

Verweking van grond aan het boorfront

Eindrapport

*Richard de Nijs
september 1996*

*Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Sectie Geotechniek*

De afstudeercommissie:

Prof. ir. A.F. van Tol
Prof. ir. E. Horvat
Prof. ir. W.J. Vlasblom
Ir. W. Broere
Ir. J.P. Oostveen

Civiele Techniek, Sectie Geotechniek
Civiele Techniek, Sectie Ondergronds Bouwen
Werktuigbouwkunde, Sectie Grond Verzet
Civiele Techniek, Sectie Geotechniek
Civiele Techniek, Sectie Geotechniek

Voorwoord

De schrijver van dit rapport is student Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

Het rapport dient als eindrapportage van een afstudeeropdracht. Deze opdracht heeft als onderwerp: verweking van grond aan het boorfront. Om een goed inzicht in het verwekingsrisico tijdens het tunnelboorproces te verkrijgen zijn verschillende deelvragen beantwoord. De uitleg van verwekingsvormen die mogelijk optreden bij het boorproces, de oorzaken, de aanpak van risicoherkenning, inschatting van het risico, verwekingsherkenning en tegenmaatregelen passeren in deze volgorde de revue.

Bij het schrijven van dit rapport heeft de auteur veronderstelt dat de lezer over de basiskennis van de grondmechanica beschikt.

De auteur wil eenieder danken die heeft bijgedragen aan de realisatie van dit rapport. De vaste begeleiders, te weten prof. ir. A.F. van Tol, prof. ir. E. Horvat en prof. ir. W.J. Vlasblom voor hun inhoudelijke kritiek en aangereikte informatie tijdens de peilingen.

De dagelijks begeleider, ir. Wout Broere, voor de regelmatige gesprekken over de te beantwoorden problemen. Bijzondere dank gaat naar hem uit voor de geboden hulp bij problemen in het gebruik van hardware en software.

Commissielid ir. J.P. Oostveen, voor de geboden mogelijkheid contact te leggen met een expert op het gebied van verwekingsanalyse en de kritiek op de Plaxissimulaties.

De sectie Ondergronds Bouwen, voor de geboden mogelijkheid een tunnelboormachine in bedrijf te kunnen zien tijdens de excursie naar het tunnelboorproject te Lille.

De medewerkers en studenten van de sectie geotechniek, voor de hulp en getoonde interesse.

Naast deze mensen gaat bijzondere dank uit naar ir. Ard den Outer, die, met zijn kennis op het gebied van dynamisch belaste bodems, een goede uitleg kon geven over de ontwikkelde theorieën en methoden omtrent de verwekingsanalyse. De door hem getoonde interesse en de belangeloze hulp in de vorm van commentaar en literatuurverwijzingen waren een grote stimulans om het verschijnsel verweking te doorgronden.

Delft, september 1996
Richard de Nijs

Samenvatting

Tijdens tunnelboringen onder de Nederlandse bodemomstandigheden wordt gevreesd voor het verschijnsel verweking. Verweking is een verschijnsel waarbij verzadigde losgepakte zandgronden ten gevolge van een belasting overgaan van een stabiele naar een vloeibare toestand, dit als gevolg van een toegenomen poriënwaterdruk welke de effectieve korrelspanning doet afnemen.

Verweking treedt op in verschillende situaties, zoals bijvoorbeeld bij het intrillen van damwanden en tijdens aardbevingen. Uit de voorbeeld situaties blijkt dat het risico van het optreden van verweking afhankelijk is van verschillende factoren. De relatieve dichtheid en cyclische bodembelasting spelen een grote rol.

Bij de analyse van de bodemafhankelijke risicofactoren kan gekozen worden tussen een monstername gevolgd door laboratoriumproeven en een sondering middels een sonde met verschillende meetinstrumenten. De sondering is zowel verticaal als horizontaal uit te voeren waarbij de horizontale sondering nog nader onderzoek vereist. De bepaling van het verwekingsrisico middels de sondering met kleefmeting geeft van alle opties de meest betrouwbare resultaten.

In verwekingsgevoelige bodems zijn zowel gronddrukbalans- als vloeistofschild tunnelboormachines inzetbaar. De gevolgen van het optreden van verweking aan het boorfront zijn afhankelijk van het soort machine.

Bij het gronddrukbalanssysteem zal een volumeverlies door toestroming van grond richting de boorkamer optreden. Deze toestroming is alleen mogelijk wanneer grond uit de boorkamer wordt verwijderd.

Het optreden van het verschijnsel zal bij een vloeistofschild een uitwisseling in de boorkamer van de steunvloeistof met een zandwatermengsel tot gevolg hebben. Het volumeverlies ten gevolge van deze uitwisseling is in het ergste geval gelijk aan het volume van de boorkamer en treedt zeer plotseling op. Het boorproces kan alleen hervat worden wanneer de boorkamer weer met steunvloeistof gevuld is en de filterkoek weer opgebouwd is. Het herstel van het vloeistofschild vereist mogelijk maatregelen vanaf maaiveld.

Voor beide systemen geldt dat het volumeverlies een zetting in de bodem tot gevolg heeft welke, in de doorgerekende homogene grondcondities, doorwerkt tot op het maaiveld.

Het verwekingsrisico tijdens het tunnelboorproces wordt beïnvloed door de spanningswijziging die optreedt in de bodem. De korrelspanningsreductie en schuifspanningstoename alsook de trilling die de machine opwekt tijdens het boorproces werken risicoverhogend.

De verticale en horizontale korrelspanningsreductie en de statische schuifspanningstoename zijn het gevolg van de ten opzichte van de bodem lagere steundruk aan het front. De cyclische schuifspanningen zijn het gevolg van de trillingen die de machine opwekt. De opgewekte trillingen zijn alleen afhankelijk van de te boren

grondsoort en de tunneldiameter gesteld. De invloed van het machinetype op de trillingen is punt van nader onderzoek.

De trillingsvoortplanting in de bodem van de door de tunnelboormachine opgewekte trillingen is beschreven door formules die de voortplanting van heitruillingen beschrijven. Middels een trillingsmeting tijdens een tunnelboring en de heiformule is de bodemversnelling aan het boorfront berekend. Door toepassing van de aardbevingstheorie van Seed kan de versnelling vertaald worden naar een cyclische schuifspanning.

De toetsing van de statische schuifspanningsbelasting geschiedt met de relatieve schuifspanning. De cyclische schuifspanningsbelasting wordt getoetst middels de stress ratio. Voor een gecombineerde schuifspanningsbelasting is geen toetsingsmiddel voor handen. Na toetsing blijkt het verwekingsrisico zeer lokaal verhoogd te worden. In de eerste twee meter voor het boorfront heerst een spanningssituatie welke in verwekingsgevoelige bodem kan leiden tot verweking. De cyclische schuifspanning in combinatie met de verticale korrelspanningsreductie zijn de meest risicoverhogende factoren. Uit de toetsing blijkt verder dat verweking van grond aan het boorfront niet uit te sluiten is.

Onderzocht is of het optreden van verweking van grond aan het boorfront te herkennen is middels machineregistraties of metingen in de bodem. De snijkraft is hiervoor niet geschikt, daar er geen wijziging optreedt tijdens verweking. De steundrukmeting bij vloeistofschildmachines zal alleen merkbaar beïnvloed worden na bezwijken van het front. De afname van de amplitude van de bodemversnelling in de bodem tijdens verweking is te gering om geregistreerd te kunnen worden op enige afstand. Een veelbelovend, nog nader onderzoek vergend middel om verweking te herkennen is de waterspanningsmeting tijdens sonderen in de bodem.

Voorkoming van verweking is voorafgaande aan het boorproces of tijdens het boorproces voor het optreden van verweking mogelijk. Het tegengaan van verweking na het optreden ervan is tijdens het boorproces niet mogelijk. Herkenning is zeer moeilijk en vergt nader onderzoek. Daarnaast vergt het uitvoeren van tegenmaatregelen tijd.

Bij de uitvoering van tegenmaatregelen voorafgaande aan het boorproces kan gedacht worden aan bodemverbetering. De weerstand van de bodem kan verhoogd worden door bijvoorbeeld verdichting of een grondwaterstandsverlaging. Tijdens het boorproces is een belastingverlaging uit te voeren door een afname van de snijdiepte of -snelheid. Ook is het bij gronddrukbalansschilden mogelijk een schuim te injecteren in de boorkamer waardoor het verknedend van grond minder energie vergt. Een verhoging van de steundruk tijdens het boorproces verhoogt de korrelspanning en verlaagt de statisch opgelegde schuifspanning.

Inhoudsopgave

| | |
|---|-----|
| Voorwoord | i |
| Samenvatting | iii |
| Verklaring symbolen | vii |
| 1 Inleiding | 1 |
| 2 Concept van verweking van grond | 3 |
| 2.1 Definitie van verweking | 3 |
| 2.2 Het verwekingsproces grafisch weergegeven | 4 |
| 2.3 Praktijkvoorbeelden van verwekingssituaties | 6 |
| 2.3.1 Zandwinning | 7 |
| 2.3.2 Damwand intrillen | 8 |
| 2.3.3 Aardbeving | 8 |
| 2.3.4 Oevererosie | 8 |
| 2.3.5 Offshore platform | 9 |
| 2.4 Factoren die het verwekingsrisico beïnvloeden | 9 |
| 3 Analyse verwekingsrisico van de bodem | 11 |
| 3.1 Monsternamen | 11 |
| 3.2 Laboratorium proeven op monsters | 11 |
| 3.2.1 De zeefkromme | 11 |
| 3.2.2 De minimale en de maximale korrelstapeling | 13 |
| 3.2.3 De kritieke dichtheid | 14 |
| 3.2.4 De cyclic stress ratio | 17 |
| 3.2.5 De korrelvorm | 19 |
| 3.3 Sondering in situ | 19 |
| 3.4 Metingen tijdens sonderen | 19 |
| 3.4.1 De conusweerstand | 20 |
| 3.4.2 De mantelwrijving | 22 |
| 3.4.3 De waterspanning | 26 |
| 3.4.4 De dichtheidsmeting | 30 |
| 3.4.5 De schuifgolfvoortplantingssnelheid | 30 |
| 4 De tunnelboormachine | 33 |
| 4.1 Algemene beschrijving tunnelboormachine | 33 |
| 4.2 Vloeistofschild | 34 |
| 4.2.1 Hydroschild | 34 |
| 4.2.2 Slurryschild | 35 |
| 4.3 Gronddrukbalansschild | 36 |
| 5 Gevolgen verweking aan het boorfront | 37 |
| 5.1 Simulatie verweking aan het boorfront | 37 |
| 5.1.1 Verplaatsingen | 39 |
| 5.1.2 Horizontale korrelspanning | 39 |
| 5.1.3 Verwekingspositie en omvang | 40 |
| 5.2 Gevolgen verplaatsingen per machine type | 40 |
| 5.3 Simulatie maaiveldzakking | 42 |
| 6 Verwekingsrisicofactoren tunnelboorproces | 43 |
| 6.1 Korrelspanningwijziging | 43 |
| 6.1.1 Verticale korrelspanning | 43 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.1.2 | Horizontale korrelspanning..... | 47 |
| 6.2 | Schuifspanningswijziging..... | 49 |
| 6.2.1 | Statische schuifspanning..... | 49 |
| 6.2.2 | Cyclische schuifspanningen..... | 51 |
| 7 | Toetsen belastingen aangaande verweking..... | 55 |
| 7.1 | Statische schuifspanningsbelasting..... | 55 |
| 7.2 | Cyclische schuifspanningsbelasting..... | 58 |
| 7.3 | Gecombineerde schuifspanningsbelasting..... | 60 |
| 8 | Herkenning van verweking aan het boorfront..... | 63 |
| 8.1 | Snijkraachregistratie..... | 63 |
| 8.2 | Steundrukregistratie..... | 64 |
| 8.3 | Amplitude meting in de bodem..... | 65 |
| 8.4 | Waterspanningsmeting in de bodem..... | 66 |
| 9 | Voorkomen verweking..... | 67 |
| 9.1 | Maatregelen voorafgaande aan het boorproces..... | 69 |
| 9.1.1 | Verhogen relatieve dichtheid..... | 69 |
| 9.1.2 | Verhogen cohesie..... | 69 |
| 9.1.3 | Verhogen doorlatendheid..... | 70 |
| 9.1.4 | Verhogen effectieve korrelspanning..... | 70 |
| 9.2 | Maatregelen tijdens het boorproces, voor verweking..... | 71 |
| 9.2.1 | Verhogen effectieve korrelspanning..... | 72 |
| 9.2.2 | Verhogen cohesie..... | 72 |
| 9.2.3 | Verlagen belasting..... | 73 |
| 9.3 | Maatregelen tijdens het boorproces na verweking..... | 74 |
| 9.4 | Conclusie tegengaan verweking..... | 75 |
| 10 | Conclusies & aanbevelingen..... | 77 |
| | Literatuurlijst..... | 79 |
| | Figuren..... | 82 |
| | Formules..... | 84 |
| | Contacten..... | 85 |
| | Bijlage I: Simulatie gevolgen verweking..... | 87 |
| | Bijlage II: Simulatie spanningswijziging..... | 105 |
| | Bijlage III: Bepaling cyclische schuifspanning..... | 109 |
| | Bijlage IV: Indringing bentoniet..... | 123 |
| | Bijlage V: Bepaling amplitude afname..... | 125 |
| | Bijlage VI: Waterspanningsregistratie..... | 127 |
| | Bijlage VII: Toepassing methode Olsen..... | 129 |

Verklaring symbolen

| | |
|-------------------------|---|
| e_{\max} | maximale waarde poriën getal e |
| e_{\min} | minimale waarde poriën getal e |
| e | poriën getal |
| n | porositeit |
| T | cyclische schuifspanning |
| σ_0 | effectieve verticale spanning |
| σ_{dc} | cyclische schuifspanning |
| σ_a | effectieve spanning waaronder het monster in het veld is geconsolideerd en welke ook aangebracht wordt in triaxiaal proef |
| C_r | reductie factor, afhankelijk van de relatieve dichtheid |
| q_{c1} | genormaliseerde conusweerstand |
| q_c | conusweerstand |
| C_p | correctie factor conusweerstand |
| $\bar{\sigma}_v$ | verticale effectieve spanning in tsf (1tsf = 0.977 kg/cm ² \approx 95.843 kN/m ²) |
| n | grondsoortafhankelijke waarde ter bepaling correctie factor conusweerstand |
| Δu | poriënwateroverdruk |
| f_{s1} | genormaliseerde mantelwrijving |
| f_s | mantelwrijving |
| FR_1 | genormaliseerde CPT frictie ratio |
| G | glijmodulus |
| ρ | dichtheid materiaal |
| ν | dwarscontractieconstante |
| E | elasticiteitsmodulus |
| C_s | voortplantingssnelheid schuifgolf |
| σ_v | totale verticale spanning |
| p | waterdruk |
| σ_v' | verticale korrelspanning |
| γ_{water} | volumegewicht water |
| γ_{grond} | volumegewicht grond |
| d | diepte t.o.v. grondwaterstand (g.w.s.) |
| h | diepte t.o.v. maaiveld (m.v.) |
| σ_h' | horizontale korrelspanning |
| K_0 | neutrale gronddruk coëfficiënt |
| ϕ | hoek van inwendige wrijving |
| g | zwaartekrachtsversnelling (1g = 9.81 m/s ²) |
| $RPPV$ | resultantepiekdeeltjessnelheid |
| A | uitwijking |
| ω | hoeksnelheid |
| f | frequentie |
| x | afstand tot de bron |
| ζ | demping (hesteretisch) |
| c | voortplantingssnelheid van de trilling in de bodem |
| γ | vervormingshoek |

| | |
|----------------|--|
| $(T_{\max})_d$ | werkelijk optredende piek dynamische schuifspanning |
| $(T_{\max})_r$ | berekende piek dynamische schuifspanning |
| r_d | dynamische schuifspannings reductie factor, waarde afhankelijk van de diepte, bij tunnelboringen circa 0,7 |
| r | straal poriënkanaal |
| τ_f | vloeigrens dikspoeling |
| l_E | indringdiepte |
| Δp | drukverschil aan het front |
| d_{50} | zeefdiameter waarvoor geldt 50 % van het monster gewicht passeert |
| d_{10} | zeefdiameter waarvoor geldt 10 % van het monster gewicht passeert |

1 Inleiding

De geboorde tunnel is in de afgelopen jaren in Nederland in technisch en economisch opzicht een reële uitvoeringsvariant geworden. Deze techniek heeft het grote voordeel dat het maaiveld niet verstoord wordt, een voordeel dat steeds belangrijker wordt. De Nederlandse bodem is echter niet optimaal voor een tunnelboorproces. De hoge grondwaterstand, de slappe bodem en de grote variatie in de bodemopbouw over een kleine afstand vormen drie hoofdproblemen in de uitvoering van een boortunnel. Een probleem dat zich onder de Nederlandse bodemomstandigheden kan voordoen is het verschijnsel verweking. Het verschijnsel doet de bodem overgaan in een vloeistof. Gevreesd wordt voor het optreden van het verschijnsel aan het boorfront tijdens de uitvoering van een tunnel. Dit kan leiden tot instabiliteit van het boorfront. Schade aan bebouwing op maaiveld en stilstand van het boorproces zijn de onvermijdelijke gevolgen van deze instabiliteit. Ook het personeel in de tunnel loopt een risico.

In dit rapport wordt een antwoord gegeven op de vraag: is verweking van grond een gevaar bij tunnelboringen? Om een volledig beeld te krijgen van dit risico is in deze studie ook opgenomen: een beschrijving van het verschijnsel verweking, het herkennen van het verwekingsrisico, het herkennen van het daadwerkelijk optreden van het verschijnsel en het vinden van maatregelen ter voorkoming van het optreden van het verschijnsel tijdens het tunnelboorproces.

In de studie is gebruik gemaakt van een simulatie van het ontgravingsproces middels het eindige elementen programma Plaxis. Verder is gebruik gemaakt van theorieën en conclusies uit onderzoeken naar verweking tijdens aardbevingen.

Het rapport beschrijft in het tweede hoofdstuk het verschijnsel verweking. Hoofdstuk drie behandelt hoe de verwekingsgevoeligheid van een bodem aan de hand van een monstername of een in situ meting bepaald kan worden. De uitleg van de tunnelboormachines is het onderwerp van hoofdstuk vier. Wat nu precies de gevolgen zijn van verweking van grond aan het boorfront wordt per machinetype toegelicht in hoofdstuk vijf. De wijze waarop het tunnelboorproces het verwekingsrisico beïnvloedt is het onderwerp van hoofdstuk zes. De toetsing van de belastingen komt in hoofdstuk zeven aan bod. Hoofdstuk acht gaat in op de herkenning van verweking aan het boorfront. De mogelijkheden om verweking te voorkomen worden uiteengezet in hoofdstuk negen. Tenslotte worden de conclusies en aanbevelingen aangegeven in hoofdstuk tien.

2 Concept van verweking van grond

Dit hoofdstuk behandelt de definitie van verweking en geeft een grafische toelichting van het fenomeen. Om het begrip van het verschijnsel te vergroten worden enkele praktijkvoorbeelden van verwekingssituaties beschouwd. Aan de hand van deze situaties zijn de factoren die het verwekingsrisico beïnvloeden geïnventariseerd.

2.1 Definitie van verweking

Verweking is een bezwijkingsvorm die primair voorkomt bij losgepakte, verzadigde zandgronden.

Een zandpakket kan door een plotselinge toename van schuifspanningen of door cyclische schuifspanningen een volume verandering ondergaan, in het geval van verweking betreft het een volume verkleining.

De korrels ondergaan als gevolg van de schuifspanningen een geringe verplaatsing en nemen, onder invloed van de zwaartekracht, een nieuwe, dichtere pakking aan. Het volume van het korrel skelet neemt hierdoor af. Daar zandkorrels en water nagenoeg onsamendrukbaar zijn, kan deze verkleining alleen optreden na het wegvloeien van poriënwater. Wanneer dit water, bijvoorbeeld bij zeer ondoorlatende zanden, niet in staat is de opgelegde verkleining te volgen middels een uitstroming van een gelijk volume, wordt er een wateroverspanning opgebouwd. Door de hoge compressiemodulus van water loopt deze overdruk reeds sterk op bij een kleine negatieve rek. Wanneer de wateroverspanning zo ver is opgelopen dat ze de effectieve verticale korrelspanning benadert of zelfs overschrijdt, is de contactdruk tussen de korrels ≈ 0 . In deze situatie is het pakket niet meer in staat schuifkrachten te weerstaan, daar zand nagenoeg geen cohesie heeft. Het pakket wordt zeer instabiel en zal bij een geringe schuifbelasting afschuiven. Het grondpakket gedraagt zich in feite als een vloeistof, welke ook niet in staat is om schuifspanningen op te nemen. In deze situatie spreekt men van verweekte grond.

Volgens het ASCE (American Society of Civil Engineers) luidt de definitie van verweking van een verzadigde cohesieloze bodem als volgt:

"De overgang van een stabiele toestand naar een vloeibare toestand als gevolg van de toename van de poriënwaterdruk en afname van de effectieve korrelspanning. "

Binnen het fenomeen verweking worden drie kwalificaties aangehouden:

- * verweking
- * initiële verweking
- * cyclic mobility

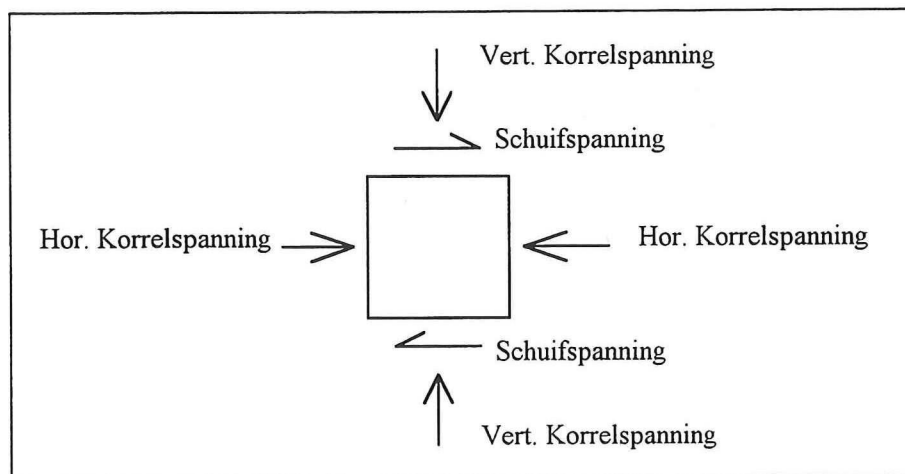
Verweking is de benaming voor de toestand waarin de bodem een continue vervorming ondergaat. De bodem heeft weinig tot geen rest schuifweerstand als gevolg van de eerder genoemde opbouw van poriënwateroverdruk en kan blijven afschuiven. Het opstarten van dit proces kan zowel door statische als door cyclische schuifspanningsbelastingen plaatsvinden.

Initiële verweking is de toestand waarbij de aangebrachte cyclische schuifspanningsbelasting de poriënwaterdruk doet toenemen tot na een bepaalde cyclus de effectieve korrelspanning overschreden wordt. Grote vervormingen zijn mogelijk wanneer er gelegenheid tot afschuiven is, de verwekingstoestand wordt dan volledig bereikt. Het proces wordt opgestart door cyclische schuifspanningsbelastingen. De aanwezigheid van een statische schuifspanningsbelasting kan de weerstand tegen initiële verweking sterk verlagen.

Cyclische verweking is dezelfde toestand als initiële verweking, alleen de bodem stabiliseert zich gedurende de aangebrachte cyclische belasting doordat de opbouw van de poriënwateroverdruk de afbouw van de poriënwateroverdruk na een aantal cycli niet meer overschrijdt. Ook in deze situatie wordt het proces door cyclische schuifspanningsbelastingen opgestart. De aanwezigheid van een statische schuifspanningsbelasting kan de weerstand tegen initiële verweking sterk verlagen.

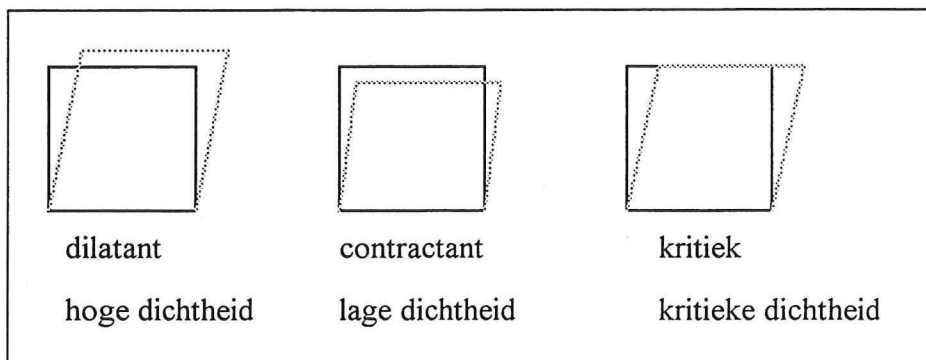
2.2 Het verwekingsproces grafisch weergegeven

Het verschijnsel verweking wordt in eerste instantie gevisualiseerd door het korrelskelet van een zandvolume te schematiseren in de vorm van een vierkant. Hier worden de ondervonden belastingen op aangegeven.



figuur (1) spanningsschematisatie korrelskelet

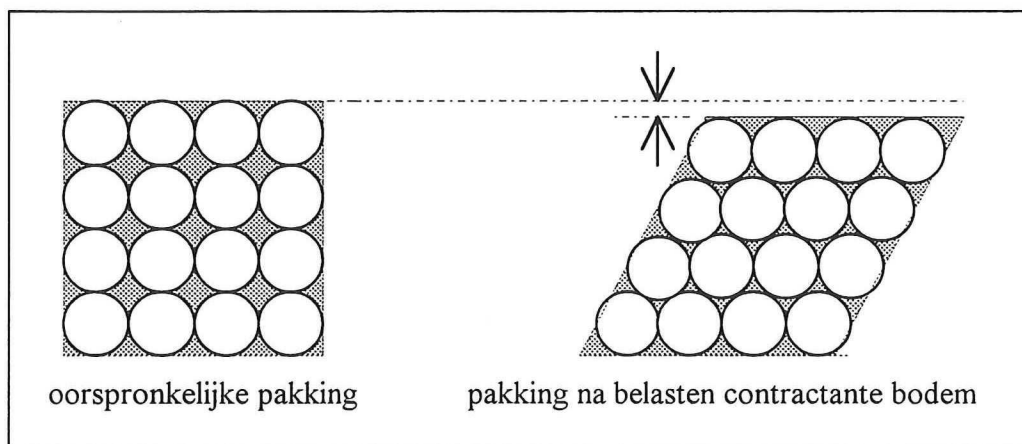
De waterspanning wordt in deze figuur nog buiten beschouwing gelaten. Afhankelijk van de korrelstapeling binnen het vierkant, hier de dichtheid van het korrelskelet genoemd, wordt de omhullende omtrek van de korrels gewijzigd door een toenemende schuifspanningsbelasting. De door de skeletdeformatie mogelijk optredende volumeveranderingen zijn in figuur (2) geschetst. De vlakken geven het omhullende volume van het korrelskelet aan.



figuur (2) deformatie vormen korrel skelet bij verschillende dichtheden

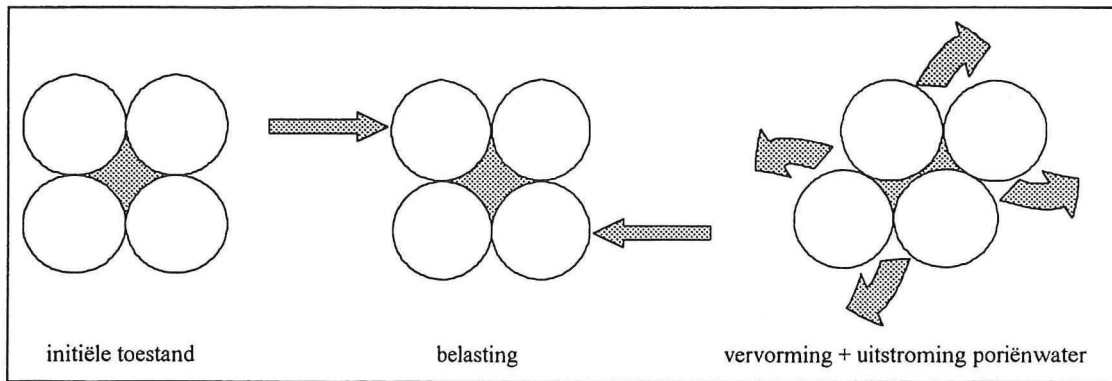
In het geval van een dilatante bodem is er sprake van een volume toename binnen het korrel skelet. Wanneer contractantie optreedt, neemt het volume af en bij een korrel stapeling gelijk aan de kritieke dichtheid blijft het volume ongewijzigd. Bij deze dichtheid is er geen wijziging van de waterspanning tijdens vervormen.

De korrel stapelingswijziging van een contractante bodem is als volgt grafisch weer te geven:



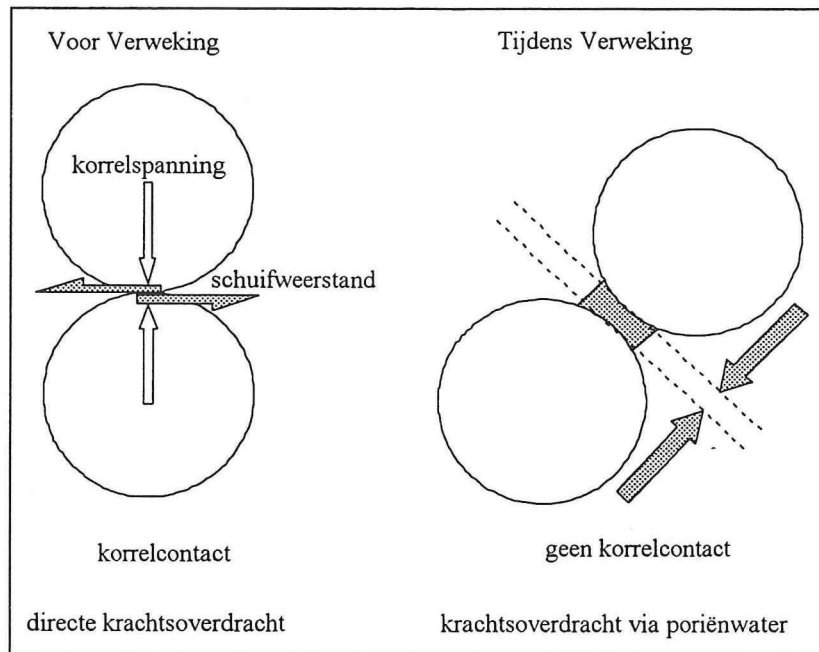
figuur (3) herschikking korrels na belaste

Tijdens de belasting op contractant materiaal wordt door de herschikking het volume tussen de korrels kleiner. Het poriënwater wordt weggeperst tijdens deze vervorming, zoals aangegeven in figuur (4).



figuur (4) uitstroming poriënwater tijdens vervormen

Wanneer het poriënwater niet voldoende snel kan uitstromen wordt de contactdruk tussen de korrels overgenomen door het water en ontstaat de volgende, grafisch weergegeven situatie. Hierbij dient opgemerkt te worden dat in de figuur de afstand tussen de korrels en de toename hiervan na verweking buiten de werkelijke proporties is.



figuur (5) korrelcontact voor en na optreden van verweking

2.3 Praktijkvoorbeelden van verwekingssituaties

Om het begrip van verweking te vergroten zijn in deze studie ook praktijkvoorbeelden van situaties waarin verweking zich heeft voorgedaan bestudeerd. Punten van belang hierbij zijn geweest wat de verweking initiëerde, de omvang van het gebied waarin het zich voordeed, wat de verweking in stand hield en hoe snel het proces verliep. Ook de bodemeigenschappen zijn een belangrijk aandachtspunt. Het doel van de inventarisatie is een helder overzicht te krijgen van de factoren die van belang zijn voor het verwekingsrisico.

In de volgende alinea's worden de zandwinning, het intrillen van een damwand, een aardbeving, kusterosie en offshore platforms behandeld als voorbeelden van verwekingssituaties.

2.3.1 Zandwinning

Verweking is bij zandwinning [Koning] een bekend verschijnsel onder de naam oevervallen. Het is waarneembaar als afschuivende taluds onder water. Het kan zich voordoen in grote winputten van stationaire winzuigers of bij taluds opgebouwd uit zand langs vaarwegen.

De techniek die wordt toegepast bij stationaire winzuigers is bekend onder de naam "actieve bressen". Bij deze techniek wordt gebruik gemaakt van hydraulische erosie. Het zand wordt door waterkracht losgemaakt en er ontstaat een dichtheidsstroming naar de zuigmond toe. In de directe omgeving van de zuigmond zal het zand als eerste in de stroming meegevoerd worden. Het talud wordt door het weggestroomde zand lokaal steiler, de bres is gevormd. Ten gevolge van het eigen gewicht van het materiaal in het talud wordt er een schuifspanning opgewekt die, naarmate het talud steiler wordt, toeneemt. Dit totdat de kritische schuifspanning wordt bereikt en het pakket over een geringe hoogte afschuift. De ontstane bres "loopt" nu door het continu afschuiven van een te steil talud richting de rand van de zuigput. Het afgeschoven zand stroomt als een dichtheidsstroom naar de lager gelegen zuigmond.

Het is echter bij deze techniek mogelijk dat zeer losgepakte zand over een grotere diepte dan de bres verstoord wordt. De schuifspanning kan ook op grotere diepte instabiliteit veroorzaken en zodoende het zand in een nieuwe pakking brengen. Een wateroverspanning op een diepte lager dan de bres kan ontstaan. In deze situatie is de kritische schuifsterkte veel lager, het talud is te steil en zal afschuiven. Nu is er geen sprake meer van een gecontroleerd eroderende bovenlaag maar van afschuiving van het talud over een grote hoogte, de bres is veel groter dan beoogd. Het proces gaat door tot de top van het talud bereikt is: de oever. De verplaatste hoeveelheden kunnen vele duizenden m³ zand bedragen. Daar het proces zeer snel verloopt lijkt het alsof de oever wegvalt, het water in, vandaar de naam oevervallen.

Van belang zijnde grondparameters in dit proces zijn het poriënvolume, de doorlatendheid, de korrelverdeling en de korrelvorm.

Verder is de omvang van de winput maatgevend voor de uiteindelijk afgeschoven hoeveelheid. Als het zand niet kan wegstromen zal het verschijnsel zich nagenoeg niet verspreiden. Het verschijnsel gaat door totdat een flauwere taludhelling is bereikt waaronder de schuifspanning niet meer de nieuwe lagere kritieke schuifspanning overschrijdt.

Afgezien van de oever is het verschijnsel ook zeer gevaarlijk voor de winzuiger. De plotselinge toestroom van een zandwatermengsel kan de zuigbuis bedelven of beschadigen.

2.3.2 Damwand intrillen

Bij het intrillen van damwanden [CUR 166, Damwand constructies] in losgepakt verzadigd zand worden de trillingen overgedragen op het zand in de naaste omgeving. Het korrelskelet wordt als gevolg van de door trillingen opgewekte schuifspanningen in beweging gebracht. De deeltjes trachten een dichtere pakking aan te nemen. Onder invloed van de zwaartekracht zakken de korrels en ontstaat er in het poriënwater tijdelijk een toestand van wateroverspanning. De heersende korrelspanningen worden drastisch verlaagd. De schuifweerstand die de grond kan leveren, neemt evenredig af. Het korrelskelet vervloeit en gaat zich min of meer gedragen als een vloeistof. Het vrijgekomen poriënwater zal wegvloeien van de lokatie waar wateroverspanning optreedt, hetgeen een zetting van de bodem tot gevolg heeft. De damwandplank fungeert als een verdichtingsnaald en zal het zandpakket verdichten waardoor het effect zichzelf tegenwerkt. Het verschijnsel treedt lokaal op, in de orde van enkele meters.

Het verschijnsel treedt niet op wanneer:

- * het zandpakket een zeer dichte pakking heeft
- * de doorlatendheid van de grond te groot is om een wateroverspanning te doen ontstaan.

2.3.3 Aardbeving

Verweking ten gevolge van aardbevingen [Committee on Earthquake Engineering, 1985] komt voor in gebieden met losgepakte zandlagen. In dit geval zijn het de door de beving opgewekte trillingen die schuifkrachten doen ontstaan. Wanneer de opgewekte schuifkrachten en het aantal cycli groot genoeg zijn kan een overspanning als gevolg van de opgetreden verdichting ontstaan die de korrelspanning overschrijdt. Door de druk die de bovenlagen uitoefenen op de zandlaag wordt het inmiddels verplaatsbare zandwater mengsel naar de oppervlakte geperst. Zandfonteinen en zettingen aan de oppervlakte zijn de zichtbare gevolgen. De mate waarin het verweekte zand in staat is naar de oppervlakte weg te vloeien geeft ook de omvang van de gevolgen van verweking aan. De omvang van het verwekingsgebied kan in de orde van vierkante kilometers liggen.

2.3.4 Oevererosie

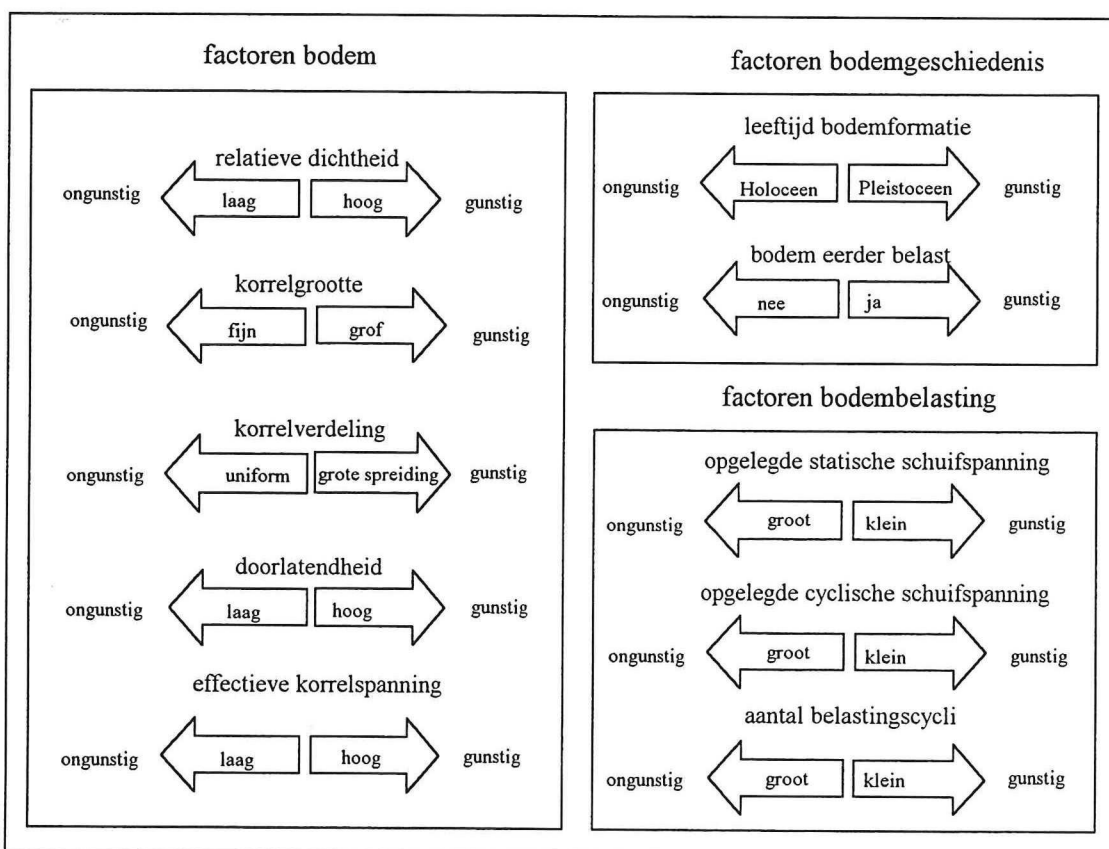
Door de stroming en waterstandsverschillen in een waterloop met zandtaluds [Barends 1992] ontstaat een zandtransport. Door het verdwijnen van dit zand wordt het talud van het zandlichaam steeds steiler. Wanneer het talud zijn maximale steilheid heeft bereikt, schuift het af en ontstaat er een poriënwateroverdruk. Deze overdruk verspreidt zich in het zandlichaam waardoor een groter gebied door de lagere resulterende korrelspanning afschuift. Belangrijke elementen in dit proces zijn dus de initiërende schuifspanning in de vorm van een plotseling steil wordend talud, de aanwezige zwaartekracht welke het afschuiven aandrijft en de overdruk die zich uitbreidt.

2.3.5 Offshore platform

Bij offshore platforms uitgevoerd als gewichtsconstructie of op palen gefundeerd moet er in de ontwerpfase al rekening worden gehouden met mogelijk grote vervormingen in de bodem [Committee on Earthquake Engineering, 1985]. Deze vervormingen ontstaan door de cyclische belasting die uitgeoefend wordt op de bodem door het bewegen van de platforms tijdens stormen. De belasting heeft een wateroverdruk op rand van de fundering tot gevolg. Poriënwater vloeit weg met meevoering van bodemmateriaal. Ondernijning van de fundering kan het gevolg zijn. Een mogelijkheid om het proces tegen te gaan is het aanbrengen van drainage onder de constructie waardoor de directe omgeving een gereduceerde poriënwateroverdruk ondervindt.

2.4 Factoren die het verwekingsrisico beïnvloeden

Na bestudering van de situaties van verweekte lokaties zijn de factoren die het verwekingsrisico van verzadigde cohesieloze bodems sterk beïnvloeden geïnventariseerd. De factoren worden in de volgende figuur beschreven.



figuur (6) factoren en hun invloed op het optreden van verweking

De factoren zijn opgedeeld in drie categorieën. Dit vanwege de aanpak van het onderzoek naar het verwekingsrisico. De categorieën bodem en bodemgeschiedenis zijn de basis van het onderzoek bij laboratorium en in situ onderzoek. De bodembelastingsfactoren zijn punt van onderzoek bij de analysering van het tunnelboorproces.

3 Analyse verwekingsrisico van de bodem

Om het verwekingsrisico van een bodem te beoordelen zijn er laboratoriumproeven op monsternames van de betreffende lokatie mogelijk. Daarnaast kunnen er in situ metingen uitgevoerd worden. Deze proeven en metingen zijn gebaseerd op de factoren die het verwekingsrisico beïnvloeden. Ook is de uitvoering van de monsternames, proeven en metingen van belang. De volgende tekst zal deze punten behandelen.

3.1 Monstername

De monstername dient al in de ontwerpfase van een tunnelproject uitgevoerd te worden, dit is van belang voor een eerste indicatie van de grondparameters. Bij sonderingen is het waardevol voor de analyse van het verwekingsrisico om de dichtheid te meten. De dichtheidsmeting kan uitgedrukt worden in de relatieve dichtheid. Deze is alleen te bepalen als de minimale en maximale pakking van een bodemmonster van de sondeerlokatie uit een laboratoriumproef bekend is. Ook moet er rekening mee worden gehouden dat de monstername niet exact in het tunneltracé wordt uitgevoerd vanwege een risico voor "piping" door het boorgat, gemaakt voor de monstername. Deze afwijking in lokatie kan een afwijking tot gevolg hebben van de parameters t.o.v. de parameters van de bodem in de werkelijk te boren lokatie.

3.2 Laboratorium proeven op monsters

Een monstername uit het te boren tracé is niet geheel te vergelijken met de bodemgesteldheid in situ. Bij een monstername in losgepakt zand moet er rekening mee worden gehouden dat de pakking verstoord is tijdens het steken van het monster en het transport naar het laboratorium. Deze bodemparameter is dus niet meer geldig en ongeschikt voor de analyse van het risico. Parameters die niet wijzigen tijdens en na de monstername komen wel voor laboratoriummetingen in aanmerking. Geschikte bodemparameters zijn:

- * de zeefkromme
- * de minimale en de maximale korrelstapeling
- * de kritieke dichtheid
- * de cyclic stress ratio
- * de korrelvorm

3.2.1 De zeefkromme

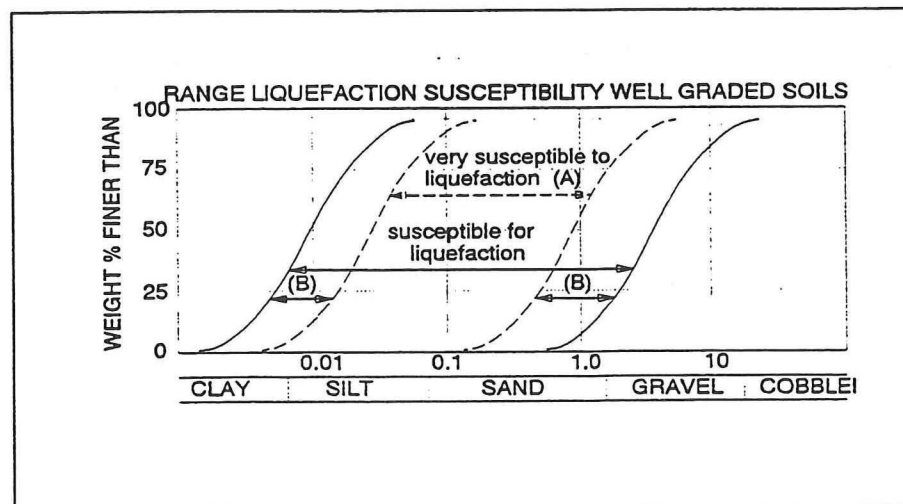
Het zeven van een monster met verschillende zeefdiameters levert een zeefkromme. Aan de hand van de massapercentages van een monster die een bepaalde zeefdiameter passeert is een punt in een zeefkromme te bepalen. Deze zeefkrommen zijn bepaald voor verschillende lokaties waar verweking zich heeft voorgedaan. Aan de hand van een groot aantal van deze zeefkrommen is een boven en een ondergrens gesteld waarbinnen de kromme van het monster moet liggen om het materiaal als verwekingsgevoelig te klasseren.

Het blijkt dat verweking van grond weliswaar primair als eigenschap van zand wordt gekenmerkt, maar niet uitsluitend aan zand toegekend moet worden. Mengvormen van zand met een fijne fractie zijn niet uitgesloten uit het verwekingsgevoelige gebied. Ook de uniformiteit van het zand speelt een belangrijke rol. Des te uniformer het zand, ofte wel des te stijler de zeefkromme, des te lager de weerstand tegen verweking. De herschikking van de korrels in het korrelskelet verloopt makkelijker bij korrels van gelijke grootte. Om deze reden worden er twee grensgebieden gedefinieerd. Een grensgebied voor een uniforme korrelverdeling en een grensgebied voor een meer gespreide korrelverdeling.

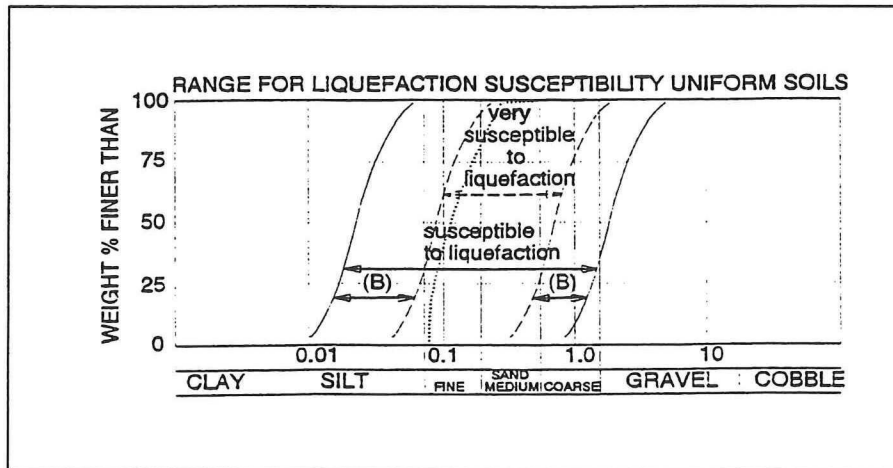
De ondergrens van het risicogebied qua korrelverdeling is gebaseerd op de cohesie die bij deze korrelverdeling optreedt. De fijne korrels verhinderen door deze cohesie de voor verweking vereiste verplaatsing van de overige grotere korrels. Cohesie komt ook bij grotere korreldiameters voor, maar is dan qua grootte te verwaarlozen. Door de samenhang ontstaat een reserve schuifweerstand, welke onafhankelijk van de korrelspanning aanwezig is in de bodem. Dit betekent dat de cohesie ook tijdens verweking weerstand tegen afschuiven blijft leveren.

De bovengrens wat betreft de korreldiameter is gebaseerd op door de doorlatendheid. Een korrelskelet opgebouwd uit grove korrels heeft een te hoge doorlatendheid om een waterdrukopbouw te laten ontstaan die in staat is de oorspronkelijke, voor vervormen aanwezige, effectieve verticale korrelspanning σ_v' te benaderen. Hierbij moet wel gelet worden op omsluitende lagen die ondoorlatend zijn, waardoor er alsnog een overdruk kan ontstaan.

De twee onderstaande zeefkrommen [Committee on Earthquake Engineering, 1985] geven aan hoe de grenzen voor een kleine en grote korrelspreiding liggen.



figuur (7) grenzen zeefkromme in relatie tot verwekingsgevoeligheid voor bodem met grote spreiding in de korrelverdeling



figuur (8) grenzen zeefkromme in relatie tot verwekingsgevoeligheid voor bodem met uniforme korrelverdeling.

3.2.2 De minimale en de maximale korrelstapeling

De relatieve dichtheidsmeting tijdens een sondering kan veel informatie geven over de verwekingsgevoeligheid van de bodem. Deze relatieve dichtheid (D_r) is alleen te bepalen wanneer de maximale en de minimale korrelstapeling bekend is. De relatie is als volgt:

$$D_r = \frac{(e_{\max} - e)}{(e_{\max} - e_{\min})} \quad [1]$$

- e_{\max} maximale waarde poriën getal e (losse pakking)
- e_{\min} minimale waarde poriën getal e (dichtst mogelijke pakking)
- e poriën getal e in situ

De relatie met andere kentallen voor de porositeit volgt in paragraaf 5.2.1 waar de sonderingen worden toegelicht.

Door het bodemmonster lange tijd te verdichten wordt een maximale dichtheid bereikt. Ook is het mogelijk een monster heel voorzichtig te stapelen door in water een zandwatermengsel voorzichtig te laten bezinken. Als de volumieke massa van de korrels en het water vooraf bepaald is kan door de volume- en gewichtsmeting de minimale korrelstapeling worden berekend. Dit volgens de relatie:

$$\rho_{\text{gem}} = \frac{\text{Volume}_{\text{monster}}}{\text{Gewicht}_{\text{monster}}} \quad \text{en} \quad \rho_{\text{gem}} = \rho_{\text{water}} * n + \rho_{\text{korrel}} * (1 - n) \quad [2]$$

n porositeit

De verhouding poriënvolume/totale grond volume volgt uit de porositeit.

$$\text{porositeit } (n) = V_p / V_g \quad [3]$$

De in buitenlandse literatuur veel gebruikte term "void ratio", het poriëngetal (e), geeft de porositeit weer volgens de verhouding:

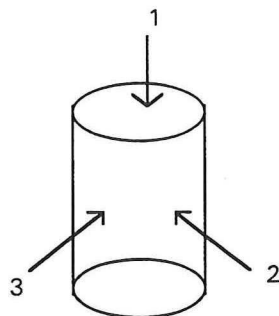
$$\text{void ratio } e = V_p / V_k \quad [4]$$

Het is mogelijk de ene verhouding om te rekenen naar de andere volgens:

$$e = n / (1 - n), \quad n = e / (1 + e) \quad [5]$$

3.2.3 De kritieke dichtheid

Een losgestapeld korrelskelet is niet vanzelfsprekend gevoelig voor verweking. Het doel van de bepaling van de kritieke dichtheid [J. Lindenberg] van een monster is of de grond ook in absolute zin als losgepakt moet worden gezien. De kritieke dichtheidsproeven zijn op zowel droge als verzadigde monsters uit te voeren. Het doel van de proeven is het poriëngehalte te vinden waarbij tijdens vervorming geen volume verandering optreedt. Deze definitie van het criterium is opgesteld door Casagrande in 1936. Het criterium wordt gemeten in een triaxiaalproef, dit omdat een schuifapparaat (direct shear) de volume verandering niet nauwkeurig genoeg kan registreren. In onderstaande figuur worden de spanningen welke opgelegd worden aan het monster in het triaxiaal apparaat weergegeven.



defenitie P:

$$P = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} \quad \text{met} \quad \sigma_2 = \sigma_3 \quad [6]$$

definitie schuifspanning q:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad [7]$$

figuur (9) schema triaxiaalproef met hoofdspansingen

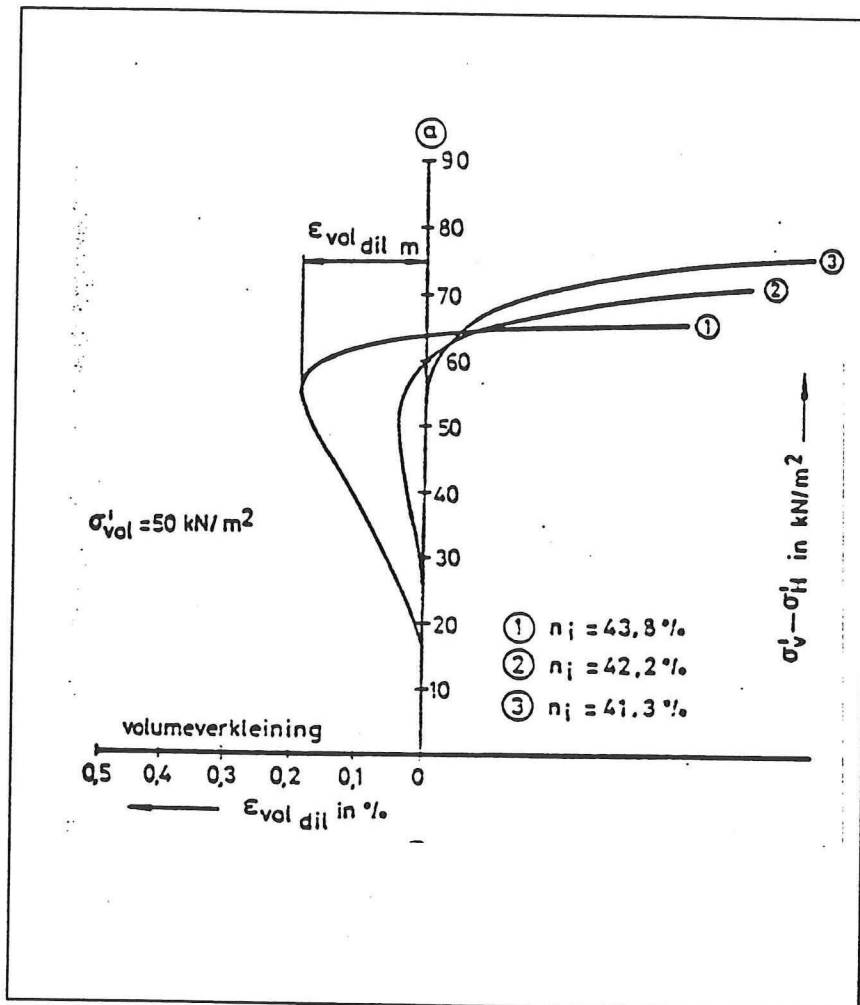
droge proef:

Een monster met bekend poriëngehalte bij constant blijvende isotrope spanning wordt met een constante snelheid vertikaal gedeformeerd. De gemiddelde normaalspanning wordt constant gehouden. Dit is te bereiken volgens:

$$\sigma'_{\text{vol}} = \frac{\sigma'_V + 2\sigma'_H}{3}$$

Met andere woorden, het spanningspad $\Delta\sigma'_V = -\frac{1}{2} \Delta\sigma'_H$ wordt doorlopen. Dit om volumedeformatie ten gevolge van normaalspanningen te elimineren.

De hierbij optredende volumedeformaties worden geregistreerd. Dat poriëngelalte waarbij een monster juist geen neiging tot volumeverkleining vertoont wordt kritieke dichtheid genoemd. Indien het poriëngelalte in situ lager is dan deze waarde is er geen risico voor verweking. Indien het zand lossier gepakt is kan, afhankelijk van de omstandigheden, verweking optreden.



figuur (10) registratie van volumeverandering bij droge kritieke dichtheidsproeven

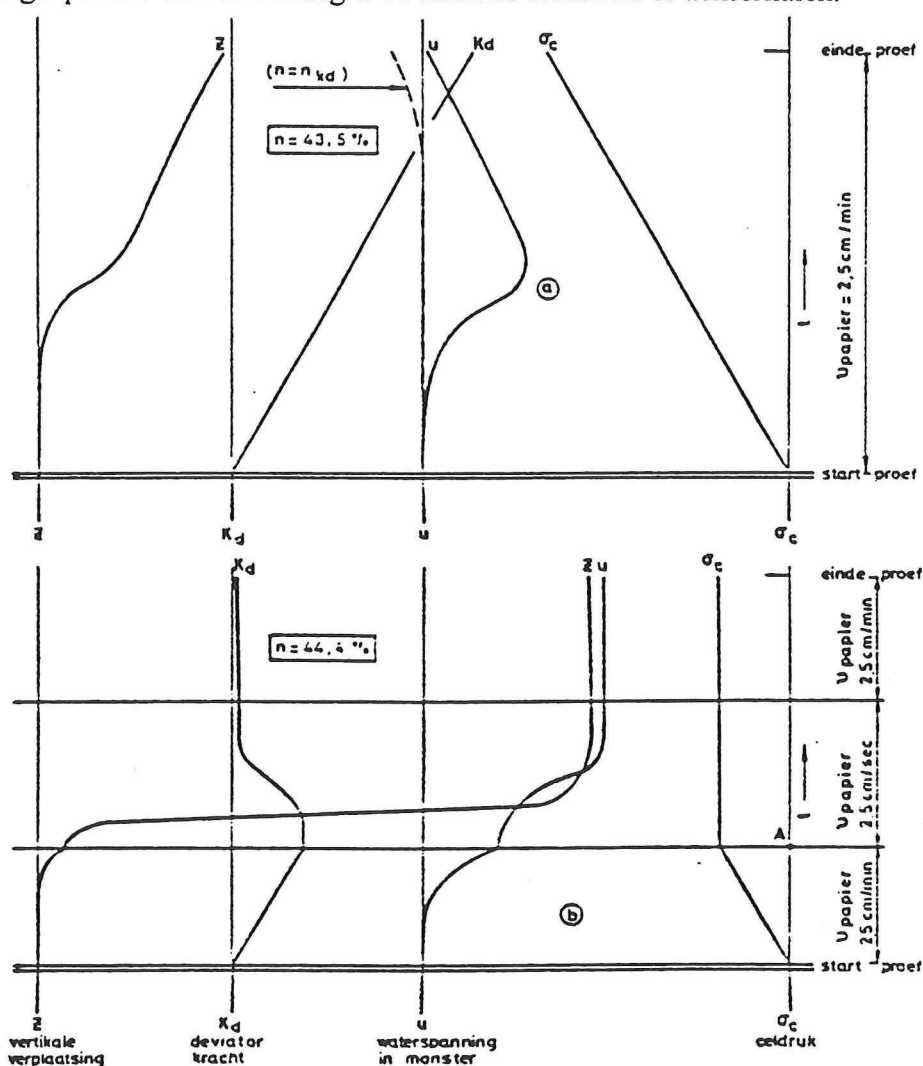
In de bovenstaande figuur is de volumeverandering weergegeven voor de toenemende waarde voor $\sigma_v' - \sigma_h'$. Uit de figuur blijkt dat het verschil in porositeit tussen een contractant en dilatant materiaal zeer gering is. Het verschil in deze figuur bedraagt slechts 2%. Pakking 1, bij porositeit $n = 41,3\ \%$, vertoont bij toenemende belasting eerst een volume verkleining, wat duidt op dilatant gedrag.

Pakking 3, bij porositeit $n = 43,3\ \%$, vertoont geen volume verandering, totdat de maximaal op te leggen belasting wordt bereikt.

verzadigde proef:

In de proeven met een met water verzadigd monster wordt de verticale belasting op een monster met bekend poriëngelalte continu opgevoerd. Ook in deze triaxiaalproef wordt de isotrope spanning constant gehouden. De proef wordt ongedraineerd uitgevoerd. In een losgepakt monster neemt de waterspanning geleidelijk toe, totdat op

een gegeven moment verweking optreedt. De dichtheid ligt nog beneden de kritieke dichtheid. Door de dichtheid te variëren in proeven en te controleren op waterspanningsopbouw en vervorming is de kritieke dichtheid te achterhalen.



figuur (11) registratie van verticale verplaatsing en waterspanning bij natte kritieke dichtheidsproeven (schematisch)

opmerkingen aangaande kritieke dichtheidsproeven:

De droge proef levert een te veilig criterium. Weliswaar treedt volumeverkleining op, maar dit hoeft nog geen verwekingsrisico te betekenen. Er mag totaal geen volumeverkleining optreden, terwijl er na een volume verkleining nog geen grote wateroverspanning opgebouwd hoeft te worden. Veel zandmassa's zullen ten onrechte verwekingsgevoelig betiteld worden.

Mogelijke bronnen van onnauwkeurigheid in de verzadigde triaxiaalproef zijn de membraamindringing in het monster en de mate van verzadiging van het zand.

Verder concludeerde Casagrande reeds in juni 1938 dat de kritieke dichtheid een functie van de normaalspanning is. Een hogere korrelspanning geeft een lagere kritieke dichtheid.

3.2.4 De cyclic stress ratio

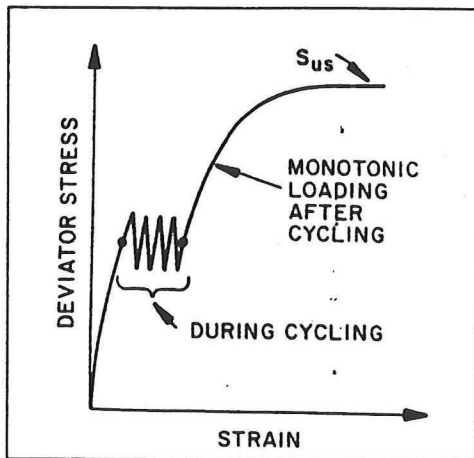
De stress ratio geeft aan hoe groot de cyclische schuifspanning is ten opzichte van de verticale effectieve korrelspanning.

$$\text{stress - ratio} = \frac{T}{\sigma_0} \quad [8]$$

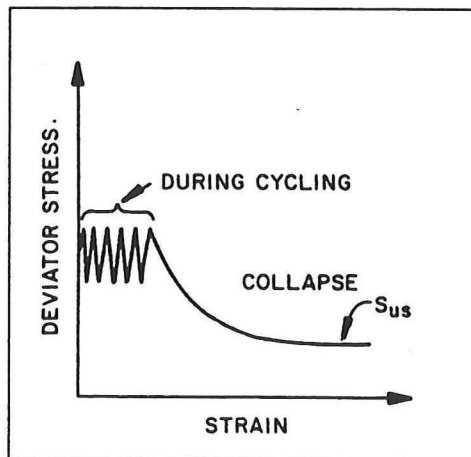
T cyclische schuifspanning
 σ_0 effectieve verticale spanning

Wanneer een bodem een cyclische belasting opgelegd wordt zal deze vervormen. Bij cyclische belastingen op een bodem met een pakking beneden de kritieke dichtheid geldt een vervormingscriterium van 5% schuifrek. Dit is gebaseerd op de waterspanning die opgebouwd wordt in een verwekingsgevoelige bodem door cyclische vervormingen groter dan 5%. Na de opbouw van de waterspanning zal bezwijken optreden.

In onderstaande grafieken wordt schetsmatig aangegeven hoe de rek (strain) verloopt ten opzichte van de cyclisch aangebrachte schuifspanning (deviator stress). Deze belastingssituatie is geschetst voor dicht- (figuur 12) en losgepakt zand (figuur 13).



figuur (12) dichtgepakt



figuur (13) losgepakt

Uit de grafieken blijkt in het geval van cyclische belasting op dichtgepakt zand de schuifweerstand toeneemt en bij losgepakt zand afneemt. Een afname van de schuifweerstand tijdens belasten is een kenmerk van een verwekingsgevoelige bodem.

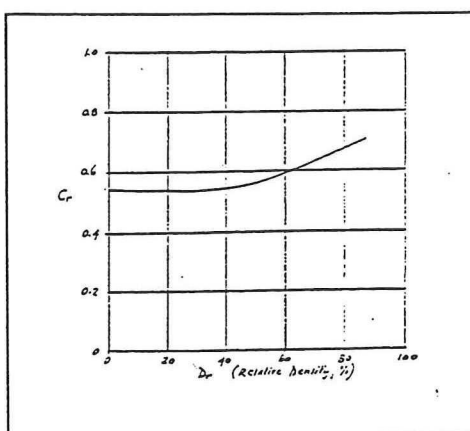
Door de stress ratio die opgelegd wordt aan de te bewerken bodem te vergelijken met de stress ratio waarbij het criterium van 5% schuifrek optreedt, is een uitspraak te doen over het verwekingsrisico. Des te groter de maximaal op te leggen stress ratio, des te lager het verwekingsrisico.

De stress ratio is in het laboratorium te bepalen middels triaxiaalproeven. Om echter de spanningsituatie die in de triaxiaalproef opgelegd wordt aan het monster te kunnen

vergelijken met de waarde in situ is een reductie factor vereist. De in situ aan te houden ratio en de in de in het laboratorium bepaalde ratio kunnen vergeleken worden volgens:

$$\frac{T}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{dc}}{2\sigma_a} * C_r \quad [9]$$

- T cyclische schuifspanning opgelegd in situ
- σ_0 effectieve verticale spanning in situ
- σ_{dc} cyclische schuifspanning
- σ_a effectieve spanning waaronder het monster in het veld is geconsolideerd en welke ook aangebracht wordt in triaxiaal proef
- C_r reductie factor, afhankelijk van de relatieve dichtheid



figuur (14) reductie factor voor de dichtheid

Daarnaast dient het verschil tussen de in situ relatieve dichtheid en de monster relatieve dichtheid (standaard 50% in proefname) gecorrigeerd te worden. Deze uiteindelijke relatie tussen de in situ waarde en de laboratorium waarde is te beschrijven met een D_{50} relatie volgens:

$$\left(\frac{T}{\sigma_0}\right)_{D_{50}} = \left(\frac{\sigma_{dc}}{2\sigma_a}\right) * C_r * \frac{D_r}{50} \quad [10]$$

- D_r relatieve dichtheid van de grond in situ
- D_{50} relatieve dichtheid 50%, waarop relaties gebaseerd zijn
- 50 ingevoerd om direct in percentages de relatieve dichtheid in te kunnen voeren

De toetsing van de in situ geldende situatie kan nu volgens de uiteindelijke relatie geschieden.

3.2.5 De korrelvorm

Naarmate de korrelvorm grilliger is zal de weerstand tegen vervormen groter zijn vanwege het ruwe contactoppervlak tussen de korrels. De hoek van inwendige wrijving van het materiaal is groter. Door bij een vastgestelde pakking het skelet te laten afschuiven kan een uitspraak worden gedaan over de ruwheid van de korrel. Let wel, een hoek van inwendige wrijving is te bepalen uit een schuifproef, maar de gevonden waarde in het laboratorium is niet te vergelijken met de waarde in situ.

3.3 Sondering in situ

In het tunneltracé kunnen metingen in de bodem middels sonderingen gedaan worden. Een bodemanalyse middels sonderen dient voorafgaande aan het tunnelboorproces uitgevoerd te worden. Het geeft op de lokaties waar de sonderingen zijn uitgevoerd een beeld over de diepte van de bodemopbouw. De keuze van de toe te passen machine en eventuele maatregelen kunnen op dit beeld gebaseerd worden. Het beeld is echter niet continu over de lengte van het tunneltracé, daar de verticale sondering alleen een indicatie geeft van de bodemgesteldheid in de directe omgeving van de sonde. Om een beeld over de lengte te verkrijgen moet de bodemopbouw tussen de sondeerlokaties bepaald worden aan de hand van de uitgevoerde sonderingen. Het drie dimensionale beeld van de bodemopbouw wordt zuiverder naarmate de afstand tussen de sondeerlokaties kleiner wordt.

Een andere mogelijkheid om een lengtebeeld van het tracé te verkrijgen is om vanuit de tunnelboormachine horizontaal de sonde door de bodem te drukken. De sonde passeert de te ontgraven grond, waardoor over de volle lengte van de sondering relevante informatie wordt verkregen. Onduidelijk is of de relaties tussen de bodemgesteldheid en de sonderegistraties zoals deze voor verticale sonderingen gelden ook toepasbaar zijn voor horizontale sonderingen. Nader onderzoek moet dit uitwijzen. De in de volgende paragraaf beschreven relaties zijn opgesteld voor verticale sonderingen.

3.4 Metingen tijdens sonderen

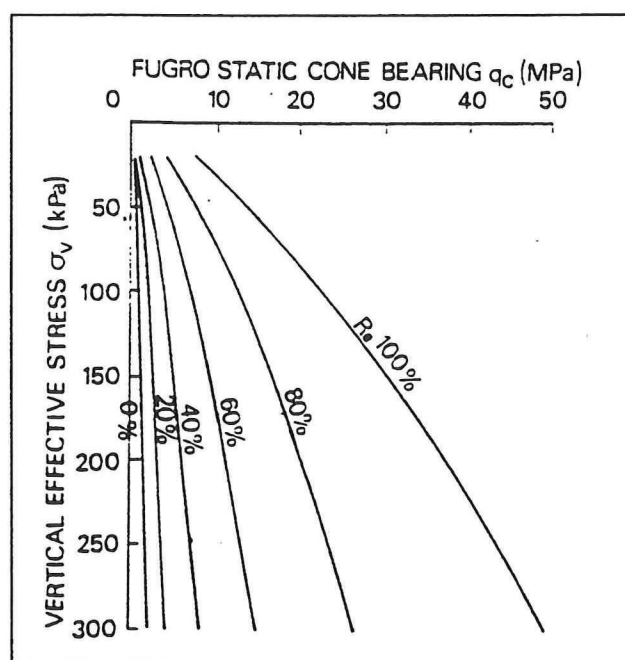
Het is mogelijk om, aan de hand van de met het sondeersysteem verkregen gegevens, het verwekingsrisico te bepalen. De metingen zijn wederom gericht op de factoren die invloed hebben op het verwekingsrisico. Een sonde die de bodem binnen dringt kan, afhankelijk van de uitrusting van de sonde, verschillende parameters meten. De volgende parameters kunnen afhankelijk van de uitrusting van de sonde middels een sondering in situ gemeten worden:

| | | |
|---|--------------------|-------------------------|
| * | conusweerstand | (cone) |
| * | mantelwrijving | (frictio) |
| * | waterspanning | (piëzo) |
| * | dichtheidsmeting | (electro density probe) |
| * | schuifgolfsnelheid | (seismic) |

De naam van de sondeuitrusting staat tussen haakjes achter de te meten parameter. De volgende alinea's behandelen de meetbare parameters met hun specifieke relatie tot verweking.

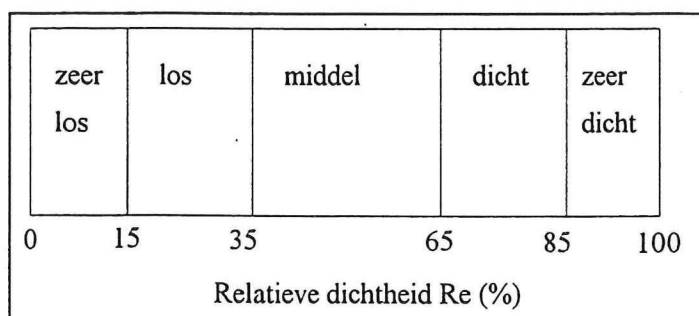
3.4.1 De conusweerstand

De conusweerstand geeft een indicatie van de draagkracht van de grond. De draagkracht van zandlagen wordt mede beïnvloed door de porositeit. In de volgende figuur [Schmertmann, 1976] wordt een relatie aangegeven tussen de conusweerstand en de relative dichtheid.



figuur (15) Relatie conusweerstand en relative dichtheid

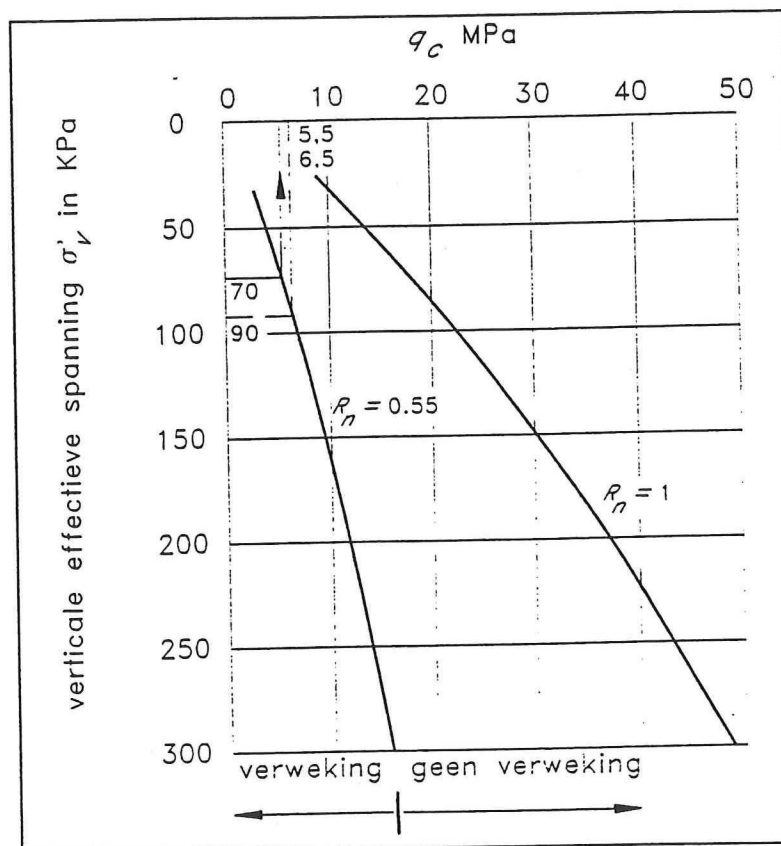
Verder is er gradatie aan te geven in de pakking aan de hand van de relative dichtheid. De relatie tussen de pakking en gradatie is in de volgende figuur vermeld.



figuur (16) Relatie pakking en relative dichtheid

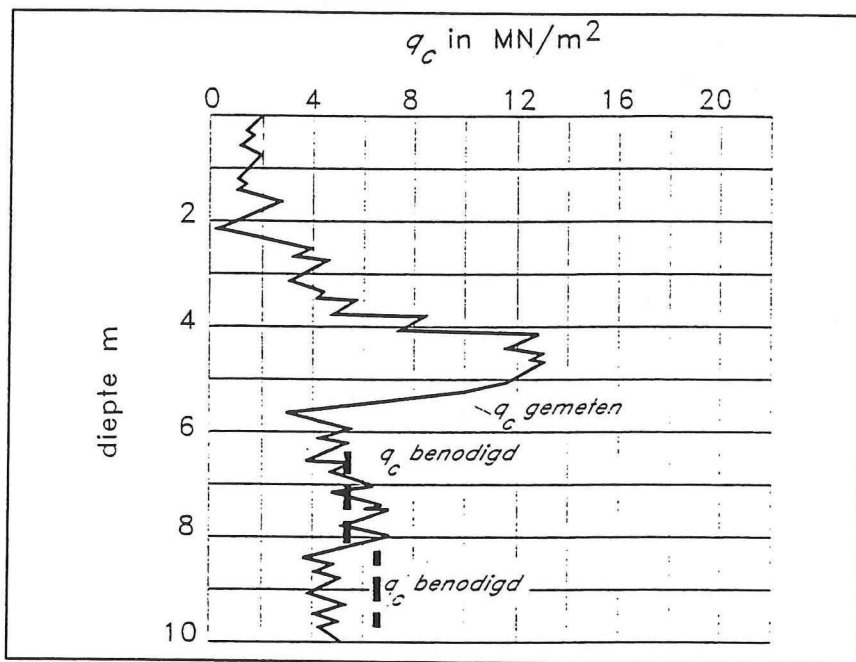
De verwekingsgevoeligheid van een bodem is te beoordelen aan de hand van de conusweerstand registratie. Dit is mogelijk vanwege de relatie tussen de relative dichtheid en de conusweerstand. Wanneer de kritieke dichtheid van een bodemformatie bepaald is kan over de verticale effectieve korrelspanning een grens aangegeven worden middels de geldende relatie tussen

conusweerstand, effectieve korrelspanning en relatieve dichtheid. Wanneer de conusweerstand bij een bepaalde effectieve verticale korrelspanning boven de grens ligt is de pakking dichter dan de kritieke dichtheid. De grens conusweerstand bij een bepaalde diepte is te vinden door de effectieve korrelspanning op deze diepte te bepalen, en aan de hand van de lijn die geldt bij de kritieke dichtheid is de minimale conusweerstand af te lezen.



figuur (17) Relatie tussen de verticale effectieve korrelspanning en de conusweerstand voor de kritieke relatieve dichtheid

In onderstaande figuur wordt een voorbeeld gegeven hoe in een sondering de minimaal benodigde conusweerstand te vergelijken is met de gemeten conusweerstand.



figuur (18) Bepaling verwekingsgevoeligheid middels conusweerstand

De methode is om verschillende redenen beperkt nauwkeurig en daardoor alleen indicatief toe te passen.

De relatie tussen de conusweerstand en de verticale effectieve korrelspanning wordt grof aangegeven voor de verschillende relatieve dichtheiden.

Bij de bepaling van de kritieke dichtheid heeft een afwijking van één tot enkele procenten grote invloed op de grensconusweerstand.

De analyse wordt uitsluitend gebaseerd op de registratie van de conusweerstand.

De methode is gebaseerd op de relatieve dichtheid. Deze factor is van grote invloed op het verwekingsrisico, maar is niet de enige factor.

3.4.2 De mantelwrijving

De mantelwrijvingregistratie geeft gecombineerd met de conusweerstand een beeld van de grondsoort. De mantelwrijving kan dienen om verschillende bodemlagen te herkennen. De mantelwrijving wordt sterk beïnvloed door de cohesie van de bodem waardoor de sonde passeert. Ook de pakking van het zand in een zandlaag heeft effect op de geregistreerde mantelwrijving. De basis van deze methode is dan ook de beïnvloeding van de conusweerstand en de mantelwrijving door de dichtheid van de granulaire bodem. Middels de gecombineerde registratie is een uitspraak over het verwekingsrisico middels de eerder toegelichte stress ratio mogelijk. De methode om de registratie te vertalen naar de stress ratio [Olsen, 1988] is gebaseerd op empirische relaties. In de volgende tekst wordt de methode toegelicht.

De aanpak is als volgt:

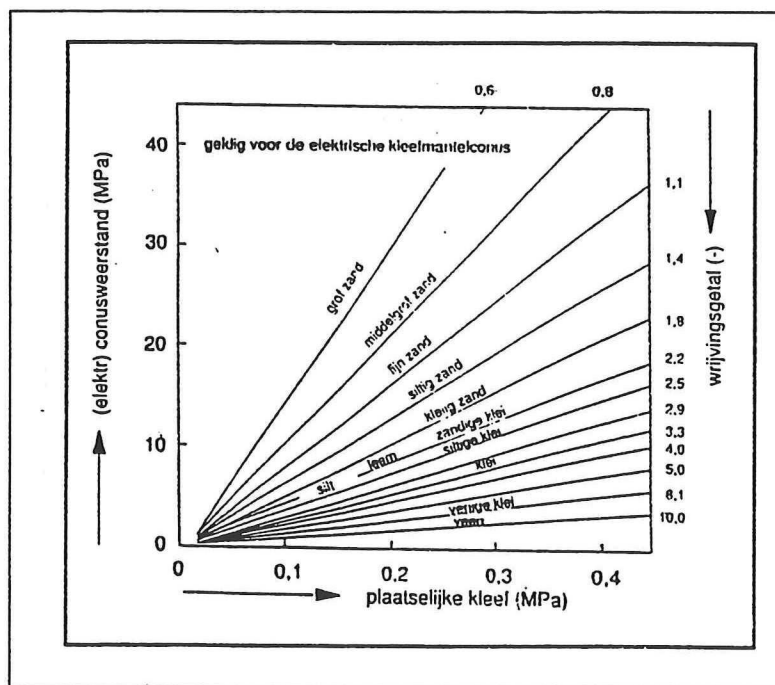
- 1) bepaling van het wrijvingsgetal aan de hand van de conus en kleefmeting
- 2) bepaling van de grondsoort aan de hand van het wrijvingsgetal (Begemann)
- 3) bepaling van de n-waarde aan de hand van de grondsoort (Olsen)
- 4) bepaling van de FR1 en qc1 aan de hand van de n-waarde (Olsen)
- 5) bepaling van de stress ratio aan de hand van FR1 en qc1 (Olsen)

Het wrijvingsgetal volgt uit

$$\text{wrijvingsgetal} = \frac{f_s}{q_c} \quad [11]$$

| | | |
|-------|----------------|-------|
| | wrijvingsgetal | (%) |
| f_s | mantelwrijving | (MPa) |
| q_c | conusweerstand | (MPa) |

Om de n-waarde te bepalen is een iteratie proces vereist. Om een eerste afschatting te bespoedigen wordt een indicatie van de n-waarde voor de verschillende grondsoorten gegeven. Voor normale geconsolideerde condities varieert de n-waarde van 0.56 voor grof zand tot net onder 1 voor klei. Voor mengvormen van grond geldt een waarde van 0.75 tot 0.9 voor silt. De iteratie kan worden vermeden door uit andere relaties (Begemann) de grondsoort te bepalen.



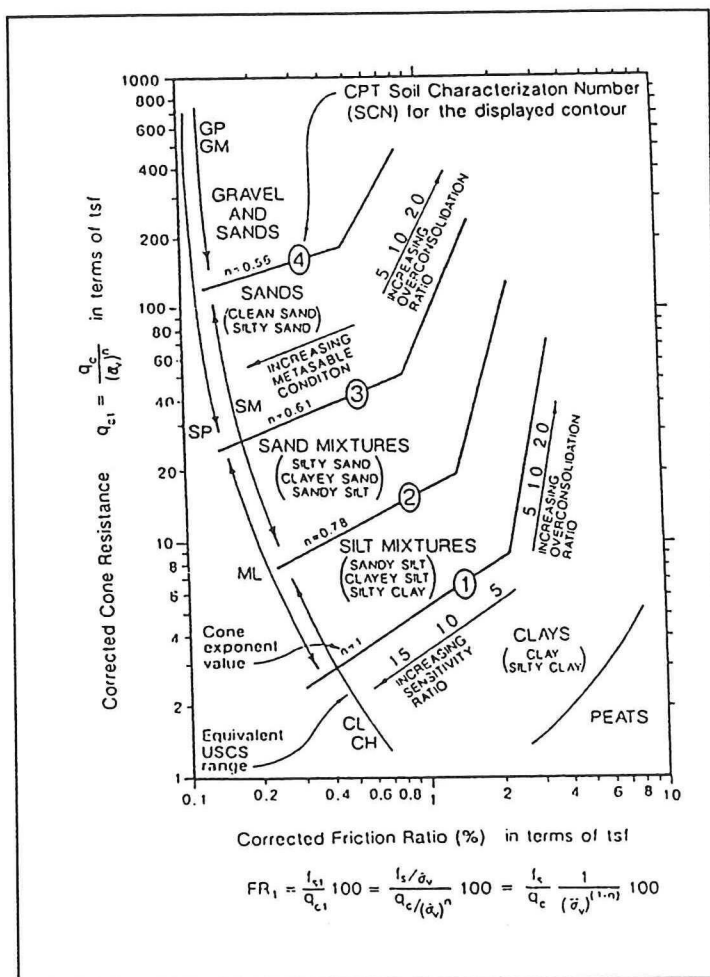
figuur (19) Bodem karakterisatie middels CPT met kleef registratie volgens Begemann

De n-waarde bepaling aan de hand van de grondsoort is gebaseerd op de volgende tabel.

| Kleefgetal | Grondsoort (Begemann) | n-waarde (Olsen) |
|------------|-----------------------|------------------|
| <0,6 | grof zand | 0,55 |
| 0,6<%<0,8 | middelgrof zand | 0,58 |
| 0,8<%<1,1 | fijn zand | 0,61 |
| 1,1<%<1,4 | siltig zand | 0,78 |
| 1,4<% | kleilig zand | 1 |

figuur (20) Bodem karakterisatie middels CPT met kleef registratie volgens Begemann

De n-waarde middels de iteratie volgt uit de volgende relatie:



figuur (21) bepaling n-waarde aan de hand van de grondsoort (Olsen, 1988)

Aan de hand van de metingen in situ en de n-waarde worden de omgerekende waarden bepaald. Dit om de conusweerstandmeting toe te kunnen passen in eerder gevonden

relaties welke gebaseerd zijn op SPT-blowcount metingen. De relaties zijn beschreven in de volgende tekst.

$$q_{c1} = q_c * C_p = q_c * \frac{1}{(\bar{\sigma}_v)^n} \quad [12]$$

| | | |
|------------------|--|-------|
| q_{c1} | genormaliseerde conusweerstand | (tsf) |
| q_c | conusweerstand | (tsf) |
| C_p | correctie factor conusweerstand | |
| $\bar{\sigma}_v$ | verticale effectieve spanning in tsf (1tsf = 0.977 kg/cm ² ≈ 95.843 kN/m ²) | |
| n | grondsoortafhankelijke waarde ter bepaling correctie factor conusweerstand | |

De mantelwrijving, f_s , moet omgevormd worden naar een genormaliseerde waarde. Dit volgens de relatie:

$$f_{s1} = \frac{f_s}{\bar{\sigma}_v} \quad [13]$$

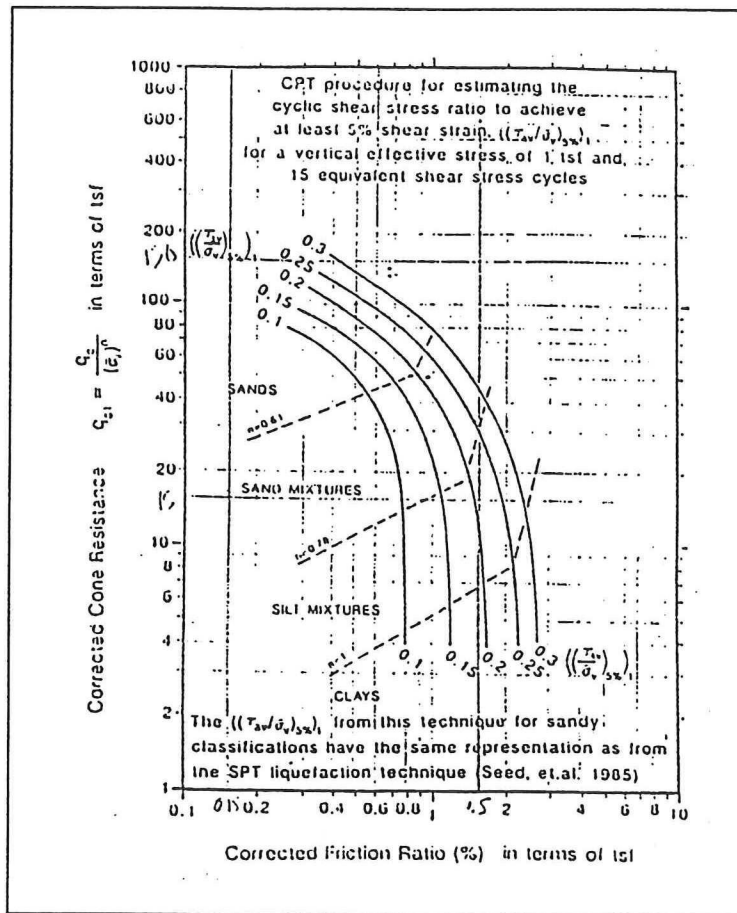
| | | |
|------------------|--|-------|
| f_{s1} | genormaliseerde mantelwrijving | (tsf) |
| f_s | mantelwrijving | (tsf) |
| $\bar{\sigma}_v$ | verticale effectieve spanning in tsf (1tsf = 0.977 kg/cm ² ≈ 95.843 kN/m ²) | |

De genormaliseerde CPT frictie ratio, FR_1 , kan bepaald worden volgens:

$$FR_1 = \frac{f_{s1}}{q_{c1}} * 100 = \frac{f_s}{q_c} * \frac{1}{(\bar{\sigma}_v)^{(1-n)}} * 100 \quad [14]$$

| | | |
|------------------|--|--|
| FR_1 | genormaliseerde CPT frictie ratio | |
| f_{s1} | genormaliseerde mantelwrijving | |
| q_{c1} | genormaliseerde conusweerstand | |
| $\bar{\sigma}_v$ | verticale effectieve spanning in tsf (1tsf = 0.977 kg/cm ² ≈ 95.843 kN/m ²) | |
| n | grondsoortafhankelijke waarde ter bepaling correctie factor conusweerstand | |

Voor de uiteindelijke bepaling van de cyclische stress ratio zijn in de volgende figuur de grenzen aangegeven voor de verschillende ratio's.



figuur (22) Bepaling stress ratio 5% schuifrek middels CPT met kleef registratie

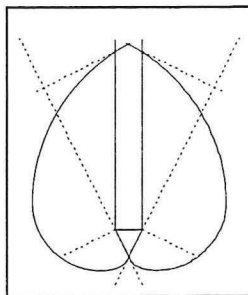
Deze methode is toegepast voor een sondering genomen te IJmuiden [Mos Grondmechanica]. Bij de aanleg van een sluiscomplex op de betreffende lokatie werd gevreesd voor verweking.

De sondering met conusweerstand en kleef registratie is weergegeven in bijlage VII. Ook de genormaliseerde waarden voor de conusweerstand en het kleefgetal zijn weergegeven. De bepaling van de stress ratio is voor een geselecteerd gedeelte uitgevoerd. Uit de methode blijkt dat de stress ratio in situ waarden beneden de 0,3 aan kan nemen, wat geldt als risicovolle waarde. Waarden welke buiten het definitie gebied zoals deze is opgesteld door Olsen vallen, zijn weergegeven met een stress ratio waarde van 0,5.

3.4.3 De waterspanning

De waterspanning wordt geregistreerd middels een sonde uitgerust met een waterspanningsmeter, een zogenaamde piëzo-cone. Met dit systeem is een overgang van watervoerende naar ondoorlatende lagen te herkennen. In een nieuwe toepassing van dit systeem wordt getracht op basis van de waterspanningsmeting een verwekingsgevoelige laag te herkennen [Robertson & Campanella, 1983]. De verwekingsrisicofactoren doorlatendheid en dichtheid spelen namelijk een grote rol bij de opwekking van een wateronder- of overspanning en de absolute grootte ervan

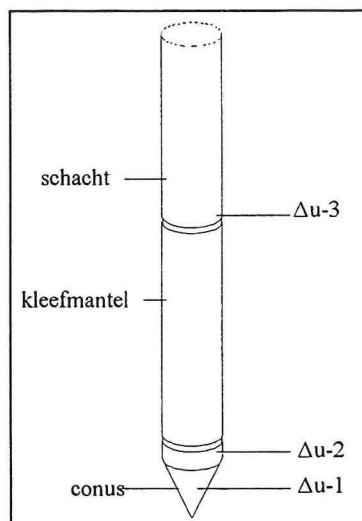
tijdens het vervormen van de bodem. Bij het indringen van de sonde ontstaan schuifvlakken zoals weergegeven in onderstaande figuur.



figuur (23) schuifvlakverloop rond een sondeerconus

Tijdens het passeren van een zandlaag met een pakking beneden de kritieke dichtheid zal de wateroverspanning binnen het vervormde gebied rond de conus oplopen. Wanneer een zandlaag een pakking boven de kritieke dichtheid heeft zal de wateroverspanning negatief zijn. Door een waterspanningsmeting buiten het vervormde gebied te vergelijken met een meting binnen het vervormde gebied wordt getracht een uitspraak te doen over de dichtheid en de doorlatendheid van het gepasseerde granulaire bodemmateriaal.

De volgende beschrijving behandelt een proef [Luger, 1988] waarin gebruik is gemaakt van een sonde met drie waterspanningsmeters.



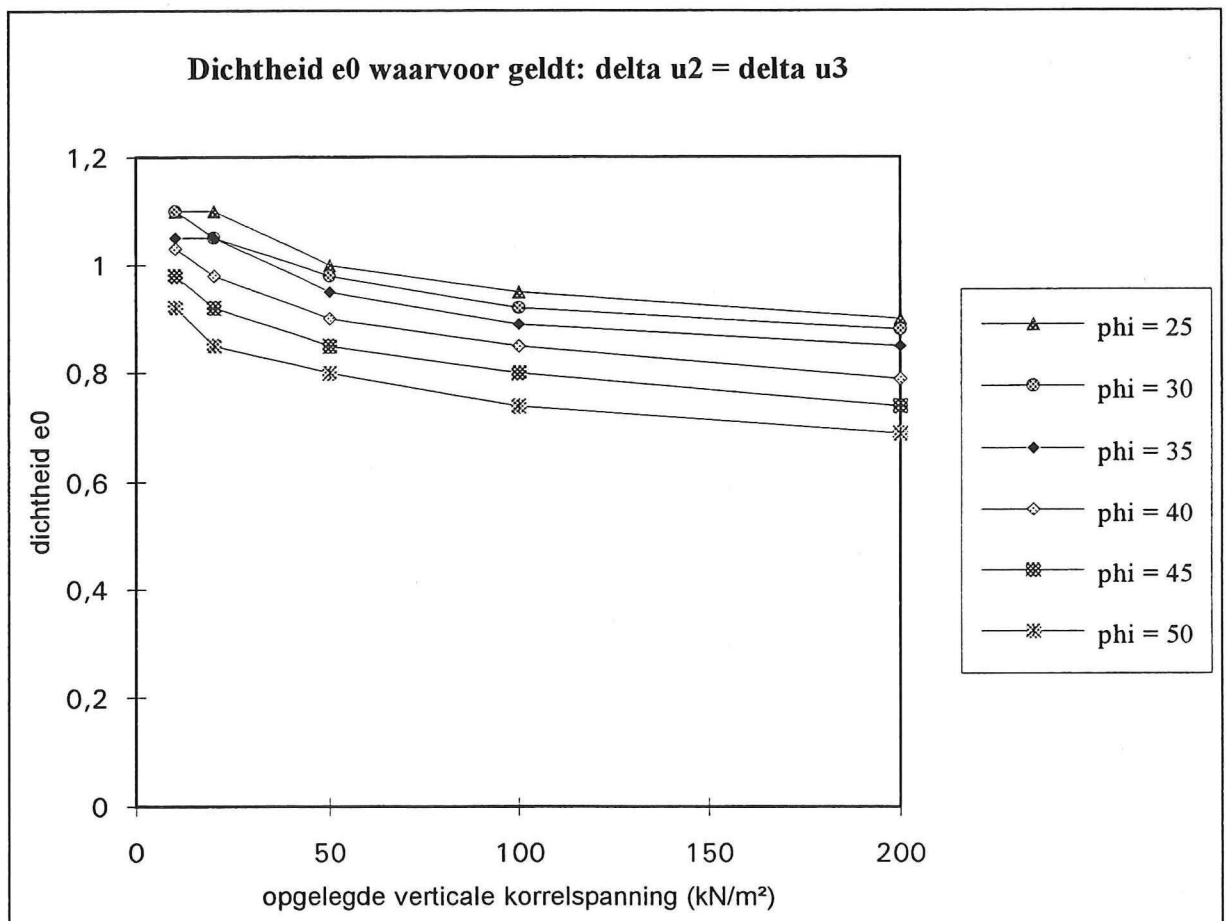
figuur (24) positie waterspanningsmeters op sonde

Het doel van de proef was de doorlatendheid en de dichtheid te bepalen aan de hand van het verschil tussen de waterspanningen op de verschillende meetpunten op de sonde. De auteur gebruikt deze metingen om aan de hand van dit verschil de kritieke dichtheid te bepalen. De auteur neemt aan dat de kritieke dichtheid is bereikt wanneer de waterspanningsgeneratie neutraal is in zowel de vervormde als in de onvervormde zone rond de conus. Dit betekent een snijpunt in de grafieken van de wateroverspanningsmeting net achter de overgang conus-schacht ($\Delta u-2$) en de meting

op de schacht van de sonde, na de kleefmantel ($\Delta u-3$). De posities van de waterspanningsmeters zijn aangegeven in de bovenstaande figuur. De absolute waarden van de snijpunten van beide wateroverspanningsregistraties lagen dicht tegen de nulspanning, zij het wel dat in alle gevallen een lichte wateronderspanning werd gemeten.

De waterspanningsveranderingen rond de conus zijn gemeten tijdens sonderingen in zand met per proef een variatie in de hoek van inwendige wrijving en variatie in de verticale effectieve korrelspanning. In bijlage VI is een voorbeeld opgenomen van de registratie door de drie waterspanningsmeters in zand met een bepaalde ϕ en σ_v' waarbij de pakking van het zand gevarieerd wordt.

In de onderstaande figuur zijn de waarden van e_0 waarvoor geldt $(\Delta u-2)=(\Delta u-3)$ uitgezet voor de verschillende hoeken van inwendige wrijving tegen de verschillende heersende korrelspanningen.



figuur (25) verloop dichtheid e_0 waarvoor geldt $(\Delta u-2)=(\Delta u-3)$

Uit de grafiek blijken twee tendensen. De dichtheid e_0 waarvoor geldt $(\Delta u-2)=(\Delta u-3)$ neemt af bij een toenemende hoek van inwendige wrijving. De tweede tendens is de afname van de e_0 bij een hogere effectieve korrelspanning.

De auteur heeft geen verklaring gevonden voor de eerste tendens. De tweede tendens is echter wel te verklaren. Het resultaat is in overeenstemming met de conclusie van

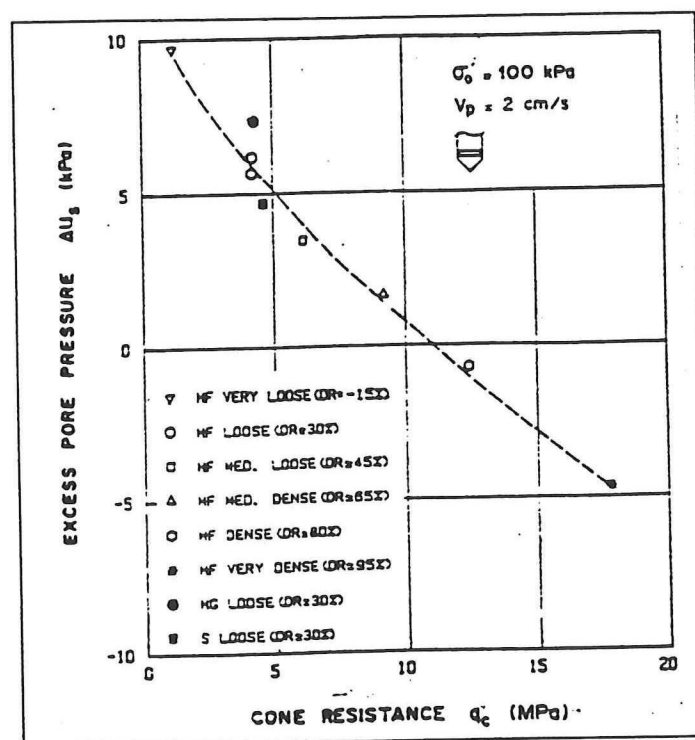
Casagrande in 1938 [Lindenberg, 1978]. Casagrande concludeerde dat bij hoger spanningsniveau het kritieke poriëngelalte lager wordt.

Het verslag geeft geen indicatie van de sondeersnelheid. Daar echter het doel een dichtheidsbepaling van zand is middels een normale sondering is, wordt aangenomen dat de snelheid 2 cm/sec. was.

Aangenomen wordt dat een grotere sondeersnelheid een versterking van deze tendens tot gevolg zal hebben.

Wanneer deze sondering met hoge snelheid (circa 20 cm per seconde) een dergelijke zandlaag passeert zal door de snellere vervorming en volume indringing een hogere wateroverspanning geregistreerd worden. Een tweede beperking van de proefbeschrijving is de relatieve dichtheid die onbekend is.

Wellicht is het ook mogelijk om aan de hand van slechts één waterspanningsmeter in de vervormde zone verweking te herkennen. Middels de waterspanningsregistratie is te bepalen of de pakking een wateroverspanning tot gevolg heeft tijdens vervormen. Of er daadwerkelijk gevaar voor verweking bestaat kan worden achterhaald door de grootte van de wateroverspanning en de snelheid waarmee deze afgebouwd wordt als de sonde stationair blijft. De invloed van de waterspanningsopbouw tijdens de sondering met een vastgestelde snelheid is aangegeven in de onderstaande figuur.



figuur (26) Relatie relatieve dichtheid en waterspanningsopbouw

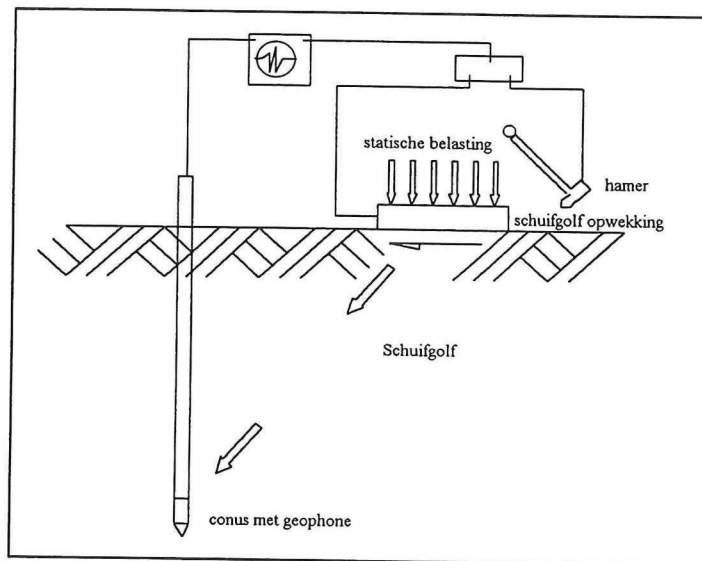
De proef [Canou, 1988] is uitgevoerd in een triaxiaal cel. In de cel is een verzadigd zandmonster geplaatst met een hoogte van 400 mm en een diameter van 180 mm. De toegepaste conus heeft een oppervlak van 1 vierkante centimeter.

3.4.4 De dichtheidsmeting

De dichtheidsmeting kan, indien de maximale en minimale korrelspanning bekend zijn, de relatieve dichtheid over de diepte in kaart brengen. Een sonde uitgerust met een electro density probe (dichtheidsmeting op basis van elektrische geleiding grond) geeft een beeld van de pakking van een zandpakket. Aan de hand van de kritische dichtheid is over de meting aan te geven waar het verwekingsrisico aanwezig is. De dichtheidsmeting alleen geeft niet voldoende informatie om een uitspraak over het verwekingsrisico te kunnen doen.

3.3.5 De schuifgolfvoortplantingssnelheid

De schuifgolfvoortplantingssnelheid wordt geregistreerd middels een seismic cone. Er wordt gebruik gemaakt van een schuifgolfbron en een ontvanger. De afstand tussen de twee moet bekend zijn. De voortplanting in de bodem kan op een bepaalde diepte horizontaal gemeten worden (Crosshole). Ook is het mogelijk verticaal te meten met een golfvoortplantingsrichting vanaf maaiveld naar de diepte (Downhole) of vanaf een bepaalde diepte naar maaiveld (Uphole). In de volgende figuur wordt de werking van het systeem toegelicht.



figuur (27) Schematisatie Downhole Seismic Cone Penetration Test

De verwekingsgevoeligheidsanalyse middels de schuifgolfvoortplantingssnelheid is gebaseerd op de factor relatieve dichtheid. De voortplantingssnelheid wordt in sterke mate bepaald door deze factor. Des te dichter de pakking, des te hoger de snelheid.

Voor de voortplantingssnelheid van de schuifgolf geldt:

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{of} \quad C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad [15]$$

| | | |
|----------------|-----------------------------------|----------------------|
| G | glijmodulus | (N/m ²) |
| ρ | dichtheid materiaal | (kg/m ³) |
| ν | dwarscontractieconstante | (-) |
| E | elasticiteitsmodulus | (N/m ²) |
| C _s | voortplantingssnelheid schuifgolf | (m/s) |

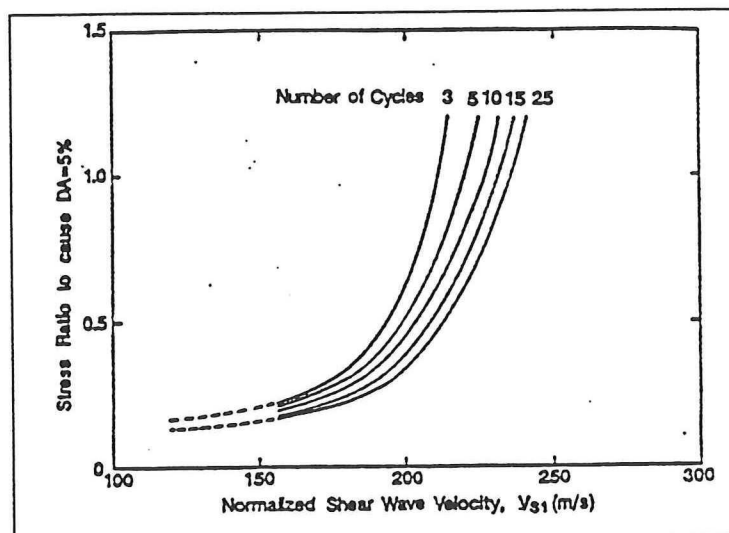
De glijmodulus wordt sterk beïnvloedt door de pakking van het skelet.

Op verschillende diepten moet de reistijd van de golven bepaald worden om later per niveau de schuifgolfvoortplantingssnelheid te kunnen bepalen. Het is immers heel goed mogelijk dat een schuifgolf gedurende de reis verschillende voortplantingssnelheden aanneemt. Nadat de metingen zijn verricht kunnen deze omgerekend worden naar een genormaliseerde schuifgolfsnelheid volgens:

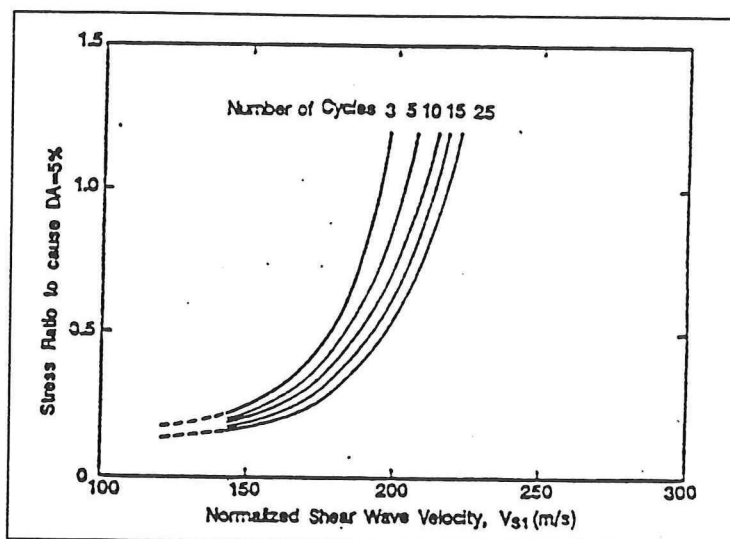
$$V_{s1} = \frac{V_s}{(\sigma'_m)^{\frac{1}{3}}} \quad [16]$$

| | |
|-----------------|--|
| V _{s1} | genormaliseerde schuifgolfvoortplantingssnelheid |
| V _s | schuifgolfvoortplantingssnelheid |
| σ' _m | korrelspanning op het meetpunt |

De orde 1/3 is empirisch bepaald. De genormaliseerde schuifgolfsnelheid en een gekozen aantal cycli tot verweking worden in een grafiek gebruikt om de stress ratio te bepalen. De grondsoort bepaalt welke grafiek gebruikt moet worden: die voor zuiver zand of die voor zand met een siltaandeel.



figuur (28) zand



figuur (29) siltig zand

Verloop van de stress ratio bij verschillende voortplantingssnelheden en aantal cycli tot verweking voor zuiver zand en siltig zand

De stress ratio is wederom gebaseerd op een grens schuifrek van 5% na het aantal te doorstane cycli.

Uit de grafieken blijkt dat voor de lage snelheden het verschil in ratio voor het verschillende aantal cycli tot verweking nagenoeg verdwenen is. Daar het grootste aantal cycli de laagste ratio oplevert en bij tunnelboringen een belasting van 20 cycli per seconde niet ongewoon is wordt de ondergrens voor de stress ratio aangehouden. Dit door het aantal te weerstane cycli op 25 te stellen.

Verder blijkt de weerstand tegen verweking boven een genormaliseerde schuifgolf voortplantingssnelheid van 200 m/s sterk toe te nemen. Zand met een genormaliseerde voortplantingssnelheid boven deze grens zal nagenoeg niet verweken. Dit is in overeenstemming met het verwekingsrisico bij een hoge dichtheid.

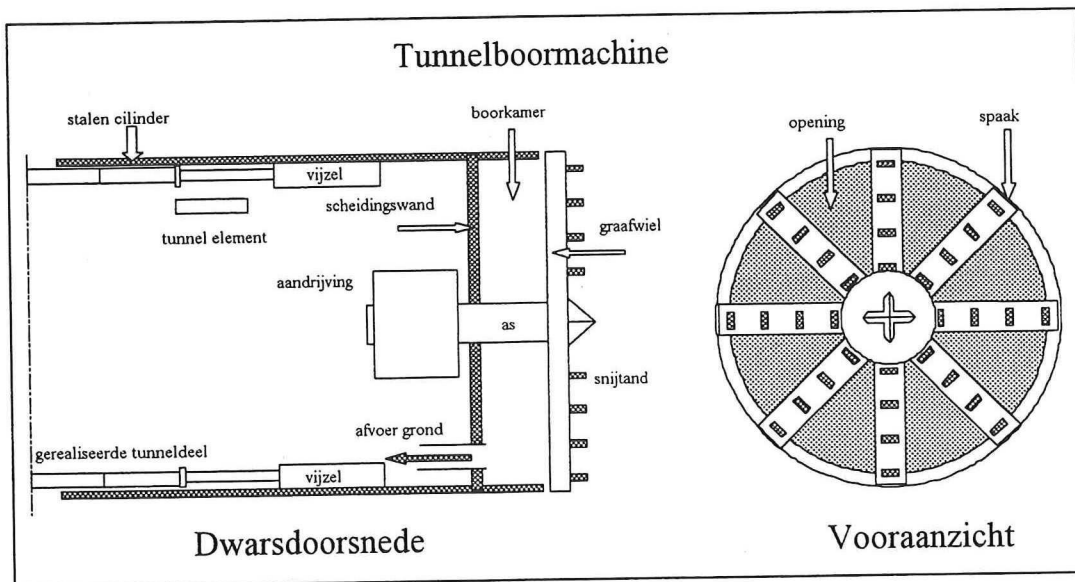
4 De tunnelboormachine

In dit hoofdstuk wordt de tunnelboormachine in het algemeen toegelicht. Na de algemene beschrijving worden de tunnelboormachinesystemen toegelicht welke toepasbaar zijn in losgepakt verzadigd zand [Becker]. De toelichting van de systemen [Maidl] moet een beeld geven van het tunnelboorproces. Dit beeld is vereist om in verder onderzoek de gevolgen van verweking en de beïnvloeding van het verwekingsrisico tijdens het boorproces te kunnen analyseren.

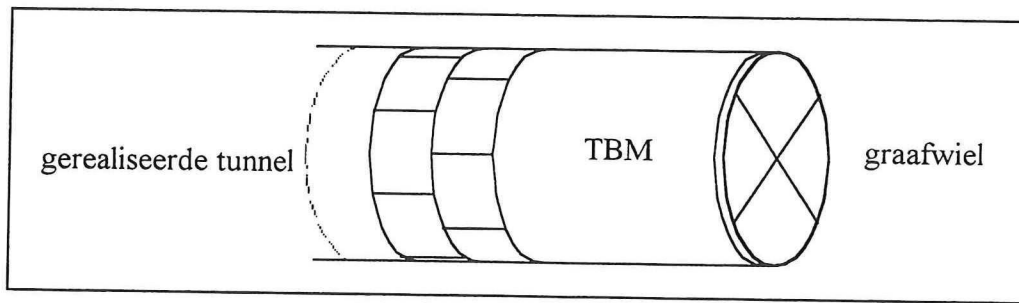
4.1 Algemene beschrijving tunnelboormachine

De tunnelboormachine is een stalen cilinder met aan de voorkant een roterend graafwiel dat via de as elektrisch of hydraulisch aangedreven wordt. De stalen cilinder wordt met vijzels naar voren gedrukt. De vijzels zetten af op de al gerealiseerde tunnel. Het graafwiel bestaat uit een aantal spaken met snijtanden. Dit graafwiel wordt door de druk van de vijzels tegen de te ontgraven grond gedrukt. De tanden maken de grond los waarna de grond via de openingen in het graafwiel in de boorkamer geperst wordt. Via een afvoer verlaat de grond de boorkamer en wordt het verder door de tunnel naar het maaiveld getransporteerd.

Na voldoende voortgang wordt het graafproces onderbroken. De vijzels worden beurtelings ingetrokken en een nieuwe ring van tunnel element wordt bevestigd aan het al gerealiseerde tunneldeel.



figuur (30) schematische weergave tunnelboormachine



figuur (31) schematische weergave voortgang tunnelboormachine

In de bovenstaande figuur is de gerealiseerde tunnelring aan de staart van de tunnelboormachine weergegeven. De ring is opgebouwd uit meerdere segmenten.

Er zijn twee systeemsoorten toepasbaar in verzadigde granulaire bodems. Het eerste systeemsoort, het vloeistofschild, maakt voor de ondersteuning van het boorfront gebruik van een vloeistofondersteuning. Het tweede systeemsoort, het gronddrukbalansschild, maakt gebruik van een ondersteuning door de afgegraven grond.

4.2 Vloeistofschild

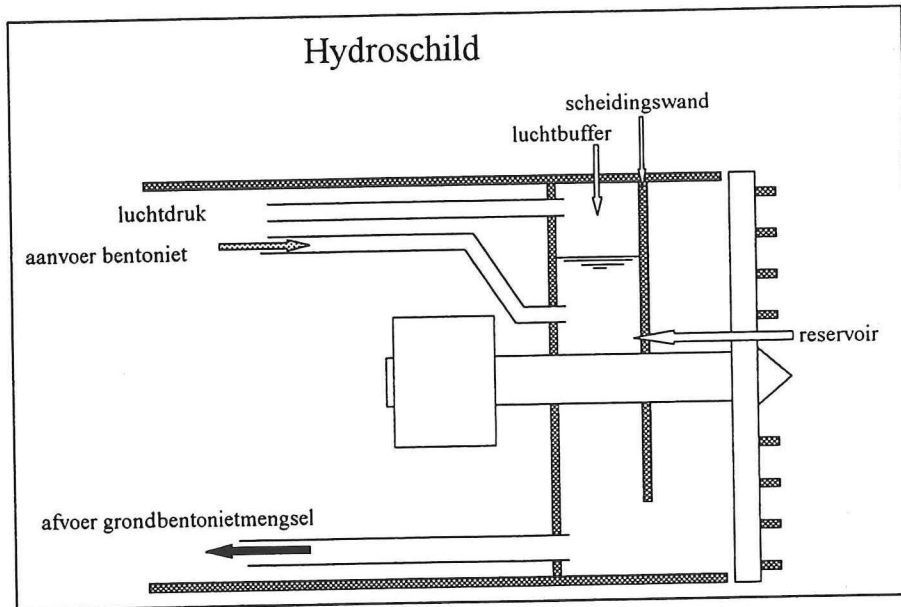
Het vloeistofschild is oorspronkelijk ontworpen voor het graven van tunnels in watervoerende, niet cohesieve grondlagen. Onder deze categorie grondlagen vallen zand- en grindlagen met een laag gehalte aan silt of klei.

De belangrijkste kenmerken van het systeem zijn ten eerste dat de grond uit de boorkamer wordt weggepompt met de steunvloeistof als transportmedium. Ten tweede dat de vloeistof de waterafdichting verzorgt middels de steundruk. De steunvloeistof wordt door de ten opzichte van de waterdruk hogere druk aan het boorfront in de bodem voor het graafwiel geperst. Dit proces gaat door tot er een afpleistering en dus een waterdichte laag aan het graaffront optreedt.

De overdruk wordt in de tunnelboormachine geregeld. De wijze waarop deze druk geregeld wordt resulteert in twee subsystemen, te weten het hydroschild en het slurryschild.

4.2.1 Hydroschild

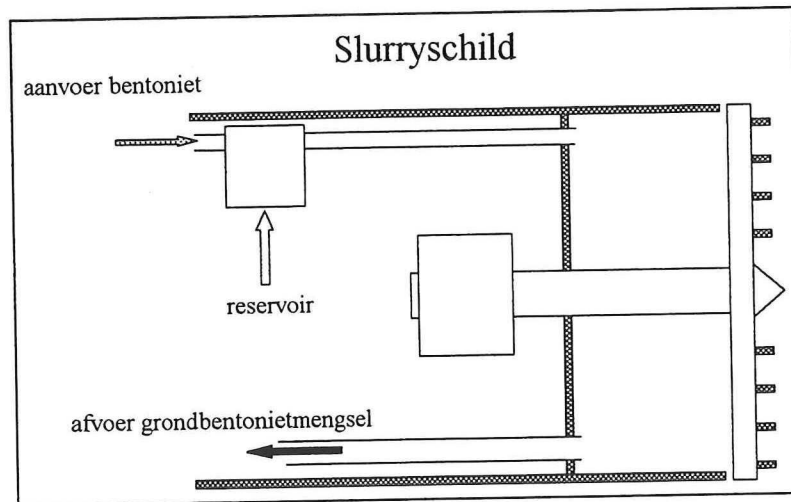
Bij het hydroschild wordt vloeistofdruk gecontroleerd door een steunvloeistofreservoir met daar boven een luchtbuffer. De steundruk is door deze lucht/bentoniet buffer goed te regelen, daar een volume verlies niet direct tot een sterke drukdaling aan het front. Het is vanwege de goede samendrukbaarheid van de lucht gemakkelijk een vastgestelde druk vast te houden.



figuur (32) schematische weergave dwarsdoorsnede hydroschild

4.2.2 Slurryschild

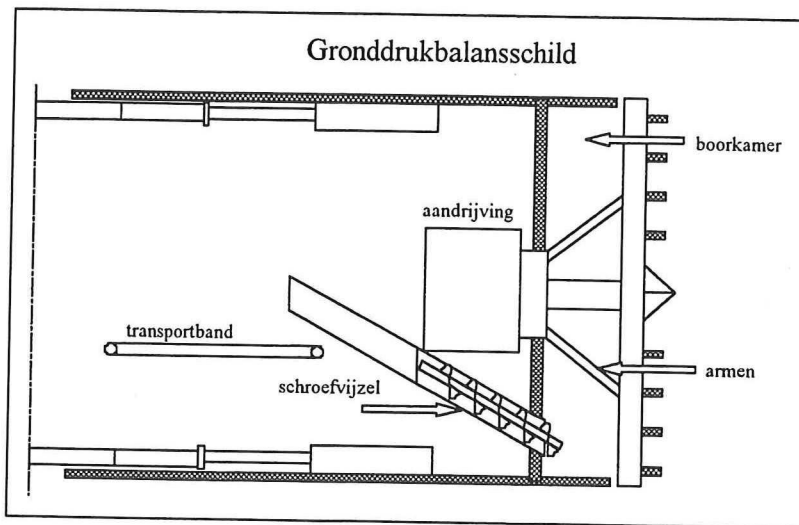
Bij het slurryschild systeem wordt de drukregeling van de steunvloeistof verzorgd door vloeistofpompen. Zelfs bij een gering vloeistofverlies treedt een sterke daling van de steundruk op. Het is moeilijk een onsamendrukbaar medium op een constante druk te houden.



figuur (33) schematische weergave dwarsdoorsnede slurryschild

4.3 Gronddrukbalansschild

Het gronddrukbalansschild is ontwikkeld voor zachte, cohesieve grondlagen. De belangrijkste twee kenmerken van het systeem zijn ten eerste dat de afgegraven grond vanuit boorkamer afgevoerd wordt met een vijzel en ten tweede dat de grond zelf als ondersteunings medium dienst doet. Dit is mogelijk daar de grond verkneed wordt in de boorkamer met armen die ronddraaien in de boorkamer. De grond waarin geboord wordt moet een hoge plasticiteit bezitten teneinde de vijzel af te sluiten voor de buitenwaterdruk. De vijzelgrootte bepaalt de maximale diameter van de te verwerken obstakels.



figuur (34) schematische weergave dwarsdoorsnede gronddrukbalansschild

5 Gevolgen verweking aan het boorfront

Het belangrijkste gevolg van verweking van grond aan het boorfront is het optreden van afschuiving. Wanneer een verweekte bodem een schuifkracht opgelegd wordt en een gelegenheid tot verplaatsen heeft, zal de bodem afschuiven. In het geval van verweking van grond aan het boorfront is er een schuifspanningsbelasting aanwezig. De gelegenheid tot verplaatsen ontstaat door de ontgraving of het bezwijken van het boorfront, afhankelijk van het machine type. Dit leidt tot verplaatsing van grond aan het boorfront. Deze verplaatsing zal tot op het maaiveld effect hebben.

Om inzicht te verkrijgen in de gevolgen van verweking is gebruik gemaakt van een simulatie in het eindige elementen programma Plaxis. De volgende tekst behandelt het doel, de simulatiemethode en de resultaten ervan. De gevolgen per machinetype worden in de laatste paragraaf van dit hoofdstuk toegelicht.

5.1 Simulatie verweking aan het boorfront

Het doel van de simulatie van verweking van grond aan het boorfront is inzicht te krijgen in de verplaatsingen die optreden en de maaiveld zakkingen die hiervan het gevolg zijn. Ook wordt inzicht verkregen in de horizontale korrelspanning die optreedt tijdens verweking. Een verder punt van interesse was hoe de positie en de omvang van het verweekte gebied de verplaatsingen beïnvloeden. De resultaten dienen om een tendens in de verplaatsingen, spanningen en verwekingspositie te ontdekken.

De basis van de simulatie middels het eindige elementen programma Plaxis is het als verweekt definiëren van enkele bodemelementen in de omgeving van het boorfront. De uitgebreide toelichting is geplaatst in Bijlage I. Het als verweekt definiëren van een bodemelement wordt bereikt door de hoek van inwendige wrijving van het betreffende element te wijzigen en wel van 30 graden naar 1 graad. In de onderstaande tabel is de invoer van de bodemelementen weergegeven.

| | Bodem element initiëel | Bodem element verweekt |
|---------|------------------------|------------------------|
| ν | 0.33 | 0.33 |
| G | 5000 | 5000 |
| E | 1.33E+4 | 1.33E+4 |
| cohesie | 1 | 1 |
| ϕ | 30 | 1 |
| K_0 | 0.5 | 0.5 |

figuur (35) tabel invoer bodemeigenschappen

Hierdoor wordt K_0 volgens de rekenregel $K_0 = 1 - \sin\phi$ gelijk aan 1 tijdens de simulatie berekening. Het gevolg van $K_0 = 1$ is dat de drukverdeling hydrostatisch wordt in de berekening op die plekken waar verweking is aangenomen in het raster (mesh). Ook de

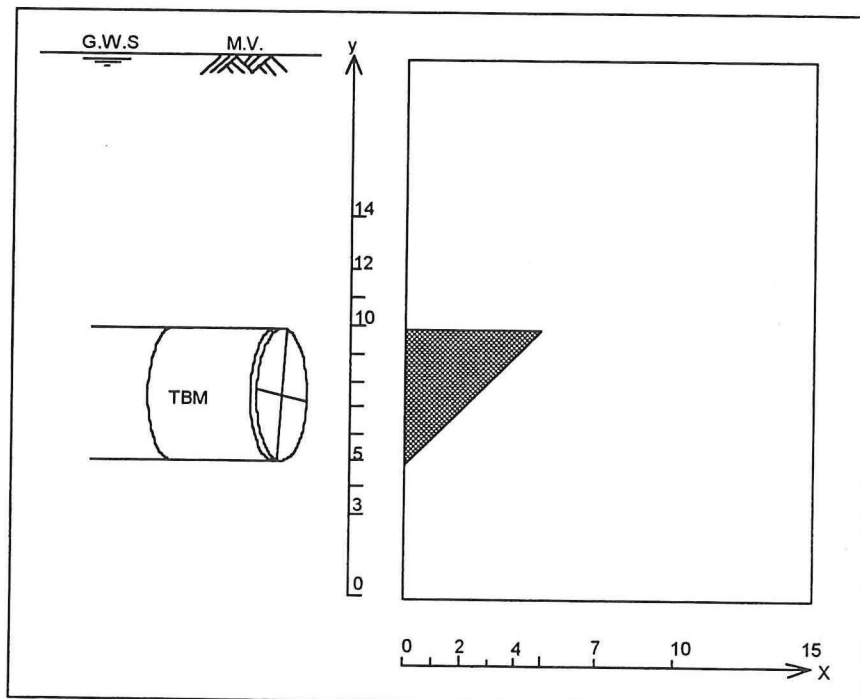
weerstand tegen afschuiven reduceert tot nagenoeg 0 in de berekening vanwege de relatie met ϕ volgens de rekenregel: $\tau = c + \sigma'_v \tan \phi$.

De aanpassing is fysisch niet geldig, daar de hoek van inwendige wrijving niet bepaald wordt door de korrel- of waterspanning. De auteur maakt toch gebruik van deze wijziging om het rekenproces te laten rekenen met spanningen die uit de wijziging volgen die fysisch wel geldig zijn. Het is echter beter datgene te wijzigen dat in de werkelijkheid ook wijzigt: de waterspanning. Daar de auteur ten tijde van de uitvoer van de simulatie geen inzicht had op de gevolgen van de invoer van een hoger freatisch vlak voor enkele elementen is deze simulatie wijze niet uitgevoerd.

De positie en de omvang van het aantal verweekt gedefiniëerde bodemelementen is als volgt gevarieerd:

- * Initiële situatie zonder verweking (berekening A)
- * Verweking twee meter hoog vanaf onderkant front (berekening A0)
- * Verweking over volledige front (berekening A1)
- * Verweking twee meter hoog vanaf bovenste meter front (berekening A2)
- * Verweking op enige afstand van front (berekening A3)

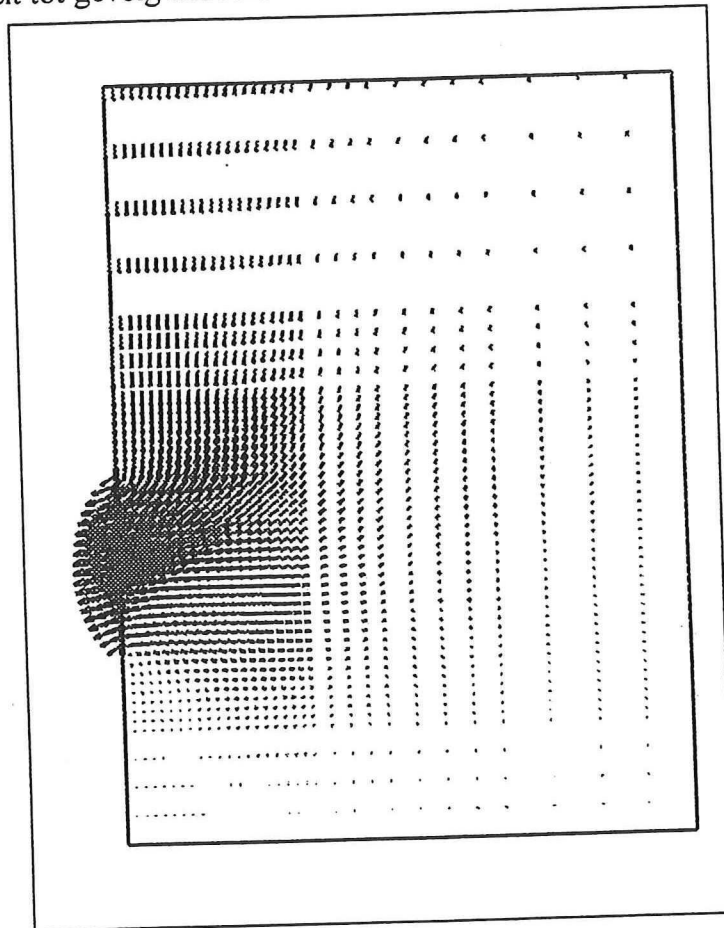
In bijlage I wordt dezelfde volgorde in de presentatie van de invoer en de resultaten van de berekeningen aangehouden. Een voorbeeld van de positie van de gewijzigde elementen is in onderstaande figuur weergegeven.



figuur (36) positie verweekte elementen berekening A1
verweking over volledige hoogte boorfront

5.1.1 Verplaatsingen

Aan de hand van de verplaatsingen die in de verschillende simulaties optraden is de volgende conclusie te trekken. Wanneer verweking opgelegd wordt op geringe afstand van het front (minder dan 7 meter) zal de grond vanuit dit verweekte gebied toestromen naar het boorfront. Dit is te wijten aan de schuifspanning en de grondontspanning die er in dit gebied opgelegd worden aan de bodem. Buiten dit gebied, dat verder in de tekst het verstoorte gebied genoemd wordt, zal verweking geen instabiliteit tot gevolg hebben.



figuur (37) verplaatsing bodemmateriaal berekening A1

5.1.2 Horizontale korrelspanning

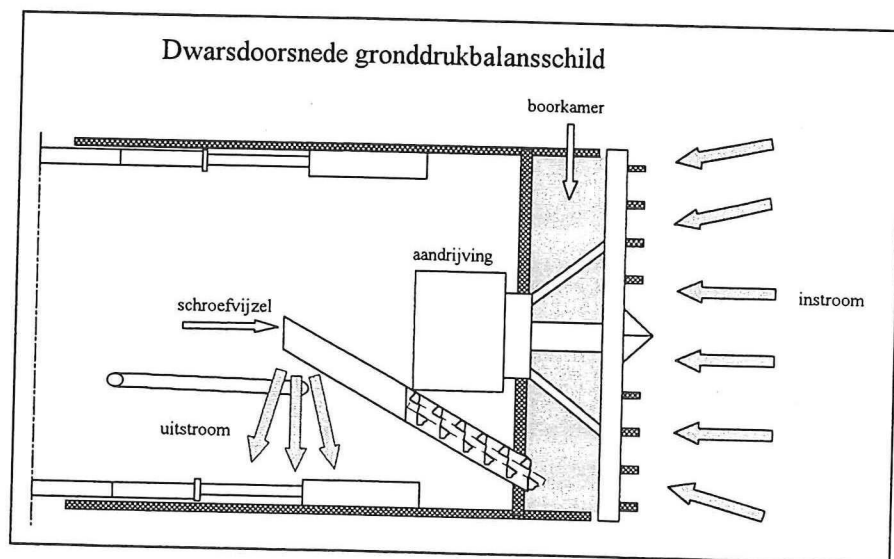
De horizontale korrelspanningen aan het boorfront lopen in voorgenoemde simulaties sterk op. Het front zal een grotere ondersteuning moeten leveren om stabiliteit van de bodem te garanderen. In de simulatie is een geotextiel met een steundruk ingevoerd ter simulatie van het boorfront. Wanneer in de simulatie hoge korrelspanningen optreden, zal het geotextiel echter verplaatsen en daarmee de spanning doen afnemen. De bepaling van de horizontale korrelspanning tijdens verweking middels deze simulatie is niet geldig. Het bezwijken van het front volgt echter wel uit de optredende verplaatsingen, welke sterker optreden op de verweekte posities.

5.1.3 Verwekingspositie en omvang

De positie en de omvang van het als verweekt gedefiniëerde bodemmateriaal zijn gevarieerd om inzicht te krijgen in de risicoposities. In de simulatie is voorbijgegaan aan het gegeven of verweking zich daadwerkelijk in de gegeven situatie kan voordoen op de als verweekt gedefiniëerde lokaties. In de simulatie ontstaan ongeacht de omvang van het verweekte gebied aan het front grote verplaatsingen. Het boorfront zal bezwijken wanneer de steundruk wordt overschreden, ongeacht de grootte van het oppervlak waarover verweking optreedt. In de simulatie is de hoogte gevarieerd tussen de twee en vijf meter. Een verwekingsgevoelige laag van twee meter dikte zal, in het geval van volledige verweking, in staat zijn de nadelige gevolgen te veroorzaken. De verwekingsgevoelige laag hoeft niet in zijn geheel aan het boorfront te liggen.

5.2 Gevolgen verplaatsingen per machine type

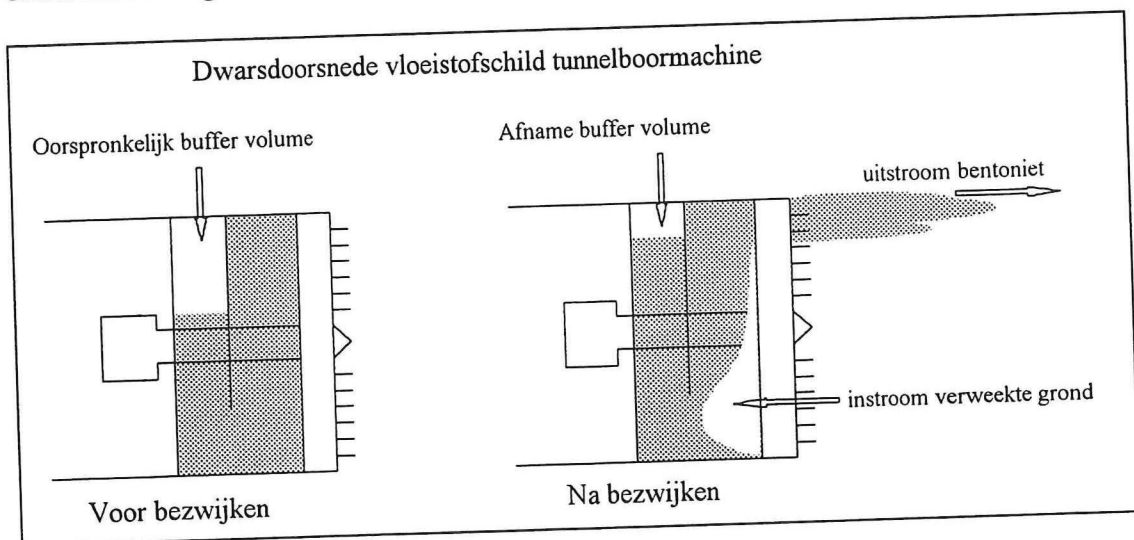
Een **gronddrukbalansschild** heeft tijdens het boorproces de boorkamer gevuld met een mengsel van grond en water. Het volumiek gewicht van het materiaal in de boorkamer en het in situ verweekte bodemmateriaal komen overeen waardoor er geen uitwisseling zal plaatsvinden. De ruimte die vrijkomt in de boorkamer door het wegvijzelen van grond uit de boorkamer zal echter direct vervangen worden door het verweekte bodemmateriaal. Het bodemmateriaal stroomt toe terwijl de machine geen voortgang maakt. In een extreem geval kan het vloeibare gedrag van de grond tot gevolg hebben dat het door de hoge druk door de schroefvijzel uitstroomt in de tunnel. Het gevolg van de toestroming van grond is dat het volume dat ingenomen wordt door de uiteindelijke tunnel en weggegraven moet worden, wordt overtroffen door het weggegraven volume, ook wel aangeduid met de engelse term volume loss. De auteur hanteert verder de term volume verlies. Het volume verlies zal bodemverplaatsingen tot gevolg hebben, waardoor ook het maaiveld een zetting ondervindt.



figuur (38) gevolgen van verweking bij een toepassing van een gronddrukbalansschild

Bij de toepassing van een **vloeistofschild** wordt in een stabiele situatie een filterkoek opgebouwd. Dit is mogelijk doordat de steunvloeistof door de gehanteerde overdruk ten opzichte van de poriënwaterdruk de grond ingeperst wordt voor het boorfront uit. In de situatie waarin verweking aan het front optreedt is de steundruk ontoereikend om de verhoogde poriënwaterdruk te overtreffen. De opbouw van de filterkoek is niet gegarandeerd in deze toestand.

Daarnaast wordt de horizontale korrelspanning tijdens verweking aanzienlijk groter. De druk op het buffervolume is niet in staat een dergelijke overdruk te weerstaan. Het boorfront zal door de twee effecten bezwijken. Na bezwijken zal het buffervolume ten gevolge van de druk toename afnemen en zal een uitwisseling van bentoniet met een grond-watmengsel plaatsvinden in de boorkamer. Dit ten gevolge van het dichtheidsverschil tussen bentoniet (circa 12 kN/m^3) en het grond-watmengsel (circa 20 kN/m^3). De uitgestroomde bentoniet zal in de bodem wegvloeien. In de onderstaande figuur is het bezwijken van het vloeistofschild weergegeven.



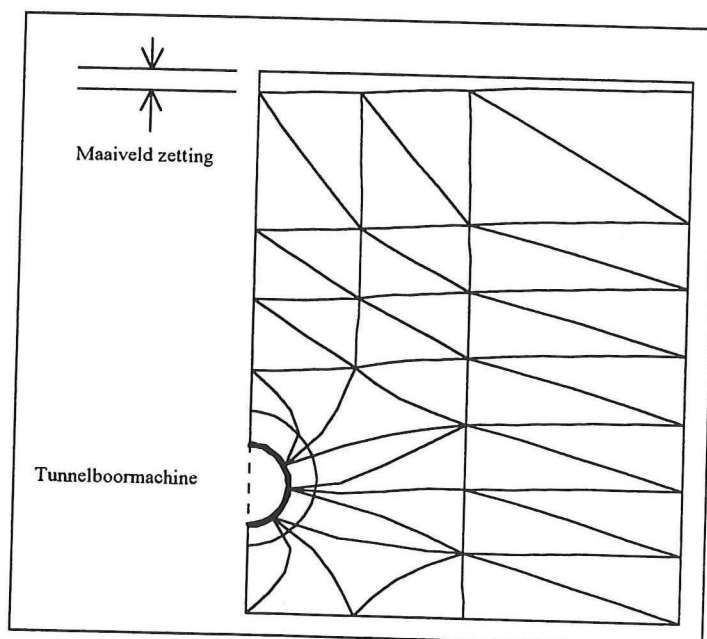
figuur (39) bezwijken vloeistofschild

Het bezwijken van het vloeistofschild heeft drie gevolgen. Ten eerste treedt ten gevolge van de uitstroom een bentonietverlies op. Ten tweede resulteren de afname van het buffervolume en de volume uitwisseling in een volume verlies aan het front. Dit heeft zettingen op het maaiveld tot gevolg. Ten derde zal het graafproces een aanzienlijke vertraging ondervinden daar het graven pas weer hervat kan worden als de boorkamer weer gevuld is met bentoniet en de filterkoek weer is opgebouwd. Het herstel van het boorfront vraagt om maatregelen, mogelijk vanaf maaiveld. Te denken valt aan het slaan van damwanden, grouten of bevroren van de bodem.

5.3 Simulatie maaiveldzakking

Om inzicht te krijgen in de orde van grootte van de maaiveldzakking ten gevolge van het volume verlies is gebruik gemaakt van een contractie simulatie in het eindige elementen programma Plaxis. Het programma is echter 2-dimensionaal. Dit is ondervangen door het volume verlies per strekkende meter te beschouwen.

Een normaal verlopend boorproces heeft een volume verlies in de orde van 2% van het tunnel- volume. In de contractie berekening is een schilddiameter ingevoerd van 5 meter en een contractie van 2%. Een maaiveldzakking treedt op in de orde van een tot enkele centimeters. Uitgaande van een tunnelboormachine met een schilddiameter van 5 m en daarmee een oppervlak hebbende van $19,6 \text{ m}^2$ zou deze berekening een grondvolume verlies van $0,4 \text{ m}^3$ per strekkende meter tunnel simuleren.



figuur (40) gevolgen van grondtoestroming op maaiveld zetting

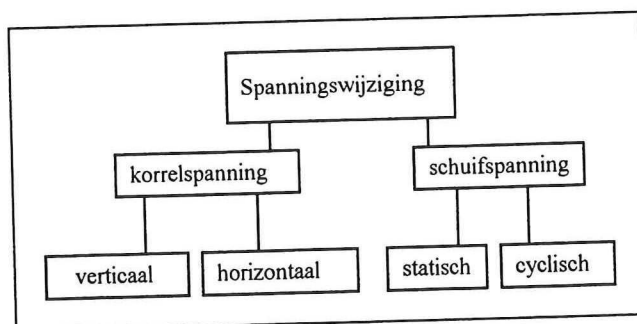
In de bovenstaande figuur is het vooraanzicht van de tunnelboormachine weergegeven en de maaiveldzakking. Dit op basis van de berekening B. Een grote weergave van de figuur is te vinden in bijlage I, berekening B. De grondverplaatsing is geschaald weergegeven en mag om deze reden niet uit de figuur afgelezen worden.

In het geval van verweking met bezwijking van het vloeistofschild tot gevolg, de situatie met het grootste volume verlies, treedt maximaal een volume verlies op gelijk aan het boorkamer volume. Bij een lengte van de boorkamer van 0.5 m en een schilddiameter van 5 meter heeft deze een volume van 9.8 m^3 . Een grond/bentoniet uitwisseling zal een volume verplaatsing teweeg brengen in de orde van enkele m^3 . Gebaseerd op de voorgaande berekening en de vergelijking van het volume verlies is te concluderen dat de maaiveldzakking in de orde van enkele decimeters zal liggen. Er is bij een dergelijke zakking sprake van een calamiteit.

6 Verwekingsrisicofactoren tunnelboorproces

Om een uitspraak te kunnen doen over het verwekingsrisico dient eerst een onderscheid te worden gemaakt naar de risicofactoren die beïnvloed worden door het tunnelboorproces. Daar de bodemeigenschappen voor het boorfront uit tijdens het boorproces niet beïnvloed worden, zijn de risicofactoren welke gebaseerd zijn op bodemeigenschappen niet meegenomen in de verdere analyse.

De twee risicofactoren die zeer sterk beïnvloed worden tijdens het boorproces zijn de korrelspanning en de schuifspanning in de bodem. Het gebied waarbinnen deze spanningswijziging optreedt wordt door aangeduid als het verstoorde gebied. De schuifspanning in het verstoorte gebied heeft zowel een statische als een cyclische component. In het onderstaande schema is aangegeven om welke spanningen het handelt.



figuur (41) schema spanningswijziging tijdens boorproces

In de volgende alinea's worden de initiële spanningen in de bodem en de wijziging van elk afzonderlijk naar grootte en plaats behandeld. De verticale en horizontale korrelspanning zullen als eerste behandeld worden. Daarna komen de statische en cyclische schuifspanning aan de orde. Om de invloed van de wijziging te kunnen beoordelen wordt ook per spanningsvorm de initiële toestand beschouwd.

6.1 Korrelspanningwijziging

6.1.1 Verticale korrelspanning

Om de initiële verticale korrelspanning te kunnen bepalen dienen de totale verticale korrelspanning en de waterdruk bepaald te worden. Voor de totale verticale spanning geldt:

$$\sigma_v = p + \sigma_v' \quad [17]$$

| | |
|-------------|---------------------------|
| σ_v | totale verticale spanning |
| p | waterdruk |
| σ_v' | verticale korrelspanning |

Voor de waterdruk geldt:

$$p = \gamma_{\text{water}} * d \quad [18]$$

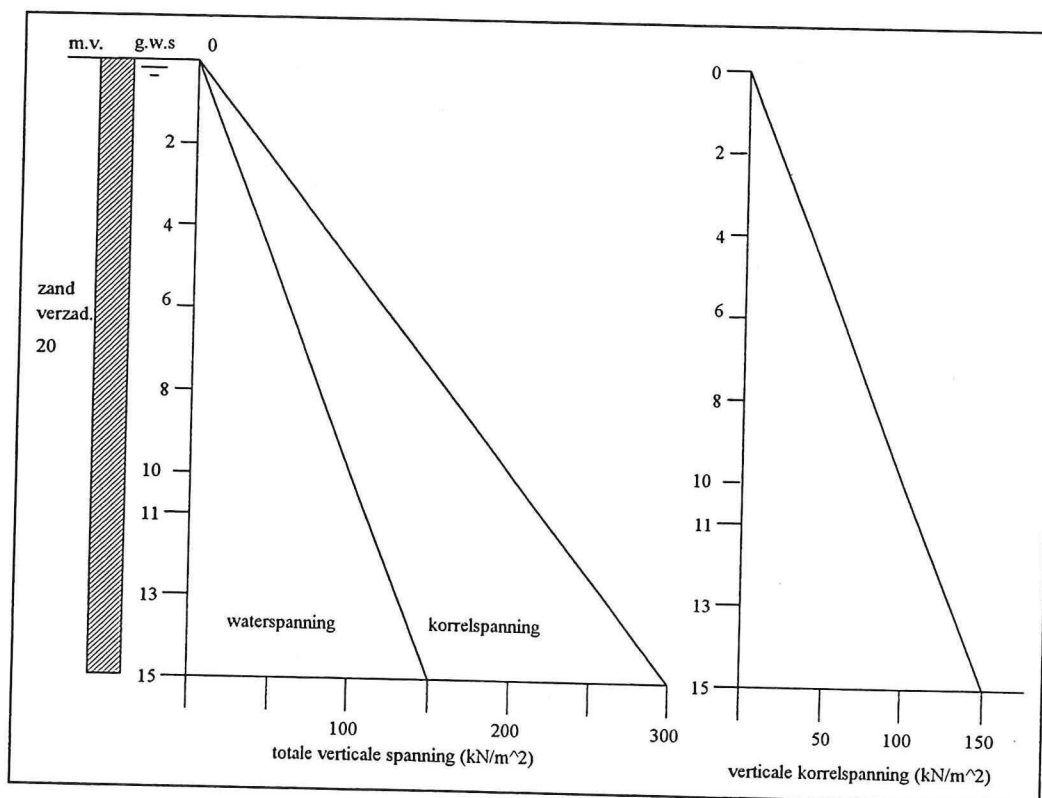
p waterdruk
 γ_{water} volumegewicht water
 d diepte t.o.v. grondwaterstand (g.w.s.)

De initiële verticale korrelspanning wordt bepaald volgens:

$$\sigma_v' = (\gamma_{\text{grond}} * h) - (\gamma_{\text{water}} * d) \quad [19]$$

σ_v' verticale korrelspanning
 γ_{grond} volumegewicht grond
 γ_{water} volumegewicht water
 h diepte t.o.v. maaiveld (m.v.)
 d diepte t.o.v. grondwaterstand (g.w.s.)

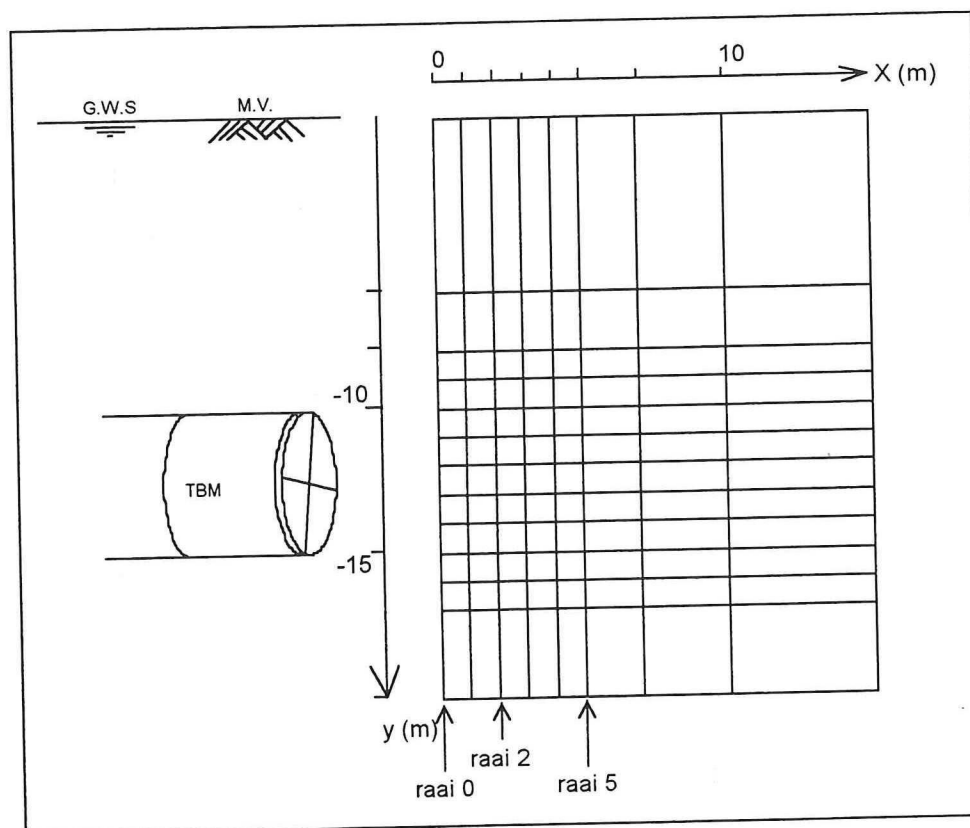
Voor een fictief bodemprofiel levert dit het volgende korrelspanningsverloop



figuur (42) verloop initiële verticale spanningen over de diepte

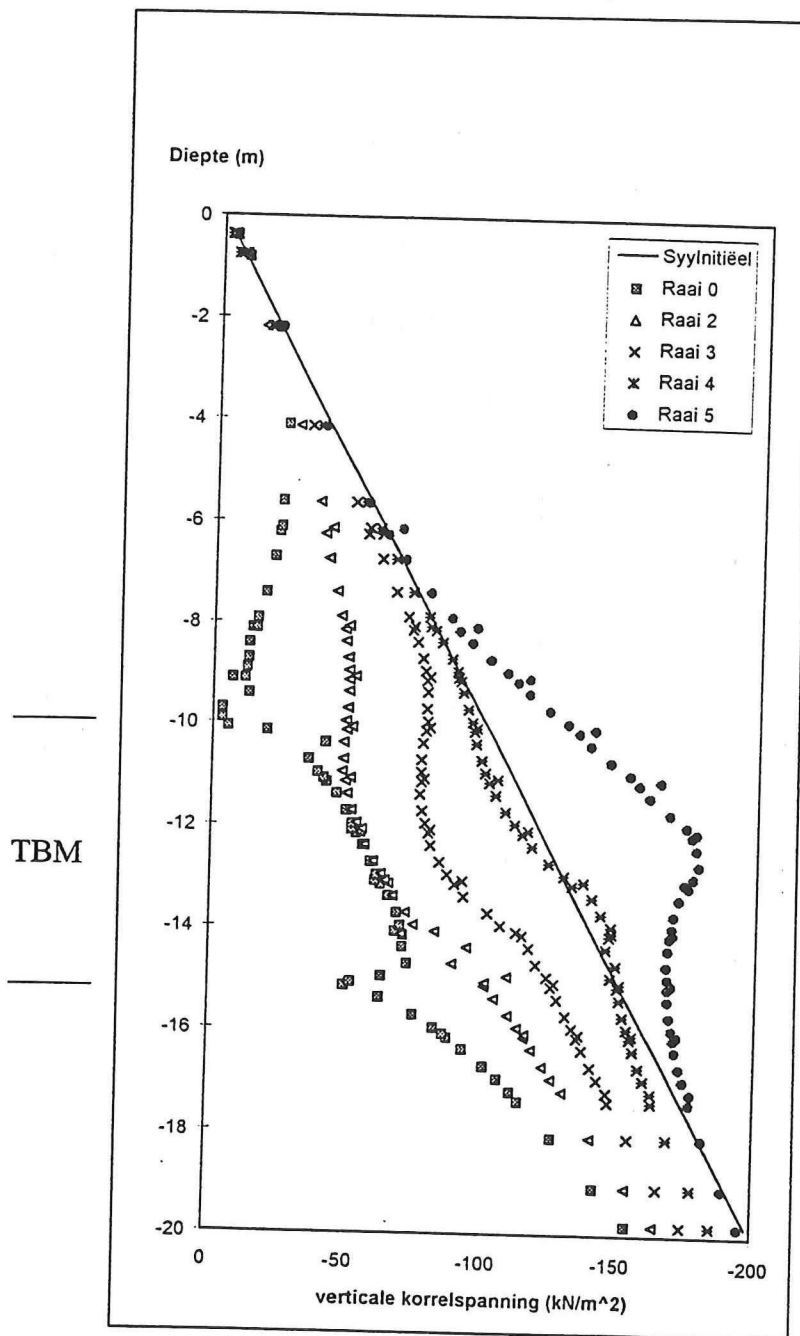
Om de wijziging van de verticale korrelspanning te bepalen tijdens het boorproces is een modellering met het eindige elementen programma Plaxis toegepast. Het verticale korrelspanningsverloop over de diepte en op verschillende afstanden tot het boorfront is bepaald. Voor de invoer van de modellering en grote weergave van de

spanningswijziging grafieken wordt verwezen naar bijlage II. In de volgende figuur is de invoer van het programma weergegeven.



figuur (43) schematische weergave invoer Plaxis

De resultaten van de simulatie aangaande de verticale korrelspanning zijn in de volgende figuur weergegeven. In de grafieken ligt het maaiveld op 0 meter diepte. Voor elke hele meter afstand tot het boorfront, de zogenaamde raaien, wordt het verloop over de diepte bepaald van de verticale- en horizontale korrelspanning en de schuifspanning. De eerste raai, raai 0 heeft nul meter afstand tot het front.



figuur (44) verloop over de diepte van verticale korrelspanningen na wijziging

De invloed van de tunnelboormachine op de verticale korrelspanningen is duidelijk aanwezig. Er is in de raaien 0 tot en met raai 3 een sterke reductie van de korrelspanning zichtbaar op de positie van de boormachine. In de afbeelding is dat op een diepte van -10 meter tot -15 meter. De korrelspanningstoename na raai 4 is te wijten aan de boogwerking die optreedt in de bodem. Deze boogwerking is gevisualiseerd in bijlage 1, korrelspanning berekening A. In deze berekening is alleen de ontgraving gesimuleerd.

6.1.2 Horizontale korrelspanning

De initiële horizontale korrelspanning wordt bepaald aan de hand van de verticale korrelspanning en de neutrale gronddrukcoëfficiënt. Voor de initiële horizontale korrelspanning geldt:

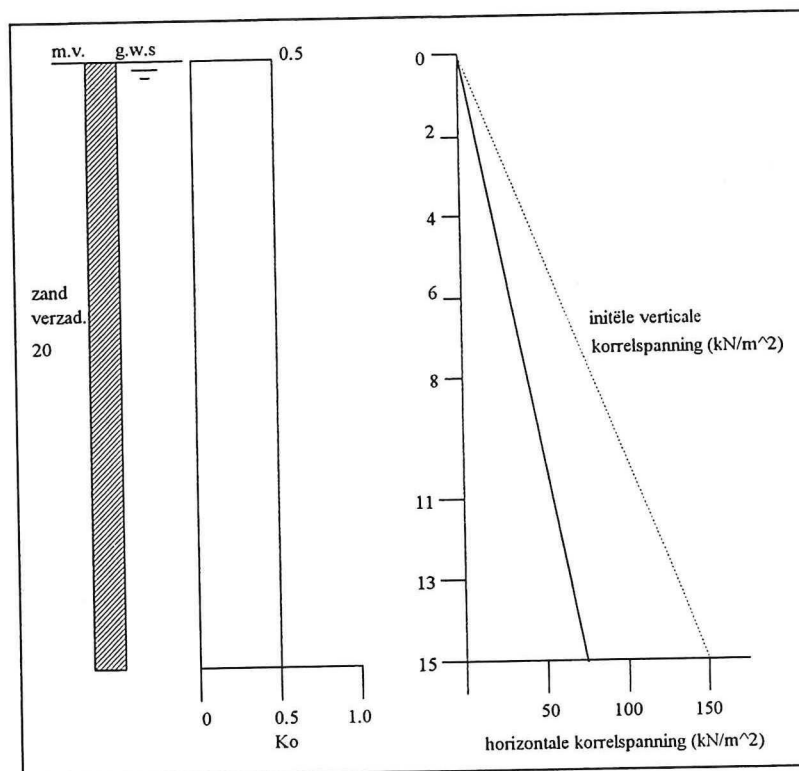
$$\sigma_h' = \sigma_v' * K_0 \quad [20]$$

σ_h' horizontale korrelspanning
 σ_v' verticale korrelspanning
 K_0 neutrale gronddruk coëfficiënt

De neutrale gronddruk coëfficiënt varieëert tussen de 0.5 en 1.0 volgens de relatie:

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad [21]$$

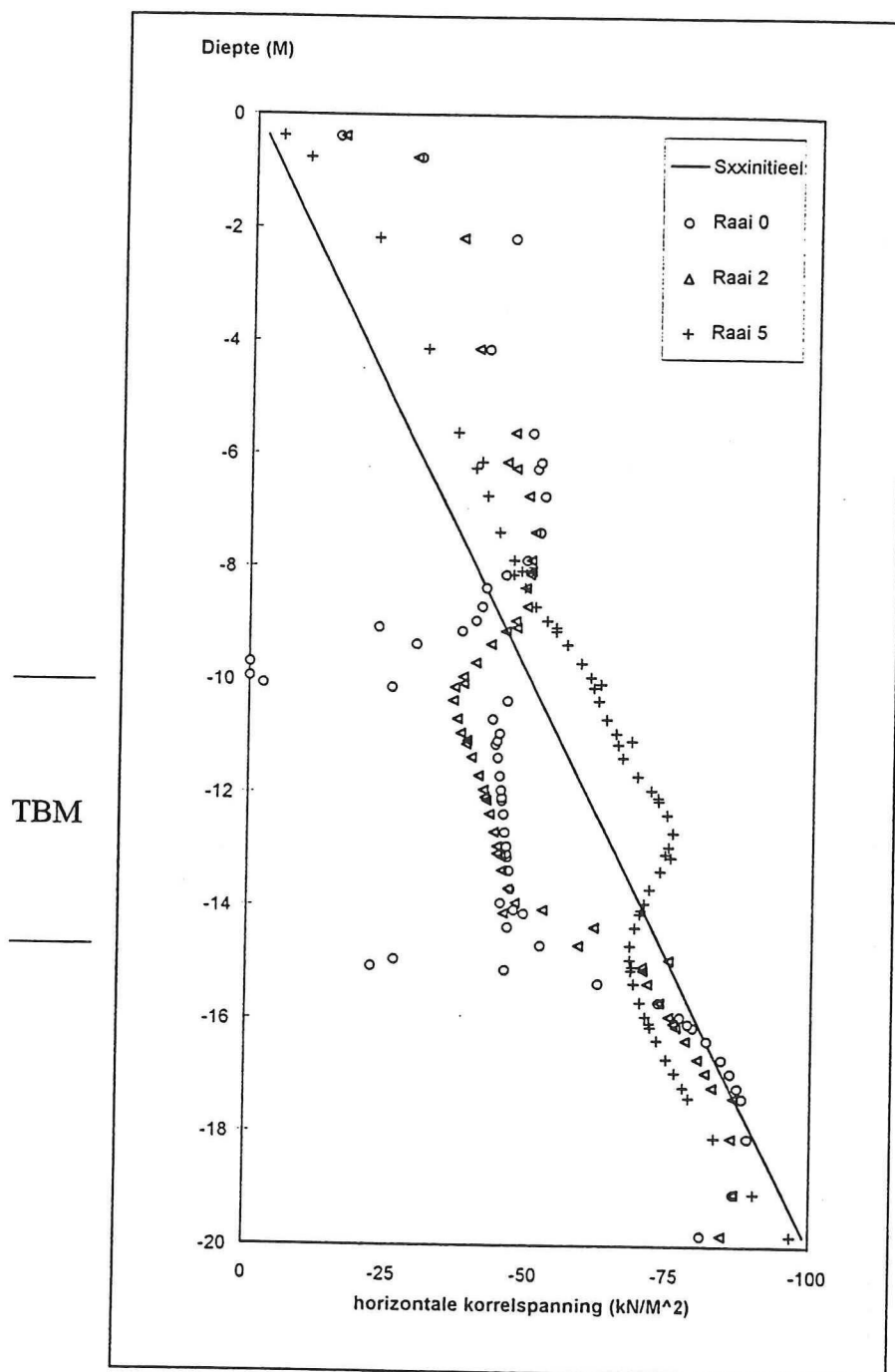
In de verdere berekeningen wordt de K_0 op 0.5 gesteld, wat voor losgepakt zand een reële waarde is. Het initiële korrelspanningsverloop wordt in de onderstaande figuur weergegeven.



figuur (45) verloop initiële horizontale korrelspanning over de diepte

De wijziging van de horizontale korrelspanningen in de gestoorde situatie is bepaald middels de eerder genoemde simulatie. Daar de horizontale korrelspanning afhankelijk is van de verticale korrelspanning zal ook in horizontale korrelspanning een sterke

reductie te verwachten zijn op de positie van de machine. De volgende grafiek geeft het verloop weer.



figuur (46) verloop horizontale korrelspanningen na versterking

Ook de horizontale korrelspanningsreductie zeer lokaal. De reductie reikt niet verder dan enkele meters. In bovenstaande grafiek is te zien dat ter plaatse van de tunnelboormachine enkele meters naar voren de spanning gereduceerd wordt.

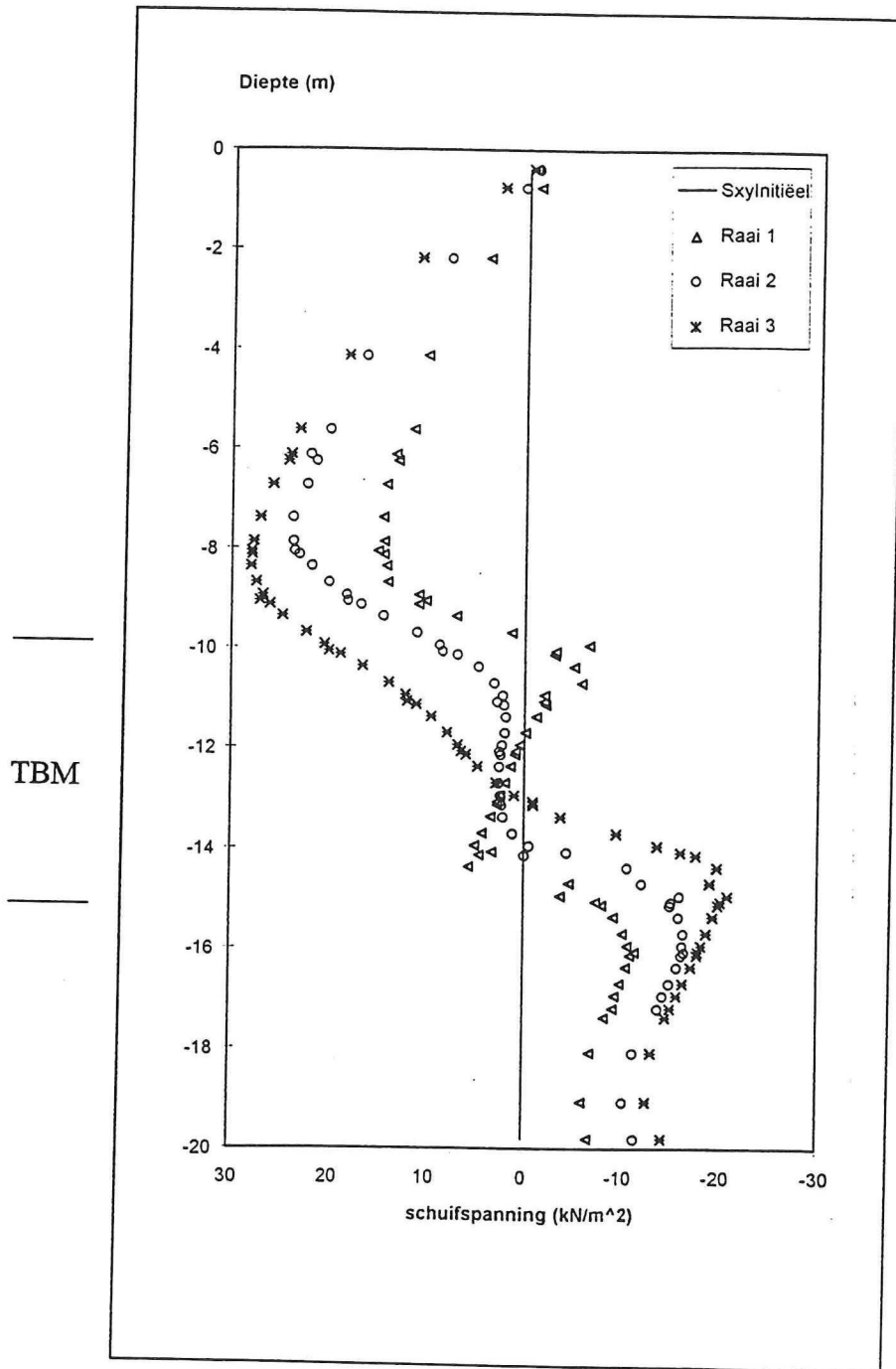
6.2 Schuifspanningswijziging

De schuifspanningen in de bodem zijn onder te verdelen in statische en cyclische schuifspanningen. De statische schuifspanningen ontstaan in de bodem door grondontspanning ten gevolge van de ontgraving. De wijze waarop de tunnelboormachine cyclische schuifspanning aan de bodem oplegt is geen punt van diepgaand onderzoek geweest. In de volgende alinea's zal het verloop van de beide schuifspanningsvormen over de afstand tot het boorfront en de diepte uitgewerkt worden.

6.2.1 Statische schuifspanning

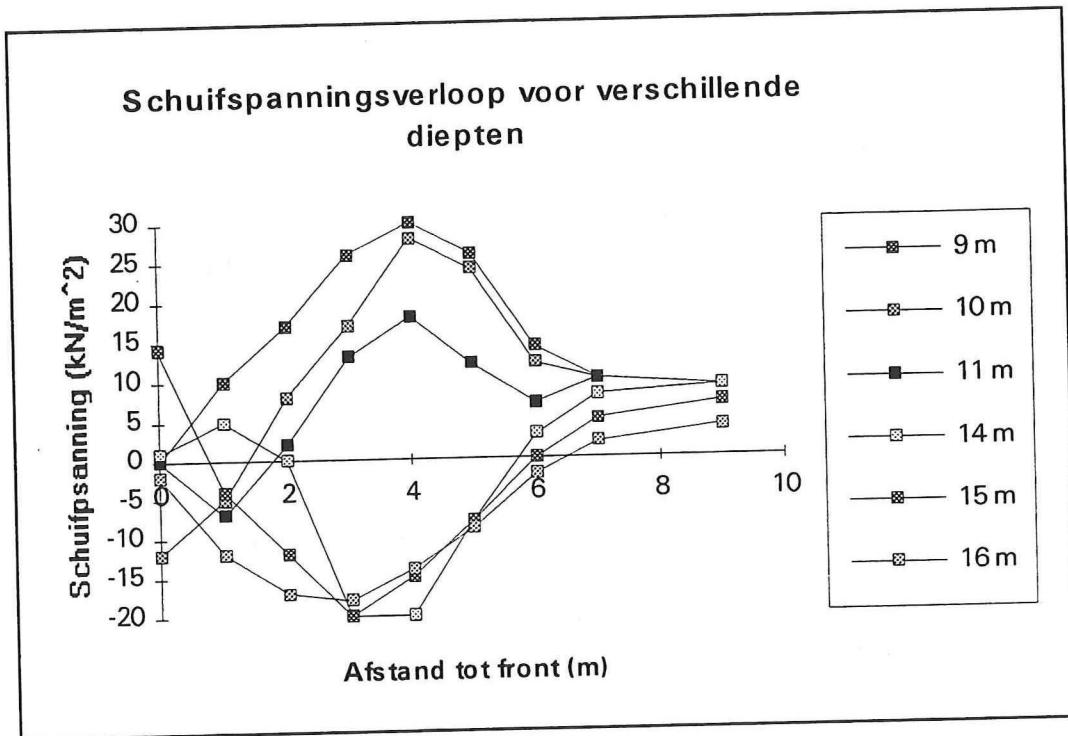
De initiële statische schuifspanning wordt in normaal geconsolideerde gronden niet noemenswaardig geacht in de grond voor het passeren van het graaffront. De bepaling van de initiële statische schuifspanning in de grond is om deze reden geen punt van onderzoek geweest. Een initiële statische schuifspanning is in de bodem aanwezig door een bovenbelasting in de vorm van grond of gebouwen. Een taludwerking brengt ook een schuifspanning in de bodem. Ook is het mogelijk dat zettingsverschillen tussen twee grondlagen statische schuifspanningen tot gevolg hebben op het grensvlak tussen twee de grondlagen. De initiële statische schuifspanning neemt toe met de diepte.

Ter bepaling van de wijziging van de statisch opgelegde schuifspanning is wederom gebruik gemaakt van de Plaxis simulatie (bijlage II berekening A). Het resultaat is weergegeven in de volgende grafiek. Het geeft het verloop van de wijziging van de statische schuifspanning over de diepte aan voor de verschillende afstanden tot het boorfront.



figuur (47) verloop schuifspanningen in fictief bodemprofiel na verstoring

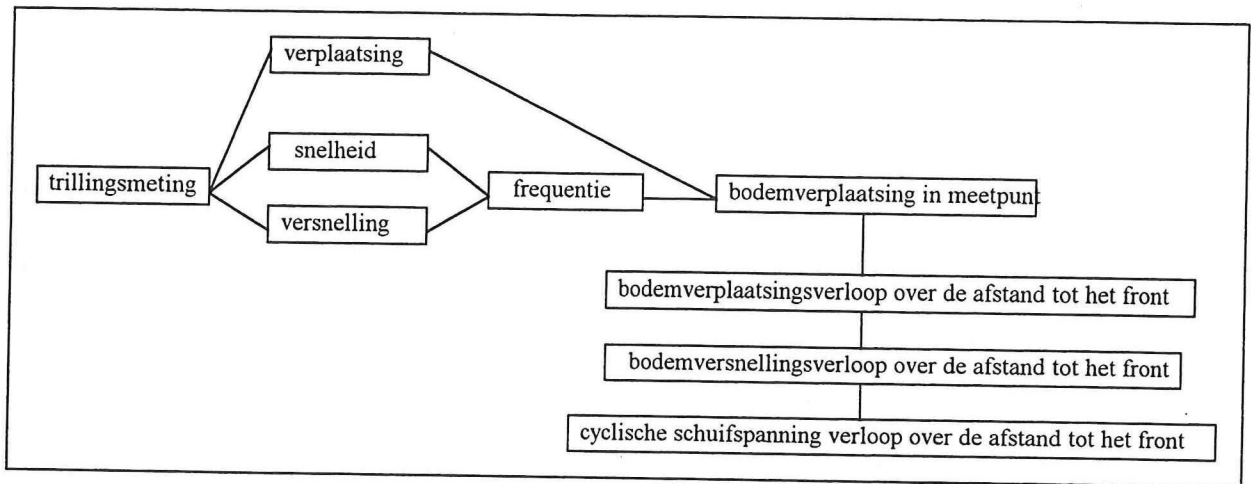
In de volgende grafiek is het schuifspanningsverloop voor de verschillende niveau's als functie van de afstand tot het boorfront weergegeven.



figuur (48) verloop schuifspanningen in fictief bodemprofiel na verstoring als functie van de afstand tot het front

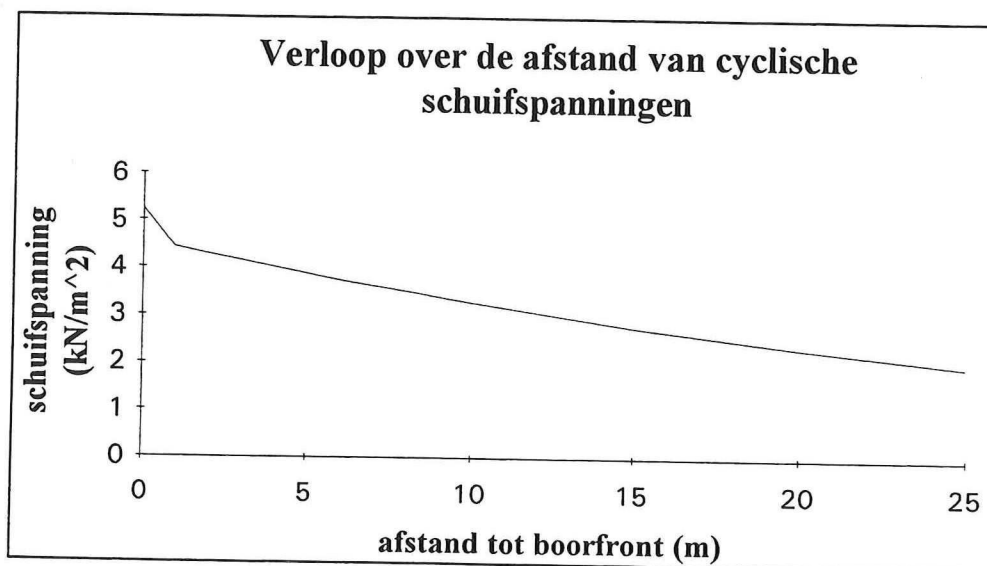
6.2.2 Cyclische schuifspanningen

De cyclische schuifspanningen worden alleen tijdens het boorproces opgelegd aan de bodem. Het boren van een tunnel boring veroorzaakt, ongeacht het machine type of de grondsoort waarin geboord wordt, trillingen in de bodem. Als bronnen voor cyclische schuifspanningen bij tunnelboringen in granulaire bodem worden de aandrijvingen in de tunnelboormachine en het ontgravingsproces aangenomen. De omwentelingssnelheid (minder dan 6 omwentelingen per minuut) van het graafwiel is te laag om trillingen te veroorzaken. Voor een verwekingsrisicoanalyse is het van belang te weten hoe groot de bodemversnelling ten gevolge van deze trillingen is en hoe de amplitude vanaf het boorfront verloopt. Aan de hand van de versnellingsamplitude kan de cyclische schuifspanningsbelasting bepaald worden. In bijlage III worden op basis van praktijkmetingen van trillingen in de grond bij passage van de tunnelboormachine de cyclische schuifspanningen teruggerekend. In de volgende figuur is de toegepaste methodiek weergegeven.



figuur (49) methodiek bepaling cyclische schuifspanning uit trillingsmeting

De bepaling van de amplitude van de boderverplaatsing in het meetpunt is gebaseerd op twee verplaatsingssnelheidsmetingen. Volgens de geldende relaties van harmonische trillingen is de boderverplaatsing in het meetpunt bepaald. Middels de hei-formule welke de verplaatsingsamplitude over de afstand beschrijft is het verloop over de afstand bekend. Hierdoor is de verplaatsingsamplitude aan het boorfront te berekenen. Weer gebruik makend van de relaties van harmonische trillingen is de versnellingsamplitude aan het front te bepalen. De versnellingsamplitude wordt middels de formule van Seed vertaald naar een cyclische schuifspanning. Deze werkwijze is over de afstand tot het boorfront uitgevoerd. Het resultaat is in de volgende grafiek weergegeven.



figuur (50) Cyclische schuifspanning tijdens tunnelboring in granulaire bodem op 10 m diepte

De knik dicht aan het front in het schuifspanningsverloop is te wijten aan de vervorming en daarmee demping die ter plaatse optreedt. Na dit punt is de demping minder sterk.

Conclusies cyclische schuifspanningen

Frequentie, amplitude en demping worden voornamelijk bepaald door de diameter van de tunnelboormachine en de te boren grondsoort. Het machine type speelt een ondergeschikte rol bij het karakteriseren van de vibraties.

De maatgevende trillingen hebben een frequentie tussen de 10 en 30 Hz.

De maximaal optredende versnelling heeft een grootte van 0.04g

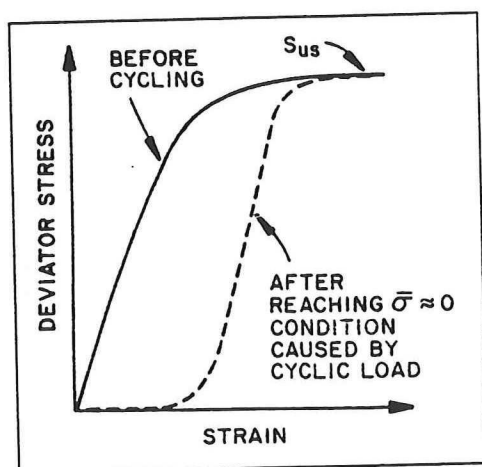
De maximaal optredende cyclische schuifspanning bij een tunnelboring met middelgrote diameter op circa 10 meter diepte heeft aan het front een grootte van circa 5 kN/m². De cyclische schuifspanningsbelasting is zeer lokaal.

7 Toetsen belastingen aangaande verweking

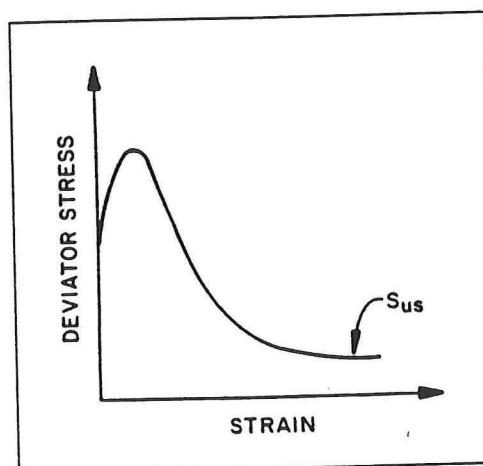
Na het vaststellen van de statische en cyclische belastingen welke optreden tijdens het tunnelboorproces, moeten deze getoetst worden aan de maximaal toe te laten belastingen. De maximaal toe te laten belastingen worden bepaald door twee criteria, één voor statische en één voor cyclische belastingen. In de nu volgende tekst worden de criteria toegelicht. Vervolgens worden voor de omgeving van het boorfront de maximale belastingen bepaald en getoetst.

7.1 Statische schuifspanningsbelasting

Bij het opleggen van een schuifspanning vervormt de bodem. In onderstaande grafieken wordt schetsmatig aangegeven hoe de rek (strain) verloopt ten opzichte van de statisch, oftewel monotoon aangebrachte schuifspanning (deviator stress)



figuur (51) dichtgepakt



figuur (52) losgepakt

Deze belastingssituatie is geschetst voor dicht- (figuur 51) en losgepakt zand (figuur 52). Een onderscheid naar pakking beneden (losgepakt) en boven (dichtgepakt) de kritieke dichtheid is beter.

Op moment van bezwijken (piekwaarde voor de schuifspanning τ) geldt:

$$\tau = c + \sigma_v' \tan \phi \quad [22]$$

| | |
|-------------|-----------------------------|
| τ | schuifspanning |
| c | cohesie |
| σ_v' | verticale korrelspanning |
| ϕ | hoek van inwendige wrijving |

Het losgepakte zand vertoont een afnemende schuifsterkte na overschreiding van de maximale schuifsterkte. Het dichtgepakte zand behoudt zijn maximale schuifweerstand ook na bezwijken. Het spanning-rek gedrag van het losgepakte zand is kenmerkend voor verwekingsgevoelige grond. Het zand bouwt als gevolg van de vervorming een

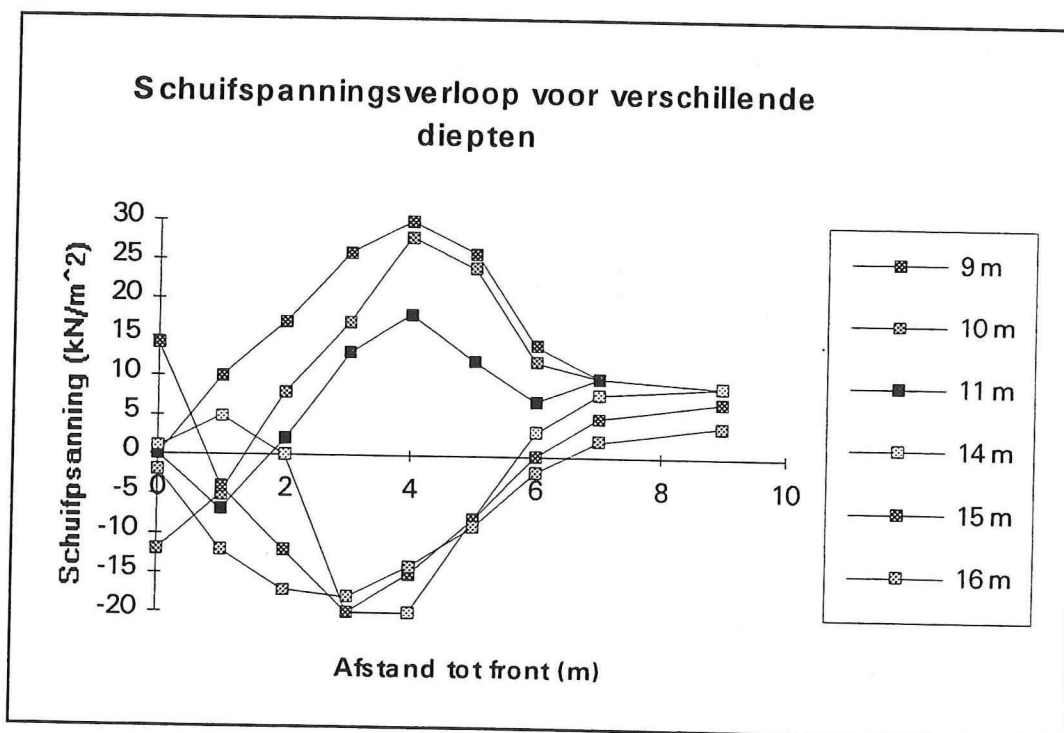
wateroverspanning op welke de korrelspanning en daardoor ook de schuifweerstand verlaagt.

De definitie van de toe te laten statische schuifspanning wordt om deze reden als toetsingscriterium voor de statische schuifspanningen gehanteerd.

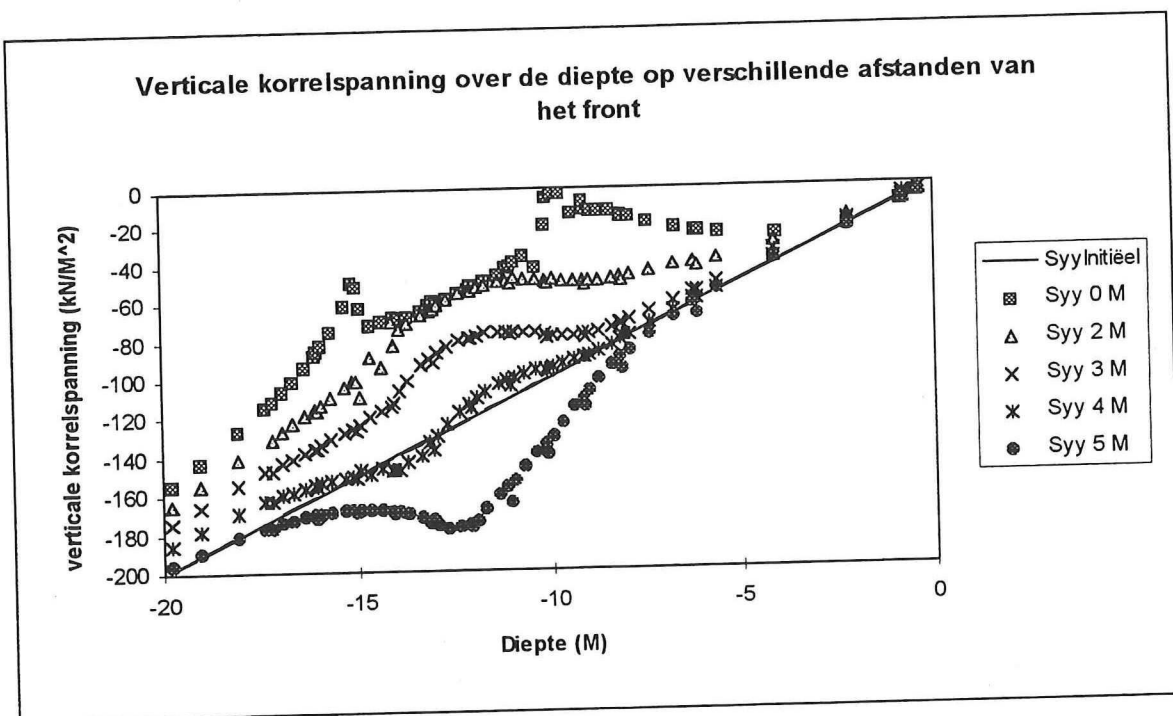
Om een veilig boorproces te garanderen moet de opgelegde statische belasting een factor kleiner zijn dan de maximaal toe te laten belasting. Dit is tot uitdrukking te brengen met de relatieve schuifspanning. Dit verhoudingsgetal geeft de grootte van de opgelegde statische schuifspanning ten opzichte van de toe te laten schuifspanning aan.

$$\text{relatieve schuifspanning} = \frac{\text{opgelegde schuifspanning}}{\text{maximaal op te leggen schuifspanning}} \quad [23]$$

Dit verhoudingsgetal wordt bepaald voor enkele maatgevende posities voor het boorfront. De in de Plaxis berekening gevonden waarden voor het schuifspannings- en korrelspanningsverloop zijn hierbij als basis gebruikt.

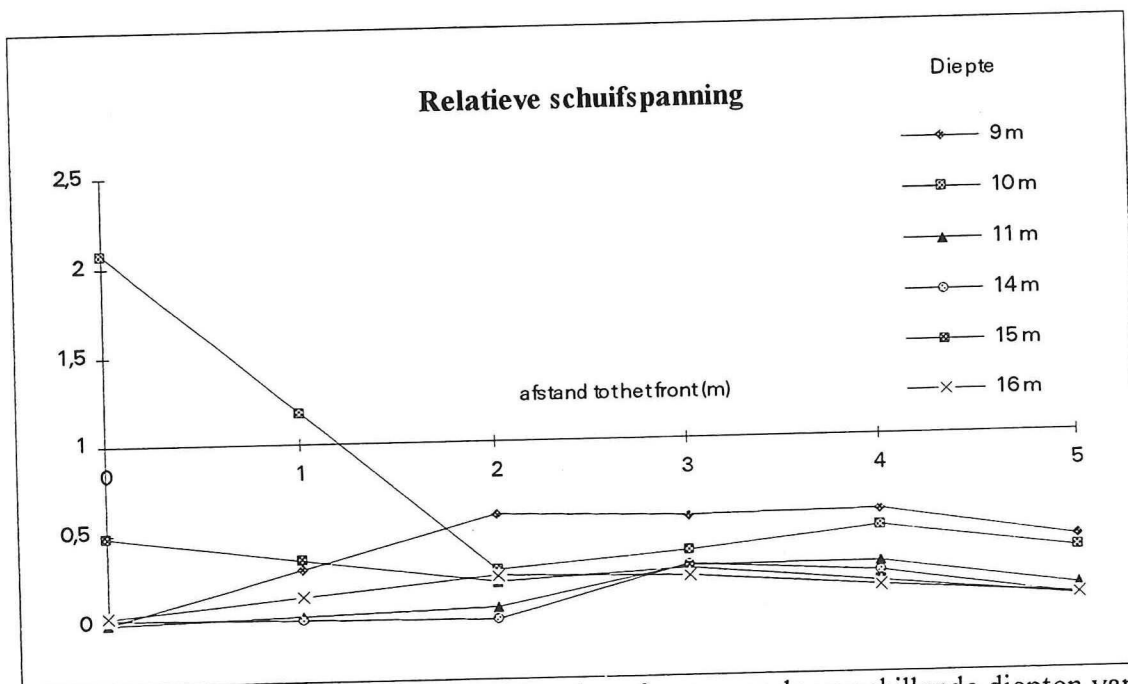


figuur (53) verloop schuifspanningen in fictief bodemprofiel na verstoring als functie van de afstand tot het front



figuur (54) verloop over de diepte van verticale korrelspanningen na wijziging op verschillende afstanden tot boorfront

Gebieden met een hoge schuifspanning en een lage korrelspanning ondervinden een hoge relatieve schuifspanning. Door nu per gebied beide waarden te koppelen via het toetsingscriterium is het verloop over de hoogte en over de afstand tot het front van de relatieve schuifspanning te bepalen. De hoek van inwendige wrijving is 30° gekozen.



figuur (55) verloop over de afstand tot boorfront voor de verschillende diepten van de relatieve schuifspanning

Conclusie statische schuifspanningsbelasting

De toetsing geeft aan dat op een diepte van 10 meter, op een afstand van minder dan 1 meter van het boorfront de maximaal toe te laten statische schuifspanning wordt overschreden. Voor alle overige gebieden geldt dat de relatieve schuifspanningen beneden de 0,6 blijven. Alleen in de directe omgeving van het boorfront en dan slechts boven aan het front bestaat een verwekingsrisico door een statische schuifspanningsbelasting.

7.2 Cyclische schuifspanningsbelasting

De toetsing van de cyclische schuifspanning geschiedt middels de cyclic stress ratio. De bepaling van de stress ratio van een bodem kan geschieden middels een triaxiaalproef op een monstername en middels een sondering in situ. De sonde kan daarbij uitgerust zijn met schuifgolffregistratie of conus met kleef registratie. Beide methoden zijn behandeld in hoofdstuk 3. De auteur adviseert de toepassing van de Olsen methode, waarbij de conus met kleef registratie wordt toegepast. In de volgende drie alinea's wordt de achtergrond van dit advies toegelicht.

De bepaling van de stress ratio middels een triaxiaalproef op een monstername is beperkt betrouwbaar. Dit vanwege de vertaling van de monster waarde naar de in situ waarde middels een aantal correctie factoren. Daarnaast is de waarde alleen bepaald voor één monster. Om een verloop van de stress ratio over de diepte te verkrijgen zijn meerdere monsternames vereist. Een sondering geeft een beeld over de volledige diepte.

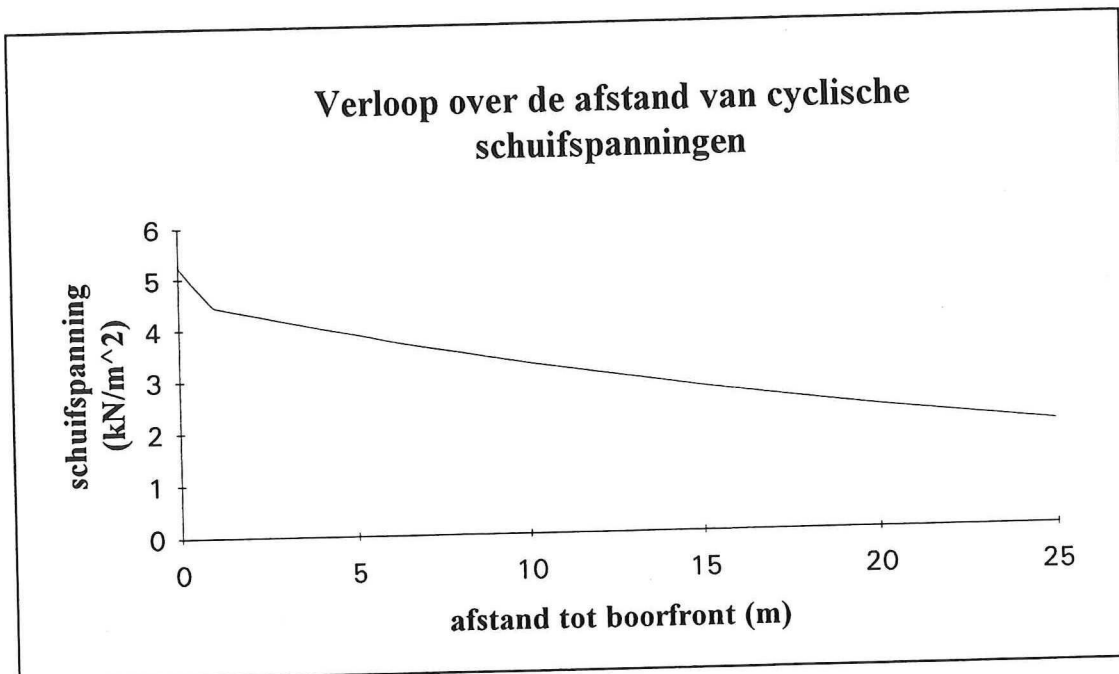
De schuifgolffmeting geeft alleen informatie over de stress ratio. De conus met kleef meting kan naast de bepaling van de stress ratio ook voor een algemene bodemkarakterisatie toegepast worden. Wanneer een bodemonderzoek middels de kleef en conus registratie is uitgevoerd behoeven er geen nieuwe sonderingen uitgevoerd te worden voor een verwekingsanalyse. Verder is het zinvol te onderzoeken of een losgepakte zandlaag wordt ingesloten door ondoorlatende lagen. De ligging en dikte van deze lagen kunnen de afbouw van wateroverspanning sterk beperken.

De methode van Olsen gaf goede resultaten in een verwekingsanalyse [Manzano, 1996] van een gebied nabij Roermond, het Herkenbosch gebied. De uit de methode verkregen resultaten aangaande het verwekingsrisico werden gecalibreerd met de waarnemingen van verweking in landbouwpercelen direct na de aardbeving nabij Roermond in 1992. Uit de studie is gebleken dat de conus met kleefweerstand registratie uitermate geschikt is voor de verwekingsanalyse onder nederlandse bodemomstandigheden. In bijlage VII zijn de resultaten van de toepassing van de methode op een sondering weergegeven. De sondering is genomen te IJmuiden in een verwekingsgevoelige lokatie.

De toepassing van de methode geeft aan dat de stress ratio een waarde aan kan nemen tussen de 0.1 en 0.3. Een bodem met een stress ratio boven de 0.3 is niet als verwekingsgevoelig te classificeren. Om de toetsing aan de hand van de maximaal op

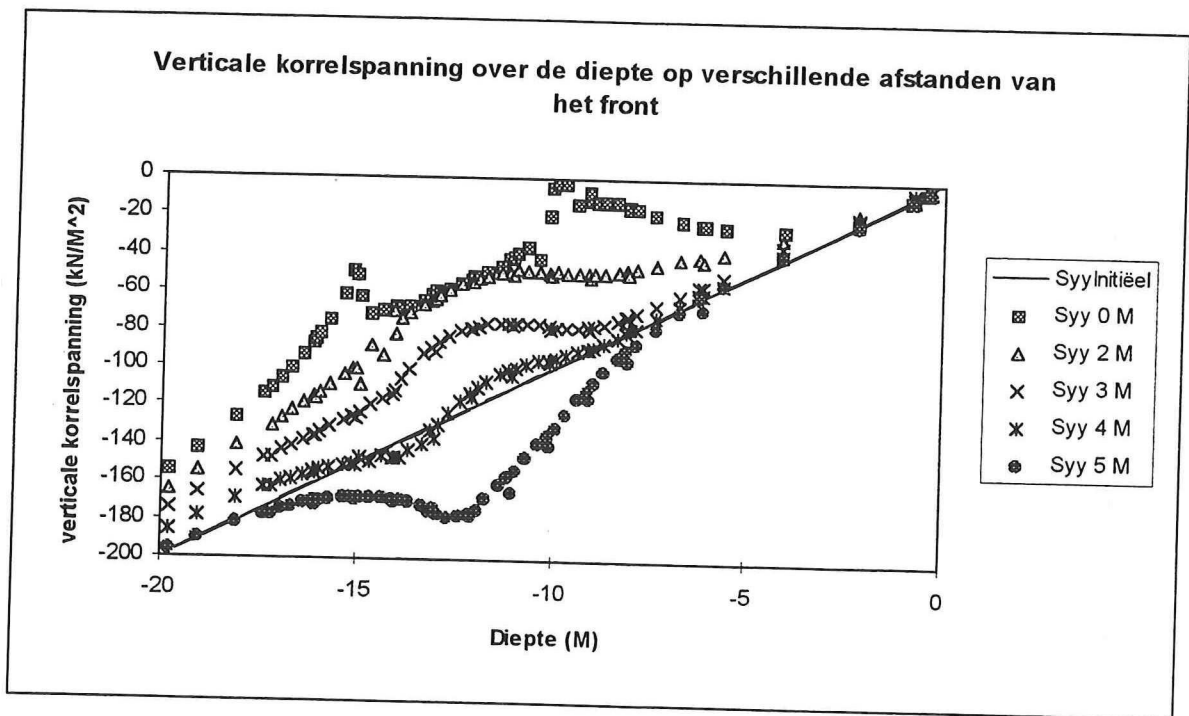
te leggen stress ratio in situ te kunnen uitvoeren moeten ook de opgelegde cyclische schuifspanning en de effectieve verticale korrelspanning bepaald worden.

De opgelegde cyclische schuifspanning is al eerder bepaald in hoofdstuk 6 middels de methode van Seed en de voortplanting van de amplitude in de bodem.



figuur (56) Cyclische schuifspanning tijdens tunnelboring in granulaire bodem op 10 m diepte

De aanwezige korrelspanning is al eerder weergegeven in hoofdstuk 6 .



figuur (57) verloop verticale spanningen in fictief bodemprofiel na verstoring

De gepresenteerde gegevens kunnen nu in de toetsing toegepast worden. De opgelegde stress ratio moet kleiner zijn dan de maximaal op te leggen stress ratio.

$$\frac{\tau_{\text{cyc opgelegd in situ}}}{\sigma'_{\text{in situ}}} \leq \text{stressratio in situ} \quad [24]$$

- τ opgelegde cyclische schuifspanning
- σ' effectieve verticale spanning in de bodem aan het front

Wanneer de opgelegde schuifspanning aangenomen wordt op 5 kN/m² en de stress ratio op 0.1 blijkt dat de korrelspanning tot op 2 meter afstand van het front dusdanig gereduceerd wordt (minder dan 50 kN/m²) dat het verwekingsrisico aanwezig is. Het gebied waar de korrelspanning lager is dan 50 kN/m² behoort tot het risico gebied.

7.3 Gecombineerde schuifspanningsbelasting

Aan de bodem worden tijdens het boorproces de statische en de cyclische schuifspanningsbelasting gelijktijdig opgelegd, zie hoofdstuk 6. In de analysering van de gevolgen van een dergelijke combinatie kan een onderscheid gemaakt worden naar de verhouding tussen de grootte van de beide vormen [M. Hyodo].

Binnen de grootte verhoudingen worden drie niveau's aangehouden. Deze zijn gebaseerd op de orde van omkering van de schuifspanningsrichting. De drie verhoudingen worden als volgt gedefiniëerd:

| | | |
|----------------|----------------|-----------------------------|
| -omkering | (reversal) | $q_{cyc}/q_s > 1.0$ |
| -overgang | (intermediate) | $q_{cyc}/q_s = 1.0 \pm 0.1$ |
| -geen omkering | (no reversal) | $q_{cyc}/q_s < 1.0$ |

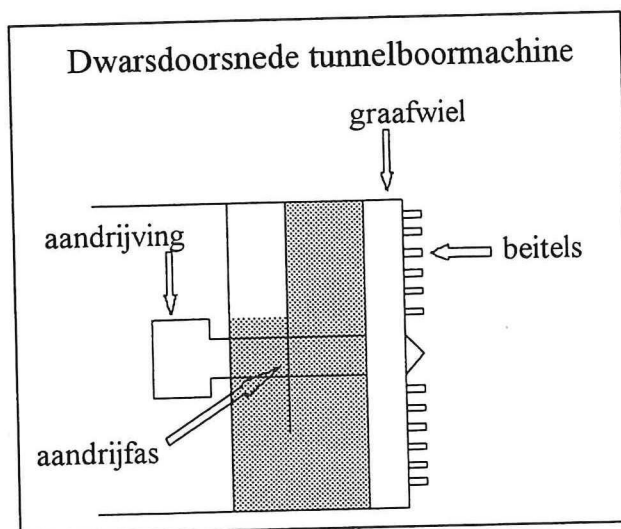
De drie verhoudingen komen allen voor binnen het verstoorde gebied. De auteur heeft geen toetsingscriterium voor deze combinatievormen. Een sommatie van statische en cyclische belastingen is niet geldig daar de vervorming die optreedt ten gevolge van de afzonderlijke vormen niet gelijk is bij een zelfde orde van grootte. Wanneer een van de twee vormen aanmerkelijk groter is stelt de auteur voor deze grotere vorm met een grotere veiligheidsmarge te toetsen alsof het de enige was. Uit literatuurstudie [M. Hyodo, 1985] is gebleken dat een combinatie belasting een risicoverhoging betekent ten opzichte van de belastingen afzonderlijk.

8 Herkenning van verweking aan het boorfront

In het nu volgende hoofdstuk wordt nagegaan of het optreden van verweking te herkennen is. Gezocht wordt naar een mogelijke wijziging in de machineregistraties of metingen in situ. Van de machineregistraties zijn de snijkracht en de steundruk beschouwd. Van de metingen in situ komen de amplitudemeting en de waterspanningsmeting aan bod.

8.1 Snijkrachtregistratie

De kracht benodigd om de grond te snijden wordt bepaald door de grondsoort waarin gewerkt wordt en de snelheid waarmee gegraven wordt. Een factor van belang voor de snijkracht is de korrelspanning. Een hogere korrelspanning vereist een grotere snijkracht vanwege de grotere weerstand tegen vervormen. De herkenning van verweking middels de snijkrachtregistratie is gebaseerd op meting van het aandrijvend moment van het graafwiel. In een verwekingssituatie daalt ter plaatse van de verweekte grond de korrelspanning en daarmee ook de benodigde kracht om de bodem te vervormen. De snijkracht en daarmee het aandrijvende moment van het graafwiel zal afnemen in deze toestand.



figuur (58) dwarsdoorsnede aandrijving graafwiel met beitels

Om drie redenen is de herkenning van verweking middels de snijkrachtregistratie zeer moeilijk of zelfs niet mogelijk.

Het eerste probleem is de mate van de reductie van het snijkracht aandrijvende moment. Om een lage snijkracht te kunnen herkennen moet vooraf bepaald worden hoe groot de snijkracht in een onverweekte situatie zal zijn. De nauwkeurigheid van deze voorspelling is dermate grof dat een mogelijke reductie van de snijkracht ten gevolge van verweking nog binnen de onnauwkeurigheid van deze berekening ligt en dus niet onderscheiden kan worden.

Ten tweede zijn er altijd pieken in de geregistreerde snijkraft. Deze kunnen ontstaan door variatie in de bodemopbouw, obstakels in de bodem of door slijtage van de beitels. Hoe uit de variaties een verwekingsdal herkend zou kunnen worden is niet duidelijk.

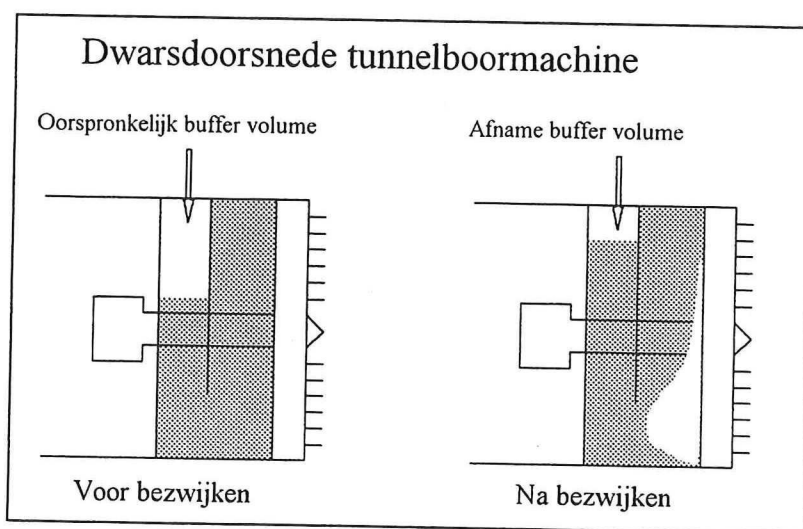
Tenslotte zal verweking, als gevolg van de opgewekte schuifkraft en de daardoor ontstane vervorming, zich altijd voordoen bij de messen in verwekingsgevoelige bodem en zal de aandrijving daardoor geen verschil ervaren met een volledig verweekte situatie.

Herkenning van verweking middels een plotselinge snijkraftreductie is niet mogelijk.

8.2 Steundrukregistratie

De herkenning van verweking middels een steundrukregistratie is gebaseerd op de plotselinge toename van de horizontale korrelspanning ten gevolge van de verweekte situatie. Omdat deze nieuwe spanningssituatie een hogere steundruk vereist om bodemverplaatsing tegen te gaan zal de grond toestromen tot er als gevolg van deze toestroming een hogere steundruk ontstaat in de boorkamer.

Dit principe kan echter alleen bij vloeistofschilden toegepast worden, daar het gebaseerd is op een luchtdruktoename in de buffer. Deze druk neemt toe als gevolg van het vollopen van de boorkamer na het bezwijken van het front. Bentoniet en verweekt zand wisselen uit als gevolg van het verschil in volumiek gewicht. Dit bezwijkingsproces is uitgebreider beschreven in hoofdstuk 5.



figuur (59) afname buffervolume na toestromen verweekt zand

Probleem hierbij is wel dat volledige verweking en instorting van het front is opgetreden voor herkenning mogelijk is.

Wanneer de steundruk dusdanig hoog is dat er geen continu afschuifproces plaats kan vinden of als er gebruik wordt gemaakt van een grondrukbalansschild spelen initiële en cyclische verweking een belangrijke rol. Deze vormen van verweking zijn niet te herkennen aan de steundruk, daar er geen grote volume verplaatsing plaatsvindt.

8.3 Amplitude meting in de bodem

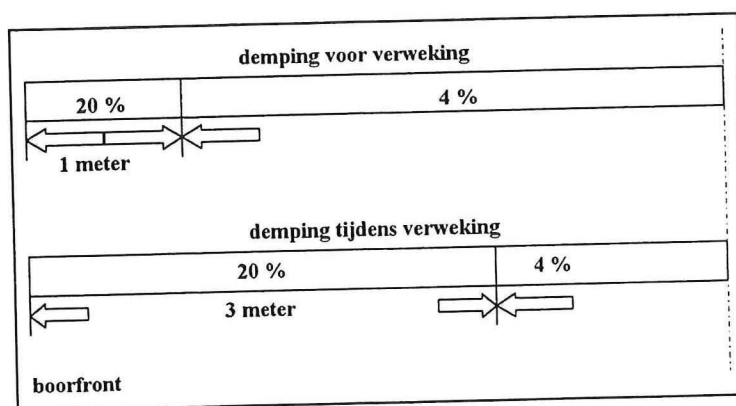
De herkenning van verweking middels een amplitude meting in de bodem is gebaseerd op de wijziging van de demping in de bodem na het optreden van verweking. De bodem zal meer dempen op de plaats waar verweking is opgetreden. Dit zal een amplitude afname tot gevolg hebben.

Om verweking op deze wijze te kunnen herkennen dient de amplitudeafname de nauwkeurigheid van de meting te overschrijden. De nauwkeurigheid van de meting wordt beïnvloed door drie elementen.

Ten eerste is de nauwkeurigheid van de meetapparatuur zelf een beperkende factor. Naarmate de apparatuur onnauwkeuriger is moet de amplitudeafname sterker zijn. De tweede beperking is de tijd die er verstreken is tussen het plaatsen van de acceleratiemeters in de bodem en het moment van meten. Dit vanwege de grondontspanning bij het aanbrengen van de apparatuur. Deze invloed is uitgewerkt na drie maanden. Dan omsluit de bodem de meetapparatuur weer zodat de trillingen op het instrument worden overgebracht.

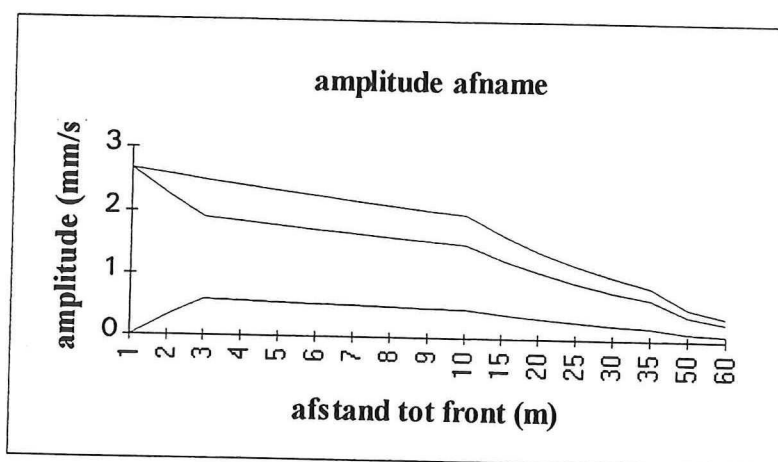
Tenslotte speelt de afstand tussen de trillingsbron en het meetinstrument een grote rol. De geometrische en hysteretische demping doen de amplitude te veel afnemen, waardoor het te meten verschil kleiner wordt. Door een eerder gevonden amplitude verloop qua demping aan te passen en zodoende een voorspelling te doen over de te verwachten amplitude afname tijdens verweking in de grond, kan de te verwachten afname bepaald worden. De nu volgende alinea heeft de bepaling van de amplitudeafname als onderwerp.

De afstand waarover de maximale demping wordt ondervonden door de trillingen vergroot in geval van verweking. De oorspronkelijke afstand waarover de demping maximaal werd aangenomen was vanaf het boorfront tot 1 meter afstand. Door deze afstand te vergroten, bijvoorbeeld tot 3 meter, kan bepaald worden hoe sterk de amplitude reduceert na het optreden van verweking.



figuur (60) aangenomen dempingsverloop

De reductie van de snelheidsamplitude in deze situatie is weergegeven in de volgende grafiek



figuur (61) verloop amplitude afname na verweking over afstand tot het boorfront

Een grote weergave alsook de achterliggende berekening van de grafiek is in bijlage IV geplaatst. Om de genoemde problemen te ondervangen zouden er meer meters geplaatst moeten worden en vooraf al bekend moeten zijn waar ze geplaatst moeten worden. Dit is erg kostbaar en ongewenst daar een deel van de apparatuur in het te boren tracé ligt en dus door de tunnelboormachine weggegraven moet worden.

Het is echter zeer de vraag of verweking zich zo ver uitbreidt met een demping die zo groot is dat er een meetbare amplitudeafname ontstaat. Ook is de bronversnelling op 0.04g gesteld, welke waarde van een tunnelboring in dichtgepakt zand is afgeleid. Een boring in losgepakt zand zal wellicht een lagere versnelling in de bodem tot gevolg hebben. De behaalde afname wordt hierdoor nog kleiner.

De nauwkeurigheid van de meetapparatuur welke gebruikt werd in de eerder genoemde tunnelboring reikt tot ongeveer 0.2 mm/s. Dat zou in dit geval betekenen dat de instrumenten binnen een straal van 20 meter van de machine geplaatst moeten worden.

Conclusie: zelfs wanneer het dempingsverloop exact bekend is, kan er middels de amplitude meting geen uitspraak gedaan worden over het actueel optreden van verweking vanwege de geringe amplitude en de geringe amplitudeafname. Een ondervanging van dit probleem door toepassing van meerdere meetinstrumenten in de risicogebieden wordt door de auteur niet haalbaar geacht.

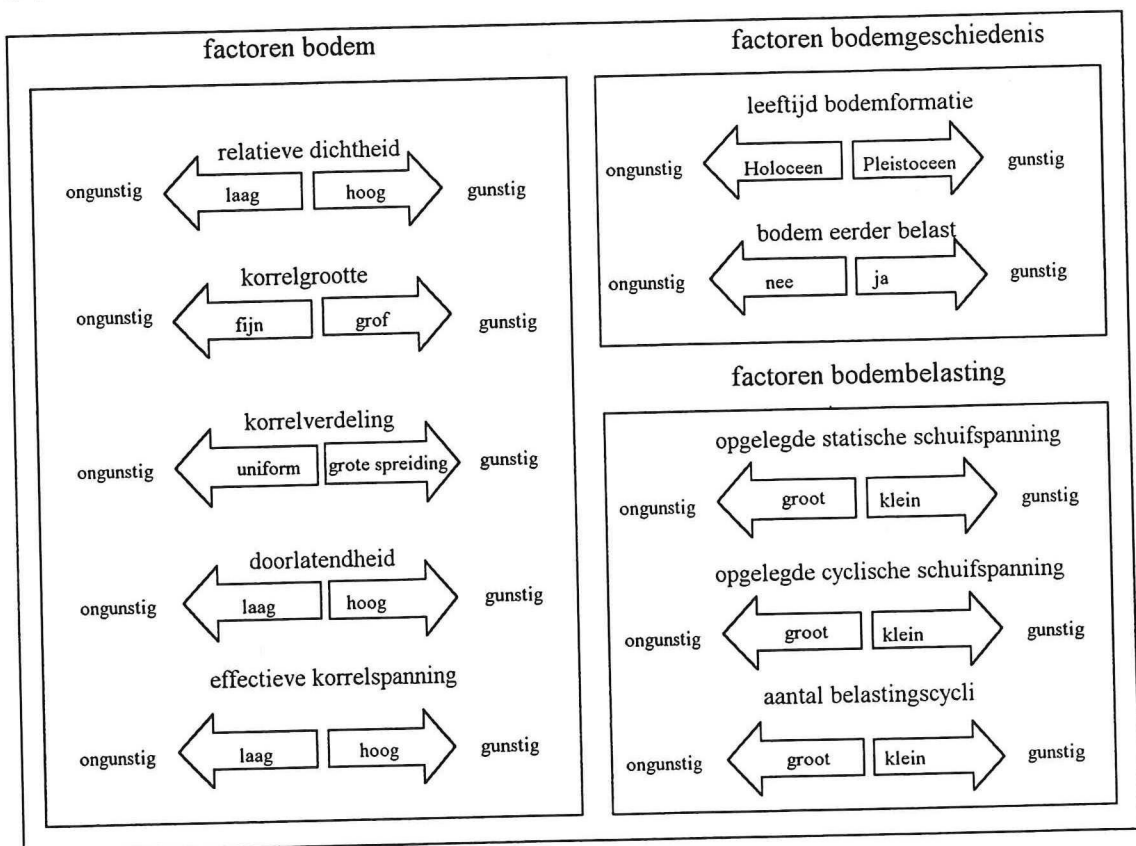
8.4 Waterspanningsmeting in de bodem

Bij het optreden van verweking kan een wateroverspanning verspreid worden naar de omgeving. Of de schaal waarop verweking optreedt bij tunnelboorprocessen voldoende is om een meetbare wateroverspanning te krijgen op enige afstand van de verwekte positie is een punt van nader onderzoek. Wanneer dit voldoende is, kan wel een directe registratie van verweking plaatsvinden. De overdruk verplaatst zich zeer snel door de bodem. Voorwaarde is dat de waterspanningsmeter en de verwekingspositie in dezelfde bodemlaag liggen en dat deze laag voldoende doorlatend is. Een probleem is dat de waterspanning in de bodem altijd beïnvloedt wordt door het boorproces. Een mogelijk optredende piek moet wel te herkennen zijn.

9 Voorkomen verweking

In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe verweking en de nadelige gevolgen die hierbij optreden tijdens het tunnelboorproces voorkomen kunnen worden. De tegenmaatregelen zijn gebaseerd op de risicofactoren van verweking. De tegenmaatregelen zijn te onderscheiden naar een weerstand verhogend of belasting verlagend effect en naar het moment van handelen. De maatregelen en de beoordeling van deze maatregelen sluiten het hoofdstuk af.

Ter verduidelijking worden de eerder in hoofdstuk 2 gepresenteerde factoren nogmaals gepresenteerd:



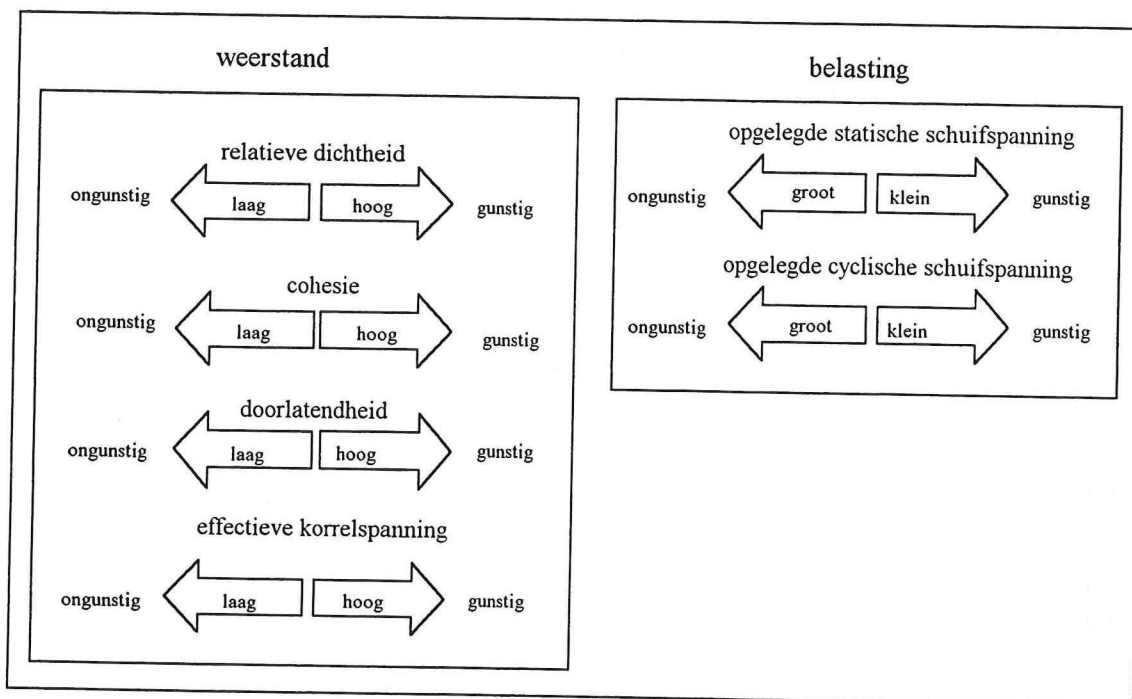
figuur (62) factoren en hun invloed op het optreden van verweking

Het schema moet wat betreft de risicobeperkingsanalyse om twee redenen aangepast worden. Ten eerste zijn niet alle risicofactoren te beïnvloeden en ten tweede is een bodemfactor in de risicoanalyse buiten beschouwing gelaten.

- * De bodem factoren korrelverdeling en korrelgrootte zijn niet meegenomen in het schema, daar deze niet in situ aan te passen zijn.
- Ook de bodemgeschiedenis is een niet te wijzigen element.
- Het aantal belastingscycli welke aan de bodem opgelegd worden tijdens het tunnelboorproces is ook niet dusdanig te reduceren dat het verwekingsrisico afneemt.

- * Daar in de analyse gesteld werd dat de bodem cohesieloos was, is deze factor niet in het risicofactoren schema opgenomen. Cohesie verhoogt echter wel de weerstand tegen verweking en is ook kunstmatig aan te brengen in de bodem.

Na inventarisatie en rangschikking van de te beïnvloeden factoren is een indeling naar weerstandsverhoging of belasting verlaging te maken. Dit resulteert in het onderstaande schema.



figuur (63) beïnvloedbare factoren ter voorkoming van verweking

De maatregelen ter bestrijding van de nadelige gevolgen van verweking tijdens het tunnelboorproces zijn naar het moment van handelen verder onder te verdelen in drie categorieën:

- * maatregelen voorafgaande aan het boorproces
- * maatregelen tijdens het boorproces, voor het optreden van verweking
- * maatregelen tijdens het boorproces, na het optreden van verweking

De maatregelen voorafgaande aan het boorproces worden gezien als alle maatregelen die resulteren in het uitblijven van een wateroverspanningsgeneratie in , voor de uitvoering van de maatregelen, verwekingsgevoelige grond. De maatregelen worden in de grond uitgevoerd voordat deze verstoord wordt door de tunnelboormachine.

De maatregelen tijdens het boorproces voor het optreden van verweking worden gezien als alle maatregelen die resulteren in het uitblijven van een wateroverspanningsgeneratie in verwekingsgevoelige grond. De maatregelen worden uitgevoerd terwijl de grond verstoord wordt door de tunnelboormachine.

De maatregelen tijdens het boorproces na het optreden van verweking worden gezien als alle maatregelen die resulteren in het uitblijven van een instabiliteit ten gevolge van

de opbouw van de poriënwateroverdruk. De maatregelen worden uitgevoerd terwijl de grond verstoord wordt door de tunnelboormachine.

9.1 Maatregelen voorafgaande aan het boorproces

Het voorkomen van verweking voorafgaande aan het boorproces berust op het principe de weerstand tegen verweking van grond te verbeteren. Hoe de risicofactoren aangepast worden is onderwerp van deze paragraaf.

9.1.1 verhogen relatieve dichtheid

De relatieve dichtheid is te verhogen door verdichting van de bodem. Door de pakking van de bodem boven de kritieke dichtheid te brengen is het risico volledig uit te sluiten. Deze methode kan op verschillende manieren uitgevoerd worden en is zeer economisch daar het geen speciaal materieel vereist, snel is uit te voeren en laag specialistisch is. Een groot probleem bij de toepassing is de zetting die ten gevolge van de verdichting optreedt. De zetting kan enkele procenten van de dikte van het te verdichte pakket groot zijn. Wanneer de toleranties omtrent zettingen op het maaiveld laag zijn (één tot enkele centimeters) is deze methode uitgesloten. De methode is zowel vanaf maaiveld als vanuit de tunnelboormachine uit te voeren. Om vanaf maaiveld een bodem te kunnen verdichten is zware apparatuur vereist. De apparatuur vergt vanwege de omvang ruimte op maaiveld. Het is mogelijk de verwekingsgevoelige grond in het te boren tracé voor het passeren van de tunnelboormachine in zijn geheel vanaf maaiveld te verdichten. Om de methode vanuit de tunnelboormachine toe te kunnen passen kan volstaan worden met lichtere trillingsbronnen en verdichtingsnaalden. De te verdichten bodem bevindt zich immers op geringere afstand. Een probleem bij de toepassing vanuit de tunnelboormachine is het ruimtegebrek in de machine. Ook is het bereik van een dergelijke installatie beperkt. Het boorproces moet meerdere malen onderbroken worden om de grond voor de tunnelboormachine uit te verdichten.

9.1.2 verhogen cohesie

De cohesie is op verschillende manieren kunstmatig te verhogen in de bodem. Hierbij worden bevroren en chemische injectie genoemd.

Bevriezen van de bodem levert een verbinding middels het bevroren grondwater tussen de korrels. Het grondwater is door de bevroering vormvast geworden en vormt een waterafdichting. De methode is zowel vanaf maaiveld als vanuit de tunnelboormachine toe te passen. Een volledige bevroering van de verwekingsgevoelige bodem vergt een fijnmazig buizenstelsel in de bodem. Door deze buizen wordt de vloeibare stikstof gepompt. De vloeibare stikstof (temperatuur van -196°C) verdampt en onttrekt daardoor warmte aan de omgeving waardoor de afkoeling van de bodem rond de buizen bewerkstelligd wordt. De afstand tussen de buizen kan niet te groot zijn, circa 1 meter, daar anders de tussenliggende bodem niet meer bevroert. Na drie tot vijf etmalen koelen is de bevroering van de grond tussen de buizen volledig. Het aanbrengen van de buizen in de bodem en de aanvoer van vloeibare stikstof vanuit de tunnelboormachine is een probleem. Bij deze toepassing moet er zorg besteed worden aan de volledigheid

van de bevrozing. Het is een specialistisch werk waarbij met sterk gekoelde gassen wordt gewerkt. De kosten worden zeer sterk bepaald door de omvang en de duur van de te koelen bodem. Een bevrozing van de bodem is vanwege de hoge koelingskosten slechts enkele dagen economisch toepasbaar. Voordelen van de methode zijn dat er geen blijvende elementen in de bodem zijn gebracht en dat er een grote bodemsterkte te bereiken is. Ook zal de bodem na het beëindigen van het koelen weer in de oorspronkelijke toestand verkeren en zijn de zettingen bij deze methode goed te controleren.

Een chemische injectie in de grond is het onder druk in de poriën persen van een vloeistof welke opstijft nadat het de gewenste positie heeft bereikt. De schuifweerstand wordt hierdoor verhoogd en de doorlatendheid verkleind. Zand - en grindlagen zijn met deze methode met succes te verstenen. In fijn zand is de methode niet of nauwelijks toepasbaar vanwege de beperkte doorlatendheid. In een verwekingsgevoelige bodem is een behandeling met cement-bentoniet suspensies niet mogelijk, daar de filterende werking van het korrelskelet de verdere indringing sterk beperkt [Krause, 1987]. De toe te passen vloeistof moet tijdens het injecteren een zo laag mogelijke viscositeit, nagenoeg gelijk aan water, hebben om een gelijkmatige indringing te garanderen. De gelijkmatige verspreiding is sterk afhankelijk van de gelijkmatige doorlatendheid in alle richtingen. Injectiemiddelen op basis van waterglas zijn hiervoor zeer geschikt. Ook zijn nieuwe chemische middelen in opkomst welke een lagere viscositeit bezitten en daardoor beter in zeer fijne gronden toepasbaar zijn. Vanaf maaiveld of vanuit de tunnelboormachine kunnen de injectielansen de grondlaag binnendringen en de vloeistof de grond inpersen. Nadeel van deze methode is de mogelijke giftigheid van de vloeistof. In gebieden waar het grondwater voor de drinkwatervoorziening wordt gebruikt kan deze methode niet toegepast worden, tenzij de vloeistof niet giftig is. De methode vergt ervaring en zorgvuldigheid. De kosten worden sterk bepaald door het vloeistofverbruik.

9.1.3 verhogen doorlatendheid

De doorlatendheid is te verbeteren middels het aanbrengen van drainage in de bodem. De opgebouwde waterdruk kan via de draingewegen afgebouwd worden voordat deze de korrelspanning benadert. Kunststof materialen zijn echter niet mogelijk daar de machine de gedraineerde lokatie nog moet kunnen passeren. Grindkolommen of zandpalen zijn wat dit probleem betreft beter. Gevolg van drainage is echter niet alleen de afbouw van een poriënwateroverdruk, maar ook een ontsnapping van de steunvloeistof via deze drainage kolommen. Om deze reden wordt drainage niet mogelijk geacht als tegenmaatregel bij de toepassing van vloeistofschildmachines. Verder is de tegenmaatregel zeer bewerkelijk en geeft het een verstoring op het maaiveld. Zettingen zijn een mogelijk gevolg doordat een versnelde consolidatie in samendrukbare lagen op kan treden.

9.1.4 verhogen effectieve korrelspanning

Een verhoging van de effectieve korrelspanning levert een evenredige toename op van de op te leggen schuifspanning. De effectieve korrelspanning is te verhogen op verschillende manieren. Het aanbrengen van een bovenbelasting, een verlaging van het

piëzometrisch niveau en jetgrouten zijn als mogelijkheden uiteengezet in de volgende tekst.

Het aanbrengen van een bovenbelasting vereist een vrij maaiveld. De aan te brengen ophoging ligt in de orde van een tot enkele meters. De methode is zeer ingrijpend en beperkt succesvol, daar de grondontspanning aan het front de korrelspanning nog altijd reduceert tot een risicovolle grootte.

Een verlaging van het piëzometrisch niveau doet de korrelspanning afhankelijk van deze verlaging toenemen. Bijvoorbeeld op 10 meter diepte zal bij een grondwaterstandsverlaging van 1 meter de korrelspanning met circa 10% toenemen. Er dient wel getoest te worden op de minimale korrelspanning tijdens het graafproces. Afhankelijk van de minimaal benodigde extra korrelspanning welke benodigd is om een veilig boorproces te garanderen, kan de grondwaterstand verlaagd worden. Zettingen van de bodem zijn bij deze toepassing een mogelijk probleem. Om de zettingen op te laten treden dient de grondwaterstand wel voor langere tijd, één tot enkele weken, gehandhaafd te blijven. De duur van de grondwaterstandsverlaging wordt bepaald door de voortgang van de tunnelboormachine en de omvang van het verwekingsgevoelige gebied. Wanneer zettingen echter in geringe mate toegestaan zijn, is deze methode moeilijk toepasbaar. Verder zijn het benodigde debiet en waterstandsverlaging in de omgeving punten van verder onderzoek bij de toepassing van bronbemaling. Wanneer een beperking van de grondwaterstand verlaging in de omgeving vereist is kan deze methode te duur worden. Bronbemalingen zijn goed uit te voeren en niet specialistisch. Het vereist ruimte op maaiveld voor de pomp, aanvoer van water en afvoer van water.

Door middel van jetgrouten kan de bodem lokaal opgespannen worden. Een groutvolume wordt in de grond geïnjecteerd en hardt op deze positie uit. De korrelspanning zal in de directe omgeving verhogen waardoor de weerstand tegen afschuiven verhoogd wordt. Het is niet duidelijk of de mate van opspanning en de grootte van het opgespannen gebied voldoende zijn om verweking te voorkomen. Ook is het niet duidelijk of de verhoogde korrelspanning tijdens het boorproces gegarandeerd is. Om deze redenen wordt deze optie verder buiten beschouwing gelaten.

9.2 Maatregelen tijdens het boorproces, voor verweking

In de maatregelen tijdens het boorproces voor het optreden van verweking is onderscheid te maken naar weerstand verhogende maatregelen en belasting verlagende maatregelen. Weerstand verhogende maatregelen zijn de verhoging van de effectieve korrelspanning en het aanbrengen van cohesie in de bodem. Te denken valt aan een verhoging van de steundruk, verhoging van het volumiek gewicht van de steunvloeistof en een inpersing van een cohesie verhogende steunvloeistof. Belasting verlagende maatregelen zijn een verlaging van de snijsnelheid, verminderen van de snijdiepte, wederom de verhoging van de steundruk en een schuimtoevoeging in de boorkamer. In de volgende alinea's worden de maatregelen toegelicht.

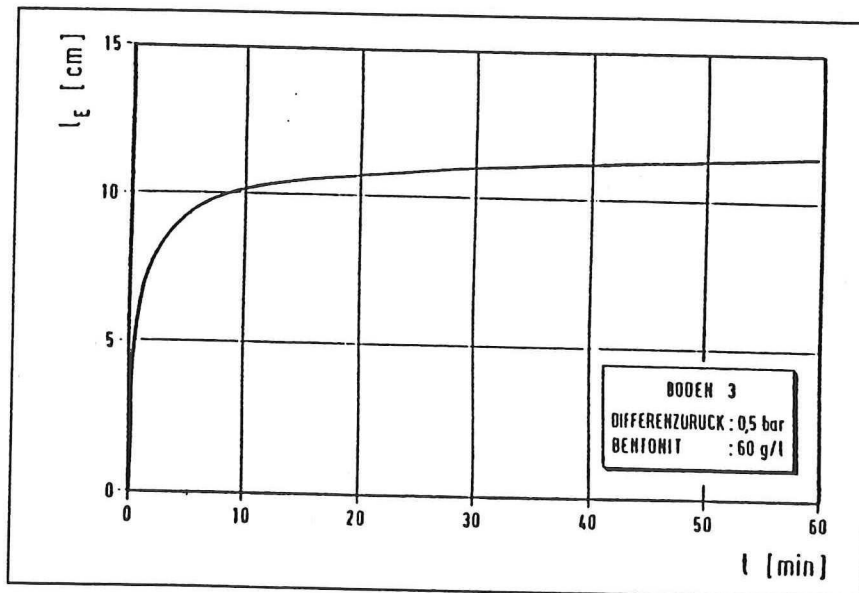
9.2.1 verhogen effectieve korrelspanning

Door een steundrukverhoging zal de grondontspanning reduceren of is zelfs een grond opspanning mogelijk. De hogere korrelspanning zal de weerstand tegen vervorming evenredig doen toenemen. De hogere steundruk is zowel bij vloeistof- als bij gronddrukbalansschild tunnelboormachines moeilijker constant te houden.

Een hoog volumiek gewicht van de steunvloeistof kan in het geval van een vloeistofschildtoepassing nooit die waarde bereiken die benodigd is om de uitwisseling van verweekte grond en bentoniet tegen te gaan, te weten 20 kN/m^3 . Het maximum volumiek gewicht voor de steunvloeistof ligt vanwege de verwerkbaarheid en het rendement van het hergebruik van de steunvloeistof rond de 13 kN/m^3 . Een voordeel van een hoog volumiek gewicht is de extra hydraustatische drukopbouw over de hoogte van het front. Dit kan een uitkomst zijn wanneer het niet haalbaar is om met een hoge overdruk te werken. De steundruk zal bij een zwaardere vloeistof over de hoogte van het front sterker toenemen en in enige mate de grondontspanning verminderen aan het front.

9.2.2 verhogen cohesie

Impersing van een steunvloeistof met een cohesie verhogende eigenschap in de te ontgraven bodem is een onderzochte mogelijkheid bij machines met een vloeistofschild. De mate van indringing is van groot belang. De plaats waar zich verweking wil doen moet bereikt kunnen worden door de vloeistof. In de volgende grafiek is de indringing over de tijd weergegeven



figuur (64) Tijdsverloop indringdiepte bentoniet

De indringing wordt sterk beïnvloedt door de viscositeit [Krause, 1987]. Naast de viscositeit zijn de doorlatendheid van de bodem, de tijdsduur en het aandrijvend drukverschil van invloed op de indringlengte. Uit de bovenstaande grafiek blijkt dat de indringing van de steunvloeistof beperkt wordt tot een tiental centimeters.

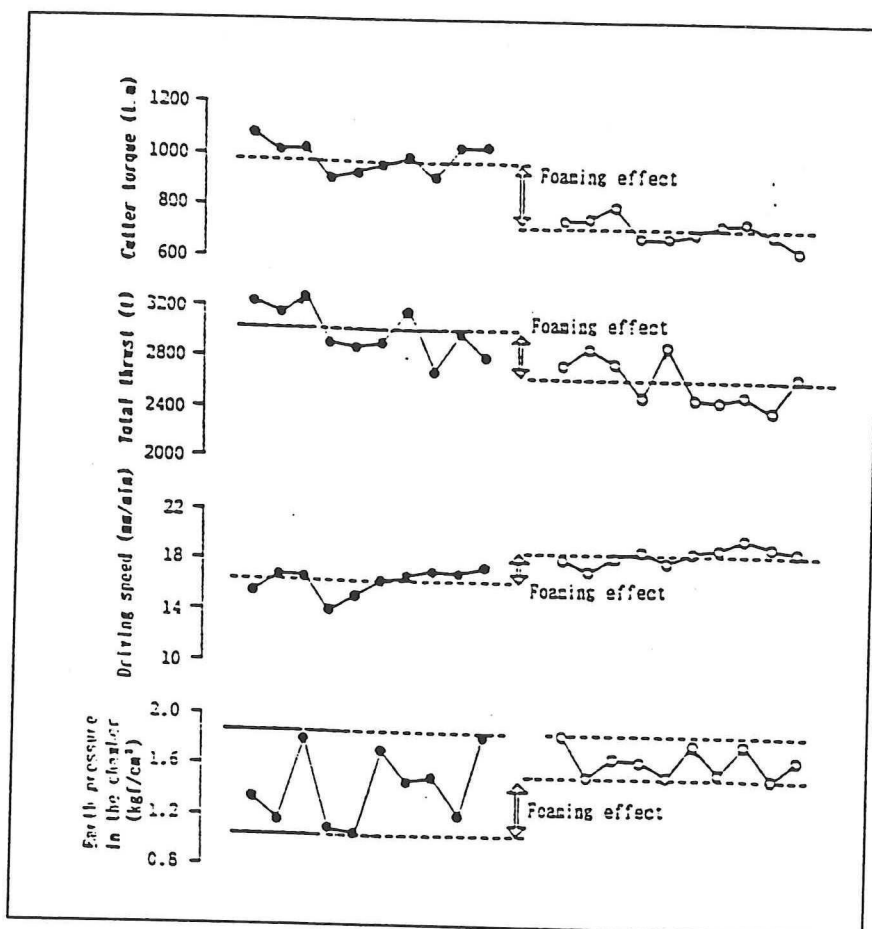
De steunvloeistof dient een hoge viscositeit te hebben om een stabiel boorproces te garanderen. Een voordeel van een vloeistof met hoge viscositeit is de beperkte indringing, waardoor er efficiënter met de steunvloeistof gewerkt kan worden. Nadeel is echter wel de verwerkbaarheid. Om de bentoniet geschikt te maken voor een volgende procesgang moet het grondaandeel verwijderd worden. Dit wordt moeilijker naarmate de vloeistof een hogere viscositeit heeft. In bijlage IV worden de factoren die bepalend zijn voor de indringlengte van de steunvloeistof nader toegelicht.

De voorkoming van verweking aan het boorfront middels inpersing van de steunvloeistof is om twee redenen niet haalbaar. Ten eerste is de indringing te gering. Ten tweede is het niet mogelijk om met een steunvloeistof een schuifweerstand op te wekken die in staat is de schuifkracht in de bodem te weerstaan van de orde zoals die optreedt in de grond tijdens het boorproces.

9.2.3 verlagen belasting

De aan de bodem opgelegde statische schuifspanning zal afnemen wanneer de steundruk aan het boorfront verhoogd wordt. Ten gevolge van grondontspanning aan het boorfront heeft de grond de neiging naar het front toe willen verplaatsen. Deze verplaatsing wordt tegengegaan door de opgewekte schuifkracht in de bodem. Een hogere steundruk resulteert in een geringere grondontspanning en daardoor geringere opwekking van schuifspanning. De hantering van een hogere steundruk is moeilijker en levert bij vloeistofschild tunnelboormachines een verhoogd bentoniet verbruik.

De opgelegde cyclische schuifspanning wordt mede veroorzaakt door de aandrijving van het graafwiel. Een lagere energie-inbreng uit de machine door verlaging van de aandrijfkraft resulteert mogelijk in een lagere amplitude in de bodem. Een verlaging van de aandrijfkraft is mogelijk door een verlaging van de snijsnelheid, een verlaging van de snijdiepte of, bij gronddrukbalansschilden, een schuimtoepassing. Door de schuimtoevoeging in de boorkamer is de grond makkelijker te kneden, wat een reductie van 10 tot 20% van het aandrijvend moment oplevert. In de volgende figuur is de verlaging van het aandrijvend moment weergegeven.



figuur (65) aandrijvend moment bij High Density slurry zonder en met schuim

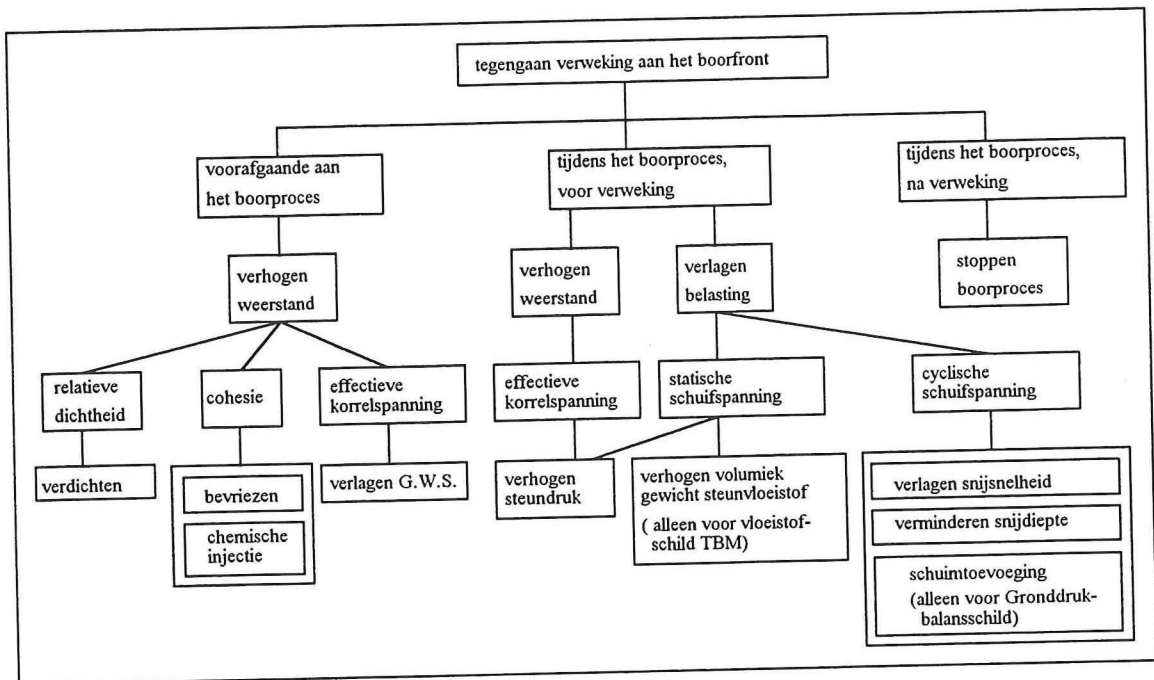
Nadelen zijn de extra toevoeging in de bodem van een bodemvreemd materiaal, een niet continu te garanderen reductie en een stijging van de kosten van het boorproces.

9.3 Maatregelen tijdens het boorproces na verweking

Maatregelen tijdens het boorproces ter voorkoming van de nadelige gevolgen van verweking worden door de auteur niet mogelijk geacht vanwege twee redenen. Ten eerste vergen de eerder genoemde opties om de risico factoren aan te passen te veel tijd. Ten tweede is het tijdig herkennen van een verwekingssituatie zeer moeilijk zo niet onmogelijk. Wanneer het verschijnsel optreedt is onderbreking van het boorproces de enige optie.

9.4 Conclusie tegengaan verweking

In het volgende schema zijn de te beïnvloeden factoren en haalbare maatregelen weergegeven.



figuur (66) schema van maatregelen om verweking tegen te gaan

Na uitvoering van een maatregel kan de toetsing van de nieuwe situatie uitgevoerd worden. De afweging van de toe te passen maatregel is afhankelijk van de grondgesteldheid, de door het uitvoeren van de maatregel ontstane meerkosten en de opgelegde beperkingen.

10 Conclusies & aanbevelingen

Conclusies:

Het verwekingsrisico van losgepakte, verzadigde cohesieloze grond wordt sterk bepaald door de relatieve dichtheid. Het verschijnsel treedt op als gevolg van een toename van de schuifspanning.

Bij de analyse van het verwekingsrisico dient een sondering met conus en kleef registratie uitgevoerd te worden. De vertaling van de registratie door middel van de methode van Olsen naar het verwekingsrisico is van de beschouwde methoden de meest betrouwbare. Daarnaast wordt de sondering met conus en kleef registratie in veel gevallen toegepast voor een algemeen bodemonderzoek, zodat voor de verwekingsanalyse gebruik gemaakt kan worden van deze metingen.

Het verwekingsrisico wordt tijdens het boorproces aan het boorfront verhoogd door de verlaging van de korrelspanning, de opgelegde statische schuifspanning en de als gevolg van de trilling opgelegde cyclische schuifspanning.

De in te zetten tunnelboormachine is van invloed op het risico en de gevolgen van verweking.

De aan de bodem opgelegde trillingen zijn afhankelijk van de machine diameter en de te boren grondsoort. Voor de diameter geldt: des te groter de diameter, des te groter de trillingen in de bodem. Voor de grondsoort geldt: des te harder de te boren grondsoort, des te groter de trillingen en des te hoger de frequentie.

De invloed van het aandrijvend vermogen op de trillingen dient nader onderzocht te worden. Een kleiner aandrijvend vermogen legt vermoedelijk een kleinere versnellingsamplitude op aan de bodem. Het verwekingsrisico is kleiner bij een geringere bodemversnelling.

De opgewekte trillingen hebben in losgepakte, granulaire bodems een frequentie tussen de 10 en 30 Hz. Als bovengrens van de versnellingsamplitude in zachte bodems is voor een middelgrote tunnelboormachine (5 m diameter) 0.04g aangehouden.

Het optreden van verweking veroorzaakt bij een vloeistofschildmachine een uitwisseling van bentoniet en verweekt zand. Bij gronddrukbalansschilden zal er tijdens het boorproces een volume verlies optreden. Beide gevolgen resulteren in zettingen op het maaiveld, waarbij de gevolgen van verweking bij vloeistofschild tunnelboormachines als calamiteit geassocieerd worden. Dit vanwege de grote verplaatsing van bodemmateriaal en de langdurige stilstand van het tunnelboorproces.

De nadelige gevolgen zijn alleen vóór het optreden van verweking te voorkomen middels bodemverbeteringsmethoden of steundrukverhoging. Het is niet mogelijk maatregelen uit te voeren om het verschijnsel tegen te werken nadat het is opgetreden. De nadelige gevolgen zijn al opgetreden voordat deze opgemerkt kunnen worden op welke wijze dan ook. Werken in een grenssituatie is om deze reden niet mogelijk, tenzij de maaiveld zakking geen probleem vormt en het toegepaste systeem een gronddrukbalansschild is.

Verweking van grond aan het boorfront is een zeer lokaal verschijnsel. Uitbreiding van verweking is niet mogelijk daar dat een uitbreiding van de grondontspanning vereist.

Aanbevelingen:

Een bodemversnellingsmeting vlak aan het boorfront tijdens een tunnelboring in zachte grond zal een zuiverder beeld geven van het amplitude verloop over de afstand en de orde van grootte. Dit omdat in deze studie, bij gebrek aan een dergelijke meting, de bodemversnelling aan het front indirect bepaald is aan de hand van een meting op maaiveld bij een tunnelboring in hardere bodem. Daarnaast is de nauwkeurigheid van de gebruikte meting zeer beperkt.

Een amplitude meting in de bodem geeft vermoedelijk een veel lagere bodemversnelling wat resulteert in een lagere cyclische bodembelasting.

De grootte van de cyclische bodembelasting is bepaald middels een relatie tussen de bodemversnelling en de cyclische belasting. Deze relatie is opgesteld voor een aardbevingssituatie. Daar de omvang en de grootte van de bodemversnelling tijdens tunnelboringen kleiner zijn en de amplitude regelmatiger over een aantal cycli is in vergelijking met de amplitude tijdens aardbevingen dienen er andere reductie factoren toegepast te worden. In dit verslag is alleen aangegeven welke factoren vergroot en welke verkleind zouden moeten worden om een tunnelboorproces middels deze relatie te kunnen toetsen. De waarden zijn in deze studie grof geschat en in de toetsing toegepast. Beter zou zijn de cyclische schuifspanningen direct te meten, een betere relatie te vinden of de factoren nauwkeuriger te bepalen.

De grondontspanning aan het boorfront is bepaald met een 2-dimensionaal model. Mogelijk treden er andere spanningsverlopen op in een 3-dimensionale modellering door een betere simulering van de boogwerking in de bodem.

De modellering is uitgevoerd met één bodemmateriaal. Een modellering met meerdere, mogelijk ook ondoorlatende of cohesieve lagen kan een ander beeld geven van de verplaatsingen en spanningen in de bodem tijdens het boorproces en na het optreden van verweking. Ondoorlatende lagen kunnen de afbouw van waterspanning belemmeren, cohesieve lagen kunnen de zettingen vertragen waardoor tegenmaatregelen mogelijk nog uitgevoerd kunnen worden.

De modellering van verweking is uitgevoerd middels de fysisch ongeldige aanpassing van de hoek van inwendige wrijving. Wellicht is een betere simulatie mogelijk door voor de als verweekt te definiëren lokatie een hoger freatisch vlak in te voeren.

Een veelbelovende registratie ter bepaling van het verwekingsrisico is de waterspanningsmeting tijdens sonderen. Bij de uitvoering van de sondering kan gedacht worden aan sonderen met hogere snelheid of horizontaal sonderen vanuit de tunnelboormachine. De beoordeling van deze sondermethoden vergt nader onderzoek.

Literatuurlijst

F. Barends (1992)
Theory of consolidation. (B26)

Claus Becker
The choice between EPB and slurry shields: selection criteria by actual examples.
Options for Tunneling 1993, pagina 781-791.
Elsevier, 1993

Canou, J. , Hachem, M. El. , Kattan, A & Juran, I.
Mini piezocone (M-CPTU) investigation related to sand liquefaction analysis.
Soil Mechanics Research Center (CERMES), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), Paris, France
Penetration Testing 1988, pagina 699-706.
Balkema, Rotterdam 1988

A. Casagrande
Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills.
Contributions to Soil Mechanics, 1925-1940, Boston Society of Civil Engineers 1936

Committee on Earthquake Engineering
Liquefaction of Soils During Earthquakes.
National Academy Press
Washington D.C. 1985

CUR 166 Damwand Constructies
2^e druk CUR Gouda

M. Hyodo, H. Murata, N. Yasufuku T. Fujii
Undrained Cyclic Shear Strength and Deformation of Sands Subjected to Initial Static Shear Stress
Department of Civil Engineering, Yamaguchi University, Japan
Liquefaction of Soils During Earthquakes, pagina 81-103
National Academy Press
Washington D.C. 1985.

H.L. Koning

Grondmechanisch onderzoek naar de oorzaak van de afschuiving en ten behoeve van het herstel van eiland 8.

Voordracht 31 maart 1977 te Amsterdam voor de 'Sectie voor Grondmechanica en Funderingstechniek' van het KIVI.

Uitgave van het laboratorium voor grondmechanica.

De afschuiving van een gedeelte van eiland 8 in de zandwinning Vinkeveense Plassen.

T. Krause (1987)

Schildvortrieb mit flüssigkeits- und erdgestützter Orstbrust.

Dissertation Technische Universität Braunschweig

J. Lindenberg

Laboratorium voor Grondmechanica

Kritieke dichtheid van zand, eindverslag T.O.W. onderzoek december 1978.

Delft, 1978

H.J. Luger

Evaluatie parameters zand, Waterspanningsveranderingen rond een conus, Interpretatie.

BAG 428 B

C.O. 256406 okt 1988 G.D.

Rapport TC 250 bijlage 3C

B.Maidl, M. Herrenknecht, L. Anheuser

Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb.

Ernst & Sohn, 1994

J.A. Manzano, jr.

Detailed liquefaction analysis of the Herkenbosch area using the Roermond earthquake observations for calibration.

ITC, International Institute for Aerospace survey and Earth Sciences

Delft, The Netherlands, June, 1996

Mos Grondmechanica

Renovatie Zuider- en Kleine Sluis (verwekingsgevoeligheid) te IJmuiden

(overeenkomst BDN 2006)

Opdracht 044295

februari 1996

Toegepaste sondering: 62493, nummer 1

Richard S. Olsen & ASCE M. (1988)

Using the CPT for Dynamic Site Response Characterisation.

Proceedings of the Speciality Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE No. 20, New York, USA

P.K. Robertson & R.G. Campanella (1983)
Interpretation of cone penetration tests - Part 1 (sand)
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, No. 4

Seed H.B. & Idriss I.M. (1970)
A simplified procedure of evaluating soil liquefaction potential
Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California
Report no. EERC 70-9

J.H. Schmertmann
An Updated Correlation between Relative Density, D_r , and Fugro-type Electric Cone Bearing, q_c .
Contract Report DACW 39-76-M6646
U.S. Army Waterways Exp. Station
Vicksburg Miss, 1976

Tunnels & Tunneling, oktober 1993, pagina 30 t/m 33

A.F. van Weele
Moderne funderingstechnieken.
tweede druk 1983, Uitgeverij Waltman, Delft

Figuren

- (1) auteur rapport
- (2) F. Barends (1992) Theory of consolidation pag 19. figuur 5
- (3) auteur rapport
- (4) auteur rapport
- (5) auteur rapport
- (6) auteur rapport
- (7) Foundation Engineering, Part I/II, mp3750
P.M. Maurenbrecher, A. den Outer, D.G. Price
5e druk, januari 1995, pag 59 fig. 4.1 (naar Tsuchida)
- (8) Foundation Engineering, Part I/II, mp3750, pag 59 fig. 4.1 (naar Tsuchida)
- (9) auteur rapport
- (10) J. Lindenberg, *Kritieke dichtheid van zand*, pagina 12 figuur 5
- (11) J. Lindenberg, *Kritieke dichtheid van zand*, pagina 15 figuur 8
- (12) Liquefaction of Soils During Earthquakes, Committee on Earthquake Engineering, National Academy Press, Washington D.C. 1985, pagina 52, figuur 2-37 (b).
- (13) Liquefaction of Soils During Earthquakes, pagina 53, figuur 2-38 (b).
- (14) Foundation Engineering, Part I/II, mp3750 pag 63 fig. 4.5 (naar Seed & Idriss)
- (15) Schmertmann 1976
- (16) Schmertmann 1976
- (17) CUR 166 Damwand Constructies, pag. 372, fig. 5.1. (naar Schmertmann 1976)
- (18) CUR 166 Damwand Constructies, pag. 373, fig. 5.2. (naar Schmertmann 1976)
- (19) H.K.S.Ph. Begemann et al, Sonderren, Civiele en Bouwkundige techniek nr. 3; mei 1982
- (20) auteur rapport
- (21) Richard S. Olsen & ASCE M. (1988), ASCE No. 20, pagina 379, figuur 1
- (22) Richard S. Olsen & ASCE M. (1988), ASCE No. 20, pagina 385, figuur 5
- (23) naar Koppejan
- (24) auteur rapport
- (25) auteur rapport
- (26) Canou, J. , Hachem, M. El. , Kattan, A & Juran, I.
Mini piezocone (M-CPTU) investigation related to sand liquefaction analysis.
Penetration Testing 1988, Balkema, Rotterdam 1988, pag. 702, fig. 5.
- (27) Robertson et al. 1986
- (28) Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis (USA) March, 1991
K. Tokimatsu, S. Kuwayama en S. Tamura
Liquefaction potential evaluation based on Rayleigh Wave investigation and its comparison with field behavior.
figuur 4a, naar Tokimatsu en Uchida, 1990
- (29) zie (28), figuur 4b, naar Tokimatsu en Uchida, 1990
- (30) auteur rapport
- (31) auteur rapport
- (32) B.Maidl, M. Herrenknecht, L. Anheuser
Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, pagina 247, figuur 10-4

- (33) B.Maidl, M. Herrenknecht, L. Anheuser
Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, pagina 247, figuur 10-4
- (34) auteur rapport
- (35) auteur rapport
- (36) auteur rapport
- (37) auteur rapport
- (38) auteur rapport
- (39) auteur rapport
- (40) auteur rapport
- (41) auteur rapport
- (42) auteur rapport
- (43) auteur rapport
- (44) auteur rapport
- (45) auteur rapport
- (46) auteur rapport
- (47) auteur rapport
- (48) auteur rapport
- (49) auteur rapport
- (50) auteur rapport
- (51) Liquefaction of Soils During Earthquakes, pagina 52, figuur 2-37 (a).
- (52) Liquefaction of Soils During Earthquakes, pagina 53, figuur 2-38 (a).
- (53) auteur rapport
- (54) auteur rapport
- (55) auteur rapport
- (56) auteur rapport
- (57) auteur rapport
- (58) auteur rapport
- (59) auteur rapport
- (60) auteur rapport
- (61) auteur rapport
- (62) auteur rapport
- (63) auteur rapport
- (64) T. Krause (1987), pagina 110, afbeelding 94
- (65) Masao Kaweda, *The control of tunnel face with compressive minute foam and high density slurry*, Towards New Worlds in Tunneling, Balkema Rotterdam (1992), pagina 538, figuur 4
- (66) auteur rapport

Bijlage I

- (1) auteur rapport

Bijlage III

- (2) auteur rapport
- (3) Tunnels & Tunneling, pagina 31, figuur 1
- (4) Tunnels & Tunneling, pagina 32, figuur 2
- (5) auteur rapport
- (6) auteur rapport

- (7) Tunnels & Tunneling, pagina 33, figuur 3
- (8) auteur rapport
- (9) CUR 166 Damwand Constructies, pagina 491, figuur 5.38, naar Haupt 1986
- (10) auteur rapport
- (11) auteur rapport
- (12) auteur rapport
- (13) auteur rapport
- (14)
- (15) M. Fornaro, M. Patrucco, & L. Sambuelli
Vibrations from explosives, high energy hydraulic hammers and TBM's; experience from Italian tunnels.
Options for Tunneling 1993, pagina 832, figuur 2
- (16) auteur rapport

Bijlage IV

- (17) T. Krause (1987), pagina 115
- (18) T. Krause (1987), pagina 96

Formules

- [1] A. Verruijt, *Grondmechanica*,
Delftse Uitgevers Maatschappij b.v.
derde druk 1990
pagina 13, formule 3.4
- [2] A. Verruijt, *Grondmechanica*, pagina 15, formule 3.8, afleiding auteur
- [3] A. Verruijt, *Grondmechanica*, pagina 13, formule 3.1
- [4] A. Verruijt, *Grondmechanica*, pagina 13, formule 3.2
- [5] A. Verruijt, *Grondmechanica*, pagina 13, formule 3.3
- [6] M. Hyodo, pagina 83
- [7] M. Hyodo, pagina 83
- [8] Foundation Engineering, Part I/II, mp3750, pagina 61 (naar Seed)
- [9] Foundation Engineering, Part I/II, mp3750, pagina 61 (naar Seed)
- [10] Foundation Engineering, Part I/II, mp3750, pagina 62 (naar Seed)
- [11] A.F. van Tol, G80, *Funderingstechnieken*, pagina 2.8, naar H.K.S.Ph Begemann
- [12] Richard S. Olsen & ASCE M. (1988), pagina 377, formule 1
- [13] Richard S. Olsen & ASCE M. (1988), pagina 378, formule 2
- [14] Richard S. Olsen & ASCE M. (1988), pagina 377, formule 4
- [15] CUR 166 Damwand Constructies, pagina 485
- [16] K. Tokimatsu, S. Kuwayama en S. Tamura
Liquefaction potential evaluation based on Rayleigh Wave investigation and its comparison with field behavior, formule 5
- [17] A. Verruijt, *Grondmechanica*, pagina 19, formule 4.2
- [18] A. Verruijt, *Grondmechanica*, pagina 24, formule 5.2
- [19] afleiding door auteur rapport
- [20] A. Verruijt, *Grondmechanica*

- [21] A. Verruijt, *Grondmechanica*
- [22] A. Verruijt, *Grondmechanica*, pagina 103, formule 18.1 (naar Coulomb)
- [23] afleiding door auteur rapport
- [24] afleiding door auteur rapport (naar Seed)

Bijlagen III

- [1] Tunnels & Tunneling, pagina 31, figuur 1
- [2] Fundamentele Natuurkunde, DUM
- [3] Fundamentele Natuurkunde, DUM
- [4] Fundamentele Natuurkunde, DUM
- [5] Fundamentele Natuurkunde, DUM
- [6] Fundamentele Natuurkunde, DUM
- [7] afleiding door auteur rapport
- [8] CUR 166 Damwand Constructies, pagina 490
- [9] afleiding door auteur rapport
- [10] Seed
- [11] Seed
- [12] afleiding door auteur rapport
- [13] afleiding door auteur rapport

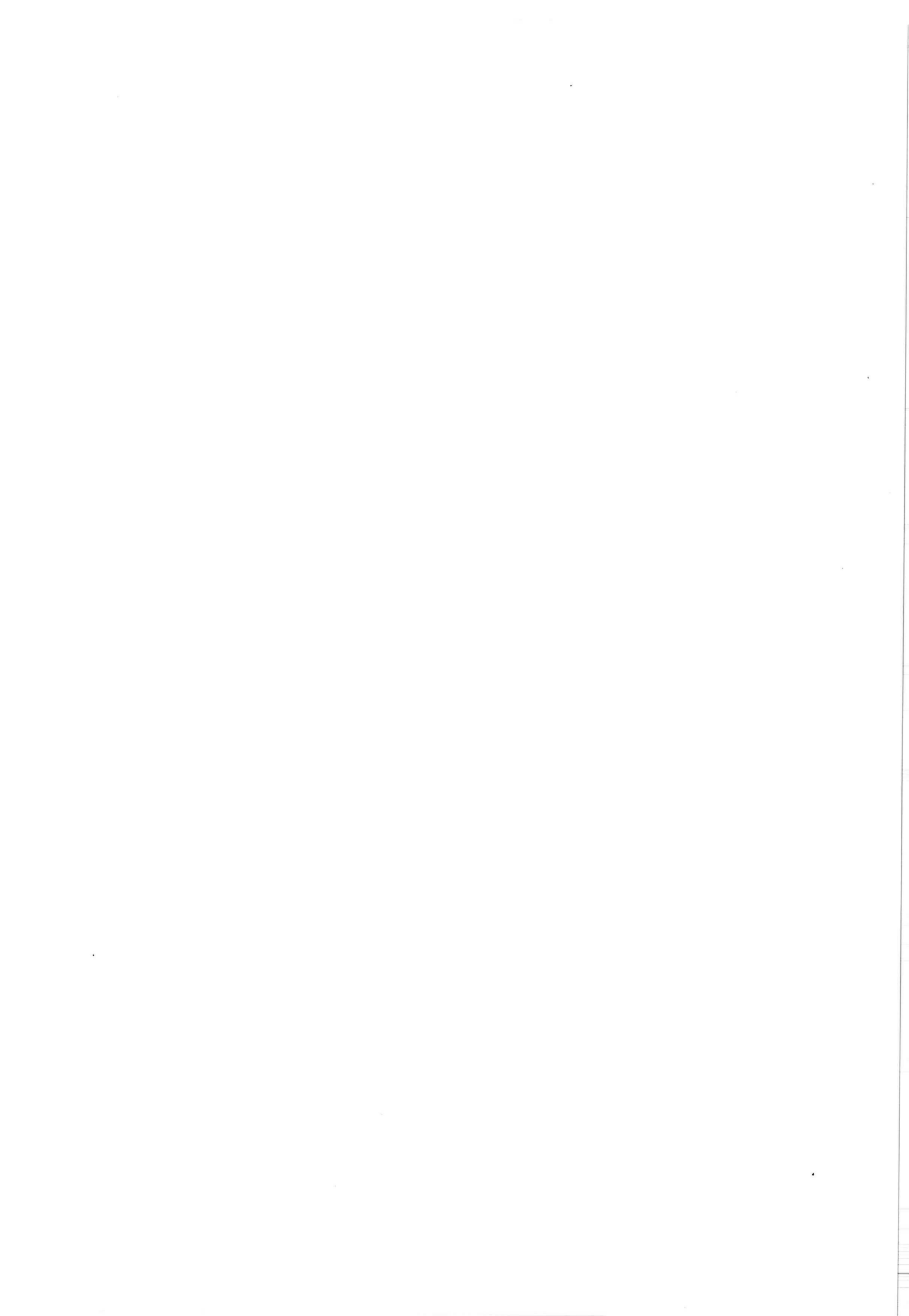
Bijlage IV

- [14] T. Krause (1987), pagina 107
- [15] T. Krause (1987), pagina 107, formule 13
- [16] auteur rapport

Contacten

Naast de afstudeercommissie is in de periode december tot en met juli gesproken met:

| | |
|------------------|----------------------------------|
| A. den Outer | AIO-Mijnbouwkunde |
| L. Kok | Expert verwekingsanalyse |
| dhr. de Groot | Grondmechanica Delft |
| dhr. Staalduinen | T.N.O., opsteller trillingsmodel |



Bijlage I: Simulatie gevolgen verweking

In deze simulatie is gebruik gemaakt van het eindige elementenprogramma Plaxis. Eerst wordt de initiële situatie zonder verweking gesimuleerd in berekening A. Daarna zal de invoer alleen qua hoek van inwendige wrijving gewijzigd worden voor verschillende bodemelementen. Tenslotte wordt het gevolg van een grondverwijdering op diepte gesimuleerd middels een contractie berekening, berekening B, in Plaxis

Algemene invoer berekening A: initiële situatie

```
| Name of data files: TUN81
| Title : tun.zijaanz.geenverw geotex 0.05
+-----+ +-----+
| Type of analysis -----+
| Length : m | | (*) Plane strain
| Force : kN | | () Axisymmetry
| Time : day | | () 3D Axisymmetry
+-----+ +-----+
```

```
+-----+ +-----+
| +- Acceleration -----+ +- Basic element type -----+
| X-accel. : 0.0000 | | () 6-noded triangle
| Y-accel. : 0.0000 | | (*) 15-noded triangle
| Gravity angle: -90.0000 | | () 20-noded brick
```

```
| Units : Length [m], Force [kN], Time [day]
| Output : Stiffnesses geotextile elements | Chain | Stiffness EA |
| Units : kN/m | +-----+ +-----+
| Units : Length [m], Force [kN], Time [day] | 1 | 1.00000E+00 |
```

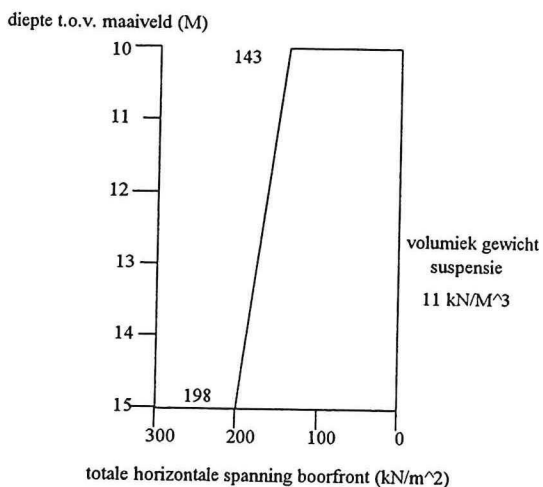
| Output : Initial phreatic line

```
General phreatic line
| No. X-coor Y-coor | No. X-coor Y-coor | No. X-coor Y-coor | +-----+ +-----+
| 1 | 0.00E+00 | 2.00E+01 | | | | | |
| 2 | 1.50E+01 | 2.00E+01 | | | | | |
Page : 1 of 1
```

```
| Units : Length [m], Force [kN], Time [day]
| Output : Material data sets
```

```
+-----+ +-----+ | Model : Drained Mohr-Coulomb
| Title : verzadigd niet verweekt zand
+- General properties ---+ +- Model parameters ----+
| Y-Top : 20.0000 | | Nu : 0.3300 |
| W-dry : 16.0000 | | G-layer : 5000.0000 |
| W-wet : 20.0000 | | E-layer : 1.330E+04 |
| Perm-x : ----- | | c-layer : 1.0000 |
| Perm-y : ----- | | c-depth : 0.0000 |
+-----+ +-----+ | phi : 30.0000 |
```

```
+-----+ +-----+ | psi : 0.0000 |
+- Interface properties --+ | [x] Tension cut-off |
| R-perm-N: ----- | |
| R-perm-S: ----- | |
| R-inter : ----- | |
```

Steundruk:**Bodem parameters:**

$$\phi = 30^\circ$$

$$\nu = 0.33$$

$$E = 5000 \text{ kPa}$$

$$\rho = 20 \text{ kN/M}^3$$

$$K_0 = 0.5$$

= Een grondsoort over gehele vlak
aangenomen

Deze invoer wordt in de simulaties niet meer gewijzigd, behalve de hoek van inwendige wrijving voor enkele bodemelementen.

In de volgende pagina's van deze bijlage worden weergegeven:

Mesh berekening A

Verplaatsingen berekening A

Korrelspanning berekening A

Mesh berekening A0

Verplaatsingen berekening A0

Korrelspanning berekening A0

Mesh berekening A1

Verplaatsingen berekening A1

Korrelspanning berekening A1

Mesh berekening A2

Verplaatsingen berekening A2

Korrelspanning berekening A2

Mesh berekening A3

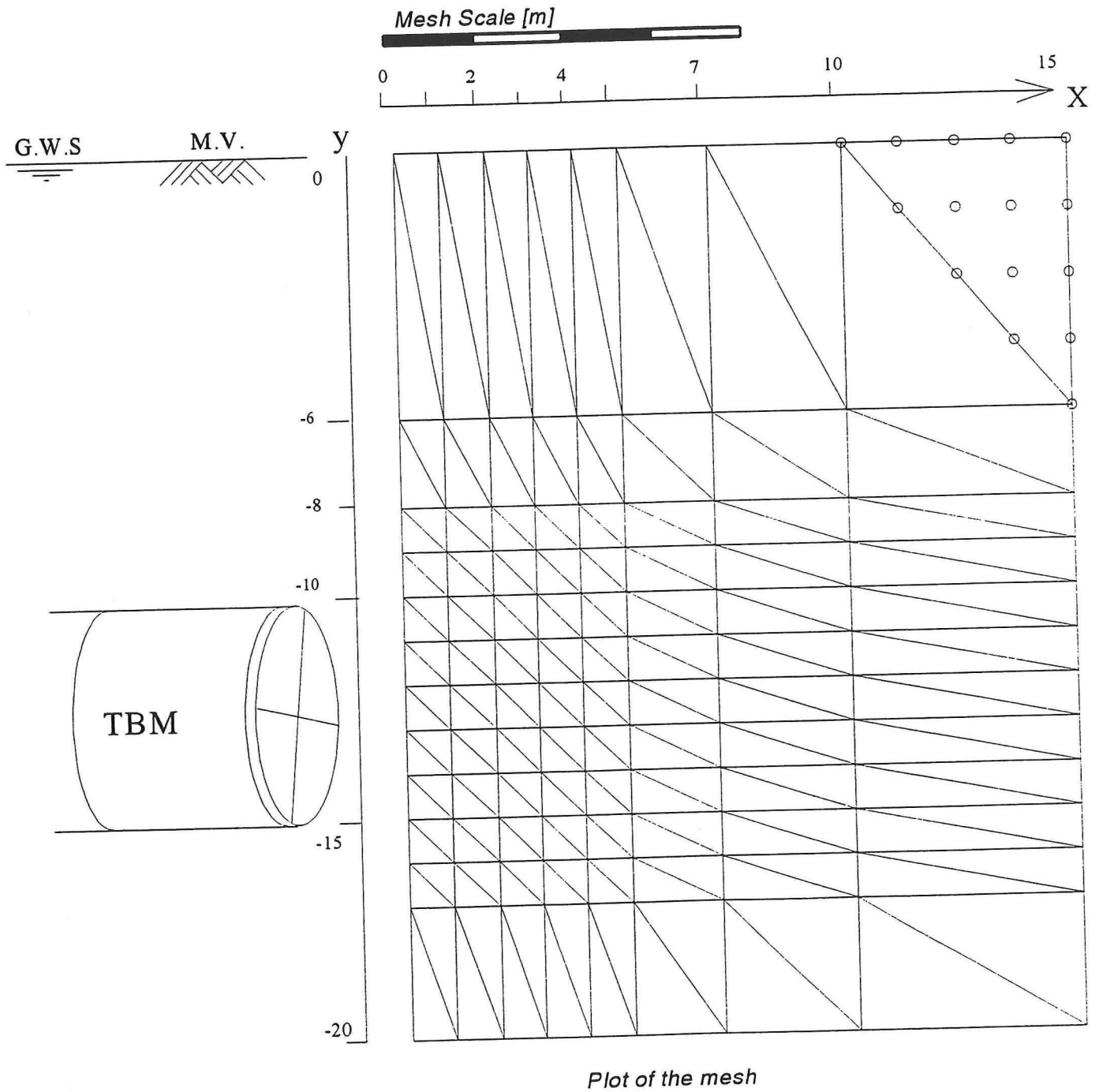
Verplaatsingen berekening A3

Korrelspanning berekening A3

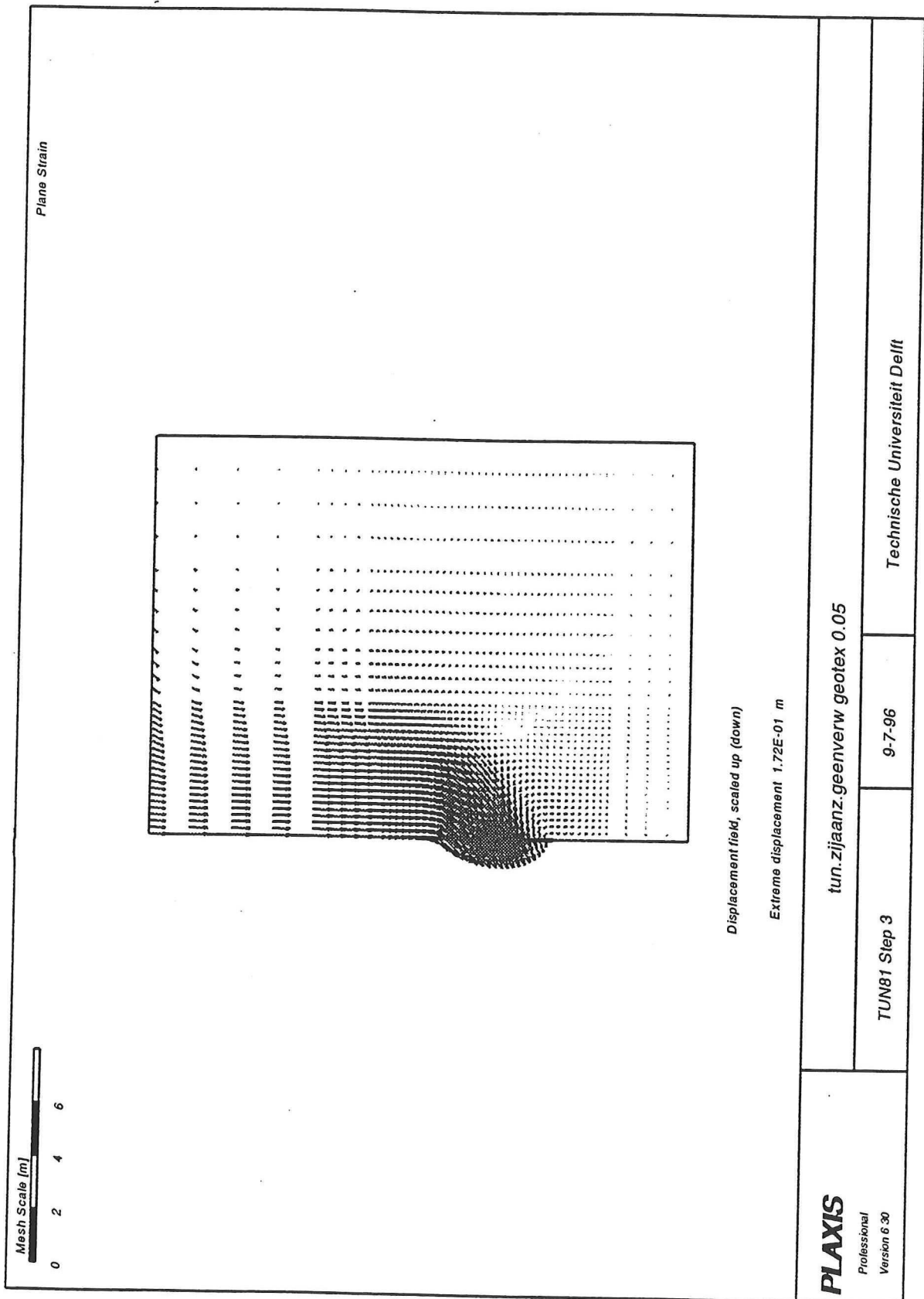
Contractie berekening B

Mesh berekening A

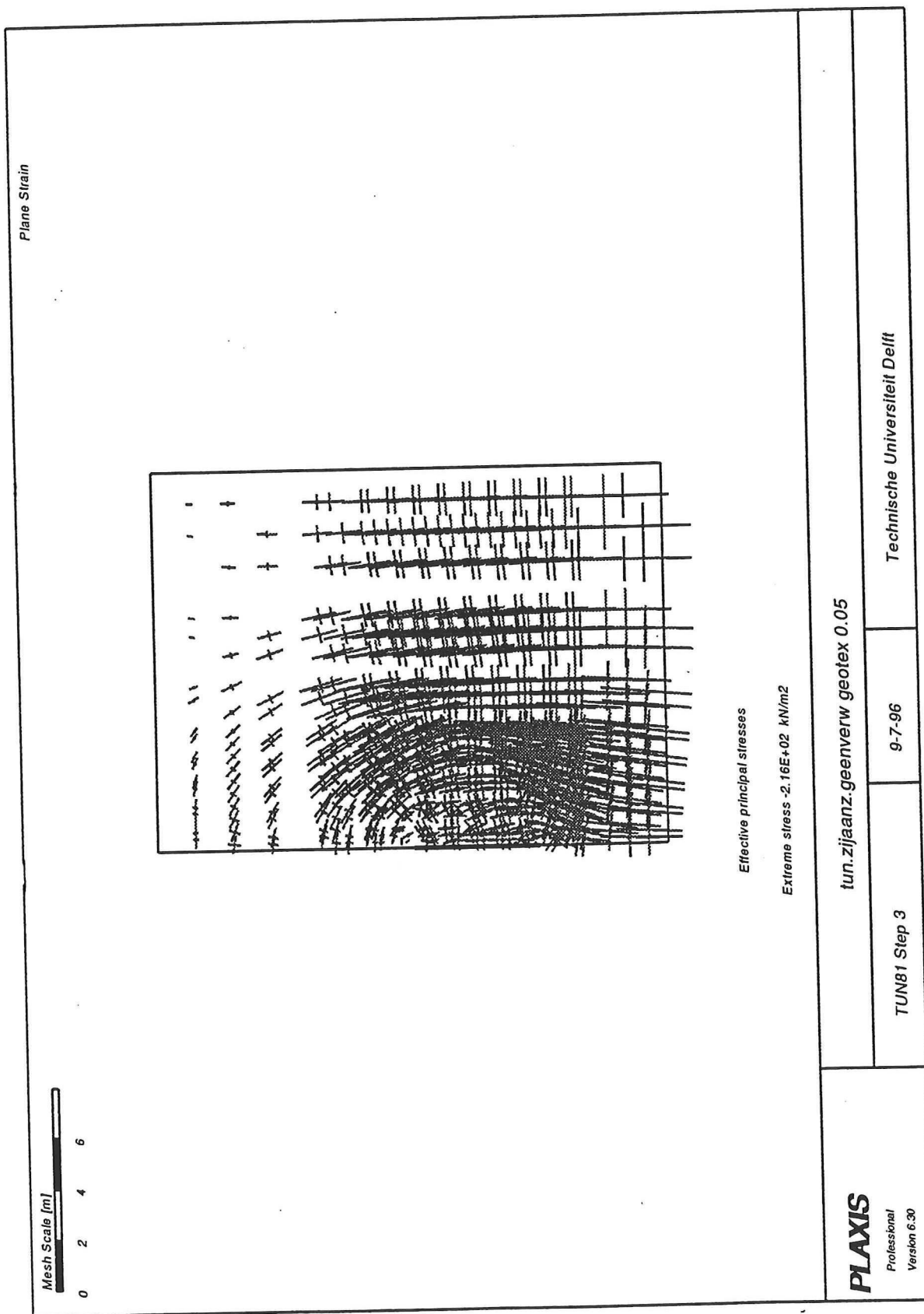
Weergave mesh simulatie berekeningen



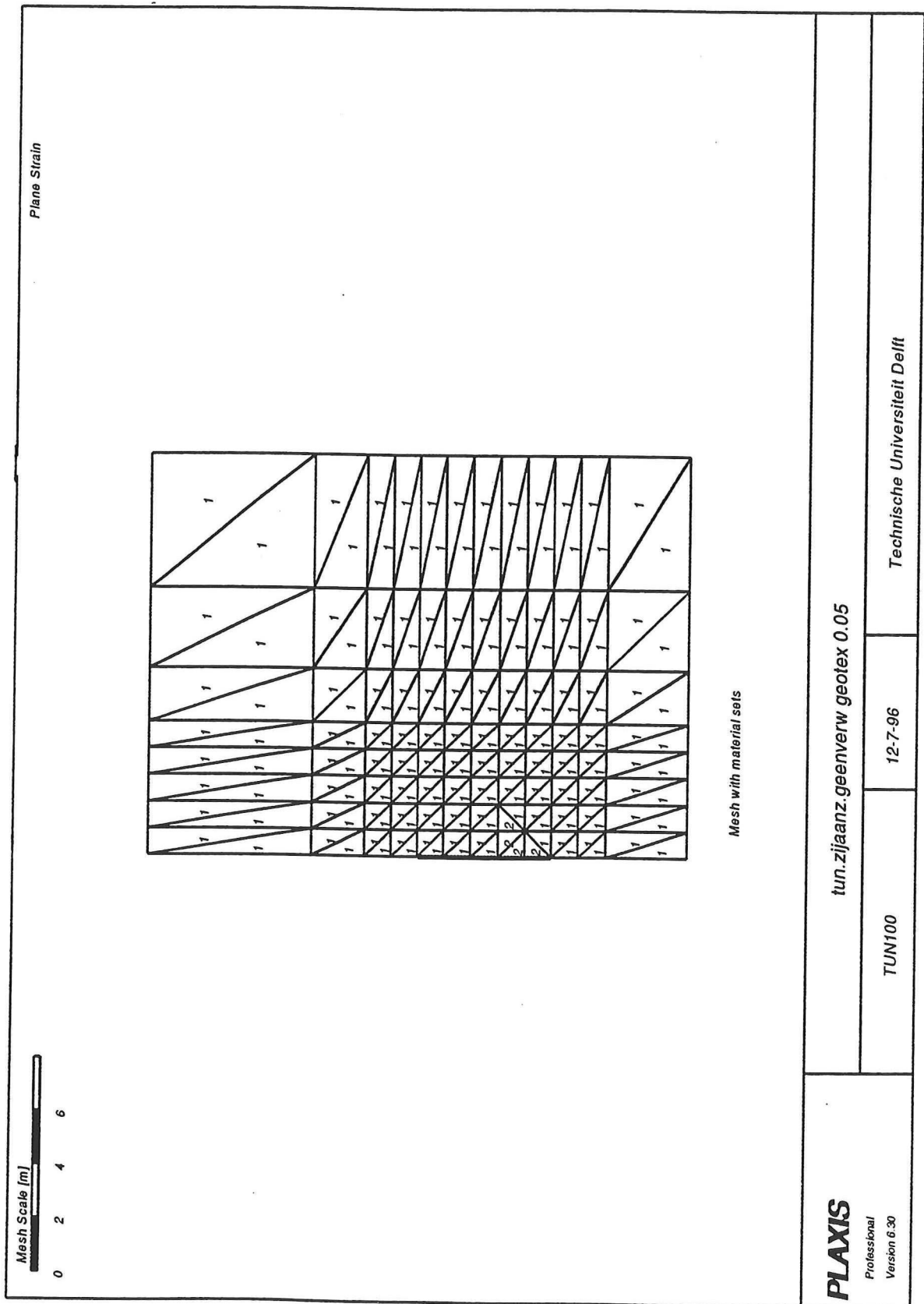
Verplaatsingen berekening A



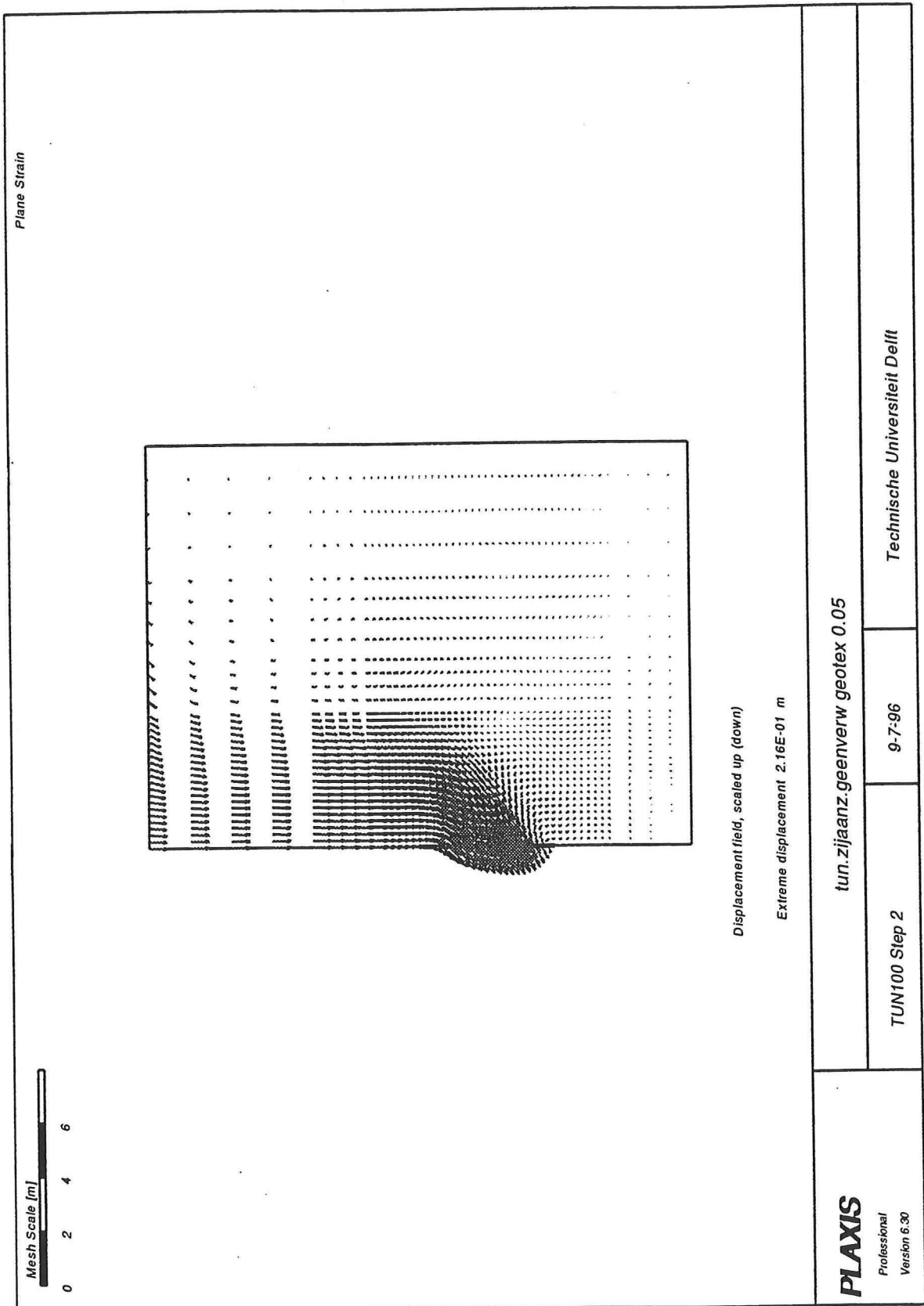
Korrelspanning berekening A



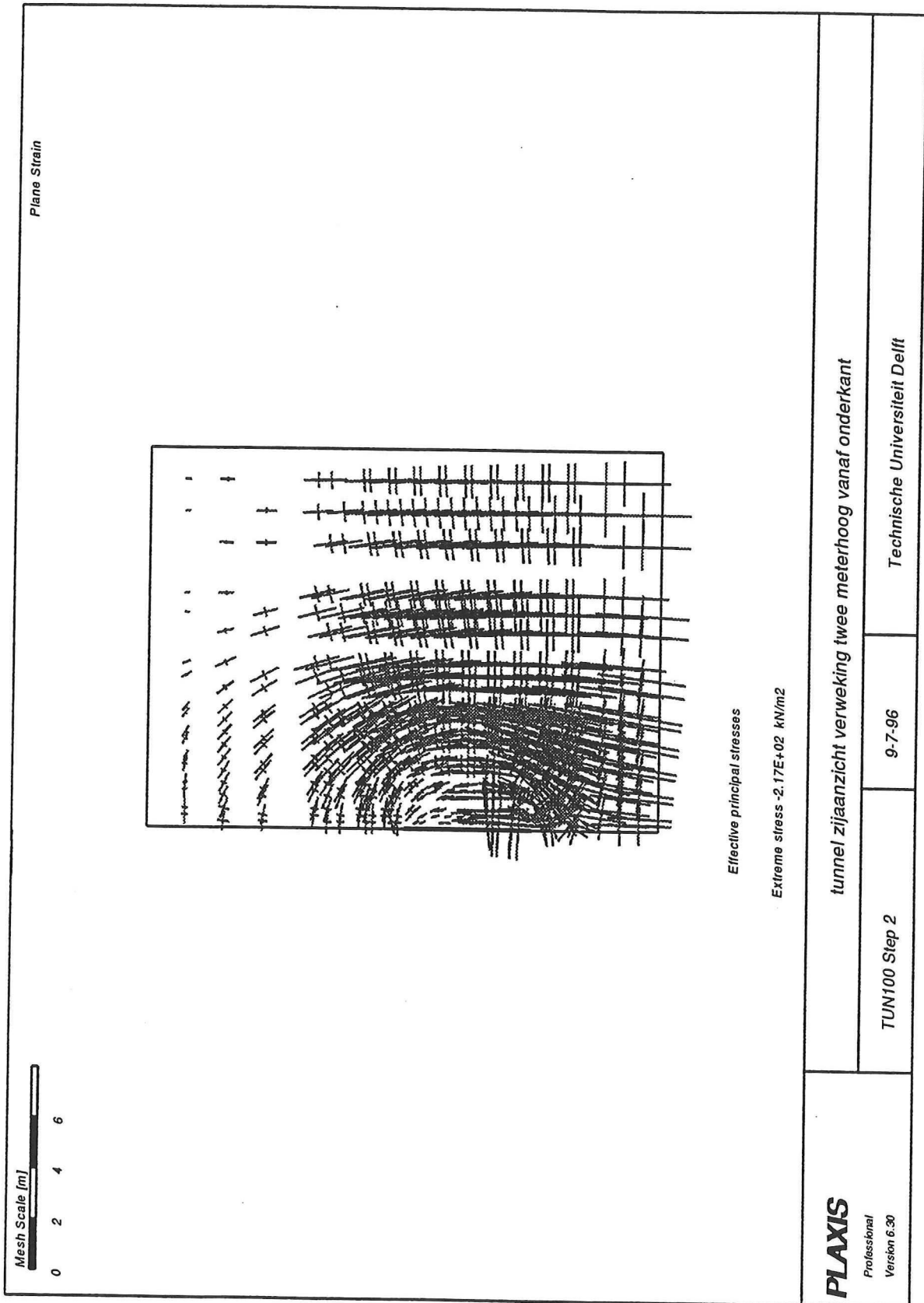
Mesh berekening A0



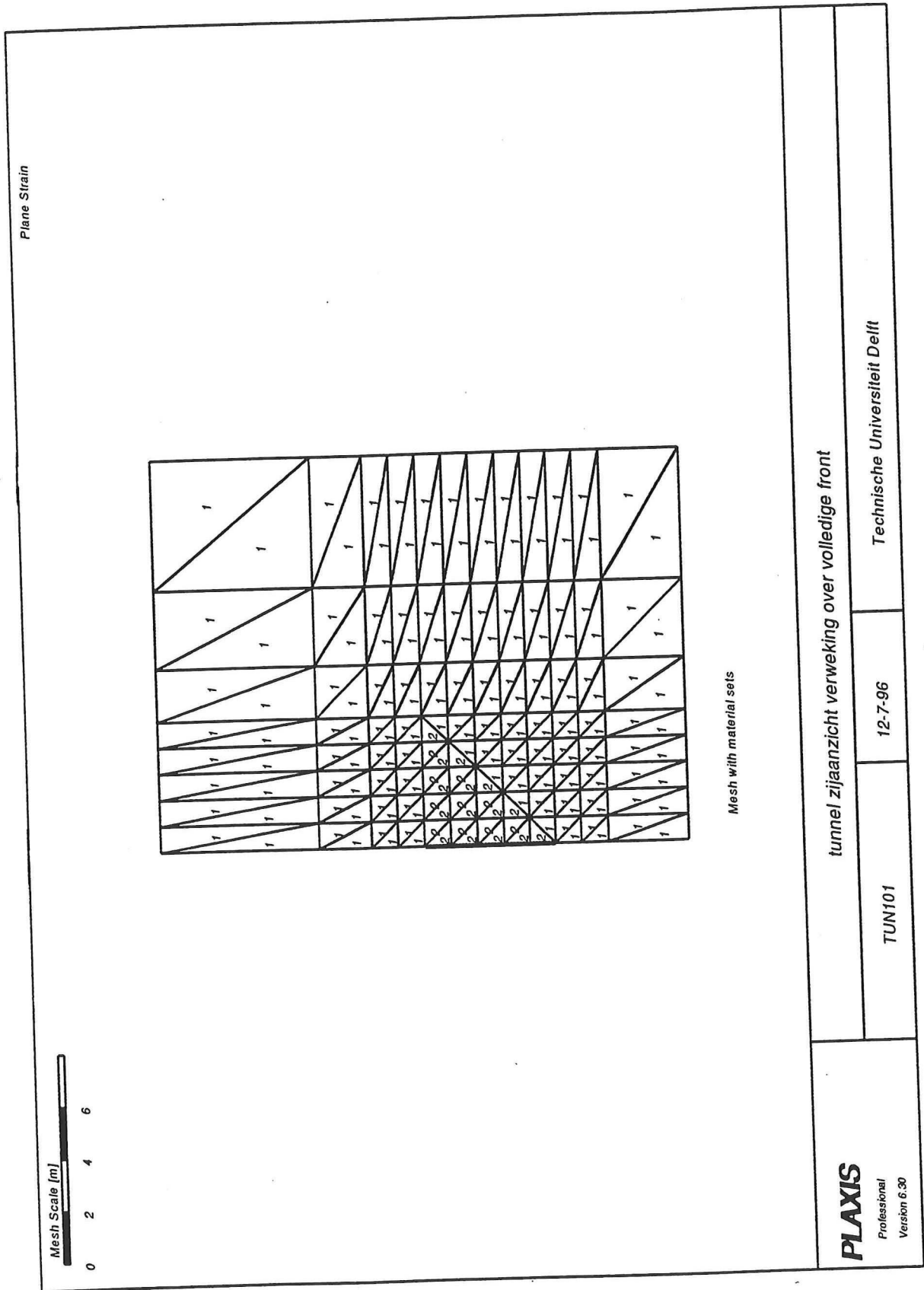
Verplaatsingen berekening A0



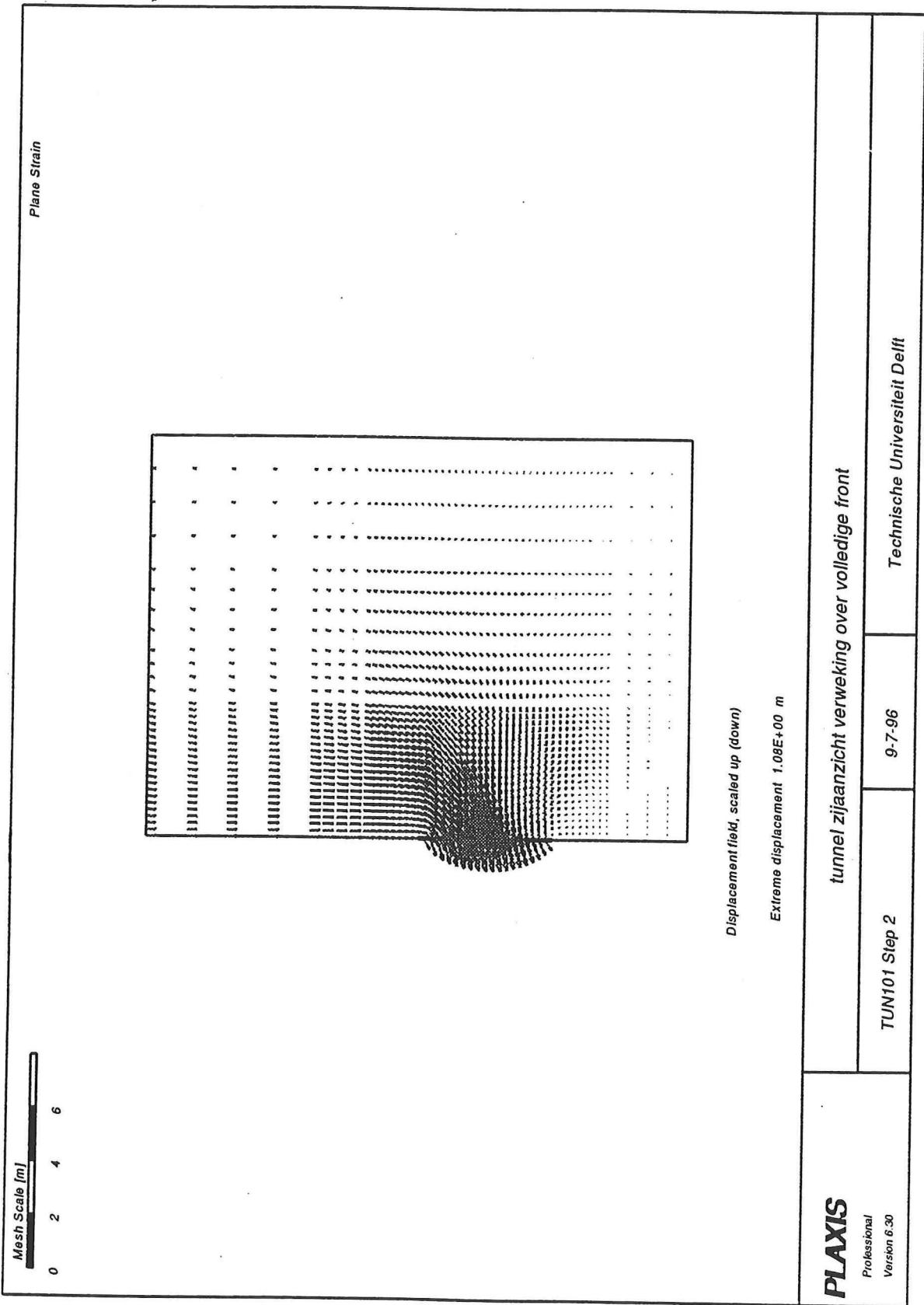
Korrelspanning berekening A0



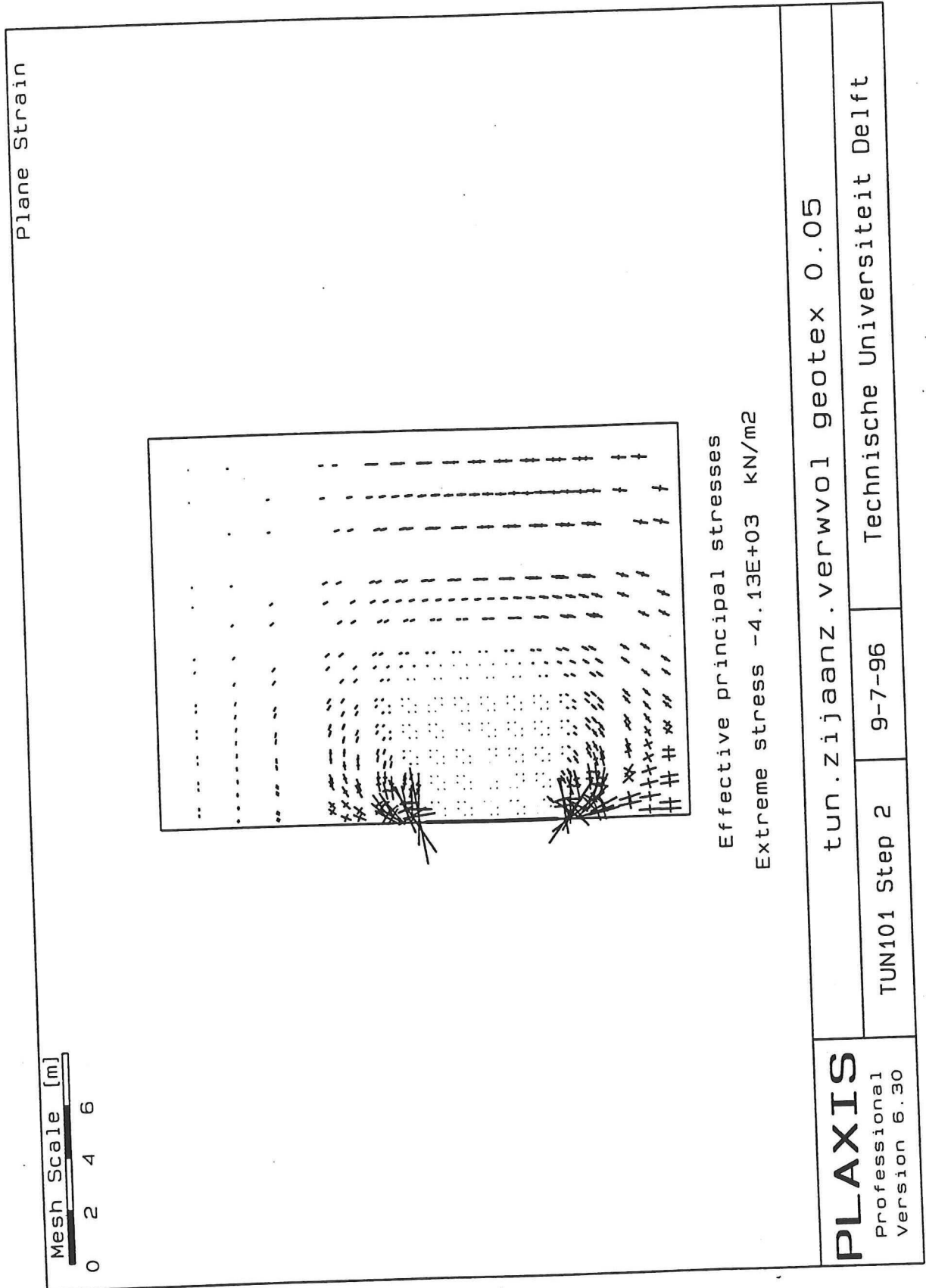
Mesh berekening A1



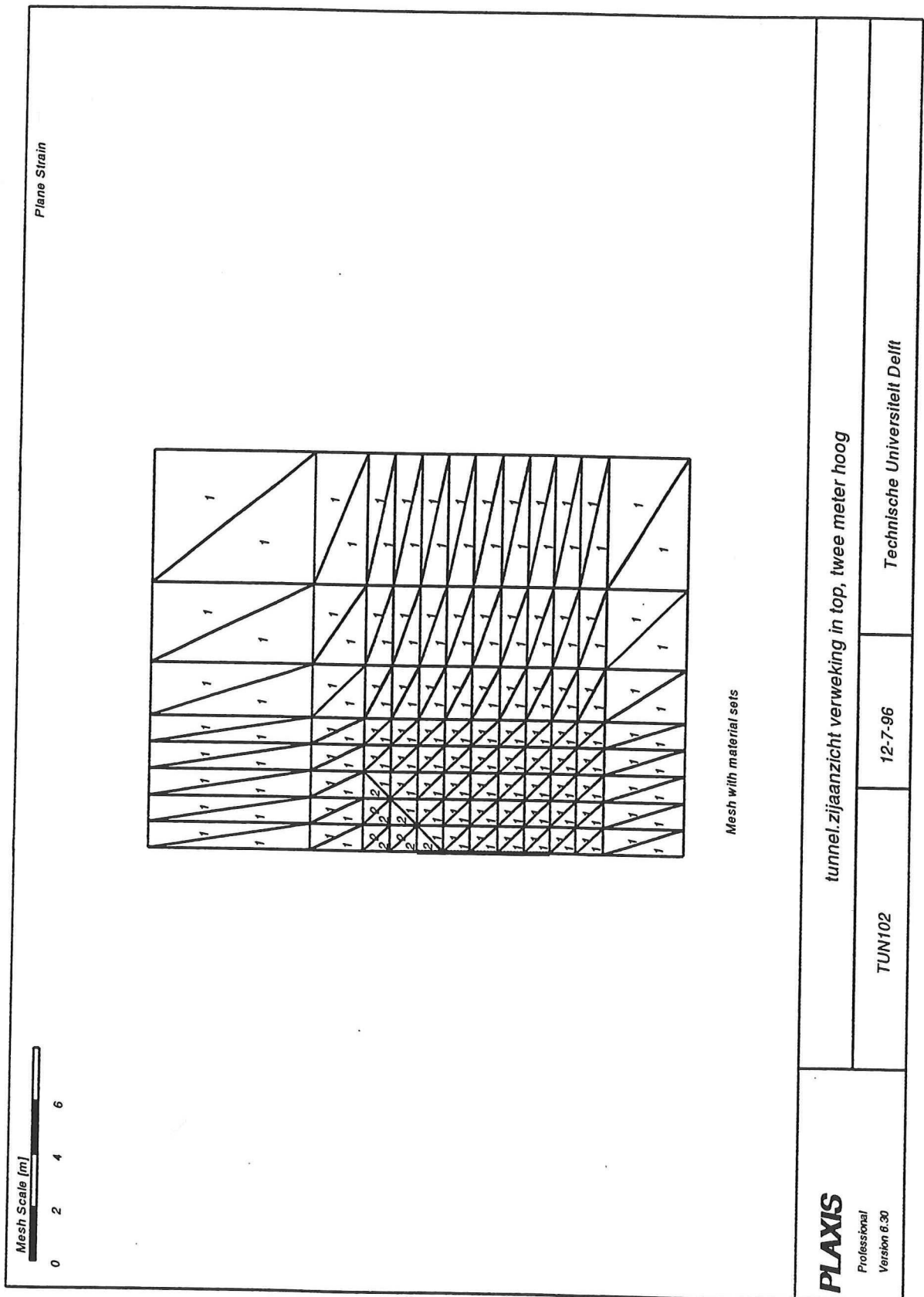
Verplaatsingen berekening A1



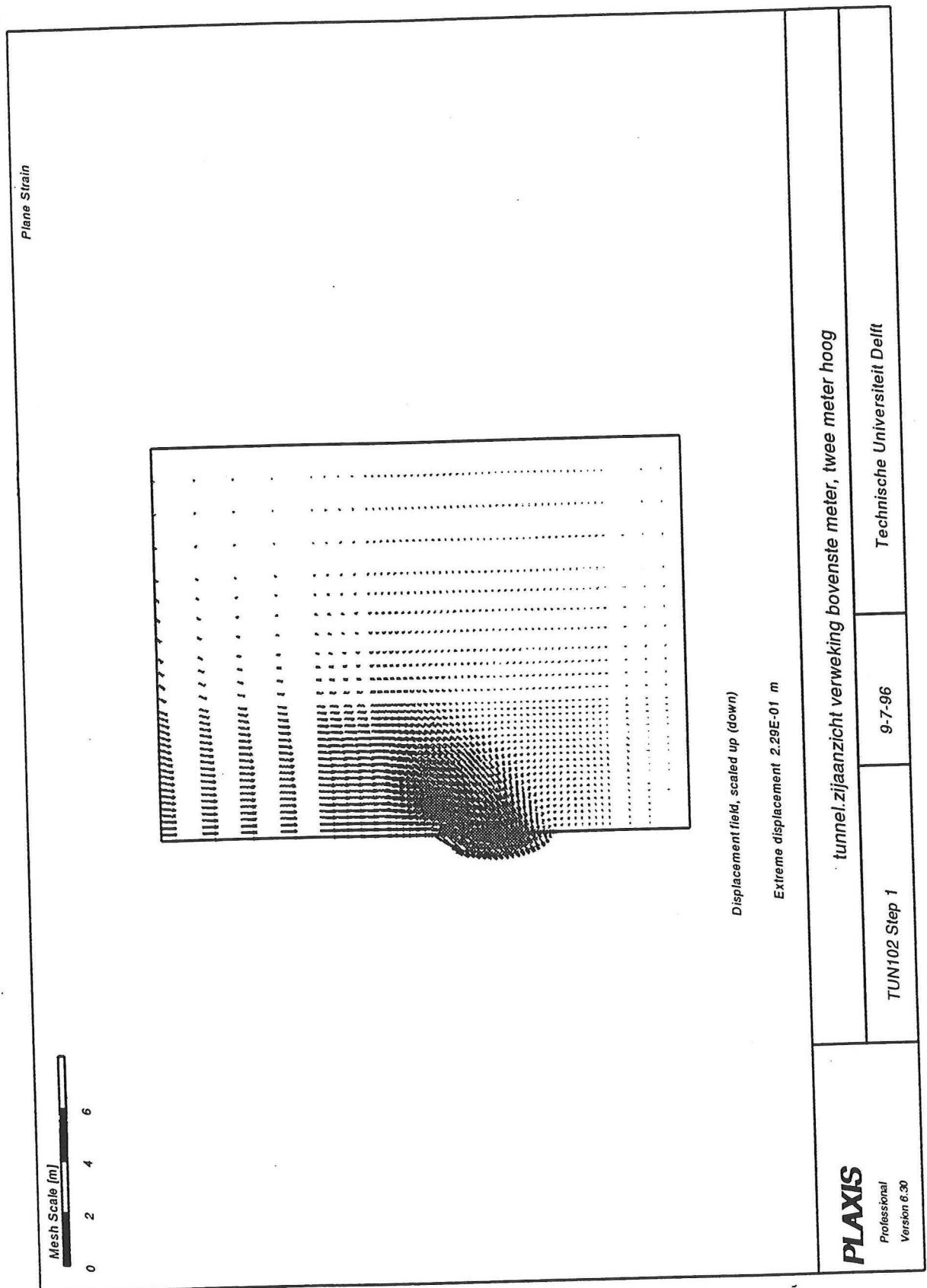
Korrelspanning berekening A1



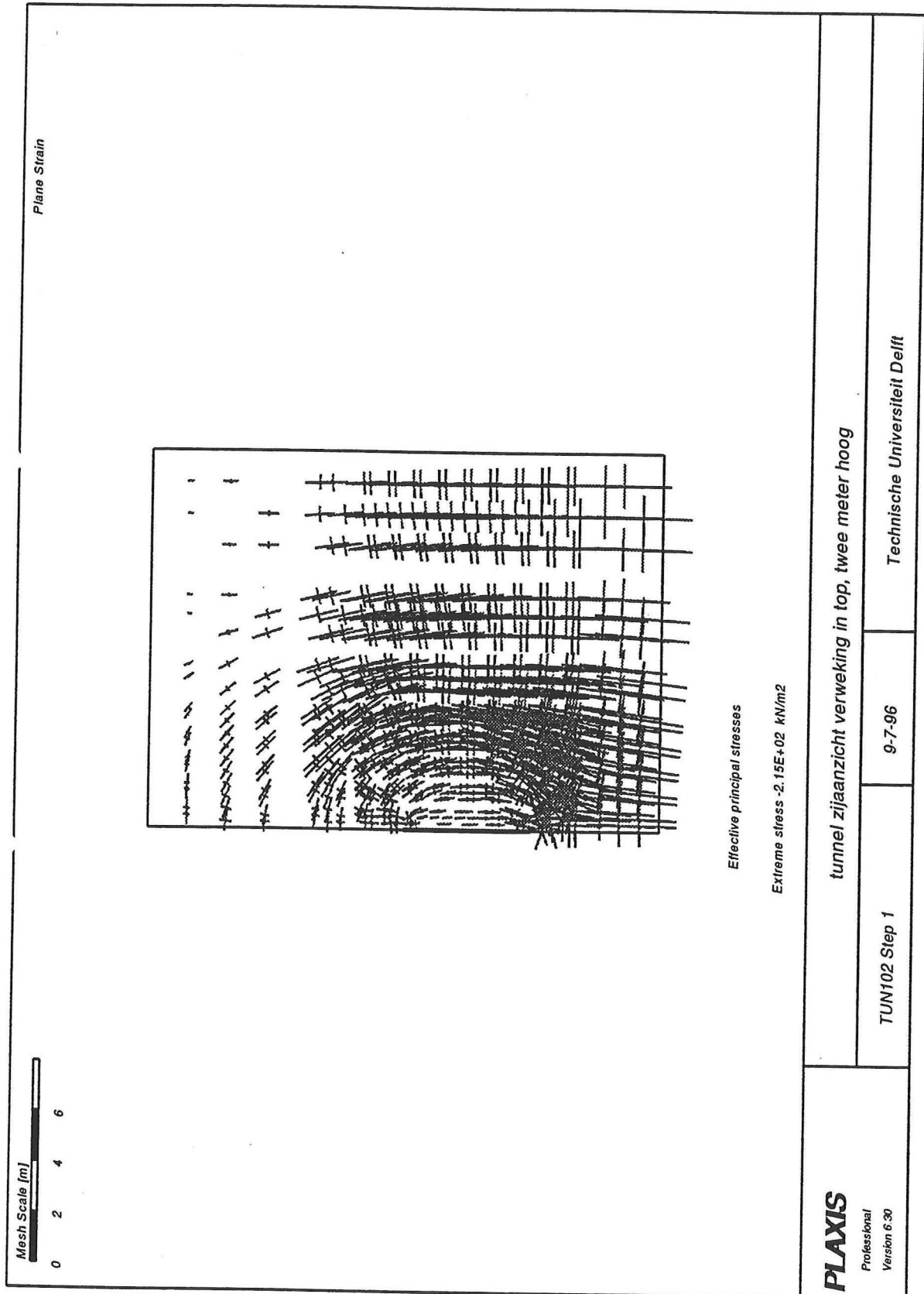
Mesh berekening A2



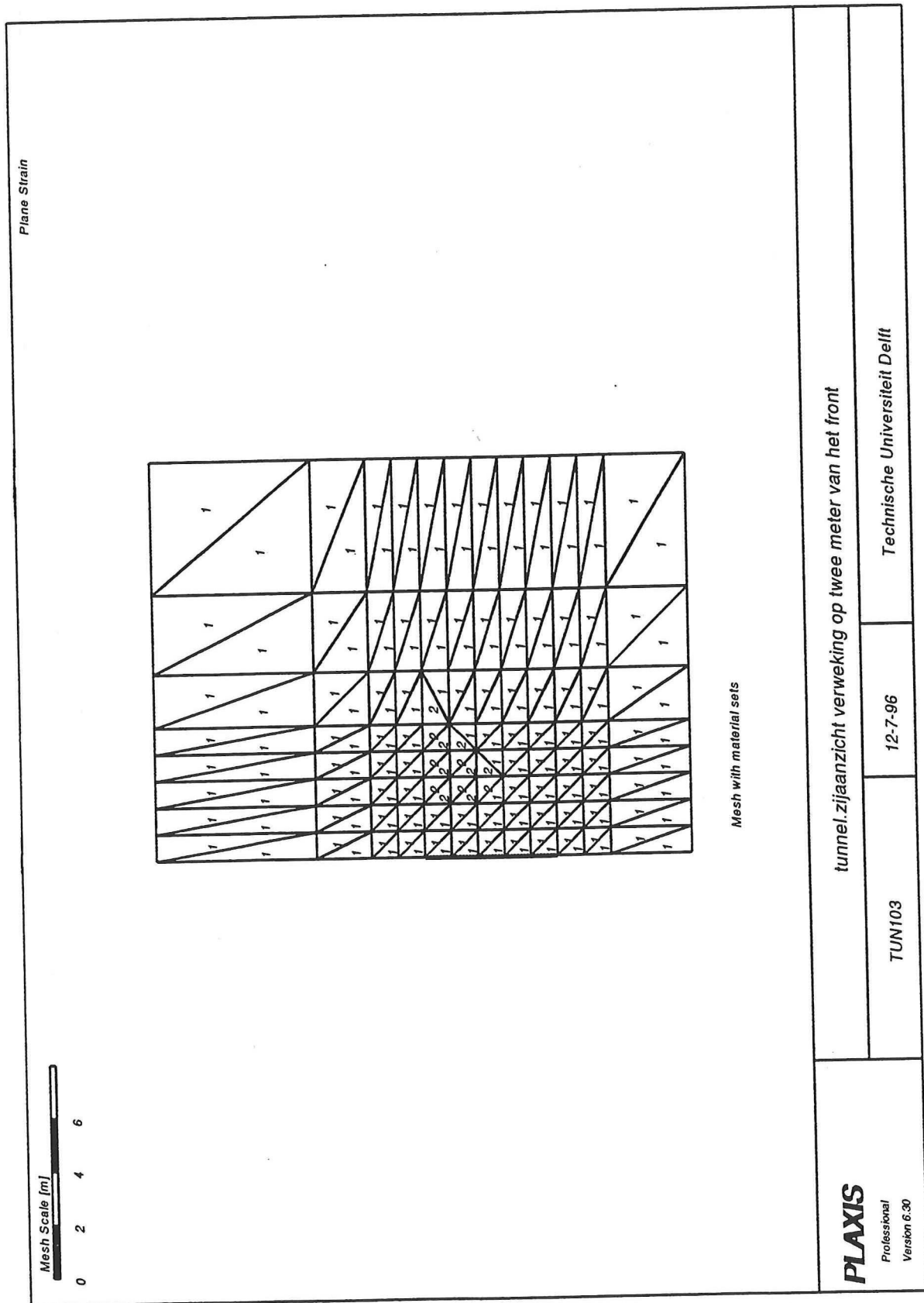
Verplaatsingen berekening A2



Korrelspanning berekening A2



Mesh berekening A3



tunnel.zijaanzicht verweking op twee meter van het front

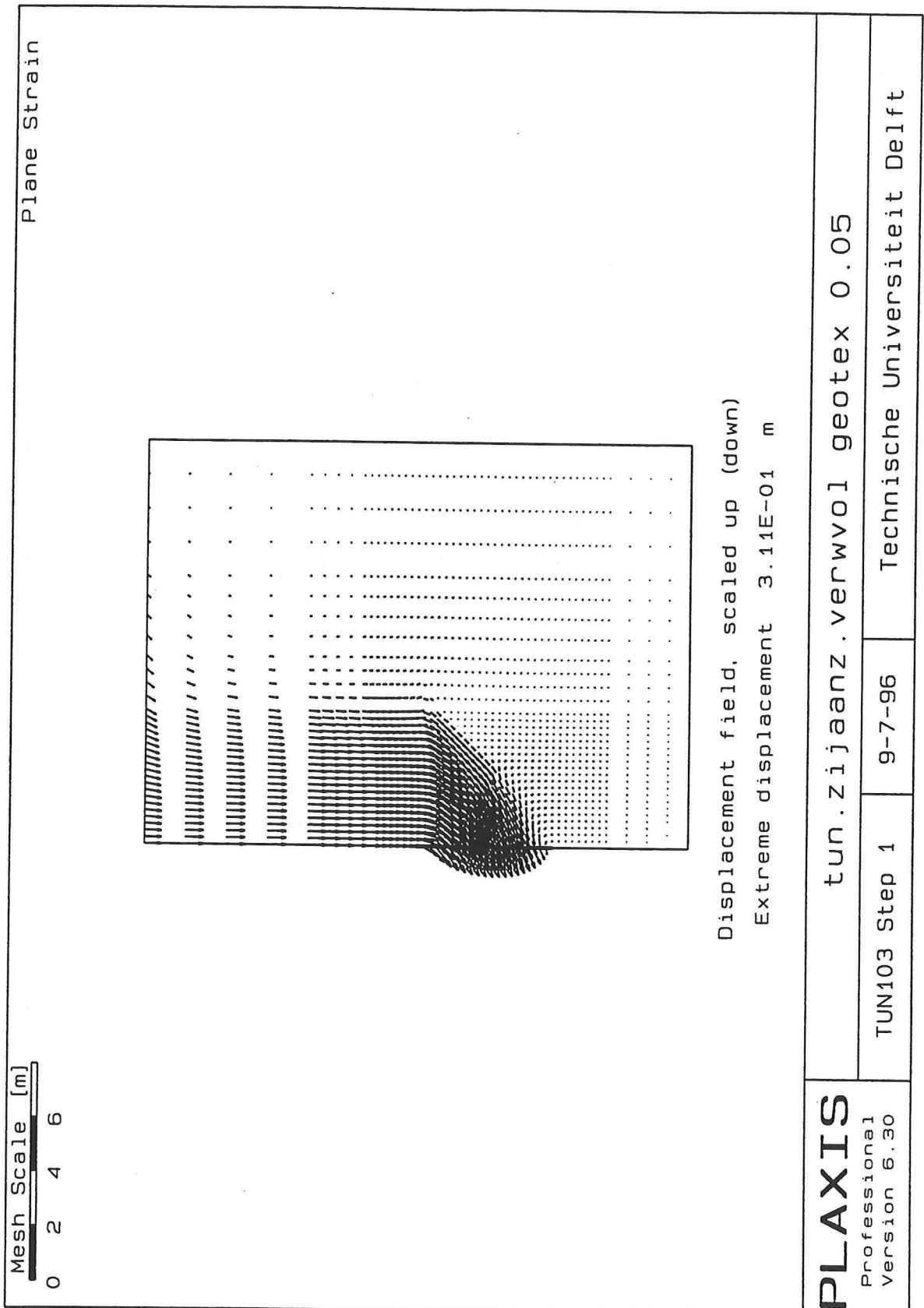
PLAXIS
Professional
Version 6.30

TUN103

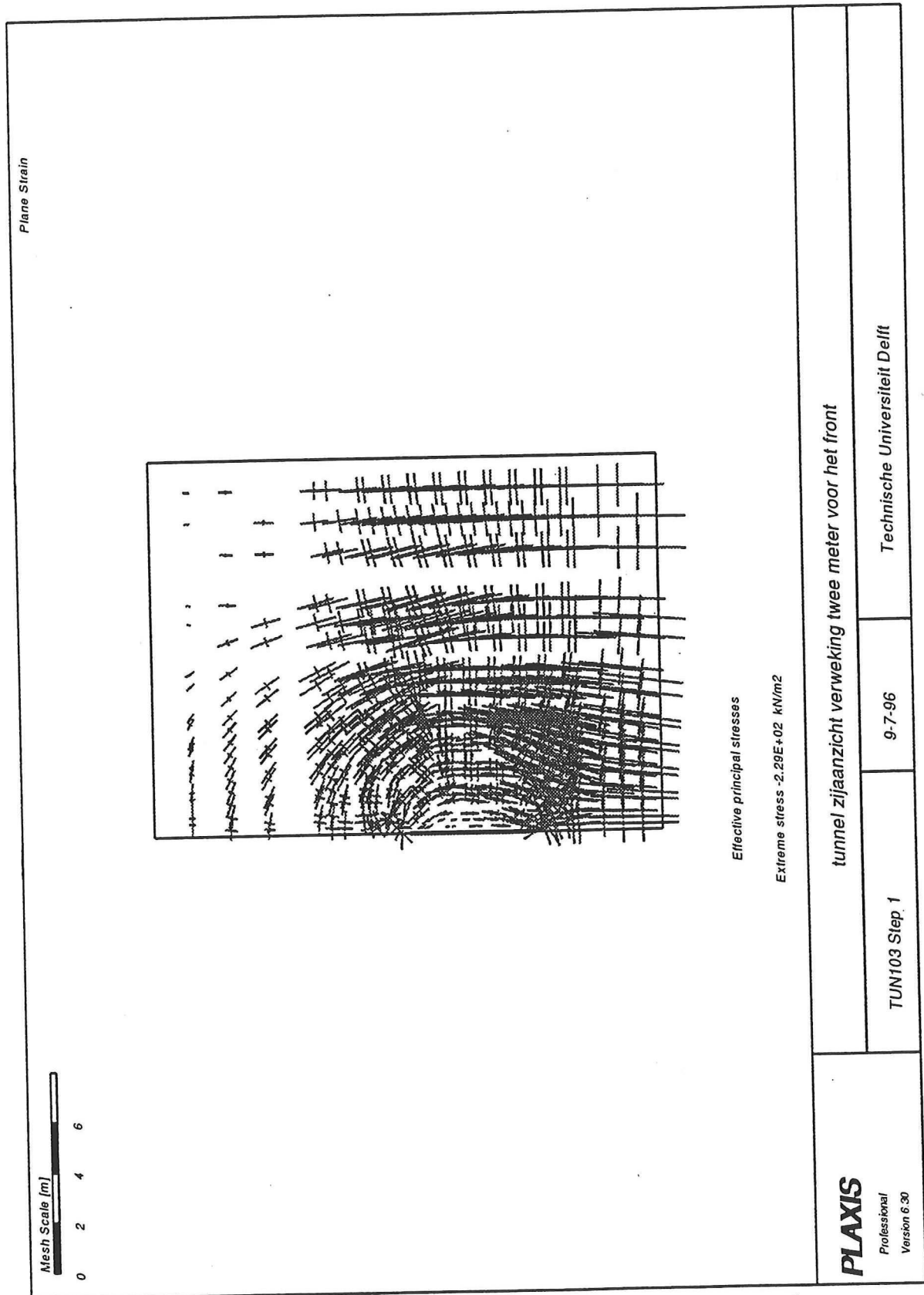
12-7-96

Technische Universiteit Delft

Verplaatsingen berekening A3

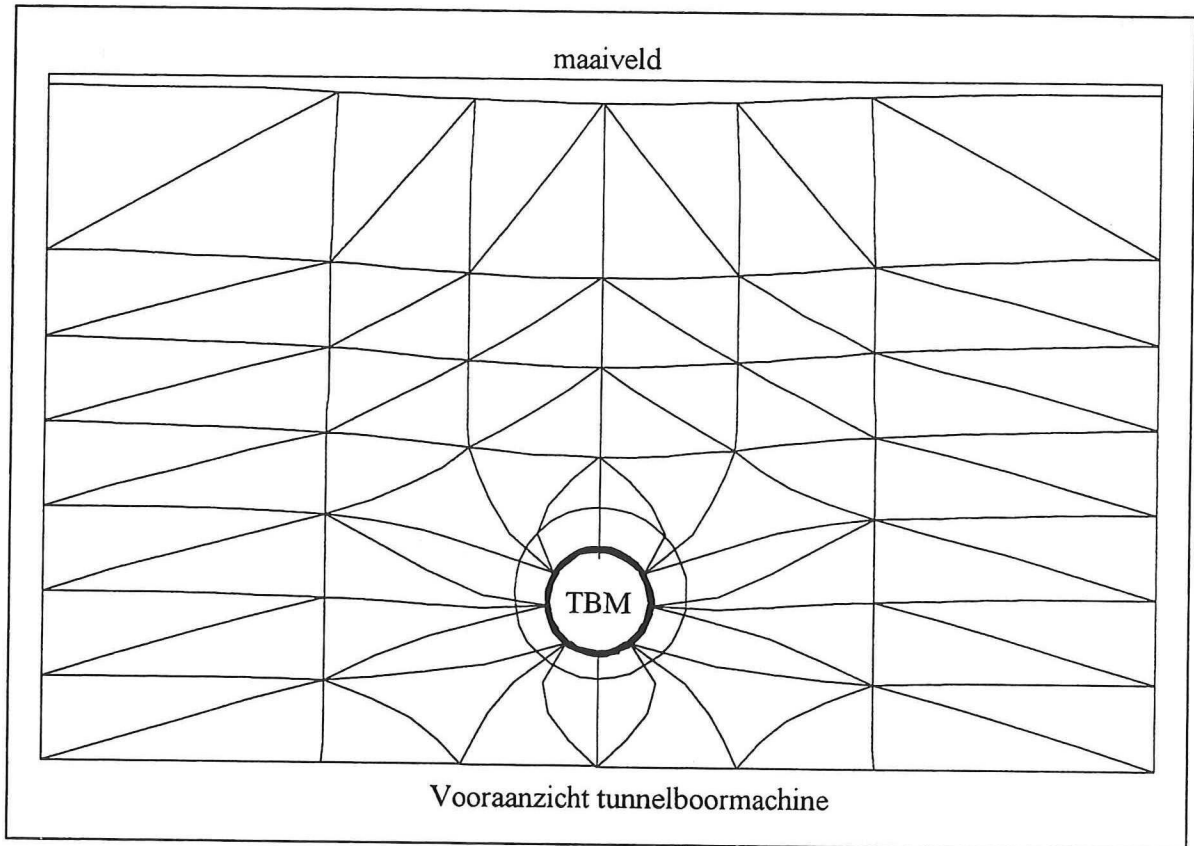


Korrelspanning berekening A3



Contractie berekening B

In deze berekening is de het gevolg van de oversnit op de maaiveldzakking gesimuleerd.



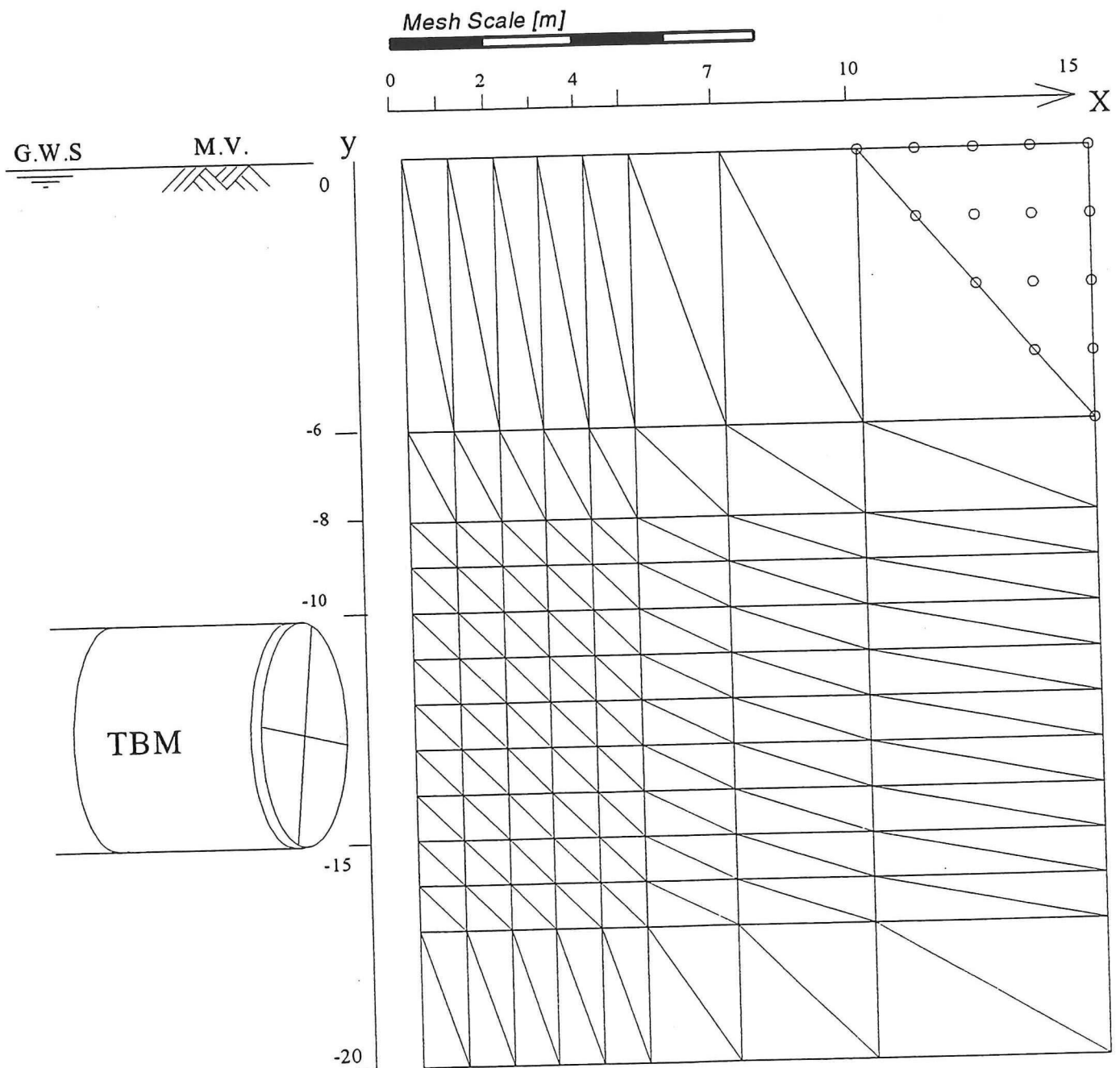
figuur (1) Maaiveldzetting bij 2% contractie

Bijlage II: Simulatie spanningswijziging

In deze simulatie is gebruik gemaakt van het eindige elementenprogramma Plaxis.
De berekening heeft dezelfde invoer als de eerder genoemde berekening A uit bijlage I.
In deze bijlage worden de spanningen weergegeven.

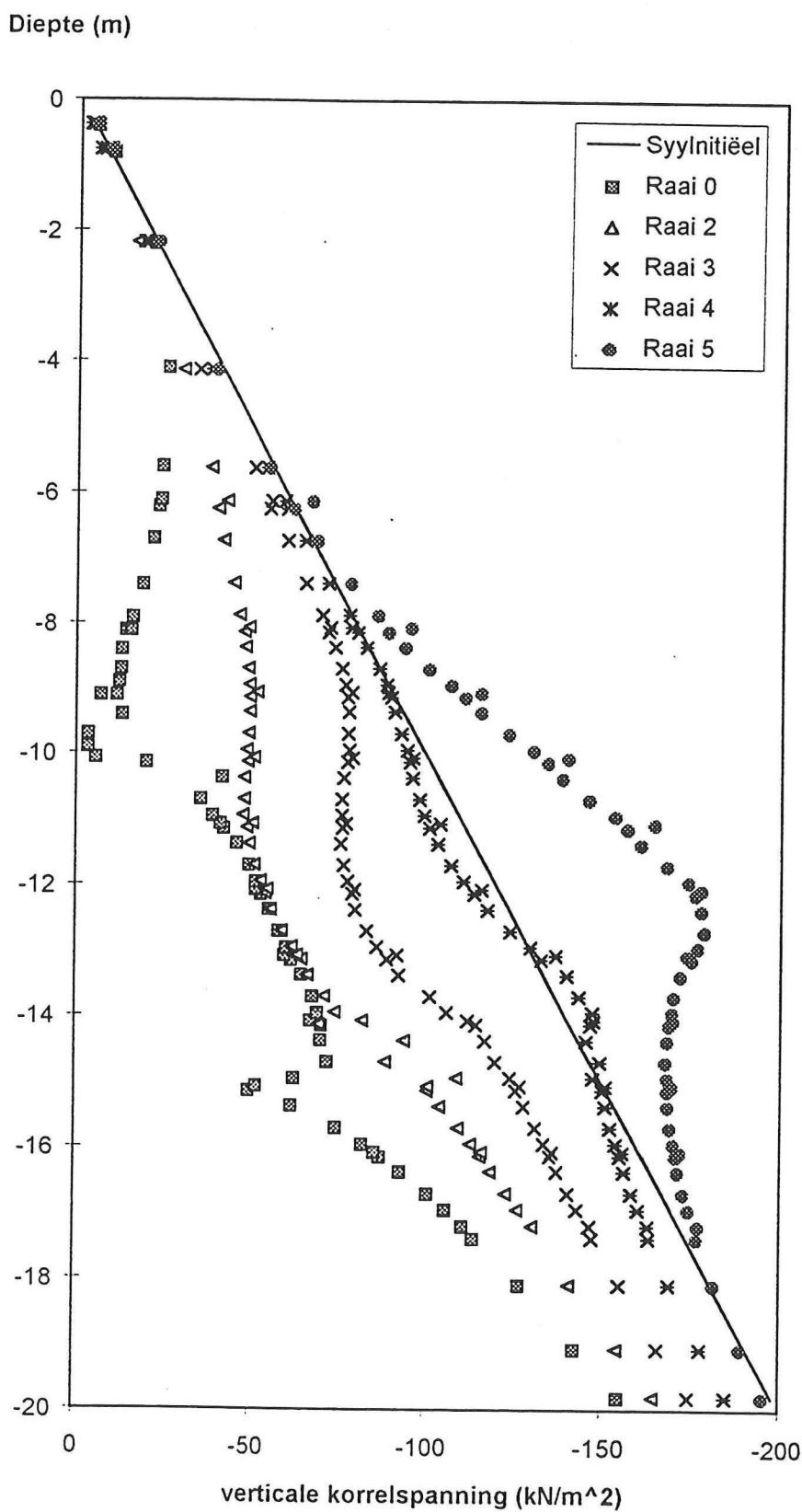
Overzicht invoer

Weergave mesh simulatie berekeningen



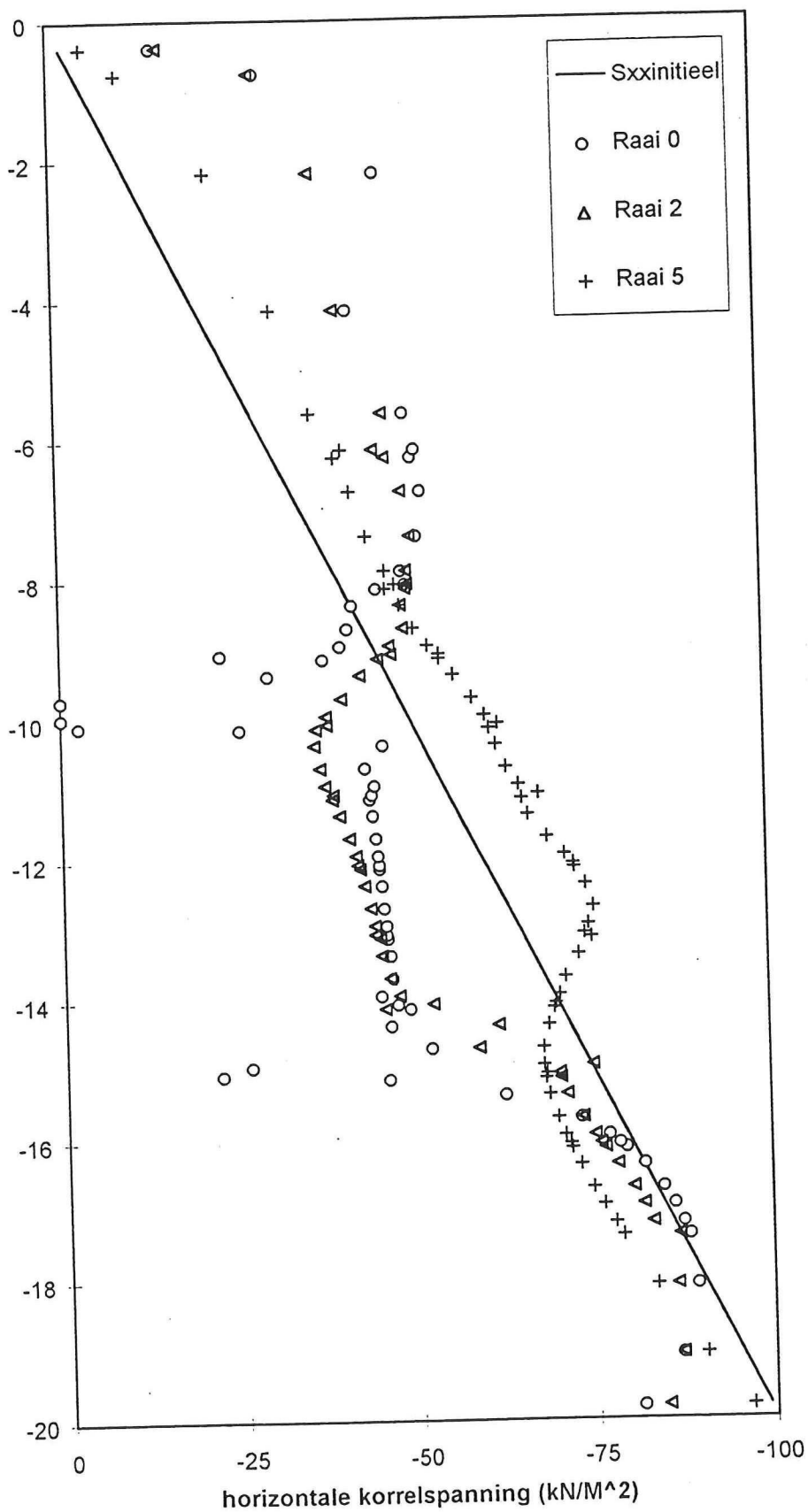
Plot of the mesh

Verzamelstaat verticale korrelspanning

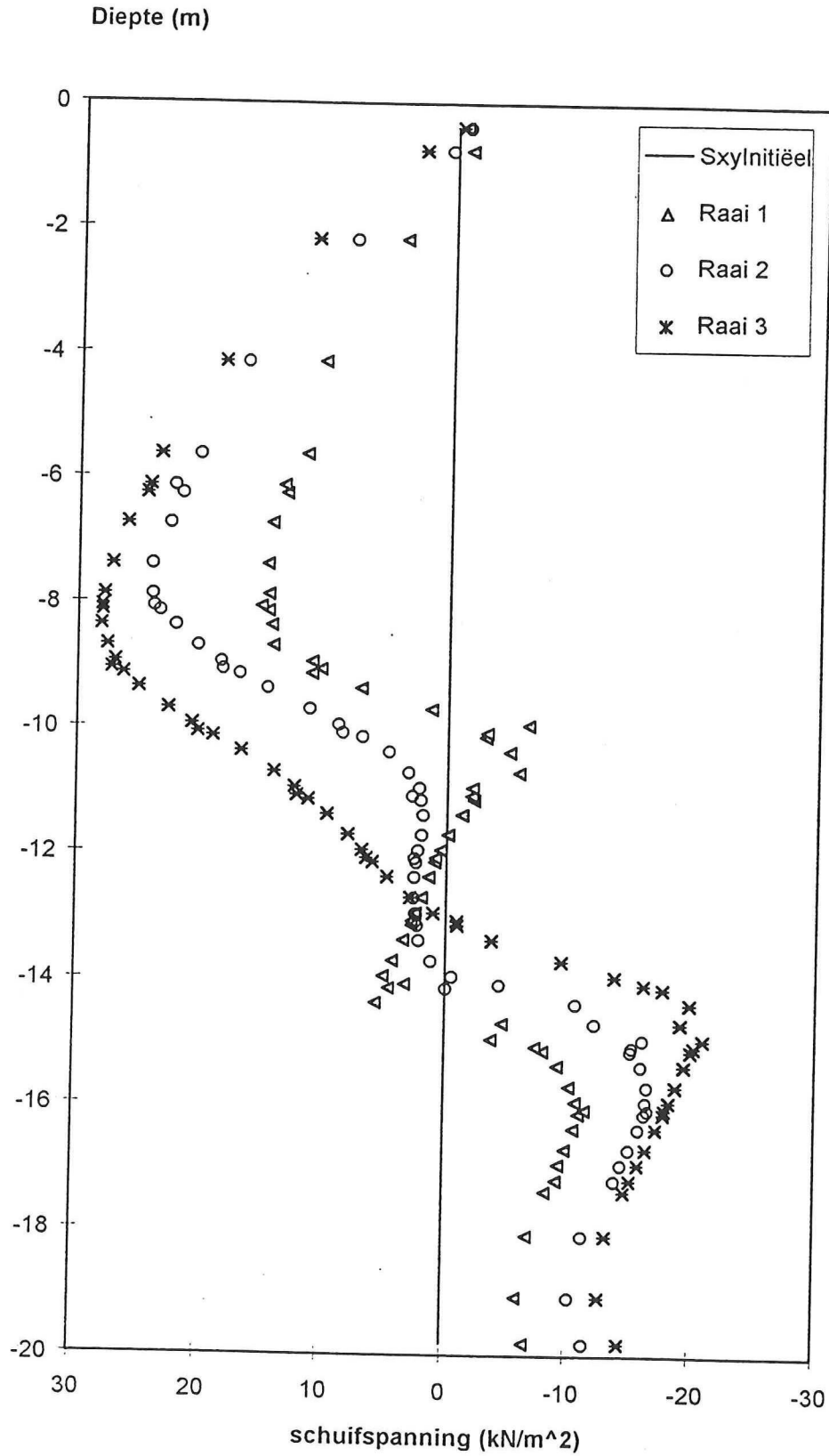


Verzamelstaat horizontale korrelspanning

Diepte (M)



Verzamelstaat schuifspanning



Bijlage III: Bepaling cyclische schuifspanning

In deze bijlage wordt de cyclische schuifspanning over de afstand tot het boorfront bepaald. Dit aan de hand van trillingsmetingen [Tunnels & Tunneling, oktober 1993] bij twee verschillende tunnelboorprojecten. Daar de metingen lokatie gebonden zijn worden deze middels harmonische relaties en een dempingsformule over de afstand bepaald. Na bepaling van het amplitude verloop over de afstand kan het cyclisch schuifspanningsverloop bepaald worden middels de aardbevingstheorie van Seed.

De trillingsmeting

De trillingsmetingen die in deze studie beschouwd worden <15> zijn echter niet gedaan in losgepakte zanden. Om dit probleem deels te ondervangen wordt die meting geanalyseerd in de grondsoort welke qua trillingseigenschappen het sterkste op losgepakt zand lijkt. De conclusies worden ook gebaseerd op deze meting. Om toch een duidelijk beeld te krijgen over hoe de grondsoort en de diameter van de tunnelboormachine de trillingen beïnvloeden worden beide metingen toegelicht.

Er worden in de volgende tekst twee metingen behandeld, te weten de metingen bij het Baltimore tunnelboorproject en het Buffalo tunnelboorproject.

| | |
|-------------------------------------|--|
| Baltimore tunnelboormachine: | dubbelschild met graafarm met luchtdruk ondersteuning, later omgebouwd tot roadheader met schild in luchtdruk ondersteuning. |
| Tunnel diameter: | 6.5 meter |
| Dekking: | 16.1 - 17.8 meter |
| Grondsoort: | zeer dicht gepakt siltig zand en siltige gravel onderliggende een harde siltige kleilaag en een kleige siltlaag. |
| Buffalo tunnelboormachine: | TBM |
| Tunnel diameter: | 5.6 - 5.7 meter |
| Dekking: | 7.8 meter gemiddeld |
| Grondsoort: | Zuiver limestone en dolostones |

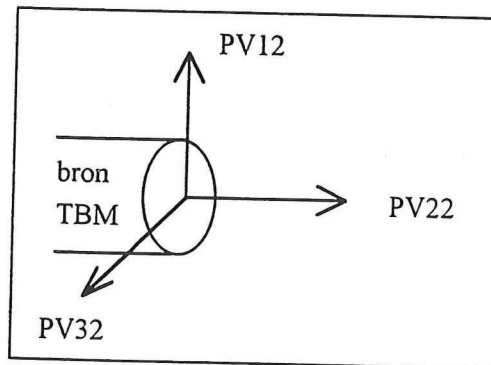
Uitvoering van de metingen

Aangenomen wordt dat de door de tunnelboormachine opgewekte trillingen harmonisch zijn. Bij het meten van harmonische trillingen kan gedacht worden aan:

| | |
|----------------------------|-------------------------------------|
| peak particle velocity | (PPV) maximale deeltjessnelheid |
| peak particle acceleration | (PPA) maximale deeltjesacceleratie |
| peak particle displacement | (PPD) maximale deeltjesverplaatsing |
| frequency | frequentie |

Een veel uitgevoerde meting is de meting van de deeltjessnelheid en de frequentie. De piekwaarde van de deeltjessnelheid geeft daarbij de maximale deeltjessnelheid aan.

In dit project is een snelheidsmeting toegepast. De meetposities liggen op drie loodrecht ten opzichte van elkaar staande assen, zoals aangegeven in de figuur.

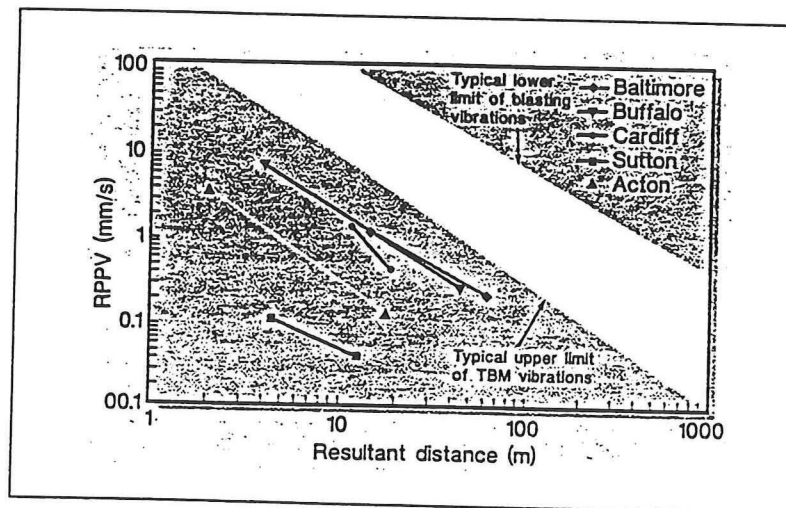


figuur (2) Schema meetassen t.o.v. bron

De resultaten hiervan zijn met behulp van de volgende relatie verwerkt:

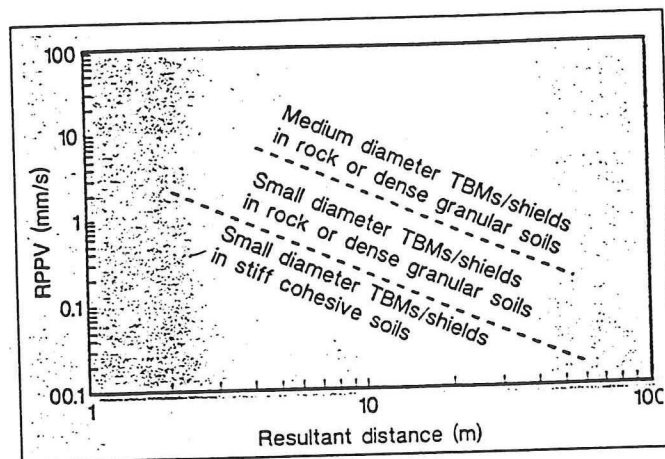
$$\text{Resultante PPV} = (\text{PV12} + \text{PV22} + \text{PV32})^{1/2} \quad [1]$$

De volgende figuur geeft een overzicht van de resultante piekdeeltjessnelheid (RPPV) over de afstand tot de trillingsbron. In de figuur wordt ook een bovengrens aangegeven voor de deeltjessnelheid, opgewekt door een tunnelboormachine. Hierbij zij wel opgemerkt dat 60% van de PPV in verticale richting zijn gemeten. De demping is in horizontale richting dus sterker dan in de verticale richting. Tussen de beide richtingen is geen onderscheid in pieksnelheden te maken. De figuur is gebaseerd op metingen op een afstand van 5 tot 45 meter van de bron.



figuur (3) TBM/schild trillingsverloop over de afstand tot bron

Uit deze metingen is een grensgebied van de te verwachten deeltjessnelheden over de afstand opgesteld aan de hand van de tunnelboormachine diameter en de te boren grondsoort.



figuur (4) Vibraties in bodem opgewekt door kleine tot middelgrote diameter TBM

Er wordt in deze figuur een onderscheid gemaakt tussen:

- * middel grote diameter (circa 6 meter)
- * kleine diameter boormachine (circa 2 meter)

De grondsoort wordt onderverdeeld in:

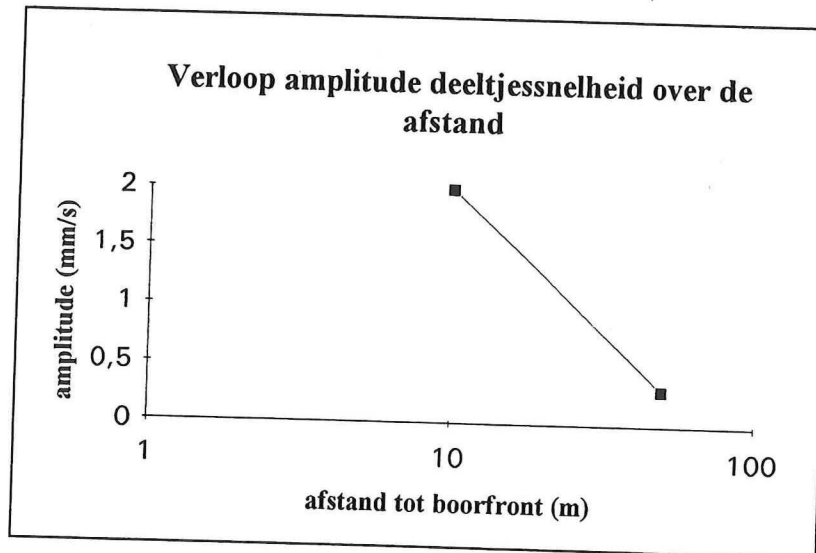
- * rots / dichtgepakte granulaire bodem
- * stijve cohesieve grondsoorten

Als bovengrens voor trillingen ten gevolge van tunnelboringen volgt uit de figuur een resultantedeeltjespieksnelheid van 10 mm/s op een afstand van 10 meter van de bron. Verder is de bovengrens voor de resultantedeeltjespieksnelheid op 50 meter afstand van de bron gesteld op 1 mm/s. De bovengrens wordt in harde bodems bereikt.

Om een uitspraak over de deeltjessnelheid voor tunnelboringen in granulaire bodems te kunnen doen wordt nu verder gewerkt met een bovengrens. Deze is gebaseerd op de ondergrens zoals die is opgesteld voor de kleine diameter tunnelboormachine in dichtgepakte granulaire bodems, de onderste stippellijn in bovenstaande figuur. Van de drie bodemsoorten die aangegeven zijn in de bovenstaande figuur komt deze het meest overeen met losgepakt zand. De ondergrens is gekozen omdat de amplitude in losgepakt zand vermoedelijk lager ligt.

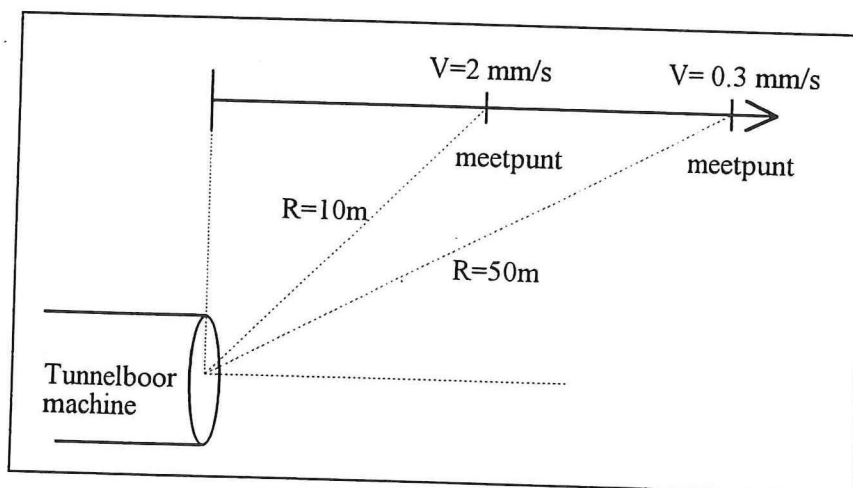
Bovengrens deeltjessnelheid over de afstand in granulaire bodems

De bovengrens van de deeltjessnelheid voor tunnelboringen in granulaire bodems ligt op 10 m afstand op 2 mm/s en op 50 m op 0.3 mm/s. Het verloop wordt logaritmisches over de afstand verondersteld.



figuur (5) Bovengrens deeltjessnelheid ten gevolge van vibraties in de bodem opgewekt door kleine tot middelgrote diameter TBM

Schematisch weergegeven:



figuur (6) schema bovengrens snelheidsamplitude over de afstand tot het boorfront uit trillingsmeting voor tunnelboring in granulaire bodem

Daar de trillingen harmonisch verondersteld worden zijn aan de hand van deze gegevens de verplaatsing of de versnelling te bepalen middels de volgende relaties:

$$\text{verplaatsing} \quad : \quad x(t) = A \sin(t + \omega) \quad (\text{m}) \quad [2]$$

$$\text{snelheid} \quad : \quad v(t) = \omega A \cos(t + \omega) \quad (\text{m/s}) \quad [3]$$

$$\text{versnelling} \quad : \quad a(t) = -\omega^2 A \sin(t + \omega) \quad (\text{m/s}^2) \quad [4]$$

A staat voor maximale uitwijking (m)

ω staat voor de hoeksnelheid = 2π * frequentie (Hz), ω in (rad/sec).

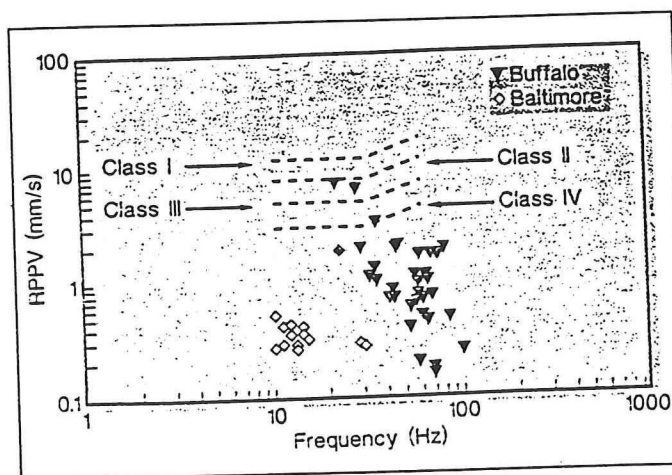
Voor de amplituden qua verplaatsing, snelheid en versnelling geldt dus de volgende relatie:

$$\left| v_{\max} \right| = \omega A \quad [5]$$

$$\left| a_{\max} \right| = \omega^2 A \quad [6]$$

Frequentie meting

Naast de snelheid is voor de twee projecten ook de frequentie meting uitgevoerd. De resultaten daarvan zijn weergegeven in de onderstaande figuur. Bij de frequentie metingen van de tunnelboormachines zijn vibraties gemeten tussen de 1 en 100 Hz. De volgende figuur laat van verschillende machines het frequentie en trillingsbereik zien, gemeten in gebouwen aan het oppervlak. De afstand tot de bron is onbekend.



figuur (7) TBM/Schild vibratie effecten op gebouwen

De frequenties zijn gemeten in gebouwen op maaiveld. Aangenomen wordt dat de bodem dezelfde vibratie ondervindt als gemeten in de gebouwen. De geldigheid van deze aanname is niet onderzocht. Het meting van trillingen in de bodem is moeilijker, omdat de meters lang van te voren meters geplaatst moeten worden. Wanneer de meters pas geplaatst zijn is er nog niet voldoende contact met de bodem en worden de trillingen niet goed overgebracht op het instrument.

Aannamen trillingen veroorzaakt door tunnelboormachines:

Aangenomen wordt dat de tunnelboormachine welke toegepast wordt in verwekingsgevoelige grond trillingen veroorzaakt met een frequentie tussen de 10 en 30 Hz, waarbij de maximale deeltjessnelheden worden bereikt bij frequenties tussen de 10 en 20 Hz.

Verplaatsingsamplitude verloop over de afstand

Aan de hand van metingen van de deeltjessnelheid en de frequentie wordt nu het amplitudeverloop van de verplaatsing bepaald. Om een uitspraak over de verplaatsing en daarmee de versnelling aan het front te kunnen doen moet met een voortplantingsformule teruggerekend worden naar het front. Hiervoor worden de relaties voor voortplanting van trillingen tijdens heiprocesen toegepast. Dit vanwege de beperking dat er alleen beschikking was over twee meetpunten.

De verplaatsingsamplitude wordt bepaald volgens de relatie:

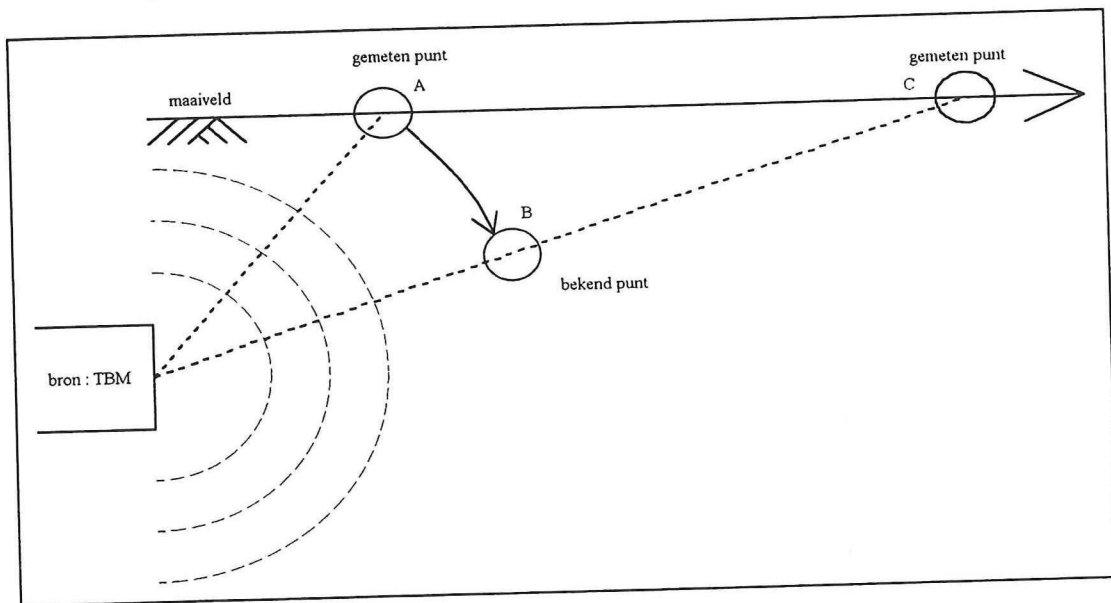
$$|A_{\max}| = \frac{|V_{\max}|}{2\pi f} \quad [7]$$

Het verplaatsingsamplitudeverloop wordt beschreven door:

$$A(x) = A_0 \exp\left[\frac{-2\pi f(x - x_0)\zeta}{c}\right] \quad [8]$$

- A_0 verplaatsingsamplitude op $x = x_0$
- f frequentie in Hz
- x afstand tot de bron in m
- x_0 referentie afstand tot de bron in m
- ζ demping (hesteretisch)
- c voortplantingssnelheid van de trilling in de bodem in m/s

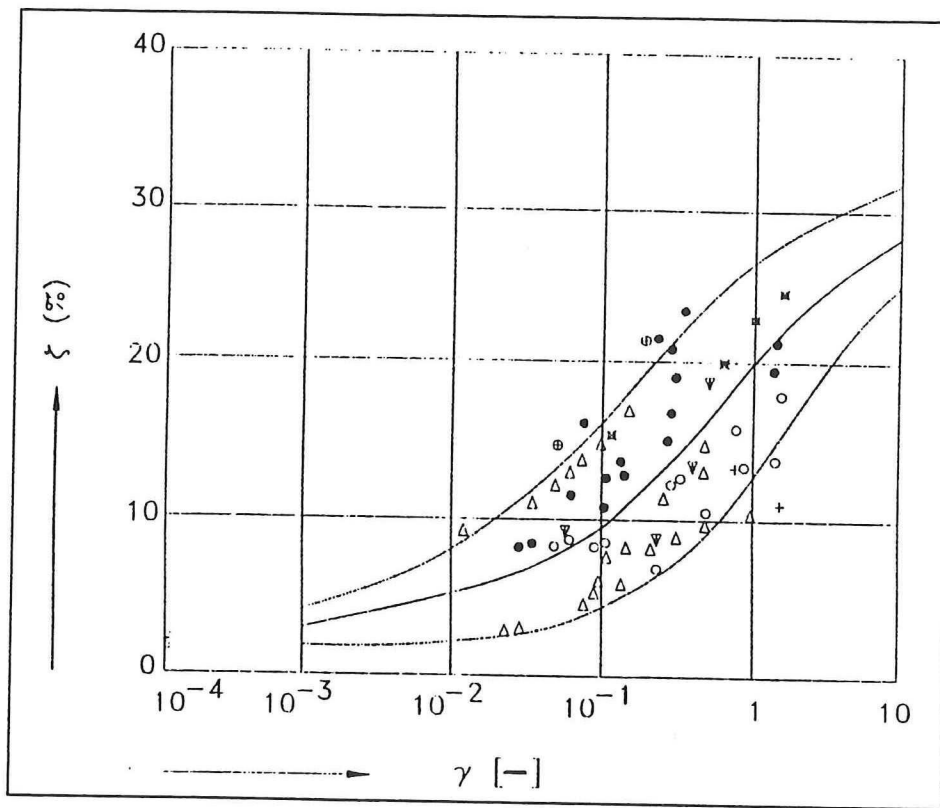
De vertaling over de afstand geschiedt als volgt:



figuur (8) schema trillingsberekening

Wanneer de amplitude in een punt bekend is en tevens de demping over een traject, kan de amplitude in elk punt op dit traject berekend worden. Ook is het mogelijk de amplituden in twee punten te meten en aan de hand daarvan de demping bepalen op het tussenliggende traject te bepalen, zodat de amplituden over het gehele traject bepaald kunnen worden. Daar de voortplantingstheorie uitgaat van een bolvormige verplaatsing, is de amplitude geldig op een bol met een straal gelijk aan de afstand van bron tot meetpunt. In de figuur is de gemeten amplitude in punt A gelijk gesteld aan de amplitude in punt B.

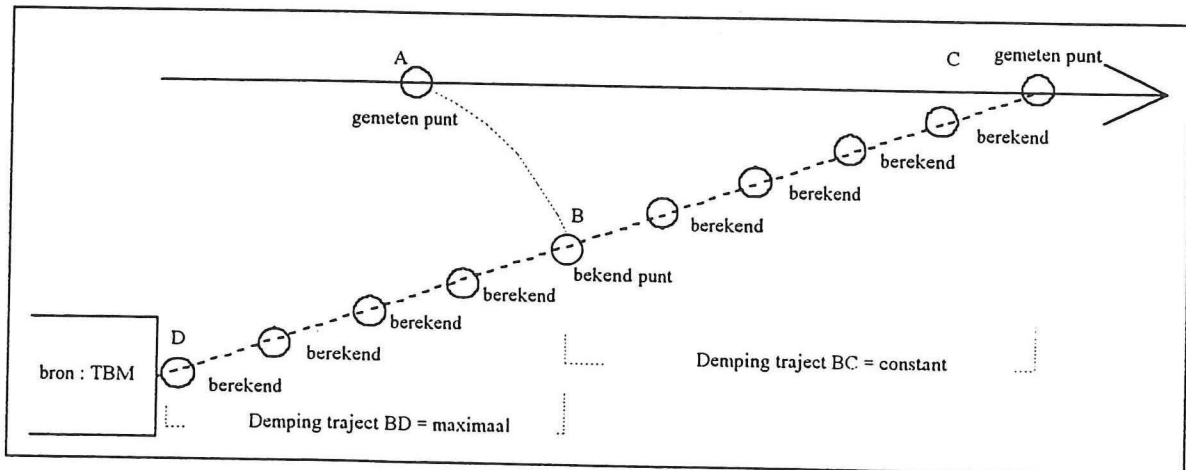
De demping is op traject BC constant verondersteld. Dicht bij het front echter kan de vervorming aanzienlijk groter zijn. Daar de demping in de bodem sterk afhangt van de vervorming (vervormingsafhankelijke demping = histeretische demping), is de aanname van een constante demping niet meer geldig op het laatste deel tot het front. De dempingsfactor in de aangegeven relatie is afhankelijk van de schuifrek die de trilling kan veroorzaken in diezelfde bodem. In de volgende figuur is de relatie aangegeven tussen de dempingsfactor en de schuifrek, hier aangeduid als de vervormingshoek γ .



figuur (9) De dempingsmaat als functie van de vervormingshoek

Uit de numerieke modellering (zie berekening A, bijlage I) blijkt dat de vervorming in de laatste meters tot het front sterk toeneemt. Om een bovengrens voor de versnelling te bepalen wordt de demping ten gevolge van de vervorming op de laatste meters tot het front maximaal verondersteld. De maximale demping wordt bereikt door een dempingsmaat van 20 % in te voeren in de voortplantingsformule.

De berekening wordt in het onderstaande schema aangegeven. Het traject BD heeft een maximale demping van 20%, traject BC heeft een demping van 4%.

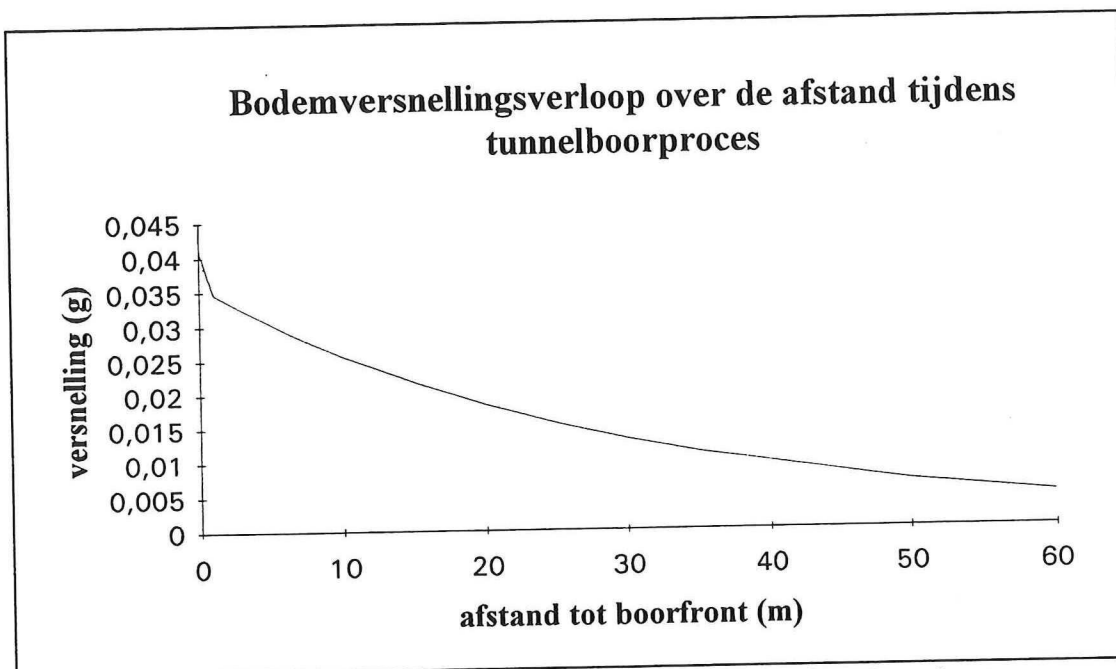


figuur (10) schema trillingsberekening met tussenstappen

De demping tussen B en C wordt in de berekening dusdanig ingevoerd dat de berekende waarde in punt C op basis van de voortplantingsformule en de waarde in amplitude in B overeenkomt met de gemeten waarde in C. Aan de hand van de volgende relatie is de bodemversnelling over de afstand tot het front te bepalen uit de bodemverplaatsing over de afstand tot het front.

$$|a_{\max}| = \omega^2 A \quad [9]$$

Dit levert het volgende bodemversnellingsverloop.

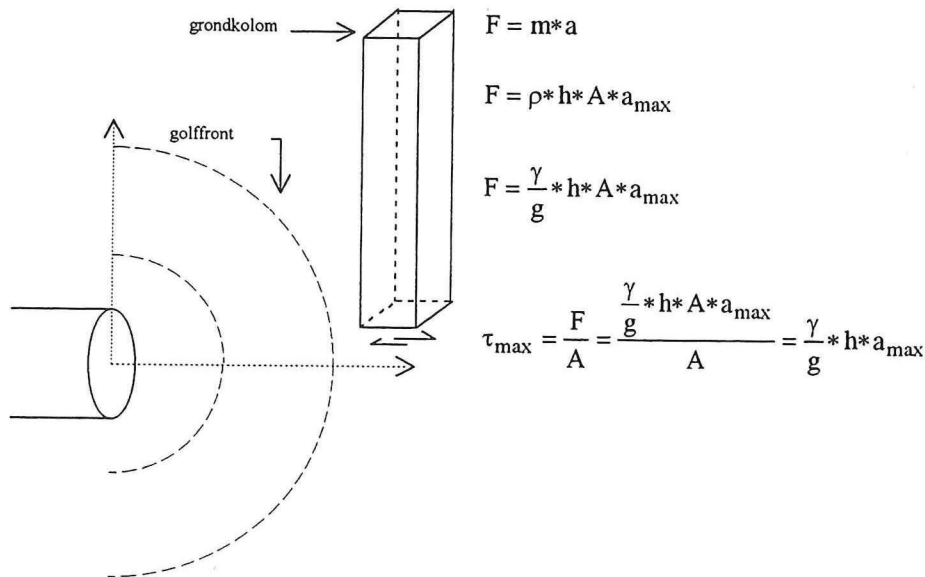


figuur (11) verloop bodemversnelling over de afstand tot front

Bij de berekening van de versnelling is de frequentie op 20 Hz gesteld en de demping maximaal verondersteld over de laatste meter tot het boorfront. Dit resulteert in een sterke toename van de amplitude aan het front. Op basis van de grafiek wordt de bovengrens van de bodemversnelling aan het boorfront bij een boring in dichtgepakt zand met een middelgrote tunnelboormachine gesteld op 0,04g.

Cyclisch schuifspanningsverloop

De berekening van de opgelegde cyclische schuifspanning is gebaseerd op een grondkolom welke een versnelling ondervindt. De theorie [Seed] is in de volgende figuur weergegeven.



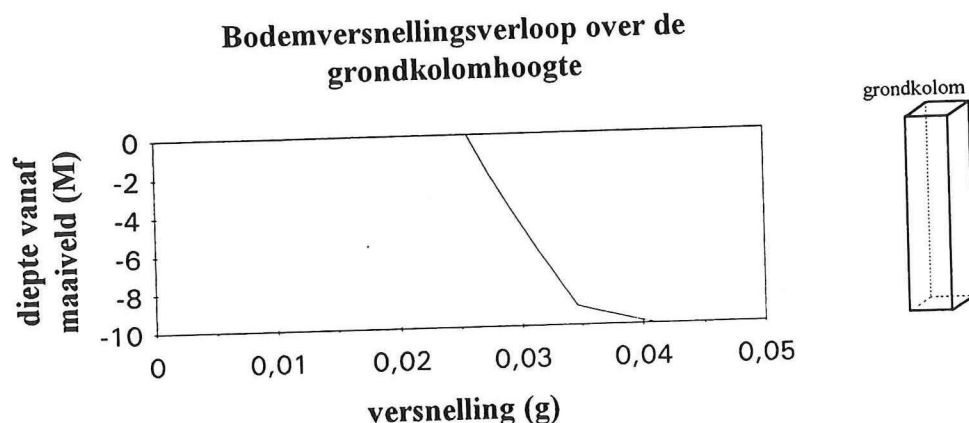
figuur (12) schematisch overzicht basis theorie

De formule voor cyclische schuifspanningen luidt

$$(T_{\max})_r = \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot a_{\max} \quad [10]$$

| | |
|------------------|---|
| $(T_{\max})_r$ | berekende piek dynamische schuifspanning |
| a_{\max} | bepaalde piek acceleratie in de bodem |
| g | zwaartekrachtsversnelling |
| $\gamma \cdot h$ | totale verticale spanning op diepte van interesse |

Doordat de bodem ten gevolge van demping deformeert binnen de hoogte h zal de optredende schuifspanning $(T_{\max})_d$ op diepte h kleiner zijn dan de maximale schuifspanning volgens $(T_{\max})_r$. Hiervoor wordt een reductie factor ingevoerd. De ondervonden versnelling is niet constant over de hoogte van de grondkolom. Naarmate de kolom groter wordt zal er meer demping over de kolom optreden. De top ondervindt dus een geringere versnelling dan de basis. In de aardbevingstheorie wordt gerekend met een versnelling op maaiveld. In deze verhandeling wordt de versnelling zoals die aan het front optreedt ingevoerd. Dit is aan de basis van de kolom.



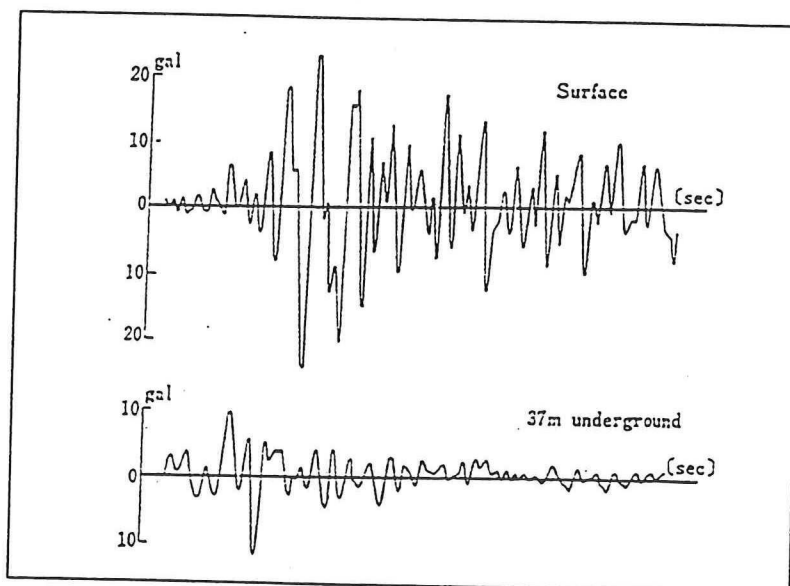
figuur (13) Bodemversnelling over de grondkolomhoogte

De schuifspanning is gebaseerd op de versnelling die de grondkolom gemiddeld ondervindt. De reductie van de maximale waarde aan de basis moet dusdanig zijn dat de gemiddelde waarde van de door de kolom ondervonden versnelling verkregen wordt. In dit geval ligt het zwaartepunt van de grafiek rond de 0,032 g. Bij aardbevingen is de afname van de amplitude minder sterk over de grondkolom. Dit is te verklaren door de grotere bron-kolom afstand. De geometrische demping, oftewel de verspreiding van dezelfde hoeveelheid energie over een groter oppervlak, is minder sterk daar de kolom relatief klein is ten opzichte van de afstand bron-kolom. In de aardbevingstheorie wordt een reductie van 0,9 aangehouden. In deze situatie beveelt de auteur een grotere reductie aan vanwege de kleinere schaal van de aandrijving van de grondkolom. Een waarde van 0,7 a 0,8 blijkt voor de door tunnelboormachine aangedreven trillingen realistischer. Uit bovenstaand amplitude verloop blijkt het zwaarte punt van 0,032 g bereikt te worden door de maximum waarde, 0,041g, te vermenigvuldigen met een reductiefactor 0,78.

$$(T_{\max})_d = (T_{\max})_r * r_d \quad [11]$$

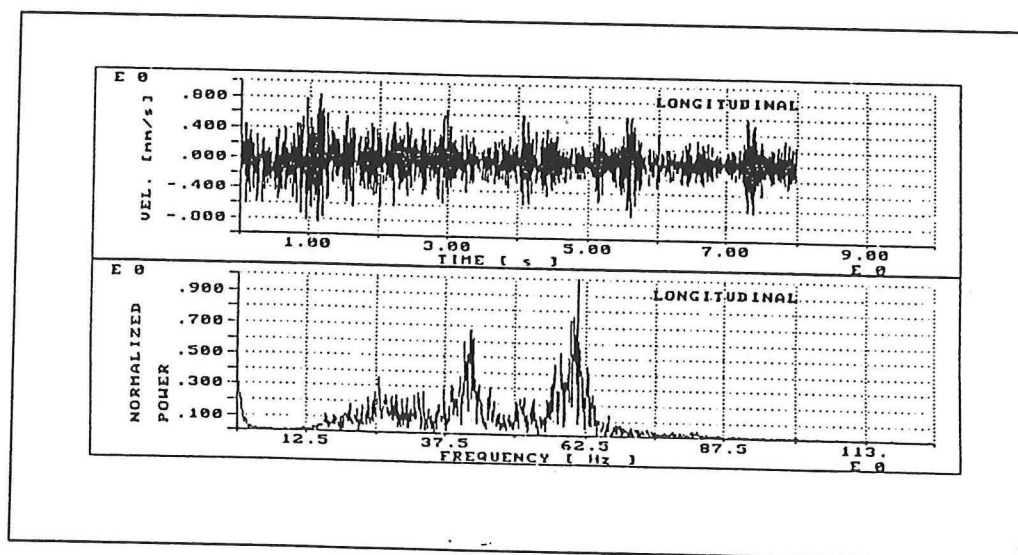
$(T_{\max})_d$ werkelijk optredende piek dynamische schuifspanning
 $(T_{\max})_r$ berekende piek dynamische schuifspanning
 r_d dynamische schuifspannings reductie factor, waarde afhankelijk van de diepte, bij tunnelboringen circa 0,7

De ondervonden versnelling in de grondkolom varieert echter niet alleen in de diepte, maar ook in de tijd. Bij aardbevingen kan de amplitude per cyclus verschillen. Om de ondervonden schuifspanning over een aantal cycli constant te kunnen veronderstellen moet ook bij het tunnelboorproces een gemiddeld opgelegde versnellingsamplitude gevonden worden.



figuur (14) Bodemversnelling tijdens aardbevingen

In de bovenstaande figuur is een verloop weergegeven van bodemversnellingen tijdens aardbevingen. Het belang van deze afbeelding is de herkomst te verduidelijken van de reductiefactor. Deze reductiefactor wordt toegepast om in de berekening een constante versnelling aan te kunnen nemen over een aantal cycli. In de aardbevingstheorie wordt deze reductiefactor op 0,65 gesteld. Vibraties tijdens tunnelboringen zijn echter niet zonder meer te vergelijken met aardbevingstrillingen. De amplitude metingen in de tijd die in deze verhandeling onderzocht zijn werden uitgevoerd tijdens tunnelboringen in rotsbodem. De boringen werden gedaan met hydraulische hamers of met een tunnelboormachine uitgerust met rolbeitels.



figuur (15) Snelheidsamplitude over de tijd en frequenties van vibraties opgewekt door hydraulische hamer

De tunnelboormachinevibraties hebben een, ten opzichte van aardbevingen, constantere amplitude in de tijd. Om deze reden wordt bij een tunnelboring in granulaire bodem een reductie factor van circa 0,8 aanbevolen om een gemiddelde amplitude te verkrijgen.

De omzetting van de berekende piek waarde naar een gemiddelde schuifspanning T_{av} wordt verkregen volgens de relatie:

$$T_{av} = T_{max} * 0.8 \quad [12]$$

T_{av} gemiddelde cyclische schuifspanning
 T_{max} maximale cyclische schuifspanning

De werkelijk optredende schuifspanning volgt uit:

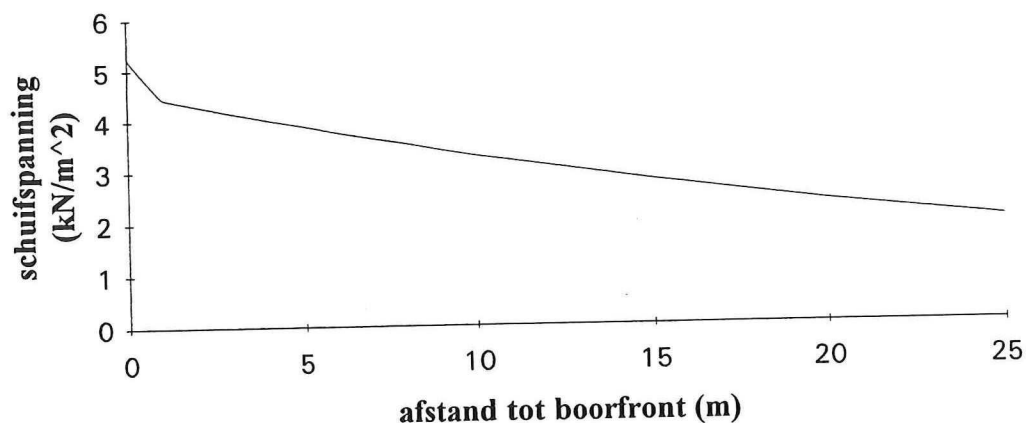
$$(T_{av})_d = \frac{\gamma * h}{g} * a_{max} * r_d * 0,8 \quad [13]$$

De orde van grootte is gebaseerd op een maximale versnelling van 0.04g aan het front.

$$(T_{av})_d = \frac{20 * 10}{9.81} * 0.04 * 9.81 * 0.8 * 0.8 \approx 5 \text{ (kN / m}^2\text{)}$$

Het cyclische schuifspanningsverloop is nu over de afstand tot het front te berekenen aan de hand van het eerder getoonde versnellingsamplitude verloop.

Verloop over de afstand van cyclische schuifspanningen



figuur (16) Cyclische schuifspanning tijdens tunnelboring in granulaire bodem op 10 m diepte

Bijlage IV: Indringing bentoniet

Het onderwerp in deze bijlage is de indringing van bentoniet voor het boorfront uit [Krause, 1987]. De factoren die de indringing beïnvloeden en de afstand waarover de bentoniet indringt zijn de aandachtspunten.

Bij de volgende berekening wordt uitgegaan van bentoniet zonder toevoegingen. Ook het verloop over de tijd wordt niet beschouwd. Er geldt:

$$2\pi * r * \tau_f * l_E = \pi * r^2 * \Delta p \quad [14]$$

- r straal poriënkanaal
 τ_f vloeigrens dikspoeling
 l_E indringdiepte
 Δp drukverschil aan het front

Deze relatie is te herleiden tot:

$$l_E = \frac{\Delta p * r}{2 * \tau_f} \quad (\text{cm}) \quad [15]$$

Om de berekening te toetsen worden enkele bij verschillende proeven gemeten indringlengtes vergeleken met de berekening.

| bodem | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------|-----|----------|----------|----------|
| aantal proeven | 1 | 27 | 26 | 9 |
| bentonietconc. (g/l) | 40 | 30-70 | 30-70 | 40-70 |
| Δp (bar) | 0.5 | 0.1-0.5 | 0.1-0.5 | 0.1-0.3 |
| indringdiepte (cm) | 4.4 | 1.2-15.1 | 3.6-29.1 | 7.8-31.3 |

figuur (17) meting indringing bentoniet

De kentallen van de in de proefopstelling toegepaste bodems zijn als volgt:

| kental / bodem | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| type (DIN 4022) | fS, ms | mS, fs', gs' | gS, ms | fG, gs' |
| d_{10} (mm) | 0.08 | 0.18 | 0.48 | 2.05 |
| $U = d_{60} / d_{10}$ (-) | 1.95 | 2.15 | 1.59 | 1.44 |
| $\rho_{dmin} / \rho_{dmax}$ (g/cm ³) | 1.36/1.64 | 1.39/1.61 | 1.38/1.60 | 1.43/1.64 |
| n_{min} / n_{max} (-) | 0.38/0.49 | 0.39/0.48 | 0.40/0.48 | 0.38/0.46 |
| e_{min} / e_{max} (-) | 0.61/0.95 | 0.65/0.91 | 0.65/0.92 | 0.61/0.86 |
| ϕ' (triaxiaalproef) (°) | 40 | 43 | 42.5 | 40.5 |
| k_w (gemiddeld) (m/s) | $5.8 * 10^{-5}$ | $5.2 * 10^{-4}$ | $1.9 * 10^{-3}$ | $1.0 * 10^{-2}$ |

figuur (18) kentallen toegepaste bodem

Uitgewerkte berekening bentoniet indringing:

Zoals eerder is gesteld is een hoge viscositeit vereist, aangenomen voor $\tau_f: 70 \text{ N/m}^2$.

Voor de steundruk wordt de maximale aangenomen: $0.5 \text{ bar} (= 10^5 \text{ N/m}^2)$.

De kanaaldiameter moet bepaald worden aan de hand van de kentallen van bodem 2.

Bodem 2 wordt het meest geschikt geacht voor een verwekingsgevoelige bodem, de overige bodems zijn te cohesief of hebben een te hoge doorlatendheid.

Bodem 2 heeft een spreiding van 2.15. Voor de d_{50} geldt:

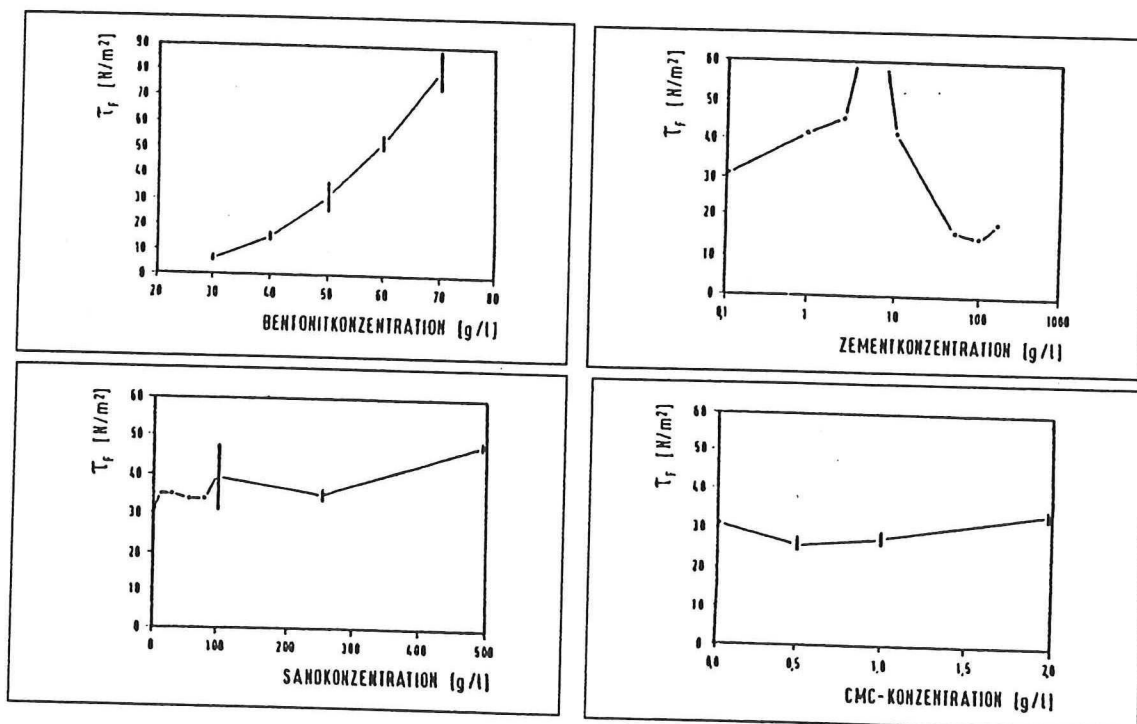
$$d_{50} = \sqrt{2.15} * d_{10} \quad [16]$$

In dit geval: $0.18 * 1.47 = 0.26 \text{ mm}$. Deze waarde ligt dicht tegen de bovengrens qua korrel diameter om de bodem, middelfijn Zand, nog als verwekingsgevoelig te classificeren. De spreiding komt wel overeen met een verwekingsgevoelige bodem. Deze diameter zal dus een maximale indringing opleveren. De kanaalgrootte is nu: $d_{50}/2 = 0.13 \text{ mm}$

$$l_E = 0.5 * 10^5 * 0.13 * 10^{-3} / (2 * 70) = 0.0464 \text{ m} = 4.64 \text{ cm}.$$

Deze waarde ligt binnen de tijdens de proeven op bodem 2 gevonden waarden, zie figuur (17). Vanwege de hoge viscositeit van de vloeistof wordt de ondergrens benaderd.

De tijdsduur waarover de steunvloeistof kan indringen in de bodem is van belang voor de indringdiepte. Daarnaast speelt de vloeigrens/viscositeit van de vloeistof een grote rol. Des te hoger de viscositeit, des te kleiner de indringdiepte. De viscositeit wordt bepaald door het bentoniet gehalte, het cement gehalte, het zandaandeel en het schuimgehalte (CMC) in de steunvloeistof. Voor elk van de toevoegingen is in een onderstaande figuur weergegeven wat de specifieke invloed is op de viscositeit.

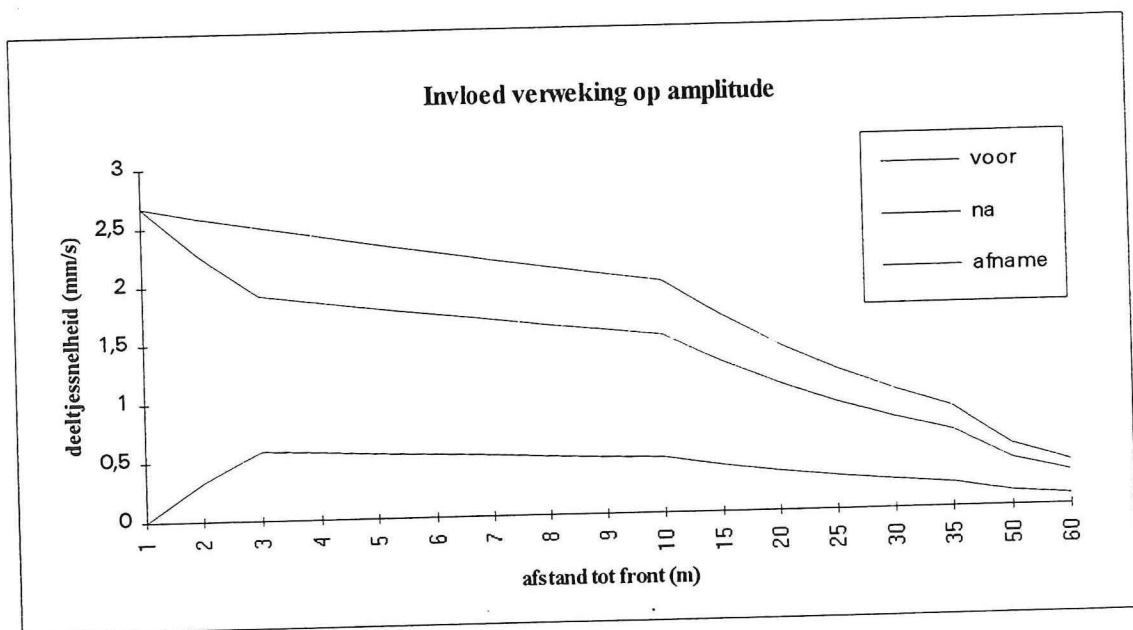


Bijlage V: Bepaling amplitude afname

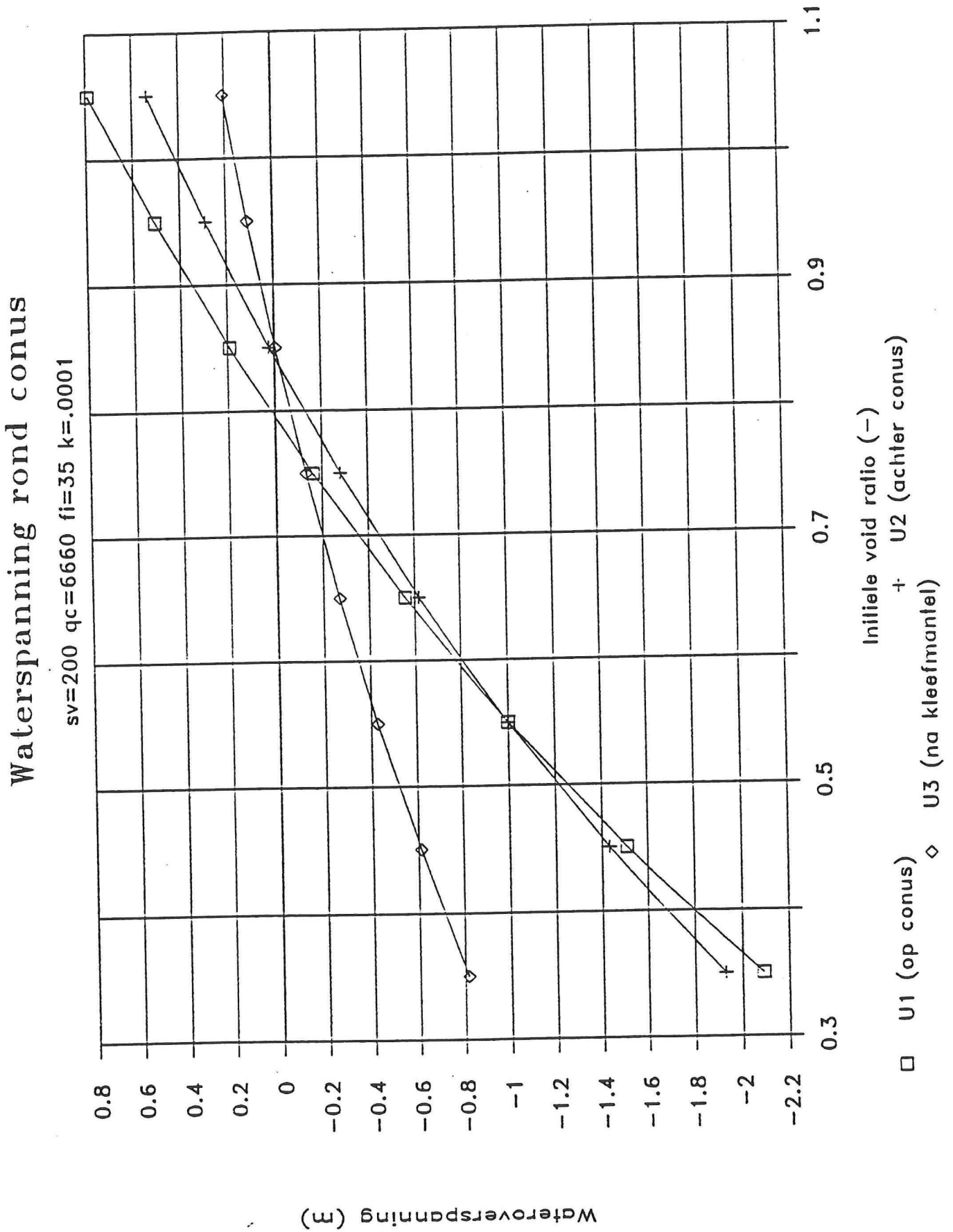
De bepaling van de amplitude afname in de bodem tijdens het optreden van verweking is het onderwerp van deze bijlage.

Als basis dient het eerder gevonden amplitude verloop. Door de maximale demping over een grotere afstand vanaf het boorfront, in dit geval 3 meter, aan te nemen wordt het nieuwe verloop bepaald. Ook wordt het verschil tussen de twee weergegeven.

Het amplitude verloop van de deeltjessnelheid in de bodem bij een opgelegde versnellingsamplitude van 0.04g aan het front en een demping van 20% (maximaal) over de eerste drie meter vanaf het front en 4% over het traject tot de meetapparatuur wordt vergeleken met het eerder gevonden verloop. Het oorspronkelijke amplitude verloop volgt uit de situatie met één meter maximale demping van 20 % en vervolgens 4%. In onderstaande grafiek is de bovenste lijn het oorspronkelijke amplitude verloop, de lijn vlak daaronder het verloop na verweking en de onderste lijn geeft het verschil aan tussen de twee.



Bijlage VI: Waterspanningsgeneraties



Bijlage VII: Toepassing methode Olsen

