vervorming (afname van de druk) ontstaat een steeds sterkere 'boogwerking', waarbij de radiale spanningen loodrecht op de gatwand lager worden en de tangentiële spanningen rondom het gat toenemen (zie Figuur 3.1). Na verloop van tijd ontstaat plasticiteit (blijvende vervorming) in de direct aan het boorgat grenzende grond.



Figuur 3.1 Spanningsverdeling rond boorgat

Deze vervormingen zullen elastisch plaatsvinden zolang het verschil tussen de radiale en de tangentele spanning, de schuifspanning onder de plastische waarde blijft.

Spanningen aan de zijkant van tunnel

In normaalgeconsolideerde gronden zal aan de zijkant van de tunnel initieel sprake zijn dat de radiale (horizontale) spanning circa de helft is van de tangentele (verticale) spanning. Het hierbij is slechts een kleine radiale spanning verlaging nodig van $K_0 = 0,5$ naar K_a om plasticiteit te bereiken.

Bij overgeconsolideerde grond zoals bij de WST zal aan de zijkant van de tunnel er sprake van zijn dat initieel de radiale (horizontale) spanning circa het dubbele is van de tangentele (verticale) spanning. Hierbij zal een circa vier maal grotere radiale spanningsverlaging nodig zijn om van $K_0 = 2$ naar K_a te gaan om plasticiteit te bereiken.

Dit betekent dat aan de zijkant van de TBM in deze overgeconsolideerde grond op de huidige locatie circa 4 maal grotere verplaatsingen nodig zijn om plasticiteit te veroorzaken ten opzichte van normaal geconsolideerde grond.

Spanningen aan de boven- en onderkant van TBM

In overgeconsolideerde gronden geldt aan de boven en onderzijde het tegenovergestelde. Dit betekent dat aan de boven- en onderkant van de TBM in overgeconsolideerde grond de verplaatsingen die nodig zijn om de radiale spanningen tot een niveau terug te brengen die verwacht kunnen worden bij normaal geconsolideerde grond kleiner zijn.

Gevolgen plasticiteit

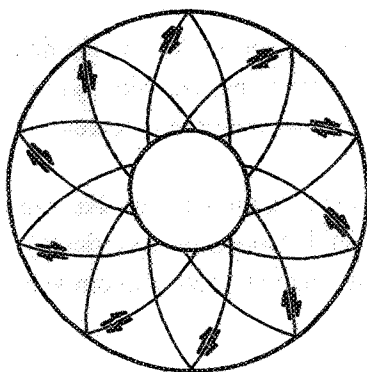
Door de plasticiteit zal in deze overgeconsolideerde gronden zwel optreden. Op het moment dat de vervormingen ten gevolge van deze zwel worden verhinderd zullen de spanningen toenemen. Door spanningstoename zal de grond waarschijnlijk weer in "evenwicht" komen c.q. weer elastisch worden. Echter de wijze waarop de zwel optreedt is niet bekend. Een geschatte waarde van de bovengrens voor de radiale druk waarbij evenwicht heerst wordt gevormd is misschien de waarde van de radiale spanning waarbij de eerste plasticiteit begon.

Opmerkingen met betrekking tot instabiliteit ten gevolge van inhomogeniteiten

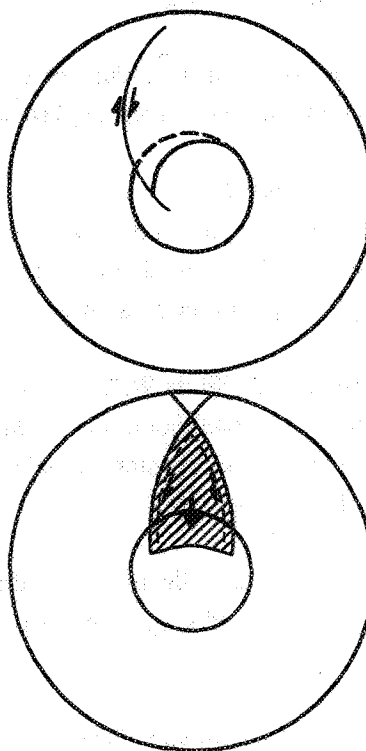
Theoretisch gezien kan indien de hierboven beschreven plasticiteit in sterke mate optreedt, een significante reductie van de straal van het boorgat het gevolg zijn. Doordat de ondergrond een natuurlijk medium is, dat niet volstrekt homogeen is, kan een afwijking van het 'regelmatige' bezwijkpatroon van gatconvergentie optreden (zie Figuur 3.2).

In plaats van een grondvervorming die wordt 'uitgesmeerd' over een heleboel glijvlakken rondom het gat, kan één glijvlak de vervormingen naar zich 'toe trekken'. Het gevolg kan zijn dat daar een gedeelte van de gatwand "instort" en materiaal in het gat terechtkomt (zie Figuur 3.3).

De grootte van de ruimte ten gevolge van de oversnijding en de tapsheid van de TBM is naar verwachting onvoldoende groot om dergelijke glijvlakken te laten ontwikkelen.



Figuur 3.2 Regelmatig (axiaalsymmetrisch) vervormingspatroon rond boorgat.



Figuur 3.3 Instabiel vervormingspatroon rond boorgat.

Verwachte spanningen

Op basis van de hierboven gehouden verhandeling wordt verwacht dat in deze overgeconsolideerde grondslag de radiale spanning beduidend minder snel zullen afnemen door toepassing van een oversnijding en tapsheid van de TBM als in normaalgeconsolideerde grond. De verwachting is dat de radiale spanningen als mede de schuifspanningen langs het schild ten gevolge van het voortbewegen van het schild significant hoger kunnen zijn.

Daarnaast zijn er mogelijkwerwijs nog speciale effecten te verwachten tengevolge van een eventuele anisotropie waarvan de gevolgen voor de spannings situatie niet op voorhand eenduidig zijn vast te stellen.

3.8.3 Staartspleet en grouten

Het doel van grouten is globaal tweeledig:

1. het onsteunen van de grond in de omgeving. Hiermee kunnen de grondvervormingen en daarmee de omgevingshinder worden beperkt. Daarnaast kunnen door middel van het beheersen van de grondvervormingen de belastingen op het schild beperkt
2. het geven van een goede ondersteuning van de lining.

Effecten op TBM t.g.v. lage groutdrukken

Door "lage" groutdrukken zullen door herverdeling van spanningen in de grond de radiale spanningen op het schild kunnen toenemen en daarmee zal de wrijvingskracht langs het schild ook toenemen.

Effecten op TBM t.g.v. hoge groutdrukken

Door "hoge" groutdrukken zullen door herverdeling van spanningen in de grond de radiale spanningen op het schild afnemen en daarmee zal de wrijvingskracht langs het schild ook afnemen.

Van grouten is bekend dat de groutdrukken direct bij de uitstroomopeningen hoog kunnen zijn. De groutdrukken nemen als functie van de afstand van het injectiepunt af. Dit betekent dat er sprake is van een niet homogene groutdrukverdeling rondom het schild. Bij groutdrukken wordt in eerste instantie aan drukken op de lining gedacht, echter het is ook denkbaar dat er grout tussen de TBM wand en de grond komt. Op deze locaties moet rekening gehouden met groutdruk in plaats van grondruk op het schild.

3.8.4 Stuurcorrecties

Om het alignement te volgen zal de TBM continu worden bijgestuurd. Ten gevolge hiervan zullen de drukken op het schild kunnen variëren.

3.8.5 Invloed eerste tunnelbuis op twee de TBM

Op de locatie waar de vervormingen in begin mei optraden loopt de westelijke TBM voor op de Oostelijke TBM. Bij de aanleg van de eerste tunnelbuis zullen de spanningen in de grond wijzigen ten gevolge van: graaffront, schuifspanningen langs het schild, tapsheid van het schild en staatspleet/grouten.

Graaffront

De invloed in het graaffront in het horizontale vlak is op een afstand van 1 tunneldiameter sterk beperkt door de driedimensionale spanningsspreiding. Uitgaande dat er op deze locatie geen boorfront instabiliteiten hebben voorgedaan mag slechts een kleine beïnvloeding worden verwacht van de korrelspanningen.

Overcut en tapsheid van het schild

Tengevolge van de overcut aan het boorfront en de tapsheid van het schild zal er een gat met een grotere diameter worden geboord dan de diameter van de TBM aan de achterzijde van de TBM. Hierdoor zal ontlasting van de korrelspanningen naast de tunnel optreden. Met name in een anisotrope grond kan hiervan invloed ter plaatse van de tweede tunnel buis worden verwacht. Deze zal resulteren in een verlaging van de horizontale spanning.

Schuifspanningen langs het schild door het naar voren bewegen van de TBM

Tengevolge van Schuifspanningen langs het schild door het naar voren bewegen van de TBM wordt geen significante veranderingen verwacht op 1 D naast de tunnel.

Staartspleet/ grouten

De diameter van de lining is kleiner dan die van de TBM het verschil is de staartspleet. De staartspleet wordt opgevuld met grout. De grout wordt op diverse plaatsen via lycenen de staartspleet in gepompt. Met het kiezen van de grootte en de verdeling van de druk over de diverse injectie openingen is het mogelijk de spanningen in de grond te verhogen dan wel te verlagen. Het groutproces kan alle andere effecten compenseren. Bij hoge injectiedrukken kan er zelfs sprake zijn van een toename van de effectieve spanningen. Het tegenovergestelde is bij een slechte vulling (lage druk) of gedeeltelijke opvulling van de staartspleet het geval, hierbij zal de grond naast de tunnel worden ontlast.

Met name in een anisotrope grond zal hiervan de invloed ter plaatse van de tweede tunnelbuis worden verwacht. Er van uitgaande dat de groutdruk de overgeconsolideerde situatie niet compenseert zal deze resulteren in een verlaging van de horizontale spanning ter plaatse van de tweede buis.

Opdrijfkraft

Ten gevolge van de opdrijfkraft worden geen significante effecten verwacht.

4 BEVINDINGEN VAN DE HEER HASHIMOTO

De heer Hashimoto van GeoReseach Institute te Osaka waarmee GeoDelft een samenwerkingsovereenkomst heeft gekeken naar wat de mogelijke oorzaken kunnen zijn. De brief met de vragen aan de heer Hashimoto en de aan hem verstrekte informatie zijn als bijlage 8 bij deze rapportage gevoegd.

Mr. Hashimoto zijn beknopte advies is als bijlage 9 bijgevoegd.

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 Conclusies

Ten aanzien van de mogelijke oorzaken van de opgetreden vervormingen aan de achterzijde van de TBM's van de WST zijn op basis van deze eerste fase van het onderzoek de hierna volgende conclusies getrokken. Het eerste fase onderzoek is inventariserend van aard. Deze conclusies geven richtingen aan waarin verder gezocht kan worden naar het vaststellen van de oorzaken van de geconstateerde "grote" vervormingen.

De grondlaag waarin de TBM's zich op dit moment bevinden is overgeconsolideerd. De mate van overconsolidatie neemt toe naar het diepste punt van de Pas van Terneuzen. De OCR op de huidige positie van de TBM's onder de Pas van Terneuzen varieert van circa 9 op het niveau van de bovenkant van de TBM tot circa 6,5 op het niveau van de onderkant van de TBM.

Tengevolge van de aanwezige overconsolidatie kunnen de radiale spanningen die op het schild van de TBM werken significant hoger zijn dan de verwachte waarden in normaal geconsolideerde grond. Dit wordt veroorzaakt doordat:

- de initiële spanningen hoger zijn en daardoor de radiale verplaatsing die nodig is om de spanningen te verlagen tot waarden die in normaal geconsolideerde grond te verwachten zijn, ook groter is. Dit kan tot gevolg hebben dat de overcut en de tapsheid van het schild minder effectief zijn.
- de plasticiteit die optreedt ten gevolge van de ontlasting van de grond in radiale zin heeft in overgeconsolideerde grond zwel tot gevolg welke de radiale grondspanning minder snel doet afnemen.

Indien er met lage druk en/ of niet volledige staartspleetvulling wordt gegROUT kan door verminderde boogwerking in axiale richting van de tunnel in de grond de radiale spanningen op het schild toenemen.

Tengevolge van het aanwezige glauconiethoudend zand zijn radiale spanningen die op het schild van de TBM werken mogelijk iets hoger dan de waarden die verwacht mag worden in normaal zand. Dit wordt veroorzaakt doordat bij bezwijken van de glauconiet er een mineraal ontstaat met chemisch zwellende eigenschappen. Echter van het meest ongunstige mineraal dat mogelijkerwijs kan ontstaan is bekend dat deze maximaal circa 50 kPa chemische zweldruk kan geven. De grootte van de optredende zweldruk is afhankelijk van het type glauconiet het percentage glauconiet en de mate van de vervormingen.

Het is niet bekend welke soort glauconiet van de circa 82 bekende soorten er aanwezig is ter plaatse van de WST.

Ongedraineerd gedrag t.g.v. verlaging van doorlatendheid door chemische zwel kan eventueel optreden. Mogelijkerwijs neemt hierdoor de wrijving tussen TBM en de omringende grond toe.

Echter het omgekeerde is ook mogelijk. Door het ontstaan van wateronderspanningen is het ook mogelijk dat het boorgat juist beter blijft staan en dus de radiale spanning en de wrijving lager is. Door de reactie tussen boorvloeistof en glauconiet kan afhankelijk van welke kationen er worden uitgewisseld het glauconiet inkrimpen of uitzetten (naast het zwellend vermogen). Of er uitwisselingen plaatsvinden hangt af van de affiniteit van Bentoniet en glauconiet tot het binden van bepaalde kationen.

Het glauconiethoudend zand is waarschijnlijk anisotroop. De grootte van de anisotropie en de gevolgen hiervan op de krachtswerking in de grond zijn op dit moment niet bekend.

Door significante vervorming of zelfs bezwijken van de glauconietkorrels kan het contactoppervlak tussen kwartskorrels, glauconiet en de TBM-mantel toenemen. Door deze toename van contactoppervlak en het cohesief gedrag van 'beschadigde' glauconiet korrels zou de wrijving op de TBM-mantel sterk kunnen toenemen.

De oorzaak dat wrijving langs het schild relatief hoog is kan mogelijk worden verklaard uit de naar verwachting hoge radiale spanningen op het schild en het mogelijke wrijvingsgedrag van de glauconiet.

Een mogelijk effect dat optreedt ter plaatste van de grote indeukingen aan de achterzijde van de schilden is dat er grout naar eventuele holten kan stromen. Dit betekent dat lokaal er in plaats van een gronddruk een groutdruk tegen het schild kan drukken. Deze druk is in "normale" gevallen met name ter plaatse van de uitstroom hoger dan de aanwezige grondspanning. Maar dit is afhankelijk van de gehanteerde groutfilosofie.

Verwacht wordt dat de geconstateerde vervormingen met name het gevolg zijn van de overconsolidatie van de grond en in mindere mate het gevolg zijn van de aanwezigheid van glauconiet in het zand.

5.2 Aanbevelingen

Indien de vervormingsproblemen bij de TBM's met de huidige maatregelen met vergroting van de overcut onvoldoende resultaat hebben verdient het aanbeveling nader onderzoek naar de grootte van de spanningen tussen grond en het schild te doen.

LITERATUUR

[ASTM]

ASTM Designaion: F 1216 – 91: Standard Practice for Rehabilitation of existing Pipelines and Conducts by Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube.

[Bellmann 1981]

H.J. Bellmann

Eigenschaften des Glauconits. Zeitschrift für angewandte Geologie, Heft 10, 488-491, 1981.

[Chen et al. 1995]

J. Chen, G.W.L. Thompson

Engineering Behaviour of Glauconite, XI ARCSMFE, Cairo, Egypt, 1995.

[GD 1995]

GeoDelft

Westerschelde Oeververbinding, Geotechnische opinie Glauconiethoudende Zanden, CO 350690/371, 1995.

[Hurblut et al. 1971]

C.S. Hurblut Jr, C. Klein

Manual of Mineralogy (after J.D. Dana). 19th edition, John Wiley & Sons, New York, 1971.

[Lambe et al. 1969]

T.W. Lambe, R.V. Whitman

Soil Mechanics. Massachusetts Institute of Technology, John Wiley & Sons, 1969.

[Manghnani et al. 1964]

M.H. Manghnani, J. Hower

Glauconites cation exchange capacities and infrared spectra. American Mineralogist, Washington, 1964.

[Mayne 1982]

Paul M. Mayne, A.M. ASCE and Fred H. Kulhawy, M. ASCE

K₀-OCR relationship in soil

Journal of the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers. Vol 108 No. GT6, June 1982.

[RGD 1978]

Rijks Geologische Dienst

Toelichtingen bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000 Blad Beveland, door F.F.F.E. van Rummelen, 1978.

[Schmidt 1966]

Smidt, B.,

Discussion of 'Earth Pressures at Rest Related to Stress History'

Canadian Geotechnical Journal, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada, Vol. 3 No 4, 1966, pp. 239-242.

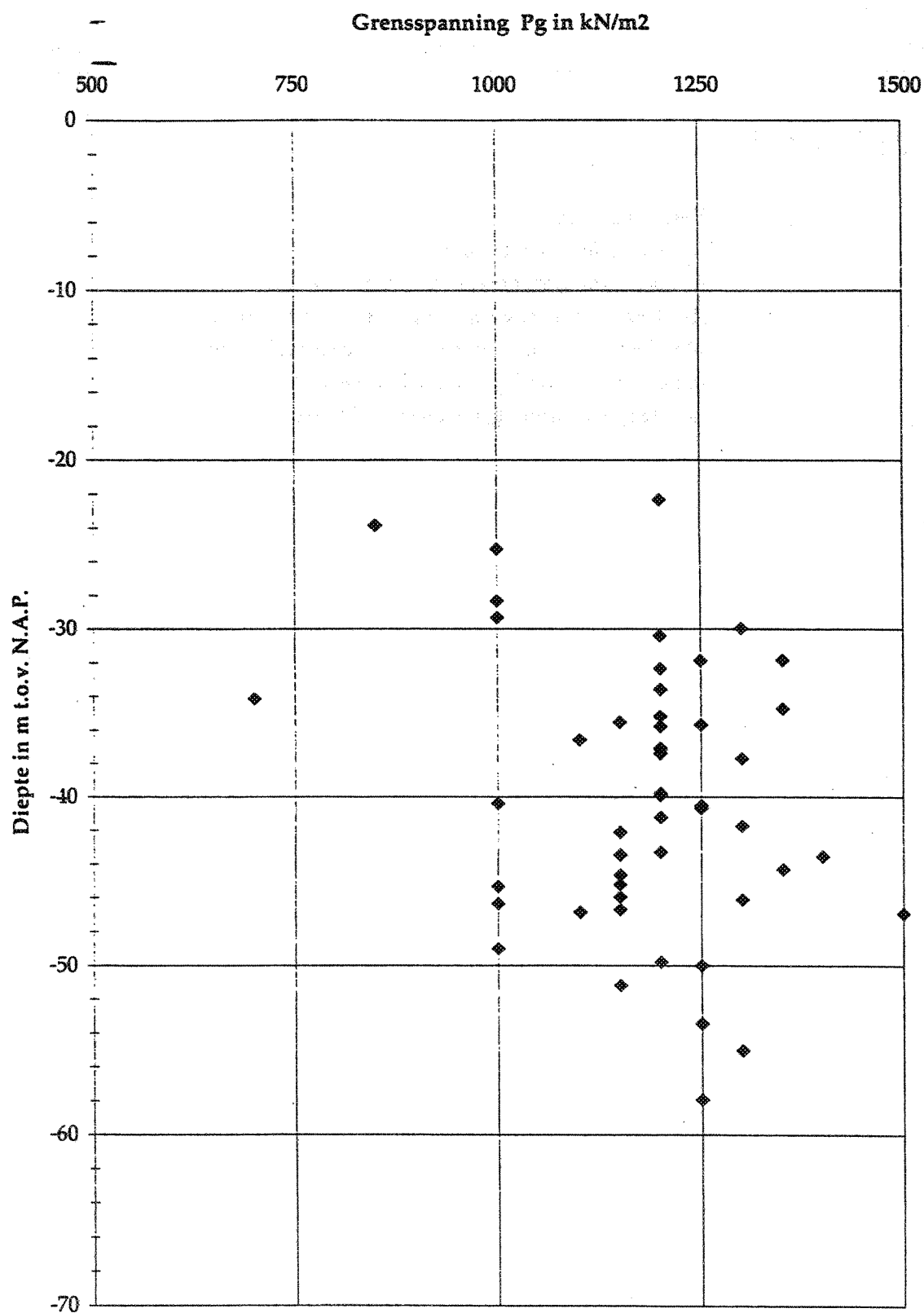
[Verhoef 1992]

P.N.W. Verhoef

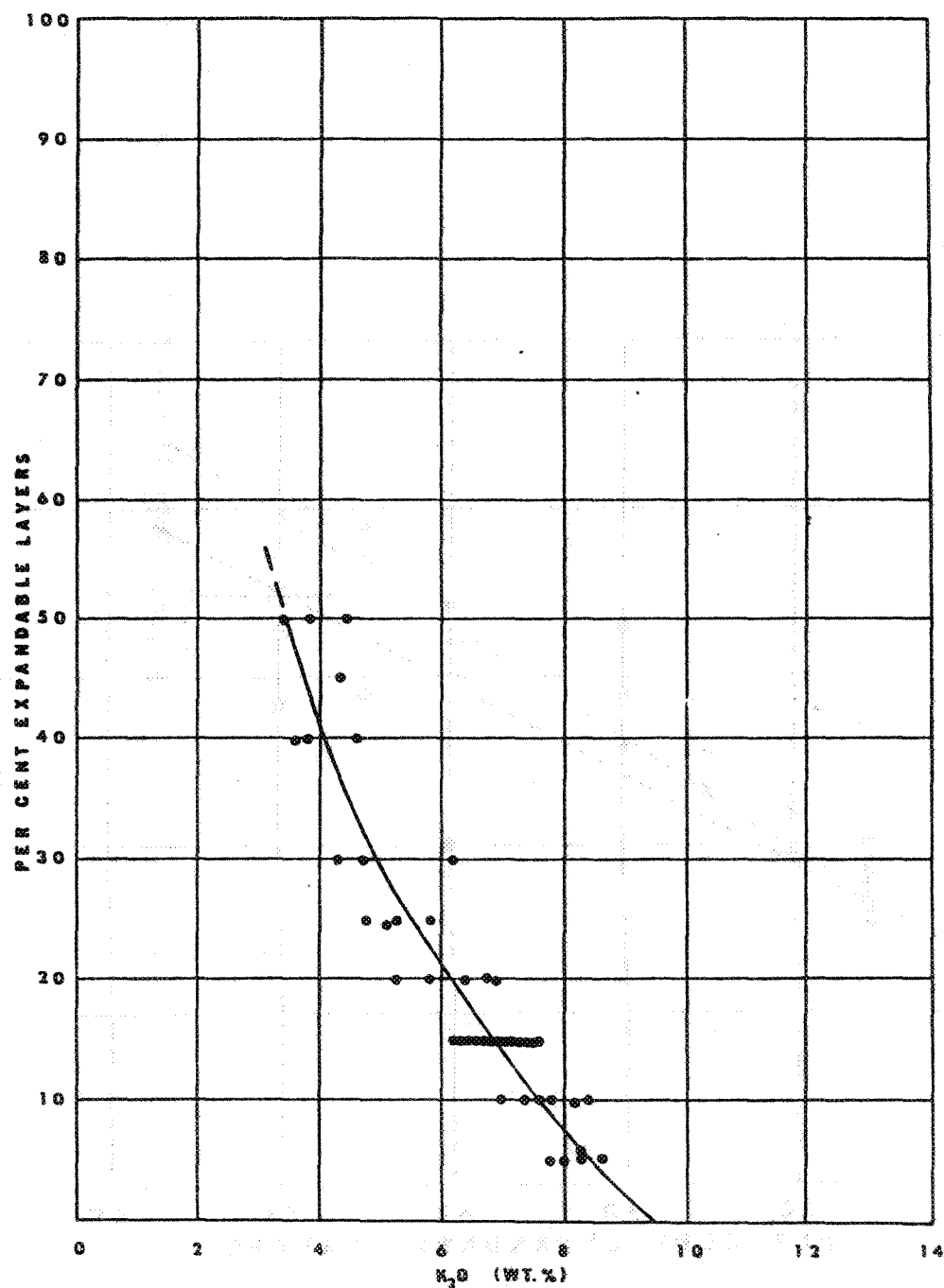
The Methylene Blue Adsorption Test Applied to Geomaterials. Memoirs of the Centre of Engineering Geology in the Netherlands, 101./GEOMAT. 02. Rapport Rijkswaterstaat- Dienst Weg- & Waterbouw, MAO-R-92025, 1992.

SYMBOLEN

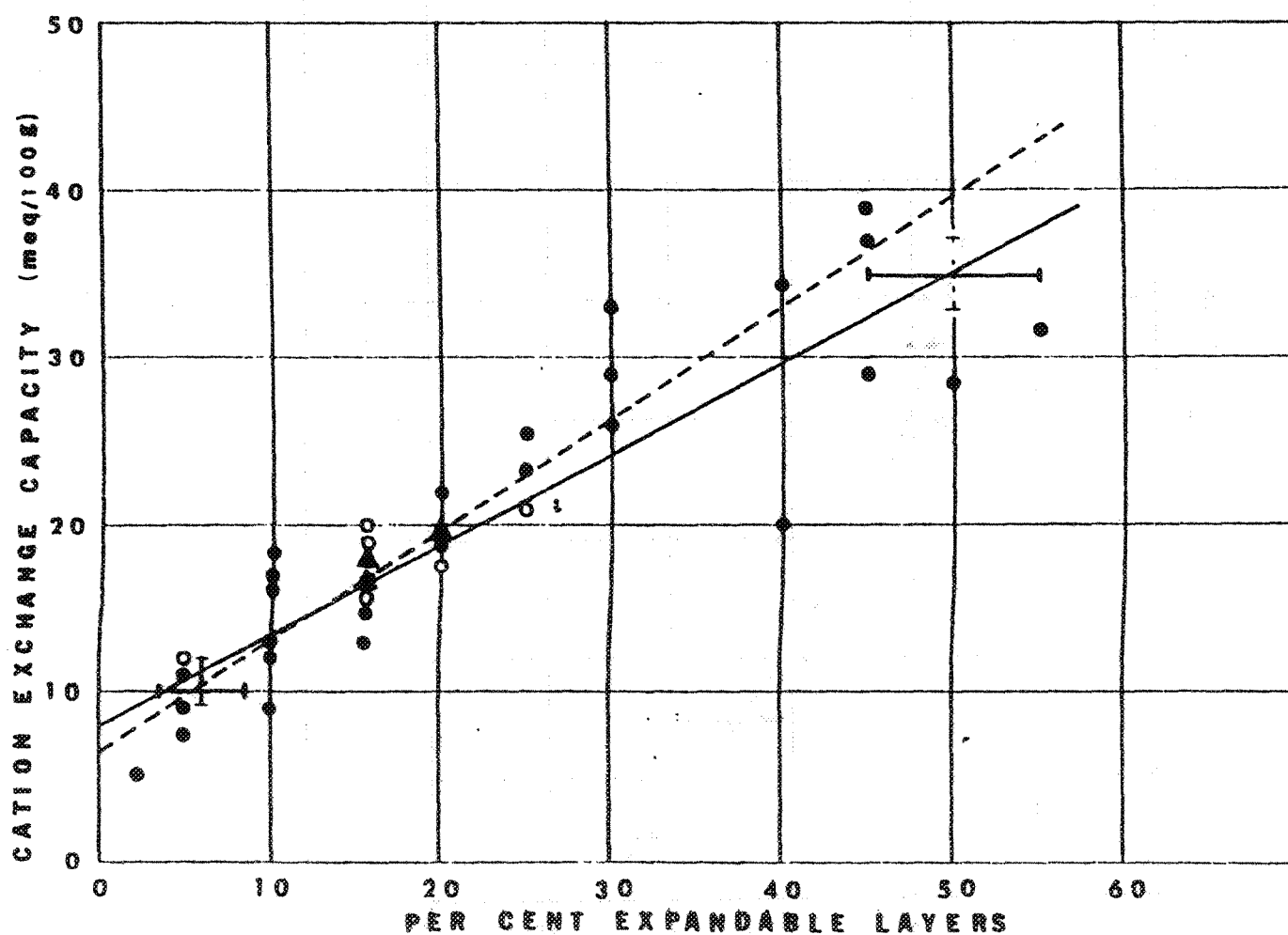
σ_w	[kPa]	Water spanning.
σ'_v	[kPa]	Verticale effectieve spanning.
σ_{gv}	[kPa]	Verticale grondspanning, normaal geconsolideerd.
$\sigma'_{h,nc}$	[kPa]	Effectieve horizontale spanning, normaal geconsolideerd.
$\sigma'_{h,oc}$	[kPa]	Effectieve horizontale spanning, overgeconsolideerd.
$\sigma_{g,r,nc}$	[kPa]	Radiale grondspanning, normaal geconsolideerd.
$\sigma_{g,r,oc}$	[kPa]	Radiale grondspanning, overgeconsolideerd.



 GRONDMECHANICA DELFT	Postbus 69 2600 AB Delft Nederland	Telefoon (015) 69 35 00 Telefax (015) 61 08 21	datum 1995-06-02	get. Kuij.
	Westerschelde Oeververbinding Deeltrace Middelplaat Relatie grensspanning P_g in met diepte		CO-350690	gez. Sta
			BIJL. 85D1	form. A4



Grafiek 1 de relatie tussen het K₂O-gehalte van Glauconiet en percentage zwellende lagen (naar Manghnani et al. 1964).



Grafiek 2 de relatie tussen de kationen uitwisselingscapaciteiten (CEC) van Glauconiet en het percentage zwellende lagen in de kristalstructuur (naar Manghnani et al. 1964)

Dear Mr Hashimoto.

We have received a question for the Western Scheldt project. The question is: Are there soil related phenomena that can lead to the extreme deformations of the two TBM shields?

We (GeoDelft and Western Scheldt project) agreed on giving a advice in separate steps:

Fase 1: Quick scan, the making of an inventory of possible causes of the measured deformations.

Fase 2: Further investigations, to be defined based on results of fase 1

Questions:

- 1 What do you think are possible reasons for the occurred deformations of the TBM?
(give for each reason if it is likeable, less likeable or unlikeable)
- 2 Do you have experience with drilling in glauconite sands? Because we are very much afraid tht some of the problems are related to this. And if this is the case there may be are very big problem because at this location the glauconite contents is only 6% and there are locations with 30%!!!!!!

Some information:

Around the 10th of May the deformations at the tail of the TBM increased some 35 mm. The maximum total displacement reached 53 mm. The TBM was located at NAP -60 m under the deepest part of the River Western Scheld (NAP -30m water depth). In the design (1996) this was not determined as the most critical location that was a location under the dyke (groundlevel NAP +6 m) and TBM at NAP -45 m. For this situation there was calculated 30 mm deformation. So at a location where with a lower vertical stress there occurred about 50% more deformation.

Present Location

Table 1 Soil conditions at present location

Soil Layer	top of layer [m NAP]	γ_{sat}^{**} [kN/m ³]
Westerscheldt water	0,0	10
Z1 (sand)	-31,0	20
BK2 hard clay	-38,4	19
GZ2 Glauconite Sand (sand with 6% Glauconite)	-44,0	20
K2 hard clay	-62,8	20

Tabel 2 Stresses at present location

	niveau* [ca. m NAP]	σ_w [kPa]	σ'_v [kPa]	σ_{gv} [kPa]	$\sigma'_{h,nc}$ [kPa]	$\sigma_{g,r,nc}$ [kPa]
Crown of TBM	-50,3	493	148	641	79	641
Middle of TBM	-54,35	543	228	771	105	648
Bottom of TBM	-60,6	606	261	867	131	867

BK2: $K_0 = 0,5$

GZ2: $K_0 = 0,46$

Table 3 Soil conditions at critical location for the design (1996)

Soil Layer	Top of Layer [m NAP]	γ_{sat}^{**} [kN/m ³]
Z1 sand	+6,0	19
K1 soft Clay	-0,2	15
Z1 sand	-1,8	20
BK1 hard Clay	-28,6	20
BK2 hard Clay	-30,2	19
GZ2 Glauconite Sand (sand with 6% Glauconite)	-40,3	20

Tabel 4 Stresses at critical location for the design (1996)

	niveau* [ca. m NAP]	σ_w [kPa]	σ'_v [kPa]	σ_{gv} [kPa]	$\sigma'_{h,nc}$ [kPa]	$\sigma_{g,r,nc}$ [kPa]
Crown of TBM	-30,7	307	298	605	149	605
Middle of TBM	-36,35	364	349	713	175	539
Bottom of TBM	-42	420	402	822	188	822

BK2: $K_0 = 0,5$

GZ2: $K_0 = 0,46$

LOCATION OF TBM

Western TBM is ahead of the Eastern TBM

Steering correction

The Western TBM needs since the start of the project a steering correction in the horizontal plane of 20% extra jackforce.

Tail of TBM

See attached drawing

Deformations of TBM tail

See attached drawing of both TBM's, some translations:

theoretisch	=	theoretical
nulmeting	=	zero measurement (initial)
ebene 0...3	=	different locations of the tail see drawing
groutleiding	=	grout lycene
vetleiding	=	grease pipe/lycene

Overconsolidation:

Based on the measurement and our geological knowledge we know that the Glauconite sand and the hard Clay is overconsolidated. I have made some estimations for the two locations.

Tabel 5 K0 for overconsolidated soil ($K_{0,OC}$) Present location

	niveau* [ca. m NAP]	OCR [-]	estimations $K_{0,OC}$				
			elastisch ν			power rule	Average estimation
			$\nu=0.1$	$\nu=0.15$	$\nu=0.2$		
Crown of TBM	-50,3	9,2	2,93	2,47	1,95	1,52	1,99
Middle of TBM	-54,35	7,9	2,32	1,97	1,58	1,40	1,68
Bottom of TBM	-60,6	6,5	1,95	1,67	1,36	1,27	1,46

Tabel 6 Stresses at present location

	niveau* [ca. m NAP]	σ_w [kPa]	σ'_v [kPa]	$\sigma'_{h,oc}$ [kPa]	$\sigma_{g,roc}$ [kPa]	$\sigma_{g,rc}$ [kPa]
Crown of TBM	-50,3	493	148	340	641	641
Middle of TBM	-54,35	543	228	383	926	648
Bottom of TBM	-60,6	606	261	416	867	867

Tabel 7 K0 for overconsolidated soil ($K_{0,OC}$) at critical location for the design (1996)

	niveau* [ca. m NAP]	OCR [-]	estimation $K_{0,OC}$				
			elastistic ν			power rule	Average estimation
			$\nu=0.1$	$\nu=0.15$	$\nu=0.2$		
Crown of TBM	-30,7	5,0	2,06	1,80	1,51	1,12	1,46
Middle of TBM	-36,35	4,4	1,84	1,61	1,36	1,05	1,33
Bottom of TBM	-42	4,0	1,50	1,31	1,09	0,97	1,14

Tabel 8 Stresses at critical location for the design (1996)

	niveau* [ca. m NAP]	σ_w [kPa]	σ'_v [kPa]	$\sigma'_{h,oc}$ [kPa]	$\sigma_{g,r,nc}$ [kPa]	$\sigma_{g,r,nc}$ [kPa]
Crown of TBM	-30,7	307	298	434	605	605
Middle of TBM	-36.35	364	349	464	827	539
Bottom of TBM	-42	420	402	460	822	822

Symbols

σ_w	[kPa]	Water pressure
σ'_v	[kPa]	Vertical effective stress
σ_{gv}	[kPa]	Vertical soil stress, normal consolidated
$\sigma'_{h,nc}$	[kPa]	horizontal effective stress, normal consolidated
$\sigma'_{h,oc}$	[kPa]	horizontal effective stress, overconsolidated
$\sigma_{g,r,nc}$	[kPa]	radial soil (total) stress, over consolidated
$\sigma_{g,r,nc}$	[kPa]	radial soil (total) stress, normal consolidated

Advisory Report for TBM of Western Shield Project

27 July, 2000

Geo-Research Institute

Advisory Report for TBM of Western Shield Project

The report was performed for:

GeoDelft

Stieltjesweg, 2628 CK Delft

P.O. Box 69, NL-2600 AB Delft

Geo-Research Institute

Special Research Division

Geotechnical Engineer * Tadashi Hashimoto

4-3-2, Itachibori, Nishi-ku, Osaka 550-0012, JAPAN

Phone * +81-6-6539-2977

Fax * +81-6-6578-6256

E-mail * hasimoto@geor.or.jp

* I received the information about Western Shield Project by your mail dated July 25, but from this information, I cannot know about the actual construction condition, observed deformation of TBM, TBM design, and so on. So I cannot give you detail advice.

* Considering the information you sent me, I listed the possible reasons of the abnormal deformation of TBM.

Question 1: What do you think are possible reasons for the occurred deformations of the TBM? (give for each reason if it is likeable, less likeable or unlikeable)

Answer

* The followings are the possible reasons.

* It is possible that the extremely big jack force and the eccentric jack force cause the abnormal deformation of the skin plate. These abnormal jack forces may be brought about by (1) friction between TBM and the sandy ground, or (2) friction between TBM and the segment.

(1) Friction between TBM and the sandy ground can increase under the following conditions.

* When the overcut is small, swelling and squeezing of sandy ground cause "shield body tightening-up".

* Bad steering of TBM when it is driving.

* Ground disturbance under driving of TBM brings about high-dense deposition of excavated sand at the lateral part of overcut.

* "shield body tightening-up"

When a shield machine drives in fine sand layers, the ground around the machine collapses under driving pressure, and over cut space is filled with collapsed sand. That increases the friction between the outer side of the machine and the surrounding ground, so the driving force becomes bigger.

(2) Friction between TBM and the segment can occur under the following conditions.

* Bad steering of TBM makes the tail clearance smaller.

* Adhesion of solidified backfill grouting material at the tail brush of TBM.

* Deformation of TBM can occur when too large backfill grouting pressure works horizontally. You should examine the grouting period, the grouting pressure, and the grouting position.

* Anisotropic earth pressure caused by stress release can be the cause of abnormal deformation of TBM when the overcut is small. When K_0 is large, it is possible that horizontal pressure becomes larger than vertical stress, and this brings about deformation of TBM.

* The skin plate of TBM do not have enough stiffness against the applied pressure. Though the skin plate is designed as 70 mm, rigidity of certain parts of the plate, for example at the grout pipes, is smaller than that of other parts.

* In Japan, as long as I know, the deformation of TBM is smaller than 1 cm even in the case of tunnel whose diameter is more than 10 m. Deformation smaller than 1 - 2 cm is no problem because such small deformation behaves within the elastic state and the deformed part of TBM becomes restored to its original state.

* To clarify the reasons of abnormal deformation of TBM;

- ▪ Estimate the friction force from the observed jack force, slurry force, and so on.
- ▪ Examine the jack's eccentric force based on the construction records.
- ▪ Examine the steering condition by the TBM's control data.
- ▪ Examine the observed tail clearance.
- ▪ Examine the adhesion condition of solidified backfill grouting material at the tail brush.
- To solve the problem of abnormal deformation of TBM;
 - When friction is the major cause,
 - ▪ Keep the face stability.
 - ▪ Enlarge the overcut employing copy cutter.
 - ▪ Control the steering strictly.
 - ▪ Employ an effective backfill grouting method like ETAC.
 - ▪ Remove the backfill grouting material adhering to the tail brush.
 - ▪ Grout lubrication material.
- It is necessary to find the cause and take the proper countermeasures.

Question 2: Do you have experience with drilling in glauconite sands?

Because we are afraid that may be some of the problems are related to this. And if this is the case there may be are very big problem because at this location the glauconite contents is only 6% and there are locations with 20 to 30%!!!!

Answer

* In Japan we seldom examine the mineralogical property (contents) of sand for shield tunnelling. Therefore, I cannot say whether we have experience of excavation of ground with glauconite sands or not. I would like to know the geological property of glauconite sands. Glauconite sands are easy to swell ?