

# Jetgrouten

precisiewerk met grof geweld

februari 1997

J.W. van Dalen



# Jetgrouten

precisiewerk met grof geweld

## AFSTUDEERVERSLAG

Voor het behalen van het ingenieursexamen aan de  
Faculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft.

Vakgroep: Waterbouwkunde, Geotechniek  
Sectie: Funderingstechniek

Afstudeercommissie:  
Prof. ir. A.F. van Tol, TU Delft  
Ir. B.J. Admiraal, Visser&Smit Bouw, Papendrecht  
Ir. K.G. Bezuijen, TU Delft  
Ir. B. Polen, TU Delft

Jos van Dalen  
1 februari 1997

## Voorwoord

Dit afstudeerverslag is het resultaat van een onderzoek naar de techniek van het jetgrouten, verricht bij de vakgroep Geotechniek, sectie Funderingstechniek van de faculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit in Delft in samenwerking met Visser & Smit Bouw te Papendrecht.

In april 1995 heb ik als stagiair bij Gemeente Werken Rotterdam voor het eerst kennisgemaakt met de jetgrouttechniek. Voor de bouw van het metrostation Wilhelminaplein zijn met behulp van deze techniek twee schermen gemaakt die de waterafsluiting vormden op de kopse kanten van de bouwput. Eén van deze schermen is tijdens de bouw gaan lekken, wat uiteindelijk heeft geleid tot het tijdelijk onder water zetten van de bouwput. Vanwege dit voorval heb ik mij tijdens mijn stage verdiept in de jetgrouttechniek.

In de oriëntatiefase van het afstuderen is een aantal onderwerpen aan de orde geweest, waaronder ook jetgrouten. De kennis van jetgrouten is grotendeels bij aannemers aanwezig en berust voornamelijk op ervaring. Dit weerhield mij er in eerste instantie van het onderwerp voor mijn afstuderen te kiezen. Het bleek echter mogelijk het jetgrouten nader te onderzoeken bij de enige jetgroutspecialist in Nederland. Bovendien zouden in het kader van een bouwproject in Den Haag jetgroutproeven worden uitgevoerd. De keuze voor het onderwerp was toen niet moeilijk meer. Deze zeer unieke jetgroutproeven zijn in april, mei en juni van 1996 uitgevoerd en worden beschreven in dit verslag.

Voor hun medewerking aan mijn afstuderen gaat mijn dank uit naar mijn collega's van Visser & Smit Bouw en van de Combinatie Funderingstechnieken Den Haag. Daarnaast dank ik de leden van de afstudeercommissie, prof. A.F. van Tol en ir. K.G. Bezuijen, voor hun bijdrage aan de tot standkoming van dit verslag. In het bijzonder noem ik ir. B.J. Admiraal en ir. B. Polen voor het kritisch doornemen van het verslag en het vormen van een aanspreekpunt tijdens mijn afstuderen. Tot slot ben ik ir. J.P. Oostveen dankbaar voor het behulpzaam zijn bij het interpreteren van de meetresultaten en het uitvoeren van een PLAXIS-berekening.

Jos van Dalen,  
Delft, februari 1997.

## Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Inhoudsopgave	ii
Samenvatting	vii
<b>Inleiding</b>	<b>viii</b>
Probleemsignalering	viii
Probleemstelling	ix
Doel	ix
Jetgroutproef Souterrain Den Haag	ix
Opbouw verslag	ix

## Deel I: Beschrijving jetgrouttechniek, toepassingen en ontwikkelingen

Samenvatting deel I.....	I-1
<b>I.1 Inleiding.....</b>	<b>I-5</b>
<b>I.2 De jetgrouttechniek.....</b>	<b>I-7</b>
I.2.1 Inleiding.....	I-7
I.2.2 Ontwikkeling jetgrouttechniek.....	I-7
I.2.3 Principe jetgrouten.....	I-7
I.2.4 Verschillende systemen.....	I-9
I.2.5 Benodigd materieel.....	I-13
I.2.6 Functies van jetgroutelementen.....	I-17
I.2.7 Behaalde resultaten, diameter, doorlatendheid en sterkte.....	I-19
<b>I.3 Functies en toepassingen van jetgroutkolommen.....</b>	<b>I-23</b>
I.3.1 Inleiding.....	I-23
I.3.2 Constructieve functie.....	I-23
I.3.2.1 Funderingsversterking of ondervanging.....	I-23
I.3.2.2 Fundering van nieuwe constructies.....	I-23
I.3.2.3 Grondverbeteringen ter voorkoming van erosie en/of zettingen.....	I-25
I.3.2.4 Grondkerende jetgroutelementen.....	I-29
I.3.3 Vloeistofremmende functie.....	I-29
I.3.3.1 Verticale schermen.....	I-29
I.3.3.2 Horizontale afsluiters.....	I-31
I.3.3.3 Afdichting van openingen.....	I-31
I.3.4 Gecombineerde functies.....	I-35
I.3.4.1 Verticale schermen.....	I-35
I.3.4.2 Horizontale schermen.....	I-35
I.3.4.3 Gekromde schermen.....	I-37
<b>I.4 Uitvoeringsparameters en grondgesteldheid.....</b>	<b>I-39</b>
I.4.1 Inleiding.....	I-39
I.4.2 Uitvoeringsparameters.....	I-39
I.4.3 Grondgesteldheid.....	I-43

<b>I.5 Onderzoek aan jetgrouten .....</b>	<b>I-47</b>
I.5.1 Inleiding.....	I-47
I.5.2 Gedrag omringende grond tijdens jetgrouten.....	I-47
I.5.3 Eroderend vermogen .....	I-49
I.5.3.1 Erosiewerking snijstraal .....	I-49
I.5.3.2 Kwantificering van het totale debiet .....	I-51
I.5.3.3 Invloed treksnelheid .....	I-51
I.5.3.4 Invloed rotatiesnelheid .....	I-53
I.5.3.5 Invloed grondeigenschappen.....	I-53
I.5.3.6 Hydraulisch vermogen .....	I-55
I.5.4 Kolommengsel en retourspoeling.....	I-57
I.5.4.1 Hoeveelheid retourspoeling.....	I-57
I.5.4.2 Samenstelling kolommengsel en retourspoeling.....	I-57
I.5.4.3 Schatting van de diameter met behulp van de retourspoeling .....	I-59
I.5.5 Mechanische eigenschappen .....	I-63
I.5.5.1 Waterremmend scherm in Italië.....	I-63
I.5.5.2 Startschacht boortunnel Taiwan .....	I-65
I.5.6 Nozzle ontwerp.....	I-69
<b>I.6 Ontwikkelingen in de jetgrouttechniek .....</b>	<b>I-71</b>
I.6.1 Inleiding.....	I-71
I.6.2 Retourspoeling.....	I-71
I.6.2.1 Vermindering retourspoeling .....	I-71
I.6.2.2 Filteren en recyclen .....	I-73
I.6.3 Metro Jet System (MJS).....	I-73
I.6.4 Cross-Jet .....	I-73
I.6.5 Super diameters .....	I-75
<b>I.7 Conclusie deel 1.....</b>	<b>I-77</b>
 <b>Deel II: Jetgroutproef Souterrain Den Haag</b>	
<b>Samenvatting deel II .....</b>	<b>II-1</b>
<b>II.1 Inleiding .....</b>	<b>II-3</b>
<b>II.2 Grondeigenschappen en uitvoeringsparameters jetgroutproef.....</b>	<b>II-5</b>
II.2.1 Algemeen .....	II-5
II.2.2 Grondeigenschappen .....	II-5
II.2.3 Uitvoeringsparameters .....	II-6
<b>II.3 Metingen/proeven tijdens uitvoering jetgroutkolommen.....</b>	<b>II-8</b>
II.3.1 Diameterbepaling met behulp van spinapparaat.....	II-8
II.3.1.1 Algemeen .....	II-8
II.3.1.2 Resultaten metingen diameter.....	II-8
II.3.1.3 Wijzigingen in parameters naar aanleiding van diameterbepaling.....	II-9
II.3.2 Monstername.....	II-11
II.3.2.1 Algemeen .....	II-11
II.3.2.2 Resultaten volumieke massa retour- en kolomspoeling .....	II-11
II.3.2.3 Wijzigingen in parameters naar aanleiding van monstername .....	II-12
II.3.3 Schatting cementgehalte in verband sterkte en stijfheid.....	II-12

II.3.3.1 Algemeen .....	II-12
II.3.3.2 Schatting cementgehalte aan de hand van diameter kolom .....	II-13
II.3.3.3 Schatting cementgehalte met behulp van filterpersproef .....	II-14
II.3.3.4 Wijzigingen in parameters naar aanleiding van geschat cementgehalte .....	II-14
II.3.4 Hellingmetingen .....	II-15
II.3.4.1 Algemeen .....	II-15
II.3.4.2 Werking hellingmeting .....	II-15
II.3.4.3 Waarden afwijkingen ten gevolge van boren .....	II-16
II.3.5 Waarnemingen tijdens uitvoering jetgroutproeven .....	II-16
<b>II.4 Metingen/proeven na uitharden kolommen .....</b>	<b>II-18</b>
II.4.1 Diameters kolommen .....	II-18
II.4.1.1 Algemeen .....	II-18
II.4.1.2 Metingen van kolomdiameters na ontgraving .....	II-18
II.4.2 Boren en beproeven kernen/monsters .....	II-20
II.4.2.1 Algemeen .....	II-20
II.4.2.2 Resultaten beproeven kernen en monsters .....	II-20
II.4.2.3 Cementgehalte kernen .....	II-21
II.4.3 Maatvoering .....	II-21
II.4.3.1 Algemeen .....	II-21
II.4.3.2 Plaatsbepaling .....	II-21
II.4.3.3 Controle positie onder- en bovenkant kolommen .....	II-22
II.4.3.4 Diameterterugval bij klei- en veenlagen .....	II-22
II.4.4 Inspectie en slopen massief en kolommen .....	II-23
<b>II.5 Verwerking gegevens jetgroutproef Den Haag .....</b>	<b>II-24</b>
II.5.1 Algemeen .....	II-24
II.5.2 Vergelijking diameterbepaling met spin en werkelijke diameter .....	II-24
II.5.3 Verwerking materiaaleigenschappen .....	II-24
II.5.4 Kansberekening falen overlap in verband met rasterkeuze .....	II-26
<b>II.6 Uitvoering jetgroutboog Kalvermarkt .....</b>	<b>II-27</b>
II.6.1 Uitvoeringsparameters .....	II-27
II.6.2 Rasterkeuze .....	II-27
II.6.3 Metingen/proeven tijdens en na uitvoering jetgroutboog .....	II-27

### Deel III: Uitwerking jetgroutproef Den Haag, verbanden en relaties

<b>Samenvatting deel III .....</b>	<b>III-1</b>
<b>III.1 Inleiding .....</b>	<b>III-3</b>
<b>III.2 Volumieke massa retour/kolom/kern .....</b>	<b>III-4</b>
III.2.1 Inleiding .....	III-4
III.2.2 Waarden volumieke massa retour- en kolomspoeling .....	III-4
III.2.3 Vergelijking volumieke massa kolom- en retourspoeling .....	III-6
III.2.4 Retour- en kolomspoeling over diepte .....	III-8
III.2.5 Volumieke massa cilinders .....	III-8
III.2.6 Volumieke massa kernen in vergelijking met retour- en kolomspoeling .....	III-10
III.2.7 Volumieke massa kernen over de diepte .....	III-11
III.2.8 Resumé .....	III-12

<b>III.3 Sterkte en stijfheid</b> .....	<b>III-14</b>
III.3.1 Inleiding .....	III-14
III.3.2 Gemiddelde waarden druksterkte retour- en kolomspoeling en kernen .....	III-14
III.3.3 Rekenwaarde druksterkte.....	III-15
III.3.4 Verloop druksterkte over kolom .....	III-16
III.3.5 Sterkte en stijfheid versus volumieke massa .....	III-16
III.3.6 Druksterkte in samenhang met cementgehalte .....	III-18
III.3.7 Druk- en treksterkte .....	III-19
III.3.8 Resumé.....	III-21
<b>III.4 Diameter kolom</b> .....	<b>III-22</b>
III.4.1 Inleiding .....	III-22
III.4.2 Diameterbepaling aan de hand van volumieke massa retour .....	III-22
III.4.3 Hydraulisch energie snijstraal .....	III-23
III.4.4 De kinetische energie van de snijstraal.....	III-27
III.4.5 Impuls van de snijstraal .....	III-30
III.4.6 Resumé.....	III-31
<b>III.5 Conclusie</b> .....	<b>III-33</b>
 <b>Deel IV: Uitvoeringsaspecten</b>	
<b>Samenvatting deel IV</b> .....	<b>IV-1</b>
<b>IV.1 Inleiding</b> .....	<b>IV-3</b>
<b>IV.2 Proces</b> .....	<b>IV-4</b>
IV.2.1 Inleiding .....	IV-4
IV.2.2 Het boorproces.....	IV-4
IV.2.3 Het jetgroutproces.....	IV-5
IV.2.4 Het gebruik van lucht .....	IV-7
IV.2.5 Volgorde uitvoering.....	IV-7
<b>IV.3 Metingen</b> .....	<b>IV-10</b>
IV.3.1 Inleiding .....	IV-10
IV.3.2 Hellingmetingen .....	IV-10
IV.3.3 Diameterbepalingen.....	IV-11
IV.3.4 Monsternamen .....	IV-11
IV.3.5 Kernboringen .....	IV-12
<b>IV.4 Ontwerp</b> .....	<b>IV-13</b>
IV.4.1 Inleiding .....	IV-13
IV.4.2 Mogelijkheden van de verschillende systemen .....	IV-13
IV.4.3 Rasterkeuze.....	IV-14
<b>IV.5 Conclusie</b> .....	<b>IV-16</b>
 <b>Eindconclusie</b>	<b>xi</b>
 <b>Aanbevelingen</b>	<b>xii</b>
 <b>Onderwerpen voor vervolgonderzoek</b>	<b>xii</b>

**Bijlagen (apart deel):****Deel I:        Literatuurlijst****Deel II:****II.1:    Publicatie tramtunnel Koolhaas  
Publicatie tramtunnel Cement****II.2:    Stroomschema's proeven, 2 en 3 fasen jetgrouten  
Tekening proefput  
Jetgroutstaat en registratieformulieren kolom 14****II.3:    Sondering DKMP 37  
Boring GB-07  
Boring MB-09  
Sondering S6 t/m S8****II.4:    Verklaring hellingmeting****II.5:    Resultaten druk- en splijtproeven  
Verklaring monstercode Mos****II.6:    Bewerkte resultaten beproevingen****II.7:    Berekening kans op falen overlappingsgebied****II.8:    Tekeningen jetgroutwerk Kalvermarkt****II.9:    Foto's jetgroutproef****Deel III:    Grafieken****Deel V:     Berekening bouwput Souterrain Den Haag**



## Samenvatting

Jetgroutkolommen worden gevormd door onder hoge druk een groutmengsel in de grond te injecteren. De grond wordt versneden, losgewoeld en vermengd met de geïnjecteerde vloeistof. Door de boorbuis roterend te trekken ontstaat een cilindervormig element. Afhankelijk van het gekozen systeem geschiedt het snijden met dezelfde of met een andere straal dan het mengen. Gesproken wordt van het 1, 2 of 3 fase(n) systeem jetgrouten. De jetgroutkolommen kunnen na uitharding worden gebruikt als waterremmend en/of constructief element. Jetgrouten kan in iedere grondsoort worden toegepast.

De ervaring in Nederland met de jetgroutechniek is beperkt tot enkele werken. Visser & Smit Bouw is vooralsnog de enige aannemer in Nederland die beschikt over het benodigde materieel. De diameter en de sterkte van de kolom worden bepaald door de uitvoeringsparameters en de grondeigenschappen, samen de invoerparameters van het systeem. Onder de uitvoeringsparameters wordt verstaan de injectiedruk, het injectiedebiet, de luchtdruk, de treksnelheid, rotatiesnelheid e.d. De belangrijke grondeigenschappen zijn de cohesie, de dichtheid en het poriëngehalte. De moeilijkheid bij de techniek betreft het voorspellen van het resultaat (diameter en sterkte) op basis van de invoerparameters.

Het doel van dit onderzoek is tweezijdig. Enerzijds is gezocht naar verbanden en relaties tussen de invoerparameters en het resultaat en anderzijds is gekeken naar de uitvoeringsaspecten van de techniek. Dit laatste betreft ook een meetmethode voor de diameter tijdens de uitvoering van de kolommen.

In het kader van de bouw van een tramtunnel in het centrum van Den Haag, het zogenaamde Souterrain, is een uitgebreide jetgroutproef op ware grootte uitgevoerd. Het doel van de proef was het bepalen van de uitvoeringsparameters voor het maken van een groutboog die de waterafsluiting aan de onderzijde van de bouwput vormt. Het 2 en 3 fasen systeem is beproefd, waarbij gevarieerd is met injectiedrukken, debieten, treksnelheden en water/cement-factoren. Tijdens de uitvoering zijn met behulp van een spinapparaat diameterbepalingen gedaan en zijn verse monsters aan de kolom en retourspoeling onttrokken. Na uitharding van de proefkolommen is de put ontgraven, zodat het resultaat kon worden bestudeerd. Uit de kolommen zijn kernen geboord die aan druk- en slijttesten zijn onderworpen.

Dit verslag bevat de beschrijving en de analyse van de jetgroutproef. Onderscheid is gemaakt tussen volumieke massa en sterkte van de verschillende monsters en de diameter van de kolom. Het jetgroutproces is te complex om te komen tot een alles omvattend rekenkundig verband tussen het resultaat en de invoer. Het grote probleem blijft het betrekken van de eigenschappen van de grond in een berekening. Toch zijn enkele interessante bevindingen gedaan.

De belangrijkste bevinding is de relatie tussen de invoer en het diameterresultaat via de begrippen hydraulische of kinetische energie van de snijstraal. De hydraulische energie wordt berekend met de snijdruk, het snijdebiet en de treksnelheid, terwijl de kinetische energie wordt berekend met de massa en snelheid van de vloeistof en de treksnelheid. Indien de energiesoorten tegen de diameter worden uitgezet, ontstaat een energiekromme. Deze kromme ligt voor ieder systeem en grondsoort anders en kan worden gebruikt bij het vaststellen en vergelijken van de uitvoeringsparameters.

Voordat met een jetgroutwerk wordt begonnen moet een grondonderzoek worden uitgevoerd, zodat de grondeigenschappen over het te grouten traject in kaart gebracht kunnen worden. Op deze wijze kan tijdens het jetgrouten worden geanticipeerd op wijzigingen in bodemgesteldheid, zodat de kwaliteit van de kolommen gehandhaafd blijft. Met behulp van diameterbepalingen met bijvoorbeeld een spinapparaat kan de diameter vlak na het jetgrouten worden gemeten.

## Inleiding

### Probleemsignalering

Nederland raakt vol en ondervindt als elk ander dichtbevolkt land de problemen daarvan. De ruimte om woningen of kantoren te bouwen of wegen aan te leggen is beperkt. Voor woningen en kantoren betekent dit dat steeds vaker hoger wordt gebouwd, gecombineerd met grote (parkeer)kelders. De verplaatsingen van mensen en goederen tussen en in de dichtbevolkte steden vraagt een uitgebreide infrastructuur en doen daarmee ook een beroep op de beperkte ruimte. Het is niet verwonderlijk dat de oplossing steeds vaker ondergronds wordt gezocht.

Het (ondergronds) bouwen in complexe gebieden als steden heeft geleid tot een sterke ontwikkeling van de funderingstechniek. Conventionele funderingsmethoden, zoals bijvoorbeeld het heien van betonnen palen, kunnen niet altijd meer worden toegepast en specialistische funderingstechnieken zijn nodig om bepaalde problemen op te kunnen lossen. Eén van deze specialistische technieken betreft de techniek van het jetgrouten. Overigens hoeft de beperkte ruimte niet altijd de reden te zijn voor het ontwikkelen van nieuwe technieken. Financiële en uitvoeringstechnische redenen spelen daarbij zeker een belangrijke rol.

Jetgrouten berust op het onder hoge druk injecteren van een water/cement-mengsel (grout), waarbij de aanwezige grond wordt losgesneden en zich vermengt met de geïnjecteerde vloeistof. Het snijden en mengen kan door verschillende injectiestralen worden uitgevoerd, afhankelijk van het gebruikte jetgroutsysteem. Na uitharding van het mengsel ontstaan vaste groutelementen die voor diverse doeleinden gebruikt kunnen worden. Deze elementen kunnen door het roteren en trekken van de injectiebuis cilindervormig worden gemaakt, maar kunnen ook als panelen worden uitgevoerd. Bij deze laatste vorm, het zogenaamde panelgrouting, wordt de injectiebuis niet geroteerd. Dit afstudeerwerk heeft betrekking op de cilindervormige jetgroutelementen, de jetgroutkolommen.

Deze kolommen kunnen worden gebruikt als dragend element voor bijvoorbeeld funderingsversterkingen, maar kunnen ook, indien ze aanéngesloten worden uitgevoerd, als waterremmende laag worden toegepast. Een combinatie van deze toepassingen is eveneens mogelijk.

Internationaal is inmiddels behoorlijk veel praktische ervaring opgedaan met jetgrouten. In Nederland is het aantal uitgevoerde jetgroutwerken echter nog beperkt. De ervaring is hoofdzakelijk aanwezig bij uitvoerende bouwbedrijven, die het benodigde materieel in huis hebben. Een groot nadeel van de jetgrouttechniek is dat het erosie- en injectieproces in laboratoria nauwelijks representatief op schaal kan worden nagebootst. Hierdoor beperkt de opgedane kennis zich tot (op ware grootte) uitgevoerde werken, waarbij experimenteren een zeer kostbare aangelegenheid is.

De moeilijkheid bij jetgrouten is het voorspellen van het resultaat op basis van de invoerparameters van het proces. De invoerparameters zijn verdeeld in uitvoeringsparameters, zoals injectiedruk en debiet en grondparameters als cohesie en poriëngehalte. De belangrijkste resultaten van het jetgroutproces zijn de diameter van de kolom en de sterkte en stijfheid van het uitgeharde kolommengsel. In de praktijk is het gebruikelijk voor aanvang van het werk één of meerdere proefkolommen uit te voeren voor het vaststellen van de uitvoeringsparameters met het oog op de vereiste resultaten.

Tijdens het maken van de (proef)kolommen is het wenselijk direct de resultaten te kunnen bepalen, zonder te moeten wachten totdat de kolom is uitgehard en kan worden vrijgegraven. Met name voor de uitvoering van waterremmende schermen is het van belang te weten welke kolomdiameter gemaakt wordt. Bij te weinig overlap tussen de kolommen door een te kleine diameter kan de waterremmend functie onvoldoende worden gegarandeerd.

## Probleemstelling

Het voorspellen van de resultaten van het jetgroutproces, in de vorm van de diameter van de kolom en de sterkte van het uitgeharde kolommengsel, op basis van de grondeigenschappen en uitvoeringsparameters is bijzonder moeilijk.

Daarnaast is het onduidelijk op welke wijze de diameter van de verse kolom goed gemeten kan worden. Ook over enkele uitvoeringsaspecten, zoals de volgorde van uitvoeren van kolommen bij verticale en horizontale schermen, bestaat vooralsnog onduidelijkheid.

## Doel

Het doel van dit afstudeerwerk is tweezijdig. Enerzijds het onderzoeken op welke wijze het resultaat van het jetgrouten afhangt van de grondeigenschap en de uitvoeringsparameters. Getracht wordt dit zowel kwalitatief als kwantitatief te onderzoeken.

Hierbij wordt tevens gezocht naar een goede meetmethode voor het bepalen van de diameter van de verse kolom en de sterkte en stijfheid van de uitgeharde kolom.

Anderzijds zal getracht worden de uitvoeringsaspecten te beschrijven en aan te geven waar onduidelijkheden aanwezig zijn en op welke wijze deze kunnen worden opgelost.

## Jetgroutproef Souterrain Den Haag

Dit afstudeerwerk is uitgevoerd bij Visser & Smit Bouw B.V. afdeling Grond & Funderingstechnieken, uit Papendrecht, de enige aannemer in Nederland die over de jetgrouttechniek en ervaring beschikt. Een deel van het onderzoek is gedaan in Den Haag, waar Visser & Smit Bouw een groot jetgroutwerk uitvoert ten behoeve van de bouw van een tramtunnel in het Haagse centrum (Het Souterrain). Als onderaannemer voor de fundering geschiedt dit in combinatie met Ballast Nedam Funderingstechnieken B.V. en Keller Grundbau GmbH.

Voor de jetgroutwerkzaamheden van dit project is een proefput gemaakt, waarin op ware grootte is geëxperimenteerd met de techniek. Het is bijzonder uniek dat deze proefput na uitharding van de jetgroutkolommen is ontgraven, waardoor de resultaten direct konden worden waargenomen. Een dergelijk groot en kostbaar experiment is zeer uitzonderlijk. De experimenten zijn uitgevoerd in april, mei en juni van 1996.

## Opbouw verslag

Dit afstudeerverslag valt in een viertal delen uiteen. Deel I betreft de algemene beschrijving van de jetgrouttechniek, de toepassingen en de ontwikkelingen. De nadruk ligt daarbij op hetgeen gevonden is in de geraadpleegde literatuur. In dit deel wordt eveneens aandacht besteed aan gepubliceerd onderzoek aan jetgrouten.

Deel II gaat in op in Den Haag gehouden jetgroutproef. Centraal daarin staan de metingen die tijdens en na het jetgrouten zijn gedaan, de waarnemingen en de interpretaties van de uitkomsten voor de jetgroutwerkzaamheden aan de tramtunnel.

Deel III bevat een bredere analyse van de resultaten van de proef. In dit deel worden verbanden en relaties gezocht tussen de invoerparameters en de resultaten. Bovendien worden de uitgevoerde metingen op waarde beoordeeld.

Het laatste deel IV gaat in op enkele uitvoeringsaspecten.

Ieder deel wordt voorafgegaan door een samenvatting en sluit af met een conclusie (uitgezonderd deel II). De eindconclusie, aanbevelingen en vervolgonderzoek vormen de afsluiting van dit verslag.

Bijlage V bevat verschillende berekeningen van de jetgroutconstructie voor de tramtunnel ter plaatse van de Kalvermarkt en Grote Marktstraat. Het verticale evenwicht van de bouwput en de definitieve tunnel is beschouwd, als mede de krachten in de zogenaamde jetgroutboog. Deze jetgroutboog komt in de vier delen eveneens aan de orde.

---

**Deel I:**  
**Beschrijving jetgrouttechniek,  
toepassingen en ontwikkelingen**

---

## Samenvatting deel I

Jetgrouten is een funderingstechniek waarbij onder hoge druk een water/cement-mengsel, het grout, in de bodem wordt geïnjecteerd. Hierbij wordt de grond met een vloeistof versneden, losgewoeld en vermengd met het geïnjecteerde grout. Door de boor- of injectiebuis langzaam roterend te trekken, ontstaat een kolomvormig lichaam in de bodem, dat na uitharding voor verschillende doeleinden gebruikt kan worden. De kolomjetgrouting vormt het onderwerp van deze afstudeeropdracht. Tijdens het jetgrouten komt als gevolg van het injecteren continu een mengsel van grout en grond naar het oppervlak. Deze retourspoeling komt via de ringvormige ruimte om de boorbuis omhoog.

Onderscheid wordt gemaakt tussen het 1, 2 en 3 fase(n) jetgrouten. In geval van het 1 fase jetgrouten bestaat de injectie alleen uit één of meerdere groutstralen. Bij het 2 fasen systeem zijn deze stralen omhuld met een luchtmantel om de reikwijdte, en dus de diameter van de kolom, te vergroten. Het 3 fasen systeem heeft twee soorten injectie. Een waterstraal vervult de snijfunctie en is hiervoor met een luchtmantel uitgerust. Een onderliggende groutstraal, de vulstraal, verzorgt de menging van het grout met de gronddeeltjes.

De functies van de jetgroutkolommen zijn divers en kunnen globaal worden verdeeld in constructieve functies, vloeistoffremmende functies en gecombineerde functies van keren en dragen. In geval van een constructieve functie moet vooral gedacht worden aan funderingsondervanging of versterking. Indien kolommen overlappend worden uitgevoerd ontstaan schermen die een vloeistoffremmende functie hebben. Deze schermen kunnen horizontale en verticale afsluitende lagen vormen. Bij een gecombineerde functie is zowel sprake van het remmen van vloeistofstromingen als ook het opnemen van vloeistof- en of gronddrukken.

De belangrijkste kenmerken van een gerealiseerde kolom zijn de diameter, de druksterkte van het verharde materiaal en de doorlatendheid. De doorlatendheid bij schermen wordt voor het grootste deel bepaald door de aansluitingen van de individuele kolommen en is daarom afhankelijk van de diameter en de onderlinge afstand. De ongewapende kolom heeft een lage treksterkte en zal bij het belasten op buiging een grote normaalkracht moeten hebben om trekspanningen in het materiaal te voorkomen.

Bovengenoemde kenmerken worden bepaald door de uitvoerparameters van het groutproces en de eigenschappen van de bodem. De snijdruk en het snijdebiet, de vuldruk en het vuldebiet, de luchtdruk en het luchtdebiet, de trek- en rotatiesnelheid en de water/cement-factor van het grout vormen de uitvoerparameters. De belangrijkste grondeigenschappen zijn dichtheid, cohesie en poriënvolume. Door de juiste keuze voor de waarden van de uitvoerparameters kan het resultaat van het jetgrouten worden gestuurd en gevarieerd.

Op beperkte schaal is getracht verbanden af te leiden tussen de invoerparameters, de grond en de uitvoerparameters, en het jetgroutresultaat. Hierbij is met name gekeken naar het eroderend vermogen van de snijstraal, die de diameter van de kolom bepaald. Hierbij spelen snijdebiet en -druk en trek- en rotatiesnelheid een belangrijke rol omdat zij de kracht van de snijstraal en de duur van het erosieproces bepalen. De retourspoeling is ook nader beschouwd en geprobeerd is op grond van de volumieke massa een berekening te maken van de diameter van de kolom.

Ontwikkelingen in de jetgrouttechniek zijn gericht op het beperken van de retourspoeling en het vergroten van de homogeniteit en voorspelbaarheid van het resultaat. Hiervoor zijn diverse variatie bedacht voor met name de boorbuis. Voor het verkrijgen van grotere diameters wordt gewerkt aan een zogenaamd Super-Jet systeem.

De jetgrouttechniek biedt vele mogelijkheden, met voordelen ten opzichte van andere, meer gebruikelijke bodeminjecties. Indien de bekendheid in Nederland groter wordt zal de techniek steeds vaker worden toegepast, zeker omdat vanwege ruimtegebrek steeds vaker constructies in de ondergrond worden aangelegd.

Helaas bevat de literatuur een geringe hoeveelheid informatie over het jetgrouten, omdat aannemers uit concurrentie overwegingen ervaringen nauwelijks publiceren. Het unieke karakter van de omstandigheden van iedere toepassing maakt het moeilijk behaalde resultaten te reproduceren op andere locaties. Ervaring speelt bij het uitvoeren van jetgroutconstructies een zeer belangrijke rol.

## I.1 Inleiding

Dit deel betreft de beschrijving, de uitvoering en de verschillende toepassingen van de jetgrouttechniek. Daarnaast wordt ingegaan op uitgevoerd onderzoek en de ontwikkeling van de techniek. Een literatuurstudie vormt de basis van dit verslag. De tussen haakjes geplaatste nummers verwijzen naar de literatuurlijst in de bijlage. Het doel van dit deel is het algemeen inleiden van het onderwerp jetgrouten en het aangeven van de mogelijkheden en beperkingen van de techniek.

Hoofdstuk I.2 bevat de geschiedenis van het jetgrouten en de eerste toepassing. Daarnaast zal het principe van de techniek worden uitgelegd met de verschillende varianten van jetgrouten. Hierbij wordt tevens aandacht besteed aan het benodigde materieel en personeel voor het uitvoeren van jetgroutelementen.

Hoofdstuk I.3 gaat aan de hand van praktijkgevallen in op de verschillende toepassingen van de jetgroutelementen. Wat zijn de mogelijkheden en op welke wijze komen die tot stand. Onderscheid wordt gemaakt tussen (grout)elementen met een constructieve en elementen met een vloeistofremmende functie. Een derde categorie betreft de elementen met een gecombineerde functie.

Hierna zullen in hoofdstuk I.4 de verschillende uitvoeringsparameters aan de orde komen. Dit betreft onder andere de druk, het debiet, de draai- en treksnelheid. Hierbij wordt ook ingegaan op de afhankelijkheid van de samenstelling en eigenschappen van de te jetgrouten bodem.

Hoofdstuk I.5 bevat een inventarisatie van mogelijke (simpele) berekeningen en onderzoek aan het jetgroutproces. In het tweede en derde deel zal hierop uitvoerig worden ingegaan. De onderwerpen in dit hoofdstuk zijn: Het gedrag van de grond tijdens jetgrouten, het eroderend vermogen van de snijstraal, volumieke massa als indicatie voor de diameter en de mechanische eigenschappen van de verharde kolom.

Het hoofdstuk (I.6) gaat kort in op nieuwe ontwikkelingen op het gebied van jetgrouten, veranderingen in de techniek en uitvoeringswijze. Het betreft technieken voor het verminderen van de retourspoeling, het verbeteren van het resultaat en het verkrijgen van grotere diameters (Super-High-Pressure). Het eind van dit deel wordt gevormd door de conclusie (I.7) over hetgeen in de literatuur vermeld is en dit verslag aan de orde komt.



## I.2 De jetgrouttechniek

### I.2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft onderwerpen waarvan een aantal verderop in dit verslag nog nader zal worden toegelicht. Het doel van dit hoofdstuk is het geven van algemene informatie over de jetgrouttechniek waarbij de ontwikkeling van de jetgrouttechniek (I.2.2), het principe van jetgrouten (I.2.3), de jetgroutvarianten (I.2.4) en het materieel waarmee de groutelementen worden gemaakt (I.2.5) aan bod komen. In I.2.6 wordt ingegaan op de functies van jetgroutlichamen en in I.2.7 volgt een opsomming van behaalde resultaten.

### I.2.2 Ontwikkeling jetgrouttechniek

In de funderingstechniek dateren de eerste toepassingen van hogedruk-injectie van rond 1960. Daarvoor werd reeds jaren in de olie-industrie gebruik gemaakt van een dergelijke techniek voor het dichten van boorgaten. De eerste funderingstoepassing betrof het repareren van een dichtingsscherm in een stuwdam in Pakistan door Cementation Ltd te Londen. [Lit. 28]

De jetgrouttechniek is na 1965 verder ontwikkeld in Japan, waar ook veel aandacht is besteed aan het ontwikkelen van gespecialiseerde apparatuur. Het licentierecht is in handen van een tweetal Japanse bedrijven, te weten Kajima Corporation en Chemical Grouting Ltd. beide gevestigd in Tokyo [Lit. 32]. In Europa is de techniek geïntroduceerd in de begin jaren zeventig en is onder andere bestudeerd voor de ondersteuning van de toren van Pisa (Italië).

In de loop van de jaren tachtig is het toepassingsbereik van de techniek enorm uitgebreid, de techniek is verfijnd en meer betrouwbaar geworden. Momenteel is het een volwaardige funderingstechniek met bijzonder veel mogelijkheden en voordelen ten opzichte van andere veel gebruikte injectie- en/of funderingstechnieken, zoals bevriezen of chemisch injecteren. Ook het groeiende besef dat het milieu zoveel mogelijk moet worden gespaard levert een bijdrage aan de verschuiving van chemisch injecteren naar injecteren op mineraalbasis (zoals grout).

Enkele bekende aannemers die de jetgrouttechniek in Europa uitvoeren zijn Visser&Smit Bouw bv te Papendrecht, Keller Grundbau GmbH (Duitsland), Smet-Boring NV (België) en Bachy (Frankrijk). Dit is een deel van de aannemers die ervaring hebben met jetgrouten, ook in Groot-Brittannië en Italië zijn dergelijke bedrijven te vinden.

### I.2.3 Principe jetgrouten

Jetgrouten is een techniek waarbij de grond in-situ wordt vermengd met de geïnjecteerde vloeistof. De grond wordt door de hogedruk-straal, met snelheden van de vloeistof groter dan 100 m/s, als het ware gesneden, losgewoeld en vermengd. Dit verschilt ten opzichte van de gebruikelijke injecties waarbij sprake is van penetratie van de injectiespecie in het grondlichaam. Omdat de grond bij het jetgrouten compleet wordt losgesneden en gemengd, is de techniek in principe in alle grondsoorten toepasbaar, ongeacht hun doorlatendheid. [Lit. 17 en 28]

Tijdens het injecteren stroomt een deel van het ontstaande grond/grout-mengsel langs de buitenzijde van de injectiebuis naar het oppervlak terug, dit wordt de retourspoeling genoemd. De uitvoering van jetgrouten is volledig trillingsvrij en kan door de toepassing van speciaal ontworpen machines in zeer kleine ruimten worden uitgevoerd.

De volgorde van uitvoeren is zichtbaar in afbeelding I.2.1. Als eerste wordt de boor-/injectiebuis (diameter circa 150 mm) met behulp van de spoelmethode op diepte gebracht. Vaak heeft deze buis aan de onderzijde een verharde boorkop om eventuele harde elementen in de bodem te doorboren. Het is mogelijk om het spoelen met alleen water te doen, maar meestal geschiedt dit al met het water/cement-mengsel (grout). Als spoelgaten kunnen de injectiegaten aan de zijkant van de boorbuis worden gebruikt, maar het is ook mogelijk hiervoor een speciaal gat aan de onderzijde van de buis te gebruiken, die alvorens te injecteren met een kogel moet worden afgedicht.

Zodra de gewenste diepte is bereikt, wordt gestopt met spoelen en wordt het eventueel gebruikte spoelgat afgesloten. Daarna wordt via zeer kleine injectieopeningen (1,5 tot 6 mm diameter) onder zeer hoge druk (150 tot 800 bar) grout geïnjecteerd. De uitstroomenergie is daarbij zo groot dat de geraakte grondkorrels uit het verband van het skelet worden gerukt en intensief worden vermengd met de geïnjecteerde specie. Aangezien sprake is van min of meer onsamendrukbaar materiaal, zal een deel van het ontstaande mengsel naar het oppervlak ontsnappen. Deze retourspoeling komt via de ringvormige ruimte langs de boorbuis omhoog. [Lit. 28]

Door het traag optrekken van de langzaam roterende boorbuis, wordt in de grond een homogene zuil gevormd die bestaat uit een mengsel van het oorspronkelijke materiaal en de injectiespecie. De afmetingen van deze groutkolom zijn afhankelijk van onder andere de injectiedruk, het debiet, de draai- en treksnelheid en de grondsoort. Om uitzakking van de zuil te voorkomen kan bentoniet aan het injectiegrout worden toegevoegd (zie ook deel IV).

Na verharding ontstaat een betonnen element, dat voor verschillende doeleinden gebruikt kan worden. Het is mogelijk na het verwijderen van de boorbuis het boorgat te voorzien van een wapeningsstaaf. In afbeelding I.2.1 is de groutkolom verticaal aangebracht, maar kan desgewenst onder een hoek worden uitgevoerd.

De groutkolommen kunnen worden aangebracht volgens willekeurige schikkingen, al naar gelang de functie die de kolommen krijgen. Door nu kolommen met een gedeeltelijke overlap naast elkaar te maken, ontstaan aanéengesloten (grotere) elementen, zie afbeelding I.2.2. Over de volgorde waarin individuele kolommen van dergelijke schermen gemaakt moeten worden bestaat geen duidelijkheid. In deel IV van dit afstudeerwerk wordt hier kort op ingegaan. Door de wijze van uitvoeren kan eenvoudig onder of tussen bestaande constructie worden geïnjecteerd, een opening ter grootte van de boorbuis is daarvoor voldoende.

### I.2.4 Verschillende systemen

Het hiervoor beschreven jetgroutsysteem kent een drietal varianten, te weten het 1 fase, het 2 fasen en het 3 fasen systeem. Deze systemen worden afhankelijk van de aannemer, ook wel Mono-, Bi- en Tri-jet genoemd of Single-, Double- en Triple-Soilcrete. Hier zal de eerste naamgeving worden aangehouden.

#### 1 fase systeem

Het 1 fase systeem wordt veelal toegepast bij gemakkelijk te eroderen grondsoorten, zoals bijvoorbeeld zand en is geschikt voor het maken van kleine en middelgrote kolomdiameters. De 1 fase betekent dat de injectiebuis is uitgerust met één soort injectie, in dit geval de groutinjectie. In afbeelding I.2.3 is dit aangeduid met Zement-susp.-strahl. Het aantal injectiegaten, hier verder nozzles genoemd, varieert.

#### 2 fasen systeem

Om de reikwijdte van de straal te vergroten kan de groutstraal worden omhuld met een luchtmantel. Dit vermindert de drukafname van de straal en leidt tot grotere diameters van de groutkolom. Dit

zogenaamde 2 fasen systeem is afgebeeld in I.2.4 (Luftummantelter Zementsusp.-strahl). Hiervoor is het noodzakelijk de boorbuis te voorzien van meerdere kanalen. De luchtdruk ligt in de orde van 10 bar, zie ook hoofdstuk I.4.

### **3 fasen systeem**

Een derde systeem betreft de 3 fasen techniek, waarbij een waterstraal wordt geïntroduceerd die de snijfunctie van de groutstraal overneemt. Deze met lucht omhulde straal bepaalt de diameter van de kolom. De grond wordt door deze snijstraal losgewoeld en na het langzaam trekken van de boorbuis vermengd met het grout uit de zogenaamde vulstraal. De snij- en vulfuncties zijn bij dit systeem duidelijk gescheiden. Zie afbeelding I.2.5.

### **vergelijking**

Het 1 fase systeem is de meest hoogwaardige techniek. Doordat gedurende het injectieproces de retourspoeling vloeiend naar boven stroomt, wordt altijd een optimale ondersteuning van de omringende grond gewaarborgd. Uit proeven is ook gebleken dat de grond rond de jetgroutkolommen vaster is geworden door het groutproces [Lit. 28].

Met het 2 en 3 fasen systeem kunnen echter grotere diameters worden bereikt dan met het 1 fase systeem vanwege de inzet van lucht. Het gebruik van lucht heeft als nadeel dat de overtollige specie nogal onregelmatig naar het oppervlak komt, waardoor het niet is uitgesloten dat tijdelijke onderdrukken in de groutkolom ontstaan [28]. Bovendien kan lucht andere wegen naar boven zoeken dan de ringvormige schacht rond de boorbuis. Het geïnjecteerde grout zal deze weg dan volgen. Met name bij veel puin of grindnesten in de grond kan dit de kwaliteit en homogeniteit van de kolom nadelig beïnvloeden.

Het grote voordeel van het 3 fasen systeem is de genoemde functiescheiding door het toevoegen van een waterstraal. Hierdoor is het mogelijk de druk van de vulstraal sterk te verminderen, de waterstraal moet echter een behoorlijke druk houden. Hoewel de krachtige waterstraal voor de vulstraal uitgaat en de afstand circa 30 cm bedraagt, vindt verdunning plaats van de vulstraal, waardoor het cementgehalte in de jetgrout-kolom lager zal uitkomen bij gelijkblijvende water/cement-factor van de groutstraal. Dit kan worden gezien als een voordeel, minder cement voor een zelfde diameter in vergelijking met het 2 fasen systeem. Indien de sterkte van de kolom belangrijk is, werkt dit echter als nadeel.

Om het cementgehalte van de groutkolom te vergroten is bij het experiment ten behoeve van de tramtunnel in Den Haag een vierde systeem getest, het zogenoemde **3 fasen plus systeem**. In dit geval is zowel gesneden als gevuld met grout. Hierdoor nam het cementgehalte van de kolom enorm toe, maar bleek achteraf een te hoge waarde te hebben. Nadeel van dit systeem is dat het nogal wat pompcapaciteit vergt en het materieel veel sneller slijt. Het verpompen van grout is veel zwaarder en veroorzaakt meer slijtage dan het verpompen van water. In de literatuur wordt geen melding gemaakt van dit systeem en was het experiment waarschijnlijk een primeur.

Op het 2 fasen systeem bestaat nog een variant waarbij geen lucht wordt gebruikt. Dit **2 fasen (water) systeem** kent een waterinjectie en een groutinjectie, het 3 fasen systeem zonder lucht dus eigenlijk. Deze variant wordt bijvoorbeeld gebruikt bij jetgrouten onder bestaande constructies als de hoeveelheid cement in de kolom niet groot hoeft te zijn, maar toch aanzienlijke diameters moeten worden gehaald. In dit verslag wordt weinig aandacht besteed aan deze variant. Onder het 2 fasen systeem wordt in dit verslag verstaan het eerder beschreven 2 fasen (lucht) systeem, zonder waterstraal.

### 1.2.5 Benodigd materieel

Globaal valt het benodigde materieel voor het maken van jetgroutelementen uitéén in een drietal delen. Als eerste betreft dit de installaties benodigd voor het opslaan, mengen en verpompen van de injectievloeistof, de jetgroutcentrale. Daarnaast is ter plekke van de te maken groutkolom een boormachine nodig met een boorbuis. Voor het afvoeren van de retourspoeling, het schoonhouden van de bouwplaats en het draaiend houden van de machines is (hulp)materieel op de bouwplaats aanwezig. Dit vormt de derde groep. De registratie van de pompprestaties en de boorbuissystemen komen nog specifiek aan de orde.

#### **jetgroutcentrale**

In afbeelding I.2.6 zijn de verschillende onderdelen van de jetgroutcentrale benoemd. Een cementsilo bevat de voorraad cement, bij grote projecten is de productie dusdanig dat meerdere silo's nodig zijn. Voor het andere bestandsdeel van het grout, te weten water, zijn vaak grote waterdichte containers op het werk aanwezig. Met behulp van een schroefpomp gaat het cement in charges de mengbak (Mischer) in. De mengverhoudingen worden op gewicht ingesteld en het in de schroefpomp opgenomen wegmaterieel dient goed geijkt te zijn.

In de mengbakken worden de bestandsdelen met behulp van enkele mixers tot een geheel geroerd. Hierna wordt het grout in voorraadbakken bewaard en continu geroerd (Rührwerk). Er dient niet te veel tijd te verstrijken tussen het aanmaken en het verpompen van het grout, zodat het grout na verwerking nog in staat is uit te harden. In de mengbakken kan de water/cement-factor door het meten van het volumegewicht van het mengsel worden gecontroleerd.

Een lagedruk-pomp leidt de grout vervolgens naar een hogedruk-pomp, waar een bepaald debiet met een van te voren ingesteld druk de slangen in wordt geperst. In het geval van het 3 fasen systeem is het noodzakelijk dat er een tweede hogedruk-pomp aanwezig is voor het op druk brengen van de waterstraal. Bij het 2 en 3 fasen systeem zal een compressor noodzakelijk zijn voor het leveren van de benodigde lucht. De ingestelde drukken worden door de machines automatisch op de juiste waarden gehouden.

Al deze installaties kunnen door één of twee personen worden aangestuurd, afhankelijk van de plaats en integratie van de verschillende bedieningspanelen. Bovenstaande apparatuur is niet specifiek voor de jetgrouttechniek, maar heeft hiervoor wel aanpassingen ondergaan. Deze apparatuur wordt door verschillende binnen en buiten Europa gevestigde bedrijven gefabriceerd. Obermann in Duitsland is bijvoorbeeld de leverancier van het grootste deel van de centrale van VSB. De verschillen tussen de pompen van de diverse leveranciers komen hier niet aan de orde.

#### **boorinstallatie**

Via hogedruk-slangen komen de verschillende materialen bij de boorkraan aan. Deze kraan kan een speciaal voor een jetgroutwerk omgebouwde heikraan zijn, maar er bestaan ook speciale lichte jetgroutmachines. Het voordeel van deze laatste machines is dat bij de uitvoering geen draglineschotten nodig zijn om te voorkomen dat de kraan in de grond wegzakt.

De boormachines hebben een makelaar waarlangs de boorbuis kan bewegen. De boormotor bevindt zich afhankelijk van de machine helemaal bovenaan de boorbuis of is verplaatsbaar langs de boorbuis. Dit laatste systeem behoeft een minder zware en lange makelaar maar verplicht tot het zogenaamde overpakken van de buis tijdens het boren. Hierbij moet de boormotor na een stuk boren naar boven worden verplaatst alvorens verder te kunnen zakken.

Via de boormachines is de draai- en treksnelheid van de boorbuis regelbaar. Tevens is meetapparatuur bevestigd om de stand van de makelaar en dus ook van de boorbuis te bepalen en eventueel te

corrigeren. Er zijn ook systemen op de markt waarbij de scheefstand van de boorbuis direct met behulp van een in de boorbuis opgenomen inclinometer wordt gemeten en continu wordt doorgegeven aan de machinist. Een andere manier om de scheefstand van het boorgat te meten is na het boren de boorbuis te verwijderen en een aparte buis in het boorgat te laten zakken. In deze buis kan vervolgens een inclinometer worden gehangen. De personele bezetting op dit onderdeel betreft een machinist en een boormeester voor respectievelijk in en naast de machine.

### **hulpmaterieel**

Op de bouwplaats is vaak nog ander materieel te vinden dat niet direct bijdraagt aan het jetgroutproces. De afvoer van de retourspoeling is meestal noodzakelijk om de bouwplaats niet in een maan- of modderlandschap te doen veranderen. Met een kleine graafmachine kan een gleuf gemaakt worden, waardoor de spoeling naar een bezinkbak kan stromen en van waaruit het overtollige water kan worden afgepompt. Indien weinig ruimte beschikbaar is kan de spoeling ook direct via kunststof leidingen naar een vloeistofdichte container worden gepompt.

In geval van langdurige defecten en na gebruik dient de hele groutinstallatie inclusief de slangen en boorbuis goed te worden schoongemaakt. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een hogedruk-spuit. Verder is een dieseltank en een aggregaat op het werk aanwezig voor de stroom- en brandstofvoorziening van de verschillende machines.

### **boorbuis**

De boorbuis bestaat uit een aantal delen van bijvoorbeeld 1, 1½ of 2 meter die tezamen de benodigde boordiepte bestrijken. Door de boorbuis lopen verscheidene leidingen die zorgen voor de aanvoer van grout, lucht en/of water. Een 2 fasen boorbuis bevat een binnenbuis voor de aanvoer van grout, de holle ruimte daar omheen is voor de luchtaanvoer. In het geval van een 3 fasen systeem bevat de boorbuis nog een extra binnenpijp, zie afbeelding I.2.7.

Aan de onderzijde bevindt zich de boorkop die in verschillende uitvoeringen bestaat, afhankelijk van het jetgroutsysteem en de leverancier. Afbeelding I.2.8 laat een tweetal boorkoppen zien. De linker boorkop in de afbeelding is van een 2 fasen systeem, waarbij aan de onderzijde een spoelgat beschikbaar is voor het op diepte brengen van de boorbuis. Nadeel van dit systeem is dat voor het injecteren een stalen kogel in de boorbuis moet worden neergelaten, om het spoelgat te dicht. Hiervoor is het noodzakelijk de druk van de buizen te halen en de boorbuis tijdelijk te ontkoppelen. Er wordt momenteel onderzocht of hiervoor een sluisstelsel ontwikkeld kan worden. De boorkop bevat verder enkele geleidingswerken en een boorpunt om harde delen in de grond te doorboren. De rechter boorkop in afbeelding I.2.8 is van het 3 fasen systeem. Deze boorkop heeft geen spoelmogelijkheid aan de onderzijde. De snijnozzles (boven) en de vulnozzles (onder) zijn duidelijk zichtbaar.

In de boorkop bevinden zich de injectieopeningen, de nozzles. Het aantal en de grootte verschillen afhankelijk van het systeem en de te bereiken resultaten. Deze nozzles, zie ook hoofdstuk I.4, kunnen eventueel ook onder een hoek worden geplaatst. Dit wordt bijvoorbeeld toegepast indien onder een betonnen element gegroot moet worden en de aansluiting van de groutkolom op dit element optimaal moet zijn. Hierbij worden de vulnozzles dan onder bijvoorbeeld 45 graden naar boven gericht.

### **controle-apparatuur uitvoeringsparameters**

Ter beoordeling van de groutresultaten worden gedurende het groutproces allerlei gegevens mechanisch dan wel elektronisch geregistreerd. Op het bedieningspaneel bevinden zich diverse meters waar waterdebiet en -druk, groutdebiet en -druk en luchtdruk af te lezen zijn. Vaak worden deze gegevens dan ook nog met behulp van een schrijver op een rol vastgelegd.

Tevens is het mogelijk bovengenoemde gegevens elektronisch met behulp van een zogenaamd log-systeem (Obermann) op een diskette vast te leggen, zodat ze achteraf kunnen worden afgedrukt. In de

boormachine vindt de elektronische registratie plaats van de draai- en treksnelheid, die ook op diskette worden vastgelegd. Inmiddels zijn er diverse andere systemen op de markt die in de boormachine gemonteerd kunnen worden en alle benodigde gegevens registreren. Voordeel van de registratie ter plaatse van de boormachine is dat de gemeten drukken beter overéenkomen met de drukken ter plaatsen van de nozzles. In het geval van lange aanvoerslangen naar de boorinstallatie, treedt drukverlies op dat niet wordt geregistreerd ter plaatse van de groutinstallatie.

Registratie van de parameters en het continu kunnen aflezen van deze parameters is eveneens belangrijk in verband met de mogelijkheid van het optreden van drukopbouw in de grond. Indien de afvoer naar het oppervlak door instorting van het boorgat verstopt raakt kan sterke drukopbouw plaatsvinden in het grondmassief. Het optreden van dit verschijnsel kan worden waargenomen op onder andere de debietmeters. Als aanvullende eis geldt overigens dat altijd retourspoeling naar het oppervlak dient te komen, wat wordt gecontroleerd door de boormeester.

## **I.2.6 Functies van jetgroutelementen**

Grofweg kunnen de verschillende functies van jetgroutkolommen worden onderverdeeld op de volgende wijze: Jetgroutkolommen met een constructieve functie, jetgroutkolommen met een vloeistofremmende functie en jetgroutkolommen met een gecombineerde functie van dragen (constructief) en keren (vloeistofremmend). Deze verdeling zal kort worden toegelicht. Meer toepassingen komen in hoofdstuk I.3 aan de orde.

### **constructieve functie**

Het constructieve gebruik van jetgroutkolommen heeft een zeer breed toepassingsgebied. Één van de meest bekende en voor de hand liggende toepassingen betreft het ondersteunen of ondervangen van funderingen. Meestal wordt jetgrouten dan uitgevoerd indien bij een bestaande constructie sprake is van ongeoorloofd zakkingsgedrag. De kolommen kunnen dan onder de bestaande fundering worden aangebracht. Een andere toepassing is het aanbrengen van jetgroutkolommen ten behoeve van een diepe ontgraving naast een fundering op staal.

Andere constructieve toepassingen zijn ondermeer het ontlasten van grondkerende wanden door het aanbrengen van een jetgroutscherm achter de wand en het verstevigen van een boorfront door horizontale jetgroutkolommen bij bijvoorbeeld de New Austrian Tunnelling Method (N.A.T.M). Het zal duidelijk zijn dat met de term constructief wordt bedoeld het opnemen van krachten.

### **vloeistofremmende functie**

Door de jetgroutkolommen overlappend uit te voeren kunnen aaneengesloten schermen gerealiseerd worden die tot doel hebben het onderbreken en remmen van vloeistofstromen, bijvoorbeeld door de kern van stuwdammen te voorzien van een jetgroutscherm, zodat mogelijke erosie van de dam door grondwaterstroming kan worden tegengegaan. Andere toepassingen zijn horizontale of verticale jetgroutlagen om de toestroom van grondwater in een bouwput te voorkomen.

Hoewel deze schermen vanwege hun functie vaak een zekere waterdruk moeten kunnen opnemen, hebben ze geen constructieve functie. Dit omdat de constructies waarin deze groutschermen worden toegepast op zich zelf voldoende sterk zijn, bijvoorbeeld een stuwdam, waar zuiver vanuit het oogpunt van grondwaterstroming een jetgroutscherm wordt uitgevoerd.

### **gecombineerde functie, keren en dragen**

Een derde groep van de toepassingen van jetgroutelementen betreft de constructies waarbij de schermen of kolommen niet alleen een vloeistofdichtende functie hebben, maar ook bijdragen aan het (constructieve) evenwicht van de bouwput. Hierbij moet gedacht worden aan horizontale of gekromde lagen met onvoldoende gronddekking als afsluiting van een bouwput of verticale schermen ter plaatse

van het inbreken of uitbreken van een tunnelboormachine in een respectievelijk start- of eindschacht van een boortunnel.

### **I.2.7 Behaalde resultaten, diameter, doorlatendheid en sterkte**

Met het oog op de genoemde functies in de vorige paragraaf is het noodzakelijk te weten welke resultaten met de beschreven jetgroutmethode haalbaar zijn. Met name is het belangrijk welke diameters gehaald kunnen worden, wat de doorlatendheid van het uitgeharde grout is (vloeistofremmende functie) en welke (druk)sterkten aan het materiaal toegekend kunnen worden (constructieve functie). Genoemde eigenschappen worden door een groot aantal parameters bepaald, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen injectieparameters en de parameters van de grond.

#### **diameters**

Literatuur [Lit. 28] geeft aan dat voor de verschillende systemen globaal het volgende geldt:

- 1 fase systeem, diameters tussen 0,40 en 1,00 m
- 2 fasen systeem, diameters tussen 0,80 en 1,40 m
- 3 fasen systeem, diameters tussen 0,80 en 2,00 m

De spreiding wordt onder andere bepaald door de grondsoort waarin de kolommen worden gemaakt.

Ongeveer dezelfde waarden worden gevonden in literatuur [Lit. 12], zie afbeelding I.2.9 en [Lit. 4] zie afbeelding I.2.10. In de praktijk liggen deze grenzen niet zo strikt en wordt gekeken naar een financieel zo gunstig mogelijk ontwerp. Indien bijvoorbeeld een horizontaal scherm op grote diepte moet worden gemaakt, kan met het maken van zeer grote diameters een aanzienlijke tijdsbesparing worden verkregen, het aantal boringen wordt immers minder. Het blijkt (zie ook deel II en III) dat met het 2 fasen systeem ook best een diameter van 2,30 m kan worden gehaald. In andere literatuur wordt zelfs verslag gedaan van kolommen met diameters tot circa 4,0 m [Lit. 10]. Voor een eerste indicatie geven bovenstaande richtlijnen goede waarden.

Diameterbepaling direct na het maken van een kolom is een belangrijk controlemiddel voor de kwaliteit van de kolom. In de praktijk blijkt het echter niet goed mogelijk te zijn de diameter direct te bepalen. Er bestaan speciaal ontwikkelde parapluvormige apparaten, spinnen genoemd, die in de verse kolom geplaatst kunnen worden, waarbij de poten open kunnen klappen. Deze poten worden tegen de buitenkant van de kolom gedrukt en door de uitslag te meten kan de diameter worden bepaald. Deze betrekkelijk nieuwe manier om de diameter te meten komt uitgebreid aan bod in deel II. Afbeelding I.2.11 illustreert de werking van de spin.

#### **doorlatendheid**

De doorlatendheid van groutschermen wordt voor het grootste deel bepaald door de aansluitingen van kolommen op elkaar, de aanwezigheid van discontinuïteiten en insluitingen. In het geval van het jetgroutscherm bij de Willemsspoortunnel werd een doorlatendheid (k-waarde) van het groutmateriaal (een geboord monster) gevonden in de orde van  $10^{-11}$  m/s [Lit. 24]. In deze literatuur wordt aanbevolen dat de geëiste doorlatendheid van verticale schermen (dus de totale wand) niet minder mag bedragen dan 1/100 van de oorspronkelijke doorlatendheid van de bodem. Voor horizontale schermen geldt een factor van 1/1000. Volgens andere literatuur ligt de doorlatendheid van een totaal scherm globaal in de orde van 1/1000 van de doorlatendheid van het oorspronkelijke bodemmateriaal [Lit. 9, blz. 387].

#### **(druk)sterkten**

Omdat het grout maar weinig trek kan opnemen en de kolommen niet of nauwelijks kunnen worden voorzien van (trek)wapening worden de elementen hoofdzakelijk op druk belast. De trekstrekke van het grout varieert globaal tussen 1/30 tot 1/10 van de druksterkte [Lit. 33].

Literatuur [28] geeft de volgende richtwaarden voor de druksterkten, afhankelijk van de grondsoort: (onduidelijk is of het hier gaat over de rekenwaarde of representatieve druksterkte)

- zuiver zand en grind: 20 tot 40 N/mm<sup>2</sup>;
- klei- of veenhoudend zand: 8 tot 15 N/mm<sup>2</sup>;
- klei of leem: 2 tot 8 N/mm<sup>2</sup>.

De spreiding wordt veroorzaakt door de waarden van de uitvoeringsparameters.

Literatuur [12] geeft iets lagere waarden, zie afbeelding 1.2.12. In het geval van de sterkten geldt tevens dat de resultaten in de praktijk sterk te beïnvloeden zijn. Het gehalte cement in de kolom is vaak een maat voor de druksterkte in een bepaalde grondsoort. Naarmate meer van de oorspronkelijke bodem door het jetproces wordt vervangen door grout zal de invloed van de aanwezige grond op de druksterkte afnemen.



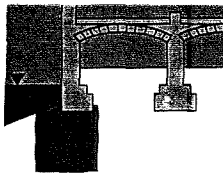
## I.3 Functies en toepassingen van jetgroutkolommen

### I.3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is kort ingegaan op de range van mogelijke inzetbaarheid van jetgrouten in de funderingstechniek. Hierbij werd onderscheid gemaakt in constructieve, vloeistofremmende en gecombineerde functies van jetgroutelementen. Deze indeling zal in dit hoofdstuk worden aangehouden. Getracht wordt per functie de verschillende toepassingen met één of meerdere voorbeelden uit de praktijk aan te halen. Een meer gedetailleerde beschrijving van deze praktijkgevallen kan worden gevonden in de aangegeven literatuur.

### I.3.2 Constructieve functie

#### I.3.2.1 Funderingsversterking of ondervanging



Het ondervangen van funderingen kan op een betrekkelijk eenvoudige wijze geschieden met jetgroutelementen. Doordat jetgroutkolommen vanaf maaiveld kunnen worden gemaakt, is het onnodig de te ondervangen of te versterken fundering bloot te leggen. Volstaan kan worden met het boren van enkele kleine openingen in de bestaande fundering, ter grootte van de boorbuis. De voordelen van jetgrouten, zoals de trillingsarme uitvoering, het niet ontspannen van de omliggende grond en de mogelijkheid van het aanbrengen tussen aanwezige leidingen, spreken voor zich.

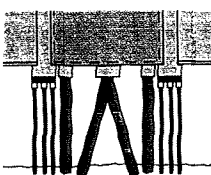
##### **funderingsversterking Huis van Brecht (KMA) Breda**

Een uitgevoerde funderingsversterking is de ondervanging van de fundering van Huis van Brecht van de Koninklijke Militaire Academie te Breda. Dit zeer oude gebouw heeft tijdens een grote restauratie een met jetgrouten versterkte fundering gekregen. Door aan weerszijden van de gevels, gefundeerd op staal, een jetgroutkolom aan te brengen, ontstaat de fundering zoals afgebeeld in I.3.1. Met behulp van speciaal materieel kan jetgrouten in zeer kleine ruimten worden uitgevoerd. Zie afbeelding I.3.2. De uitvoering van dit werk was in handen van de Belgische firma Smet-Boring. Omdat de diameter van de palen gering mocht zijn en de sterkte belangrijk was, is gekozen voor het meest eenvoudige en hoogwaardige systeem, het 1 fase systeem. Het is niet mogelijk alle kolommen direct achter elkaar uit te voeren, omdat verse kolommen nauwelijks enige sterkte bezitten, voorzichtigheid is dus geboden. [Lit. 28]

##### **ondersteuning kademuur Liverpool, Engeland**

Vanwege laterale verplaatsingen en ongeoorloofde zettingen was het noodzakelijk een 80 m lange kademuur te versterken. Een combinatie van twee rijen jetgroutkolommen met een diameter van 1,5 m en een aantal 20 m lange ankers is gekozen als oplossing voor de versterking. Het werk is uitgevoerd door de internationale tak van Keller Grundbau GmbH. Zie afbeelding I.3.3 en I.3.4. [Lit. 12]

#### I.3.2.2 Fundering van nieuwe constructies

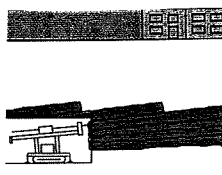


Naast het ondervangen van bestaande funderingen is het goed mogelijk de jetgroutkolommen te gebruiken voor funderingen van nieuwbouwprojecten. De genoemde voordelen van trillingsvrij aanbrengen en het niet ontspannen van de ondergrond vormen grote voordelen indien in de nabijheid van bestaande funderingen nieuwe funderingselementen gecreëerd moeten worden. Een voorbeeld hiervan betreft de nieuwbouw van Kaufhaus Woolworth Einbeck. Hiervan is geen afbeelding beschikbaar. [Lit. 12]

### wegfundering Venetië (Italië)

Een grote toegangsweg naar Venetië bevond zich in een buitengewoon slechte staat vanwege de onregelmatige zakkings van de klei-achtige ondergrond. Besloten is de fundering te vernieuwen door onder een stijve dekplaat groutkolommen te maken en deze door te zetten tot in betere grondlagen. Kolommen met een diameter van 0,65 m, gemaakt met het 1 fase jetgroutsysteem, vormen de basis van de huidige fundering. Zie afbeelding I.3.5. [Lit.10, blz. 315]

### I.3.2.3 Grondverbeteringen ter voorkoming van erosie en/of zettingen

 De grenzen tussen de verschillende toepassingen zijn niet altijd even duidelijk. Zo wordt de jetgroutmethode ook gebruikt voor het verbeteren van de grondeigenschappen ter voorkoming van erosie door bijvoorbeeld golfaanval of rivierwaterstroming. Meestal wordt dit gecombineerd met een versterking van de fundering van de te beschermen constructie.

### Kingston Bridge, Glasgow (Groot-Britannië)

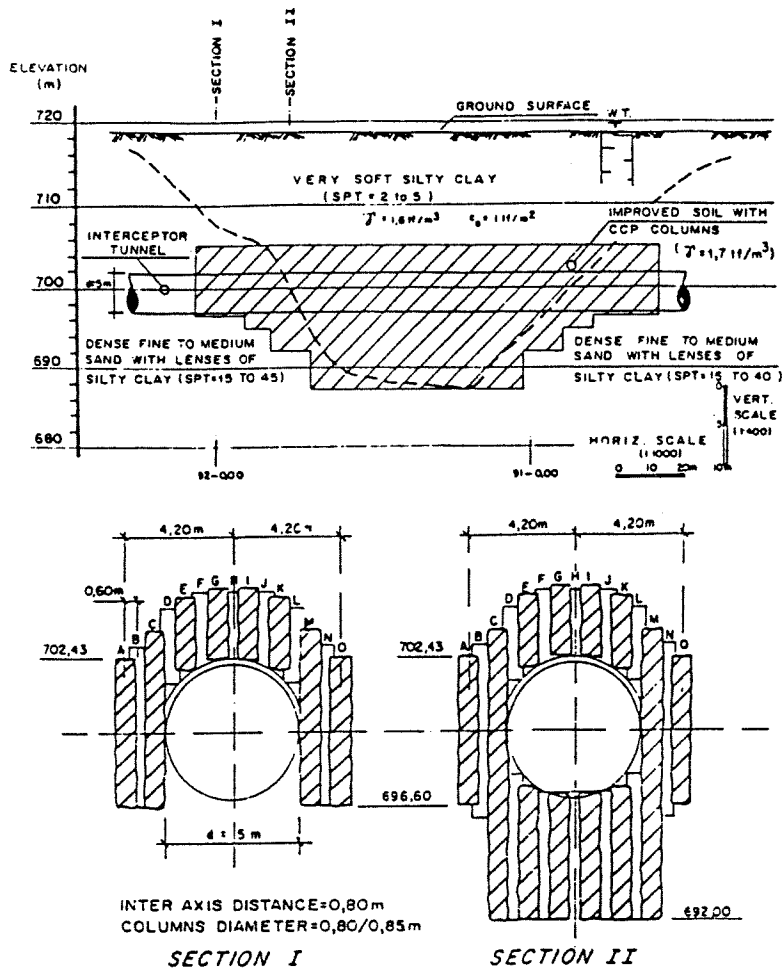
De Kingston Bridge vormt een belangrijke schakel in de ringweg van Glasgow. Onderzoek, uitgevoerd eind jaren tachtig, wees uit dat de brugconstructie op een aantal plaatsen ernstige gebreken begon te vertonen. De dilatatievoegen functioneerden niet naar behoren, de noordelijke consoles stonden ruim 16 cm uit het lood en de bescherming van de brugfundering bleek in niet al te beste staat. Daarnaast vertoonde de brug ook nog ernstige verzakkingen. De oplossing is gevonden in een grondverbetering door middel van 3 fasen jetgrouttechniek (afbeelding I.3.6). Het bestek eiste een druksterkte van minimaal 5 N/mm<sup>2</sup> en een dichtheid van 1800 kg/m<sup>3</sup>. Voor het vinden van de juiste uitvoeringparameters zijn enkele proefkolommen gemaakt. [Lit. 9, blz. 433]

### kademuur containerhaven Marseille (Frankrijk)

De kade bestaat uit caissons met een zandvulling waarop de voorste kraanbaan is gefundeerd. Na verloop van tijd bleken zakkings op te treden als gevolg van het samendrukken van de caissonvulling. Daarnaast leidde golfoverslag tot erosie van de toplaag onder de voorste kraanbaan. Door dicht langs de waterkant een rij korte groutkolommen te plaatsen kon de erosie worden tegengegaan. Daarnaast is de ondersteuning van de kraanbaan verbeterd door het aanbrengen van groutkolommen h.o.h. 3 m (afbeelding I.3.7 en I.3.8). Het voorkomen van verdere samendrukking van de caissonvulling is opgelost met een chemische injectie op grotere diepte. [Lit. 4]

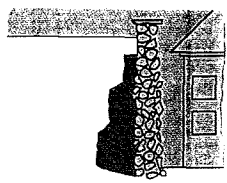
### tunneltechniek, een vijftal toepassingen

Bij het boren van tunnels kunnen ongewenste zakkings optreden van het maaiveld of is de aanwezige grond ongeschikt om een bepaalde graafmethode te gebruiken. Jetgrouten kan een oplossing bieden voor dit soort problemen. Ter bescherming van staal- of paalfunderingen tegen passerende Tunnel Boor Machines (TBM) kan een scherm worden aangelegd, zie afbeelding I.3.9 [Lit. 4]. Indien de aanwezige grond te weinig stand-up tijd heeft voor het uitvoeren van een tunnel met behulp van de New Astrian Tunnelling Method (N.A.T.M.), waarbij zonder steundruk en stalen mantel wordt gewerkt, kan de grond worden verbeterd met behulp van horizontale jetgroutkolommen, die voor het front uit worden gemaakt, afbeelding I.3.10 [Lit. 12]. Door na het jetgrouten een prop in het boorgat aan te brengen, wordt leegloop van de kolom voorkomen. Om zettingen te voorkomen worden ook wel schuine jetgroutkolommen uitgevoerd, als ondersteuning van de lining. Afbeelding I.3.11 [Lit. 4]. Verticale kolommen die vanaf maaiveld worden gerealiseerd, zijn eveneens mogelijk, afbeelding I.3.12 [Lit. 9, blz. 455]. Literatuur [10], pagina 325 bericht over een aansluiting van twee TBM's die in een blok van jetgroutkolommen tot stand is gekomen, hiervan is geen afbeelding.



Afb. I.3.12: grondverbetering ten behoeve van tunnelbouw Brazilië. [9]

### I.3.2.4 Grondkerende jetgroutelementen



Een mogelijke toepassing van jetgrouten met een grondkerende functie betreft het ontlasten van een kerende wand door het opnemen van een deel van de horizontale spanningen. Het is ook mogelijk alle horizontale grondspanningen op te nemen en zelf een kering te vormen. Omdat jetgroutkolommen een lage treksterkte bezitten en vaak ongewapend worden uitgevoerd, moet een aanzienlijke bovenbelasting aanwezig zijn om trekspanningen ten gevolge van buiging in het groutlichaam te voorkomen.

#### **verlenging Keizershoofd (kademuur) Vlissingen**

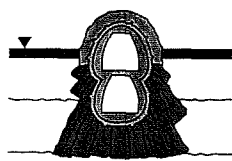
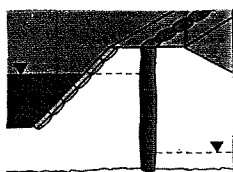
Één van de eerste in Nederland uitgevoerde jetgroutwerken betrof de verlenging van het Keizershoofd in Vlissingen. Deze veertiende-eeuwse gemetselde kademuur vormt de verdediging van de haveningang. Door uitbaggeren van de haven zou een onstabiele situatie van het Keizershoofd kunnen ontstaan. Door nu het Keizershoofd te verlengen met een groutscherm en dit geheel in het achterliggende grondmassief te verankeren is het evenwicht hervonden (afbeelding I.3.13). Dit werk is uitgevoerd met het 3 fasen systeem door Visser & Smit Bouw bv. De damwand dient ter bescherming van het groutlichaam. [Lit. 30 en 31]

#### **ontlasten oude keldermuren Louvre Museum Parijs (Frankrijk)**

Om het mogelijk te maken opgegraven archeologische vondsten te bekijken in het Louvre museum was het noodzakelijk de oude keldermuren te ontlasten van gronddrukken. Hiervoor is met behulp van het 1 fase systeem een verticale keermuur gerealiseerd (afbeelding I.3.14). Deze keermuur fungeert tevens als fundering voor de dakplaat, die het geheel overdekt. [Lit. 4]

## I.3.3 Vloeistofremmende functie

### I.3.3.1 Verticale schermen



Ten behoeve van het construeren van een fundering in een droge bouwput is het nodig de grondwaterstroming naar de bouwput zoveel mogelijk te stoppen of af te remmen. Dit kan geschieden door bijvoorbeeld het intrillen van damwanden of het maken van diepwanden. Aaneengesloten jetgroutkolommen vormen een vloeistofdicht scherm en kunnen op dezelfde wijze worden ingezet als de meer bekende bouwput omsluiters. In deze paragraaf ligt de nadruk op het keren van alleen de vloeistof en dus geen grond. Het spreekt voor zich dat de uitvoering bij de fabricage van vloeistofremmende schermen zeer nauwkeurig dient te gebeuren. De werking van een scherm wordt hoofdzakelijk bepaald door de kwaliteit van de aansluitingen van de individuele kolommen op elkaar.

#### **Willemspoortunnel Rotterdam, kruising metro station Blaak**

Het tracé van de spoortunnel kruist ter plaatse van station Blaak de Oost-West metrolijn. Deze, als stijve kokerligger uitgevoerde metrobus, is opgelegd op een tweetal palenwanden bestaande uit doorgaande HZ-profielen ingeheid tot -24 m NAP. Voor het creëren van een waterdichte bouwput was het nodig deze waterdichte palenwand in het pleistoceen te verlengen tot in de Formatie van Kedrichem. Dit is gedaan met een jetgroutscherm (afbeelding I.3.15), uitgevoerd door Bachy volgens het 3 fasen systeem. De diameter van de lange kolommen bedroeg 1,35 m. [Lit. 25]

#### **metrostation Wilhelminaplein Rotterdam**

Een andere bouwput in Rotterdam waar jetgrouten is toegepast betrof de put voor de bouw van het metrostation Wilhelminaplein. Dit nieuw te bouwen metrostation is gerealiseerd in de reeds bestaande

Noord-Zuidlijn. De metrotunnel, in de jaren zestig afgezonken, loopt ter plaatse van het Wilhelminaplein onder een sterke helling naar het maaiveld. Het metroverkeer mocht niet of nauwelijks hinder ondervinden van de bouw. De moeilijkheid van dit project bevond zich onder andere in het maken van een waterdichte bouwput. De waterdichting op de kopse kanten van de bouwput, waar de metrotunnel doorheen loopt, is gemaakt door middel van jetgrouten (afbeelding I.3.16 en I.3.17). Tijdens de bouw is een lek ontstaan in het noordelijke scherm en de bouwput is toen tijdelijk geheel onder water gezet. Het scherm is gerepareerd door het maken van 3 extra rijen kolommen. Het scherm had geen functie als grondkering, een talud aan de binnenzijde van de put maakte dit overbodig. De uitvoering van het scherm was in handen van Smet-Boring en het betrof het 2 fasen systeem jetgrouting. [Lit. 7]

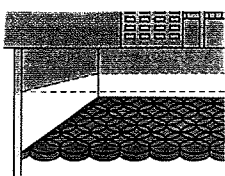
### **stuwdam Nairobi (Kenya)**

Als onderdeel van een watervoorzieningsproject in Nairobi is een groot stuwmeer aangelegd. Het meer wordt begrensd door een stuwdam van 65 m hoog en 500 m lang. Deze aarden dam heeft een kern van klei, die de grondwaterstroming door de dam moet tegengaan. Om de stroming onder de dam te remmen, is een groutscherm onder het kleilichaam aangelegd, zie afbeelding I.3.18. Er is gebruik gemaakt van het 3 fasen systeem, de aannemer was Bachy. [Lit. 4]

### **bescherming grondwater tegen giftige stoffen**

Indien zich plaatselijk giftige stoffen in de bodem bevinden is het mogelijk met behulp van de jetgrouttechniek een waterdichte bak te construeren die weglekken van de stof naar schoon grondwater tegengaat. Afbeelding I.3.19 laat zien hoe dat kan worden uitgevoerd. [Lit. 12]

### **I.3.3.2 Horizontale afsluiters**



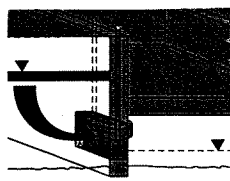
Indien een bouwput wordt gemaakt in goed doorlatende grond met een grondwaterstand boven putniveau, is het noodzakelijk buiten het realiseren van waterdichte wanden ook de onderzijde van de put waterdicht te maken. Dit kan worden gerealiseerd met onderwater beton of met een injectielaag in de bodem. Deze injectielaag kan gevormd worden door in elkaar gedraaide jetgroutkolommen.

Op deze wijze ontstaat een "jetgroutzool", in het Duits aangeduid met Soilcrete-Sohle. Indien voldoende gronddekking aanwezig is, heeft deze afsluitende laag zuiver alleen een waterremmende functie.

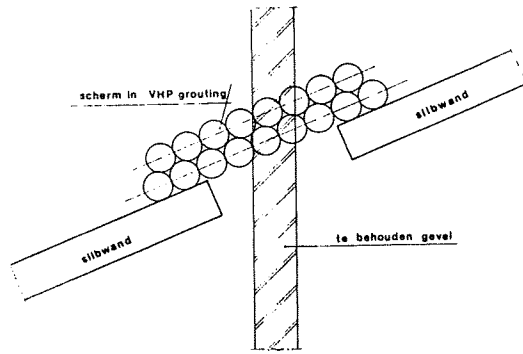
### **nieuwbouw kantoorcomplex Düsseldorf (Duitsland)**

Vanwege de grote doorlatendheid van de aanwezige grond was het noodzakelijk de bouwput voor een kantorencomplex met een injectielaag aan de onderzijde af te sluiten. De bouwput met afmetingen van 73 bij 41 m werd voorzien van een jetgroutlaag met een dikte van 90 cm. De kolommen hadden een afmeting van 1,40 m en zijn uitgebreid getest in een proefput. Zie afbeelding I.3.20. [Lit. 18]

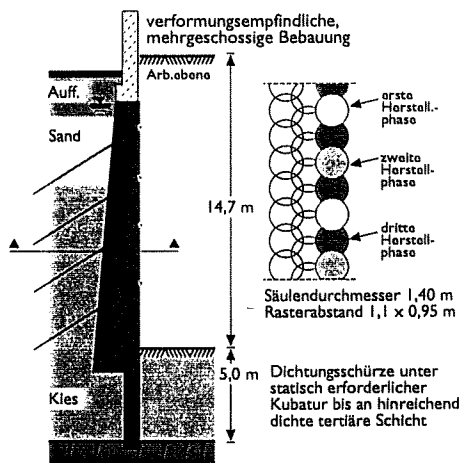
### **I.3.3.3 Afdichting van openingen**



Jetgrouten is bij uitstek geschikt voor het dichten van openingen in dam- of diepwanden of ander soort constructies. Voorwaarde is wel dat eventuele stromingen door dergelijke openingen niet te groot zijn zodat het cement tijd krijgt om uit te harden. In het kader hiervan moet bijvoorbeeld gedacht worden aan een damwand met daarin een rioleringsbuis die in functie moet blijven. Door ter plaatse van de buis de damwand te onderbreken en een aantal jetgroutkolommen te maken kan de riolering in de wand worden opgenomen en is met de aansluiting van de damwanden te realiseren.



Afb. I.3.21: openingen in diepwand, dichten door middel van jetgrouten. [28]



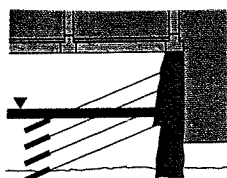
Afb. I.3.22: doorzetten groutwand tot in afsluitende laag. [12]

### gevelconstructie, V-polder en Hartelkering

Een ander voorbeeld is zichtbaar gemaakt in afbeelding I.3.21 [Lit. 28], waar een bestaande gevelconstructie niet mag worden onderbroken. Verder is jetgrouten ook gekozen voor het afsluiten van de twee schuin geheide damwanden voor het V-polder idee van Volker Stevin als alternatief voor de Betuwelijn.

## I.3.4 Gecombineerde functies

### I.3.4.1 Verticale schermen



Het is mogelijk de functies van de grondkerende schermen (I.3.2.4) en de verticale vloeistofremmende schermen (I.3.3.1) te combineren tot een verticaal grondkerend en waterdicht scherm. De reeds eerder gemaakte opmerking, dat zorg gedragen dient te worden voor het beperken van trekspanningen in het grout, blijft uiteraard gelden. Voldoende eigengewicht of een bovenbelasting is daarbij een vereiste. Door het toepassen van ankers of stempels kan de buigspanning eveneens beperkt blijven.

#### bouwput kantoor Bonn (Duitsland)

De waterdichting van de bouwput werd compleet door het verlengen van het jetgroutscherm tot in een waterafsluitende kleilaag, zie afbeelding I.3.22. De jetgroutwand is opgebouwd uit kolommen van 1,40 m die zijn vervaardigd met de 3 fasen techniek. Om zettingen achter de wand te voorkomen werden meer ankers (4 over de hoogte) toegepast dan nodig was voor het horizontale evenwicht. [Lit. 12]

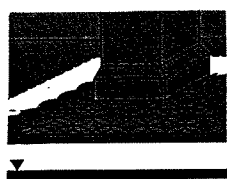
#### voetgangerstunnel onder spoor, Flüelen (Zwitserland)

Voor het bouwen van een voetgangerstunnel onder het spoor in het Zwitserse Flüelen was het niet toegestaan voor lange tijd de treinverbinding te blokkeren. Buiten de sporen bestond de bouwput uit diepwanden, die onder de sporen door middel van een tweetal groutschermen zijn verbonden. Het unieke aan dit project is dat de groutschermen niet zijn opgebouwd uit verticale of horizontale kolommen, maar uit diverse schuine kolommen. Op deze wijze werden twee schermen gemaakt met een dikte van een drietal meters, opgebouwd uit drie rijen (I.3.23 en I.3.24). [Lit. 12]

#### begin- en eindschachten boortunnel Lyon (Frankrijk)

Het begin- en eindpunt van een boortunnel behoeft een schacht van waaruit de Tunnel Boor Machine (TBM) begint te graven of waar deze eindigt. Deze schachten hebben vanwege de vereiste diepteligging van boortunnels een aanzienlijke diepte. De wanden van deze schachten kunnen worden gemaakt met behulp van de diepwanden techniek. Als gestart wordt met het boorproces wordt één van de wanden doorboord door de TBM. Grout is gemakkelijker te doorboren dan beton en daarom worden de wanden ter plaatse het begin of eind van de boortunnel vaak gemaakt van groutlichamen. Een voorbeeld hiervan is de beginschacht van een metrotunnel in Lyon (I.3.25). De kolommen hebben een afmeting van 1,20 m. [Lit. 4]

### I.3.4.2 Horizontale schermen

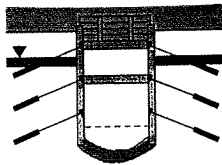


In paragraaf I.3.3.3. zijn horizontale schermen aan de orde geweest waarbij steeds voldoende gronddekking aanwezig was. Bij voldoende sterkte (en dikte) van de jetgroutzool en voldoende wrijving tussen de bouwputwanden en de zool is het mogelijk deze dekking achterwege te laten. Het voordeel van het vanaf het oorspronkelijke maaiveld aanbrengen van de zool is dat na verharding direct een stempel op diepte aanwezig is. Constructief gezien biedt dit grote voordelen.

#### **bouwput metro Duisburg (Duitsland)**

Voor de bouw van de metro in Duisburg is gebruik gemaakt van deze stempelfunctie van de waterafsluitende jetgroutzool, zie afbeelding I.3.26. Hierdoor konden enerzijds de diepwanden aanzienlijk worden verkort, anderzijds werd door het wegvallen van een stempel meer vrije werkruimte gecreëerd. De zool bestaat uit kolommen met een diameter van 1,80 m. De vervormingen van diepwand en zool zijn na iedere ontgravingsstap gemeten. [Lit. 12]

#### **I.3.4.3 Gekromde schermen**



Indien ten gevolge van belastingen de buigspanningen in de horizontale jetgroutzool te hoog worden, kan worden besloten de zool als een boog uit te voeren. Dit is gunstig in verband met de opname van de waterspanning aan de onderzijde van de put. Deze variant is gekozen voor enkele vakken van de bouwput voor de tramtunnel in Den Haag. Dit project vormt, zoals eerder gemeld, een onderdeel van de afstudeeropdracht. De jetgroutboog is slechts twee maal eerder op deze wijze uitgevoerd.

#### **proefput metrobouw Strasbourg (Frankrijk)**

In Strasbourg is een groutboog gerealiseerd in een relatief kleine proefput, zie afbeelding I.3.27. De afmetingen van de put waren 11 bij 17,3 m. Op een diepte van 19,0 m onder maaiveld is de boog gemaakt met een straal van 9,0 m en een dikte van ten minste 1,50 m. De individuele kolommen hebben afmetingen variërend van 2,10 tot 2,50 m. Het geheel is uitgevoerd door de firma Keller GmbH met het 2 fasen systeem. [Lit. 21]



## I.4 Uitvoeringsparameters en grondgesteldheid

### I.4.1 Inleiding

De resultaten van het jetgroutproces, waarvan de gerealiseerde diameter en de behaalde druksterkte de voornaamste zijn, worden bepaald door het gekozen systeem met de verschillende uitvoeringsparameters en de eigenschappen van de aanwezige grond. Van de drie systemen is het 3 fasen systeem de meest uitgebreide, de uitvoeringsparameters zijn bij dit systeem: de snij- en vuldruk, het snij- en vuldebiet, de snij- en vulnozzles, de luchtdruk, het luchtdebiet en de trek- en rotatiesnelheid. Samen met de grondgesteldheid vormen de uitvoeringsparameters de invoerparameters voor het jetgrouten. Uit de praktijk is duidelijk gebleken dat de aard van de grond een heel belangrijke rol speelt, maar waarvan de invloed niet gemakkelijk kan worden afgeleid uit eenvoudige parameters zoals de conusweerstand.

In paragraaf I.4.2 zal aandacht worden besteed aan de uitvoeringsparameters en in I.4.3 wordt ingegaan op de eigenschappen van de grond die een rol spelen bij het jetgroutproces.

### I.4.2 Uitvoeringsparameters

Bij het jetgroutproces wordt onderscheid gemaakt in een snij- en een vulstraal. De snijstraal heeft als functie het snijden en loswoelen van de grond en de vulstraal verzorgt de menging van de grond met de injectiespecie. In het geval van een 1 en 2 fase(n) systeem heeft de boorbuis maar één soort injectiestraal, wel of niet omringd met een luchtmantel. Deze groutstraal is dan zowel een snij- als vulstraal, maar wordt aangeduid met snijstraal. Het 3 fasen systeem kent wel gescheiden stralen, de snijstraal betreft een waterinjectie en de vulstraal betreft een groutinjectie. De waterstraal wordt met een luchtmantel omringd. Zie ook paragraaf I.2.4, afbeelding I.2.3 t/m I.2.5.

#### **snij- en vuldruk**

De snijstraal bepaalt in grote mate de diameter van de groutkolom. De druk van deze straal, de snijdruk, is een belangrijke indicatie voor het eroderend vermogen van de snijstraal. Hoe hoger deze druk des te verder reikt de straal in de grond en des te meer grond zal worden versneden en losgewoeld. De snijdruk wordt uitgedrukt in bar en geeft als het ware een indicatie voor de snelheid van de injectievloeistof. Het effect van de snijstraal wordt niet alleen bepaald door de druk. Het debiet en de soortelijke massa spelen daarbij ook een zeer belangrijke rol.

De vuldruk (alleen van toepassing bij het 3 fasen systeem, tevens uitgedrukt in bar) is van mindere betekenis. De snijstraal woelt de grond los en de vulstraal heeft een mengend karakter. De druk van deze vulstraal is ondergeschikt aan het debiet van deze straal. De druk moet wel voldoende groot zijn om in de losgewoelde suspensie de buitenkant van de kolom te bereiken om optimale menging over de hele kolom te bewerkstelligen.

#### **snij- en vuldebiet**

Het 3 fasen systeem kent een snijstraal van water. De snijstraal mengt zich enigszins met de vulstraal, zodat de water/cement-factor van de injectie hoger ligt dan de water/cement-factor van de vulstraal. Meer snijdebiet zal dan ook meer vuldebiet vragen om het cementgehalte van de kolom niet nadelig te beïnvloeden. Dit is financieel ongewenst. Dat meestal de snijdruk wordt vergroot als de diameter te klein wordt bevonden komt dus voort uit het feit dat het waterdebiet de samenstelling van het totaal geïnjecteerde volume nadelig beïnvloed.

Het snijdebiet heeft wel degelijk effect op de reikwijdte van de snijstraal en dus ook op de diameter van de uiteindelijke kolom. De waarde van dit debiet wordt echter voor een groot deel bepaald op grond van andere voorwaarden. De snijstraal moet namelijk voldoende spoeling geven om een vloeibare suspensie te generen en om een deel van de grond af te voeren naar het oppervlak.

Het vuldebiet bij het 3 fasen systeem is belangrijk in verband met het cementgehalte van de uiteindelijke groutkolom. De combinatie van de waarde van het debiet, uitgedrukt in liters per minuut, en de water/cement-factor bepalen samen de hoeveelheid cement die per minuut in de kolom wordt gepompt. De hoeveelheid cement in een kolom vormt in het geval van zandgronden een indicatie voor de sterkte van de jetgroutkolommen.

In het geval van het 1 en 2 fase(n) jetgroutsysteem vervult de enige injectiestraal zowel de snij- als vulfunctie. Een combinatie van voldoende druk en debiet moet worden gezocht om een goede reikwijdte van de straal te krijgen, een juiste spoeling te bewerkstelligen voor het afvoeren van gronddeeltjes en voldoende cement in de kolom over te houden. Een hulpmiddel hierbij vormt de water/cement-factor.

### **snij- en vulnozzles**

De keuze van de afmetingen van de keramisch beklede nozzles wordt direct bepaald door de waarden van de druk(ken) en debiet(en). De nozzles worden, afhankelijk van de leverancier in standaard maten geleverd en worden gemaakt van bijzonder hard staal om slijtage zoveel mogelijk te beperken. Proefondervindelijk wordt bepaald wat de druk/debiet combinatie mogelijkheden zijn bij een bepaalde nozzle diameter en boorbuissysteem. De nozzles dienen tijdens uitvoering regelmatig op slijtage te worden gecontroleerd.

In het geval van de snijnozzles zal de diameter klein worden gehouden om voldoende druk van de snijstraal te kunnen krijgen. Het aantal snijnozzles bedraagt, afhankelijk van de doelstelling, één, twee of drie. Het toepassen van één snijnozzle geeft een grotere en sterkere straal, maar betekent een grotere draaisnelheid om een voldoende kleine snijhoogte te bereiken. De snijhoogte is de hoogte waarover een snijstraal één keer langs komt en wordt bepaald door de draai- en treksnelheid. De term zal bij draaisnelheid nader worden uitgelegd. Grotere draaisnelheid geeft de snijstraal minder tijd om ver te reiken. Kortom, het is een keuze tussen één snijnozzle met een grotere draaisnelheid en een sterkere straal of meerdere snijnozzles met een lagere draaisnelheid en een minder sterke straal. De keuze is meestal afhankelijk van de gebruikte boorkop en de voorkeur van de uitvoerder.

De snijnozzles worden bij het 2 en 3 fasen systeem in een mantel geplaatst, waar kleine openingen in zijn gemaakt waardoor lucht wordt geperst als ondersteuning van de snijstraal. Het ontwerp van de snijnozzle is belangrijk met het oog op de effectiviteit van de snijstraal. In hoofdstuk 1.5 wordt dit ontwerp nader toegelicht.

Voor de vulnozzles (3 fasen) is de druk niet maatgevend maar wordt het debiet aangehouden als maatgevende factor. Deze nozzles zijn vaak een maat groter dan de snijnozzles en worden met meerdere tegelijk toegepast. Bij kleine kolommen betreft dit twee vulnozzles, maar bij grotere kolommen en debieten worden vaak drie vulnozzles toegepast. Deze vulnozzles kunnen onder een hoek worden geplaatst om een betere aansluiting te creëren tussen een kolom en een bestaande constructie. Een regel uit de praktijk (Keller) is dat wordt gesteld dat het oppervlak van de vulopeningen circa 10 keer het oppervlak van de snijopeningen moet zijn. Een bepaald vuldebiet en oppervlak van de nozzles bepalen de vuldruk. De afstand tussen snij- en vulnozzles is afhankelijk van het type boorkop, maar bedraagt ongeveer 35 cm.

### **luchtdruk en debiet**

De luchtmantel om de snijstraal dient ter ondersteuning en versterking van de straal. Praktijktesten en laboratoriumexperimenten hebben aangetoond dat de luchtmantel de reikwijdte van de jet positief beïnvloedt. Zie hiervoor paragraaf I.5.3.

Luchtdruk en -debiet vormen de variabelen die het effect van lucht op het jetgroutproces bepalen. De openingen waardoor de lucht uit de boorbuis ontsnapt zijn niet variabel en bevinden zich in een ring om de snijstraal. Vaak wordt tijdens het jetgrouten alleen gelet op de luchtdruk. Indien deze een vooraf ingestelde waarde behoudt, wordt het functioneren van de luchtmantel als goed beschouwd. Tegenwoordig bestaan er compressoren die exact de vooraf ingestelde druk leveren en het toerental aanpassen aan de weerstand. Als de luchtmantel voor een deel verstopt raakt, wordt het toerental automatisch naar beneden bijgesteld, zodat de druk niet oploopt. Nadeel is, dat op deze wijze het debiet wel eens flink kan afnemen zonder dat dit wordt bemerkt. Een indicatie van de airflow (luchtdebiet) is noodzakelijk en kan met speciale meters worden verkregen. Als uitvoeringsparameter wordt de luchtdruk vaak als enige vermeld. Zie ook deel IV.

### **treksnelheid**

De treksnelheid bepaalt als het ware hoelang de snijstraal de mogelijkheid heeft in het grondmassief door te dringen. Deze snelheid wordt uitgedrukt in centimeters per minuut en beïnvloedt in hoge mate de afmetingen van de jetgroutkolom. Langzaam trekken levert grote diameters en snel trekken geeft kleine kolommen. Toch is dit geen uitvoeringsparameter die onafhankelijk van andere parameters kan worden veranderd.

De snijstraal moet de kans krijgen het losgewoelde materiaal naar het oppervlak af te voeren. Daarbij moet de vulstraal voldoende vulling geven. Anders ontstaan grondkolommen met een lichte concentratie cement.

### **draaisnelheid**

De draai- of rotatiesnelheid is direct gekoppeld aan de treksnelheid via het begrip snijhoogte. Zoals eerder vermeld betreft dit de hoogte waarover de snijstraal één keer langs komt. Indien bijvoorbeeld gesneden wordt met 2 stralen, met 100 cm/min wordt getrokken en met 25 omwentelingen per minuut wordt gedraaid, dan bedraagt de snijhoogte:  $100/(25 \cdot 2) = 2$  cm. Dit betekent dat per laagje grond van 2 cm de snijstraal één keer langs komt. Voor gemakkelijk te eroderen grondsoorten als los zand geldt dat de snijhoogte in de orde van een decimeter mag zijn en voor klei- en veenlagen of vast zand ligt de snijhoogte in de orde van centimeters. Indien te langzaam wordt gedraaid ten opzichte van de treksnelheid ontstaan groutcirkels met daartussen nagenoeg ongeroerde grond.

## **I.4.3 Grondgesteldheid**

De invloed van de grond is zonder twijfel de grootste moeilijkheid indien geprobeerd wordt het jetgroutproces cijfermatig weer te geven. Jetgrouten is mogelijk in een breed scala aan grondsoorten, zie afbeelding I.4.1, en heeft daarmee een groot voordeel boven andere injectietechnieken. Deze grondsoorten hebben allemaal weer specifieke eigenschappen die modelleren van jetgrouten bijzonder ingewikkeld maken.

Verschillen in korrelopbouw, dichtheid (volumiek massa), poriënvolume en de cohesie zijn de voornaamste oorzaken van veranderingen in de resultaten van het jetgroutproces bij gelijkblijvende uitvoeringsparameters. Cohesie versterkt in hoge mate de samenhang tussen individuele grondkorrels en bemoeilijkt het eroderen. Een hoger poriënvolume vergemakkelijkt bij zand het erosieproces en een hogere dichtheid daarentegen maakt erosie moeilijker.

Bovendien eroderen niet alle grondsoorten op dezelfde wijze. Zandgronden laten zich relatief makkelijk eroderen en vermengen zich goed met het geïnjecteerde grout. Kleigronden zijn moeilijk erodeerbaar maar laten zich na erosie wel goed mengen. Veengebieden breek vaak in grote stukken af en blijft als klonten in het grout rondrijven. Deze klonten komen vaak snel naar het oppervlak vanwege hun lage dichtheid.

Bij jetgroutwerken is het gebruikelijk vanwege het moeilijk in te schatten effect van de aanwezige grond, enkele experimenten op ware grootte uit te voeren voordat aan het werk wordt begonnen. Resultaten van deze experimenten worden zorgvuldig bewaard en indien zich bij volgende werken soortgelijke bodemcondities voordoen, kunnen de proeven achterwege blijven of vindt slechts een klein experiment plaats.

## I.5 Onderzoek aan jetgrouten

### I.5.1 Inleiding

Zoals eerder aangegeven, is het uitvoeren van enkele experimenten ten behoeve van het ontwerp van een jetgroutwerk eerder gebruikelijk als uitzonderlijk. Deze experimenten richten zich alleen op de resultaten die van toepassing zijn op dat specifieke werk. Onderzoek naar algemene verschijnselen en verbanden in de jetgrouttechniek wordt nauwelijks uitgevoerd en zal met het oog op de concurrentie niet altijd worden gepubliceerd. Toch zijn in de literatuur enkele interessante bevindingen terug te vinden die in dit hoofdstuk worden aangehaald.

In Japan waar jetgrouten veelvuldig wordt toegepast is onderzoek gedaan naar het gedrag van de grond om een jetgroutkolom tijdens en na het groutproces. Met name het gedrag van het grondwater speelt een belangrijke rol. In paragraaf I.5.2 zal op dit onderzoek worden ingegaan. Het vermogen van de snijstraal de omringende grond te eroderen is het belangrijkste gegeven voor de diameter van de groutkolom. Paragraaf I.5.3 beschrijft onderzoek dat betrekking heeft op dit vermogen, gekeken wordt naar de erosiewerking van de snijstraal, het effect van het debiet, de rotatie- en treksnelheid en de grondeigenschappen op de diameter van de kolom. Verder komt het begrip hydraulisch vermogen aan de orde. In paragraaf I.5.4 wordt aandacht besteed aan de diameterbepaling aan de hand van de volumieke massa van de retourspoeling. Begrippen als totale vervanging en volledige mixing komen daarbij ter sprake. Naast de diameter van de groutkolom is de druksterkte van het verharde grout, in het geval van een constructieve toepassing, zeer belangrijk. Deze mechanische eigenschappen vormen onderwerp van onderzoek in paragraaf I.5.5. Als laatste wordt het ontwerp van de snijnozzles nader bekeken voor het vergroten van het snijresultaat. Tevens wordt het effect van de luchtmantel beschouwd, dit in paragraaf I.5.6.

### I.5.2 Gedrag omringende grond tijdens jetgrouten

Indien in de nabijheid van kwetsbare constructies groutelementen worden gemaakt, is het belangrijk te weten welk proces zich afspeelt in de grond tijdens en vlak na het maken van een kolom. Met name voor het maken van funderingsondersteuningen met jetgrouten is dit van fundamenteel belang. Naast het wegvallen van de steundruk ter plaatse van de kolom treden ook andere verschijnselen op die invloed hebben op het draagvermogen van de omringende grond. Zie ook I.3.2.1.

In Japan is onderzoek gedaan naar waterspanningen in, en de horizontale en verticale verplaatsingen van het grondmassief nabij een groutkolom [Lit.10, blz 133]. Afbeelding I.5.1 geeft de proefopzet met het geologische profiel. WP-2, WP-3 en WP-4 betref waterspanningsmeters, T-1 en T-2 verplaatsingsmeters en K-1/9 een multi-point inclinometer. Onbekend is welk jetgroutstelsel is toegepast. Gezien de kolomdiameter zal dit waarschijnlijk het 2 of 3 fasen systeem zijn geweest.

#### waterspanningen

Afbeelding I.5.2 laat zien hoe de waterspanningen toenemen tijdens het maken van kolom 5 en 6. Duidelijk is te zien dat vlak nadat de nozzle het meetpunt is gepasseerd de waterspanning vrij snel weer terugkeert naar de oorspronkelijke waarde. De toename van de waterdruk betref, op een afstand van circa 1 m van de kolom, maximaal 10 kPa. Op een afstand verder van de kolom neemt de amplitude van de waterspanning af. De invloed van de jet komt goed tot uiting in afbeelding I.5.3, waarop een doorsnede te zien is over het grondmassief. De toename in waterspanning treedt op tot ongeveer 4 m boven en 2 m onder de plaats van de snijstraal. De waterspanningstoename is waarneembaar tot circa 6 m vanaf de kolom in de richting van de snijstraal.

Met deze toename van de waterspanning dient in bepaalde gevallen rekening te worden gehouden. Het is mogelijk dat de effectieve korrelspanning lokaal dusdanig vermindert dat de grond verweekt. Dit kan leiden tot ernstige situaties, zeker indien dit in de nabijheid van funderingen optreedt.

#### **zettingen**

Observatie van de zakkingen van het grondmassief (afbeelding I.5.4) heeft aangetoond dat de zettingen voornamelijk ontstaan tijdens het afnemen van de tijdelijke overdruk in het water. Nadat het injecteren is gestopt, werd ook direct de definitieve zakking bereikt. De maximale zetting ter plaatse van T-1 ligt in de orde van 0,1 cm.

#### **horizontale verplaatsingen**

Met behulp van de inclinometer K-1/9 is getracht een indicatie te geven van de horizontale verplaatsingen van het grondmassief. Afbeelding I.5.5 geeft de indicatie. De horizontale verplaatsingen treden met name op in cohesieve en losgepakte lagen. In eerste instantie treedt in deze lagen een horizontale verplaatsing op van de kolom af. Enige tijd later treedt echter het omgekeerde op. Bij hardere lagen zonder cohesie treedt slechts een kleine verplaatsing op in de richting van de kolom. Al deze verplaatsingen zijn bijzonder klein.

#### **conclusie**

Het belangrijkste effect op de omgeving is de toename van de waterspanning en dus de afname van de korrelspanning in de nabijheid van de kolom. Dit effect is goed zichtbaar als peilbuizen geplaatst zijn. Aan deze peilbuizen is duidelijk te merken wanneer de invloed van de snijstraal de peilbuis bereikt. In het geval van een voldoende hoge grondwaterstand zullen de buizen dan water spuiten. In afbeelding I.5.6 is het totale effect in de grond gevisualiseerd.

### **I.5.3 Eroderend vermogen**

Onder het eroderend vermogen wordt hier verstaan de mate waarin de snijstraal de omliggende grond kan eroderen. Dit vermogen kan op verschillende manieren worden uitgedrukt, zowel kwalitatief als kwantitatief. Met behulp van de kinetische energie van de straal kan een vermogen in de zin van energie per seconde worden uitgedrukt. Op dezelfde wijze kan dat geschieden met de waarden van de druk en het debiet. Indien de diameter van de kolom bekend is kan het eroderend vermogen ook in volume per meter worden aangegeven.

Het eroderend vermogen wordt in dit verslag aangehouden als een algemene term waarmee een maat wordt aangegeven voor de wijze waarop de snijstraal in staat is de grond te eroderen. Achtereenvolgens komen in deze paragraaf aan de orde: erosiewerking snijstraal, kwantificering van het totale debiet, invloed treksnelheid, invloed rotatiesnelheid, invloed grondeigenschappen en het hydraulisch vermogen van de snijstraal.

#### **I.5.3.1 Erosiewerking snijstraal**

De fysische verschijnselen die de structuur van het grondmassief vernietigen en de individuele grondkorrels verplaatsen en mengen met de injectiespecie zijn:

- de hoge hydrodynamische druk (of kinetische energie van de straal);
- het splijteffect van de injectiemassa;
- de inslagkracht van de injectiemassa;
- de stroming van de suspensie.

Afbeelding I.5.7 laat het gedrag van een snijstraal zien in de lucht. Zone 1 is de kernzone en hierin is de hydrostatische druk constant. Zone 2 wordt de intermediaire zone genoemd en de lengte van

deze zone bedraagt circa 300 keer de nozzle diameter  $D_0$ . Na deze invloedzone is de waterstraal niet meer gefocust en wordt discontinu (zone 3), de hydrostatische druk neemt exponentieel af. Indien de straal in een dichter medium, zoals bijvoorbeeld water of grond, wordt uitgevoerd bestaat zone 3 niet meer. De invloed van de jet gaat niet buiten de snijzones 1 en 2, waardoor de grondspanningen buiten deze zones niet veranderen.

Experimenten hebben aangetoond dat de effectiviteit van de snijstraal kan worden verbeterd door het toevoegen van een luchtmantel. In afbeelding 1.5.8 is de reikwijdte van een waterjet in water (1), een waterjet in water omringd met lucht (2) en een waterjet in lucht (3) gegeven. Het effect van de luchtmantel is duidelijk zichtbaar. Een soort gelijk beeld ontstaat ook met een jet in de grond, wel of niet omringd met lucht. [Lit. 22]

### 1.5.3.2 Kwantificering van het totale debiet

Het snij- en vuldebiet hebben een grote invloed op het effect van de stralen en de mate waarin vervanging of mixing plaatsvindt tussen de aanwezige grond en het geïnjecteerde grout. In geval van 1 en 2 fase(n) jetgrouten is het uit het oogpunt van kostenbesparing belangrijk te weten hoe groot het snijdebiet moet zijn om een bepaalde diameter te krijgen en een goede mixing te bewerkstelligen. Kanematsu [Lit. 9, blz 618] geeft voor dit snijdebiet een empirische formule:

$$Q = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot H \cdot \lambda \cdot (1 + \beta)$$

waarin,

Q het totale injectiedebiet van de stra(a)l(en) in  $m^3$ ;

D de te bereiken diameter;

H de hoogte van de kolom;

$\lambda$  een empirische parameter, zie afbeelding 1.5.9;

$\beta$  een verliesfactor (niet groter dan 0,1).

In geval van een diameter van bijvoorbeeld 1.5 m, betekent dit dat het totale injectiedebiet circa 85% van het volume van de kolom moet bedragen. Opgemerkt wordt dat in het geval van zandgronden dit percentage na beneden en in het geval van kleigronden naar boven moet worden bijgesteld (tot respectievelijk 60% en 120%). In de formule wordt geen onderscheid gemaakt tussen 1, 2 of 3 fase(n) techniek. Omdat de snijdruk niet wordt vermeld of gekwantificeerd is de bruikbaarheid van de formule beperkt.

### 1.5.3.3 Invloed treksnelheid

In literatuur [9, blz. 391] wordt een verband gegeven tussen het geërodeerd volume  $V_e$  en de treksnelheid  $L_s$  (cm/min) zijnde:

$$V_e = 10 \cdot \pi \cdot (D^2 / 4) \cdot L_s \quad \text{in liters/min.}$$

daarin valt duidelijk de inhoud van de kolom te herkennen. De herkomst van de factor 10 is onduidelijk. Gesteld wordt dat voor een bepaalde grondsoort het geërodeerd volume  $V_e$  constant blijft en zodoende een verband wordt gevonden tussen treksnelheid  $L_s$  en diameter  $D$ :

$$L_s = \text{Constante} \cdot 1 / D^2$$

Dit betekent dat de diameter omgekeerd evenredig is met de wortel uit de treksnelheid. In afbeelding 1.5.10 is het verband uitgezet tussen uit de praktijk gevonden waarden. Gesteld wordt dat het ontwerpen van jetgrouten nu berust op het kiezen van een juiste waarde voor  $V_e$ , afhankelijk van de

grondsoort en eigenschappen. De andere parameters worden bepaald op grond van de eigenschappen die het verharde grout moet bezitten. In dit geval ontbreekt zowel de snijdruk als het snijdebiet, waardoor de formule in waarde vermindert.  $V_e$ , het geërodeerd volume, is afhankelijk van  $Q$ , het debiet, en  $p$ , de druk.

Met alle data die gepresenteerd is op de conferentie waarvan literatuur [9] verslag doet is een soort gelijke grafiek gemaakt als afbeelding 1.5.10. Onderscheid is gemaakt tussen grove en fijne bodemmaterialen. Afbeelding 1.5.11 en 1.5.12 laten zien dat het genoemde verband tussen treksnelheid en diameter behoorlijk goed lijkt te voldoen.

#### **1.5.3.4 Invloed rotatiesnelheid**

De rotatiesnelheid is afhankelijk van de grondsoort en de treksnelheid en is tevens een maat voor de impacttijd van de snijstraal. Er zijn auteurs die als uitgangspunt de "cirkelsnelheid" nemen en daarvan de rotatie- en treksnelheid afleiden. De omtrek van de kolom geldt dan als maat voor het eroderend vermogen van de straal. [Lit. 9, blz. 618]

Voorbeeld

Cirkelsnelheid  $\Omega$  voor een diameter  $D$  van 1,5 m in een bepaalde grondsoort moet zijn:

$$\Omega = 50 \text{ cm/s} = 30 \text{ m/min,}$$

Daarvan wordt afgeleid de rotatiesnelheid  $\varphi$  met:

$$\varphi = 30 / (\pi \cdot D) = 4 \text{ omw/min bij één straal,}$$

Uitgaande van een snijhoogte van bijv. 1 cm kan dan de treksnelheid  $L_s$  berekend worden met:

$$L_s = \varphi \cdot 1 \text{ cm} = 4 \text{ cm/min.}$$

De aanwezigheid van klei in de grond verplicht tot een daling van de cirkelsnelheid en bij ongedraineerde schuifsterkten van meer dan  $30 \text{ kN/m}^2$  daalt de effectiviteit van de straal in zeer sterke mate. De rotatiesnelheid dient dan drastisch te worden aangepast. [Lit.9, blz. 622]

#### **1.5.3.5 Invloed grondeigenschappen**

Onderzoek heeft uitgewezen dat met betrekking tot de eigenschappen van de te eroderen grond het volgende worden kan worden aangegeven [Lit. 9, blz. 622]:

- Voor iedere grondsoort vormen druk, treksnelheid en debiet de meest belangrijke uitvoeringsparameters voor het volume van de jetgroutkolom;
- Bij een constante treksnelheid en snijdruk neemt het volume van de kolom af bij toenemende kleifractie. Als de kleifractie toeneemt zal of de druk moeten toenemen of de treksnelheid zal moeten afnemen;
- Het is bijzonder moeilijk in geval van harde kleilagen een grotere diameter te behalen dan 1,5 m;
- Het jetgroutproces wordt binnen een zandfractie niet significant beïnvloed door de korrelgrootteverdeling;
- Als de fractie stenen ( $d > 2 \text{ mm}$ ) groter is dan 50% zal dat effect hebben op de reikwijdte van de snijstraal en leiden tot sterke onregelmatigheden in de kolom;
- Indien grote obstakels in de bodem aanwezig zijn kan dit leiden tot schaduw plekken die niet door de snijstraal bereikt kunnen worden;
- Jetgrouten in door stenen, zware klei en veen gedomineerde grond vraagt om speciale aandacht en experimenten;
- In veen hebben de vezelachtige delen de neiging het fysische jetproces te remmen, niet vezelachtige delen laten zich makkelijker snijden. Het aantal toepassingen in veen is bijzonder schaars en data ontbreekt;
- Jetgrouten is nauwelijks toegepast in zacht gesteente en informatie hierover ontbreekt;
- Bepaalde harde kleilagen en veenlagen kunnen in stukken afbreken en als klonten in de suspensie achterblijven.



In afbeelding 1.5.13 is voorts een verband gegeven tussen Standard Penetration Test en kolomdiameter voor cohesieve en niet cohesieve materialen. Tussen de N-value van de SPT en de conusweerstand die in Nederland wordt gebruikt, geldt het volgende verband:

grondsoort	$q_c / N\text{-value}$
zand	0,4 à 0,5
leem	0,2
klei	0,07

bron: [Lit. 27]

### 1.5.3.6 Hydraulisch vermogen

Naast de kwalitatieve beschrijving van het effect van bepaalde invoerparameters op het eroderend vermogen van het jetgroutproces, is het met behulp van het begrip hydraulisch vermogen mogelijk een waarde aan het snijvermogen van de straal toe te kennen. Vermogen is een hoeveelheid energie per tijdseenheid en wordt uitgedrukt in Watt of Joules per seconde.

Literatuur [17] geeft een uitdrukking voor het hydraulisch vermogen  $E$ , gebruik makend van het debiet en de druk van de snijstraal.

$$E \text{ [kW]} = \mu^2 \cdot \frac{V \text{ [l/min]} \cdot p \text{ [bar]}}{600}$$

waarin,

$V$  het injectiedebiet;

$p$  de injectiedruk;

$\mu$  een effectiviteitsindex.

De eenheden kloppen en  $\mu$  is dimensieloos. Deze hydraulische Leistung (duits) is een maat voor de reikwijdte van een stilstaande straal in een bepaalde grondsoort, zie afbeelding 1.5.14. De rotatie- en treksnelheid zijn buiten beschouwing gelaten en dienen meegenomen te worden indien een koppeling gelegd wordt met de diameter van een kolom. Immers snel trekken met een groot vermogen geeft niet automatisch grotere diameters dan langzaam trekken met een lager vermogen. Het hydraulisch vermogen delen door de treksnelheid geeft een waarde voor de energie die per meter kolom is ingebracht. Hiermee kan een betere vergelijking tussen uitvoeringsparameters worden gemaakt. Deze laatste toevoeging is niet beschreven in literatuur [17]. In deel III zal met name op deze hydraulische energie per meter kolom nader worden ingegaan.

Via het begrip snelheid kan ook een (kinetisch) vermogen worden bepaald, hiervoor is de soortelijke massa van de injectievloeistof, het debiet en het nozzle-oppervlak nodig. De snelheid  $v$  van de vloeistof wordt bepaald met:

$$v \text{ [m/s]} = Q/A_{\text{nozzle}}$$

waarin,

$Q$  het injectiedebiet in  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$A_{\text{nozzle}}$  het oppervlak van de nozzle in  $\text{m}^2$ .

Een uitdrukking voor het kinetisch vermogen wordt:

$$E \text{ [kW]} = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{met } m \text{ [kg/s]} = \rho \cdot Q$$

waarin,

m de massa van de straal per tijdseenheid in kg/s;

$\rho$  het soortelijk gewicht van de injectievloeistof in kg/m<sup>3</sup>.

Bovenstaande benadering maakt geen gebruik van de druk van de snijstraal waarmee eveneens een waarde voor de snelheid berekend kan worden. Het op deze wijze berekenen van het kinetisch vermogen is niet vermeld in de literatuur maar is reeds bekeken bij het uitvoeren van de proeven zoals die worden beschreven in deel II.

## 1.5.4 Kolommengsel en retourspoeling

### 1.5.4.1 Hoeveelheid retourspoeling

Gezien het onsamendrukbare karakter van het geïnjecteerde materiaal en de aanwezige grond ligt het voor de hand te voorspellen dat de hoeveelheid retourspoeling ongeveer even veel bedraagt als de hoeveelheid geïnjecteerd volume. Onderzoek [Lit. 1, blz 173] wijst uit dat dit afhankelijk is van het gekozen systeem (1, 2 of 3 fase(n)). In maar enkele gevallen blijkt deze voorspelling juist te zijn. In afbeelding I.5.15 staan gegevens afkomstig van het 1 fase (1) en 3 fasen (3) jetgrouden. Het percentage retourspoeling ten opzichte van het geïnjecteerd volume is uitgezet tegen dit geïnjecteerd volume omdat deze laatste waarde grote invloed blijkt te hebben. Hoe groter het injectievolume des te groter is het percentage retourspoeling. Hierdoor scoort het 1 fase systeem een gemiddeld percentage van circa 50 %, terwijl het zwaardere 3 fasen systeem boven de 60% uitkomt.

Met een groter injectievolume komt meer retourspoeling naar het oppervlak maar wordt ook een grotere kolomdiameter gevormd. Indien nu de hoeveelheid retourspoeling, gedeeld door het kolomvolume, wordt uitgezet tegen het geïnjecteerd volume ontstaat een ander beeld, zie afbeelding I.5.16. De afbeelding vertoont een tendens naar circa 0,35 m<sup>3</sup> retourspoeling per m<sup>3</sup> gemaakte kolom. Bij injecties van boven 500 liter per meter kolom worden met het 3 fasen systeem grotere diameters verkregen en komt minder retourspoeling naar het oppervlak.

Belangrijk voor de hoeveelheid retourspoeling is of het individuele kolommen of in elkaar gedraaide kolommen betreft. De lengte heeft ook invloed op de volume stroom van de retour.

### 1.5.4.2 Samenstelling kolommengsel en retourspoeling

In het algemeen wordt gesteld dat de jetgrouttechniek de fijnere delen in de grond uitspoelt en afvoert en de grout mengt met de grovere delen uit de in-situ grond. Dit zou betekenen dat de retourspoeling van een andere samenstelling is dan het kolommengsel. In de praktijk wordt vaak aangenomen dat de samenstelling van de retourspoeling gelijk is aan de samenstelling van het kolommengsel.

Iets anders is, of gesproken kan worden over vervanging door het grout of mixing van het grout met de aanwezige bodem. In beide gevallen is sprake van volledige menging van de injectievloeistof met de aanwezige grond. In het geval van de vervanging is het volume-aandeel injectievloeistof echter (veel) groter dan het volume-aandeel grond en bij mixing ligt dit ongeveer gelijk. Meestal, afhankelijk van de uitvoeringsparameters, is sprake van een combinatie van mixing en vervanging van de aanwezige grond. Literatuur [9, blz. 607] geeft een waarde van 50% tot 80% vervanging bij kolomjetgrouting. Dit betekent dat 5/10 tot 8/10 deel van het kolommengsel ingebracht is.

De waarde van het injectiedebiet speelt een belangrijke rol. Indien veel wordt geïnjecteerd met een relatief lage druk, zodat de diameter beperkt blijft, is veel spoeling aanwezig om de gronddeeltjes af te voeren en zal de vervanging groter zijn dan bij een lager debiet. In het algemeen kan worden gezegd dat het 3 fasen systeem meer vervangt dan de 1 en 2 fase(n) systemen door de aanwezigheid van een aparte snijstraal met een relatief groot debiet. De samenstelling van de retourspoeling is ook anders vanwege de scheiding tussen snijden en vullen. Bij het 1 en 2 fase(n) systeem komt relatief meer cement naar het oppervlak dan bij het 3 fasen systeem.

De monitorhoogte van de boorkop, de afstand tussen de snij- en vulnozzles, blijkt een grote invloed te hebben. Een grotere hoogte leidt tot meer vervanging. Van deze gegevens kan handig gebruik gemaakt worden indien de grondsoort gunstig of ongunstig is voor de kolomsterkte. Bij slechte lagen kan worden gestreefd naar meer vervanging en bij goede zandlagen is het beter het percentage mixing te vergroten. [Lit. 9, blz. 608]

### 1.5.4.3 Schatting van de diameter met behulp van de retourspoeling

Aan de hand van de retourspoeling wordt door enkele auteurs een voorspelling gedaan over de diameter van de gemaakte groutkolom. Hiervoor moet de samenstelling van de retourstroom bekend zijn. Enkele aannemers wekken de indruk met behulp van alleen de volumieke massa van de retourstroom een schatting te kunnen maken van de diameter van de verse kolom. Hiervoor moeten de volgende aannamen gemaakt zijn:

1. het kolommengsel is homogeen;
2. de retourspoeling heeft dezelfde samenstelling als het kolommengsel;
3. er vindt geen uitwisseling van water in de kolom plaats met de omringende grondmassa;
4. er is sprake van complete menging tussen injectievloeistof en aanwezige materialen in de grond;
5. het volume van eventueel ingesloten lucht heeft geen invloed op de berekening.

Het begrip complete menging (punt 4) heeft niet direct te maken met het eerder gehanteerde begrip mixing. Hier betekent het dat volledige menging optreedt tussen injectievloeistof en zand+water. Deze hoeven zich niet direct in dezelfde hoeveelheid te mengen. Met name de tweede en derde aanname zijn discutabel. Voor de berekening dient de samenstelling van het grondmassief bekend te zijn. In onderstaande berekening wordt uitgegaan van een 2 fasen jetgroutsysteem met een grondwaterstand minimaal tot aan de bovenkant van de kolom. [Lit. 7]

Benodigd is:

- $\gamma_{\text{retour}}$  : volumieke massa retourspoeling;  
 (dit moet een representatieve waarde zijn, gebaseerd op meerdere metingen)
- $\gamma_{\text{grout}}$  : volumieke massa grout;
- $\gamma_{\text{grond}}$  : volumieke massa grond (zand+water);
- $\gamma_{\text{zand}}$  : volumieke massa zand;
- $\gamma_{\text{water}}$  : volumieke massa water;
- $\gamma_{\text{cement}}$  : volumieke massa cement;  
 alle uitgedrukt in  $\text{kg/m}^3$ .

De volumieke massa's van grond en grout kunnen worden berekend uit de samenstelling, gebruikmakend van porositeit  $n$  en water/cement-factor ( $w/c$ ).

$$\gamma_{\text{grond}} = n \cdot \gamma_{\text{water}} + (1-n) \cdot \gamma_{\text{zand}}$$

$$\gamma_{\text{grout}} = \frac{1}{(1 + c/w \cdot \gamma_w/\gamma_c)} \gamma_{\text{water}} + \frac{1}{(1 + w/c \cdot \gamma_c/\gamma_w)} \gamma_{\text{cement}}$$

Met behulp van de volumieke massa van de retourspoeling kan het volumedeel grond  $y$  en het volumedeel grout  $(1-y)$  in de kolom worden bepaald:

$$y = \frac{\gamma_{\text{retour}} - \gamma_{\text{grout}}}{\gamma_{\text{grond}} - \gamma_{\text{grout}}}$$

Dit betekent dat per  $\text{m}^3$  toegevoegde grout:

$$X = y/(1-y)$$

$\text{m}^3$  grond (zand+water) gemengd is. Indien nu bekend is hoeveel grout per meter kolom is toegevoegd, te berekenen uit debiet en gedeeld door treksnelheid (Q/Ls), is het volume van de kolom per meter:

$$V_k = X \cdot Q/Ls$$

De diameter kan eenvoudig worden bepaald met:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_k}{\pi}}$$

**Voorbeeld:**

Stel:

w/c-factor = 0,7  
 $\gamma_{\text{water}} = 1000 \text{ kg/m}^3$   
 $\gamma_{\text{cement}} = 3000 \text{ kg/m}^3$   
 dan geldt:  $\gamma_{\text{grout}} = 1645 \text{ kg/m}^3$

porositeit  $n = 0,25$   
 $\gamma_{\text{zand}} = 2500 \text{ kg/m}^3$   
 dan geldt:  $\gamma_{\text{grond}} = 2125 \text{ kg/m}^3$

$\gamma_{\text{retour}} = 1990 \text{ kg/m}^3$   
 dan geldt:  $y = 0,719$   
 $X = 2,56$

Q = 200 l/min  
 Ls = 10 cm/min = 0,10 m/min  
 dan geldt:  $V_k = 5,12 \text{ m}^3/\text{m}$   
**D = 2,55 m**

In geval van het 3 fasen systeem dient het waterdebiet ook meegenomen te worden en als de kop van de kolom zich boven het grondwaterpeil bevindt moet de berekening ook worden aangepast. In deel

III is getracht soortgelijke berekeningen uit te voeren. Vanwege met name aanname 3 worden geen goede waarden voor de diameter gevonden. Literatuur [1, blz. 196] en [10, blz. 155] bevatten soortgelijke berekeningen, waarbij meer variabelen worden meegenomen en minder aannamen worden gedaan. Indien meer gegevens omtrent de samenstelling beschikbaar zijn, neemt de nauwkeurigheid van de schatting toe.

### **1.5.5 Mechanische eigenschappen**

Onder de mechanische eigenschappen worden de druk- en treksterkten, de elasticiteitsmoduli en de breukrekken verstaan van het verharde kolommengsel. Door het nemen van steekmonsters tijdens de uitvoering en het maken van kernboringen na verharding kunnen monsters worden verkregen waarvan de genoemde mechanische eigenschappen kunnen worden bepaald. Meestal met als doel het aantonen dat aan bepaalde bestekseisen voldaan wordt. De druksterkte, E-modulus en breukrek worden bepaald met een drukproef en de treksterkte met behulp van een splijtproef. In de wereld bestaan verschillende testen en normen over de wijze van uitvoeren van deze proeven.

Eerder is aangegeven dat met behulp van de uitvoeringsparameters een grote invloed kan worden uitgeoefend op de mate van vervanging of mixing van de aanwezige grond. Indien een bepaalde grondsoort een slechte invloed heeft op de sterkten kunnen, door te streven naar bijna volledige vervanging van de grond door het grout, betere mechanische eigenschappen worden verkregen dan wanneer mixing optreedt. Overigens is dit het hoofddoel van het toepassen van de jetgrouttechniek, namelijk het verbeteren van mechanische eigenschappen en doorlatendheid van de bodem.

Voor het uitvoeren van een tweetal jetgroutwerken, een waterremmend scherm in Italië en een startschacht voor een boortunnel in Taiwan, respectievelijk beschreven in literatuur [3] en [33], zijn uitgebreide testen gedaan met als doel het vastleggen van de mechanische eisen. Hierna zullen de resultaten van beide onderzoeken kort worden aangehaald.

#### **1.5.5.1 Waterremmend scherm in Italië**

De te jetgrouten bodem betrof een 4 m dikke kleihoudende siltlaag met daarboven een 11 meter dikke silthoudende zandlaag. Gebruik gemaakt is van het 1 fase systeem, met een treksnelheid van 40cm/min, een draaisnelheid van 20 omw/min en een injectiedebiet van 100 l/min. De nominale diameter bedroeg 0,6 m (0,88 m<sup>3</sup> grout per m<sup>3</sup> kolom). Laboratoriumonderzoek bestond uit twee delen. Het eerste deel betrof testen op handmatig gemaakte monsters en het tweede deel waren testen op monsters, die met behulp van kernboringen uit een achttal kolommen waren genomen.

De resultaten van de testen op monsters uit de kolommen zijn afgebeeld in I.5.17 en I.5.18. Wat opvalt is de sterke variatie in volumieke massa en sterkte, zowel over de hoogte als op gelijke hoogte. Dit is in tegenstelling met de geringe variatie bij de handmatig gemaakte monsters. Een conclusie moet zijn dat het kolommengsel bijzonder inhomogeen is, iets wat overigens in meerdere literatuur wordt vermeld.

In afbeelding I.5.19 wordt het verband gegeven tussen de volumieke massa van het mengsel en de druksterkte  $R$ , bij een bepaalde cement/water-factor ( $C/W$ ), grond/water-factor ( $S/W$ ) en cementgehalte van het mengsel ( $C$  in  $\text{kN/m}^3$ ). Deze factoren zijn de factoren zoals ze met de hoeveelheden in het mengsel kunnen worden berekend. De cement/water-factor en grond/water-factor zijn gebaseerd op massa. In de afbeelding zijn de data uit I.5.17 en I.5.18 verwerkt. Het verloop van de lijnen in I.5.19 is gebaseerd op de navolgende afleiding.

Uitgaande van een volumieke massa van het aanwezige zand van  $27 \text{ kN/m}^3$  en van het cement van  $30 \text{ kN/m}^3$  is het volgende verband afgeleid tussen volumieke massa van mengsel en  $S/W$ -factor en  $C/W$ -factor.

$$\gamma = \frac{1 + S/W + C/W}{0,1 + 0,37 \cdot S/W + 0,33 \cdot C/W}$$

in  $\text{kN/m}^3$ , W, S, C in kN.

Het verband tussen cement/water-factor en langeduursterkte R in MPa is bepaald uit een groot testprogramma (literatuur ontbreekt) en bedraagt:

$$C/W = 0,447 \cdot \sqrt{R}$$

Een soort gelijk verband wordt aangehaald in literatuur [1, blz. 200], de constante heeft echter een waarde van 0,135 en heeft betrekking op grof zand. Indien dit verband tussen C/W-waarde en sterkte wordt ingevuld in de formule voor de volumieke massa, ontstaat:

$$\gamma = \frac{1 + S/W + 0,447 \cdot \sqrt{R}}{0,1 + 0,37 \cdot S/W + 0,015 \cdot \sqrt{R}}$$

Uitgezet in een grafiek geeft dit afbeelding I.5.19.

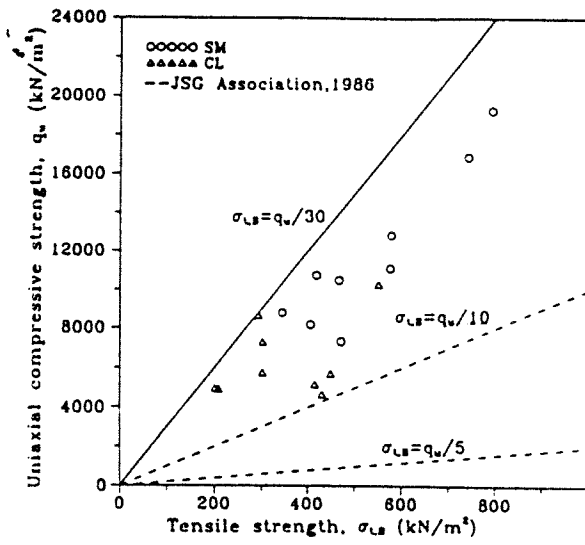
Het mag duidelijk zijn dat het cementaandeel in het kolommengsel een grote invloed heeft op de druksterkte van het verharde materiaal, een toenemend cementaandeel vergroot de druksterkte. Een toenemende volumieke massa duidt op hetzelfde effect. Dit cementaandeel in de kolom kan betrekkelijk eenvoudig worden geschat indien bekend is welke diameter bereikt is. Deze diameter, te bepalen door uitgraven of een spinmeting, zie paragraaf I.2.7, wordt gebruikt voor de berekening van het volume geïnjecteerde grond per meter kolom. Wetend hoeveel kg cement per meter kolom is geïnjecteerd (met volume grout, soortelijk gewicht en w/c-factor) kan worden bepaald hoeveel cement in kg per  $\text{m}^3$  mengsel aanwezig is uitgaande van volledige menging (paragraaf I.5.4).

### 1.5.5.2 Startschacht boortunnel Taiwan

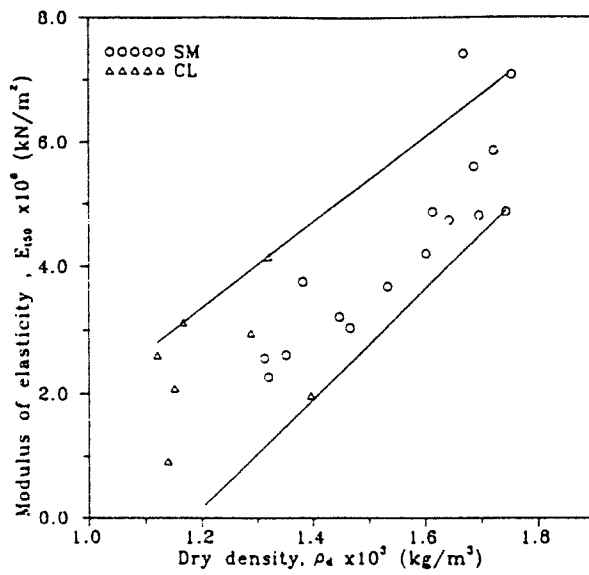
De bouwput die als startschacht diende voor een te boren verkeerstunnel is opgebouwd met diepwanden. Achter het te doorboren gedeelte van de diepwand is een groutmassief aangebracht om te voorkomen dat ongeoorloofde zettingen zouden optreden als gevolg van de start van het boorproces. De grondeigenschappen staan vermeld in afbeelding I.5.20. Het jetgroutmassief is uitgevoerd met het 2 fasen systeem met een snijdruk van 200 bar, een luchtdruk van 7 bar, een injectiedebiet van 60 l/min, een water/cement-factor van 1,0, een treksnelheid van 5 cm/min en een draaisnelheid van 5 omw/min. De nominale diameter bedroeg 1,2 m ( $1,11 \text{ m}^3$  grout per  $\text{m}^3$  kolom). Door middel van kernboringen zijn monsters verkregen die weer beproefd zijn in druktesten, braziliaanse trektesten en ultrasonic pulstesten. Deze laatste testen worden hier niet beschreven.

Het algemene beeld dat de drukproeven gaven van de monsters genomen in de kolom ter hoogte van de klei- en zandlaag is afgebeeld in I.5.21. Een duidelijk verschil is waarneembaar tussen de monsters uit de siltige zandlaag en de kleilaag. De gemiddelde conusweerstand/druksterkte van de kleilaag is door het jetgrouten met een factor 50 (5000%) toegenomen. Ook in dit geval wordt een aanzienlijke variatie over de hoogte en op dezelfde hoogte verkregen, wat duidt op een sterke inhomogeniteit van de kolom. (afbeelding I.5.22).

In afbeelding I.5.23 is een verband gezocht tussen het droge dichtheid (volumieke massa) van de kolomkernen en de druksterkte. Dit levert een grote hoeveelheid punten op waaruit de conclusie kan worden genomen dat bij toenemende dichtheid, de druksterkte eveneens groter wordt. Een soort



Afb. I.5.25: relatie trekstrekke versus druksterkte. [33]



Afb. I.5.26: relatie dichtheid versus E-modulus. [33]

gelijke conclusie kon ook worden getrokken uit afbeelding 1.5.19. Enkele monsters genomen ter hoogte van de zandlaag gaven waarden voor de druksterkte die in de orde van druksterkte van beton zijn.

Indien de dichtheid wordt uitgezet tegen de laterale en axiale breukrekken ontstaat een beeld waarbij de rekken toenemen bij toenemende dichtheid. De maximale waarden bedragen ongeveer 0,62% en 0,20%, wat zeer dicht in de buurt ligt bij de waarden van beton (axiale rek 0,2-0,3%), terwijl grond een breukrek heeft tot circa 15%.

De gevonden treksterkten zijn verwerkt in afbeelding 1.5.24 (t.o.v. de dichtheid) en het verband tussen trek- en druksterkte in afbeelding 1.5.25. Op grond van deze laatste afbeelding zou een redelijke aanname zijn dat de treksterkte tussen 1/30 tot 1/10 van de druksterkte ligt.

Op dezelfde wijze stijgt ook de waarde van elasticiteitsmodulus bij stijgende dichtheid (afbeelding 1.5.26). De E-modulus is door het groutproces gemiddeld circa 880 keer (88000%) groter geworden, vergeleken met de modulus van de grond voor het jetgrouten.

Tot slot moet worden opgemerkt dat de gevonden waarden van de sterken, moduli en rekken gelden voor de monsters die intact waren en beproefd konden worden. Aangezien bij het boren van kernen ook enkele slechte stukken zijn doorboord, die niet konden worden beproefd, moet gesteld worden dat de eigenschappen van de totale kolom anders zijn als bovenstaande afbeeldingen laten zien. Hier dient bij het ontwerp ter dege rekening mee gehouden te worden.

### **1.5.6 Nozzle ontwerp**

De jetgroutnozzles zijn van vitaal belang voor het maximaliseren van de snijenergie van het water of grout. In literatuur [22] wordt verslag gedaan van een onderzoek naar de vorm en dimensie van de nozzle, bij optimale uitstroomenergie.

De optimale nozzle vorm blijkt cilindrisch te zijn met een keel van van circa 3 à 4 maal de uitstroomdiameter. De vergroting van de nozzle in de buis verloopt onder een hoek van ongeveer 0,23 à 0,24 radialen. In afbeelding 1.5.27 is het ontwerp van de doorsnede opgenomen. Afbeelding 1.5.28 en 1.5.29 verklaren de optimale waarden voor de keellengte en versmallingshoek.



## **I.6 Ontwikkelingen in de jetgrouttechniek**

### **I.6.1 Inleiding**

Omdat jetgrouten een nog relatief jonge techniek is, betreft het een techniek waar nog van alles aan te ontwikkelen en te verbeteren is. Ontwikkelingen hebben betrekking op de uitvoeringstechniek alsmede het eindresultaat en kunnen technisch, dan wel economisch van aard zijn.

De grote hoeveelheid retourspoeling geeft niet alleen problemen bij de afvoer van al deze spoeling, maar vormt tevens een hoge kostenpost in verband met de grote hoeveelheid cement die daarmee verloren gaat. Verbeteringen worden gezocht in het beperken van de retourstroom, het filteren en het recyclen van de spoeling. Voor het verbeteren van de homogeniteit van de kolom worden technieken ontwikkeld als het Metro Jet System (MJS) en Cross-jet systeem, beide afgeleid van het jetgroutsysteem. Ook wordt bekeken of het mogelijk is de diameters van de kolommen nog groter te maken, tot kolommen met een diameter van circa 5,0 m met een soort Super-High-Pressure systeem.

### **I.6.2 Retourspoeling**

De grote hoeveelheid retourspoeling die naar het oppervlak stroomt gedurende het jetgrouten vormt een kostenpost die een aanzienlijk deel van de totale kosten inneemt, zeker indien grote volumina moeten worden geïnjecteerd. (In paragraaf 1.5.4 is onder andere gekeken naar de hoeveelheid retourspoeling). De kosten liggen op het gebied van arbeid (afvoer), materiaal (cement), materieel (transport), energie en opslag. Op een tweetal manieren kunnen de kosten van de retourspoeling worden verminderd. Enerzijds kan worden geprobeerd de retourspoeling te verminderen, anderzijds kan de retourspoeling worden hergebruikt of worden gezuiverd.

#### **I.6.2.1 Vermindering retourspoeling**

In literatuur [10, blz. 154] wordt een aantal manieren aangegeven waarop de retourspoeling verminderd kan worden. De nadruk ligt hierbij op het verwijderen van meer grond voordat het injecteren begint.

Als eerste wordt voorgesteld om de boordiameter te vergroten, waarbij het boorgat door spoelen met alleen water wordt verkregen. De boorbuis krijgt ook een grotere diameter zodat de reikwijdte van de straal, voor het verkrijgen van een zekere diameter, verkleind kan worden. Dit gebeurt door het toepassen van een kleiner debiet, wat een vermindering in retourspoeling oplevert. Indien het boorgat dusdanig groot wordt gemaakt dat er net zoveel grond wordt verwijderd als grout wordt geïnjecteerd zal de retourspoeling een minimum bereiken. Bij het 1 fase systeem kan dit minimum vanwege de geringe diameters wel worden bereikt, bij het 2 en 3 fasen systeem krijgt het boorgat een te grote afmeting.

Een andere oplossing wordt gevonden in het voorsnijden met water en lucht. Dit is iets anders dan gebeurt bij het 3 fasen systeem. In afbeelding 1.6.1 is de volgorde van uitvoering aangegeven. Het principe berust op het voorsnijden met water, het sedimenteren van de grond en het grouten van deze uitgezakte grond/water-massa. De letters in afbeelding 1.6.1 corresponderen met de volgende fasen: a) boren, b) boorgat vergroting, c) voltooiing vergroting en bezinken gronddeeltjes, d) boorbuis terugbrengen in gesedimenteerde grond, e) jetgrouten en f) voltooiing jetgrouten. De nummers staan voor: 1) waterjets, 2) groutjets, 3) bezonken gronddeeltjes, 4) grout/grond-mix en 5) positie boorbuis bij voltooiing jetgrouten.

Aan de werking van dit voorsnijden kan worden getwijfeld. Het ligt in de verwachting dat zowel het boorgat als de kolom bij gebrek aan steundruk zullen instorten.

Een derde manier voor het verminderen van de retourspoeling gebeurt op een soortgelijke wijze als hiervoor besproken is met het voorsnijden met water. Nu echter geschieden alle fasen tegelijk en wordt het boorgat vergroot tijdens het jetgrouten. Dit alles met een speciaal ontworpen boorbuis zoals afgebeeld in I.6.2. Het systeem berust op het 3 fasen systeem met een extra toevoeging van een lagedruk-waterstraal.

#### **I.6.2.2 Filteren en recyclen**

Tegenwoordig bestaan er ook filterinstallaties die een redelijk percentage van de cement in de retourspoeling kunnen scheiden van van de gronddeeltjes. Dergelijke installaties zijn wel bijzonder kostbaar. Het maakt het mogelijk het cement nogmaals te gebruiken.

Een andere mogelijkheid is de spoeling in bakken te laten uitzakken en het water af te pompen, waardoor een redelijk droog cement/grond-mengsel overblijft dat bijvoorbeeld als fundatie voor een weg kan worden gebruikt. In het geval van funderingsondersteuning kan naast een groutpaal een extra boorgat worden gemaakt, waar de retourspoeling in wordt gepompt, na uitharding is dan een extra ondersteuning gecreëerd. Op deze wijze krijgt de spoeling nog een functie en krijgt het een economische waarde.

#### **I.6.3 Metro Jet System (MJS)**

De conventionele jetgrouttechniek heeft als nadeel dat het in sommige gevallen kan leiden tot maaiveld zakkings of stijgingen. Door de enorme injectiedrukken ontstaat drukopbouw wat kan leiden tot ongeoorloofd verplaatsingsgedrag van de omliggende grondmassa. Bovendien kent het systeem beperkingen doordat de snijstraal tevens voor de afvoer van de spoeling moet zorgen. Hierdoor is de uitvoerdiepte enigszins beperkt (maximaal circa 40 m). Om aan deze nadelen een eind te maken is in 1988 een begin gemaakt met de ontwikkeling van het zogenaamde Metro Jet System.

Het belangrijkste kenmerk van dit systeem is het mechanisme voor de afvoer van de retourspoeling. Deze afvoer wordt verbeterd door niet de ruimte om de boorbuis te gebruiken voor de retourspoeling, maar de boorbuis te voorzien van een retourkanaal. Een interne waterjet verzorgt de een extra opwaartse kracht, zodat op grotere diepte (tot 80 m) kan worden gejetgrout (afbeelding I.6.3). De toevoeging van drukmeters geeft de mogelijkheid te anticiperen op drukopbouw of andere ongewenste verschijnselen. [Lit. 10, blz. 333]

#### **I.6.4 Cross-Jet**

De Cross Jet techniek is ontwikkeld met als doel de verschillen in diameter over de hoogte te verminderen en de kwaliteit en homogeniteit van de kolom te verbeteren. Hierbij neemt de hoeveelheid retourspoeling af doordat kleinere, sterkere en meer homogene kolommen worden gemaakt.

In geval van crossing jets neemt de druk door kruisen van de stralen sterk af en wordt een bredere straal gecreëerd met een lagere druk. Hiermee is de reikwijdte van de straal beter te controleren en zal bij kleine storingen niet direct een verandering optreden. Resultaten van experimenten hebben aangetoond dat de variatie in druksterkte en diameters minder is met de Cross-Jet-methode dan met het conventionele jetgrouten. Het beter onder controle hebben van de reikwijdte van de straal heeft een positief effect op de hoeveelheid en regelmatigheid van de retourspoeling. [Lit. 10, blz. 707]

### 1.6.5 Super diameters

Indien jetgroutkolommen met grotere diameters ( $>4,0$  m) gemaakt kunnen worden, zullen de uitvoeringskosten aanzienlijk verminderen, omdat minder boorgaten nodig zijn. Literatuur [10, blz. 712] doet verslag van experimenten voor het verkrijgen van diameters van 5,0 m. De basis wordt gevormd door alleen een groutinjectie. De injectiedrukken variëren tussen de gebruikelijke drukken van circa 400 bar tot drukken van ongeveer 600 bar. Een belangrijke invloed wordt aan het debiet toegekend en een nieuw ontwikkeld debiet controlesysteem moet voor een regelmatige stroom zorg dragen. De trek- en rotatiesnelheid zijn aangepast en geoptimaliseerd totdat kolommen met extra grote diameters konden worden uitgevoerd. Nevenstaande afbeelding (I.6.6) vertoont een kolom met een diameter van ongeveer 5,0 m.

## I.7 Conclusie deel 1

Jetgrouten is een nog vrije jonge techniek die volop in ontwikkeling is. In het nabije (België en Duitsland) en verre (Japan, Hong Kong) buitenland wordt jetgrouten veelvuldig toegepast. In Nederland is het aantal uitgevoerde werken nog zeer beperkt. De kennis van techniek is sterk geconcentreerd bij de aannemers die jetgroutconstructies uitvoeren.

Gezien de mogelijke toepassingen (hoofdstuk I.3) zullen in de toekomst steeds vaker jetgroutconstructies worden gemaakt. Zeker in dichtbevolkte steden vormt het een uitstekende techniek om bepaalde civieltechnische constructies te maken of problemen op te lossen. Uit milieuoverwegingen zal injectie op basis van cement (mineralen) ook steeds meer de voorkeur krijgen boven bodeminjectie op basis van hard- of solftgel.

Net als bij alle andere bodeminjectie-technieken is het moeilijk bij jetgrouten vooraf te resultaten te voorspellen. De grote hoeveelheid parameters waarvan het resultaat afhankelijk is, maakt het moeilijk het jetgroutproces te modelleren. In de literatuur worden toepassingen slechts zeer algemeen beschreven en daarbij wordt vaak belangrijke informatie zoals de invoerparameters weggelaten. Het onderzoek op het gebied van jetgrouten is zeer praktisch van aard en wordt alleen gedaan in combinatie met een uit te voeren werk.

Het jetgroutproces is nauwelijks op kleine schaal na te bootsen, zodat proeven op ware grootte worden uitgevoerd en daarom bijzonder kostbaar zijn. Het is gebruikelijk voor het realiseren van een jetgroutwerk enkele proefkolommen te maken, zodat de uitvoeringsparameters vastgesteld kunnen worden. Vanwege het unieke karakter van de aanwezige grond op een proeflocatie zijn de resultaten niet op dezelfde wijze op andere locaties te verkrijgen.

In hoofdstuk I.5 zijn enkele methoden aangegeven waarmee meer grip kan worden verkregen op het erosieproces tijdens het jetgrouten. Met de energiebeschouwing (hydraulische en kinetische) van de snijstraal kan geprobeerd worden het proces te kwantificeren. In volgende delen wordt hiermee verder gewerkt.

---

**Deel II:**  
**Jetgroutproef Souterrain Den Haag**

---

## Samenvatting deel II

Voor het bouwproject Souterrain Grote Marktstraat-Kalvermarkt te Den Haag is in de maanden april, mei en juni 1996 een uitgebreide jetgroutproef uitgevoerd. Hierbij zijn jetgroutkolommen gemaakt met het zogenaamde 2 en 3 fasen jetgroutsysteem. Het doel van de proevenreeks was het bepalen van de geschikte uitvoeringsparameters van de jetgroutkolommen voor het uit te voeren jetgroutwerk in de Kalvermarkt en Grote Marktstraat. Gevarieerd is met snij- en vuldrukken, treksnelheden, water/cement-factoren, debieten en luchtdruk. Het streven was de diameter van de kolommen te maximaliseren, zodanig dat ook de aan de sterkte-eisen van het groutmateriaal werd voldaan.

Door middel van een diameterbepaling met behulp van een zogenaamd spinapparaat was het mogelijk direct de diameters van de gemaakte kolom te bepalen. Naast de diameterbepaling zijn verscheidene monsters van zowel de retour- als ook de kolomspoeling genomen. Tevens is met behulp van een stalen kokerprofiel meerder malen de helling (en afwijking) van het boorgat gemeten. De proefput bevatte naast een groot aantal individuele kolommen ook een deel waar een test is gedaan met het in elkaar draaien van de kolommen. Na uitharding van de kolommen en ontgraving van de put zijn kernen geboord die op druk en treksterkte beproefd zijn en heeft inspectie plaatsgehadt van de vorm en afmeting van de kolommen en het massief.

Door de variatie in jetgroutparameters van de proefkolommen kon uiteindelijk een geschikte kolom worden bepaald. Het 3 fasen systeem werd in dit geval niet het meest geschikt geacht in verband met de hoge sterkte-eisen aan het materiaal. De water/cement-factor van het kolommengsel dient daartoe vrij laag te zijn, wat bij het 3 fasen systeem en grote kolomdiameters moeilijker te bewerkstelligen is. Bij het 2 fasen systeem voldeden kolommen wel aan de sterkte-eis en zodoende is dit systeem gekozen voor de uitvoering van het werk.

Op verzoek van de bouwdirectie zijn tevens kernboringen uitgevoerd op de overlappingsen van de kolommen in het gemaakte massief. Naast twee verticale boringen zijn ook twee schuine en een horizontale boring in het massief gemaakt. De kernen van de horizontale en verticale boringen zijn gebruikt voor druk- en splijtproeven, de kernen van de schuine boringen zijn alleen geïnspecteerd. De resultaten van de boringen voldeden aan de eisen, op enkele geringe zand/veen-insluitingen na, werden geen onregelmatigheden gevonden.

De proefput is in fasen ontgraven, waarbij de kolommen steeds werden vrijgegraven voor inspectie en het uitvoeren van metingen. De kolomdiameters zijn daarbij op verschillende hoogten gemeten en vergeleken met de resultaten van de diameterbepalingen tijdens het uitvoeren van de kolommen. Geconcludeerd kan worden dat de diameterbepaling in de uitvoeringsfase een goede waarde geeft voor de diameter van de kolom op de betreffende hoogten. Opgemerkt dient te worden dat het meten van de diameter van de verse kolom niet eenvoudig was en vanwege puin of opstijving van de kolomspoeling niet altijd uitvoerbaar was.

De beproefde cilinders, afkomstig van retour- en kolomspoeling, blijken geen goed beeld te geven van de sterkte en stijfheid van het kolommateriaal. De gevonden waarden liggen ruim onder de waarden die werden gevonden bij de proeven op de kernen. Voor een representatief beeld van de materiaaleigenschappen blijken proeven op geboorde kernen noodzakelijk te zijn. Wellicht dat de omstandigheden waaronder de monsters uitharden veranderd kunnen worden, zodanig dat dezelfde omstandigheden worden gecreëerd als waaronder het kolommengsel in de grond uithardt.

Alle individuele kolommen en het massief zijn in delen gesloopt. Dit bood de mogelijkheid doorsneden van het massief op zand- en veeninsluitingen te bekijken. Op enkele plaatsen werden kleine (max. 1 dm<sup>3</sup>), volledig ingesloten zand of veenresten gevonden. Verder was het massief een groot betonnen geheel.

De positie van de onderkant van de kolommen is gecontroleerd aan de hand van de lengte van de kernboringen, die verricht zijn in de verschillende kolommen. De kernboringen zijn volledig doorgezet tot in het zand, hierdoor kon een indicatie worden verkregen van de diepte van de onderkant van de kolom. Tevens zijn de korte kolommen 9A en 10A tot aan de onderzijde vrijgegraven en geïnspecteerd. De kolommen zijn vanaf de hoogte waarop de snijdruk de vastgestelde waarde heeft gehad op volledige dikte. Bij het jetten worden de snijnozzles voor de hoogtebepaling aangehouden. De onderkant van de kolommen was altijd op voldoende diepte en vaak nog een tiental centimeters dieper.

In verband met jetgroutwerkzaamheden in slechte klei- en veenlagen ter plaatse van de Grote Markstraat zijn de proefkolommen ook bekeken op een diepte tussen NAP -6,0 m en NAP -8,0 m. Volgens de sonderingen bevinden zich hier klei- en veenlaagjes. Belangrijk was hierbij het effect van deze laagjes op de diameter van de kolom. Geconstrueerd is dat de diameter bij deze klei- en veenlagen enkele decimeters (circa 20 cm) terugvalt en zich boven en onder deze lagen een uitstulping vormt.

De uitvoeringsparameters van kolom 14 zijn als meest geschikt beoordeeld en leveren een gemiddelde diameter van 2,30 m. Het raster voor het jetgroutwerk in de Kalvermarkt is bepaald op grond van een nominale diameter van 2,10 m. Een berekening heeft bepaald dat de kans op falen van het overlappingsgebied van drie kolommen in geval van 2000 aansluitingen, circa  $2 \times 10^{-8}$  bedraagt. Bij deze berekening is gebruik gemaakt van de afwijkingen van de maatvoering en diameter, die zijn bepaald tijdens de jetgroutproef.

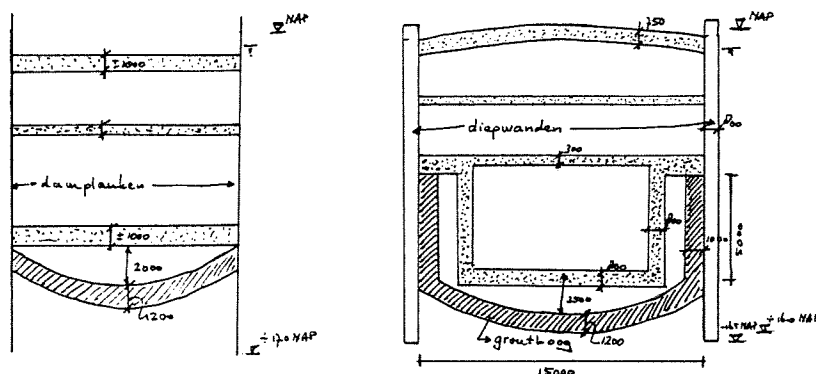
Hoewel de uitvoerbaarheid van diameterbepalingen met de spin op grote diepte (NAP -12 m tot -15 m) zeer problematisch bleek te zijn, hebben metingen tijdens de uitvoering aangetoond dat de diameter ruimschoots voldoet aan de gestelde eisen. In de aanwezige veenlaag in de Klavermarkt is een aanvullende jetgroutproef gedaan. Door terug te gaan in treksnelheid werd ter plaatse van de veenlaag ook een goede diameter verkregen. Proeven op kernen uit de boog hebben aangetoond dat sterkte en stijfheidseisen gehaald zijn.

## II.1 Inleiding

De bouw van de Souterrain in het Haagse centrum is wellicht het meest complexe bouwproject uit de geschiedenis van de stad. De tramtunnel maakt deel uit van een enorme hoeveelheid bouwprojecten na jaren zonder noemenswaardigen bouwontwikkelingen, zie ook bijlage II.1. Het Souterrainproject, ook wel tramtunnelproject genoemd, betreft twee ondergrondse trambanen met een lengte van 1250 m, een tweetal stations ter hoogte van de Grote Markt en het Spui en twee ondergrondse parkeerdekken met in totaal circa 500 parkeerplaatsen. De tram zal ter plaatse van de Muzenstraat onder het maaiveld verdwijnen en via de Kalvermarkt, het Spui, de Grote Marktstraat en de Grote Markt bij de Prinsegracht weer op straatniveau terugkeren. De hoofdaannemer van de bouw van de tunnel is een combinatie, genaamd TRAMKOM, waarin Van Hattum & Blankevoort, Ballast Nedam Beton- en Waterbouw en Strukton Betonbouw deelnemen. De onder-aannemer voor de funderingstechniek wordt gevormd door de Kombinatie Funderingstechnieken Den Haag (KFD), met de bedrijven Visser & Smit Bouw en Ballast Nedam Funderingstechnieken.

De tunnel wordt gebouwd volgens het wanden/dak-principe, wat betekent dat vanaf maaiveld de langswanden en het dak van de tunnel worden gemaakt, waarna onder het dak de grond wordt verwijderd en de tunnel afgemaakt kan worden. De overlast op de straat wordt zo tot een minimum beperkt. Funderingstechnisch is het wenselijk de wanden tot in een horizontale waterafsluitende grondlaag door te kunnen zetten, zodat na het afsluiten van de kopse kanten als het ware een polder wordt gecreëerd, waar de grondwaterstand naar behoefte kan worden verlaagd zonder de waterstand in de omgeving te beïnvloeden. Op deze wijze is bijvoorbeeld de spoortunnel in Rijswijk tot stand gekomen. Op het tramtunneltraject ontbreekt op een paar kleine stukken na een natuurlijke horizontale waterafsluitende laag of bevindt zich op een verkeerde hoogte. De benodigde horizontale afsluitende laag moet om die reden kunstmatig worden aangebracht.

De langswanden worden afhankelijk van de diepteligging van de tunnel uitgevoerd als damwand of diepwand. De horizontale waterafsluitende laag wordt gemaakt door middel van verschillende injectietechnieken. Eén van deze injectietechnieken betreft de techniek van het jetgrouten, zoals beschreven in deel I. Het jetgroutwerk zoals dat voor de bouw van de tramtunnel wordt uitgevoerd is op een drietal punten bijzonder uniek te noemen. Als eerste is de grootte van het werk uniek, zeker voor Nederlandse begrippen. De totale oppervlakte van de horizontale afsluitende jetgroutlaag bedraagt circa 5600 m<sup>2</sup>. Ook de vorm van het jetgroutwerk is uniek en slechts één keer eerder, als proefproject, uitgevoerd. Daarnaast is voor het werk een grote en unieke proefput gemaakt waar diverse aspecten van de jetgrouttechniek zijn getest, getoetst en bestudeerd.



Afb. II.1: doorsneden tramtunnel Kalvermarkt (links) en Grote Marktstraat (rechts) met groutboog en verticale groutkolommen (rechts).



De horizontale jetgroutlaag wordt in boogvorm uitgevoerd, zie afbeelding II.1. De zogenaamde jetgroutboog fungeert als waterafdichting en zal vanwege het ontbreken van voldoende gronddekking op de boog sterk genoeg moeten zijn om opbreken van de bouwputbodem te voorkomen. De boog is opgebouwd uit allemaal individuele jetgroutkolommen. Paragraaf 3.4.3 van deel I gaat in op dit type constructie en beschrijft de andere op deze wijze uitgevoerde kleine proefput te Strasbourg. Ter plaatse van de Kalvermarkt worden de langswanden gevormd door damwanden en is de aanhechting tussen de jetgroutboog en de damwand verbeterd door het oplassen van hoekprofielen op de damwand. In de Grote Marktstraat ligt de tunnel een stuk dieper en worden de langswanden gevormd door diepwanden. De jetgroutboog wordt hier uitgebreid met verticale groutkolommen die worden afgesteund op de vloeren van de parkeergarage, zie afbeelding II.1. Voor het uitvoeren van de jetgroutwerken is een nieuwe combinatie opgericht, de Combinatie Jetgrouten Den Haag (KJD), met daarin naast de bedrijven van de KFD het bedrijf Keller Grundbau, een jetgroutspecialist uit Duitsland.

In het bestek van het tramtunnelproject is het uitvoeren van een jetgroutproef verplicht gesteld. Hiervoor is een vak van het traject aangewezen als proefput waar enkele jetgroutkolommen moesten worden uitgevoerd. De proef is in de maanden april, mei en juni van 1996 door de KJD uitgevoerd. Deze jetgroutproef is bijzonder groot opgezet en uitgevoerd en vormt het onderwerp van dit deel II. Het doel van de proef was het vaststellen van de uitvoeringsparameters voor de fabricage van de jetgroutkolommen. Daarbij speelden de verkregen diameter en de druksterkte van het kolommengsel na uitharding een belangrijke rol. De diameter is belangrijk met het oog op de rasterafstand van de kolommen en de waterdichtheid van de boog, de druksterkte moet voldoen aan de in het bestek gestelde eis van een rekenwaarde van  $4,5 \text{ N/mm}^2$ . Het subdoel was het vaststellen van de nauwkeurigheid van de maatvoering van het groutproces. Het unieke van het experiment is gelegen in het feit dat de proefput na uitharding van de kolommen is ontgraven, zodat het resultaat direct kon worden aanschouwd, gefotografeerd en bestudeerd.

Dit deel II is als volgt opgebouwd: Hoofdstuk II.2 behandelt de algemene proefopzet, de grondopbouw in de proefput en de uitvoeringsparameters van de gemaakte kolommen. In hoofdstuk II.3 komen de metingen en proeven aan bod die tijdens het groutproces in de proefput zijn uitgevoerd, welke monsters genomen zijn, wat daarmee gedaan is en welke conclusies daaraan verbonden zijn. De bepaling van de diameter met behulp van een zogenaamd spinapparaat vormt een belangrijk deel van dit hoofdstuk. De fase van ontgraven en meten na uitharding vormt het onderwerp van hoofdstuk II.4. Het boren en beproeven van kernen komt hierbij aan de orde en het verloop van de diameter. In hoofdstuk II.5 zijn de bewerkte resultaten opgenomen en wordt een relatie gelegd met de toepassing als jetgroutboog. De conclusie van dit deel is samengetrokken met die van deel III en is achteraan deel III te vinden. De uitvoering van de jetgroutboog in de Kalvermarkt is het onderwerp voor het laatste hoofdstuk van dit deel (II.6). Hierin komen de uiteindelijke parameterkeuze, de rasterbepaling en de registratie van het groutproces aan de orde. Verder zijn tijdens de uitvoering nog enkele metingen gedaan waarvan de resultaten in dit hoofdstuk zullen worden aangehaald.

## II.2 Grondeigenschappen en uitvoeringsparameters jetgroutproef

### II.2.1 Algemeen

In de inleiding van dit deel is reeds aangegeven dat het doel van het experiment was het vaststellen van de uitvoeringsparameters voor het jetgroutwerk ten behoeve van de bouw van de tramtunnel. Twee eigenschappen van de individuele jetgroutkolommen die samen de groutboog vormen zijn daarbij specifiek van belang. Dit betreffen de diameter van de kolom en de sterkte en stijfheid van het verharde kolommengsel. De grootte van de diameter bepaalt de rasterafstand en hoe groter de kolom, desto minder kolommen dienen gemaakt te worden om de groutboog tot stand te brengen. Dit levert een tijdwinst op vanwege de afname van het aantal boringen. Een doel van het experiment was dan ook de diameter van de kolom te maximaliseren, dit in samenhang met voldoende sterkte en stijfheid.

Vanwege de relatief kleine diameters die met het 1 fase systeem jetgrouten kunnen worden gemaakt is dit systeem niet meegenomen in de jetgroutproef en bij voorbaat uitgesloten voor de uitvoering van de boog. Het 2 en 3 fasen systeem jetgrouten levert aanzienlijk grotere diameters op. Het voordeel van het 3 fasen systeem is dat het snijden en vullen gescheiden plaatsvindt. Hierdoor kan gevarieerd worden in diameter door middel van variatie in de snijstraal, en kan de hoeveelheid geïnjecteerd cement veranderen door variatie in de vulstraal (druk/debiet/nozzles). Nadeel van het systeem is dat een zekere menging optreedt tussen de waterstraal (snijstraal) en groutstraal (vulstraal), waardoor uiteindelijk de water/cement-factor van de totale injectie hoger is dan die van de vulstraal. Het 2 fasen systeem kent dit probleem niet omdat zowel gesneden als gevuld wordt met dezelfde groutstraal. Hier geldt het nadeel dat het grout niet geheel onafhankelijk kan worden gedoseerd, wat tevens leidt tot een relatief hoog cementgehalte in de retourspoeling. Een hulpmiddel vormt wel de water/cement-factor van geïnjecteerde grout, waarmee onafhankelijk van druk en debiet beperkt gevarieerd kan worden met de hoeveelheid cement in de kolom en retourspoeling.

Er is gekozen voor het maken van meerdere jetgroutkolommen met zowel het 2 als ook het 3 fasen systeem jetgrouten. Voor beide systemen is vooraf een stroomschema gemaakt van de veranderingen in parameters afhankelijk van de resultaten van uitgevoerde metingen. Deze stroomschema's zijn opgenomen in bijlage II.2. Begonnen is met het 3 fasen systeem jetgrouten. Het stroomschema voor dit systeem heeft als leidraad gediend maar is uiteindelijk in verband met de tussentijdse resultaten niet geheel gevolgd. Met dit systeem zijn uiteindelijk acht jetgroutkolommen gemaakt, waarvan zes met een relatief grote en twee met een relatief kleine diameter. De kleine kolommen zijn gemaakt met het oog op de buitenste verticale groutkolommen in het ontwerp van de groutboog ter plaatse van de Grote Marktstraat. Het betreffen de kolommen met een geringe diameter aan de buitenzijde van de boog die zijn afgestempeld op de parkeervloer (zie afbeelding II.1). Daarnaast werd er ten tijde van de proef al over gesproken om alle damwandkassen bij de boog op de Kalvermarkt te voorzien van een extra kolom om zeker te zijn van een goede aansluiting tussen boog en damwand. Door schaduweffecten, dat wil zeggen onbereikbaarheid van bepaalde hoeken van de damwandprofielen door de rechte jetgroutstraal, zou de aansluiting niet voldoende kunnen zijn. Het vaststellen van de uitvoeringsparameters voor deze kleine kolommen is aan de proef toegevoegd.

Naast deze acht 3 fasen kolommen is geëxperimenteerd met een nieuw 3 fasen systeem, het door de KFD genoemde 3 fasen plus systeem. Hierbij bestaat, om de hoeveelheid cement in de kolom te vergroten, zowel de snij- als ook de vulstraal uit een groutinjectie. Hierna is overgeschakeld naar het 2 fasen systeem, waarmee eveneens een achttal kolommen is vervaardigd. Dit betroffen drie kleine en vijf grote kolommen. Als laatste is met een geschikt geachte kolom een massief gemaakt, zodat de aansluitingen tussen individuele kolommen na ontgraving bekeken konden worden. Dit massief bestond uit elf kolommen waarvan negen 2 fasen en twee 3 fasen kolommen. Voor de exacte uitvoeringsparameters wordt verwezen naar paragraaf II.2.3 en bijlage II.2.

## II.2.2 Grondeigenschappen

De resultaten van een proef krijgen pas voldoende waarde als de omstandigheden van de werkelijke uitvoering van de groutboog goed overéénkomen met de omstandigheden van de proef. Uitvoeringsparameters kunnen eenvoudig worden gereproduceerd. De eigenschappen van de grond daarentegen niet. Het was daarom moeilijk een geschikte proeflocatie te vinden. Uiteindelijk is vak 18 van het tramtunnelproject aangewezen als proeflocatie.

De aanlegdiepte van de jetgroutboog ter hoogte van de Kalvermarkt varieert van NAP -10,5/-11,7 m tot NAP -13,2/-14,4 m. Aan weerszijden van de groutboog moeten op enkele plaatsen groutvloeren worden gemaakt op een diepte van NAP -6,5 m. Ter plaatse van deze injecties wordt hoofdzakelijk zand aangetroffen, met een enkele kleilens. De jetgroutwerkzaamheden op de Grote Marktstraat zijn beperkt tot het maken van een groutboog waarvan de aanlegdiepte varieert van NAP -11,5/-12,7 m tot NAP -14,8/-16,0 m. Ook op deze diepte wordt hoofdzakelijk zand aangetroffen, met iets meer kleilenzen dan in de Kalvermarkt. Het diepste gedeelte van de boog zal waarschijnlijk voor een deel in een dunne veenlaag terecht komen, gelegen rond NAP -16,0 m.

In vak 18 ontbreekt een veenlaag op de diepte van NAP -16,0 m. De aanwezige grondslag van NAP -7,5 m tot -13,0 m is vergelijkbaar met die van de Kalvermarkt en Grote Marktstraat ter plaatse van de boog. De grond bestaat over deze hoogte voornamelijk uit zand met een conusweerstand tot circa 20 MPa, onderbroken door laagjes kleilig zand. Besloten is de proefkolommen in vak 18 vanaf een diepte van NAP -11,0 m uit te voeren. Dit ook omdat de proefput uiteindelijk tot maximaal NAP -9,0 m kon worden uitgegraven. Ter plaatse van de Kalvermarkt is de veenlaag wel aanwezig op de aangegeven diepte. De groutboog is daar tijdens de uitvoering plaatselijk doorgezet tot in de veenlaag zodat ook daarop nog enkele metingen konden worden verricht.

De sondering behorend bij de proeflocatie is DKMP 37 en de meest nabije boring is GB 07, beide zijn gegeven in bijlage II.3. Door Tjaden zijn ter plaatse van vak 18 nog enkele aanvullende sonderingen verricht, dit zijn sonderingen S6 t/m S8 (eveneens bijlage II.3).

## II.2.3 Uitvoeringsparameters

De uitvoeringsparameters zijn in dit verslag niet opgenomen, wel is een overzichtstekening toegevoegd van vak 18 met de daarin de omtrek van de gemaakte jetgroutkolommen. De diameters van de kolommen zoals ze direct na het groutproces zijn gemeten, zijn op de tekening geprojecteerd. Begonnen is met kolommen 1 tot en met 6 (3 fasen), waarna kolommen 7 en 8 gemaakt zijn met het 3 fasen plus systeem. Kolommen 9A en 10A (de A is van afwijkende diameter) zijn kleine kolommen, gemaakt volgens het 3 fasen systeem. Hierna is overgeschakeld op de 2 fasen techniek voor kolom 11 tot en met 16B. Kolom 15 kon niet worden gemaakt vanwege de aanwezigheid van een peilbuis binnen de waarschijnlijke straal van de kolom. Kolommen 16 en 17 zijn twee keer gemaakt (16B respectievelijk 17B) vanwege meetproblemen bij de eerste kolommen. Kolommen 17A/17B en 18A hadden een beperkte afmeting. Het merendeel van deze individuele kolommen is gemaakt vanaf een diepte van NAP -11,0 m tot aan NAP -2,5 m. Het maaiveld lag ten tijde van de uitvoering op NAP +0,0 m. Alleen kolommen 9A en 10A zijn korter uitgevoerd.

Voor de uitvoering van het massief zijn de uitvoeringsparameters van kolom 14 gekozen. Met de parameters van deze kolom zijn de kolommen 19 t/m 21, 23 t/m 25 en 27 t/m 29 gemaakt. In de tekening in de bijlage is te zien dat de afstand tussen de assen J'en H groter is dan tussen de assen H en G (vandaar ook het accent in J'). Kolom 31 en 32 zijn vervaardigd met de 3 fasen techniek. De lengte van de kolommen 19, 20 en 23 bedraagt 8 m, de andere kolommen in het massief zijn korter. De variatie in lengte is aangebracht vanwege de geplande kernboringen door het massief (zie eveneens tekening).

Per kolom zijn de uitvoeringsparameters en de verrichte metingen op een zogenaamde jetgroutstaat vastgelegd. De trek- en draaisnelheid werden bij de boorstelling elektronisch geregistreerd, terwijl de injectieparameters met schrijvende meters ter plaatse van de pomp werden vastgelegd. Het elektronische log-systeem dat alle gegevens opslaat functioneerde nog niet naar behoren en kon tijdens de proef niet worden gebruikt. In bijlage II.2 zijn van kolom 14 de jetgroutstaat en de boor- en pompregistratie opgenomen.

In paragraaf II.3. zullen de metingen die tijdens het groutproces zijn gedaan aan de orde komen. De resultaten van deze metingen waren de reden tot het wijzigen van de uitvoeringsparameters. In de paragraaf zal nader worden ingegaan op deze wijzigingen. In bijlage II.9 zijn foto's opgenomen van de uitvoering van de jetgroutkolommen.

## II.3 Metingen/proeven tijdens uitvoering jetgroutkolommen

### II.3.1 Diameterbepaling met behulp van spinapparaat

#### II.3.1.1 Algemeen

Een goede diameterbepaling van een verse kolom is waarschijnlijk de meest belangrijke meting die aan jetgroutkolommen is uit te voeren. De diameter bepaalt in geval van jetgroutschermen de overlap tussen de verschillende individuele kolommen en daarmee de waterdichtheid van het jetgroutscherm. Indien met zekerheid een waarde voor de diameter van een kolom kan worden gegeven, kan daarmee direct de kwaliteit van het eindresultaat worden beoordeeld. Het verloop van de diameter is daarbij in geval van verticale waterremmende schermen natuurlijk nog belangrijker omdat de minimale diameter van de kolom uiteindelijk de kwaliteit van de aansluiting bepaald.

Enkele aannemers proberen aan de hand van de volumieke massa van de retourspoeling een uitspraak te doen van de gerealiseerde diameter. In deel III van dit rapport zal getracht worden de nauwkeurigheid van deze diameterbepaling na te gaan. Het spreekt voor zich dat plaatselijke insnoeringen op deze wijze niet ontdekt zullen worden. Keller Grundbau heeft een apparaat ontwikkeld dat in de verse kolom kan worden gelaten en waarbij zogenaamde voelsprietten de wanden van de kolom opzoeken. De mate van uitklappen van deze sprietten is een maat voor de diameter van de kolom. Visser & Smit Bouw heeft een soortgelijk apparaat ontwikkeld (de spin genaamd). Het resultaat is afgebeeld op een foto in de bijlage II.9. In deze afbeelding is de "spin" al enigszins uitgeklapt.

De spin van Visser & Smit is voor het eerst ingezet bij de hier beschreven jetgroutproef in Den Haag. Getracht is van iedere kolom de diameter op een aantal diepten te meten. Dit is vrij redelijk gelukt, maar er waren toch enkele problemen waardoor metingen af en toe mislukten. Puin in de bovenste lagen van het grondmassief was de oorzaak van het feit dat de spin niet altijd door het boorgat in de kolom kon worden gelaten. Het opnieuw uitboren van het gat was noodzakelijk om de spin op diepte te kunnen krijgen. Door het spinapparaat te verbeteren wordt geprobeerd het aantal problemen te verminderen.

Eenmaal op diepte, kostte het enige moeite om de poten van de spin uit de neutrale positie te krijgen. Op maaiveld klapt de spin gemakkelijk uit, maar vervuild door de spoeling in het boorgat en in de dikke pap van de kolom weigerden de poten er nog weleens uit de neutrale positie te bewegen. De spin verwijderen, schoonmaken, terugbrengen op diepte en het opnieuw proberen was het enige dat op dat moment kon worden gedaan.

Indien lange kolommen worden gemaakt is de tijd van het jetgrouten per kolom aanzienlijk (in geval van de proef soms 45 min). In de onderste delen van de kolom vindt dan reeds een zekere opstijving plaats van het kolommengsel. Deze opstijving belemmert het indringen van de spin. Met name bij zeer cementrijke kolommen is dit de oorzaak geweest dat spinmetingen mislukt zijn. Dit fenomeen werd ook geconstateerd indien vers gemalen cement werd gebruikt voor de kolom. Het hardingsproces verloopt in geval van vers cement sneller dan bij gemalen cementsteen van enkele dagen oud. Overigens wordt de opstijving onderin de kolom waarschijnlijk mede veroorzaakt door enige sedimentatie in de kolom, waardoor zwaardere delen naar de bodem van de kolom zakken.

#### II.3.1.2 Resultaten metingen diameter

De resultaten van de spinmetingen zijn gepresenteerd in tabel II.1. In eerste instantie was gepland de diameterbepaling te doen op diepten van NAP -3,0/-6,0/-8,0/-9,0/-10,0 m. Vanwege bovengenoemde

problemen was het niet altijd mogelijk de diameters op de vooraf gestelde hoogten te bepalen. Het steken van monsters uit de verse kolom, wat wordt behandeld in II.3.2, is betrokken bij de diameterbepaling. Vaak werd een monster genomen op een diepte van NAP -4,0 m. Besloten is toen ook op deze hoogte een spinmeting uit te voeren om een verband te kunnen leggen tussen volumieke massa en diameter.

Dat de in tabel II.1 met een sterretje gemarkeerde metingen niet mee zijn genomen in de berekening van het gemiddelde heeft te maken met het feit dat bij deze metingen niet de buitenkant van de kolom de oorzaak was dat de spin niet verder is uitgeklapt. Het uit de neutrale stand brengen van de poten van de spin heeft in deze gevallen reeds veel moeite gekost. De spoeling is plaatselijk te stijf om de spin nog verder te bewegen. Metingen net boven NAP -3,0 m zijn ook niet altijd gelukt omdat de bovenkant van de kolom het uitklappen van de spin tegenwerkt. De spin heeft een zekere werkhoogte nodig om volledig uit te kunnen klappen. Overigens kon de spin, in de uitvoering die gebruikt is bij de proef, een maximale diameter meten van circa 2,50 m. Later is dit vergroot tot boven de 2,60 m.

Omdat dit een groot experiment betrof en de diameterbepaling belangrijk was voor de verder uit te voeren proeven is bijzonder veel moeite gedaan om diameters te meten. De spin is in verschillende kolommen meerdere malen op diepte gebracht, er weer uit gehaald, schoongemaakt en opnieuw in de kolom gelaten, dit alles om een diameterbepaling te krijgen. Vaak is de spin langzaam omhoog getrokken totdat een meting kon worden gedaan. Een schatting van het percentage succesvol verlopen metingen is eigenlijk niet goed te maken.

### II.3.1.3 Wijzigingen in parameters naar aanleiding van diameterbepaling

Naar aanleiding van de gemeten diameters zijn de volgende wijzigingen in de uitvoeringsparameters doorgevoerd.

#### 3 fasen:

- Kolom 1 gaf een relatief kleine diameter (1,80 m). Geprobeerd is door het opvoeren van het snijdebiet een grotere diameter te bereiken. Het groutdebiet is iets opgevoerd om de vullingsgraad voldoende te houden;
- De diameter van kolom 2 was behoorlijk groot, gekeken is wat het effect was als de treksnelheid wat zou worden opgevoerd;
- Omdat de spinmetingen en het steken van monster nauwelijks op grote diepte kon worden uitgevoerd is besloten tot het jetgrouten in twee delen, zodat de tijd tussen grouten en meten in de onderste delen niet te groot zou worden. Dit is gebeurd voor kolom 4, 5 en 6;
- De diameter, rond de 2 meter, werd als goed beschouwd, gekeken is daarna na het cementgehalte voor kolom 4;
- In overleg met Keller is besloten te proberen de diameter toch naar de 2,50 m te krijgen, omdat dit in het werk tot een aanzienlijke tijdsbesparing (en kostenbesparing) zou kunnen leiden. Hiervoor is de treksnelheid weer verlaagd.

#### 3 fasen plus:

- Hierbij lag de nadruk sterk op het cementgehalte in de kolom (kolom 7 en 8).

#### 3 fasen:

- Voor de diameter van de kleine kolommen is gestreefd naar een waarde van circa 1,0 m. De diameter van 9A bleek te hoog. Voor 10A is toen besloten de snijdruk te verminderen.

#### 2 fasen:

- De diameter van kolom 11 was betrekkelijk klein. De pompdruk was zeer hoog, gekozen is toen voor het opvoeren van het debiet;

Hoofdstuk II.3: Metingen/proeven tijdens uitvoering jetgroutkolommen

kolomnummer	diameter gemeten met spin		kolomnummer	diameter gemeten met spin	
	diepte	diameter		diepte	diameter
	NAP [m]	[m]		NAP [m]	[m]
1	-3,00	1,80	10A	-2,75	1,30
	-6,00	2,00		-3,50	1,25
	-8,00	1,66		-4,50	1,06
	-9,00	1,77		-5,50	1,13
	<b>gemiddeld</b>	<b>1,80</b>		<b>gemiddeld</b>	<b>1,18</b>
2	-3,00	2,22	11	-3,00	1,66
	-5,00	2,29		-4,00	1,69
	-6,00	2,35		-6,00	1,54
	-7,25	2,29		-7,00	1,34*
	<b>gemiddeld</b>	<b>2,29</b>		-8,50	1,61
3	-3,75	2,17	12	<b>gemiddeld</b>	<b>1,63</b>
	-4,75	2,14		-4,00	2,36
	-5,75	1,99		-5,00	2,29
	-6,75	2,17		-6,00	2,47
	-7,75	2,07		-7,00	2,22
4	<b>gemiddeld</b>	<b>2,11</b>	13	<b>gemiddeld</b>	<b>2,34</b>
	-3,00	2,10		-3,00	2,04*
	-4,00	1,86		-4,00	2,39
	-5,00	1,64*		-5,00	2,18
	-6,50	1,55*		-6,00	2,11
5	-8,50	2,00	-7,00	1,81*	
	-9,00	2,24	-8,00	2,50	
	-10,00	1,82	<b>gemiddeld</b>	<b>2,30</b>	
	<b>gemiddeld</b>	<b>2,00</b>	14	-4,00	2,01*
	-3,25	2,25		-5,00	2,08*
-5,25	1,81*	-6,00		2,37	
-6,25	2,36	-7,00		2,05*	
-7,50	1,48*	-8,00		2,20	
6	<b>gemiddeld</b>	<b>2,30</b>	-9,00	2,42	
	-3,00	2,13	-10,00	2,24	
	-4,00	2,34	<b>gemiddeld</b>	<b>2,30</b>	
	-6,00	2,50	16	geen metingen	
	-7,00	1,73*	17A	-4,00	1,01
7	-8,00	>2,50	18A	geen metingen	
	<b>gemiddeld</b>	<b>2,37</b>	16B	-3,00	2,35
	-3,00	1,90	-4,00	2,37	
	-4,00	1,76	-5,00	2,07*	
	-6,00	1,64	-6,00	2,37	
8	-7,00	1,49*	-7,00	2,25	
	-8,00	1,68	-8,00	2,01*	
	-9,00	1,76	-9,00	2,50	
	<b>gemiddeld</b>	<b>1,75</b>	<b>gemiddeld</b>	<b>2,37</b>	
	-3,00	1,78	17B	-4,00	1,61
-4,00	1,58	-5,00		1,44	
-6,00	1,38	<b>gemiddeld</b>		<b>1,53</b>	
-7,00	1,13*				
<b>gemiddeld</b>	<b>1,58</b>				
9A	-2,75	1,34			
	-3,50	1,50			
	-4,50	1,54			
	-5,50	1,07*			
	<b>gemiddeld</b>	<b>1,46</b>			

\* betekent: niet meegenomen in gemiddelde

Tabel II.1: diameterbepalingen met spinapparaat.

- De wijzigingen in tussen kolom 12 en 13 zijn ingegeven door het cementgehalte in de kolom;
- Om nog grotere diameters te bereiken is de treksnelheid voor kolom 14 verlaagd;
- Kolommen 16 en 16B zijn gemaakt met een hogere luchtdruk om het effect van de luchtdruk op de diameter te bekijken;
- Kolommen 17A en 18A konden niet of nauwelijks worden gemeten. Om na ontgraving toch vergelijkingsmateriaal te hebben is kolom 17B met een lagere treksnelheid gemaakt.

### II.3.2 Monstername

#### II.3.2.1 Algemeen

Tijdens de uitvoering van de jetgroutproeven zijn monsters genomen van zowel de retourspoeling als ook het kolommengsel. De retourspoeling is met behulp van een emmer aan een touw verzameld aan het oppervlak ter plaatse van de boorbuis. De monsters zijn steeds op vaste diepte van de snijnozzles aan de retourstroom onttrokken, te weten op NAP -10,0 m en NAP -8,75 m. Op NAP -10,0 m wordt zuiver zand aangetroffen en op NAP -8,75 m zijn enkele kleilenzen aanwezig. In de laboratoriumcontainer is de volumieke massa van de spoeling twee maal bepaald, een keer met een maatbeker en weegschaal en een maal met een dobber. Hierna zijn negen cilinders gevuld met het materiaal en onder geconditioneerde omstandigheden opgeslagen. De cilinders zijn na 28 dagen beproefd, waarvan in hoofdstuk II.4. de resultaten worden vermeld.

Het nemen van een monster uit de verse kolom is minder eenvoudig dan het nemen van monsters van de retourspoeling. Met een speciaal ontwikkeld steekapparaat, zie fotonummer !!!!, is geprobeerd monsters te nemen op dezelfde hoogte als de monsters van de retourspoeling. Bij het steken van de monsters werden dezelfde problemen ondervonden als met het plaatsen van het spinapparaat. Het steekapparaat bleef regelmatig in het boorgat hangen op puinresten of kon het opgestijfde kolommengsel niet meer binnendringen. Door na het jetgrouten zeer snel over te gaan op het nemen van steekmonsters, konden toch redelijk wat monsters worden genomen. De diepte waarop het monster genomen is varieert vanwege genoemde problemen. Van deze monsters werd de volumieke massa in tweevoud bepaald en zijn cilinders gevuld.

Beide soorten monsters zijn ook gebruikt voor het uitvoeren van een filterpers-proef. Deze proef wordt beschreven in II.3.3 en heeft als doel het vaststellen van het cementgehalte.

#### II.3.2.2 Resultaten volumieke massa retour- en kolomspoeling

De waarden voor de volumieke massa zijn vermeld in tabel II.2:



kolomnummer	monstername			kolomnummer	monstername		
	soort	diepte	volumieke massa		soort	diepte	volumieke massa
	[-]	NAP [m]	[ton/m3]		[-]	NAP [m]	[ton/m3]
1	retour	-10,00	1,81	8	retour	-10,00	1,96
	retour	-8,75	1,81		retour	-8,75	1,95
	kolom	-6,25	1,83		kolom	-8,25	1,90
	kolom	-4,00	1,73		kolom	-4,00	1,91
2	retour	-10,00	1,86	11	retour	-10,00	1,91
	retour	-8,75	1,82		retour	-8,75	1,97
	kolom	-5,25	1,66		kolom	-10,00	1,95
	kolom	-4,00	1,63		kolom	-8,75	1,92
3	retour	-10,00	1,87	12	retour	-10,00	1,96
	retour	-8,75	1,87		retour	-8,75	1,97
	kolom	-5,50	1,86		kolom	-8,50	1,77
	kolom	-4,00	-		kolom	-4,00	1,85
4	retour	-10,00	1,90	13	retour	-10,00	1,98
	retour	-8,75	1,89		retour	-8,75	1,97
	kolom	-7,50	1,79		kolom	-8,00	1,88
	kolom	-4,00	1,77		kolom	-4,00	1,71
5	retour	-10,00	1,88	14	retour	-10,00	1,97
	retour	-8,75	1,88		retour	-8,75	1,98
	kolom	-7,50	1,82		kolom	-10,00	1,93
	kolom	-4,00	1,79		kolom	-4,00	1,80
6	retour	-10,00	1,87	16B	retour	-10,00	1,92
	retour	-8,75	1,87		retour	-8,75	1,95
	kolom	-8,00	1,86		kolom	-8,50	1,91
	kolom	-4,00	-		kolom	-4,00	1,81
7	retour	-10,00	1,94				
	retour	-8,75	1,95				
	kolom	-10,00	1,92				

Tabel II.2: volumieke massa retour- en kolomspoeling.

### II.3.2.3 Wijzigingen in parameters naar aanleiding van monstername

Het nemen van monsters van de retourspoeling en het kolommengsel heeft niet direct bijgedragen tot het veranderen van de uitvoeringsparameters van de proefkolommen. Wel hebben de monsters bijgedragen aan veronderstellingen over het cementgehalte van het kolommengsel. Door de samenstelling te bestuderen werd het vermoeden bevestigd dat er veel of weinig cement in de kolom aanwezig zou zijn. Met de bepaalde volumieke massa's is tijdens de proef niets gedaan. In deel III zal gekeken worden of met de gevonden waarden bepaalde verbanden afgeleid kunnen worden.

### II.3.3 Schatting cementgehalte in verband sterkte en stijfheid

#### II.3.3.1 Algemeen

In het bestek zijn sterkte- en stijfheidseisen voor het verharde kolommengsel opgenomen. De rekenwaarde van de druksterkte moet minimaal  $4,5 \text{ N/mm}^2$  bedragen, de rekenwaarde van de treksterkte mag  $0,45 \text{ N/mm}^2$  niet onderschrijden en de elasticiteitsmodulus moet een waarde hebben van minimaal  $2000 \text{ N/mm}^2$ . Deze eisen komen voort uit sterkteberekeningen van de jetgroutboog in het tramtunnelproject. Omdat grout bij het berekenen van de sterkte wordt beschouwd als beton, wordt vaak in het bestek de opmerking toegevoegd dat gerekend moet worden volgens het CUR-rapport 94-12 "Beoordeling van de constructieve consequenties van het toepassen van grindvervangende toeslagmaterialen in beton". Dit rapport bevat allerlei normen waaraan beproevingen van monsters dienen te voldoen, en hoe relaties tussen druk- en treksterkte moeten worden veranderd indien ander toeslagmateriaal wordt gebruikt dan grind. Voor het onderzoek van de jetgroutproef zijn alle drie de materiaaleigenschappen rechtstreeks door middel van proeven bepaald. Er is niet gewerkt met onderlinge relaties.

In eerste instanties is gekeken naar de geëiste druksterkte. De rekenwaarde van  $4,5 \text{ N/mm}^2$  betekent een gemiddelde waarde van circa 8 tot  $10 \text{ N/mm}^2$  in verband met de zeer grote inhomogeniteit van het

kolommengsel. Door deze inhomogeniteit is de spreiding tussen de gevonden druksterkten groot, wat leidt tot een groot verschil tussen gemiddelde en rekenwaarde van de druksterkte. In deel I is in paragraaf 5.5 ingegaan op de mechanische eigenschappen van het groutmateriaal. Als maat voor de druksterkte wordt vaak het cementgehalte van het kolommengsel aangehouden. Op grond van de hoeveelheid cement per volume, achtergebleven in de kolom en uitgedrukt in  $\text{kg/m}^3$ , kan een voorspelling worden gedaan over de druksterkte van het verharde materiaal. In overéénstemming met de relatie in de betontechnologie levert een lagere water/cement-factor van het kolommengsel een hogere sterkte op. Voor de eisen voor de jetgoutboog is vooraf een schatting van de hoeveelheid cement voor het behalen van de sterkte eisen, gemaakt van  $250 \text{ kg/m}^3$ . De bepaling van deze waarde geschiedt op basis van ervaring.

De moeilijkheid is tijdens het uitvoeren van de jetgroutproef het cementgehalte van de kolommen te bepalen. Het cementgehalte van verhard beton kan alleen met behulp van een chemisch proces worden bepaald. Getracht is op twee manieren een schatting te kunnen maken van het cementgehalte in de kolom, zodat aan de sterkte eisen kon worden voldaan. De eerste schatting berust op de waarde van de gemeten diameter. De tweede schatting is geprobeerd te maken met behulp van een filterpersproef, bekend uit de diepwandentechnologie.

### II.3.3.2 Schatting cementgehalte aan de hand van diameter kolom

Als basis voor deze schatting dient de diameter zoals die is gemeten met het spinapparaat en waarvan de gevonden waarden zijn vermeld in tabel II.1. De volgende aannamen zijn gemaakt voor de berekening:

- Het totale injectievolume mengt zich volledig met de losgewoelde grond;
- De samenstelling van de retourspoeling is hetzelfde als die van het kolommengsel;
- De gemiddelde waarde van de diameterbepaling is de gemiddelde diameter over de hoogte;
- Er vindt geen uittreding van water plaats;
- Er is sprake van onsamendrukbare materialen;
- Er is geen sprake van volumereductie door het reageren van cement met water.

Voorbeeld berekening:

Gegevens:

- gemiddelde diameter  $D$  m;
- debiet waterstraal  $Q_w$  ltr/min;
- debiet groutstraal  $Q_g$  ltr/min;
- water/cement-factor  $wcf$ ;
- treksnelheid  $L_s$  cm/min;

Berekening:

- totale injectiedebiet water:  $Q_w \cdot 100/L_s$ ;
- totale injectiedebiet grout:  $Q_g \cdot 100/L_s$ ;
- inhoud kolom:  $\frac{1}{4} \pi \cdot D^2 \cdot l$  m (volume zand en water);
- water/cement-factor  $\rightarrow X \text{ kg/m}^3$  cement;
- totaal gewicht cement per meter kolom:  $Q_g/(10 \cdot L_s) \cdot X$ ;
- totale volume (zand+grondwater+water+grout):  $Q_w \cdot 100/L_s + Q_g \cdot 100/L_s + \frac{1}{4} \pi \cdot D^2 \cdot l = Y$  ltr/m kolom;
- cementgehalte:  $(Q_g/(10 \cdot L_s) \cdot X)/Y = Z \text{ kg/m}^3$ .

Op dezelfde wijze geschiedt deze berekening bij de andere kolommen. In geval van het 2 fasen systeem ontbreekt een waterstraal, wat meteen een effect heeft op het cementgehalte in de kolom.

kolomnummer	cementgehalte in kg/m <sup>3</sup>
1	190
2	142
3	148
4	194
5	198
6	171
7	406
8	409
9A	143
10A	194
11	261
12	209
13	255
14	287
17A	271
16B	274
17B	148

Tabel II.3: schatting cementgehalte a.d.v. diameter.

### II.3.3.3 Schatting cementgehalte met behulp van filterpersproef

De filterpers zie foto in bijlage II.9 is een apparaat waarmee bij de diepwandentechniek de kwaliteit van de bentoniet wordt gecontroleerd. Het bentoniet wordt meerdere malen gebruikt maar verliest in kwaliteit. De bentoniet wordt met behulp van de filterpersproef gecontroleerd op waterbindend vermogen en op cake-vorming. Gedurende een volgens normen vastgestelde tijd wordt koolzuurgas met een bepaalde druk door het bentonietmengsel gestuurd. De hoeveelheid water die hiermee uit het mengsel wordt verdreven is een maat voor het waterbindend vermogen van het bentoniet.

Op dezelfde wijze is geprobeerd tijdens de jetgroutproeven de monsters van de retourspoeling en het kolommengsel in de filterpers te beproeven. Getracht is met de pers het water uit het monster te verwijderen en door middel van de volumieke massa van het residu een berekening te kunnen maken van het cementgehalte in het monster. Gedurende 5 min is koolzuurgas door de monsters gestuurd. Het water in het monster kon helaas niet geheel uit het monster worden verwijderd, waardoor de berekeningen zeer onnauwkeurig werden en aan de uitkomsten geen waarde gehecht kon worden.

### II.3.3.4 Wijzigingen in parameters naar aanleiding van geschat cementgehalte

De streefwaarde van het cementgehalte van het kolommengsel was 250 kg/m<sup>3</sup>. Samen met een zo groot mogelijke diameter behoorde dit tot de doelen van de jetgroutproef. In paragraaf II.3.1.3. zijn de wijzigingen van de uitvoeringsparameters naar aanleiding van de diameterbepaling aangegeven. Hier volgen de wijzigingen die zijn doorgevoerd met het oog op het cementgehalte, en dus de druksterkte van het materiaal.

#### 3 fasen:

- Nadat bij kolommen 1 tot en met 3 gevarieerd is met diameters is bij kolom 4 de water/cement-factor verlaagd om iets te doen aan het geringe cementgehalte bij de eerste drie kolommen;
- Omdat voor kolom 5 een grotere diameter werd voorzien is de water/cement-factor nog een stap verlaagd om toch voldoende cement in de kolom te krijgen. De water/cement-factor werd te laag zodat er een grote kans op verstoppingen in slangen en leidingen ontstond. Bovendien wordt het grout dusdanig zwaar dat het moeilijk te verpompen is. Het cementgehalte was nog niet zo als vereist;
- Vanwege bovengenoemde argumenten is de water/cement-factor teruggebracht voor kolom 6;

**3 fasen plus:**

- Bij de eerste zes kolommen kon niet worden voldaan aan de eis van de hoeveelheid cement in de kolom, terwijl de diameters vrij acceptabel waren. De verdunnende werking van de waterstraal werd niet opgeheven. Geprobeerd is toen met het 3 fasen plus systeem meer cement in te brengen. De water/cement-factor kon hiervoor wel weer enigszins omhoog;
- Kolommen 7 en 8 leverden een bijzonder zware en cementrijke retourspoeling op met ruim voldoende cement in het kolommengsel (schatting:  $410 \text{ kg/m}^3$ );

**3 fasen:**

- Bij de kolommen 9A en 10A lag de nadruk op de diameter.

**2 fasen:**

- Vanwege het ontbreken van een waterstraal behoefde de water/cement-factor nog niet hoog te zijn om toch een goede hoeveelheid cement in de kolom te krijgen (kolom 11). De diameter was aan de lage kant;
- Voor kolom 12 werd een grotere diameter verwacht en voor voldoende vulling is het groutdebiet opgevoerd;
- Kolom 12 leverde een goede diameter maar te weinig cement, de water/cement-factor is voor kolom 13 daarom verlaagd;
- Daarna is getracht het cementgehalte van kolom 13 nog enigszins te verhogen door langzamer te trekken. Dit heeft echter ook effect op de diameter, zodat het cementgehalte ook kan afnemen;
- Bij kolom 14 is de juiste hoeveelheid cement gevonden, voor 16 en 16B is daar niet veel in veranderd;
- Bij de kleine kolommen heeft de hoeveelheid cement niet direct een rol gespeeld.

## II.3.4 Hellingmetingen

### II.3.4.1 Algemeen

Één van de handelingen die de uiteindelijk plaatsingsnauwkeurigheid van de kolom bepalen, is de afwijking ten gevolgen van het op diepte boren. Bij de jetgroutproef is de boornauwkeurigheid bestudeerd door ieder boring van de individuele kolommen, ongeacht de lengte en diepte van de kolommen eerst tot een diepte van NAP -16,0 m uit te voeren. Op deze diepte zal immers ter plaatse van de Grote Marktstraat de groutboog worden aangebracht.

Voordat begonnen wordt met boren wordt de makelaar van de boorstelling zo goed mogelijk verticaal gesteld. Hierbij wordt gebruik gemaakt van meters in de boorkraan en een timmermans-waterpas. Ook de boorbuis wordt in twee richtingen met behulp van een waterpas verticaal gesteld.

### II.3.4.2 Werking hellingmeting

De helling is gemeten door na het boren het boorgat te vullen met grout, de boorbuis te verwijderen en een flexibele stalen koker in het boorgat te zetten. Ook hierbij zijn grote problemen opgetreden en kwam het vaak voor dat de koker in het boorgat bleef hangen en niet op diepte kon worden gebracht. Indien de koker tot een diepte van NAP -16,0 m in het boorgat was geplaatst, werd een inclinometer in de koker naar beneden gelaten. Vanaf de onderzijde is om de meter vervolgens de helling gemeten en elektronisch opgeslagen. Door dezelfde meting nogmaals te doen en de meter hierbij 180 graden te draaien is een controle berekening uitgevoerd. Met de gemeten hellingen zijn in een spreadsheet de afwijkingen in twee richtingen bepaald. Met de stelling van Pythagoras is dan de totale afwijking te bepalen.

Theoretisch gezien kan de hellingmetingbuis schuin in het boorgat gaan staan, wat leidt tot grotere afwijkingen dan in werkelijkheid aanwezig zijn. Het boorgat gemaakt met het 2 fasen systeem heeft een kleinere diameter dan het boorgat van het 3 fasen systeem vanwege het gebruik een spoelgat aan de onderzijde van de boorbuis. Dit was merkbaar in de metingen van de verschillende hellingen. Door

nu bij het boren de snijnozzles van het 3 fasen systeem af te dichtten bleef het boorgat ook bij dit systeem beperkt van omvang.

### II.3.4.3 Waarden afwijkingen ten gevolge van boren

kolomnummer	afwijking in mm	procentuele afw.
2	54	0,34%
3	61	0,38%
4	111	0,69%
7	70	0,44%
11	29	0,18%
12	4	0,02%
13	50	0,31%
33 (extra boring)	64	0,40%
34 (extra boring)	65	0,41%
35 (extra boring)	50	0,31%

Tabel II.4: afwijkingen gemeten met hellingmeter.

In bijlage II.4. is een hellingmeting opgenomen met een uitleg van de verschillende kolommen op de uitdraai.

### II.3.5 Waarnemingen tijdens uitvoering jetgroutproeven

Een belangrijk gegeven van werkzaamheden in de funderingstechniek is dat hetgeen gemaakt wordt vaak niet of nauwelijks kan worden aanschouwd. De kwaliteit van het jetgrouten wordt voornamelijk bepaald door de nauwkeurigheid van uitvoeren. Het registreren en controleren van de uitvoeringsparameters is een belangrijke taak. Soms kunnen op maaiveld verschijnselen worden waargenomen die ook een indruk geven van de kwaliteit van de jetgroutkolom.

De retourstroom is een belangrijk indicatiemiddel voor het groutproces. Bij het maken van kolom 16 werd over een hoogte van  $\frac{3}{4}$  deel van de lengte van de kolom geen retourspoeling aan het oppervlak waargenomen. Tijdens het boren was reeds gestuit op grote hoeveelheden puin. De retourstroom kan gemakkelijk in deze puinlagen een weg vinden en de kolom ter plaatse enorm doen uitdijen. Spinmetingen waren vanwege deze puinlagen niet mogelijk en ook monsters konden niet worden gestoken. Tijdens het jetgrouten leek het alsof de hele put stond te koken. Door het aanwezige puin kon de lucht zich door de hele put verspreiden en op verschillende plaatsen naar het oppervlak komen.

Bij het maken van kolom 13 ontsnapte een grote hoeveelheid retourspoeling uit kolom 12, die op dezelfde dag even daarvoor was gemaakt. Dit verschijnsel betekent dat de kolommen met elkaar in verbinding staan. Omdat het bijna gedurende het hele jetgroutproces merkbaar was, zullen de kolommen elkaar met de straal waarschijnlijk snijden. Bij het maken van kolom 14 zijn luchtontsnappingsen uit kolommen 11, 12 en 13 geconstateerd. Dit betrof geen transport van retourspoeling en de kolommen zullen daarom waarschijnlijk niet overlappen.

Indien zich kleilenzen in het zandpakket bevinden worden kleine kleibolletje in de retourspoeling waargenomen. Veenlagen hebben de neiging in klonten te eroderen, deze zijn wat groter dan de kleibolletjes. Omdat veenklonten relatief licht zijn komen deze vaak met de retourspoeling naar het oppervlak. Bij het steken van monsters in de kolom werden de kleikontjes nog weleens gevonden. Deze klontjes kunnen laten een nadelig effect hebben op de druksterkte van het materiaal.

In de proefput bevonden zich op een drietal plaatsen peilbuizen. In deel I, paragraaf 5.2, is beschreven dat de waterspanning ten gevolge van het jetgrouten plaatselijk sterk toeneemt. Dit was duidelijk merkbaar, de peilbuizen stonden zelfs op afstanden van circa 5 m van het jetgroutproces, hevig te

sputen. Indien de snijnozzles de laag waarin de peilbuizen geplaatst waren, gepasseerd hadden was het sputen vrij snel afgelopen.

Bij de fabricage van het massief was het bijzonder goed merkbaar dat de kolommen elkaar goed overlaptten. Indien kolommen op dezelfde dag werden uitgevoerd kwam de retourspoeling bij alle verse kolommen naar boven. Maar als de kolommen minstens een dag oud waren kon dit verschijnsel niet meer worden waargenomen. Tussen de fabricage van de kolommen 23 t/m 27 en 28 t/m 32 bevindt zich een weekend. Na ontgraving is gekeken of dat effect heeft gehad op de aansluiting tussen de kolommen. Dit wordt beschreven in het volgende hoofdstuk en in deel IV.

## **II.4 Metingen/proeven na uitharden kolommen**

### **II.4.1 Diameters kolommen**

#### **II.4.1.1 Algemeen**

Het maken van de verschillende proefkolommen heeft ongeveer twee weken in beslag genomen. Circa een week na de fabricage van de laatste kolom is begonnen met het ontgraven van de proefput. Dit geschiedde in eerste instantie vrij snel, maar nadat de bovenkant van de kolommen in zicht kwam is voorzichtiger gegraven. De bovenlaag was door het groutproces sterk vervuild met uitgeharde retourspoeling. Op de kolomkoppen stonden de boorschachten, waarvan de diameter nabij de kolom vrij aanzienlijk was ( $\pm 50$  cm). Naar boven nam deze schacht in dikte af. Op een diepte van NAP -2,5 m kon duidelijk het begin van de kolom worden gesignaleerd. De plotselinge toename in diameter was een teken dat de bovenkant van de kolom was gevonden. Hierna is het ontgraven van de put zeer langzaam verlopen. De kolommen hadden een kleine onderlinge afstand, zodat de inzet van graafmachines niet overal mogelijk was. Veel graafwerk is dan ook met de hand verricht.

Nadat stukken van de kolommen waren vrijgegraven zijn er verschillende metingen verricht. De diameter en omtrek van de kolom is op verschillende diepten bepaald. Met de omtreksmeting konden de diameters worden gecontroleerd. Indien de vorm sterk afweek van een cilinder is dit genoteerd. Door een landmeetkundig bureau zijn enkele kolommen zeer nauwkeurig ingemeten. Dit betrof de kolommen 12, 13, 14 en 16B. De overgang van het kolomoppervlak naar de ongeroerde grond was zeer duidelijk. Het zand kon eenvoudig van de verharde kolom worden afgespoeld, van een overgangszone was geen sprake.

#### **II.4.1.2 Metingen van kolomdiameters na ontgraving**

Vak 18, de proeflocatie, is onderdeel van het tramtunneltraject. De proefput is ontgraven tot een niveau van de onderkant van de onderste betonvloer. Ter plaatse van de kolommen 1 t/m 3 was dit op een niveau van circa NAP -6,5 m. Aan de andere kant van het vak lag dit peil 2 m lager. Geprobeerd is zoveel mogelijk diameterbepaling te doen. Omdat de kolommen na enkele meters ontgraven eerst zijn gesloopt, voordat verder is ontgraven, en de kolom daarbij nog weleens lager afbrak, is niet altijd op dezelfde diepte een diameterbepaling gedaan. Tabel II.5 geeft de resultaten van de diameterbepaling.

Hoofdstuk II.4: Metingen/proeven na uitharden kolommen

kolomnummer	diameter na ontgraving		kolomnummer	diameter na ontgraving		
	diepte	diameter		diepte	diameter	
	NAP [m]	[m]		NAP [m]	[m]	
1	-2,50	1,81	11	-2,50	2,04	
	-2,85	1,90		-2,85	2,16	
	-3,00	1,85		-3,25	2,16	
	-3,25	2,10		-4,00	2,10	
	-3,75	2,10		-4,20	2,10	
	-4,00	2,15		-4,30	2,10	
	-4,50	2,00		12	-2,77	2,42
-5,75	2,23	-3,00	2,35			
2	-2,50	2,24	-3,48		2,44	
	-2,85	2,26	-3,86		2,36	
	-3,00	2,24	-4,00		2,37	
	-3,25	2,15	-4,50		2,32	
	-3,50	2,40	-4,70		2,26	
	-4,00	2,32	-5,00	2,31		
	-5,00	2,29	-5,60	2,60		
-5,75	2,45	-6,15	2,16			
3	-2,50	2,25	-7,00	2,23		
	-2,85	2,25	-7,25	3,12		
	-3,25	2,25	-7,90	2,70		
	-3,75	2,17	13	-2,70	2,00	
	-4,75	2,15		-3,15	2,21	
	-5,75	2,38		-4,00	2,42	
	4	-2,50		2,10	-4,25	2,31
-2,85		2,10		-5,00	2,20	
-3,00		2,11		-5,80	2,35	
-3,25		2,10		-6,20	2,27	
-4,00		1,91	-6,70	1,94		
-4,30		2,07	-6,80	1,90		
-5,00		1,90	-7,40	2,75		
5	-2,50	2,23	-8,00	2,19		
	-2,85	2,32	14	-2,50	2,26	
	-3,25	2,25		-2,90	2,36	
	-3,50	2,20		-3,25	2,42	
	-4,00	2,15		-3,40	2,25	
	-4,30	2,10		-3,80	2,31	
	-5,25	1,90		-3,90	2,25	
6	-2,50	2,07		-4,12	2,39	
	-3,00	2,15	-5,00	2,08		
	-3,25	2,29	-5,75	2,06		
	-3,60	2,32	-6,30	2,12		
	-3,80	2,35	-6,75	2,10		
	-4,00	2,35	-7,35	2,72		
	-4,40	2,17	-7,80	2,41		
-5,00	2,04	-8,20	2,06			
7	-2,50	1,81	16	-3,50	2,36	
	-3,00	1,94		17A	-3,00	1,75
	-3,25	1,96			-3,50	1,90
	-3,50	1,90			-4,00	1,75
	-4,00	1,80			-6,50	1,50
	-4,50	1,67			-7,00	1,20
	-5,00	1,70			18A	-2,50
8	-2,50	1,85	-3,00			1,90
	-3,00	1,78	-4,00	1,85		
	-3,25	1,80	16B	-2,50		2,30
	-4,00	1,72		-3,00		2,37
	-4,20	1,60		-3,50		2,39
	-4,50	1,65		-4,00		2,42
	-5,00	1,55		-4,50	2,30	
9A	-2,50	1,53		-6,50	2,10	
	-2,85	1,53		-6,75	2,58	
	-3,50	1,53	-7,25	1,90		
	-4,50	1,55	-7,40	2,58		
	-5,00	1,55	-7,50	2,10		
10A	-2,50	1,26	17B	-2,50	1,80	
	-2,85	1,35		-3,00	1,85	
	-3,25	1,31		-3,50	1,90	
	-3,50	1,29		-4,00	1,90	
	-4,00	1,30		-6,50	1,40	
	-4,50	1,40				
-5,50	1,15					

Tabel II.5: werkelijke diameters bepaald na ontgraving.



## II.4.2 Boren en beproeven kernen/monsters

### II.4.2.1 Algemeen

Op grond van resultaten van het jetgroutproces en de diameterbepalingen van de verse kolom en na uitharding, is een aantal kolommen uitgekozen voor het nemen van monsters uit de verharde kolom. Door middel van kernboringen zijn monsters verkregen, die vervolgens door Mos te Rhon zijn beproefd. Verticale kernboringen zijn uitgevoerd op de kolommen 2, 5, 8, 10A, 12, 14, en 17A. Daarnaast is op de overlap van kolommen 24, 25 en 28 en op de overlap van kolommen 19 en 20 een verticale boring verricht. In kolom 20 van het massief is nog een horizontale boring uitgevoerd op een diepte van NAP -6,0 m.

Voor controle van de aansluitingen in het massief zijn nog een tweetal schuine kernboringen verricht. Op de tekening van de proefput in bijlage II.2. zijn deze aangegeven, even als een aantal andere boringen. Zie ook foto's bijlage II.9.

### II.4.2.2 Resultaten beproeven kernen en monsters

De geboorde kernen zijn zorgvuldig op volgorde bewaard en genummerd, zodat eventueel later een verband kan worden gelegd tussen diepte en sterkte van het materiaal. Tijdens het jetgrouten zijn per kolom monsters genomen van de kolom- en retourspoeling. Hiermee zijn cilinders gevuld en deze zijn eveneens naar Mos te Rhon gestuurd voor beproevingen. De cilinders zijn over het algemeen beproefd 28 dagen nadat ze zijn gemaakt. De kernen waren niet altijd op tijd gemaakt om de proeven na 28 dagen uitharding te kunnen doen. Bij de resultaten staat de leeftijd van het monster vermeld.

De materiaaleigenschappen die van het verharde mengsel zijn bepaald zijn: Volumieke massa, druksterkte, slijttreksterkte en elasticiteitsmodulus. De volumieke massa is bepaald conform NEN 5967, de druksterkte conform NEN 5968, de slijttreksterkte volgens NEN 5969 en de elasticiteitsmodulus volgens ISO 6784. De bestekseisen zijn (minimale waarden):

- rekenwaarde druksterkte:  $4,5 \text{ N/mm}^2$
- rekenwaarde treksterkte:  $0,45 \text{ N/mm}^2$
- elasticiteitsmodulus:  $2000 \text{ N/mm}^2$

De onverwerkte resultaten van de beproevingen van de verschillende kernen en cilinders zijn in bijlage II.5. opgenomen. Tevens is een lijst met verklaringen van de monstercode bijgevoegd zodat de oorsprong van het monster kan worden getraceerd. De resultaten van de proeven op de cilinders, gemaakt van de retour- en kolomspoeling vielen tegen. Zij zijn stukken lager dan de waarden gevonden bij de kernen uit dezelfde kolommen. Een mogelijke verklaring is gelegen in het feit dat de kolom onder een grote druk ten gevolge van het eigen gewicht is uitgehard, zodat de dichtheid en de ook de sterkte en stijfheid stukken groter zijn. Gekeken is of de leeftijd van de cilinders een rol speelden, daartoe zijn de cilinders van kolom 16B na 56 dagen getest. De gevonden resultaten zijn in de bijlage II.5. opgenomen. Kolom 16B mag direct worden vergeleken met kolom 14 vanwege dezelfde uitvoeringsparameters en diameterresultaten. Wellicht is het mogelijk in de toekomst de omstandigheden waaronder de monsters van de kolom- en retourspoeling worden bewaard dusdanig aan te passen dat dezelfde omstandigheden worden gecreëerd als bij verharding in de kolom. Nader onderzoek zal dit moeten uitwijzen.

Per genomen monster tijdens het jetgrouten, zijn steeds drie cilinders gemaakt voor het bepalen van de volumieke massa, de druksterkte en de elasticiteitsmodulus, en zes cilinders voor het bepalen van de treksterkte. Geboorde kernen zijn op drie hoogten beproefd, waarbij zes druk- en zes slijtproeven (trek) zijn gedaan. In verband met geringe geschikte kernen zijn van enkele kolommen minder resultaten.

### II.4.2.3 Cementgehalte kernen

Resten van kernen zijn naar een chemisch laboratorium gestuurd voor een analyse van het materiaal. Het cementgehalte van het materiaal is bepaald voor een zevental kernen. De resultaten zijn:

kolomnummer	cementgehalte volgens tabel II.3 in kg/m <sup>3</sup>	cementgehalte volgens chemische analyse in kg/m <sup>3</sup>	toename in %
5	198	461	233
8	409	846	207
10A	194	355	183
12	209	558	267
14	287	511	178
19/20 (overlap)	287*	499	174
20	287*	558	194

Tabel II.6: vergelijking cementgehalte bepaling.

\* uitgaande van parameters kolom 14

De schatting volgens paragraaf II.3.3.2. aan de hand van de diameter lijkt niet te voldoen met de werkelijkheid. Bij navraag bij de uitvoerende instantie bleek dat de analyse waarschijnlijk niet op de juiste basis is uitgevoerd. Het cementgehalte is bepaald op basis van gloeiverlies en oplossend vermogen. Indien organische materialen in het monster zijn opgenomen geeft dit te hoge waarden voor het cementgehalte. Momenteel wordt bekeken hoe groot het effect van dit gegeven is op het bepaalde cementgehalte.

### II.4.3 Maatvoering

#### II.4.3.1 Algemeen

Één van de doelen van het experiment in vak 18 was het vaststellen van de nauwkeurigheid van de maatvoering. Daarvoor zijn onder andere tijdens het uitvoeren van de jetgroutproeven hellingmetingen gedaan van het boorgat. Na ontgraven zijn enkele andere aspecten van de maatvoering nader bestudeerd. De onder- en bovenkant van de kolommen zijn op hoogte ingemeten en het werkelijke middelpunt van de kolom is vergeleken met het theoretische middelpunt. Verder konden de effecten van klei- en veenlagen in de proefput op enkele plaatsen worden waargenomen.

#### II.4.3.2 Plaatsbepaling

De afwijking van het middelpunt van de kolom als gevolg van een plaatsingsnauwkeurigheid van de boorbuis is bepaald door het theoretische middelpunt van de kolom te vergelijken met het werkelijke middelpunt. Hiertoe is aan de bovenzijde van de kolom (op NAP -2,5 m) een tiental punten ingemeten op de omtrek van de kolom. Hiermee is vervolgens het werkelijke middelpunt bepaald. Het theoretische middelpunt was bekend omdat alle kolommen op coördinaten zijn uitgezet. Het verschil tussen deze middelpunten is van een vijftal kolommen berekend.

kolomnummer	afwijking in mm
5	60
10A	20
11	20
14	30
16B	60

Tabel II.7: afwijking t.g.v. plaatsingsfout.

### II.4.3.3 Controle positie onder- en bovenkant kolommen

Tijdens de uitvoering is getracht de kolommen vanaf en tot een bepaalde diepte te maken. Hierbij is gebruik gemaakt van een dieptemeter in de boorstelling. Na uitharding is gecontroleerd of de kolommen ook werkelijk op de goede diepte zijn gemaakt. Dit is gedaan door de bovenkant van de kolommen wat hoogte betreft te bepalen en enkele kolommen tot onderaan uit te graven. Met behulp van de lengte van kernboringen is de onderzijde van andere kolommen berekend. Naast deze controle in het werk zijn de boorstaten, afkomstig uit de computer van de boorstelling, en de uitvoer gemaakt door de schrijvende meters bekeken. Hieruit kan de lengte van de kolom worden vastgesteld.

De uitvoer van de computer en de schrijvende meter gaven aan dat voor alle kolommen voldoende lang de voorgeschreven parameters aangehouden zijn. Hierbij is speciaal gelet op de treksnelheid en de snijdruk. De kolommen zijn dus in ieder geval voldoende lang uitgevoerd. De kernboringen in kolom 2, 5, 8, 10A, 12 en 14 zijn doorgezet tot aan de onderzijde van de kolom. Hierbij werd de onderzijde bereikt op de juiste diepte of iets onder de juiste diepte. Ook het uitgraven van kolommen 9A en 10A leidde tot de conclusie dat het jetgrouten op voldoende diepte is begonnen.

Aan de bovenzijde van de kolommen is waargenomen dat de kolommen aan de rand iets zijn afgerond. Zie ook de foto's. Het vermoeden heerste dat de diameter in de laatste circa 20 cm kleiner zou worden dan de gemiddelde diameter van de kolom. Dit ten gevolge van het uitzakken van de kolom. Voor een viertal kolommen zijn de koppen door middel van hoogtelijnen in kaart gebracht. De diameter van de kolommen was tot minimaal NAP -2,5 m (bovenkant kolom) op volledige grootte. Ook aan de bovenkant was de positie van de kolommen dus in orde.

### II.4.3.4 Diameterterugval bij klei- en veenlagen

Mede met het oog op het nog uit te voeren jetgroutwerk in de Grote Marktstraat is getracht met behulp van de in de proefput (vak 18) gemaakte kolommen een indicatie te geven van de diameterterugval bij klei- en veenlagen.

Hiervoor heeft inspectie plaatsgevonden van de kolommen 12, 13, 14 en 16B op een diepte van NAP -6,0 m tot NAP -8,0 m. Volgens de sonderingen, gemaakt door Tjaden (s6 t/m s8, zie bijlage II.3.), bevinden zich in vak 18 op deze hoogte enkele dunne klei- en veenlagen. Na ontgraving bleken deze lagen zeer plaatselijk voor te komen en een dikte te hebben van maximaal 30 cm.

Bij kolom 16B was de invloed van deze lagen het beste zichtbaar. Een foto in bijlage II.9 geeft een goede indicatie van de terugval. De foto bevat een meetband die een terugval van de kolomstraal aangeeft van 40 cm. Het is belangrijk hierbij op te merken dat de diameter bovenen onder de slechte lagen juist een vergroting kent ten opzichte van de gemiddelde waarde, waardoor het effect groter lijkt.

Bij kolom 16B zijn de volgende diameters bepaald:

- 2,30 m op een diepte van NAP -4,50 m;
- 2,10 m op een diepte van NAP -6,10 m (klei);
- 2,58 m op een diepte van NAP -6,95 m;
- 1,90 m op een diepte van NAP -7,25 m (klei);
- 2,58 m op een diepte van NAP -7,40 m.

De terugval aan de tegenoverliggende zijde bedroeg 25 cm, hetgeen samen overeenkomt met het verschil tussen de grootste en kleinste diameter. Het materiaal in de slechte laag bestond uit vette klei. Een zelfde effect is waargenomen bij kolom 14. Op een diepte van NAP -6,75 m is een diameter van 2,10 m gemeten, vlak daaronder bedroeg de diameter zelfs 2,72 m.

#### II.4.4 Inspectie en slopen massief en kolommen

Zowel het massief als ook de individuele kolommen zijn in fasen gesloopt. Dit maakte het mogelijk de doorsneden van de kolommen en het massief te inspecteren op insluitingen of andersoortige onregelmatigheden. Op enkele plaatsen werden in het massief kleine (max. 1 dm<sup>3</sup>), volledig ingesloten zand of veenresten gevonden. Verder was het massief een groot geheel waar nauwelijk individuele kolommen te onderscheiden waren. Er is geen verschil gesignaleerd tussen aansluitingen van kolommen die op dezelfde dag zijn gemaakt of op verschillende dagen (zie ook deel IV). De kernen die gemaakt zijn dwars door het massief zijn afgebeeld op een foto in bijlage II.9. Zo ook een detail van een overgang tussen twee kolommen. De kernboringen bevestigden dat het massief goed aaneengesloten was.

De individuele kolommen bevatten ook enkele kleine insluitingen. Puinresten konden op sommige plaatsen in de kolommen worden waargenomen. In enkele kolommen bevonden zich meer zandnesten dan gemiddeld. Het betrof de kolommen waarbij, tijdens het uitvoeren van de proeven, in de verse kolom bijzonder veel inspanning is verricht om metingen te kunnen doen en monsters te kunnen steken. Het was toen al duidelijk dat erg veel in de kolom was geroerd.

## II.5 Verwerking gegevens jetgroutproef Den Haag

### II.5.1 Algemeen

Als basis voor de jetgroutproeven diende de Project Werk Instructie (PWI) "Jetgrout proeven", gemaakt door de KFD. Na het uitvoeren van de jetgroutkolommen is een rapportage gemaakt van alle uitvoeringsparameters van de kolommen, de registratiedocumenten en de hellingmetingen. Tijdens de fase van het ontgraven is een beproevingsplan opgesteld waarin alle metingen zijn beschreven na uitgraven van de kolommen. Van de resultaten van deze metingen is een document gemaakt, genaamd "Resultaten jetgroutproeven", waarin hoofdzakelijk gegevens zijn verwerkt van de gekozen kolom 14. Tevens bevat dit document een faalkansberekening van het overlappingsgebied bij een gekozen raster. Deze berekening volgt in paragraaf II.5.4. Het eindrapport over de jetgroutproeven in vak 18, "Evaluatie jetgroutproeven Den Haag", is een bundeling van nieuwe en al eerder gerapporteerde gegevens. Een aantal onderdelen van deze bundel is reeds aan de orde geweest, enkele andere worden in dit hoofdstuk beschreven.

Alle hiervoor genoemde documenten leidde uiteindelijk tot de Project Werk Instructie "Jetgrouten Kalvermarkt". Dit jetgroutwerk is uitgevoerd in de maanden juni, juli en augustus 1996. Tijdens dit werk zijn nog vele diameterbepalingen gedaan en is een bescheiden proef uitgevoerd in de veenlaag op NAP -16,0 m. De voorlopig laatste jetgroutproef betrof een proef op de overgang tussen diepwand en groutboog. Kernen zijn geboord op deze overgang en de schuifweerstand tussen de delen is bepaald. Ter plaatse van het Spui is daarvoor een aantal kolommen tegen een diepwandpaneel gemaakt.

### II.5.2 Vergelijking diameterbepaling met spin en werkelijke diameter

In II.3.1.2 zijn waarden gegeven van de diameterbepaling met behulp van het zogenaamde spinapparaat. Na uitharding van de kolommen en ontgraving van de put zijn vervolgens de werkelijke diameters van de kolommen gemeten. De kolommen hebben een grillig karakter waardoor de diameter redelijk wisselvallig is. Op een diepte waarbij zowel een spinmeting is gedaan als ook de werkelijke diameters is gemeten, kan een vergelijking worden gemaakt tussen de twee waarden. In tabel II.8. is deze vergelijking weergegeven. Geconcludeerd moet worden dat de spinmeting een juiste waarde geeft voor de diameter op de gemeten hoogte. De diameter van de kolom na uitgraving was gelijk aan de gemeten waarde met de spin of enkele centimeters groter.

### II.5.3 Verwerking materiaaleigenschappen

In paragraaf II.4.2.2 zijn de resultaten gegeven van alle beproevingen van monsters, genomen tijdens het jetgrouten, en op kernen geboord in de uitgeharte kolommen. Het betrof de materiaaleigenschappen volumieke massa, druksterkte, treksterkte en elasticiteitsmodulus. Voor de volumieke massa zijn in het bestek geen eisen opgenomen. Voor de andere drie eigenschappen gelden de al eerder genoemde eisen:

- rekenwaarde van de druksterkte van  $4,5 \text{ N/mm}^2$ ;
- rekenwaarde van de treksterkte van  $0,45 \text{ N/mm}^2$ ;
- elasticiteitsmodulus van  $2000 \text{ N/mm}^2$ .

Bij de verwerking van de resultaten van druk- en splijtproeven is uitgegaan van een normale verdeling met een gemiddelde waarde  $\mu$  en een standaardafwijking  $\sigma$ . De rekenwaarde van de druksterkte kan berekend worden met behulp van de materiaalfactor (1,2) en factoren voor langeduursterkte (0,92) en éénassige spanningstoestand (0,85), volgens:

$$\text{rekenwaarde druksterkte} = 0,92 \times 0,85 \times (\mu - 1,53\sigma) / 1,2$$

Hetgeen is in overeenstemming met de rekenregels uit de betontechnologie.  $\mu-1,53\sigma$  geeft de representatieve waarde van de druksterkte.

Voor de treksterkte bedraagt de materiaalfactor 1,4 en de factor voor éénassige spanningstoestand is niet van toepassing.

kolomnummer	diepte tov NAP [m]	meting diameter met spin in [m]	meting diameter na ontgraving in [m]	verschil [cm]
1	-3,00	1,80	1,85	+5
2	-3,00	2,22	2,24	+2
2	-5,00	2,29	2,29	+0
3	-3,75	2,17	2,17	+0
3	-4,75	2,14	2,15	+1
4	-3,00	2,10	2,11	+1
4	-4,00	1,86	1,91	+5
5	-3,25	2,25	2,25	+0
5	-5,25	1,81	1,90	+9
6	-3,00	2,13	2,15	+2
6	-4,00	2,34	2,35	+1
7	-3,00	1,90	1,94	+4
7	-4,00	1,76	1,80	+4
8	-3,00	1,78	1,78	+0
9A	-3,50	1,50	1,53	+3
9A	-4,50	1,54	1,55	+1
10A	-2,75	1,30	1,35	+5
10A	-3,50	1,25	1,29	+4
10A	-5,50	1,13	1,15	+2
12	-4,00	2,36	2,37	+1
12	-5,00	2,29	2,31	+2
12	-7,00	2,22	2,23	+1
13	-4,00	2,39	2,42	+3
13	-5,00	2,18	2,20	+2
14	-5,00	2,08	2,10	+2
16B	-3,00	2,35	2,37	+2
16B	-4,00	2,37	2,42	+5

Tabel II.8: vergelijking werkelijke diameter met spinmeting.

De waarden van sterkte en stijfheid lagen van ééndezelfde kolom bij de kernen veel hoger dan bij de monsters in de cilinders. Aangenomen mag worden dat de kernen het juiste beeld geven van de materiaalparameters van het verharde groutmateriaal en dat de gevonden waarden voor stijfheid en sterkte van de cilinders niet zou worden meegenomen in de parameterkeuze. In deel III van dit rapport zal aan de cilinders nog enige aandacht worden besteed. Hier zijn de resultaten van de beproevingen op de kernen van kolommen 5, 12, 14, 19/20 (overlap), 24/25/28 (overlap) en kolom 20 (horizontale boring), statistisch verwerkt. In bijlage II.6. zijn de verschillende berekeningen opgenomen. Hier volgt een overzicht:

kolom	rekenwaarde druksterkte in N/mm <sup>2</sup>	rekenwaarde treksterkte in N/mm <sup>2</sup>	gemiddelde E-modulus in N/mm <sup>2</sup>	stand.afwijk. E-modulus in N/mm <sup>2</sup>	gemiddelde vol. massa in kg/m <sup>3</sup>	stand.afwijk. vol. massa in kg/m <sup>3</sup>
gevraagd	4,50	0,45	2000	-	-	-
5 (3 fasen)	3,59	0,313	1481	268	2040	12
12 (2 fasen)	2,20	0,28	1460	233	2000	55
14 (2 fasen)	6,50	0,63	2484	348	2079	38
19/20 (massief)	5,40	0,97	3104	687	2021	40
24/25/28 (massief)	4,20	0,65	2332	502	2057	45
20 (horizontaal)	4,55	0,69	2655	581	2020	15

Tabel II.9: samenvatting verwerkte gegevens resultaten beproeven kernen.

#### II.5.4 Kansberekening falen overlap in verband met rasterkeuze

Op grond van de bestekseisen zijn de parameters van kolom 14 gekozen voor het uitvoeren van het jetgroutwerk in de Kalvermarkt. De individuele jetgroutkolommen vormen samen een horizontale waterdichting in de vorm van een boog. In hoofdstuk II.6. zal hier nader op worden ingegaan. De afstanden tussen de kolommen wordt bepaald door de kans dat de kolommen niet volledig aansluiten waardoor de jetgroutboog niet voldoende waterdicht is. Het falen van dit overlappingsgebied van de kolommen kan veroorzaakt worden door enerzijds het tegenvallen van de diameter van de kolom, of het niet juist plaatsen van de kolom.

Aan de hand van de metingen die bij de jetgroutproeven zijn uitgevoerd is een beeld gekregen van de nauwkeurigheid van de maatvoering en de regelmatigheid van het resultaat. Hiermee is een onderbouwing gemaakt voor een rasterkeuze. De kans dat de overlap tussen drie kolommen, de meest kritische overlap, faalt, is door middel van een berekening bepaald. In bijlage II.7. is deze kansberekening opgenomen. Afwijkingen die falen tot gevolg kunnen hebben zijn afwijkingen van de plaatsbepaling, de helling en de diameter.

De kansberekening is gemaakt in het kader van het tramtunnelproject en vormt zodanig geen onderdeel van dit verslag. Omdat het een onderdeel vormde voor de onderbouwing van de rasterkeuze is de berekening in de bijlage gegeven. Het opstellen van een dergelijke berekening is niet eenduidig en eenvoudig. Met name een aantal positieve effecten op de kans op falen van de overlap kon niet worden gekwantificeerd en in de berekening worden meegenomen.

De rasterkeuze is bepaald op een diameter van 2,30, waarvan conform het bestek  $2 \times 0,10$  m standaard moet worden afgetrokken. Bij een raster waarbij de kolommen in raayen liggen en verspringend verlopen is de afstand tussen de kolommen in een raay  $\frac{1}{2} \times \sqrt{3} \times \text{diameter} = \frac{1}{2} \times \sqrt{3} \times 2,10 = 1,82$  m. De kans dat een overlapping van de jetgroutkolommen faalt is bepaald op  $9 \times 10^{-12}$ . Uitgaande van circa 2000 overlappingsen is de kans dat ergens in het werk een overlap faalt  $2000 \times 9 \times 10^{-12} = 2 \times 10^{-8}$ . Hierbij zijn enkele gunstige invloeden, die merkbaar waren tijdens het maken van het massief in de proefput, niet gekwantificeerd en meegenomen. Voor de exacte berekening wordt verwezen naar bijlage II.7.

## II.6 Uitvoering jetgroutboog Kalvermarkt

### II.6.1 Uitvoeringsparameters

Kolom 14 van de jetgroutproeven heeft als modelkolom gefungeerd. De parameters van deze kolom vormden de basis voor de uitvoering van de jetgroutkolommen in de Kalvermarkt. Hoewel de kansberekening, behandeld paragraaf II.5.4, heeft geresulteerd in een zeer geringe kans van  $2 \times 10^{-8}$  op het falen van het overlappingsgebied tussen drie kolommen, is toch besloten extra veiligheid in te bouwen. Dit is gedaan door over een hoogte van circa 10 cm de treksnelheid te verlagen. Overigens is voor de uitvoering gekozen voor slechts één nozzle. De snijenergie wordt hiermee geconcentreerd op één straal, wat de diameter ten goede komt. Als compensatie moet wel sneller worden gedraaid, wat een negatief effect heeft op de diameter.

In de proef is geen kolom direct geschikt geacht voor de kleine kolommen in de kassen van de damwanden. Maar aan de hand van de resultaten van de gemaakte kleine kolommen kon wel een parameterkeuze worden gedaan. Daarbij is gelet op de juiste vulling van de kolom, zodat de sterkte voldoende zal zijn en op het energieniveau van de straal, bepalend voor de diameter. In het werk zijn beide gegevens gecontroleerd. De volgende parameters zijn gekozen voor de veldkolom (groot) en kaskolom (klein):

### II.6.2 Rasterkeuze

Bij de uitvoeringsparameters zijn enkele wijzigingen doorgevoerd ten opzichte van de parameters van de modelkolom. Met betrekking tot het raster is het eerder beschreven voorstel overgenomen. Het raster is gebaseerd op een nominale kolomdiameter van 2,10 m. Met deze nominale diameter is een raster gemaakt voor de jetgroutboog ter plaatse van de Kalvermarkt. In bijlage II.8. is dit raster gegeven. Om de veiligheid te vergroten is nog vanuit de directie nog overwogen het raster te verkleinen. Maar na advies van de KFD is hier van afgezien. Omdat de kolomdiameters in alle waarschijnlijkheid aanzienlijk groter zijn geworden, ontstaat bij het verkleinen van het raster de kans op schaduwplekken; Het is niet ondenkbaar dat een boring in de invloedssfeer van een reeds gemaakte, naastliggende kolom ligt. Bij een reeds verharde, naastliggende kolom, betekent dit dat de jetstraal niet tot ontwikkeling kan komen en er dus een gat in het massief kan ontstaan.

In doorsnede ziet de boog eruit zoals te zien is in bijlage II.8. De individuele kolommen verspringen zodat de boog met een dikte van minimaal 1,20 m overal aanwezig zal zijn. De tweede doorsnede in de bijlage is een raay verder genomen dan de eerste. De kolommen zijn versprongen. Omdat de jetgroutboog over het tracé in hoogte verloopt is geen enkele uitgevoerde kolom hetzelfde. Veel aandacht is dan ook besteed aan de kwaliteitsregistratie, zodat met zekerheid kan worden gezegd dat iedere kolom op de juiste wijze en op de juiste diepte is gemaakt.

### II.6.3 Metingen/proeven tijdens en na uitvoering jetgroutboog

Ook tijdens de uitvoering zijn nog tal van metingen aan de jetgroutkolommen uitgevoerd. Vaak meerdere malen per dag is een diameterbepaling gedaan met behulp van de spin. Deze metingen gaven vaak grote waarden voor de diameter, die soms de 2,62 m haalde. Alle diameters waren groter dan 2,30 m. Het uitvoeren van deze metingen verliep vaak nog moeizamer dan bij de jetgroutproef in vak 18. Dit was te wijten aan gebruik van nog zeer verse cement, zodat het mengsel sneller opstijfd en aan de grotere diepte waarop de metingen moesten geschieden. Naast de diameterbepalingen zijn nog enkele hellingmetingen gedaan. De resultaten vormden geen aanleiding het raster of de parameters te veranderen. De diameterbepalingen hinderen het productieproces en zijn in kleine mate succesvol. Dit zijn wellicht de belangrijkste redenen dat ook in het buitenland diameterbepalingen in principe alleen op proefkolommen worden uitgevoerd.



In een tiental kolommen is na uitharding een kernboring gemaakt. Hiertoe waren de kolommen een halve meter langer uitgevoerd, zodat de boog niet zou lijden onder de gemaakte gaten. De resultaten waren in overeenstemming met de verwachting. De rekenwaarde van de druksterkte bedraagt  $5,1 \text{ N/mm}^2$  en de elasticiteitsmodulus  $2743 \text{ N/mm}^2$ , hetgeen meer is dan de bestekseisen.

Als aanvulling op de experimenten in vak 18 zijn vijf kolommen van de jetgroutboog doorgezet tot in de veenlaag rond NAP -16,0 m. De treksnelheid in de veenlaag is verlaagd. De spinmetingen gaven waarden voor de diameter groter dan 2,30 m. Ook zijn vijf kernboringen op de kolommen in de veenlaag uitgevoerd. De sterkte en stijfheid van het materiaal was ook nu ruimschoots voldoende. Wel zijn bij het boren van de kernen enkele veeninsluitingen over een hoogte van circa 25 cm gevonden. Dit heeft geen effect op de waterdoorlatendheid van de boog.

---

**Deel III:**  
**Uitwerking jetgroutproef Den Haag,  
verbanden en relaties**

---

## Samenvatting deel III

De resultaten van de jetgroutproef, beschreven in deel II, zijn in dit deel geanalyseerd en getracht is kwalitatief en kwantitatief verbanden en/of relaties af te leiden tussen uitvoeringsparameters en jetgroutresultaten. Gekeken is naar de volumieke massa van de verschillende monsters voor en na uitharding, de sterkte en de stijfheid van het groutmateriaal en de diameter van de gemaakte kolommen.

### Volumieke massa monsters

Tijdens het jetgrouten treedt een aanzienlijke hoeveelheid van het aanwezige grondwater en het door de injectie ingebrachte water uit het kolommengsel (circa 10% tot 30% van het totale volume aan water). Hierdoor stijgt de volumieke massa van de spoeling, zowel van de retour- als de kolomspoeling. Het exacte percentage wateruittreding is moeilijk te bepalen en zeer gevoelig voor kleine wijzigingen in invoerparameters van de berekening. Een regelmatigheid kon niet worden gevonden.

De volumieke massa van de retourspoeling per systeem is niet of nauwelijks afhankelijk van de diepte of invoerparameters. Van de kleine kleilenzen op een diepte van NAP -8,75 is in geval van de retourspoeling niets gemerkt. De volumieke massa van de kolomspoeling daarentegen varieert duidelijk over de diepte, waarbij de volumieke massa op grotere diepte hoger ligt. Dit duidt op het uitzakken van zwaardere deeltjes in de kolomvloeistof waardoor de lichtere deeltjes bovenin de kolom terechtkomen. Daarnaast zal het ongebonden water onderin de kolom sneller uitfilteren dan bovenin als gevolg van een grotere hydrostatische druk.

Als gevolg van bleeding, het uitzakken van zwaardere deeltjes uit de vloeistof en de wateruittreding voor het uitharden, neemt de volumieke massa van het kolommengsel toe. Dit is eveneens waargenomen bij de genomen retour- en kolommonsters. De toename in volumieke massa is bij het 3 fasen systeem groter dan bij het 2 fasen systeem. De volumieke massa van de kolomspoeling neemt verhoudingsgewijs meer toe dan de volumieke massa van de retourspoeling. Beide verschillen zijn te verklaren met een grotere hoeveelheid ongebonden water in geval van het 3 fasen systeem en de kolomspoeling.

Het geringe verschil in volumieke massa van de uitgeharde retour- en kolomspoeling ten opzichte van de iets zwaardere kernen, geboord uit de kolommen, wordt veroorzaakt door het verschil in druk waaronder de monsters zijn verhard. Hoewel de kolomspoeling in verse toestand op grotere diepte zwaarder is, blijkt de volumieke massa van de uitgeharde kernen diepte onafhankelijk te zijn. In eerste instantie zal onderin de kolom het vrije water sneller uit de kolom treden als bovenin. Na verloop van tijd echter is bovenin ongeveer net zo veel water uitgetreden als onderin. De volumieke massa zal uiteindelijk over de hoogte niet veel meer verschillen. Overigens is tijdens het ontgraven bepaald dat de totale kolom niet is verkort, dit ten gevolge van waarschijnlijk voldoende aanvoer van spoeling uit het boorgat.

Nader onderzocht kan worden of het mogelijk is de monsters van retour- en kolomspoeling dusdanig te bewaren dat dezelfde verschijnselen optreden als in de kolom. Dit zodat de eigenschappen van de monsters niet meer afwijken van de eigenschappen van het verharde mengsel in de kolom.

De toename van de volumieke massa van het mengsel is één van de verklaringen voor de dikke stijve spoeling die problemen opleverden bij het uitvoeren van spinmetingen. Een andere oorzaak betreft de reactie van het cement. Onder normale omstandigheden zal het enige uren duren voordat het groutmateriaal enige stijfheid krijgt. Maar bij zeer grote en cementrijke kolommen, zoals in Den Haag, wordt de reactiesnelheid sterk vergroot vanwege de temperatuurstoename van het grout.

**Sterkte en stijfheid grout**

De sterkte van de uitgeharde monsters komt niet overéén met de sterkte van de kernen. Vanwege het geringe aantal cilinders per genomen monster, is de gemiddelde druksterkte gevoelig voor kleine onregelmatigheden in de cilinders. De druksterkte van de kernen is met name bij cementrijke kolommen veel hoger dan de druksterkte van de spoeling in de cilinders. De voornaamste redenen hiervan zijn hoogst waarschijnlijk de verhardingsomstandigheden zoals uitfiltering van het water onder de hydraulische druk. Voor een goede indicatie van de druksterkte wordt dan ook het boren en beproeven van kernen aangeraden.

De inhomogeniteit van het kolommengsel veroorzaakt een grote spreiding in sterkte, waardoor de uiteindelijke rekenwaarde gemiddeld slechts 46% bedraagt van de gemiddelde druksterkte. De kleilaagjes in het geïnjecteerde zandpakket zijn te dun om zichtbare invloed te hebben op het resultaat van sterkte en stijfheid van het kolommateriaal. De druksterkte is niet afhankelijk van de diepte maar wordt minder naar de buitenkant van de kolom. Dit waarschijnlijk als een gevolg van minder cement en een slechtere menging. De sterkte en stijfheid zijn sterk afhankelijk van de volumieke massa en de water/cement-factor. De sterkte en stijfheid nemen toe bij afnemende water/cement-factor, toenemend cementgehalte en toenemende volumieke massa.

De gemiddelde treksterkte, verkregen via een slijtproef, heeft een waarde tussen 1/5 en 1/7 van de druksterkte. Deze proef geeft over het algemeen een iets te hoge waarde voor de treksterkte. Indien de verhouding tussen trek- en druksterkte van beton wordt aangehouden, dat wil zeggen 1:10, wordt voor de groutboog in Den Haag ruimschoots voldaan aan de sterkte-eis.

**Diameter jetgroutkolom**

De diameter van de kolom kan niet worden bepaald op basis van de volumieke massa van de retourspoeling. De gevoeligheid van de uitkomst van de berekening voor wijzigingen in de onnauwkeurige invoerparameters is te groot.

De snijstraal bepaald bijna volledig de diameter van de kolom. Met behulp van de formules voor de hydraulische en kinetische energie per meter kolom kunnen waarden worden bepaald voor de energieniveaus waarmee een kolom wordt gemaakt. De hydraulische energie per meter kolom is niet geheel juist bepaald, omdat in geval van de jetgroutproef in Den Haag, de snijdruk aan de pomp alleen bekend was. Het drukverlies in leidingen en nozzles dat gemiddeld circa 27,5% van de pompdruk bedraagt zal in mindering moeten worden gebracht. Indien de drukken en debieten bij de boorstelling worden geregistreerd kan op dezelfde wijze als met de kinetische energie, ook met de hydraulische energie per meter kolom een goede vergelijking van jetgroutprestaties worden gemaakt.

Als de beide energie-uitdrukkingen worden uitgezet tegen de behaalde diameter, ontstaat een hyperboolvormige curve. De ligging van de curve wordt sterk bepaald door de grondeigenschappen en de het gebruikte jetgroutsysteem. Proefondervindelijk kan de curve per locatie worden vastgesteld. Uiteraard is dit een kostbare aangelegenheid. Toch geven de energie-uitdrukkingen goede mogelijkheden verschillend opgebouwde snijstralen met elkaar te vergelijken. Indien niet de energie maar de impuls van de snijstraal wordt bepaald en uitgezet tegen de diameter, ontstaat eenzelfde beeld.

## III.1 Inleiding

In het vorige deel van dit verslag is de jetgroutproef, uitgevoerd in het kader van de bouw van de Souterrain in Den Haag, beschreven en zijn de verkregen data gepresenteerd. Tijdens het uitvoeren van de jetgroutkolommen en het gemaakte massief zijn diameterbepalingen gedaan en zijn verse monsters aan de kolom- en retourspoeling onttrokken. Na verharding is de put ontgraven en zijn de kolommen bestudeerd. Van enkele kolommen zijn door middel van kernboringen monsters verkregen van het verharde kolommengsel.

In dit deel zal geprobeerd worden de verschillende resultaten van de metingen te verklaren en verbanden en relaties tussen de diverse grootheden af te leiden. Tijdens de jetgroutproef zijn bijzonder veel metingen gedaan. Helaas zijn de metingen niet altijd voldoende geweest om bepaalde verbanden kwantitatief vast te kunnen stellen. Gezien de veelheid aan verschijnselen die optreden tijdens en na het jetgroutproces, kunnen bepaalde resultaten niet altijd goed verklaard worden. Het zeer grove en turbulente proces van onder hoge druk injecteren levert een sterk inhomogeen resultaat en bemoeilijkt daarmee het vinden van een eenduidige verklaring. Toch zijn enkele interessante bevindingen gedaan en kunnen in dit deel voor een aantal metingen goede verklaringen worden gegeven.

In deel I van dit afstudeerverslag zijn in hoofdstuk 5 enkele methoden aan de orde geweest met betrekking tot het rekenen aan jetgrouten. In de komende hoofdstukken zal regelmatig naar onderdelen van dit deel worden verwezen. De analyse van de resultaten van de jetgroutproef richt zich met name op de volumieke massa van de (verharde) retour- en kolomspoeling, de sterkte en stijfheid van het verharde groutmateriaal en de diameter van de kolommen. De doorlatendheid van jetgroutmassieven worden zoals eerder aangegeven voornamelijk bepaald door de aansluiting van de kolommen, die afhankelijk is van de onderlinge afstand en diameter van de jetgroutkolommen. Met betrekking tot de doorlatendheid van het groutmateriaal wordt hier opgemerkt dat voor een kern uit het massief van de proef een doorlatendheid in de orde van  $10^{-11}$  m/s is bepaald. Dit is meer dan voldoende. De doorlatendheid van het materiaal zelf komt dan ook verder niet aan de orde.

Hoofdstuk III.2 betreft de analyse van de volumieke massa van de verse en uitgeharde spoelingen en de kernen. In hoofdstuk III.3 staan de sterkte en stijfheid centraal en in hoofdstuk III.4 vormt de diameter van de kolommen onderwerp van studie. Ieder hoofdstuk wordt afgesloten met een resumé van de in dat hoofdstuk gedane bevindingen. Hoofdstuk III.5 tenslotte bevat de eindconclusie van de jetgroutproef en de analyse van de proefresultaten.

**Voor de leesbaarheid van dit verslag is besloten alle grafieken in een losse bijlage (III) te plaatsen. Deze bijlage heeft dezelfde indeling als dit verslag en verwijzingen naar grafieken zijn in de tekst opgenomen. De lezer wordt aangeraden beide documenten naast elkaar te gebruiken.**

## III.2 Volumieke massa retour/kolom/kern

### III.2.1 Inleiding

Tijdens de uitvoering van de jetgroutproeven is de volumieke massa van de retour- en kolomspoeling bepaald. De waarde van de volumieke massa wordt vaak als indicatie gebruikt voor de mate van vervanging van de oorspronkelijke aanwezige grondmassa. Verder wordt de volumieke massa weleens gebruikt als indicatie van de druksterkte. Hoe zwaarder een monster desto groter is de sterkte (zie ook hoofdstuk III.3). Dit is uiteraard wel afhankelijk van de hoeveelheid cement in het monster. De uitkomende retourspoeling en de gestoken kolommonsters kunnen worden bestudeerd op kleur en geur. Uit deze eigenschappen kan kwalitatief een beeld verkregen worden van de hoeveelheid cement in de kolom. Hiervoor is wel de nodige ervaring vereist.

Bij de proeven in Den Haag is getracht naast het steken van monsters uit de verse kolom ook diameterbepaling met behulp van het spinapparaat te doen. Een probleem hierbij vormde de zeer snel opgestijfde of verdichte kolomspoeling. Hierdoor was het in veel gevallen niet mogelijk metingen te verrichten op grote diepte. In dit hoofdstuk worden de volumieke massa's van de kolom- en retourspoeling en de kernen met elkaar vergeleken. Doel daarbij is te bepalen welke verschijnselen in de verse kolom optreden die leiden tot de dichte/stijve massa en een beoordeling te maken van de relevantie van bepaalde metingen.

Achtereenvolgens komen in dit hoofdstuk aan de orde: de waarden van retour- en kolomspoeling (paragraaf III.2.2), de vergelijking tussen retour- en kolomspoeling (paragraaf III.2.3), de retour- en kolomspoeling over de diepte (paragraaf III.2.4), de vergelijking tussen verse en uitgeharde monsters (paragraaf III.2.5), de vergelijking tussen de retour- en kolomspoeling en de kernen (paragraaf III.2.6) en de kernen ten opzichte van de diepte (paragraaf III.2.7). Dit alles heeft betrekking op de volumieke massa van de verschillende monsters. Bij de kolom- en retourspoeling moet onderscheid worden gemaakt tussen de volumieke massa zoals die is bepaald van het verse mengsel en de volumieke massa van de uitgeharde cilinders na 28 dagen.

### III.2.2 Waarden volumieke massa retour- en kolomspoeling

Indien tabel II.2 (uit het vorige deel) nader wordt bekeken is duidelijk zichtbaar dat de volumieke massa's van de retourspoeling per systeem niet veel fluctueren. De gemiddelde waarde van de volumieke massa van alle genomen retourspoelingen bij de 3 fasen kolommen bedraagt  $1,86 \text{ ton/m}^3$ , met een standaard afwijking van  $0,029 \text{ ton/m}^3$ . Voor de 2 fasen kolommen geldt een gemiddelde waarde van  $1,96 \text{ ton/m}^3$  en een standaard afwijking van  $0,023 \text{ ton/m}^3$ . Dit terwijl binnen de systemen gezien de verschillen in sterkte van het kolommateriaal toch grote variatie in samenstelling aanwezig is. De volumieke massa van alle kolomspoelingen heeft een grotere variatie, het gemiddelde bij het 3 fasen systeem ligt op  $1,77 \text{ ton/m}^3$ , met een standaard afwijking van  $0,075 \text{ ton/m}^3$ . Het 2 fasen systeem heeft een gemiddelde van  $1,85 \text{ ton/m}^3$  en een standaard afwijking van eveneens  $0,075 \text{ ton/m}^3$ . De retourspoeling is dus veel homogener dan het kolommengsel. Overigens mogen de gemiddelde waarden van retour- en kolomspoeling niet worden vergeleken, omdat de hoogte waarop de monsters genomen zijn sterk verschilt.

Tijdens het jetgrouten wordt een relatief lichte groutspoeling ( $1,49\text{-}1,79 \text{ ton/m}^3$ ) bij een zwaarder grondmengsel (circa  $2,0 \text{ ton/m}^3$ ) gevoegd en vermengd. De mengverhouding kan worden bepaald op grond van de diameter van de kolom en het geïnjecteerd volume. De hoge waarde van de volumieke massa van de retourspoeling (bijvoorbeeld  $1,96 \text{ ton/m}^3$  in geval van 2 fasen) suggereert een mengverhouding waarbij het volume van de erodeerde grond vele malen groter is dan het geïnjecteerd volume. Een korte berekening leert dat de mengverhouding anders moet zijn. Een verklaring wordt gevonden in wateruitwisseling met het omringende grondmassief gedurende het groutproces, wat leidt tot een verandering in dichtheid/volumieke massa van het mengsel. In paragraaf I.5.2 is beschreven

dat de waterspanningen tijdens het grouten plaatselijk sterk toenemen. Dit drukverschil leidt tot een grondwaterstroming van de kolom af. Omdat dit verschil ook in de groutkolom aanwezig is zal de spoeling ook de neiging hebben in het grondmassief door te dringen. Bij het ontbreken van grondwater zal dit proces nog sterker merkbaar zijn. De cement- en zanddeeltjes worden tegen gehouden en het niet gebonden water zal wel in het massief kunnen doordringen. Een waterverlies in de spoeling en een toename van de volumieke massa zijn het gevolg.

Met behulp van de bepaalde diameters is getracht een percentage te bepalen van het water dat gedurende het groutproces ten gevolge van het waterspanningsverschil uittreedt. Er is gebruik gemaakt van de volumieke massa van de retourspoeling, omdat deze tijdens het jetgrouten is bepaald. Na het jetgrouten treden weer andere verschijnselen op die de kolomspoeling hebben beïnvloed. De diameters van de kolommen zijn niet allemaal op de diepte van de retourspoeling bekend, zodat een enkele keer met een schatting van deze diameter is gewerkt. Als voorbeeld voor de berekening is kolom 14 genomen. Als eerste wordt de exacte samenstelling van de aanwezige grond op circa NAP - 10,0 m bepaald.

Volgens de dichtstbijzijnde boring GB-07 (bijlage II.3) is de volumieke massa van het aanwezige zand  $19,5 \text{ kN/m}^3$  ( $1,95 \text{ ton/m}^3$ ). De verzadigingsgraad van het monster bedroeg 91,9 % zodat voor de volledige verzadigde grond geldt: volumieke massa  $1,99 \text{ ton/m}^3$ . Het poriëngehalte bedraagt 38,1 %.

**Gegevens:**

1  $\text{m}^3$  zand bevat:           → 381 ltr water = 381 kg  
   → 619 ltr zand = 1610 kg

**Kolom 14:**

- diameter D op NAP -10,0 m : 2,25 m
- vol. massa ( $\gamma$ ) retour : 1,97  $\text{ton/m}^3$
- treksnelheid  $L_s$  : 17 cm/min
- snijdebiet (Q) : 300 ltr/min
- w.c.f. : 0,7
- vol. massa ( $\gamma$ ) grout : 1,637  $\text{ton/m}^3$
- cementgehalte grout : 963  $\text{kg/m}^3$
- vol. massa ( $\gamma$ ) cement : 2,9  $\text{ton/m}^3$

**Berekening percentage wateruittreiding:**

- inhoud per meter kolom :  $\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 = 3,98 \text{ m}^3$
- hoeveelheid zand per meter kolom :  $3,98 \text{ m}^3 \times 61,9 \% = 2,46 \text{ m}^3 = 6399 \text{ kg}$
- hoeveelheid water per meter kolom :  $3,98 \text{ m}^3 \times 38,1 \% = 1,52 \text{ m}^3 = 1516 \text{ kg}$
- hoeveelheid grout per meter kolom :  $Q/L_s = 300/0,17 = 1765 \text{ ltr}$
- hoeveelheid cement in 1765 ltr grout :  $1,765 \text{ m}^3 \times 963 \text{ kg} = 1700 \text{ kg} (= 586 \text{ ltr})$
- hoeveelheid water in 1765 ltr grout :  $1,765 \text{ m}^3 \times 674 \text{ kg} = 1189 \text{ kg} (= 1189 \text{ ltr})$

Nu wordt de volumieke massa van de retourspoeling bepaald door de totale massa te delen door het totale volume, waarbij de hoeveelheid achtergebleven water de onbekende is. De gebruikte lucht tijdens het jetgrouten wordt niet meegenomen in de berekening.

$$\gamma_{\text{retour}} = \frac{6399 + 1700 + M_w}{2,46 + 0,586 + \frac{M_w}{1000}} = 1970 \text{ kg/m}^3$$

$M_w$ , de massa van het achtergebleven water, bedraagt 2160 kg. Ten opzichte van de totale hoeveelheid water is dit:

$\frac{2160}{1516+1189} \cdot 100\% = 79,8\%$  , de uittreding van water bedraagt dus 20,2 volume procenten.

Dezelfde berekening is gemaakt voor kolom 12, 11, 7, 4 en 1. De resultaten zijn opgenomen in onderstaande tabel. Voor het 3 fasen systeem is eveneens de volumieke massa van de retourspoeling gebruikt. Bij dit systeem is de totale hoeveelheid water bepaald door de snijstraal, de vulstraal en het poriënwater. Binnen de systemen kunnen de resultaten worden vergeleken.

kolomnummer	diameter op NAP -10,0 m in m	volumieke massa retour in ton/m <sup>3</sup>	uittreding in vol. %
14 (2 fasen)	2,25	1,97	20,2 (basis)
14 (2 fasen)	2,30 (+2,2%)	1,97	19,2 (-5%)
14 (2 fasen)	2,25	1,95 (-1,0%)	16,1 (-20%)
12 (2 fasen)	2,25	1,96	26,3
11 (2 fasen)	2,10	1,94	13,0
7 (3 fasen plus)	1,75	1,94	21,3
4 (3 fasen)	1,82	1,90	30,0
1 (3 fasen)	1,75	1,81	20,0

Tabel III.1: resultaten berekening vol.procenten wateruittreding tijdens jetproces.

De resultaten in tabel III.1 geven weinig mogelijkheden tot het afleiden van een verband tussen het uittreedvolume en andere grootheden. Getracht is het uittreedvolume uit te drukken ten opzichte van het cementdeel, het volume van de kolom, de omtrek van de kolom en de hoeveelheid vaste stof. Er is geen regelmatigheid ontdekt. In de tabel zijn eveneens de resultaten vermeld (kolom 14) van een gevoeligheidsanalyse van de gekozen invoerparameters van de berekening. De gevoeligheid van de uitkomst voor veranderingen in diameter en volumieke massa van de retourstroom blijkt zeer groot. Daar enkele diameters geschat zijn op basis van extrapolatie moet een geringe waarde worden gehecht aan de procentuele uittreding. Wel is duidelijk dat de uittreding globaal 10% tot 30% van het watervolume bedraagt, een aanzienlijke hoeveelheid waarmee zeker rekening moet worden gehouden. Ook indien het mogelijk is nauwkeuriger en meer metingen uit te voeren zal het bijzonder moeilijk zijn de juiste waarden voor de uittreding te bepalen. De uittreding zal in de praktijk eveneens gevoelig zijn voor de volumieke massa en soort van de aanwezige grond. In zandgrond zal de uittreding groter zijn dan in kleigronden. Bij jetgrouten in zuivere kleigrond, mag theoretisch gezien helemaal geen uittreding worden verwacht.

### III.2.3 Vergelijking volumieke massa kolom- en retourspoeling.

In tabel II.2 zijn de waarden van de volumieke massa van de kolom- en retourspoeling gegeven zoals die zijn gemeten tijdens de proef in Den Haag. De retourmonsters zijn aan de retourstroom onttrokken kort nadat de snijnozzles zich op een diepte van NAP -10,0 m en NAP -8,75 m bevonden. De monsters uit de verse kolom konden vaak niet op deze diepten worden genomen, wat een vergelijking in volumieke massa's moeilijk maakt. Van de vierentwintig kolommonsters kan een negental wel worden vergeleken met een retourmonster omdat ze ongeveer op dezelfde diepte zijn genomen. De eenheid voor de volumieke massa (ton/m<sup>3</sup>) is bepaald door de nauwkeurigheid van de meting.



kolomnummer	soort [-]	diepte NAP [m]	volumieke massa [ton/m <sup>3</sup> ]
6 (3 fasen)	retour	-8,75	1,87
	kolom	-8,00	1,86
7 (3 fasen plus)	retour	-10,00	1,94
	kolom	-10,00	1,92
8 (3 fasen plus)	retour	-8,75	1,95
	kolom	-8,25	1,90
11 (2 fasen)	retour	-10,00	1,91
	kolom	-10,00	1,95
	retour	-8,75	1,97
	kolom	-8,75	1,92
12 (2 fasen)	retour	-8,75	1,97
	kolom	-8,50	1,77
13 (2 fasen)	retour	-8,75	1,97
	kolom	-8,00	1,88
14 (2 fasen)	retour	-10,00	1,97
	kolom	-10,00	1,93
16B (2 fasen)	retour	-8,75	1,95
	kolom	-8,50	1,91

Tabel III.2: vergelijking volumieke massa retour- en kolomspoeling genomen op (ongeveer) dezelfde hoogte. (bron: tabel II.2)

In bovenstaande tabel verschilt de waarde van de volumieke massa van kolomspoeling van kolom 12 nogal met die van de retourspoeling op ongeveer dezelfde diepte (NAP -8,50 t.o.v.-8,75 m), zijnde 1,77 ton/m<sup>3</sup> ten opzichte van 1,97 ton/m<sup>3</sup> voor de retourspoeling. Op deze diepte is sprake van enkele kleischollen en mogelijk zijn kleiresten in het kolommonster opgenomen. Ook in hoofdstuk III.3, bij de druksterkte van de monsters, geeft dit monster een afwijkend beeld.

Indien de volumieke massa's van retour- en kolomspoeling uit tabel III.2 tegen elkaar worden uitgezet, ontstaat grafiek III.2.1 (Alle grafieken staan in bijlage III). De lijn  $y=x$  (vol.massa retour=vol. massa kolom) is in de grafiek opgenomen. In grafiek III.2.2 zijn de volumieke massa's op elkaar gedeeld en uitgezet ten opzichte van de volumieke massa van de kolomspoeling. Indien kolom 12 buiten beschouwing wordt gelaten, bedraagt de gemiddelde breuk: 0,984. Dit betekent dat de volumieke massa van de kolomspoeling gemiddelde 1,6 % minder bedraagt dan de retourspoeling. Indien zuiver naar het 2 fasen systeem wordt gekeken bedraagt de gemiddelde breuk 0,982. Voor de andere systemen is te weinig data verkregen.

Voor het 3 fasen systeem kunnen geen conclusies worden verbonden uit de hier gepresenteerde gegevens omdat alleen voor kolom 6 een vergelijking tussen retour- en kolomspoeling mogelijk was. Met name bij 3 fasen kolommen wordt een verschil verwacht tussen de volumieke massa van retour- en kolomspoeling vanwege de gescheiden snij- en vulstraal. Omdat gesneden is met water, werd in ieder geval een lichtere retourspoeling verwacht dan in geval van het 2 fasen jetgrouten. Dit klopt met hetgeen is gemeten. Het 2 fasen systeem kent een relatief klein verschil tussen volumieke massa van retour- en kolomspoeling. De gemaakte vergelijking geeft aan dat voor de volumieke massa van de kolomspoeling in geval van het 2 fasen systeem de waarde van de retourspoeling kan worden genomen, eventueel verminderd met een klein percentage. Het steken van kolom monsters zou daardoor achterwege gelaten kunnen worden. Verderop in dit hoofdstuk zal worden aangetoond dat dit niet altijd opgaat.

### III.2.4 Retour- en kolomspoeling over diepte

In de paragraaf II.2.2 is aangegeven dat de variatie in volumieke massa bij de kolomspoeling veel sterker is dan bij de retourspoeling. Een belangrijke opmerking die daarbij gemaakt dient te worden is dat de retourspoeling op vaste, diep gelegen, plaatsen is onttrokken, terwijl de kolomspoeling op verschillende hoogten uit de verschillende kolommen is genomen. Toch blijft het frappant dat de volumieke massa van de retourspoeling nauwelijks verandert bij variatie in uitvoeringsparameters.

In deze paragraaf wordt de diepte waarop de monsters zijn genomen in de beschouwing betrokken. Tabel II.2 laat zien dat de verschillen tussen de volumieke massa's van de retourspoeling op NAP -10,0 m en NAP -8,75 m bij eenzelfde kolom klein zijn, terwijl de volumieke massa van de kolomspoeling hoofdzakelijk toeneemt bij grotere diepte. In grafiek III.2.3 is de volumieke massa van de retourspoeling over de diepte uitgezet. Voor de kolomspoeling is dit gedaan in grafiek III.2.4.

Grafiek III.2.3 laat zowel enkele dalende als enkele stijgende lijnen zien en bevestigt het vermoeden dat de verschillen in volumieke massa over de diepte niet of nauwelijks aanwezig zijn. In de grafiek van III.2.4 kan met uitzondering van kolommen 8 en 12 (met de afwijkende waarde van  $1,77 \text{ ton/m}^3$ ) een dalende lijn worden waargenomen. Kolom 8 is een 3 fasen plus kolom en toont een lichte stijging in volumieke massa bij afnemende diepte. Het moge duidelijk zijn dat de volumieke massa (dichtheid) van het verse kolommengsel op grotere diepte toeneemt.

Een verklaring voor dit verschil in volumieke massa is gelegen in het uitzakken van de zwaardere delen in het kolommengsel na gereed komen van de jetgroutkolom. Hierdoor zal bij toenemende diepte een toenemende volumieke massa worden gevonden. Dit proces blijft doorgaan totdat voldoende stijfheid van het mengsel is verkregen. Dit betekent dat de concentratie van het lichtere water bovenin de kolom hoger ligt dan onderin. Een andere oorzaak is dat ten gevolge van de hydrostatische druk het overtollige water onderin de kolom sneller zal uitfilteren dan bovenin. Indien voldoende lang wordt gewacht zal ook in het bovenste deel het overtollige water uitfilteren. Naar alle waarschijnlijkheid wordt het verloop van volumieke massa van het kolommengsel over de diepte door beide verschijnselen veroorzaakt. Tijdens de jetgroutproef in Den Haag is geconcludeerd dat de bovenkant van de uitgeharde paal zich op dezelfde hoogte bevindt, als waar het jetgrouten is beëindigd. De goed gevulde boorschacht heeft voor voldoende aanvoer van zand en cementdeeltjes gezorgd, zodat de bovenkant van de kolom niet is gezakt.

### III.2.5 Volumieke massa cilinders

Van de retour- en kolomspoeling zijn na meting van de volumieke massa cilinders gevuld. Deze cilinders zijn gedurende 28 dagen onder voorgeschreven condities bewaard en uitgehard. Na 28 dagen zijn de cilinders bij Mos te Rhoon beproefd. Onderdeel van drukproeven is het bepalen van de volumieke massa van het monster. Voor de verschillende geteste cilinders zijn de volumieke massa gegeven in bijlage II.5.

De gevulde cilinders van kolommen 2, 5, 8, 12 en 14 zijn beproefd. De keuze voor deze cilinders is gekoppeld aan de kernboringen die in de genoemde kolommen zijn uitgevoerd. In tabel III.3 is een vergelijking gemaakt tussen de volumieke massa van de retourspoeling direct na onttrekken en dezelfde spoeling na 28 dagen uitharden. De volumieke massa van de cilinders betreft een gemiddelde van drie waarnemingen.

De laatste twee kolommen uit de tabel zijn in een grafiek tegen elkaar uitgezet (III.2.5). De gemiddelde waarde van de toename in volumieke massa bedraagt 3,1%, de standaard afwijking is 1,9%. Het is beter een onderscheid te maken tussen het 2 en 3 fasen systeem jetgrouten. Voor het 3 fasen systeem (kolom 2 en 5) bedraagt het gemiddelde 5,0% en de standaard afwijking 1,24%. Voor het 2 fasen systeem (kolom 12 en 14) geldt: gemiddelde 1,9%, standaard afwijking 0,55%.

kolomnummer	diepte tov NAP [m]	vol.mass a retour verse spoeling [ton/m <sup>3</sup> ]	vol. massa retour cilinders (na 28 dagen) [ton/m <sup>3</sup> ]	vol. massa cilinders tov verse spoeling [-]
2	-10,00	1,86	1,94	1,043
(3 fasen)	-8,75	1,82	1,95	1,071
5	-10,00	1,88	1,96	1,043
(3 fasen)	-8,75	1,88	1,96	1,043
8	-10,00	1,96	1,99	1,015
(3 fasen plus)	-8,75	1,95	1,98	1,015
12	-10,00	1,96	2,00	1,020
(2 fasen)	-8,75	1,97	1,99	1,010
14	-10,00	1,97	2,01	1,020
(2 fasen)	-8,75	1,98	2,03	1,025

Tabel III.3: vergelijking volumieke massa verse retourspoeling met spoeling na 28 dagen. (bron: II.5).

Hetzelfde is geschiedt voor de kolomspoeling. Tabel III.4 en grafiek III.2.6 geven de resultaten. De gemiddelde toename bedraagt 8,5 % met een standaard afwijking van 6,0 %. Voor het 3 fasen systeem geldt een gemiddelde toename van 13,3 % en een standaard afwijking van 6,0 %. Het 2 fasen systeem kent een gemiddelde toename van 6,1 % met een standaard afwijking van 2,1 %.

kolomnummer	diepte tov NAP [m]	vol.mass a kolom verse spoeling [ton/m <sup>3</sup> ]	vol. massa kolom cilinders (na 28 dagen) [ton/m <sup>3</sup> ]	vol. massa cilinders tov verse spoeling [-]
2	-5,25	1,66	1,96	1,181
(3 fasen)	-4,00	1,63	1,96	1,203
5	-7,50	1,82	1,93	1,060
(3 fasen)	-4,00	1,79	1,95	1,089
8	-8,25	1,90	2,00	1,053
(3 fasen plus)	-4,00	1,91	1,96	1,026
12	-8,50	1,77	1,92	1,085
(2 fasen)	-4,00	1,85	1,93	1,043
14	-10,00	1,93	2,00	1,036
(2 fasen)	-4,00	1,80	1,94	1,078

Tabel III.4: vergelijking volumieke massa verse kolomspoeling met spoeling na 28 dagen.

De cilinders zijn tijdens de jetgroutproef tot de rand gevuld. Na 28 dagen uitharden bevond de bovenkant van het grout enkele tientallen millimeters onder de rand. Dit verschijnsel trad bij alle monsters op, de mate waarin variëerde. Deze verdichting werd reeds korte tijd na het plaatsen van de monsters in de waterbak zichtbaar. De in deze paragraaf gepresenteerde cijfers bevestigen deze waarneming.

Al eerder is gesproken over het uitzakken van de zwaardere deeltjes van de spoeling. Dit heeft niet direct een effect op het volume van het monster. In de betontechnologie wordt gesproken over bleeding, waarmee wordt bedoeld het deels uitzakken van de spoeling. Onder bleeding wordt ook verstaan het uittreden van niet gebonden water. Bij normale beton treedt, afhankelijk van de samenstelling, gemiddeld circa 7% van het water uit de specie. De veranderingen in volumieke massa bij de gevulde cilinders kan met bleeding worden verklaard.

Dat het 3 fasen systeem een grotere toename van de volumieke massa heeft dan het 2 fasen systeem is te wijten aan een hoger watergehalte en lager cementgehalte bij het 3 fasen systeem, waardoor minder water gebonden is. De verklaring voor de verschillen tussen de retour- en kolomspoeling, waarbij de kolomspoeling een grotere toename in volumieke massa kent dan de retourspoeling, kan liggen in het feit dat de kolomspoeling op hogere niveaus aan de kolom is onttrokken. De retourspoeling is vrij

identiek over de hoogte van de kolom, zie ook paragraaf III.2.4. De kolomspoeling heeft ten gevolge van hetzelfde bleedingeffect naar de bovenkant van de kolom toe een toenemend watergehalte.

### III.2.6 Volumieke massa kernen in vergelijking met retour- en kolomspoeling

In de kolommen 2, 5, 8, 12 en 14 zijn na ontgraven kernboringen uitgevoerd. In enkele andere kolommen is dit ook gebeurd. In dit hoofdstuk gaat het met name om de vergelijking in volumieke massa van de retour- en kolomspoeling met de volumieke massa van de kernen. Op de hoogte waarop monsters van retour- en kolomspoeling zijn genomen zijn eveneens kernen beproefd. De volumieke massa van deze kernen wordt in deze paragraaf vergeleken met die van de retour- en kolomspoeling. Als eerste wordt een vergelijking gemaakt tussen de volumieke massa van de cilinders na 28 dagen ten opzichte van de kernen uit de verharde kolom.

kolomnummer	diepte tov NAP [m]	vol. massa retour cilinders (na 28 dagen) [ton/m <sup>3</sup> ]	vol. massa kernen [ton/m <sup>3</sup> ]	vol. massa kernen tov cilinders retour [-]
2	-10,00	1,94	-	-
(3 fasen)	-8,75	1,95	-	-
5	-10,00	1,96	2,04	1,041
(3 fasen)	-8,75	1,96	2,04	1,040
8	-10,00	1,99	1,94	0,975
(3 fasen plus)	-8,75	1,98	1,98	1,000
12	-10,00	2,00	2,03	1,015
(2 fasen)	-8,75	1,99	2,03	1,020
14	-10,00	2,01	2,07	1,030
(2 fasen)	-8,75	2,03	2,08	1,025

Tabel III.5: vergelijking volumieke massa uitgeharde retourspoeling met de kernen. (bron: bijlage II.5)

Voor kolom 2 is vergelijking van de volumieke massa niet mogelijk, omdat op de diepten van NAP -10,0 m en NAP -8,75 m geen kernen zijn beproefd. De toename in volumieke massa van de kernen ten opzichte van de uitgeharde retourspoeling bedraagt gemiddeld 1,8%, met een standaard afwijking van 2,1 %. De toename bij het 3 fasen systeem bedraagt 4,0 % gemiddeld, met een standaard afwijking van 0,05 %. Deze laatste percentages zijn gebaseerd op 2 metingen. Voor het 2 fasen systeem geldt een gemiddelde toename van 2,2 % en een standaard deviatie van 0,6 %. Zie ook grafiek III.2.7.

kolomnummer	diepte tov NAP [m]	vol. massa kolom cilinders (na 28 dagen) [ton/m <sup>3</sup> ]	vol. massa kernen [ton/m <sup>3</sup> ]	vol. massa kernen tov cilinders kolom [-]
2	-5,25	1,96	1,96	1,000
(3 fasen)	-4,00	1,96	1,96	1,000
5	-7,50	1,93	2,04	1,057
(3 fasen)	-4,00	1,95	2,06	1,056
8	-8,25	2,00	2,00	1,000
(3 fasen plus)	-4,00	1,96	1,93	0,985
12	-8,50	1,92	2,03	1,057
(2 fasen)	-4,00	1,93	1,87	0,969
14	-10,00	2,00	1,99	0,995
(2 fasen)	-4,00	1,94	2,07	1,067

Tabel III.6: vergelijking volumieke massa uitgeharde kolomspoeling met de kernen. (bron: bijlage II.5)

In geval van de kolomspoeling geldt een gemiddelde toename van 1,9 % en een standaard afwijking van 3,7 %. Voor het 3 fasen systeem is dit respectievelijk 2,8 % en 2,8 %. Het 2 fasen systeem kent een gemiddelde toename van 2,2 % en een standaard afwijking van 4,1 % (grafiek III.2.8).

Als controle kan de volumieke massa van de verse retour- en kolomspoeling worden vergeleken met de volumieke massa van de kernen. De toename zal gelijk moeten zijn aan de som van de vergelijking tussen verse en uitgeharde spoeling en de vergelijking van de uitgeharde spoeling met de kernen. (zie ook grafieken III.2.9 en III.2.10)

soort	deel	stap	gemiddelde toename vol. massa
retour	totaal (incl. 8)	vers→uitgeharde cilinders	3,1 %
		uitgeharde cilinders→kernen	1,8 %
		som	4,9 %
	3 fasen	vers→uitgeharde cilinders	5,0 %
		uitgeharde cilinders→kernen	4,0 %
		som	9,0 %
2 fasen	vers→uitgeharde cilinders	1,9 %	
	uitgeharde cilinders→kernen	2,2 %	
	som	4,1 %	
kolom	totaal (incl. 8)	vers→uitgeharde cilinders	8,5 %
		uitgeharde cilinders→kernen	1,9 %
		som	10,4 %
	3 fasen	vers→uitgeharde cilinders	13,3 %
		uitgeharde cilinders→kernen	2,8 %
		som	16,1 %
2 fasen	vers→uitgeharde cilinders	6,1 %	
	uitgeharde cilinders→kernen	2,2 %	
	som	8,3 %	

Tabel III.7: samenvatting gemiddelde toename volumieke massa's.

Indien de toename van de volumieke massa van de retourspoeling ten opzichte van de kernen in één stap wordt berekend worden iets andere waarden gevonden dan in tabel III.7 bij retourspoeling staat vermeld. Dit heeft te maken met het ontbreken van de kernen van kolom 2. De afwijking bij het 3 fasen systeem is daarbij het grootst (8,4 % in plaats van 9,0 %).

Bovenstaande tabel geeft aan dat er een verschil in volumieke massa ontstaat tussen dezelfde mengsels afhankelijk van de plaats van uitharden. Indien in de kolom uitharding plaatsvindt (kern) wordt een iets grotere (1,8% tot 2,8%) volumieke massa gevonden dan na uitharden in de cilinders. Het verschil kan worden verklaard door de druk waaronder beide monsters uitharden. De cilinders harden uit in een ondiepe waterbak terwijl de kernen zijn genomen uit een 8,5 meter hoge groutkolom. De druk van deze kolom kan de volumieke massa verhogen. Dit drukeffect blijft beperkt tot enkele procenten.

### III.2.7 Volumieke massa kernen over de diepte

Door tijdens het boren van de kernen in de aangegeven vijf kolommen nauwkeurig de uitkomende kernen te meten, te merken en te registreren was het mogelijk de herkomst van een beproefd monster te bepalen. Hierdoor kan de volumieke massa van de kernen tegen de diepte worden uitgezet (grafieken III.2.11 t/m III.2.15). Slechts bij de kernboring in kolom 8 kan enigszins een verloop van de volumieke massa over de diepte worden gevonden. Bij de andere boringen is geen sprake van een toe- of afnemende volumieke massa bij een grotere diepte. Wat wel opvalt is dat in rond NAP -8,0 m bij kolommen 2, 5, 8 en 12 enkele lage waarden voor de volumieke massa worden gevonden. Dit kan veroorzaakt zijn door de op die diepte aanwezige kleilaagjes. De kleilaagjes zijn te dun om een duidelijk effect te weeg te brengen. Van de vijf kolommen zijn gemiddelde waarden en standaard afwijkingen van de volumieke massa van de kernen bepaald.

kolomnummer	gemiddelde vol.massa in ton/m <sup>3</sup>	standaard deviatie in ton/m <sup>3</sup>
2 (3 fasen)	1,957	0,0186
5 (3 fasen)	2,040	0,0113
8 (3 fasen plus)	1,981	0,0328
12 (2 fasen)	2,000	0,0523
14 (2 fasen)	2,073	0,0424

Tabel III.8: gemiddelde waarde en standaard deviatie volumieke massa kernen. (bron: bijlage II.5)

### III.2.8 Resumé

Tijdens het jetgrouten treedt een aanzienlijke hoeveelheid van het aanwezige en geïnjecteerde water uit de kolom, het grondmassief in. Dit ten gevolge van een waterspanningsverschil. Het volume van het uittredende water bedraagt circa 10% tot 30% van het totale volume aan water (poriënwater + injectie water). Het effect van deze wateruittreding is sterk merkbaar bij de waarde van de volumieke massa van retour- en kolomspoeling. De gevoeligheid van de berekening van de procentuele wateruittreding is groot voor kleine wijzigingen in diameter van de kolom of volumieke massa van de retourspoeling die voor de berekening worden gebruikt. Een regelmatigheid is niet gevonden.

In paragraaf III.2.3 zijn metingen van de volumieke massa van de retour- en kolomspoeling met elkaar vergeleken. Het aantal vergelijkbare metingen is beperkt vanwege het verschil in diepte waarop de monsters onttrokken zijn. Het betrof voornamelijk spoelingen uit 2 fasen kolommen. De gemiddelde kolomspoeling heeft een volumieke massa die circa 1,6 % minder is dan die van de retourspoeling met de volumieke massa van de kolomspoeling als representatieve waarde. Dit verschil is dusdanig klein dat voor het verkrijgen van de volumieke massa van het kolommengsel het nemen van steekmonsters uit de verse kolom achterwege kan blijven en volstaan kan worden met het bepalen van de volumieke massa van de veel eenvoudiger te verkrijgen retourspoeling. Eventueel kan een kleine correctie (1,6 %) worden toegepast. Opgemerkt dient te worden dat de vergelijking is gemaakt op een relatief grote diepte, onderin de kolom. Dit kan van invloed zijn op de vergelijking.

Na deze vergelijking is namelijk gekeken naar het verloop van de volumieke massa van de beide spoelingen. De volumieke massa van de retourspoeling is niet of nauwelijks afhankelijk van de diepte. Van de kleine kleilenzen op een diepte van NAP -8,75 is in geval van de retourspoeling niets gemerkt. De kleilaagjes zijn naar alle waarschijnlijkheid te dun om meetbare invloed te hebben op de volumieke massa. De volumieke massa van de kolomspoeling varieert duidelijk over de diepte, waarbij de volumieke massa op grotere diepte hoger ligt. Dit duidt op het uitzakken van zwaardere deeltjes in de kolomvloeistof waardoor de lichtere deeltjes bovenin de kolom terechtkomen. Daarnaast treedt het overtollige water onderin de kolom ten gevolge van de grotere hydrostatische druk sneller uit dan bovenin.

In de beschouwing van de retour- en kolomvloeistof is de volumieke massa van de genomen monsters ook na uitharding bepaald en is gekeken naar de volumieke massa van de uitgeharde kolom. Hiervoor zijn kernen geboord. Een aantal verschijnselen treedt op en vormt een verklaring voor de gevonden verschillen en veranderingen in volumieke massa's.

Als eerste is het mogelijk uitzakken van de kolom reeds genoemd. Zwaardere delen zakken naar de bodem van de kolom terwijl de lichtere delen bovenin de kolom achterblijven. Dit heeft een verloop van de volumieke massa over de diepte tot gevolg. Dit uitzakken valt onder de term bleeding, waarbij ook het uittreden van water hoort. De toename in volumieke massa van de verse retour- en kolomspoeling naar de uitgeharde spoeling kan door dit verschijnsel worden verklaard. Het verschil in procentuele toename van massa tussen het 3 en 2 fasen systeem, waar het 3 fasen systeem een

grotere toename kent, kan worden toegeschreven aan een hoger volume ongebonden water in een 3 fasen kolom. Dat de retourspoeling een lager bleeding effect heeft dan de kolomspoeling komt doordat de kolomspoeling minder diep is onttrokken, waar door het uitzakken van de kolom (ook bleeding) meer water aanwezig is dan bij de retourspoeling.

Het geringe verschil in volumieke massa van de uitgeharde retour- en kolomspoeling ten opzichte van de kernen wordt veroorzaakt door het verschil in druk waaronder de monsters zijn verhard.

Tenslotte wordt het diepte onafhankelijk zijn van de volumieke massa van de kernen verklaard door het verschil in wateruittreding over de hoogte van de kolom. In het onderste deel is minder water aanwezig dan in het bovenste deel, waardoor bovenin meer water uittreedt dan onderin. En zoals beschreven treedt het overtollige water onderin sneller uit dan bovenin. Indien voldoende lang wordt gewacht zal ook bovenin veel overtollig water zijn uitgefilterd. De volumieke massa zal uiteindelijk over de hoogte niet veel verschillen. Overigens is tijdens het ontgraven bepaald dat de totale kolom niet is verkort, dit ten gevolge van waarschijnlijk voldoende aanvoer van spoeling uit het boorgat.

De toename van de volumieke massa van de spoeling en de oorzaken zoals die hier zijn genoemd verklaren ook de sterke mate van opstijving van het kolommengsel na het jetgrouten. De problemen die optraden bij het steken van monsters uit de verse kolom en het meten van de diameter met behulp van de spin, kunnen worden toegeschreven aan de dik en stijf geworden spoeling. Een andere oorzaak betreft de reactie van het cement. Onder normale omstandigheden zal het enige uren duren voordat het groutmateriaal enige stijfheid krijgt. Maar bij zeer grote en cementrijke kolommen, zoals in Den Haag, wordt de reactiesnelheid sterk vergroot vanwege de temperatuurstoename van het grout. Bij de chemische reactie van uitharden komt warmte vrij, die de reactiesnelheid weer vergroot. Deze verhoging van de temperatuur heeft met name in de eerste fase van het uithardingsproces een sterke invloed. Enkele kolommen in de proefput voelden na ontgraving, circa 4 weken na fabricage nog warm aan. Deze hydratatie warmte zorgt eveneens voor een verdamping van een deel van het water, zodat de volumieke massa van het grout weer toeneemt.

De vraag rijst of het mogelijk is de monsters van de retour- en kolomspoeling dusdanig te bewaren dat dezelfde verschijnselen optreden, en in dezelfde mate, als in de kolom. Het uittreden van ongebonden water blijkt sterk tijdsafhankelijk. Door de cilinders 28 dagen te bewaren, treedt een groot deel van de wateruitfiltering die in kolom plaatsvindt, ook in de cilinders op. Het uiteindelijke geringe verschil in volumieke massa (circa 2,0%), wordt veroorzaakt door de lagere hydrostatische druk waaronder de monsters in de waterbak uitharden. Het plaatsen van de monsters in drukcellen kan een oplossing zijn. Nader onderzoek is nodig om te bepalen of op deze wijze dezelfde volumieke massa's worden verkregen als bij uitharding van het kolommengsel in de grond.

### III.3 Sterkte en stijfheid

#### III.3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk staan de sterkte en stijfheid van het uitgeharde materiaal centraal. De cilinders gevuld met retour- en kolomspoeling zijn op druk en trek beproefd door middel van drukproeven en slijtproeven (indirecte trekproeven). Hetzelfde is gebeurd met de verschillende kernen, geboord uit de kolommen. Zoals reeds eerder aangegeven is de druksterkte in geval van een constructieve toepassing van jetgroutkolommen van groot belang. Jetgroutconstructies worden niet of nauwelijks op trek belast. Vaak wordt getracht de treksterkte te bepalen uit de druksterkte. De druksterkte vormt samen met de stijfheid de belangrijkste onderwerpen van dit hoofdstuk.

Vergelijkingen worden gemaakt tussen sterkte en stijfheid van de retour- en kolomspoeling en tussen sterkte en stijfheid van de spoelingen en de kernen (paragraaf III.3.2). In de paragraaf daar op volgend (III.3.3.) komt het verschil in gemiddelde waarde en rekenwaarde van de druksterkte aan de orde. Door de grote spreiding in waarden voor de sterkte is dit verschil aanzienlijk. De druksterkte over de diepte vormt het onderwerp van paragraaf III.3.4 en de druksterkte en stijfheid (E-modulus) ten opzichte van de volumieke massa komen in paragraaf III.3.5 aan bod. De invloed van het cementgehalte wordt in paragraaf III.3.6 behandeld. Het verband tussen druk- en treksterkte is het onderwerp van paragraaf III.3.7 en paragraaf III.3.8 vormt de afsluiting van dit hoofdstuk met een resumé van de gevonden relaties.

#### III.3.2 Gemiddelde waarden druksterkte retour- en kolomspoeling en kernen

In hoofdstuk 2 is reeds beschreven dat de cilinders van de kolommen 2, 5, 8, 12 en 14 voor onderzoek naar Mos te Rhooon zijn gebracht. Per genomen monster zijn 3 cilinders gevuld voor een drukproef en zes voor een slijtproef. De gemiddelde drukwaarden worden in tabel III.9 gepresenteerd:

kolomnummer	gemiddelde druksterkte retourspoeling in N/mm <sup>2</sup>	gemiddelde druksterkte kolomspoeling in N/mm <sup>2</sup>	kolom tov retour
2 (3 fasen)	2,24	1,83	0,817
5 (3 fasen)	3,13	4,04	1,291
8 (3 fasen plus)	7,64	7,37	0,965
12 (2 fasen)	5,14	1,70	0,331
14 (2 fasen)	5,34	5,61	1,051

Tabel III.9: vergelijking retour- en kolomspoeling, gemiddelde druksterkte. (bron: bijlage II.5)

De tabel bevat de gemiddelde druksterkte van de monsters van de twee retourspoelingen en de twee verse kolommonsters. Het verschil in diepte is niet meegenomen. In hoofdstuk III.2 is vermeld dat het kolommonster van kolom 12 een niet geheel representatief monster is. Naar alle waarschijnlijkheid heeft het monster enkele slechte gronddeeltjes bevat. Dit komt in werkelijkheid natuurlijk voor, maar staat een goede vergelijking in de weg. Indien kolom 12 buiten beschouwing wordt gelaten bedraagt de druksterkte van het kolommengsel gemiddeld 3,1 % meer dan de druksterkte van de retourspoeling. De verschillen zijn tussen beide spoelingen zijn bij het 3 fasen systeem het grootst. Grafiek III.3.1 geeft de vergelijking in de vorm van een staafdiagram.

De waarde in de laatste kolom van tabel III.9 variëren te veel om te spreken van een relatie tussen druksterkte van retour- en kolommengsel. Aan het gemiddelde percentage kan niet veel waarde worden gehecht. Een verklaring voor de verschillen kan zijn dat de geteste cilinders relatief klein van afmeting waren (diameter 60 mm) en daardoor erg gevoelig zijn voor kleine onregelmatigheden in het materiaal. De spreiding in druksterkte is bij de kernen eveneens aanzienlijk, zie paragraaf III.3.3.



Omdat de druksterkte van de cilinders slechts bepaald is met 3 proeven is de invloed van een enkel monster te groot.

Indien nu de gemiddelde druksterkte van de beproefde kernen in de vergelijking wordt meegenomen, wordt een beeld verkregen van de verschillen tussen de sterkte van uitgeharde monsters genomen uit de verse kolom en monsters uit de uitgeharde kolom.

kolomnummer	gemiddelde druksterkte retourspoeling in N/mm <sup>2</sup>	gemiddelde druksterkte kolomspoeling in N/mm <sup>2</sup>	gemiddelde druksterkte kernen in N/mm <sup>2</sup>	kernen tov kolomspoeling
2 (3 fasen)	2,24	1,83	1,78	0,973
5 (3 fasen)	3,13	4,04	7,27	1,800
8 (3 fasen plus)	7,64	7,37	12,45	1,689
12 (2 fasen)	5,14	1,7	5,03	0,979*
14 (2 fasen)	5,34	5,61	12,45	2,219

Tabel III.10: vergelijking spoelingen en kernen, gemiddelde druksterkte.

\* voor de vergelijking is hier gebruik gemaakt van de retourspoeling ipv de kolomspoeling.

In grafiek III.3.2 is de vergelijking in de vorm van een staafdiagram gegeven. Opvallend is dat de verschillen tussen de beide spoelingen en de kernen met name bij zeer cementrijke kolommen erg groot zijn (kolom 5, 8 en 14). Een oorzaak van de verschillen is waarschijnlijk het verschil in druk waarbij de monsters uitharden. Dit drukverschil was ook de oorzaak voor verschillen in volumieke massa van de uitgeharde cilinders en de uitgeharde kolomspoeling in de kolom. Bij de kolommen waar deze volumieke massa toename duidelijk aanwezig was, is de druksterkte van de kernen (veel) hoger uitgevallen dan de druksterkte van de cilinders. Voor het bepalen van de sterkte van een kolom is het, gezien bovenstaande, het beste kernboringen te verrichten en de kernen op druk te beproeven. Dit omdat de cilinders een slecht en onregelmatig beeld geven van de werkelijke sterkte van het kolommengsel.

### III.3.3 Rekenwaarde druksterkte

In bijlage II.6. zijn de resultaten van de kernboringen verwerkt. Met uitzondering van de verticale kernboringen in kolom 2, 8, 10A en 17A zijn de rekenwaarden van de druksterkte in deze bijlage vermeld. In onderstaande tabel zijn de gemiddelde en rekenwaarde van de druksterkte voor de verschillende kernen gegeven. De berekening van de rekenwaarde is in de bijlage gegeven.

kern kolom	gemiddelde druksterkte in N/mm <sup>2</sup>	rekenwaarde druksterkte in N/mm <sup>2</sup>	rekenwaarde tov representatieve
2	1,78	0,75	0,423
5	7,27	3,59	0,466
8	12,45	6,04	0,485
10A	3,52	1,70	0,482
12	5,03	2,20	0,437
14	12,45	6,50	0,522
17A	2,91	1,33	0,456
19/20	11,57	5,40	0,467
24/25/28	9,74	4,20	0,431
20 horizontaal	10,13	4,55	0,449

Tabel III.11: vergelijking representatieve en rekenwaarde druksterkte. (bron: bijlage II.5/II.6)

Gemiddeld bedraagt de rekenwaarde 46,2 % van de gemiddelde druksterkte. De standaardafwijking van dit percentage is 2,8 %. Door de zeer grote spreiding in druksterkte van de monsters ontstaat een grote standaard afwijking (variantie) in de druksterkte. Dit heeft een sterk nadelig effect op de rekenwaarde. Grafiek III.3.3 geeft de resultaten in de vorm van een staafdiagram. De verschillen tussen het gemiddelde en de rekenwaarde van de druksterkte zijn bij het 3 fasen systeem niet anders dan bij het 2 fasen systeem.

### **III.3.4 Verloop druksterkte over kolom**

De sterke variatie in druksterkte van de monsters duidt op een grote inhomogeniteit van het kolommateriaal. De verticale kernboringen zijn gemaakt op circa 50 cm vanaf het midden van de kolom. Bij de kleine kolommen (8, 10A en 17A) was deze afstand kleiner. De verticale kernboringen in het massief zijn gemaakt in de overlappingsgebieden van de individuele kolommen. In deze buitenste schil is de gemiddelde waarde van de druksterkte minder dan verder naar het centrum van de kolom. De kern uit het grotere overlappingsgebied van kolom 19 en 20 heeft een hogere druksterkte dan de kern uit het veel kleinere overlappingsgebied van kolom 24, 25 en 28. De druksterkte lijkt naar buiten toe af te nemen.

De horizontale boring in kolom 20 die gemaakt is om te kijken of de druksterkte van het groutmateriaal richtingsafhankelijk is, bevestigt het vermoeden van de afname in druksterkte naar de buitenkant van de kolom. In bijlage II.6. bevatten de gegevens van kolom 20 een kaartje met daarop de herkomst van de beproefde kernen. De kernen uit met name het E-deel hebben een lagere sterkte dan de andere kernen. Overigens waren de resultaten van de kernboring in kolom 20 geen aanleiding te vermoeden dat de eigenschappen van het verharde grout richtingsafhankelijk zijn. Een verklaring voor het verminderen van de sterkte naar de buitenschil van de kolom kan gelegen zijn in een slechtere menging van het grout met de aanwezige grond of een vermindering van de hoeveelheid cement in de buitenste delen van de kolom. De omtrek van de kolom neemt toe bij een vergrotende straal zodat de tijd die de snijstraal heeft voor erosie en menging van de buitenste delen van de kolom minder is dan voor de delen, gelegen meer naar het hart van de kolom.

Naast de variatie in sterkte over een horizontale doorsnede van de kolom is ook het verloop van de sterkte over de diepte beschouwd. De verschillende sonderingen (zie bijlage II.3) hebben de aanwezigheid van kleine zwakke lagen over de hoogte van de kolom aangetoond. De vraag was of deze zwakke lagen in de kolom terug konden worden gevonden. Daartoe zijn de resultaten van de druksterkte van de kernen uitgezet ten opzichte van de diepte. Grafiek III.3.4 geeft dit verloop voor alle kernboringen.

Uit de afbeelding kunnen geen diepten worden gehaald waar de kernen in sterkte significant terugvallen. Per kern verschillen de diepten waarop de laagste druksterkten worden behaald. De sondering laat zich dus niet naar de kolom vertalen. De kleilagen zijn naar alle waarschijnlijkheid te klein en plaatselijk aanwezig om een eenduidige invloed te kunnen uitoefenen op de druksterkte van het kolommengsel.

### **III.3.5 Sterkte en stijfheid versus volumieke massa**

Hoofdstuk 5 van deel I beschrijft enkele onderzoeken op het gebied van de mechanische eigenschappen van grout en groutkolommen. De grote invloed van de volumieke massa op de sterkte en stijfheid is in de gebruikte literatuur ([3] en [33]) reeds aangetoond. In het algemeen kan worden gesteld dat hoe zwaarder een mengsel deste hoger de druksterkte. De druksterkte is bij grout echter mede afhankelijk van de hoeveelheid cement in de kolom. Dit maakt het moeilijk de verschillende kolommen onderling te vergelijken. Omdat de sterkte en stijfheid van de kernen nogal verschilt ten opzichte van die van de retour- en kolomspoeling gaat de aandacht hierna voornamelijk uit naar de mechanische eigenschappen en volumieke massa van de kernen. In grafiek III.3.5 is van alle kernen de gemiddelde volumieke massa uitgezet tegen de gemiddelde druksterkte. De gebruikte data zijn:

kolomnummer	gemiddelde vol.massa in kg/m <sup>3</sup>	gemiddelde druksterkte in N/mm <sup>2</sup>
2	1957	1,78
5	2040	7,27
8	1981	12,45
10A	2009	3,52
12	2000	5,03
14	2079	12,45
17A	2075	2,91
19/20	2021	11,57
24/25/28	2057	9,74
20 horizontaal	2020	10,13

Tabel III.12: gemiddelde volumieke massa en druksterkte kernen. (bron: bijlage II.5)

In verband met het cementgehalte wijkt kolom 8 nogal af de lijn die met behulp van lineaire regressie tot stand komt. Kern 8 bevat bijzonder veel cement en krijgt daardoor een relatief grotere druksterkte ten opzichte van de volumieke massa dan de overige kernen. Bij kolom 17A valt de druksterkte tegen vanwege een andere fenomeen. Bij deze kolom is de boorbuis tijdens het jetgroueten verhoudingsgewijs snel getrokken en te langzaam gedraaid. Hierdoor waren zeer cementrijke en grondrijke banen in de kolom waarneembaar. De kernen uit de grondbanen hebben een lage sterkte maar een hoge volumieke massa.

In de grafieken III.3.6 t/m III.3.15 is per kolom de volumieke massa van de verschillende kernmonsters uitgezet tegen de gemeten druksterkte. Voor een aantal kolommen is een lineair verband te bepalen tussen de beide eigenschappen. De druksterkte neemt duidelijk toe bij een vergrotende volumieke massa. Omdat kernen 19/20, 24/25/28 en 20 (horizontaal) op dezelfde kolom 14 gebaseerd zijn, kunnen de resultaten van de beproevingen van al deze kernen in een grafiek worden samengevoegd. In grafiek III.3.16 zijn de resultaten uitgezet en is een tweetal omhullende en een lineaire regressielijn toegevoegd. Het resultaat laat eenzelfde beeld zien als afbeelding I.5.23 (Taiwan). De ligging van de lijnen is wel anders. De oorzaak ligt hoogst waarschijnlijk in andere grond- en uitvoeringsparameters.

Naast de sterkte van het materiaal is de Elasticiteits-modulus eveneens belangrijk. De stijfheid is bepaald als de helling van het  $\sigma$ - $\epsilon$ -diagram op 50 % van de maximale druksterkte, de zogenaamde  $E_{50}$ . Op dezelfde wijze als voor de druksterkte is voor alle beproefde kolommen de volumieke massa uitgezet tegen de E-modulus. De grafieken zijn opgenomen in bijlage, grafieken III.3.17 t/m III.3.28. Zij geven een soort gelijk beeld als de grafieken van volumieke massa versus druksterkte. Zie ook afbeelding I.5.26.

Een toenemende sterkte en stijfheid bij toenemende volumieke massa wordt veroorzaakt door een lager watergehalte bij een toenemende massa. Op dezelfde wijze als bij beton bepaalt de water/cement-factor de sterkte en stijfheid. Indien deze factor lager is wordt een grotere sterkte bereikt. Het cementsteen (het reactieproduct van cement en water) is de zwakste schakel van het verharde materiaal. Om alle cement te laten reageren is circa 40% massa procenten water nodig ten opzichte van cement. Dit vormt geen ondergrens omdat al het cement niet hoeft te reageren. Theoretisch is een water/cement-factor van nabij nul het beste voor de sterkte. Een beetje water is benodigd om samen met het cement de vaste deeltjes aanéén te klitten.

kolomnummer	gemiddelde vol.massa in kg/m <sup>3</sup>	gemiddelde E-modulus in N/mm <sup>2</sup>
2	1957	288
5	2040	1481
8	1981	3438
10A	2009	701
12	2000	1267
14	2079	2481
17A	2075	511
19/20	2021	3157
24/25/28	2057	2729
20 horizontaal	2020	3370

Tabel III.13: gemiddelde volumieke massa en E-modulus kernen. (bron: bijlage II.5)

Op deze wijze wordt direct ook een verband gelegd tussen het cementgehalte en de volumieke massa met het oog op de sterkte en stijfheid. De water/cement-factor bepaalt samen met de hoeveelheid cement de hoeveelheid water in het monster en daarmee ook de volumieke massa. Een lage water/cement-factor van, en de hoeveelheid cement in het uiteindelijke kolommengsel zijn daarmee eigenlijk de belangrijkste factoren voor sterkte en stijfheid. In de volgende paragraaf wordt ingegaan op het cementgehalte.

De breukrekken van de beproefde kernen zijn in de beschouwing meegenomen. Hier wordt volstaan met te vermelden dat de rekken niet afhankelijk zijn van de volumieke massa. Er konden verder geen regelmatigigheden worden ontdekt.

### III.3.6 Druksterkte in samenhang met cementgehalte

De druksterkte van het grout hangt zoals beschreven naast de volumieke massa ook sterk af van de hoeveelheid cement in de kolom. Omdat de cementsteen ook de zwakste schakel van het kolommengsel is, zou te toevoegen van net voldoende cement en water om de gronddeeltjes voldoende aan elkaar te klitten het meest logisch zijn. Voor de verwerkbaarheid wordt echter meer water toegevoegd. Dit extra water treedt voor een deel uit het beton (bleeding), maar blijft eveneens in fijne poriën in de beton achter.

In grafiek III.3.29 is het geschatte cementgehalte uit tabel II.3 uitgezet tegen de behaalde druksterkte. De onderstaande data is voor de grafiek gebruikt.

kolomnummer	geschat cementgehalte in kg/m <sup>3</sup>	gemiddelde druksterkte in N/mm <sup>2</sup>
2	142	1,78
5	198	7,27
8	409	12,45
10A	194	3,52
12	209	5,03
14	287	12,45

Tabel III.14: vergelijking cementgehalte met druksterkte kernen. (bron: tabel II.3/bijlage II.5)

Op de hoogte van het cementgehalte en de juistheid van de berekening zal hierna nog worden ingegaan. In de afbeelding is in ieder geval duidelijk af te lezen dat meer cement tot hogere sterkten leidt. Dat eigenlijk de water/cement-factor een belangrijke indicator voor de sterkte is, kan worden gezien door kolom 8 met kolom 14 te vergelijken. Bij gelijke gemiddelde sterkte bevat kolom 8 circa 120 kg/m<sup>3</sup> cement meer, maar een veelvoud daarvan aan meer water. De gemiddelde volumieke massa van kolom 8 bedraagt 1981 kg/m<sup>3</sup> ten opzichte van 2073 kg/m<sup>3</sup> voor kolom 14, een verschil van circa 90 kg/m<sup>3</sup>.

De schatting van het cementgehalte is gebaseerd op een totale menging van het aanwezige grond en water en het geïnjecteerde grout. In paragraaf III.2.2 is geconcludeerd dat een grote hoeveelheid water (circa 10% tot 30% van het totale watervolume) tijdens het groutproces uit de kolom treedt. De schatting van het cementgehalte valt hierdoor eigenlijk te laag uit. De resultaten van een cementanalyse zoals die op een aantal kernen is uitgevoerd, is eveneens in tabel II.3 vermeld. Deze waarden van het cementgehalte liggen veel hoger (tot 250% meer).

Navraag bij de uitvoerende instantie van deze cementanalyse leert dat het cementgehalte naar alle waarschijnlijkheid lager ligt dan uit de analyse is gebleken. De kernen zijn geanalyseerd op de wijze zoals beton wordt geanalyseerd, met behulp van het oplossend vermogen en gloeiverlies. Doordat het kolommengsel organische stoffen bevat die meereageren, kan het cementgehalte hoger uitvallen dan dat het in werkelijkheid is.

De resultaten van de berekening van het cementgehalte met een wateruittreding van 20% zijn vermeld in tabel III.15. Daarin is ook de water/cement-factor opgenomen. In grafiek III.3.30 is de druksterkte van de kernen uitgezet (tabel III.14) tegen de nieuwe schatting van het cementgehalte en in grafiek III.3.31 is de druksterkte uitgezet tegen de water/cement-factor. Het verband tussen de druksterkte en de water/cement-factor spreekt duidelijk uit de laatste grafiek.

kolomnr.	geschat cementgehalte zonder uittreding in kg/m <sup>3</sup>	cementgehalte volgens chemische analyse (te veel!) in kg/m <sup>3</sup>	geschat cementgehalte met 20% uittreding in kg/m <sup>3</sup>	w.c.f. bij 20% uittreding
1	190		214	2,3
2	142		159	3,0
3	148		169	2,8
4	194		217	2,2
5	198	461	220	2,0
6	171		191	2,3
7	406		451	1,0
8	409	846	455	1,0
9A	143		153	3,0
10A	194	355	210	2,3
11	261		289	1,5
12	209		230	1,8
13	255		282	1,4
14	287	511	317	1,3
17A	271		300	1,4
16B	274		304	1,3
17B	148		163	2,4

Tabel III.15: vergelijking cementgehalte berekening met en zonder 20% uittreding.

### III.3.7 Druk- en treksterkte

In hoofdstuk 5 van de literatuurstudie is eveneens stilgestaan bij de treksterkte van het groutmateriaal. Deze treksterkte is van ondergeschikt belang omdat de groutconstructies vrijwel nooit op trek worden belast. De treksterkte wordt als nihil beschouwd. Toch is het interessant om te kijken of er een verband bestaat tussen de druk- en treksterkte. In literatuur [33] is bepaald dat de treksterkte globaal tussen 1/10 en 1/30 van de druksterkte ligt. Een soortgelijke uitdrukking wordt hier ook afgeleid. In eerste instantie wordt de retour- en kolomspoeling nog eens bekeken.

De volgende gemiddelde waarden van druk- en treksterkte van de beproefde cilinders zijn gevonden:

kolomnummer	retour/kolom	diepte tov NAP in m	druksterkte in N/mm <sup>2</sup>	treksterkte in N/mm <sup>2</sup>
2	retour	-10,00	2,21	0,22
	retour	-8,75	2,27	0,14
	kolom	-5,25	1,99	0,12
	kolom	-4,00	1,68	0,11
5	retour	-10,00	3,77	0,64
	retour	-8,75	2,50	0,36
	kolom	-7,50	3,83	0,51
	kolom	-4,00	4,25	0,63
8	retour	-10,00	6,94	1,15
	retour	-8,75	8,33	1,52
	kolom	-8,25	7,25	1,37
	kolom	-4,00	7,48	1,23
12	retour	-10,00	5,58	0,84
	retour	-8,75	4,70	0,81
	kolom	-8,50	1,96	0,29
	kolom	-4,00	1,32	0,25
14	retour	-10,00	4,25	0,50
	retour	-8,75	6,43	0,79
	kolom	-10,00	8,08	1,04
	kolom	-4,00	3,15	0,35

Tabel III.16: gemiddelde druk- en treksterkte cilinders. (bron: bijlage II.5)

Indien de druksterkte wordt uitgezet tegen de treksterkte ontstaat grafiek III.32. De getekende omhullenden bepalen de range waartussen de treksterkte ligt ten opzichte van de druksterkte. Gevonden is dat de treksterkte tussen 1/5 en 1/7 van de druksterkte ligt. Met nadruk wordt hier gewezen op het feit dat in de grafiek opgenomen waarden gemiddelden zijn van drie resultaten van druk- en zes resultaten van trekproeven. Door de variatie in sterkte is de werkelijke bandbreedte groter.

Voor de kernen is dezelfde berekening uitgevoerd. De gemiddelde druk- en treksterkten over de diepte staan vermeld in de onderstaande tabel:

kernnummer	gemiddelde druksterkte in N/mm <sup>2</sup>	gemiddelde treksterkte in N/mm <sup>2</sup>
2	1,78	0,33
5	7,27	0,90
8	12,45	1,82
10A	3,52	0,50
12	5,03	0,94
14	12,45	1,65
17A	2,91	0,49
19/20	11,57	1,77
24/25/28	9,74	1,43
20 horizontaal	10,13	1,89

Tabel III.17: gemiddelde druk- en treksterkte kernen. (bron: bijlage II.5)

Indien druk- en treksterkte in een grafiek tegen elkaar wordt uitgezet, ontstaat grafiek III.33. Dezelfde lijnen als in geval van de retour- en kolomspoeling zijn ook nu in de grafiek verwerkt. De lijnen vormen ook in deze grafiek de band waarbinnen alle gevonden gemiddelden vallen. Er is dus geen onderscheid tussen spoeling en kernen.

In de betontechnologie wordt globaal aangehouden dat de treksterkte van de verharde betonspecie circa 1/10 bedraagt van de druksterkte. De kernen van de groutkolommen hebben dus verhoudingsgewijs een grotere treksterkte, uitgedrukt ten opzichte van de druksterkte, dan beton. Een indirecte trekproef in de vorm van een splijtproof, zoals die is uitgevoerd met de kernen en cilinders, levert een iets grotere treksterkte dan indien de treksterkte met andere proeven wordt bepaald. Indien gerekend wordt met een treksterkte van 1/10 van de druksterkte, wordt de nodige veiligheid in acht genomen.

### **III.3.8 Resumé**

De druksterkten van de cilinders gevuld met retour- en kolomspoeling laten zich niet goed met elkaar vergelijken. Vanwege het geringe aantal cilinders per genomen monster, is de gemiddelde druksterkte gevoelig voor kleine onregelmatigheden in de cilinders. De druksterkte van de kernen is met name bij cementrijke kolommen veel hoger dan de druksterkte van de spoeling in de cilinders. Het verschil lijkt mede te zijn veroorzaakt door het onder hogere hydrostatische druk uitharden van het mengsel in de kolom ten opzichte van het mengsel in de cilinders. Voor een goede indicatie van de druksterkte wordt dan ook het boren en beproeven van kernen aangeraden.

Indien de omstandigheden in de kolom, bijvoorbeeld met behulp van drukcellen, kunnen worden nagebootst, kunnen de monsters voor het bepalen van de sterkte en stijfheid van het verharde mengsel misschien wel een functie krijgen. Zoals ook is vermeld in III.2.8 kan dit een onderwerp zijn voor nader onderzoek.

Door de grote variatie in druksterkte tussen de verschillende beproefde kernen, is het verschil tussen de gemiddelde druksterkte en de rekenwaarde aanzienlijk. Het verschil is onafhankelijk van de techniek en de rekenwaarde bedraagt circa 46% van de gemiddelde druksterkte.

De volgens de sondering aanwezige dunne kleine kleilaagjes zijn niet direct terug te vinden in druksterkten van de kernen. Wel valt de druksterkte van enkele monsters sterk terug ten opzichte van de andere, wat het gevolg kan zijn van klei-insluitingen. De druksterkte is niet afhankelijk van de diepte maar wordt minder naar de buitenkant van de kolom. Dit kon worden waargenomen uit de resultaten van de drukproeven op de kernen uit van het massief. De testen op de horizontale kern uit kolom 20 bevestigden dit. Dit kan veroorzaakt zijn door een lager cementgehalte als gevolg van een slechtere menging bij een vergrotende straal.

De sterkte en stijfheid zijn sterk afhankelijk van de volumieke massa en het cementgehalte van de kolom. De water/cement-factor speelt hierbij een cruciale rol. Een hoge water/cement-factor geeft aan dat er verhoudingsgewijs veel water aanwezig is, dat zowel direct als indirect een slechte uitwerking heeft op de sterkte van het materiaal. Direct vanwege de aanwezigheid van ongebonden water in het materiaal en indirect omdat het water de volumieke massa verlaagt. De sterkte en stijfheid nemen toe bij afnemende water/cement-factor, toenemend cementgehalte en toenemende volumieke massa.

De uiteindelijke water/cement-factor in de kolom wordt onder andere bepaald door de waterafgifte aan het omringende grondmassief. In klei en veen zal praktisch geen uittreding plaatsvinden van water. Wellicht is dan sprake van een heel ander sterktebeeld. Dit kan mede een oorzaak zijn van lagere sterkte van groutkolommen in klei- en veenlagen.

Hoewel jetgroutconstructies niet of nauwelijks op trek worden belast, wordt een eis voor de treksterkte vaak wel in het bestek opgenomen. De gemiddelde treksterkte heeft een waarde tussen 1/5 en 1/7 van de druksterkte en is verkregen via een splijttrekproef. Deze proef geeft over het algemeen een iets te hoge waarde. Indien de verhouding tussen trek- en druksterkte van beton wordt aangehouden van 1:10, geeft dit een voldoende betrouwbare waarde.

## III.4 Diameter kolom

### III.4.1 Inleiding

Het onderwerp van dit hoofdstuk betreft de diameter van de jetgroutkolom. Tijdens de proef in Den Haag is de diameter bepaald met de zogenaamde spin. Na uitharding en uitgraven van de kolommen is de werkelijke diameter bepaald en deze blijkt goed overéén te komen met de spinmeting in de verse kolommen. Met het uitvoeren van spinmetingen kan de diameter van de gemaakte kolom worden bepaald. In hoofdstuk I.5.4 is aangegeven dat ook weleens wordt geprobeerd aan de hand van de volumieke massa van de retourspoeling een uitspraak te doen over de gemaakte diameter. De vraag is hoe gebeurt dit en wat is de nauwkeurigheid van een dergelijke berekening. In paragraaf III.4.2 komt dit aan de orde.

Bovengenoemde methoden betreffen diameterbepalingen die achteraf worden uitgevoerd. Bij het maken van jetgroutkolommen vormt het bepalen van de uitvoerparameters voor het verkrijgen van een voorgeschreven resultaat (waaronder de diameter) de grootste moeilijkheid. Het is wenselijk voor het uitvoeren van de proef een indicatie te hebben van de te realiseren diameter bij bepaalde uitvoeringsparameters. De diameter wordt voor het grootste deel bepaald door de eigenschappen van de snijstraal. Deze straal staat dan ook centraal in de paragrafen III.4.3 tot en met III.4.5, waarin het hydraulisch vermogen (III.4.3), de kinetische energie (III.4.4) en de impuls (III.4.5) van de straal nader worden beschouwd. Geprobeerd wordt een verband te leggen tussen deze grootheden en de diameter van de kolom.

### III.4.2 Diameterbepaling aan de hand van volumieke massa retour

In paragraaf 5.4. van deel I is gesproken over de diameterbepaling aan de hand van het volumieke gewicht van de retourspoeling. De berekening is in de betreffende paragraaf gegeven. In eerste instantie is aangenomen dat het kolommengsel homogeen is, gelijk is van samenstelling als de retourspoeling, géén uitwisseling plaatsvindt met het omliggende grondmassief en complete menging van het geïnjecteerde grout met de grond optreedt. De lucht vindt een uitweg naar het oppervlak en blijft niet achter in de spoeling. Met behulp van de volumieke massa van de retourstroom kan een mengverhouding worden gevonden tussen grond en grout. De hoeveelheid grout per meter kolom is bekend en de hoeveelheid grond (cilinder van een meter hoog) laat zich eenvoudig berekenen. Op deze wijze wordt gesteld een diameterbepaling te kunnen doen. Aan de hand van de gegevens van de jetgroutproef in Den Haag zal deze berekeningswijze hierna worden getoetst.

Kolom 14 dient als voorbeeldkolom. Het injectiedebiet (snijdebiet) bedraagt 300 ltr/min, bij een treksnelheid van 17 cm/min. Het totale injectiedebiet per meter kolom bedraagt dus: 1765 ltr. Er zijn nog twee belangrijke variabelen, de volumieke massa van de spoeling, deze wordt gemeten en de volumieke massa van de grond (zand+water). Volgens boring GB-07 (zie bijlage II.3) en paragraaf III.2.2 heeft de grond een natte volumieke massa van circa  $1,99 \text{ ton/m}^3$ . In grafiek III.4.1 is met het injectiedebiet van kolom 14 een verband uitgezet tussen de te meten volumieke massa van de retourstroom en de bijbehorende berekende diameter. Voor verschillende volumieke massa's van de grond is dit uitgevoerd (zie de verschillende lijnen). Gezien de wijze van berekenen en de beperkingen van het computerprogramma Excel was het niet mogelijk de assen om te draaien, wat eigenlijk een betere voorstelling geeft.

Voor kolom 14 zijn retourmonsters aan de spoeling onttrokken en heeft een bepaling van de volumieke massa plaatsgevonden. De volumieke massa bedroeg 1,97 tot  $1,98 \text{ ton/m}^3$ . Uitgaande van de aannamen zouden deze volumieke massa's een zeer grote kolomdiameter ( $>5 \text{ m}$ ) betekenen. Uit metingen blijkt dat dit niet het geval is. Een verklaring moet worden gezocht in de sterke wateruittreding tijdens het jetgrouten. Deze wateruittreding is berekend in paragraaf III.2.2 en betreft 10% tot 30% van het totale aanwezige watervolume. In de betreffende paragraaf is met behulp van de



gemeten diameter de wateruittreding berekend. Deze betrof voor kolom 14 circa 20 %. Met dit gegeven wordt grafiek III.4.1 aangepast, resulterend in grafiek III.4.2.

De lijn waarbij de volumieke massa van de grond  $1990 \text{ kg/m}^3$  bedraagt, snijdt het punt (2,25; 1970), de volumieke massa van de retourspoeling en diameter op NAP -10,0 m van kolom 14. De grafiek III.4.2 maakt het mogelijk een gevoeligheidsanalyse van de resultaten uit te voeren voor wijzigingen in de invoer van de berekening.

Stel nu dat de volumieke massa van de retourspoeling niet  $1,97 \text{ ton/m}^3$  bedraagt maar  $1,98 \text{ ton/m}^3$ , een verandering die gezien de nauwkeurigheid van de meting ( $\pm 0,005 \text{ ton/m}^3$ ) zeer goed mogelijk is. Dit betekent een toename van de volumieke massa van de retourspoeling van 0,5 %. Het gevolg is een diametertoename van circa 20 cm, procentueel een toename van 9 %. Dit betreft alleen nog maar de nauwkeurigheid van de meting. Gezien de grote inhomogeniteit van het kolommengsel is een variatie in volumieke massa van de retourspoeling van  $0,03 \text{ ton/m}^3$  niet uitgesloten (zie bijvoorbeeld kolom 16B, tabel II.2). De variatie in diameter loopt dan op naar enkele tientallen van procenten.

Een andere invoerparameter betreft de volumieke massa van de aanwezige grond. Het steken van ongeroerde monsters geschiedt zeer nauwkeurig, maar een kleine verandering van het monster ten opzichte van zijn oorspronkelijke staat treedt al gauw op. Stel dat de volumieke massa van de grond niet  $1,99 \text{ ton/m}^3$  bedraagt maar  $1,95 \text{ ton/m}^3$ , een afname van 2 %. De berekende diameter neemt daardoor toe met 73 cm, een toename van 32 %. Kijkend naar de analyse van de boring GB-07 uit bijlage II.3, is een variatie in volumieke massa over de diepte van  $0,04 \text{ ton/m}^3$  zeer goed mogelijk.

In paragraaf II.2.2 is reeds gesproken over de nauwkeurigheid waarmee de wateruittreding tijdens het groutproces kan worden bepaald. Een verschil in uittreding van circa 5 % met de berekende waarde van 20 % is zeer goed mogelijk. In grafiek III.4.3 is de berekende diameter uitgezet tegen de volumieke massa van de retourspoeling bij verschillende procentuele uittredingen (20 % en 25 %). De massa van de aanwezige grond is constant gehouden op  $1990 \text{ kg/m}^3$ . Bij een diameter van circa 2,25 m leidt het verschil in wateruittreding tot een diameter verschil van ongeveer 35 cm (15,5 %).

Indien de diameter van de kolom moet worden berekend met behulp van de volumieke massa van de retourspoeling zal dus een nauwkeurige bepaling moeten worden gedaan van de volumieke massa van de aanwezige grond en de wateruittreding tijdens het groutproces. Een goede waarde van de wateruittreding is bijzonder moeilijk te verkrijgen en zal bovendien sterk variëren afhankelijk van grondsoort, uitvoeringsparameters e.d. Omdat ook de nauwkeurigheid van de bepaling van de massa van de retourspoeling en aanwezige grond niet voldoende groot is, kan geen nauwkeurige diameterbepaling worden gedaan op de wijze zoals hiervoor is aangegeven. In het uiterste geval kan met een dergelijke berekening een indicatie van de diameter worden verkregen.

### III.4.3 Hydraulisch energie snijstraal

In I.5.3.6 is gesproken over het hydraulisch vermogen van de snijstraal. Het begrip is vertaald uit het Duits (Hydraulische Leistung) en wordt bepaald volgens [Lit.17]:

$$E = \mu^2 \cdot \frac{Q \cdot p}{600}$$

waarin,

E het hydraulisch vermogen in kW;

Q het snijdebiet in ltr/min;

P de snijdruk in bar;

$\mu$  een dimensieloze effectiviteitsindex.

Waarschijnlijk wordt de waarde van de effectiviteitsindex  $\mu$  bepaald door de grondsoort. Dit kon niet worden nagegaan. Het debiet wordt in de literatuur aangegeven met de letter V. Het is gebruikelijk

hiervoor de letter Q te nemen. Het hydraulische vermogen wordt bepaald door de belangrijkste kenmerken van de snijstraal: de druk en het debiet, en geeft een indicatie van het eroderend vermogen van de snijstraal. Indien een vertaling naar de diameter van de kolom wordt gemaakt, moet eigenlijk de treksnelheid in de formule worden opgenomen. Immers is, naast het vermogen van de straal, bepalend, hoelang de straal de tijd krijgt de omringende grond te eroderen. De grootte verschuift daarmee van vermogen naar energie per meter kolom. De nieuwe uitdrukking wordt, in standaardeenheden:

$$U_h = \frac{Q \cdot p}{L_s}$$

waarin,

$U_h$  de hydraulische energie per meter kolom in J/m;

Q het snijdebiet in  $m^3/s$ ;

p de snijdruk in  $N/m^2$ ;

$L_s$  de treksnelheid in m/s;

Omdat 1 Joules gelijk staat aan 1 Nm kan de hydraulische energie per meter kolom ook als een kracht worden gezien. Uitgedrukt in de eenheden zoals de snijdruk, het snijdebiet en de treksnelheid in de jetgrouttechniek worden gebruikt, wordt de formule:

$$U_h = 10 \cdot \frac{Q \cdot p}{L_s}$$

$U_h$  de hydraulische energie per meter kolom in kJ/m;

Q het snijdebiet in ltr/min;

p de snijdruk in bar;

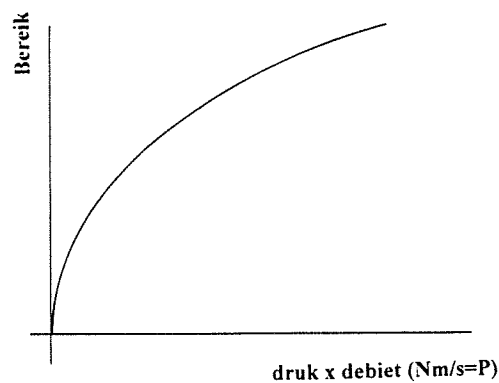
$L_s$  de treksnelheid in cm/min

De factor 10 is een verrekening in verband met de eenheden. Voor alle kolommen is deze hydraulische energie berekend en uitgezet ten opzichte van de gemiddelde behaalde diameter in grafiek III.4.4. Voor de gemiddelde diameter is gebruik gemaakt van de resultaten zoals die zijn bepaald na uitharding van de kolom, vermeld in tabel II.5. Er ontstaat een soort hyperboolvormige curve, hetgeen enigszins in overeenstemming is met de verwachting en afbeelding I.5.14. Druk en debiet zijn als het ware een indicatie voor de sterkte van de straal. De treksnelheid is een maat voor de tijd die de straal heeft om de grond te eroderen.

De loop van de curve in grafiek III.4.4 wordt feitelijk door een drietal verbanden bepaald. Als eerste zal een toenemende sterkte van de straal een toenemend bereik opleveren. De sterkte van de straal wordt bepaald door de druk en het debiet. Indien kwalitatief het produkt van de druk en het debiet (eenheid vermogen) wordt uitgezet tegen het bereik van de straal, ontstaat hoogst waarschijnlijk een curve zoals afbeelding III.4.1. De toename van het bereik neemt af bij toenemende afstand (bereik) en een gelijke stap in toename van vermogen. Of te wel de lijn zal steeds vlakker gaan lopen. Hoe groter het bereik hoe meer vermogen geleverd moet worden om het bereik te vergroten. De steeds groter wordende afstand door de suspensie verkleint het effectieve erosievermogen. De curve zal nooit horizontaal gaan lopen omdat een vergroting van het vermogen theoretisch altijd een diametervergroting oplevert.

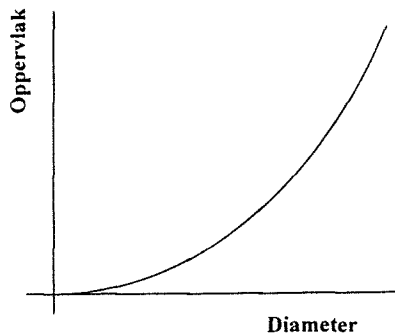
kolomnummer	Hydraulische energie $U_h$ in kJ/m	gemiddelde diameter in m
1 (3 fasen)	31500	2,02
2 (3 fasen)	40500	2,29
3 (3 fasen)	34239	2,24
4 (3 fasen)	34239	2,05
5 (3 fasen)	39375	2,16
6 (3 fasen)	36000	2,22
7 (3 fasen +)	45000	1,83
8 (3 fasen +)	32625	1,71
9A (3 fasen)	12720	1,54
10A (3 fasen)	8100	1,29
11 (2 fasen)	50000	2,11
12 (2 fasen)	73500	2,43
13 (2 fasen)	69000	2,23
14 (2 fasen)	81176	2,30
16B (2 fasen)	81176	2,31
17A (2 fasen)	16200	1,62
17B (2 fasen)	18286	1,86
18A (2 fasen)	16200	1,82

Tabel: III.18: hydraulische energie snijstraal en gemiddelde diameter kolommen. (bron: tabel II.5)

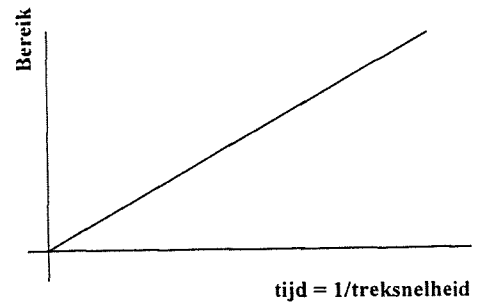


Afb. III.4.1: kracht snijstraal versus bereik.

Een tweede mee te nemen aspect is de toename in oppervlak of inhoud van een cirkel of kolom bij toenemende straal. In afbeelding III.4.2 is dit zichtbaar gemaakt. Dit staat los van de redenering over de sterkte van de straal en betekent dat voor het vergroten van de diameter een extra hoeveelheid grond moet worden geërodeerd. Het oppervlak als functie van de straal levert immers een dalparabool op



Afb. III.4.2: diameter versus oppervlak.



Afb. III.4.3: tijd versus bereik.

Het moeilijkste element in de beschouwing van de hydraulische energie is de tijd in de vorm van de draai- en treksnelheid. In literatuur 28 wordt dit ook aangegeven als zijnde het grootste probleem bij het modelleren van de straal. Uitgangspunt is dat de draaisnelheid aan de treksnelheid is gekoppeld door middel van het begrip snijhoogte (zie I.4.3). Nu wordt alleen gekeken naar de treksnelheid. Nemen we het fysisch onmogelijke geval dat de sterkte van de straal gelijk blijft tijdens het eroderen en de boorbuis niet roterend wordt getrokken, dan zal het bereik naar verwachting rechtlijnig toenemen bij afnemende treksnelheid. Zie afbeelding III.4.3.

Afbeelding III.4.3 mag niet worden vergeleken met de afbeeldingen I.5.10 t/m I.5.12 waar eveneens de treksnelheid is uitgezet tegen het bereik (de diameter). In deze afbeeldingen uit het eerste deel worden veel meer aspecten meegenomen dan in afbeelding III.4.3, die geldt in het theoretische geval zonder verlies in sterkte van de snijstraal.

Een combinatie van de curves, zoals die gegeven zijn in afbeelding III.4.1 t/m III.4.3 leidt tot de curve uit grafiek III.4.4. De invloed van de afzonderlijke curves op de totaal curve kan niet worden ingeschat. Gezien de vorm van de curve in de grafiek heeft het vermogen van de straal een grote invloed. Eigenlijk is het niet juist één lijn te trekken door de punten in de grafiek die bepaald zijn uit verschillende systemen. Per systeem dient feitelijk een andere lijn getrokken te worden, omdat het erosieproces per systeem anders verloopt. Omdat daarvoor het aantal punten te weinig is, wordt dit onderscheid in systeem hier niet gemaakt.

Indien in de praktijk met het begrip hydraulische energie gewerkt wordt, moet proefondervindelijk de ligging van de curve bij bepaalde grondeigenschappen en per systeem worden vastgesteld. Dit vraagt uiteraard een zeer uitgebreid onderzoek.

Daarnaast wordt hier vermeld dat de analyse gebaseerd is op het gebruik van een tweetal snijnozzles. Een verandering van dit aantal kan effecten hebben op de resultaten. Helaas is een vergelijking met andere aantallen snijnozzles niet mogelijk, omdat gedurende het experiment daarmee niet gevarieerd is. De sterkte van de snijstraal zal toenemen bij vermindering van het aantal snijnozzles, de draaisnelheid moet echter toenemen om een gelijke snijhoogte te hebben.

Een nadere beschouwing van grafiek III.4.4 leert dat het 3 fasen systeem bij gelijke hydraulische energie een grotere diameter oplevert dan het 3 fasen plus systeem en meer boven de gemiddelde lijn ligt dan de andere systemen. Een verklaring hiervoor ligt in het verschil in snelheid van de snijvloeistof. Bij vergelijking van kolom 5, 8 en 13 worden de volgende waarden gevonden:

kolomnummer	gemid. snelheid vloeistof in m/s
5	246
8 (2 <sup>e</sup> deel)	203
13	199

Tabel III.19: vergelijking snelheid  
snijvloeistof.

De snelheid is bepaald door het debiet te delen op het oppervlak van de nozzles. Hoewel de snijdrukken ongeveer gelijk zijn, is de gemiddelde snelheid en dus het debiet van de snijvloeistof in geval van het 3 fasen systeem hoger dan het 2 of 3 fasen plus systeem. Dit is toe te schrijven aan het soort injectievloeistof. De injectievloeistof bij het 3 fasen systeem is water, bij de andere systemen betreft het een injectie van het veel zwaardere grout. Het grout ondervindt een grotere wrijving in de leidingen (groter drukverlies bij gelijk debiet of lager debiet bij gelijke druk).

Het begrip hydraulische energie per meter kolom kan goed worden toegepast bij het voorspellen van de resultaten van jetgroutwerken. De nauwkeurigheid van de voorspelling neemt toe indien onderscheid wordt gemaakt tussen de verschillende systemen en het aantal gebruikte snijnozzles. Om dit onderscheid te maken is veel meer data benodigd. Belangrijk is ook dat de resultaten alleen betrekking hebben op de grond zoals die in Den Haag aanwezig is. Experimenten op andere locaties, in andere grondsoorten zullen ook andere resultaten geven.

Omdat de drukaflezing aan de hogedruk-pomp plaatsvindt en de druk nabij de nozzle door drukverlies in de leidingen en nozzles lager is, zal de werkelijke hydraulische energie minder zijn. Het drukverlies is afhankelijk van de lengte en dikte van de leidingen, de dichtheid van de vloeistof, en de snelheid en het debiet van de straal. In de volgende paragraaf wordt hier nader op ingegaan

#### III.4.4 De kinetische energie van de snijstraal

In de vorige paragraaf is de relatie tussen eigenschappen van de snijstraal en het diameterresultaat gelegd via het begrip hydraulische energie, bepaald uit de druk en het debiet van de snijstraal. Kort is ingegaan op het snelheidsverschil tussen lichtere en zwaardere injectievloeistof bij gelijke snijdrukken. Deze paragraaf behandelt de relatie tussen de snelheid van de vloeistof en diameterresultaat via het begrip kinetische energie. De kinetische energie wordt uitgedrukt per meter kolom en kan daarom vergeleken worden met de hydraulische energie per meter kolom. De uitdrukking voor de kinetische energie bedraagt:

$$U_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot Q}{L_s} \cdot \left[ \frac{Q}{A_{noz}} \right]^2$$

of wel,

$$U_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot Q^3}{L_s \cdot A_{noz}^2}$$

waarin,

$U_k$  de kinetische energie van de snijstraal in J/m;

$\rho$  de volumieke massa van de snijstraal in kg/m<sup>3</sup>;

$Q$  het snijdebiet in m<sup>3</sup>/s;

$L_s$  de treksnelheid in m/s;

$A_{noz}$  het oppervlak van de snijnozzles in m<sup>2</sup>.

In andere eenheden wordt de formule:

$$U_k = 0,01389 \cdot \frac{\rho \cdot Q^3}{L_s^2 \cdot Anoz^2}$$

waarin,

$U_k$  de kinetische energie van de snijstraal in kJ/m;

$\rho$  de volumieke massa van de snijstraal in  $\text{kg/m}^3$ ;

$Q$  het snijdebiet in ltr/min;

$L_s$  de treksnelheid in cm/min;

$Anoz$  het oppervlak van de snijnozzles in  $\text{mm}^2$ .

Voor de verschillende snijstralen levert dat de volgende kinetische energie  $U_k$  op:

kolomnr.	kinetische energie $U_k$ in kJ/m	gemiddelde diameter in m
1 (3 fasen)	23276	2,02
2 (3 fasen)	28700	2,29
3 (3 fasen)	22934	2,24
4 (3 fasen)	22934	2,05
5 (3 fasen)	26374	2,16
6 (3 fasen)	25977	2,22
7 (3 fasen +)	24563	1,83
8 (3 fasen +)	24650	1,71
9A (3 fasen)	10179	1,54
10A (3 fasen)	6241	1,29
11 (2 fasen)	42614	2,11
12 (2 fasen)	58391	2,43
13 (2 fasen)	48591	2,23
14 (2 fasen)	57167	2,30
16B (2 fasen)	57167	2,31
17A (2 fasen)	12807	1,62
17B (2 fasen)	12150	1,86
18A (2 fasen)	12807	1,82

Tabel: III.20: kinetische energie snijstraal en gemiddelde diameter kolommen.  
(bron: tabel II.5)

In grafiek III.4.5 is de energie uitgezet tegen de behaalde diameter. Ook in dit geval kan een soort hyperbool worden waargenomen. Door het gebruiken van de snelheid van spoeling wordt een betere waarde van het energieniveau verkregen. Het verschil tussen de hydraulische en kinetische energie bij een gelijke kolom komt door een te hoge waarde voor de druk bij het berekenen van de hydraulische energie. Door drukverlies in leidingen en nozzles is de druk aan de nozzle-opening lager dan aan de pomp. In onderstaande berekening wordt het drukverlies bepaald.

Indien de uitstroomsnelheid aan de nozzles wordt bepaald op basis van het uitstroomvolume per oppervlakte eenheid geldt:

$$v = \frac{Q}{Anoz}$$

waarin,

$v$  de snelheid van de vloeistof in m/s;

$Q$  het snijdebiet in  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$Anoz$  het snijnozzle-oppervlak in  $\text{m}^2$ .

Indien de snelheid wordt bepaald op basis van druk aan de pomp geldt:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{\text{pomp}}}{\rho}}$$

waarin,

v de snelheid van de vloeistof in m/s;

$p_{\text{pomp}}$  de druk bij de pomp in  $\text{N/m}^2$ , of  $\text{kg/ms}^2$ ;

$\rho$  de vol.massa van de spoeling in  $\text{kg/m}^3$ .

De snelheid bepaald met het volume en de nozzlegrootte geeft de enige juiste waarde. Met behulp van de formule voor snelheid berekend met de druk, kan een schatting gedaan worden van het drukverlies over de leidingen en nozzles, volgens:

$$\frac{Q}{A_{\text{noz}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{\text{pomp}} - p_{\text{verlies}})}{\rho}}$$

waarin,

$p_{\text{verlies}}$  het drukverlies in leidingen en nozzles is uitgedrukt in  $\text{N/m}^2$ .

Voor de verschillende snijstralen van de kolommen levert het de drukverliezen op die gegeven zijn in tabel III.21. Gemiddeld gezien is een drukverlies van circa 27,5 % opgetreden. Dit drukverlies kan worden verdeeld in een verlies ten gevolge van wrijving in de leidingen en een verlies in de nozzle. Het drukverlies in de leiding (en boorbuis) is afhankelijk van de dichtheid van de spoeling, de lengte en dikte van de leiding, de snelheid en de viscositeit van de spoeling. Het verlies in de nozzle is afhankelijk van de vorm, grootte en het materiaal van de nozzle en de eigenschappen van de spoeling.

kolomnr.	uitstroom snelheid bepaald met druk in m/s	uitstroom snelheid bepaald met debiet in m/s	drukverlies in leidingen en nozzles in bar	druk aan de pomp in bar	uitstroom druk in bar	uitstroom druk/druk aan de pomp
1	300	258	117	450	333	0,74
2	300	253	131	450	319	0,71
3	300	246	149	450	301	0,67
4	300	246	149	450	301	0,67
5	300	246	149	450	301	0,67
6	300	256	125	450	325	0,72
7	234	173	204	450	246	0,55
8	234	203	111	450	339	0,75
9A	283	253	79	400	321	0,80
10A	245	215	68	300	231	0,77
11	255	236	74	500	462	0,85
12	252	225	101	490	389	0,79
13	237	199	136	460	324	0,70
14	237	199	136	460	324	0,70
16B	237	199	136	460	324	0,70
17A	239	212	94	450	356	0,79
17B	231	189	134	400	266	0,66
18A	239	212	94	450	356	0,79

Tabel III.21: drukverlies, berekend uit snelheden.

Voor het drukverlies in de leiding zijn de volgende eenheidswaarden gegeven:

debiet in ltr/min	diameter leiding in m	snelheid in m/s	dichtheid (vol. massa) in kg/m <sup>3</sup>	drukverlies per meter in bar
300	0,025	10,19	1000 water	0,293
200	0,025	6,79	1000 water	0,144
300	0,025	10,19	1580 wcf 0,8	0,946
200	0,025	6,79	1580 wcf 0,8	0,466
100	0,025	3,40	1580 wcf 0,8	0,138
300	0,025	10,19	1660 wcf 0,67	1,080
200	0,025	6,79	1660 wcf 0,67	0,531
100	0,025	3,40	1660 wcf 0,67	0,158
300	0,025	10,19	1500 wcf 1,0	0,736
200	0,025	6,79	1500 wcf 1,0	0,362
100	0,025	3,40	1500 wcf 1,0	0,108

Tabel III.22: drukverlies in leidingen. (bron: VSB ism Keller Grundbau)

Bij grote lengte van de leidingen en hoge debieten loopt het drukverlies aanzienlijk op. In Den Haag betrof de lengte van de leidingen circa 40 meter, bij kolom 14 geeft dat een drukverlies van 43 bar. Dit zou betekenen dat het drukverlies over de boorbuis en de nozzles nog circa 90 bar moet zijn.

Het werken met het begrip kinetische energie lijkt gezien het bovenstaande beter dan te rekenen met hydraulische energie. Toch wordt met dit tweede begrip veel gewerkt, met name bij de firma Keller uit Duitsland. Belangrijk verschil is dat het materieel van deze firma is uitgerust met drukmeters ter plaatse van de boorbuis. Verliezen in de leidingen worden op deze wijze niet meegenomen in de bepaling van het hydraulisch vermogen of energie.

In de berekening van de kinetische energie van de snijstraal heeft de volumieke massa van de vloeistof een positief effect op de hoeveelheid energie. Een zwaardere straal wordt echter eerder instabiel dan een lichtere, waardoor de diameter bij lichtere vloeistoffen feitelijk hoger zou moeten liggen. Deze ogenschijnlijke tegenstrijdigheid wordt voor een deel te niet gedaan omdat het debiet bij gelijke druk in geval van een zwaardere straal lager is, en dus ook de snelheid.

### III.4.5 Impuls van de snijstraal

Op een soortgelijke wijze als in geval van de beide energie-uitdrukkingen kan voor de snijstraal de impuls worden berekend. Impuls is gelijk aan massa maal snelheid, en ook hier geldt dat dit per meter kolom wordt bepaald. In standaard eenheden leidt de formule voor het bepalen van de impuls van de straal per meter kolom:

$$P = \frac{\rho \cdot Q^2}{L_s \cdot Anoz}$$

waarin,

P de impuls van de snijstraal in N.s/m;

$\rho$  de vol. massa van de vloeistof in kg/m<sup>3</sup>;

Q het snijdebiet in m<sup>3</sup>/s;

L<sub>s</sub> de treksnelheid in m/s;

Anoz het oppervlak van de snijnozzles in m<sup>2</sup>.

Indien gebruik wordt gemaakt van andere eenheden geldt:

$$P = 0,00167 \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{L_s \cdot Anoz}$$

waarin,



P de impuls van de snijstraal in kN.s/m;  
 ρ de vol. massa van de vloeistof in kg/m<sup>3</sup>;  
 Q het snijdebiet in ltr/min;  
 Ls de treksnelheid in cm/min;  
 Anoz het oppervlak van de snijnozzles in mm<sup>2</sup>.

De impuls voor de verschillende snijstralen van de kolommen zijn vermeld in onderstaande tabel:

kolomnr.	impuls snijstraal in kNs/m	gemiddelde diameter in m
1 (3 fasen)	181	2,02
2 (3 fasen)	227	2,29
3 (3 fasen)	187	2,24
4 (3 fasen)	187	2,05
5 (3 fasen)	215	2,16
6 (3 fasen)	204	2,22
7 (3 fasen +)	284	1,83
8 (3 fasen +)	241	1,71
9A (3 fasen)	81	1,54
10A (3 fasen)	58	1,29
11 (2 fasen)	361	2,11
12 (2 fasen)	518	2,43
13 (2 fasen)	489	2,23
14 (2 fasen)	575	2,30
16B (2 fasen)	575	2,31
17A (2 fasen)	121	1,62
17B (2 fasen)	129	1,86
18A (2 fasen)	121	1,82

Tabel: III.23: impuls snijstraal en gemiddelde diameter kolommen. (bron: tabel II.5)

Uitgezet in een grafiek (III.4.6) levert het een soortgelijk plaatje op als voor de beide energie-uitdrukkingen. Ook hier geldt dat de impuls berekend is van de beide snijstralen. Door de waarden van de impuls te vermenigvuldigen met de helft van de snelheid wordt de kinetische energie weer gevonden.

Als de treksnelheid in de uitdrukking voor de impuls wordt weggelaten ontstaat als het ware een uitdrukking van de kracht van de beide snijstralen. Omdat de kracht van de straal op zich zelf niet direct gekoppeld kan worden aan de diameter, zonder de treksnelheid te gebruiken, voegt een dergelijke eigenschap niets toe aan de beschouwing van relaties tussen snijstraal en diameter en is dan ook niet uitgevoerd.

### III.4.6 Resumé

Het bepalen van de juiste diameter van een gemaakte jetgroutkolom aan de hand van de volumieke massa van de retourspoeling is bijzonder moeilijk. Indien de wateruittreiding wordt verwaarloosd is de berekende diameter veel groter dan de werkelijke. De moeilijkheid ligt in het voorspellen van de hoeveelheid wateruittreiding en volumieke massa van de aanwezige grond. Omdat beide gegevens zeer moeilijk exact te verkrijgen zijn en de uitkomst van een diameterberekening zeer gevoelig is voor kleine veranderingen in deze beide gegevens, is het bepalen van de exacte diameter op basis van de volumieke massa van de retourspoeling voor alsnog niet mogelijk. Hoogstens kan een indicatie worden verkregen van de gevormde diameter. Nader onderzoek is nodig om na te gaan of de

benodigde gegevens voor het op deze wijze bepalen van de diameter van de kolom met voldoende nauwkeurig verkregen kunnen worden.

De snijstraal bepaald bijna volledig de diameter van de kolom. Voor het vaststellen van relaties tussen invoerparameters en diameterresultaat wordt alleen naar deze straal gekeken. Als de treksnelheid wordt opgenomen in de formule van het hydraulisch vermogen, verandert het resultaat van eenheid. De eenheid gaat van vermogen naar energie per meter kolom. Dit is een juiste manier om een relatie te leggen tussen het energieniveau van de snijstraal en de gemaakte diameter van de jetgroutkolom. De hydraulische energie per meter kolom wordt niet geheel juist bepaald, omdat in geval van de jetgroutproef in Den Haag, de snijdruk aan de pomp alleen bekend is. Het drukverlies in leidingen en nozzles dat gemiddeld circa 27,5% van de pompdruk bedraagt (en varieert tussen 15%- en 45%), zal in mindering moeten worden gebracht.

Als de druk en het debiet consequent bij de boorstelling worden geregistreerd, kan met de hydraulische energie per meter kolom een goede vergelijking van jetgroutprestaties worden gemaakt. Indien de registratie aan de pomp plaatsvindt, kan beter met de kinetische energie per meter kolom gerekend worden. Doordat de snelheid van de uitstromende vloeistof als invoer wordt gebruikt, wat een hard gegeven is, geeft de berekening direct de juiste waarde voor de hoeveelheid snijenergie per meter kolom. Verliezen in aanvoerleidingen worden dan niet meegenomen in de berekening.

Indien zowel de hydraulische als de kinetische energie voor een kolom worden uitgezet tegen de behaalde diameter, ontstaat een soort hyperboolvormige curve. Dit is enigszins in overeenstemming met de verwachting. De diameter toename per een bepaalde hoeveelheid snijenergie zal afnemen, bij toenemende diameter. De ligging en vorm van de curve worden bepaald door het gebruikte systeem en de grondeigenschappen. Het aantal snijnozzles heeft ook een invloed op de lijn, maar in mindere mate als het systeem en de grond. Uitgebreide proeven zijn noodzakelijk om de curves bij bepaalde grondsoorten en jetgroutsystemen vast te kunnen leggen. Uiteraard is dit een bijzonder kostbare activiteit. Toch maken dergelijke definities van het energieniveau van de snijstraal het beter mogelijk invoerparameters met elkaar te vergelijken en resultaten te voorspellen.

Ook de uitdrukking van de impuls van de snijstraal kan gebruikt worden bij het voorspellen van het resultaat van de diameter. Ook hier vormt zich een hyperboolvormige curve indien de impuls wordt uitgezet tegen de behaalde diameter. Het berekenen van de snijkraft geeft alleen een indicatie van de sterkte van de straal. De treksnelheid moet worden meegenomen indien een relatie met de diameter moet worden gelegd. Geschiedt dit dan ontstaat de uitdrukking voor de impuls van de snijstraal.

## III.5 Conclusie

Op basis van hetgeen in de delen II en III is beschreven worden de volgende conclusies getrokken:

### Jetgroutproef:

- Het 2 fasen systeem jetgrouten is in verband met de sterkte-eisen het meest gunstige systeem voor het uitvoeren van de jetgroutboog ten behoeve van de bouw van de tramtunnel;
- Kolom 14 heeft de beste uitvoeringsparameters en voldoet aan een goede diameter en heeft voldoende sterkte en stijfheid;
- Het boren en beproeven van kernen geeft het meest representatieve beeld van de sterkte en stijfheid van het groutmateriaal in de uiteindelijke situatie;
- Resultaten van het nemen en beproeven van monsters van retour- en kolomspoeling hebben niet bijgedragen aan de keuze van de modelkolom;
- De voorspelling en berekening van het benodigde cementgehalte van de kolom voor de sterkte-eis heeft goed gewerkt. De berekende schatting kwam echter niet overeen met de werkelijke hoeveelheid cement in de kolom;
- Een uitgevoerde spinmeting geeft een goed beeld van de diameter van de kolom;
- De kans op slagen van een spinmeting is gering (zeker op grotere diepte). De toepasbaarheid is dan ook gering en de meting moet bij voorkeur worden beperkt tot proefkolommen;
- Het raster gekozen voor het massief geeft goede aansluitingen en overlappen tussen de kolommen;
- De positie van de onder- en bovenkant van de kolommen wordt op een goede wijze beheerd;
- Op grond van een faalkansberekening is het verantwoord om met de uitvoeringsparameters van kolom 14 voor de jetgroutboog een rasterafstand te kiezen van 1,82 m;
- Bij klei- en veenlagen moet rekening worden gehouden met geringe diameter terugvallen (circa 25-40 cm). Boven en onder deze slechte lagen is de diameter aanzienlijk groter dan gemiddeld.

### Volumieke massa:

- Tijdens het jetgrouten treedt ongeveer 10% tot 30% van het aanwezige en geïnjecteerde water uit de kolom, het grondpakket in;
- Het exacte percentage van de wateruittrekking is moeilijk te bepalen en met behulp van de resultaten van de jetgroutproef in Den Haag is geen duidelijk verband af te leiden tussen dit percentage en andere parameters;
- De volumieke massa van de retourspoeling is over de hoogte nagenoeg homogeen en varieert nauwelijks bij verschillend uitgevoerde kolommen;
- De volumieke massa van de kolomspoeling varieert sterker en wordt hoger op grotere diepte als gevolg van het uitzakken van de kolomspoeling en het uittreden van water uit de kolom, bleeding genoemd. Door een hogere hydrostatische druk onderin de kolom verloopt het uittreden van water daar sneller als bovenin de kolom;
- Tot bleeding wordt zowel het uitzakken van de zwaardere delen van de spoeling, als de wateruittrekking gerekend;
- Na verloop van tijd zal over de hoogte van de kolom nagenoeg evenveel water zijn uitgetreden, zodat de uiteindelijke volumieke massa van de uitgeharde kolom niet verloopt over de diepte;
- Op de vrij diepe locatie waar de retourspoeling is onttrokken bedraagt de volumieke massa van de kolomspoeling gemiddeld 1,6% minder dan de volumieke massa van de retourspoeling. Dit geringe percentage geldt hoofdzakelijk voor het 2 fasen systeem jetgrouten;
- Het uitharden van het kolommengsel onder grote druk (in de kolom) leidt tot een hogere volumieke massa dan uitharden in monstercilinders onder een geringe hydrostatische druk;
- Het 3 fasen systeem heeft een groter bleedingeffect ten opzichte van het 2 fasen systeem vanwege meer ongebonden water in de spoeling;
- Het kan mogelijk zijn de monsters van retour- en kolomspoeling dusdanig te bewaren dat dezelfde verschijnselen als in de kolom optreden. Dit kan een onderwerp zijn voor nadere studie.

**Sterkte en stijfheid:**

- De gemiddelde druksterkte van de uitgeharde monsters van retour- en kolomspoeling laten zich slecht vergelijken in verband met het geringe aantal beproevingen waarop de gemiddelde sterkte is gebaseerd en de grote variatie in sterkte;
- Ook hier geldt dat onderzocht kan worden hoe de monsters bewaard kunnen worden, zodat de eigenschappen identiek zullen worden aan die van het uitgeharde mengsel in de kolom;
- Kernen van cementrijke kolommen hebben een aanzienlijk grotere sterkte dan de uitgeharde monsters, dit waarschijnlijk als gevolg van het uitharden onder grotere druk en het uittreden van water;
- Door grotere inhomogeniteit van het kolommengsel ontstaat een grote spreiding in sterkte van het materiaal. Hierdoor bedraagt de rekenwaarde van de druksterkte gemiddeld circa 46% van de gemiddelde druksterkte;
- De sterkte van het verharde kolommengsel neemt af naar de buitenkant van de kolom;
- Het verloop van de sterkte over de hoogte van de kolom kan niet worden vertaald naar de sondering;
- De kleilenzen ter plaatse van de proeflocatie zijn te dun om zichtbare invloed te hebben op het resultaat van sterkte en stijfheid;
- De sterkte en stijfheid nemen toe bij toenemende volumieke massa en cementgehalte;
- De water/cement-factor van het uiteindelijke materiaal bepaald grotendeels de sterkte en stijfheid;
- De splijttreksterkte van de kolommen bedraagt gemiddeld circa 1/5 tot 1/7 van de druksterkte;
- De splijttreksterkte geeft een iets te hoge waarde voor de treksterkte;
- Indien de verhouding tussen trek- en druksterkte van beton wordt aangehouden, dat wil zeggen 1:10, wordt voor de groutboog in Den Haag ruimschoots voldaan aan de treksterkte-eis.

**Diameter:**

- Het bepalen van de diameter van de gemaakte kolom op basis van de volumieke massa van de retourspoeling is bijzonder moeilijk;
- De gevoeligheid van de uitkomst van de berekening voor wijzigingen in invoerparameters is groot;
- Het hydraulisch vermogen moet worden omgezet naar hydraulisch energie om een verband te kunnen leggen met de behaalde diameter;
- De hydraulische energie per meter kolom ten opzichte van de diameter levert een hyperboolvormige curve;
- De waarde van de hydraulische energie per meter kolom is bepaald bij de pomp. Door drukverlies in nozzles en leidingen is de uitstroomenergie veel lager (gemiddeld circa 73% van de oorspronkelijke waarde);
- Als de registratie van de drukken en debieten bij de boorstelling geschiedt, kan de hydraulische energie goed gebruikt worden als indicatie voor het energieniveau van de snijstraal;
- De kinetische energie geeft een betere waarde voor het energieniveau van de snijstraal, omdat hiervoor de snelheid van de vloeistof wordt gebruikt;
- Ook de kinetische energie uitgezet tegen de diameter levert een hyperboolvormige curve op;
- Voor beide energiebeschouwingen geldt dat de ligging van de curve wordt bepaald door het gekozen systeem en de grondeigenschappen. In mindere mate heeft ook het aantal snijnozzles een invloed op de curve;
- Indien de impuls van de snijstraal op dezelfde manier wordt uitgezet, ontstaat weer een soort gelijke curve;
- De kinetische en hydraulische energie per meter kolom bieden mogelijkheden om snijstralen en jetgroutresultaten met elkaar te vergelijken.

---

# **Deel IV: Uitvoeringsaspecten**

---

## Samenvatting deel IV

Uitvoeringsaspecten zijn zeer belangrijk bij het maken van het ontwerp van een jetgroutconstructie. De keuze voor het jetgroutsysteem en de uitvoeringsparameters spelen daarbij een belangrijke rol. Niet alle vragen op het gebied van de uitvoering zijn eenduidig te beantwoorden. Op basis van ervaring worden veelal bepaalde afwegingen gemaakt. De ervaring heeft een grote invloed op de productiviteit en kwaliteit van het gemaakte werk.

Bij de uitvoering van jetgroutkolommen vormt het gebruik van lucht een moeilijk element. De effecten van lucht, het vergroten van het bereik, de diameter, zijn bewezen. Hoeveel de druk en het debiet bij bepaalde injecties zou moeten zijn, is moeilijk aan te geven. Voor kleine, ondiepe kolommen wordt circa 4-6 bar aangehouden. Voor andere kolommen meestal circa 10 bar. Een rekenmodel omtrent de invloed van luchtdruk en debiet is er echter niet. Het verdient daarom aanbeveling om hier in een vervolgonderzoek aandacht aan te schenken.

In het algemeen geldt dat tijdens het jetgrouten aandacht besteed moet worden aan het openhouden van het boorgat. Als het deze weg naar het oppervlak dicht raakt, kan ongewenste drukopbouw in de bodem plaatsvinden. Dit geldt met name bij jetgroutkolommen onder funderingen en in het bijzonder bij het gebruik van lucht.

Minder belangrijk in het uitvoeringsproces is de keuze van het boorkopsysteem, het aantal snij- of vulnozzles en het al dan niet boren met water of grout. Tijdens het boren moet voldoende debiet en druk gebruikt worden om verstoppingen van de nozzles te voorkomen.

Er bestaat onduidelijkheid over de volgorde van uitvoeren van jetgroutkolommen bij horizontale of verticale jetgroutlagen. De keuze is tussen het verspringend uitvoeren van de kolommen of het aanéngesloten maken van de kolommen. Voor beide methodieken zijn voor- en nadelen aan te geven. De proeven in Den Haag (Souterrain) hebben geen duidelijk verschil in resultaten kunnen aantonen. De voorkeur gaat voorlopig uit naar het aanéngesloten uitvoeren in verband met het schoonhouden van het werkerterrein, een lagere kans op het vergeten van kolommen en het risico van boren door een reeds verharde kolom bij sterk wisselende diameters in stoorlagen. Tevens bestaat het idee dat grond naast een verse kolom gemakkelijker wordt geërodeerd. Anderzijds is vastgesteld dat weerkatsing tegen reeds verharde elementen tot grotere diameters in andere richtingen leidt. Nader onderzoek is nodig om de verschillen in resultaten tussen de methodieken te kwalificeren.

Met betrekking tot het uitvoeren van metingen wordt gesteld dat moet kunnen worden volstaan met enkele diameterbepalingen bij de eerste kolommen. Door voldoende veiligheid in te bouwen is de kans op falen van de constructie klein. Bij alle werken dient de grondopbouw nauwkeurig bekend te zijn. De variatie in grondparameters is namelijk bepalend voor de kwaliteit bij vastliggende uitvoeringsparameters. Bij grote trajecten waarover gejetgrout moet worden, wordt aangeraden tussentijds enkele diameterbepalingen te doen (bijv. 1:100).

Het regelmatig uitvoeren van metingen in het werk, zowel diameterbepalingen als hellingmetingen, drukt de produktiesnelheid. Indien voldoende veiligheid is ingebouwd in het ontwerp, moet met enkele metingen in het begin van het werk volstaan kunnen worden. Het is financieel aantrekkelijker nog meer veiligheid in te bouwen dan veelvuldig metingen te verrichten. Voor het bepalen van de sterkte en stijfheid van het groutmateriaal wordt het boren en beproeven van kernen aangeraden. Dit is alleen nodig indien de rekensterkte-eis hoger is dan circa  $2 \text{ N/mm}^2$ , omdat deze sterkte zonder meer behaald kan worden.

De keuze voor het jetgroutsysteem is afhankelijk van de toepassing, de plaatselijke omstandigheden en de voorkeur van de aannemer. Met het 1 fase systeem kunnen kleine sterke kolommen worden

gemaakt. Met het 2 fasen systeem kunnen eveneens aanzienlijke sterkten worden behaald. De diameter kan daarbij aanzienlijk toenemen. Voor minder sterke, maar nog grotere kolommen ligt de keuze voor het 3 fasen systeem het meest voor de hand. Een tussenweg vormt het 2 fasen (water) systeem, waarbij geen lucht wordt gebruikt.

De in te bouwen veiligheid bij het vastleggen van een rasterpatroon en afstand is niet in regels vast te leggen. Op basis van ervaring of resultaten van proeven moet een verantwoord rasterafstand vastgesteld kunnen worden. De mate waarin de bodemopbouw bekend is speelt een rol bij het vastleggen van de veiligheid. Bij kans op stoorlagen moet een aanzienlijke veiligheid worden ingebouwd. Veiligheid kan worden ingebouwd door een kleinere rasterafstand te kiezen of het energieniveau van de snijstraal te verhogen eveneens.

## IV.1 Inleiding

In de voorgaande delen (I t/m III) is meerdere malen opgemerkt dat de uitvoeringsaspecten bij het jetgrouten een zeer belangrijke rol spelen. Het maken van een ontwerp van een jetgroutconstructie vergt over het algemeen weinig tijd en inspanning. De moeilijkheid is het vertalen van het ontwerp, in de vorm van diameter en sterkte, naar uitvoeringsparameters en een systeemkeuze.

Enkele keuzes die bij de uitvoering van dergelijke constructies gemaakt moeten worden, kunnen niet aan de hand van duidelijk geformuleerde regels worden gemaakt en zullen vaak op basis van ervaring en gevoel worden genomen. In dit deel worden aspecten van de uitvoering nader beschouwd en indien mogelijk zal worden aangegeven welke afwegingen gemaakt moeten worden en hoe belangrijk deze zijn voor het resultaat. Hetgeen in dit deel is beschreven komt voort uit gesprekken gevoerd met projectleiders, uitvoerders en constructeurs van Visser & Smit Bouw en uit ervaringen die zijn opgedaan bij het uitvoeren van de proef en de jetgroutboog in Den Haag.

In hoofdstuk IV.2 staat het proces centraal. Dit betreft het boren en het jetgrouten. Het gebruik van lucht en de volgorde van uitvoeren van jetgroutkolommen komen ook aan de orde. Hoofdstuk IV.3 beschrijft de metingen aan het boor- en jetgroutproces en de resultaten ervan. In deel II en III zijn reeds enkele meetmethoden besproken en is het nut van deze metingen aan de orde geweest. In dit hoofdstuk worden nog enkele andere methoden beschreven. Hoofdstuk IV handelt over het ontwerp van jetgroutconstructies. Wetend wat de mogelijkheden en beperkingen zijn van de jetgrouttechniek, hoe komt een ontwerp dan tot stand? Het laatste hoofdstuk betreft de conclusie (IV.5).



## IV.2 Proces

### IV.2.1 Inleiding

Het doel van dit hoofdstuk is het beschrijven van enkele uitvoeringsaspecten die aan de orde zijn bij het maken van jetgroutkolommen. Het jetgroutproces wordt, zoals in de inleiding van dit deel is aangegeven, verdeeld in het boren (paragraaf IV.2.2) en het onder hogere druk injecteren van het groutmengsel (paragraaf IV.2.3). Het gebruik van lucht vormt bij beide processen een belangrijke uitvoeringsaspect. In paragraaf IV.2.4 wordt dit aspect daarom nader toegelicht. Een ander aspect betreft de volgorde van uitvoeren van de jetgroutkolommen bij verschillende jetgroutconstructies. Paragraaf IV.2.5 wordt hier aan gewijd.

### IV.2.2 Het boorproces

Voordat begonnen kan worden met het op diepte brengen van de boorbuis dient de makelaar en de boorbuis op de juiste boorlocatie te worden gebracht en onder de juiste hoek te worden gesteld. Het hart van de jetgroutkolom kan van te voren zijn bepaald en door middel van een piket zijn vastgelegd. Doordat het maaiveld bij het uitvoeren van jetgroutkolommen wordt overspoeld met de retourstroom, wordt de plaatsing van de boorbuis voor het inboren gecontroleerd. Naar gelang de plaatselijke omstandigheden en het ontwerp geschiedt dit met een meetlint of wordt de boorbuis verklikt op een meetraam.

De inboorhoek wordt met behulp van de inclinometer in de boorstelling gesteld en zonodig gecontroleerd met behulp van een waterpas. De maken van verticale boringen verdient de voorkeur omdat hierbij de maatvoering en boornauwkeurigheid het beste onder controle kunnen worden gehouden.

Enkele boorkopsystemen hebben een speciaal spoelgat aan de onderzijde, waar tijdens het inboren van de buis water of grout uitstroomt. Al spoelend wordt de boorbuis op diepte gebracht. Indien dit speciale spoelgat niet aanwezig is wordt de spoeling via de, haaks op de boorrichting geplaatste, snij- en/of vulnozzles toegevoegd. Het grote nadeel van het speciale gat aan de onderzijde is dat indien de juiste diepte is bereikt, de buis ergens losgekoppeld moet worden, om met behulp van een stalen kogel het spoelgat te dichten. Hierbij moet de druk geheel van alle toevoerleidingen af, wat niet alleen tijdrovend is maar ook het dichtslibben van de nozzles tot gevolg kan hebben. In de overwegend relatief slappe of losgepakte grond in Nederland is een dergelijke, naar beneden gerichte spoelstraal niet direct benodigd. Het spoelen met de snij- of vulnozzles minder effectief maar heeft het wel het voordeel dat direct een voldoende groot boorgat wordt gecreëerd, zodat de retourspoeling genoeg ruimte heeft om langs de boorbuis naar het oppervlak te vloeien.

Het boren/spoelen kan geschieden met water of grout. De keuze van de spoeling wordt bepaald door de diepte van de boring, de gebruikte centrale en het jetgroutsysteem. Indien de jetgroutcentrale het mogelijk maakt tijdens het spoelen over te gaan van een water- naar een groutinjectie is het financieel aantrekkelijk met water te spoelen tijdens het boren. Als de onderkant van de jetgroutkolom is bereikt wordt over gegaan op grout en nadat het hele boorgat is gevuld, kan met jetten worden begonnen. Bij zeer korte kolommen wordt vaak direct met grout gespoeld. In geval van het 3 fasen systeem jetgrouten wordt vanwege de aanwezigheid van een waterleiding in de boorbuis met water gespoeld. Daarbij vindt toch een geringe groutinjectie plaats om te voorkomen dat de vulnozzles verstopt raken.

Problemen die optreden bij het boren zijn het verstopt raken van de nozzles en het vastlopen op puin. Indien een spoelgat aan de onderzijde wordt gebruikt, moet het debiet voldoende groot zijn, zodat ook een geringe uittreding bij de nozzles plaatsvindt. Bij spoelen met behulp van de snijnozzles moet voldoende druk worden ingesteld om eveneens verstopt raken te voorkomen. Vaak wordt daarvoor

een druk van circa 100 bar gebruikt. De vulnozzles bij het 3 fasen systeem raken minder snel verstopt vanwege de relatief grote afmetingen van de openingen.

Boorkoppen zijn voorzien van een verstevigde kop, waarmee eventueel puin doorboord kan worden. In zeer vervuilde grond kan een voorsnijder worden toegepast. Dit is een snijkop, bevestigd onder de boorkop, met een kleinere diameter dan de boorbuis. Om het boorgat voldoende groot te maken kan een ruimer worden gemonteerd. Deze ruimer bestaat uit zogenaamde vinnen die het boorgat verruimen. Deze ruimer wordt vaak toegepast in combinatie met een spoegat aan de onderzijde. Zie ook afbeelding I.2.8.

### IV.2.3 Het jetgroutproces

#### nozzles

Nadat de boorbuis op diepte is gebracht kan de injectiedruk worden opgevoerd en het jetgrouten beginnen. Maatgevend voor de positie van de onderkant van de kolom is de plaats van de snijnozzles. De snijstralen bepalen in feite de diameter van de kolom. In geval van snij- en vulnozzles bedraagt de afstand tussen deze verschillende type nozzles 35 tot 50 cm. Deze afmeting is proefondervindelijk bepaald.

Het aantal snij- of vulnozzles varieert en is sterk afhankelijk van het gebruikte boorkopsysteem en de voorkeur van de uitvoerder. Bij 1 fase jetgrouten wordt soms voorgeschreven met een even aantal nozzles te werken in verband met de nauwkeurigheid van maatvoeren. Door een asymetrische uitstroom kan de reactiekracht de boorbuis slingeren in het ruime boorgat en de plaatsnauwkeurigheid van de kolom verkleinen. Bij het 2 of 3 fasen systeem is deze vervorming minder door het gebruik van stijvere boorbuizen. Bij het jetten in diep water of andere niet geleidende mediums kunnen de vervorming toch te groot worden. Proeven moeten dit aantonen. Het gebruiken van extra boorbuisgeleiding is een mogelijkheid. De toepassing van een even aantal snijstralen, paarsgewijs tegengesteld gericht, is een eenvoudiger oplossing in een dergelijk geval.

Zoals reeds eerder in dit verslag aangegeven, is het vaak een keuze tussen één nozzle met een bepaald debiet en draaisnelheid van de boorbuis of meerdere nozzles met een lager debiet per nozzle en een lagere draaisnelheid van de boorbuis. De draaisnelheid is belangrijk in verband met de snijhoogte (de hoogte waarover de straal één keer langs komt). Het voordeel van het toepassen van één snijnozzle is dat de straal dikker en stabiel wordt, zodat de snijhoogte eigenlijk iets toe kan nemen. Het aantal vulnozzles is minder belangrijk en vaak afhankelijk van het benodigde debiet en de afmetingen van de nozzles. De keuze voor het aantal nozzles is een aspect dat aan de orde is bij het maken van jetgroutkolommen. De keuze kan enig effect op de resultaten tot gevolg hebben. Opgemerkt dient te worden dat de belangrijkheid van deze invoerparameter vele malen kleiner is dan bijvoorbeeld de grondeigenschappen of de treksnelheid.

#### plaatsing kolom

In dit verslag worden voornamelijk jetgroutprocessen beschreven waarbij de kolommen van onder na boven en verticaal tot stand worden gebracht. In de literatuur wordt een enkele keer aangegeven dat jetgrouten van boven na onder ook tot de mogelijkheden behoort. Toepassingen zijn echter niet vermeld. De vraag is onder welke omstandigheden een dergelijke uitvoeringsmethodiek zal worden verkozen en welke nieuwe problemen zich daarbij voordoen. De beschreven methode met van onder na boven jetgrouten lijkt gezien de beheersbaarheid van de uitvoeringsparameters (trekken ipv drukken!) de meest voor de hand liggende methodiek.

Bij jetgrouten op zeer grote diepte zullen maatregelen genomen moeten worden om de retourstroom continu naar het oppervlak te kunnen krijgen. Indien het boorgat plaatselijk vernauwt kan ongewenste drukopbouw plaatsvinden, waardoor nozzles verstopt raken en de grond te zwaar wordt belast. Het plaatsen van een casing kan een mogelijkheid zijn. Uiteraard zijn de mogelijkheden sterk afhankelijk

van de kenmerken van de aanwezige grond. De geïnjecteerde lucht speelt bij op zeer grote diepte een belangrijke rol. De lucht fungeert als drager van de retourstroom. Hiervoor is voldoende druk en debiet van de lucht benodigd.

Bij het jetgrouten onder grote hoeken met de verticaal kunnen andere problemen zich voor doen. De retourstroom kan een kortere weg naar het oppervlak nemen in plaats van de ruimte om de boorbuis. Dit soort doorbraken verminderen de kwaliteit van het proces. Bij geringe gronddekking kan dit dan ook niet worden gedaan. Voorzichtigheid met het gebruik van lucht is daarbij belangrijk omdat lucht de doorbraken kan forceren.

In de tunnelbouw wordt bijvoorbeeld bij de NATM (New Austrian Tunnelling Method) zelfs schuin omhoog gejetgrout (vanuit de tunnel). Dit vergt extra aandacht in verband met het leeglopen van de kolom. Een sterk gebonden en zwaar mengsel is daarbij wenselijk. Vaak wordt na het uitnemen van de boorbuis het boorgat met een prop afgesloten.

### **retourstroom**

De retourstroom is een belangrijke indicatie voor het functioneren van de techniek. Indien te weinig of geen retourspoeling meer naar het oppervlak komt kan het boorgat zijn ingestort, waardoor ongewenste drukopbouw kan plaatsvinden in de bodem. Een andere oorzaak van het uitblijven van retourspoeling kan de aanwezigheid van puin in de bodem zijn, waar zich nog holle ruimten bevinden.

Bij meerdere jetgroutkolommen die elkaar overlappen kan een controle van de overlapping met de retourspoeling worden vastgesteld. Als de nevenkolom nog niet is uitgehard, zal bij het maken van een kolom ernaast, bij voldoende overlap, retourspoeling uit de reeds gemaakte kolom ontsnappen.

De hoeveelheid retourspoeling is sterk afhankelijk van onder andere het gebruikte systeem, de lengte van de kolom, de bodemgesteldheid en het type constructie. Bij individuele kolommen is de retourspoeling minder dan bij horizontale of verticale schermen als gevolg van de overlap. In geval van goed doorlatende grondlagen zal meer spoeling achter blijven dan in geval van zware kleilagen en korte kolommen geven relatief minder spoeling dan lange. Globaal bedraagt de retourstroom 50% tot 100% van het invoervolume. Omdat de spoeling onregelmatig naar boven komt, het maaiveld sterk vervuild is en water wordt toegevoegd om de spoeling te kunnen afvoeren, is het schatten van het volume van de retourstroom vaak een ondoenlijke bezigheid.

### **problemen**

Problemen die kunnen optreden tijdens het jetgrouten zijn te verdelen in defecten in de jetgroutcentrale of aanvoerleidingen en problemen ter plaatse van de te maken kolom. Voor de eerste categorie zijn de defecten zeer divers van aard. Gesprongen aanvoerleidingen, elektronische storingen, storingen in de energievoorziening, versleten onderdelen van de pomp etcetera. Problemen die zich voordoen bij de boorstelling zijn het verstopt raken van de nozzles of luchtmantels, het instorten van het boorgat, het wegzakken van de boorstelling en dergelijke.

Veel van deze problemen veroorzaken een stagnatie van de jetgroutproductie. De effectiviteit van een gemiddeld jetgroutwerk ligt tussen de 60% tot 80%. Het werken met zeer hoge drukken en een complexe installatie zorgen voor deze waarde van de effectiviteit. Het zal duidelijk zijn dat personeel met veel ervaring veel problemen kan voorkomen en als ze toch optreden, snel kan verhelpen, waardoor de productiviteit gunstig wordt beïnvloed.

### **grondsoorten**

Jetgrouten is een techniek die in iedere grondsoort kan worden toegepast. Iedere grondslag vraagt echter wel om een bepaalde aanpak, zodat voor te beginnen met jetgrouten goed bekeken moet worden, welke lagen zich in het te grouten traject bevinden en met welke parameters gegrout wordt.

Zand is eenvoudig te eroderen en de treksnelheden kunnen aanzienlijk zijn. Dit wil niet zeggen dat heel snel getrokken kan worden, omdat het mixen en de afvoer van spoeling goed moet kunnen plaatsvinden. Globaal kan de treksnelheid beter niet groter worden verkozen dan 50 tot 60 cm/min. Kleilagen zijn iets moeilijker te eroderen en de treksnelheid zal lager moeten zijn om dezelfde resultaten te krijgen als in de zandlagen.

Veenlagen vragen ook een nadere beschouwing vanwege het in brokken eroderen. Verwacht kan worden dat de afmeting van de kolom onregelmatiger is dan in zandlagen en de kwaliteit van het uitgeharde kolommengsel, door achtergebleven brokken, niet altijd even goed is. Bij aansluitingen aan diep- of damwanden moet rekening gehouden moeten met een hoge plakfactor van het veen, waardoor de veen moeilijk van de wanden is te verwijderen.

#### IV.2.4 Het gebruik van lucht

Het gebruik van lucht is één van de meest onduidelijke aspecten van de jetgrouttechniek. In paragraaf I.5.3.1 is aangetoond dat lucht een zeer gunstige invloed heeft op de stabiliteit van de injectiestraal. Door middel van luchtmantels om de snijnozzles wordt de reikwijdte en dus de diameter van de kolom vergroot.

In de praktijk wordt als invoerparameter slechts de luchtdruk gebruikt, terwijl het debiet ook een belangrijke rol speelt. De reden hiervoor is dat de luchtmantels voor iedere nozzle hetzelfde zijn en dat een stijging van de druk dus ook een debiettoename tot gevolg heeft. Vaak wordt de compressor op een zekere luchtdruk ingesteld en kan een verschil in afvoerdebiet niet worden waargenomen. Worden zeer zware compressoren gebruikt dan passen deze hun toeren aan indien de afvoer minder wordt.

Bij de fabricage van het jetgroutscherm voor de bouw van het metrostation Wilhelminaplein in Rotterdam maakte de firma Smet-Boring gebruik van een soort flowmeter, waarbij een balletje door de lucht werd hooggehouden. Indien het balletje terug viel, was het debiet sterk gereduceerd. Voor de jetgroutkolommen in de Kalvermarkt in Den Haag (Visser&Smit Bouw) is een flowmeter op de boorstelling gemonteerd.

De vraag is welke luchtdruk bijvoorbeeld tijdens het inboren moet worden gebruikt. Indien te weinig luchtdruk (en debiet) wordt ingesteld kunnen de luchtmantels snel verstopt raken. Voorkomen moet worden dat de injectievloeistof de luchtkanalen binnentreedt. Ook tijdens het jetten moet de druk voldoende zijn om een bepaalde diameter te realiseren en mag de injectievloeistof niet binnendringen. Er is als het ware een verhouding tussen snijdruk en luchtdruk om te voorkomen dat bij geringe drukopbouw de luchtkanalen vollopen.

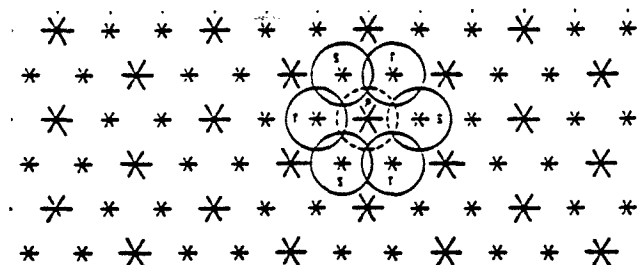
Over het algemeen wordt voor de luchtdruk circa 10 bar aangehouden. Bij kleine, ondiepe jetgroutkolommen kan de druk op circa 4 tot 6 bar worden ingesteld. Tijdens het experiment in Den Haag (zie deel II) is één keer alleen gevarieerd in luchtdruk (9 en 12 bar). Een geringe diametertoename (circa 5 cm) was het resultaat. Om concrete regels op te kunnen stellen voor het gebruik van lucht, met een zekere druk en debiet, zal meer onderzoek op grote schaal moeten worden uitgevoerd. Tot die tijd blijft het gebruik van lucht een kwestie van ervaring.

Overigens wordt lucht niet of nauwelijks ingezet bij funderingsversterkingen omdat het gevaar voor drukopbouw onder de fundering aanzienlijk is. Vaak geschiedt dit dan ook met het 1 fase of 2 fase(n) met water systeem (grout- en waterinjectie).

#### IV.2.5 Volgorde uitvoering

Een ander uitvoeringsaspect waarvan nog onduidelijk is welke van de mogelijkheden de beste resultaten levert, is de volgorde van fabricage van de jetgroutkolommen in geval van horizontale of

verticale jetgroutschermen. In literatuur [9] wordt voor een volgorde gekozen, waarbij verspringend kolommen worden gemaakt, en een sluitkolom als laatste wordt uitgevoerd. Afbeelding IV.1 laat dit zien. Een andere mogelijkheid is het als een front uitvoeren van de kolommen, opéénvolgend en direct na elkaar. Voor beide methoden zijn voor- en nadelen aan te geven. Het zogenaamde dambordsgewijs injecteren sluit aan bij de eerst genoemde methode uit afbeelding IV.1.



Afb. IV.1: Een mogelijke volgorde van uitvoering jetgroutkolommen. [9]

Indien kolommen worden uitgevoerd volgens afbeelding IV.1 zullen de omringende kolommen redelijk zijn uitgehard alvorens de laatste sluitkolom wordt gemaakt. De buitenkant van de gerealiseerde kolommen kan door de snijstraal van de laatste kolom schoon worden gespoten, waardoor de aansluiting vrij is van vervuilingen. Met de laatste kolom wordt het hele gebied netjes opgevuld. Overwogen kan worden de laatste kolom iets langzamer te trekken zodat een waterdichte aansluiting verzekerd is.

Nadeel van deze wijze van uitvoeren is dat bij zeer grote horizontale velden van kolommen de volgorde moeilijk te handhaven is en feitelijk iedere kolom een sluitkolom is van een omliggende cirkel. Bovendien vraagt deze volgorde om een bijzonder nauwkeurige registraties, zodat geen kolommen worden vergeten.

Op volgorde jetgrouten heeft als grote voordeel dat het werkterrein nog enigszins schoon te houden valt, omdat achteruit gewerkt kan worden. De boorstelling staat dan niet op het door het jetgroutproces aangetaste maaiveld. Deze methode betekent wel dat veelal nieuwe kolommen worden gemaakt naast verse kolommen. Het voordeel hiervan kan zijn dat de kolommen dan in elkaar vloeien, waardoor de aansluiting bijzonder goed is.

Daarnaast geldt dat snijstralen verder reiken indien de horizontale gronddruk minder is. Indien twee verse individuele kolommen elkaar eigenlijk net niet zullen overlappen, gebeurt dat nu wel omdat het kleine gronddammetje tussen de twee kolommen weinig tegendruk geeft en door de snijstraal weg wordt gespoten. Dit fenomeen verkleint de kans op slechte aansluitingen. Daarentegen kunnen bijvoorbeeld veenbrokken naar de nog verse kolom worden gespoten, waardoor de kwaliteit van deze kolom uiteindelijk minder zal zijn.

In Den Haag (zie deel II) zijn zowel verse kolommen in elkaar gedraaid als verse kolommen naast uitgeharde gemaakt. Tijdens het slopen van het massief werden geen verschillen in aansluiting geconstateerd. Om een duidelijke uitspraak te kunnen doen naar wat gunstiger is zullen beide methodieken nader moeten worden bestudeerd. Mogelijkerwijs is dit op kleinere schaal uit te voeren. Eigenlijk moet daarbij duidelijk onderscheid worden gemaakt tussen de volgorde van het uitvoeren van de kolommen en het wel of niet maken van een kolom naast een verse of uitgeharde kolom.

Voorlopig gaat de voorkeur uit naar het in volgorde naast elkaar uitvoeren van de kolommen, omdat dit uitvoeringstechnisch het eenvoudigst is, de minste kans geeft op het vergeten van kolommen en de

hoogste productiesnelheid oplevert. Het maken van een sluitkolom kan problemen geven indien de omliggende kolommen groter zijn dan verwacht en reeds zijn uitgehard.

Voor het uitvoeren van funderingsversterkingen gelden uiteraard ander eisen. Omdat verse kolommen geen of nauwelijks draagvermogen hebben, mogen ze niet direct naast elkaar worden vervaardigd. Een volgorde van bijvoorbeeld: 1-6-11-2-7-12-3-etc. (bij 1 rij) wordt vaak aangehouden. De kolommen hebben vaak na een dag al een draagvermogen dat hoger ligt dan de oorspronkelijk aanwezige grondlagen, zodat het gevaar voor verzakkingen dan niet meer aanwezig is.

## IV.3 Metingen

### IV.3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de metingen die aan jetgroutkolommen kunnen worden uitgevoerd. In de delen II en III zijn de metingen, verricht in het kader van het tramtunnelproject in Den Haag, aan de orde geweest. Hier zullen naast deze eerder genoemde technieken nog andere worden aangehaald. Doel van dit hoofdstuk is aan te geven welke metingen nuttig zijn bij het maken van jetgroutconstructies en wanneer deze in het uitvoeringsproces uitgevoerd dienen te worden.

In paragraaf IV.3.2 staat de hellingmeting centraal, in de paragraaf daarop volgend de diameterbepaling en paragraaf IV.3.4 beschrijft het nemen van verse monsters tijdens en vlak na het jetgrouten. De laatste paragraaf van dit hoofdstuk heeft betrekking op de kernboringen in de uitgeharde kolom.

### IV.3.2 Hellingmetingen

Voor het bepalen van de boorafwijkingen is voor de jetgroutproef ten behoeve van de bouw van de tramtunnel een stalen kokerprofiel in het boorgat geplaatst. Los van de problemen met het inbrengen van het profiel, waar reeds eerder over bericht is, bleek de diameter van het boorgat enige invloed te hebben op de boorafwijking op grotere diepte. Dit kan te maken hebben met de geleiding van de boorbuis tijdens het inboren, maar meer voor de hand liggend is het uit het hart staan van het kokerprofiel.

Een betere methoden voor het bepalen van de boorafwijking zou zijn het integreren van het meetapparaat in de boorbuis. Hiermee kunnen ook de problemen worden omzeild die optreden bij het plaatsen van de koker. Dergelijke systemen bestaan, maar functioneren nog niet altijd naar behoren. Visser&Smit Bouw heeft met derden een in de boorbuis geïntegreerde hellingmeter ontwikkeld voor het plaatsen van injectiepuntjes ten behoeve van bodeminjecties met hard- of softgel. De inclinometer zendt per 1/10 seconde de scheefstand in combinatie met de diepte naar de computer in de boorstelling. Na voltooiing van de boring kan het verloop worden geprint. Het gebruikte systeem is helaas behoorlijk storingsgevoelig gebleken en nog niet geschikt voor intensieve productie.

Het grote probleem bij het uitvoeren van metingen blijft altijd dat de resultaten gelden voor de kolom of boring die gemeten is. Dit zegt nog niet direct iets over de niet gemeten boorgaten. Statistisch kunnen op basis van een aantal metingen kansen en afwijkingen worden bepaald, maar helemaal "waterdicht" is het nooit. Het meten van iedere boring zou het meest ideaal zijn. Voorlopig zal op basis van de resultaten van enkele hellingmetingen een schatting moeten worden gemaakt van de maximale afwijking. Rekeninghoudend met enige veiligheid kan dan een verantwoord raster worden gemaakt. Op meerdere werken is gebleken dat de boorafwijking gemiddeld 0,5 % en maximaal 1,0% van de boordiepte bedraagt. In het ontwerp dient daarmee rekening te worden gehouden.

Veelvuldig meten, zoals in de eerste fase voor de jetgroutboog in de Kalvermarkt is gedaan, voorkomt niet dat de afwijking bij een niet gemeten kolom groter kan zijn dan verwacht. Belangrijk is tijdens het inboren in het oog te houden of de boorbuis door obstakels in de grond ernstig van richting wordt veranderd. Opnieuw boren kan dan noodzakelijk zijn. Vooraf moet een veiligheid worden bepaald op basis van enkele metingen en ervaring van de uitvoerders.

### IV.3.3 Diameterbepalingen

Voor het bepalen van de diameter van de kolom is in Den Haag gebruik gemaakt van het door Visser&Smit Bouw ontwikkelde spinapparaat. De gemeten diameters kwamen overéén met de werkelijke na ontgraving en inspectie. De spinmetingen mislukten regelmatig als gevolg van een

aanwezig puin in het boorgat, een te stijf kolommengsel of vuil in de spin zelf. Circa 20%-30% van de metingen was succesvol. Met name op grotere diepte mislukten de metingen regelmatig. De grote vraag blijft wat te doen indien in een werk een meting een kleinere diameter aangeeft dan verwacht. Indien ook een controle van de metingen een kleinere diameter aangeeft zal naar een oorzaak moeten worden gezocht.

Als naast gelegen kolommen al gemaakt en uitgehard zijn, kan een vergroting van de diameter van die kolommen de reden zijn dat de spin niet voldoende uitklapt. Bij diameters die veel kleiner zijn dan verwacht ligt de oorzaak meestal in een te stijf kolommengsel of een vervuilde spin. Omdat de spinmetingen een lage kans van slagen hebben vergt het nogal wat tijd en inspanning de metingen met grote regelmaat uit te voeren.

Dit pleit ervoor de spinmeting te gebruiken voor de eerste (proef)kolommen. Op de eerste kolommen kunnen dan verschillende metingen worden gedaan en door bijvoorbeeld de treksnelheid iets terug te nemen kan een veiligheidsmarge worden ingepast. Bij grote trajecten en wisselende hoogten moet alvorens te beginnen de opbouw van de ondergrond nauwkeurig in kaart worden gebracht om te kunnen anticiperen op wijzigingen in grondparameters. De grondeigenschappen zijn immers bepalend voor eventuele verstoringen. Anticipatie op een zeer zorgvuldig uitgevoerd grondonderzoek is daarom waarschijnlijk belangrijker dan het uitvoeren van vele metingen. Bij grote risico volle projecten kan het noodzakelijk zijn de proevenserie enkele malen op verschillende plaatsen te herhalen.

In deel III is aangetoond dat het met de kennis en ervaring die op dit moment aanwezig is geen diameterbepaling kan worden gedaan met behulp van volumieke massa's van spoelingen. Meer onderzoek zal meer gegevens opleveren en mogelijk kan het verband als nog worden afgeleid. Maar waarschijnlijk zullen de fluctuaties in volumieke massa en wateruitreding te groot zijn om nauwkeurig genoeg een schatting van de diameter te kunnen maken.

Een andere door Visser&Smit toegepaste methode voor het bepalen van de diameter is het prikken met een sondeerapparaat vanaf het centrum van de kolom, totdat de overgang van kolom naar ongeroerde grond is gevonden. Deze methode werkt vrij aardig, maar het vinden van de overgang blijkt niet bepaald eenvoudig. Zeker op grotere diepte wordt het moeilijk de buitenkant van de kolom nauwkeurig te bepalen. Met de spin kan eenvoudiger het diameterverloop over de hoogte worden aangeven.

Keller Grundbau heeft geëxperimenteerd met sonar. De nauwkeurigheid is laag en zeker bij zware kolommengsel wordt het bepalen van de diameter op deze wijze bemoeilijkt. Door de inhomogeniteit van het mengsel worden de metingen sterk verstoord en is de diameter nauwelijks vast te stellen.

Het na uitharding blootleggen van de kolom is natuurlijk de beste methode voor de diameterbepaling. Maar juist op grotere diepte is dit niet uitvoerbaar. Helaas functioneert de spin op grotere diepte ook minder. Bij grotere werken is een proefput maken en ontgraven financieel soms haalbaar. Bij kleine werken zal de techniek daarvoor veel te duur worden. Dit ook vanwege een extra mobilisatie en demobilisatie als gevolg van de tijd tussen maken, uitgraven en inspecteren.

### IV.3.4 Monstername

In deel III zijn de monsters van retour- en kolomspoeling gebruikt om bepaalde verschijnselen te verklaren die zich in de verse kolom en tijdens het uitharden voordoen. Voor het bepalen van de diameter van de kolom, het cementgehalte en de sterkte van het kolommengsel bleken de monsters niet geschikt. Voorlopig heeft het nemen van kolommonsters niet veel zin. De retourspoeling kan gebruikt worden als indicatie voor de verlopen van het proces. Indien bepaalde grondlagen worden bereikt, kan dat visueel gecontroleerd worden in de retourspoeling en ook de hoeveelheid cement kan globaal worden bepaald door observatie van de retourspoeling.



Een doel voor nadere studie kan zijn het bekijken van mogelijkheden de monsters onder dezelfde omstandigheden te laten uitharden dan het mengsel in de kolom zelf. Hierdoor kan het nemen van monsters een grotere functie krijgen dan nu het geval is. Daarvoor is het wel noodzakelijk de verschijnselen die zich voordoen in de kolom nog nader te bestuderen.

### IV.3.5 Kernboringen

In deel III is aangetoond dat voor het verkrijgen van de juiste sterkte- en stijfheidseigenschappen van het verharde kolommengsel, het maken van kernboringen op dit moment de enige goede methode is. Door de kernen te beproeven worden de eigenschappen vastgesteld. Vanwege de zeer grote spreiding in resultaten van de (druk)proeven zou het niet juist zijn op basis van een beperkt aantal beproevingsen, gemiddelden en standaard afwijkingen te bepalen.

Het maken van kernboringen in jetgroutelementen op grote diepte is niet eenvoudig. Omdat de kolommen door de kernboringen worden aangetast kan het noodzakelijk zijn vooraf rekening te houden met de boringen en de kolommen langer te maken dan nodig is. Tijdens het uitvoeren van de jetgroutkolommen in de Kalvermarkt (Den Haag) is geprobeerd pvc- en stalen buizen in de grond weg te zetten, zodat later daar doorheen geboord kon worden. Dit wegzetten is mislukt. Achteraf, na uitharding, zijn casings met een ankermachine in de bodem geplaatst.

Bij kernboringen gaat altijd een deel van de kern verloren. Hierdoor is de kern die naar het oppervlak wordt gehaald korter dan de ingeboorde lengte. Tijdens het boren en het omhoog halen van de kernen, wordt een deel van de kern kappot geboord en vergruisd. Overigens worden alleen de goede delen van de kernen aan (druk)proeven onderworpen. Slechte stukken waaruit geen monster is te prepareren worden niet getest. Voor het berekenen van de constructie dient wel rekening te worden gehouden met deze zwakkere plekken.

Voor constructies met een geringe sterke-eis, tot circa  $2 \text{ N/mm}^2$  (rekenwaarde) is het onnodig kernboringen uit te voeren omdat deze sterkte eenvoudig te behalen is. Bij hogere sterkte-eisen zullen de waarden van de uitvoeringsparameters sterk door deze eisen worden beïnvloed en het beproeven van enkele kernen dient ter controle van de juistheid van de parameters

## IV.4 Ontwerp

### IV.4.1 Inleiding

Het ontwerp van een jetgroutconstructie hoort misschien niet thuis onder de uitvoeringsaspecten, maar omdat de uitvoering een enorme stempel drukt op het ontwerp zal het hier kort worden behandeld. In dit hoofdstuk wordt stilgestaan bij de afwegingen die gemaakt worden in de constructie/ontwerp-fase. Er wordt aangenomen dat constructieve berekeningen de afmetingen en sterkten van de jetgroutelementen reeds hebben bepaald en dat nu een keuze voor een systeem, een diameter en een raster moet worden gemaakt.

### IV.4.2 Mogelijkheden van de verschillende systemen

In deel I, hoofdstuk 2, zijn voor de verschillende jetgroutsystemen richtlijnen gegeven voor de haalbare diameters. In hoofdstuk 3 van hetzelfde deel is een aantal toepassingen van de jetgrouttechniek aangehaald. Waar mogelijk is het gebruikte systeem vermeld. In deze paragraaf zal geprobeerd worden aan te geven wanneer voor welk systeem gekozen wordt. Dat de systeemkeuze niet wordt gemaakt op basis van keiharde regels, lijkt duidelijk gezien de grote hoeveelheid mogelijkheden en de kennis van de jetgrouttechniek op dit moment. Onderstaande afwegingen moeten niet te krampachtig worden aangehouden, maar kunnen meegenomen worden in het ontwerpproces.

Het 1 fase systeem wordt veelal gebruikt voor funderingsondersteuning. De kolomgrootte (tot circa 1,0 m) vormt geen probleem omdat voor het ondersteunen van funderingen niet te grote oppervlakten tegelijk mogen worden ondersteund. Dit in verband met het tijdelijk wegvallen van de steundruk als de kolom nog vers is. Het 1 fase systeem kent alleen een groutinjectie, zonder gebruik van lucht. Hierdoor bestaat geen gevaar voor het opdrukken van de fundering ten gevolge van (lucht)drukopbouw.

Met behulp van het debiet, de treksnelheid en de water/cement-factor kan de hoeveelheid cement in de kolom gevarieerd worden. Over het algemeen kan veel cement worden toegevoegd, wat een gunstig effect heeft op de sterkte van de kolom. Dit is bij funderingsondersteuning zeer belangrijk.

Als voor bepaalde doeleinden volstaan kan worden met kleine kolommen, ligt het toepassen van het 1 fase systeem voor de hand. Bijvoorbeeld voor de afdichting van kleine spleten of openingen achter dam- of diepwanden, of andere water- en grondkerende constructies. Vanwege de beperkte benodigde installatie en drukken, ten opzichte van de andere systemen, wordt het 1 fase systeem ook wel toegepast bij ondiepe horizontale lagen of ondiepe verticale schermen.

Indien grotere kolommen moeten worden gemaakt, die toch een aanzienlijke sterkte moeten hebben, wordt vaak gekozen voor het 2 fasen systeem, met een door lucht omringde groutinjectie. De reikwijdte van de straal wordt door de lucht vergroot. Vanwege het gebruik van lucht wordt dit systeem minder snel toegepast onder constructies. Gebeurt dit wel, dan dient extra zorg besteed te worden aan het openhouden van het boorgat. Tijdens het grouten moet steeds worden waargenomen dat de lucht naar het oppervlak komt.

Voor jetgroutelementen met een waterremmende en constructieve functie is dit 2 fasen (lucht) systeem bijzonder geschikt. Voor schermen op grote diepte zijn grote diameters gunstig in verband met de hoeveelheid te maken boringen. Met dit systeem kan eveneens een aanzienlijke sterkte van de kolom worden bewerkstelligd.

Als de sterkte-eisen minder hoog zijn, ligt de keuze voor het 3 fasen systeem meer voor de hand. De bereikte diameters zijn nog groter dan bij het 2 fasen systeem en vanwege het geringere gebruik van cement is deze 3 fasen techniek goedkoper. Voor waterremmende schermen op grotere diepte wordt dan ook vaak het 3 fasen systeem verkozen. Door de grote hoeveelheid uitvoeringsparameters is de flexibiliteit van het systeem groot.

Als voor een ondersteuning van een constructie toch aanzienlijke diameters zijn gewenst, bijvoorbeeld omdat het aantal gaten in de constructie beperkt moet blijven of het boren van diezelfde gaten bijzonder duur is, en lucht beter niet kan worden toegepast, vormt het 2 fasen (water) systeem een oplossing. Dit hier nauwelijks besproken systeem berust op een waterstraal en een groutstraal, zonder gebruik van lucht. Feitelijk het 3 fasen systeem zonder lucht. Vanwege het gebruik van water en de menging met de groutstraal is de hoeveelheid cement, achtergebleven in de kolom, minder dan bij het 2 fasen (lucht) systeem.

Dat in bovenstaande tekst geen waarden voor de sterkte worden gegeven heeft te maken met de sterke invloed van de aanwezige grond. Bij een goede grondsoort als zand zal de sterkte aanzienlijk hoger kunnen worden, dan bij slechte grondsoorten als klei en veen. De grondsoort speelt ook een rol bij de keuze van het systeem. Voor het versterken van de kolommen is het nog mogelijk een wapeningsstaaf in het hart van de kolom aan te brengen. Bij verticale schermen wordt dit nog weleens uitgevoerd.

Bij geringe sterkte-eisen kan ook besloten worden tot het toevoegen van bentoniet als vervanging van een deel van de hoeveelheid cement. Dit kan financieel gunstig zijn omdat bentoniet goedkoper is dan cement. Voor het kunnen toevoegen moet de jetgroutcentrale worden uitgebreid, zodat een dergelijke vervanging alleen lonend is bij grotere werken.

#### **IV.4.3 Rasterkeuze**

Afhankelijk van de toepassing en afmeting- en sterkte-eisen zal een minimale diameter en een raster moeten worden vastgesteld. Voor funderingsversterkingen is de diameter afhankelijk van de breedte van de fundering, de lengte van de fundering en het constructief mogelijke oppervlak dat tijdelijk geen steundruk ontvangt. De kolommen behoeven elkaar niet noodzakelijk te overlappen. Aangeraden wordt het gebruikte systeem niet tot het maximale te belasten, zodat de diameter bijvoorbeeld bij het 1 fase systeem niet groter hoeft te zijn dan 80 cm. Indien het uitvoeringstechnisch mogelijk is, kan een tweede rij, versprongen gemaakt ten opzichte van de eerste, worden aangebracht.

Bij waterremmende schermen zal een voldoende grote overlap tussen de individuele kolommen moeten worden gerealiseerd, om de waterdichting te garanderen. Bij verticale schermen is de diameter van de kolom sterk afhankelijk van de constructief benodigde breedte van het scherm. De minimale breedte bij een overlap tussen twee kolommen is afhankelijk van de waterdruk. Bij grote waterdrukken (meer dan circa 3 m water) is een diameter en een hart op hart-afstand, waarbij de breedte van de overlap minimaal 40 cm bedraagt, aan te raden. Uiteraard is dit sterk afhankelijk van de plaatselijke omstandigheden en mogelijkheden. Bij geringe overlap kan en extra rij een uitkomst bieden.

Bij horizontale schermen is de diameter afhankelijk van de afmetingen van de bouwput. Meestal wordt getracht de diameter van de kolom bij diep liggende schermen te maximaliseren. Bij smalle bouwputten hoeft dit niet altijd gunstig te zijn. Voor de overlap, moet in ieder geval rekening worden gehouden met een voldoende zekere aansluiting bij het kritische punt, de overlap van drie kolommen. Door rekening te houden met een kleinere diameter dan de minimale, of door het verhogen van de snijenergie ten opzichte van de snijenergie voor de minimale kolomdiameter wordt een veiligheid ingebouwd. Voor extra veiligheid kan de treksnelheid, tijdens het maken van de kolommen, tijdelijk terug worden genomen.

Voor bovengenoemde en niet aangehaalde toepassingen geldt altijd dat de diameter en rasterkeuze sterk afhankelijk is van de plaatselijke omstandigheden en de risico's en de gevolgen bij het falen van de constructie.

## IV.5 Conclusie

Op basis van hetgeen in dit deel is beschreven kunnen de volgende conclusies worden getrokken. Enkele van deze sluiten aan of overlappen eerder beschreven bevindingen uit andere delen:

- Bij jetgrouten ligt de nadruk voor het grootste deel op de uitvoeringsaspecten;
- Daarbij gaat het met name om de keuze van het systeem en de uitvoeringsparameters;
- Ervaring speelt daarbij een hele belangrijke rol;
- De kwaliteit van het resultaat valt of staat bij het controleren en het sturen van het jetgroutproces;

### **Boor- of jetproces:**

- Boren met water of met grout heeft geen of nauwelijks effect op het resultaat en wordt bepaald door ervaring, voorkeur van uitvoerder, omstandigheden en materieel;
- Er zijn verschillende boorbuis- en boorkopsystemen op de markt die invloed hebben op de wijze van uitvoeren;
- Door voldoende druk tijdens het boren te gebruiken kunnen verstoppingen van nozzles voorkomen worden;
- Bij jetgrouten onder grote hoeken met de verticaal, moet extra aandacht besteed worden aan de afvoer van de retourspoeling.
- Bij het gebruik van lucht moet het boorgat goed open worden gehouden en dient gewaakt worden voor ongewenste drukopbouw;
- Iedere grondsoort heeft specifieke erosieverschijnselen. Veen erodeert het moeilijkst en verdient bijzondere aandacht;

### **Metingen:**

- De boorafwijking moet met in achtname van een veiligheid mee worden genomen in de rasterkeuze;
- Bij extreme boordiepten of grondgelaagdheid is het uitvoeren van enkele controlemetingen aan te raden;
- Tijdens het boren zal de machinist te grote afwijkingen moeten bemerken, zodat het boren kan worden gestaakt;
- Diameterbepalingen met het spinapparaat hebben een laag slagingspercentage (20%-30%);
- Toch is het spinnen een betrouwbare methode om de diameter van verse kolommen te meten;
- Bij kleine werken kan worden volstaan met enkele metingen en een veiligheid op het energieniveau;
- Bij grotere werken (oppervlakten) kan het raadzaam zijn de metingen gedurende het werk meerdere malen uit te voeren, bijvoorbeeld één op de honderd kolommen;
- De grondopbouw dient bij grote werken nauwkeurig in kaart te worden gebracht;
- Bij het opstellen van een werkplan dient rekening gehouden te worden met de randvoorwaarden voor de spinmetingen, zoals bijvoorbeeld puin in de grond, waardoor metingen een grotere kans hebben te mislukken;
- Het nemen van monsters uit de kolom- of retourspoeling dient voor een globale controle van de grondopbouw en het cementgehalte van de kolomspoeling;
- Het boren en beproeven van kernen is een goede manier om de materiaaleigenschappen te controleren;
- Het beproeven van kernen heeft alleen zin bij hoge sterkte-eisen aan het kolommengsel, omdat verhard grout altijd een minimum sterkte heeft.

### Ontwerp

- Het 1 fase systeem levert relatief kleine diameters en wordt veelal gebruikt voor funderingsondersteuning, ondiep gelegen jetgroutschermen of het afdichten van openingen in wanden;
  - Met het 1 fase systeem kunnen relatief sterke kolommen worden vervaardigd;
  - Bij grotere kolommen met aanzienlijke sterkte valt de keuze op het 2 fasen systeem;
  - Bij minder hoge sterkte-eisen en grote tot zeer grote kolommen wordt het 3 fasen systeem ingezet;
  - Onder funderingen worden systemen die gebruik maken van lucht, minder snel toegepast;
  - Het 2 fasen (water) systeem (zonder lucht) vormt een tussenweg tussen het 2 en 3 fasen systeem;
- Bovenstaande punten vormen een richtlijn en maar geen harde regels. De keuze van het systeem is afhankelijk van de plaatselijke omstandigheden, sterkte-eisen en voorkeur van de uitvoerder.

- Bij het maken van een raster dient een gedegen afweging te worden gemaakt tussen diameter van de kolommen en afstand tussen de kolommen;
- De risico's van het niet aansluiten van kolommen, in geval van schermen, moeten worden ingeschat op basis van ervaring en proefresultaten.
- Het verlagen van de treksnelheid is een goede manier om de kans op falen van een aansluiting te verkleinen.

Nadere punten voor onderzoek zijn:

- Het effect van luchtdruk en debiet op de kolomdiameter;
- Het effect van de volgorde van uitvoering op de kwaliteit van en de aanhechting tussen de kolommen.



## Eindconclusie

De techniek van het jetgrouten zal in de toekomst steeds vaker als oplossing voor funderingsproblemen worden ingezet. De sterke ontwikkeling van het ondergronds bouwen zal daar zeker een bijdrage aan leveren. Ook bij het boren van tunnels biedt het jetgrouten grote mogelijkheden. In Nederlandse grond is de ervaring met jetgrouten nog beperkt maar de jetgroutproef en de uitvoering van de jetgroutboog in Den Haag hebben aangetoond dat met deze techniek ook hier goede resultaten behaald kunnen worden.

Het groutproces is afhankelijk van te veel parameters om te komen tot een alles omvattend rekenkundig verband tussen de invoerparameters en de resultaten in de vorm van met name de diameter en de sterkte. De uitvoeringsparameters zijn goed te kwantificeren. Het grote probleem blijft de parameters/eigenschappen van de grond op een juiste wijze in een berekening mee te nemen.

Tijdens en na het jetgrouten vindt een sterke wateruitreding uit de kolom plaats, dit als gevolg van bleedingeffecten en een wateroverspanning in de kolom ten opzichte van de omliggende grond. Het uitfilteren van water is een tijdsafhankelijk proces en wordt mede gestuurd door de (hoge) hydrostatische druk van het groutmengsel. Hierdoor zal de uiteindelijke samenstelling en dichtheid van het kolommengsel verschillen van die van de retourspoeling. Een visuele beoordeling van de retourspoeling levert een globale indicatie van het cementgehalte en de grondopbouw. De sterkte van het kolommengsel wordt vergroot, bij afnemende water/cement-factor en toenemende volumieke massa van het mengsel.

Op basis van ervaring kan toch een goede inschatting worden gemaakt van de resultaten in een bepaalde grondsoort bij bepaalde uitvoeringsparameters. Het gebruik van de empirisch bepaalde energiekrommen zijn daarbij een hulpmiddel. Zowel de berekening van de hydraulische als de kinetische energie per meter kolom zijn zeer geschikt voor het vergelijken van de invoer. Dit richt zich dan met name op de bereikte diameter van de kolom.

In een aantal gevallen zal toch het uitvoeren van een proefkolom nodig zijn om de uitvoeringsparameters vast te kunnen stellen. Mede misschien op verzoek van de bouwdirectie. Met name bij zeer grote werken kan het voor een aannemer financieel gunstiger zijn een aantal proefkolommen uit te voeren, zodat de veiligheidsmarge iets minder groot kan zijn. Het inbouwen van voldoende veiligheid blijft inherent aan het jetgrouten. Deze veiligheid is afhankelijk van de risico's en het schadegevolg en zal per werk moeten worden bepaald.

Diameterbepalingen met behulp van het spinapparaat is de beste methode om in het werk diametermetingen te doen. De slagingskans van een dergelijke meting ligt niet hoog (20%-30%). Met name bij het opstarten van een project kan de spin worden gebruikt om de diameterresultaten te controleren. Bij sterkte-eisen aan de verharde kolommen kan met behulp van geboorde kernen een controle van de sterkte worden verkregen. Aangeraden wordt dit alleen te doen bij een reken druksterkte-eis groter dan circa  $2 \text{ N/mm}^2$ . Lagere sterkten kunnen eenvoudig worden verkregen en controle van de sterkte is dan ook nauwelijks noodzakelijk.

Het uitvoeren van een uitgebreid grondonderzoek voor aanvang van jetgroutwerkzaamheden is, zeker bij grote werken, zeer belangrijk. Variatie in grondparameters heeft direct effect op de kwaliteit van het jetgroutresultaat. Het anticiperen op variatie in de grond tijdens het jetgrouten is beter dan na het jetgrouten diameterbepalingen te doen en te concluderen dat de resultaten tegenvallen. Dus een uitgebreid grondonderzoek is te prefereren boven het regelmatig uitvoeren van diameterbepalingen.

Voor de kwaliteitsborging is het belangrijk, continu de uitvoeringsparameters te registreren en in te grijpen indien zich ongewenst wijzigingen voordoen. De ervaring en vakmanschap van het uitvoerend



personeel speelt daarbij een cruciale rol. Ervaren personeel levert bovendien een verhoogde productie op, wat de kostprijs ten goede komt. Dit ook omdat de inzet van materieel in geval van jetgrouten een groot deel van de prijs bepaalt.

Jetgroutkolommen vervullen vaak belangrijke functies in de totale bouwconstructie, gedacht kan worden aan waterremmende schermen. De nauwkeurigheid bij het uitvoeren van de kolommen dient dan vaak ook zeer groot te zijn. Dit terwijl het jetgrouten zelf geschiedt met zeer hoge drukken en plaatselijke zeer grote turbulenties. Jetgrouten is kortom: **Precisiewerk met grof geweld**.

## Aanbevelingen

Het maken van jetgroutconstructie berust voor een groot deel op de ervaring die bij de uitvoerders aanwezig is. Het is belangrijk deze ervaring zoveel mogelijk schriftelijk vast leggen, om zo een overdracht van die kennis mogelijk te maken. Gemeten resultaten van gerealiseerde werken dienen binnen een bedrijf centraal geregistreerd te worden, zodat ze geraadpleegd kunnen worden.

Het gebruiken van energiebeschouwingen voor het vergelijken en voorspellen van resultaten wordt sterk aangeraden. Afhankelijk van het registratiesysteem kan dit geschieden met de hydraulische of kinetische energie. Na verloop van tijd kan worden geprobeerd de loop van de energiekrommen te bepalen.

Het spinapparaat kan op sommige onderdelen nog verder worden ontwikkeld, wat de slagingskans van diameterbepalingen met deze spin kan vergroten. Hetgeen de bruikbaarheid van de meetmethode verbetert en financieel ook aantrekkelijk is.

Door middel van publicaties kan de bekendheid van de jetgrouttechniek worden vergroot. Belangrijk is met name ontwerpers en toezichhoudende instanties op de hoogte te brengen van de mogelijkheden, de beperkingen en de kosten van deze techniek.

De jetgrouttechniek biedt meer mogelijkheden dan het maken van kolommen. Andere vormen, zoals panelen kunnen in sommige gevallen grote voordelen hebben. Aanbevolen wordt ook deze jetgroutvarianties nader te bestuderen en te beproeven.

## Onderwerpen voor vervolg onderzoek

Indien in de toekomst een soortgelijke jetgroutproef wordt uitgevoerd als voor het Souterrainproject, kan geprobeerd worden de verschijnselen die voor uitharding optreden in de kolom (met name de wateruittreding) te kwantificeren. Met de gegevens die nu beschikbaar zijn was dit niet mogelijk.

Het effect van de treksnelheid op de resultaten is in geval van de jetgroutproef in Den Haag nauwelijks bestudeerd. Door de treksnelheid meer te variëren bij gelijke injectiedebieten en drukken kan het effect van de treksnelheid beter worden beschouwd. Aangeraden wordt dit te combineren met de energiebeschouwing van de snijstralen.

Zonder grote en kostbare experimenten uit te voeren, kan nader onderzoek worden verricht naar de conservering van monsters. Door de monsters onder andere condities te bewaren is het misschien mogelijk dezelfde eigenschappen te krijgen als die van het materiaal in de kolom. Overigens geldt dit niet alleen voor jetgrouten, maar ook bijvoorbeeld bij cement/bentoniet-wanden. Daarnaast kan geprobeerd worden in laboratoria het erosieproces van de grond tijdens jetgrouten te bestuderen en te beschrijven. Mogelijkerwijs komen daarbij verschijnselen aan het licht die belangrijk kunnen zijn voor de praktijk.

## Nawoord

Voordat ik met afstuderen was begonnen, stond vast dat het waarschijnlijk zeer moeilijk zou worden rekenkundige verbanden te vinden tussen de verschillende parameters. Voor mijn stage had ik al de nodige literatuur bestudeerd en weinig concreets gevonden. De jetgroutproeven in Den Haag boden de mogelijkheid zelf te experimenteren met de verschillende parameters.

Hoewel het experiment gericht was op de uitvoering voor project in Den Haag werd mij toch de mogelijkheid geboden, specifiek voor mijn afstuderen belangrijke onderdelen te bekijken. De goede sfeer en samenwerking maakten de maanden van proeven doen en uitwerken tot een heel boeiende tijd van mijn afstuderen.

Om meer verbanden en relaties te vinden en de verschijnselen die optreden bij het jetgrouten beter te kunnen analyseren, is veel meer data benodigd. Toch zijn, denk ik, enkele interessante bevindingen gedaan, met name gelegen op het gebied van de uitvoering en beproevingen.

Jetgrouten is een prachtige techniek, die voor heel funderingsproblemen een goede oplossing kan bieden. Belangrijk is, denk ik, dat ontwerpers en opdrachtgevers de werking en beperkingen van het jetgroutproces goed kennen zodat de eisen die gesteld worden aan het uitvoeringsproces en het resultaat aansluiten bij hetgeen mogelijk is met de techniek. Hopelijk levert dit verslag daaraan een bijdrage.

# Jetgrouten

precisiewerk met grof geweld

## Bijlagen

februari 1997

J.W. van Dalen



Bezuysen

# Jetgrouten

precisiewerk met grof geweld

## AFSTUDEERVERSLAG

Voor het behalen van het ingenieursexamen aan de  
Faculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft.

Vakgroep: Waterbouwkunde, Geotechniek  
Sectie: Funderingstechniek

Afstudeercommissie:  
Prof. ir. A.F. van Tol, TU Delft  
Ir. B.J. Admiraal, Visser&Smit Bouw, Papendrecht  
Ir. K.G. Bezuijen, TU Delft  
Ir. B. Polen, TU Delft

Jos van Dalen  
1 februari 1997

**Bijlage deel I: Literatuurlijst**

## Literatuurlijst

1. ASCE, *Grouting, soil improvement and geosynthetics*, Volume 1, Proceedings of the conference, Geotechnical Special Publication No. 30, New Orleans 1992;
2. ASCE, *Verification of Geotechnical Grouting*, Geotechnical Special Publication No. 57, San Diego 1995;
3. Aschieri, ir. F e.a. , *Case history of a cut-off wall executed by jet grouting*, Italië.
4. Bachy, *Jet mix*, diverse informatiefolders en referenties;
5. Brassinga, ing. H.E. , *WillemsSpoortunnel, jetgrout metrokruising*, GW-R'dam IGM, geotechn. publ. '90;
6. Cementbulletin, *Horizontales Jet Grouting im Tunnelbau*, okt. '87, Nummer 22;
7. Dalen, J.W. van, *Verlag praktische werken, metrostation Wilhelminaplein*, TU Delft '95;
8. Esnault, A, *Adaptation et évolution des techniques de traitement de sol en matière de protection de l'environnement*, Bachy/Français Geotechn. '92;
9. ICE, *Grouting in the ground*, Proceedings of the conference, London nov '92;
10. IS-Tokyo, *Ground improvement Geosystems*, Proceedings of the second int. conference on, Tokyo mei '96;
11. Jess-berger, prof H.L. , *Soilgrouting special session 2*, Bochum;
12. Keller Grundbau GmbH, *Das Soilcrete Verfahren*, diverse informatiefolders en referenties;
13. Kirsch, dipl.-ing. K e.a. , *Soilcrete-Grossversuch für das EOLE-Projekt in Paris*, Keller '93;
14. Maschwitz, dr.ing. G, *Unterfangung von Bauwerken*, Hannover dec '83;
15. Morey, J, *Les domaines d'application du jet-grouting*, Bachy/Français Geotechn. dec '92;
16. Raabe, dr.-ing. E.W. e.a. , *Herstellung von Dichtwänden and Sohlen mit dem Soilcrete-Verfahren*, Keller '87;
17. Raabe, dr.-ing. E.W. e.a. , *Einsatz von Soilcrete und soilfrac im Tiefbau*, Keller '95;
18. Raabe, dr.-ing. E.W. e.a. , *Sohlaussteifung einer tiefen Baugrube unter Anwendung des Soilcrete-Verfahrens*, Keller '94;
19. Samol, ing H e.a. , *Soilcrete-Verfahren-HDI zur Lastübertragung und Abdichtung in fein- und grobkörnigen Bodenschichten*, Keller;
20. Samol, ing H, *Soilcrete für die Unterfangung von Bauwerken*, Keller;
21. Schnarr, ing I e.a. , *Versuchsschacht U-bahn Strasbourg*, Keller '90;
22. Shibazaki, M e.a. , *A unique underpinning of soil solidifacation utilizing super-high pressure liquid jet*, Chemical Grouting Company, Japan;
23. Smet-Boring NV, *VHP-grouting*, diverse informatiefolders;
24. Tol, prof.ir. A.F. van, *Jetgrouting voor WillemsSpoortunnel Rotterdam*, GW-R'dam IGM, geotechn. publ. '90;
25. Tol, ir. A.F. van, *Jetgrouting als alternatief voor grondwaterkering*, geotechn. aspecten v/d bouw v/d WillemsSpoortunnel R'dam, overdruk CT '88-'93;
26. Tol, ir. A.F. van, *Panelgrouting in bouwput Binnenrotte*, geotechn. aspecten v/d bouw v/d WillemsSpoortunnel R'dam, overdruk CT '88-'93;
27. Tol, prof.ir. A.F. van, *g80, Funderingstechnieken*, college dictaat TU Delft 1993;
28. Vleeschauer, ir. P de e.a. , *VHP-grouting , een aanwinst voor de funderingstechniek*, Smet-Boring;
29. Vleeschauer, ir. P de e.a. , *Grondvernageling, bijzondere toepassing van VHP-grouting*, Smet-Boring;
30. Visser&Smit Bouw BV, *Jetgrouten*, diverse informatiefolders, Papendrecht;
31. Visser&Smit Bouw BV, *Jetgroutproeven Vlissingen*;
32. Visser&Smit Bouw BV/Van Hattum en Blankevoort BV, *Spuurwerk en Ontwikkeling*, Beverwijk '83;
33. Yung-show Fang e.a. , *Mechanical properties of jet-grouted soilcrete*, Taiwan '94;

## **Bijlagen deel II:**

- II.1: Publicatie tramtunnel Koolhaas  
Publicatie tramtunnel in Cement
- II.2: Stroomschema's proeven, 2 en 3 fasen jetgrouten  
Uitvoeringsparameters, totaaloverzicht  
Tekening proefput  
Jetgroutstaat en registratieformulieren kolom 14
- II.3: Sondering DKMP 37  
Boring GB-07  
Boring MB-09  
Sondering S6 t/m S8
- II.4: Verklaring hellingmeting
- II.5: Resultaten druk- en splijtproeven  
Verklaring monstercode Mos
- II.6: Bewerkte resultaten beproevingen
- II.7: Berekening kans op falen overlappingsgebied
- II.8: Tekeningen jetgroutwerk Kalvermarkt
- II.9: Foto's jetgroutproef

**II.1:    Publicatie tramtunnel Koolhaas  
         Publicatie tramtunnel Cement**



# Tramtunnel van Rem Koolhaas betekent open-hartoperatie voor Den Haag

door Hans Schmit

Minister Jorritsma van verkeer en waterstaat geeft dinsdag het startsein voor de bouw van een tramtunnel onder de drukste winkelstraat van Den Haag. Vijf jaar lang staat het centrum in het teken van het meest complexe bouwproject – inclusief overlast en ongemak – uit de geschiedenis van de stad. Maar wanneer tegen de eeuwwisseling de eerste trams onder de grond rijden en zo'n zeventig andere bouwputten en gaten zijn gevuld, moet het Haagse hart na jaren van versukkeling weer sterker kloppen dan ooit.

DEN HAAG - Het is dringen op het kruispunt van de Grote Marktstraat en het Spui in Den Haag. Met 27,5 miljoen passagiers die hier jaarlijks in en uit het openbaar vervoer stappen, is het een van de drukste gelijkvloerse kruisingen in Europa.

Van de zestig minuten die een uur telt, zijn de tramrails er 56 bezet. Groei zit er dus nauwelijks nog in. Maar de stroom bezoekers aan het Haagse centrum neemt wel gestaag toe door de bouw van winkels, woningen, theaters en vooral kantoren. Aan het Spui verrees (naast de theaters) het stadhuis- en bibliotheek-complex, de Tweede Kamer breidde uit met nieuwbouw, het ministerie van Vrom vestigde zich tegenover het Centraal Station en Nationale Nederlanden bouwde een nieuw kantoor over de Utrechtsebaan.

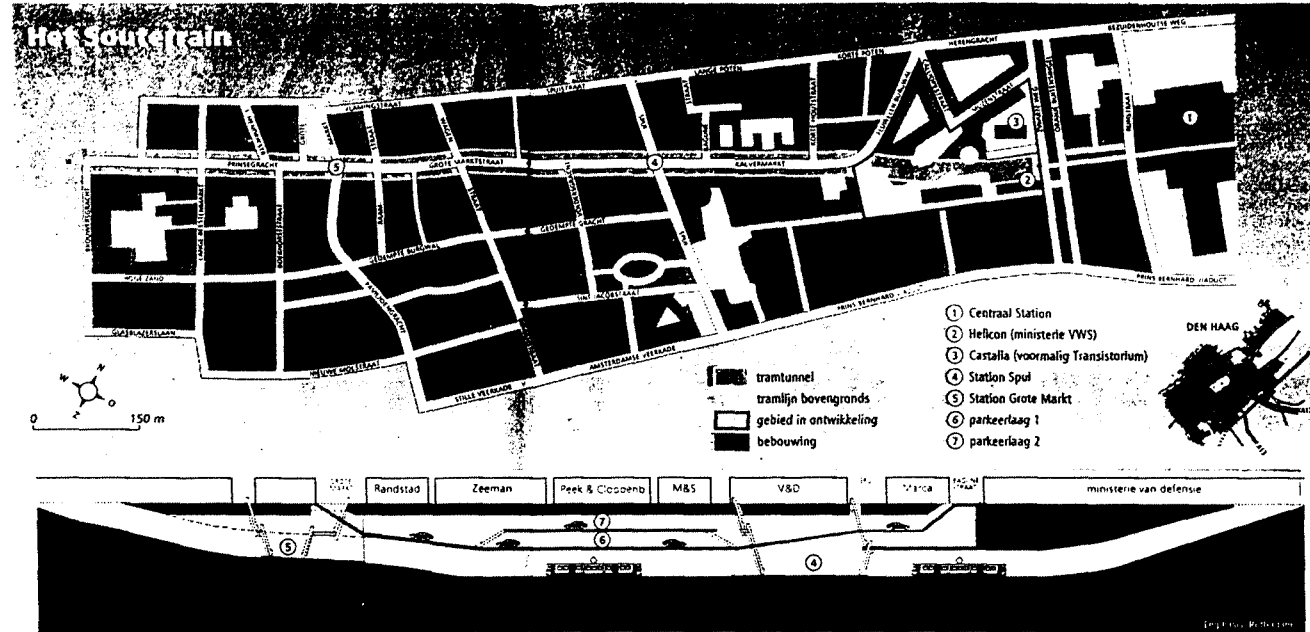
Verder wordt druk gebouwd aan de Resident (waar onder meer het ministerie van VWS komt) en de Grotius-plaats (uitbreiding van het Paleis van Justitie), is de kantoorstoren van het VNO boven de Utrechtsebaan bijna gereed, verrijst een nieuw winkel- en woningcomplex (Spuihof) tegenover het stadhuis en is de renovatie van de Bijenkorf in volle gang. Deze en andere bouwactiviteiten, met een totale investering van 2,6 miljard gulden, plus de toekomstige woningbouwlocaties aan de rand van de Haagse agglomeratie trekken volgens de prognoses begin volgende eeuw twee keer zoveel passagiers naar het Haagse centrum.

## Maaiveld

Eind jaren tachtig werd daarom vanuit de gemeenteraad geopperd te onderzoeken of de tram niet onder het maaiveld kon verdwijnen, zodat de bezoekers zonder congestie kunnen worden aan- en afgevoerd. Bijkomend voordeel: door ook het auto-

verkeer aan banden te leggen, kan het leefklimaat op straat (met name rond de grote warenhuizen) aanzienlijk worden verbeterd. Het uiteindelijk resultaat: een ontwerp voor een tunnel van 1250 meter die vanaf de Muzenstraat onder de Kalvermarkt, Grote Marktstraat en Prinsegracht duikt.

Het Rotterdamse Office for metropolitan architecture (Oma) van Rem Koolhaas tekende een tunnel met twee stations en lange zichtlijnen en veel licht vanwege de sociale veiligheid. In de Grote Marktstraat krijgt de tunnel, het Souterrain, een extra verdieping waar bijna vijfhonderd auto's een parkeerplaats kunnen vinden. Een bovengrondse parkeergarage kan hierdoor plaatsmaken voor woningbouw. De gemeenteraad ging vijf jaar terug worden gezet. Meer nog dan de benodigde vergunningen, te wijzigen bestemmingsplannen en extra technische onderzoeken naar de bouwveiligheid (het project moet tot op



enkele meters afstand van historische bebouwing moet worden uitgevoerd), vormden de financiën een buitengewoon zware hobbel. In januari stelde minister Jorritsma (verkeer en waterstaat) 195 miljoen gulden beschikbaar, waarmee een belangrijk deel van de totale kosten van 280 miljoen wordt gedekt. De exploitant van de parkeergarage

neemt voor 30 miljoen deel, terwijl de gemeente, het vervoersbedrijf HTM en de nutsbedrijven de overige kosten voor hun rekening nemen.

Overigens zijn nog niet alle plooiën glad gestreken, want een aantal omwonenden en kleinere winkelbedrijven, die samenwerken in de Kern Gewond, probeert op de valreep de

aanleg van de tunnel tegen te houden. Hoewel al hun bezwaren eerder door de rechtbank zijn verworpen, hebben zij deze week de Raad van State gevraagd de bouwvergunning te schorsen, onder meer vanwege dreigende schade aan omliggende gebouwen. De Raad van State spreekt zich maandag over het schorsingsverzoek uit – een dag voor het

met een feest opgeluisterde begin van de bouwwerkzaamheden. De projectleider van het Souterrain, ir. Liesbeth Alferink, vergelijkt de aanleg van de tunnel met een openhartoperatie, waarbij de patiënt zo normaal mogelijk moet blijven functioneren. Alferink: „De grootste uitdaging is dat tijdens de bouw de verkoop gewoon door moet gaan. De

stad moet optimaal bereikbaar zijn, de overlast op het maaiveld moet minimaal zijn. „Gekozen is daarom voor de wanden-/dak-methode – volgens Alferink in principe een eenvoudige en eerder toegepaste constructie. Alferink: „Het komt erop neer dat in het wegdek de wanden worden gemaakt. Wanneer deze gereed zijn, wordt op

de wanden het dak van de tunnel aangebracht en het maaiveld weer gesloten. Vervolgens wordt ondergronds de tunnel uitgegraven en de grond vanaf beide uiteinden van de tunnel afgevoerd. „De werkzaamheden beginnen aan die uiteinden: de Prinsegracht en de Kalvermarkt. De tunnelwanden worden daar door middel van het slaan van damwanden gerealiseerd. Alferink: „In het middendeel, de Grote Marktstraat, komen de wanden op anderhalf tot twee meter uit de bestaande gevel, hetgeen redelijk uniek is in Nederland. De grondmechanische aspecten zijn uitgebreid onderzocht en damwanden blijken vanwege het trillingsgevaar voor de omliggende bebouwing niet mogelijk. Daarom worden daar trivri diepwanden, verticale sleuven tot 27 meter diep, in de grond uitgeslepen. „

De tunnel wordt in dit deel stukje bij beetje aangelegd, in moten van zestig tot honderd meter. Liesbeth Alferink: „De wanden moeten bereikbaar blijven. Daarom hebben we de straat van zijstraat tot zijstraat in mootjes geknipt. Er wordt alleen gewerkt in stukken die niet naast elkaar liggen. Het werk in de Grote Marktstraat duurt achttien maanden, zodat in de loop van 1998 het casco van de tunnel gereed is. Daarna kan de tunnel ondergronds worden ingevuld. „

Het is de bedoeling dat de Grote Marktstraat, wanneer de tunnel er ligt, vooral het domein van voetgangers en fietsers wordt. Hoe het auto-luw gebied wordt ingericht, is echter nog onduidelijk, omdat de Raad van State aan het weren van doorgaand autoverkeer de voorwaarde heeft verbonden dat de capaciteit van de binnenruimte rond het centrum voldoende moet zijn. Voordat dit het geval kan zijn, moet onder meer het krakersbolwerk de Blauwe Anslag onder de slopershamer. „

De gemeente heeft echter nog enkele jaren de tijd voor het opstellen van een definitief plan voor de inrichting van de openbare ruimte. Overigens kan, zegt Liesbeth Alferink, de bouw van het Souterrain worden aangegrepen om in de Grote Marktstraat allerlei activiteiten (terrassen, marktkramen, muzekentent) te organiseren die nu, vanwege het drukke verkeer, onmogelijk zijn. Alferink: „De bouw als evenement en attractie: waarom niet? Veel winkeliers zijn er al mee bezig. „

## 'Ik baal van de obstakels die ik moet overwinnen'

door Riet Diemer

DEN HAAG – „Ik baal ervan dat ik uit bed geholpen moet worden, naar het station gebracht en in de trein gezet. Ik baal ervan dat ik niet met mijn kinderen kan schaatsen. Ik voel me gehandicapt dat ik in die rolstoel zit. Er is iets in me weg. Er zijn dingen die ik niet kan en die ik wel kan. Maar ik ben daar helemaal niet trots op. „Over de stelling: 'Ik ben trots op wie ik ben met mijn functiebeperking', waren de meningen op het eerste debat in de reeks 'Voren Toren' van de Gehandicaptenraad gisteren in

Den Haag behoorlijk verdeeld. „Ik kan niet trots zijn dat ik dingen heb overwonnen en op mijn handicap kan ik helemaal niet trots zijn. Ik ervaar het als een beperking“, bekende iemand uit de zaal uit de grond van zijn hart. Zijn hartkreet oogstte veel bijval. „Ik baal van de obstakels die ik moet overwinnen en van de gigantische moeite die het me kost. Ik zou willen dat daar begrip voor is. „Dat zo'n opvatting heel persoonlijk kan zijn bleek uit de reactie van een andere rolstoeler, een vrouw met een progressieve spierziekte. Ondanks

dat ze veel moest inleveren – „Je gaat soms door een diep dal“ – is ze er toch met oplossingen zoeken en knokken telkens weer bovenop gekomen. „Dat geeft vertrouwen en een gevoel van trots. „En ook dat ging er bij de zaal in als koek, tijdens de pittige discussie naar aanleiding van de bundel 'Trots en treurnis. Gehandicapt in Nederland' die werd bijgewoond door personen met verschillende soorten handicaps en chronisch zieken. Een beetje verwonderlijk was het wel, dat wanneer de voren toren moet worden verla-

ten – wat de bedoeling is – er geen mensen zonder handicap waren uitgenodigd als exponent van de maatschappij, die nogal eens ter verantwoording wordt geroepen. „Wat betekent mijn handicap voor mij op mijn plaats in de samenleving? was een van de stellingen met aansluitend de vraag hoe je de samenleving kunt beïnvloeden. Een Haagse deelneemster in een rolstoel betreurde het dat er vijftien jaar na het Jaar van de Gehandicapten nog steeds geen gelijke rechten zijn op wonen, studeren of reizen. Maar

ze vroeg zich ook af: „Hebben we in die vijftien jaar op efficiënte wijze en met succes de politici benaderd? „Ze gaf als voorbeeld hoe je het Haagse gemeentebestuur op een simpele manier kunt uitleggen wat het betekent minder vervoersmogelijkheden te krijgen met de vraag: „Is het de bedoeling dat ik drieënhalf keer per maand kan reizen? „„Nee zeker niet“, was het antwoord. „Toch werd het uitgebreid tot zeven à acht keer. „Gehandicapten moeten hun gelijke rechten op een andere manier gerealiseerd zien te krijgen. Dat doe je door

duidelijk te laten zien wat je wilt en je rechten op te eisen“, concludeerde discussieleidster Mieke Bökkerink. Ze gaf als voorbeeld hoe je het Haagse gemeentebestuur op een simpele manier kunt uitleggen wat het betekent minder vervoersmogelijkheden te krijgen met de vraag: „Is het de bedoeling dat ik drieënhalf keer per maand kan reizen? „„Nee zeker niet“, was het antwoord. „Toch werd het uitgebreid tot zeven à acht keer. „Gehandicapten moeten hun gelijke rechten op een andere manier gerealiseerd zien te krijgen. Dat doe je door

Onder de noemer 'Den Haag Nieuw Centrum' worden de komende jaren ambitieuze vernieuwingsplannen uitgevoerd. Met dit werk dat tot en met 1999 zal duren, wordt een zodanige opwaardering van het centrum nagestreefd, dat voor een regio van circa 800.000 inwoners een aantrekkelijk woon- en werkgebied ontstaat.

Als onderdeel van deze plannen wordt de Grote Marktstraat verkeersluw gemaakt door het doorgaande verkeer te weren, bestemmingsverkeer te beperken en de straat in te richten als domein voor voetgangers en fietsers. Essentieel is een goede bereikbaarheid van het centrum vanuit de stad en de regio, waarvoor voldoende parkeergelegenheid nodig is. Snel en comfortabel openbaar vervoer speelt daarbij een cruciale rol.

Voor een optimale invulling van deze plannen zijn diverse studies uitgevoerd. Op grond daarvan zijn bouwmethoden en uitvoeringsorganisatie bepaald. Het zijn deze methoden die in dit artikel de volle aandacht krijgen.

# HET SOUTERRAIN GROTE MARKTSTRAAT

## TECHNISCH HOOGSTANDE IN HET CENTRUM VAN DEN HAAG

Bij de uitwerking van de plannen bleken de kruispunten Grote Marktstraat-Spui en Jan Hendrikstraat-Grote Markt extra aandacht te vragen. Beide kruispunten hebben momenteel al te weinig capaciteit om het autoverkeer en het openbaar vervoer te kunnen verwerken.

Uit de onderzochte alternatieven is komen vast te staan dat alleen een ongelijkvloerse kruising, met het tramverkeer ondergrond, tot een aanvaardbare oplossing zal leiden. Een integrale aanpak voor de verkeersproblematiek in de binnenstad heeft uiteindelijk geleid tot een gecombineerde tram- en parkeervoorziening binnen het project Souterrain Grote Marktstraat/Kalvermarkt, waarvan met de bouw in februari van dit jaar is begonnen.

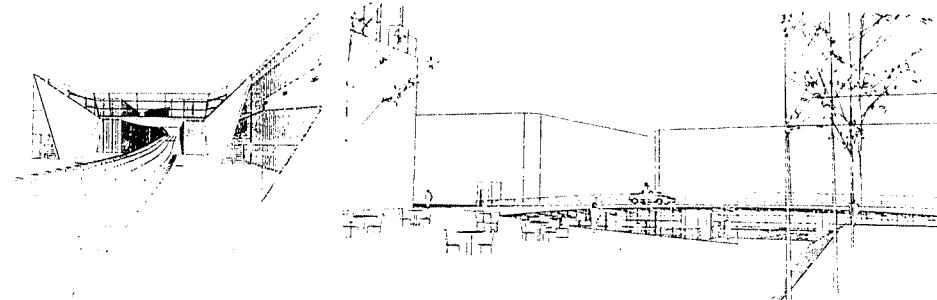
### ONTWERP

Het Souterrain Grote Marktstraat/Kalvermarkt (fig. 1) omvat een ondergrondse tram-

voorziening in combinatie met een plaatse-lijk erboven gelegen parkeergarage. Het tracé van de tunnel loopt vanaf de Brouwersgracht, via de Prinsegracht, de Grote Markt, de Grote Marktstraat en de Kalvermarkt. Bij de Muzenstraat sluit het aan op het bestaande Muzenviaduct. De tunnel heeft een lengte van circa 1250 m. Als onderdeel van de ondergrondse tramverbinding zijn in het ontwerp twee stations opgenomen. Het belangrijkste station wordt gebouwd ter plaatse van het kruispunt Grote Marktstraat - Spui, tussen de Voldersgracht en de Bagijnestraat.

Het tweede station wordt gebouwd bij de Grote Markt tussen de J. Hendrikstraat en de Lutherse Burgwal.

De huidige vorm van het Souterrain met al zijn verschillende onderdelen is het resultaat van een groot aantal randvoorwaarden waaraan moest worden voldaan. Maatge-



② Toepassen passerelles in de stations

④ Verdiepte ingang station Grote Markt

vend hierbij waren stedenbouwkundige uitgangspunten, voorwaarden vanuit het tramvervoer en de aanwezige kabels en leidingen maatgevend.

Naast de verschillende omgevingsfactoren zijn vooral de diverse openingen op maaiveldniveau, nodig voor de toegang tot de tramtunnel, de stations en de parkeergarage, bepalend geweest voor de vormgeving van de verschillende onderdelen van het Souterrain. Zo zijn de beschikbare locaties voor de openingen van de beide in- en uitritten, in hoge mate bepalend geweest voor de uiteindelijke lengte van de tramtunnel. Door de grote lengte waarover de straat moet worden doorbroken, vormen deze openingen een moeilijk in het maaiveld in te passen obstakel. Eén en ander heeft er toe geleid dat de westelijke in- en uitrit op de Prinsegracht is gesitueerd en dat de oostelijke in- en uitrit niet op de Kalvermarkt, maar voorbij de Fluwelen Burgwal binnen de bebouwing van het in uitvoering zijnde Residentproject is gesitueerd.

Verder bleek het inpassen van de verschil-

③ Langsdoorsnede Souterrain: 1250 m tramtunnel, twee stations en 485 parkeerplaatsen

- 1 = station Grote Markt
- 2 en 3 = parkeertagen
- 4 = station Spui

lende toegangen voor de beide stations in het maaiveld alleen mogelijk door het toepassen van passerelles binnen de ondergrondse ruimten (fig. 2). Deze passerelles maken het mogelijk om de perrons en de in- en uitgangen naar het maaiveld onderling met elkaar te verbinden, waardoor meer vrijheid ontstaat voor het kiezen van locaties voor de verschillende openingen in het maaiveld.

Samenvattend kan worden gesteld dat de randvoorwaarden bij het inpassen van de verschillende toegangen tot de diverse onderdelen van het Souterrain, in belangrijke mate bepalend zijn geweest voor het verloop van het verticale alignement van de tramtunnel en de ligging van de parkeergarage.

Komende vanaf de zuidzijde gaat de vrije trambaan op de Prinsegracht direct na het kruispunt Brouwersgracht over in de hellende inrit van de tramtunnel. Ter hoogte van de Beestenmarkt begint het gesloten tunneldeel dat vervolgens verder daalt naar het station Grote Markt (fig. 3).

Bij de uitwerking van het ruimtelijk ontwerp van dit station heeft de ontwerper, bureau OMA (Office for Metropolitan Architecture) volledig gebruik gemaakt van de mogelijkheden die de locatie bood.

Door een niveauverschil aan te brengen in het plein, kon de ingang van het station Grote Markt hierin worden opgenomen (fig. 4).

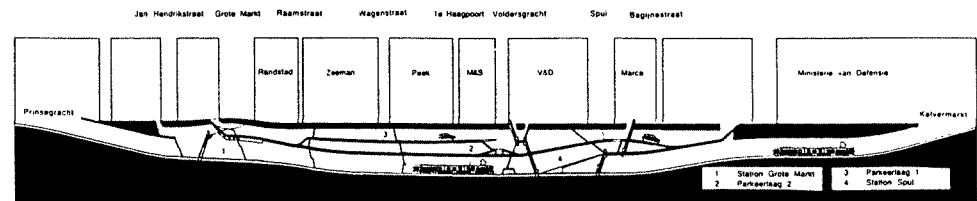
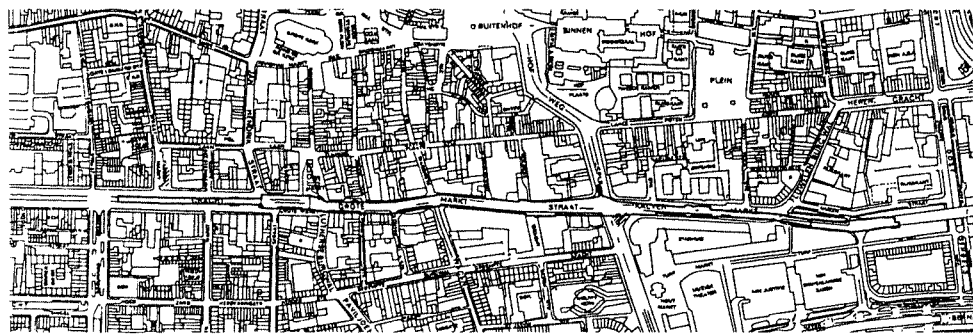
Vanaf de Grote Markt daalt de tramtunnel geleidelijk verder. Door het tunnelgedeelte in de Grote Marktstraat iets dieper aan te leggen dan strikt noodzakelijk was op basis van het verloop van het vereiste verticale alignement, ontstaat op relatief eenvoudige wijze de mogelijkheid om tussen tramtunnel en maaiveld een parkeergarage van twee lagen te bouwen.

De beschikbare breedte tussen de gevels van de Grote Marktstraat is circa 20 m. Na aftrek van de minimaal benodigde breedte voor het ondergronds parkeren, resteert langs de gevellijn een strook van minimaal 1,50 m. In deze strook worden alleen kabels en leidingen voor de aansluitingen naar de belendingen gesitueerd.

Ter hoogte van de Voldersgracht gaat de tramtunnel over in station Spui. De hellend verlopende vloer van de parkeergarage vormt hierbij het dak van het station. Door de breedte van de parkeergaragevloer in station Spui niet de verbreding van het station te laten volgen, wordt binnen het station een bijzonder ruimtelijk effect verkregen. Hiermee wordt bereikt dat de passagiers niet het gevoel krijgen in een ondergrondse doos te zijn opgesloten.

Dit ruimtelijk effect wordt nog vergroot door de scheidingswanden tussen parkeergarage en station als een glazen pui uit te voeren.

① Centrum Den Haag met situatie Souterrain - Grote Marktstraat/Kalvermarkt



Het toepassen van de hellende parkeer- vloer heeft tevens het grote voordeel, dat de passarelle ter hoogte van het kruispunt Spui, direct aansluitend boven de perrons kan worden gerealiseerd, waardoor het totale station over de gehele breedte kan worden overzien. Vanaf het kruispunt met het Spui stijgt de tramtunnel weer geleidelijk, maar blijft onder het maaiveld. Pas binnen de nieuwe te realiseren bebouwing van de Resident komt de tunnel boven maaiveld uit en sluit aan op het bestaande Muzenviaduct.

#### BEREIKBAARHEID EN UITVOERINGS- FASERING

De locatie van het project, midden in een drukke stedelijke omgeving, maakt dat de bereikbaarheid van de binnenstad en de omringende bebouwing, alsmede het handhaven van de stedelijke functies, een zeer belangrijke rol spelen bij de keuze van de uitvoeringsmethodiek.

Dit betekent in de eerste plaats dat werkzaamheden op het maaiveld die overlast kunnen veroorzaken, tot een minimum moeten worden beperkt.

Daarnaast moet de uitvoeringvolgorde zijn afgestemd op het handhaven van verkeers- en tramvoorzieningen. Ook moet de uitvoering rekening houden met het verleggen van kabels en leidingen en de bereikbaarheid van de omringende bebouwing voor bezokers, expeditieverkeer en hulpdiensten.

Dit alles heeft geleid tot het toepassen van de wanden-dakmethode (zie fig. 6). Bij deze methode worden eerst de wanden en het dak gemaakt, waarna het maaiveld in een vroeg stadium weer aan de gebruikers kan worden teruggegeven. De ontgraving en de andere tunnelbouwwerkzaamheden geschieden dan onder het dak.

Bij deze bouwmethode moet een sterk gefaseerde wijze van uitvoering worden toegepast.

#### 5 Uitvoeringsfasen

De bouw van het totale tunnelproject wordt onderverdeeld in de drie hoofdvoeringsfasen A, B en C (fig. 5).

Om handhaving van de huidige tramlijnen mogelijk te maken, zullen de bovengrondse werkzaamheden van de fasen A en C eerst worden uitgevoerd alvorens met fase B te beginnen.

Tijdens fase A moeten het doorgaande verkeer en het openbaar vervoer in de Prinsegracht gehandhaafd blijven. Dit maakt het noodzakelijk de werkzaamheden per zijde uit te voeren, waarbij het slopen van een gemetseld hoofdriool, het inbrengen van de stalen damwanden, het verleggen van tramspooren, het verleggen van kabels en leidingen en het omleiden van het verkeer gefaseerd plaatsheeft.

Zodra het dak van het gesloten tunnelgedeelte gereed is, kunnen de tramspooren op hun definitieve plaats worden gelegd en aangesloten op de tramspooren in de J. Hendrikstraat.

Fase C kan worden onderverdeeld in het tunnelgedeelte Kalvermarkt en de inrit Muzenstraat. Uitvoering van de bovengrondse werkzaamheden in de Kalvermarkt gebeurt in vakken. Hierbij wordt de volgorde van het inbrengen van de stalen damwanden, het vervaardigen van de diepwanden en het aanbrengen van het dak bepaald door de mogelijkheden om het doorgaande en lokale verkeer te handhaven en de kruisende kabels en leidingen te verleggen.

Tijdens deze werkzaamheden worden de huidige tramlijnen tijdelijk omgeleid via de omrijsporen in de Schedeldoekshaven. De werkzaamheden ter plaatse van de Muzenstraat vinden gefaseerd plaats in samenhang met het verleggen en omleiden van de daar te handhaven doorgaande tramlijnen.

Als de bovengrondse werkzaamheden in de hoofdvoeringsfasen A en C gereed zijn,

worden de thans in de Grote Marktstraat aanwezige tramlijnen omgeleid en kan worden begonnen met fase B.

In de twee tot fase B behorende onderdelen Grote Markt (B1) en Grote Marktstraat (B2) is voor een verschillende uitvoering gekozen.

Bij de Grote Markt is handhaving van het doorgaande verkeer van belang. Daarom is voor een gefaseerde uitvoering van de wanden en de dakconstructie gekozen in nauwe samenhang met het om, over en langs het bouwterrein leiden van het verkeer.

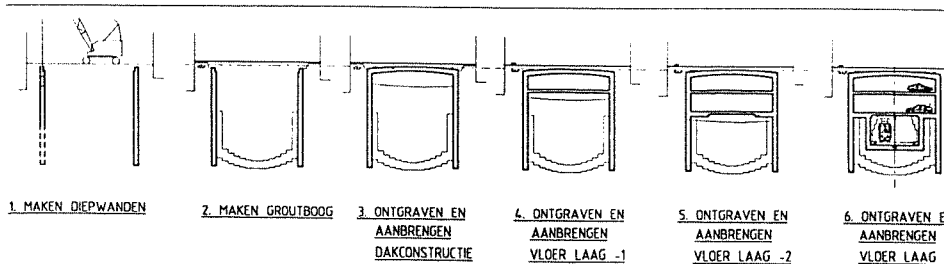
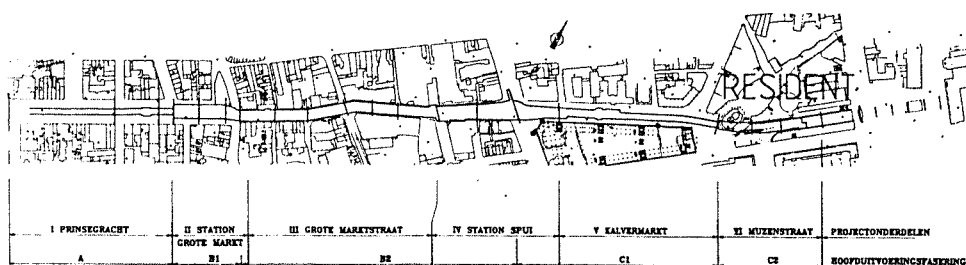
In de Grote Marktstraat is de bereikbaarheid van de omringende bebouwing maatgevend voor de wijze van uitvoeren. Dit heeft geleid tot een onderverdeling van de tunnel in vakken met een lengte van maximaal 60 à 100 m. Deze maat komt overeen met de afstand tussen twee zijstraten, zodat de zijstraten altijd bereikbaar blijven vanaf de Grote Marktstraat.

De op het maaiveld zichtbare werkzaamheden worden in principe per vak uitgevoerd, waarbij nooit in twee naast elkaar gelegen vakken tegelijk mag worden gewerkt. Vanuit de beide uiteinden van de Grote Marktstraat wordt naar het midden toegewerkt. Indien in een vak de bovengrondse werkzaamheden gereed zijn, wordt het bouwterrein verplaatst naar het volgende vak en wordt het eerste vak vrijgegeven voor het publiek.

Tussen de gevels van de bestaande bebouwing en het bouwterrein blijft een beperkte ruimte beschikbaar voor passanten en voor de bereikbaarheid van de aanliggende panden. Deze ruimte varieert per locatie en per uitvoeringsfase.

Tijdens het maken van de diepwanden is de breedte 1,30 m; tijdens de uitvoering van de dakconstructie ten minste 2,00 m.

Na de bovengrondse werkzaamheden wordt met de uitvoering van de onderdakse werkzaamheden begonnen.



#### 6 Wanden-dak methode in zes fasen

#### CIVIELE TECHNIEK

Het bouwen van het Souterrain in een drukke stedelijke omgeving met ontgravingen tot 14 m onder het straatniveau op korte afstand van de bestaande bebouwing heeft geleid tot het stellen van aanvullende eisen ten opzichte van de bestaande voorschriften. Deze aanvullende eisen voor de vakgebieden geotechniek, geohydrologie en civieltechniek zijn tijdens de ontwerpfase in overleg met de betrokken overheidsinstanties vastgesteld. Diverse deelonderzoeken zijn uitgevoerd voor de geologische bodemgesteldheid, de toelaatbare bijkomende vervormingen van de belendingen, de stabiliteit van de constructie tegen opdrijven en de tijdelijke voorzieningen tijdens de bouw.

De gekozen technische oplossingen zijn elk het resultaat van een variantenstudie, waarbij ook de economische factor is meegewogen. Na het vaststellen van de constructiemethode van een bouwdeel is het ontwerp in financiële zin verder geoptimaliseerd. Het constructie ontwerp maakt deel uit van het integrale ontwerp, dat is afgestemd op de randvoorwaarden met betrekking tot de locatie en functionele, architectonische, installatie- en uitvoeringstechnische eisen. De constructie is vooral bepaald door de keuze voor de wanden-dak methode (fig. 6) waardoor de overlast tijdens de bouwperiode op straatniveau tot een minimum beperkt zal blijven.

De constructieve mogelijkheden zijn, samen met de architectonische vormgeving, via intensief overleg tussen alle betrokken partijen uitgewerkt tot een technisch hoogwaardig ondergronds gebouw. Een gebouw, waarin aan de beleving van de reiziger de hoofdrol is toebedeeld.

Ondergronds bouwen vereist een intensief bodemonderzoek, waarbij kennis van en ervaring met de lokale omstandigheden onontbeerlijk zijn. De resultaten van de grond-

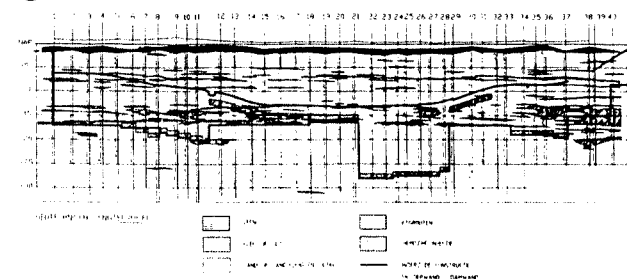
boringen, diepsonderingen en stijghoogtemetingen van het grondwater tot in de wijde omgeving zijn uitgewerkt tot civieltechnische randvoorwaarden voor de constructie.

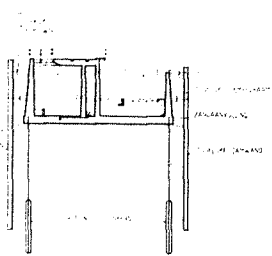
Kenmerkend voor de bouw van het Souterrain zijn de volgende hoofdaspecten:

- de bodemopbouw ter plaatse bestaat voornamelijk uit zandige gronden, met op circa NAP - 16 m een dunne waterremmende veenlaag. Deze laag vormt de scheiding tussen het bovengelegen duinpakket en het ondergelegen eerste watervoerende pakket (fig. 7). De veenlaag ontbreekt op sommige delen van het tunneltraject;
- de grondwaterstanden in de omgeving mogen slechts een zeer geringe wijziging ondergaan. Dit betekent dat de bouw plaats moet vinden in gesloten bouwputten;
- de ontgravingen van de bouwputten onder de dakconstructie veroorzaken bijkomende zakkingen direct boven en naast het tracé. Deze geringe zakkingen en eventuele trillingen tijdens het aanbrengen van de damwanden mogen geen schade toebrengen aan de bestaande ondergrondse infrastructuur, de wegverharding met tramspooren en de naastgelegen gebouwen.

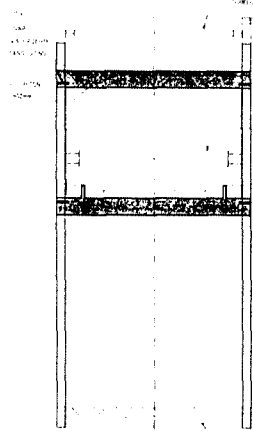
De bouwputten zijn ontworpen met waterdichte stalen damwanden of betonnen diepwanden, die tevens als permanente wand in de constructie zijn opgenomen. De wanden

#### 7 Geotechnisch langsgedeelte

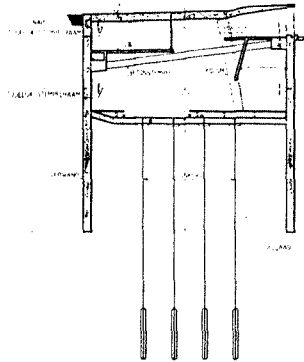




8 Ontwerp inrit Muzenstraat



9 Ontwerp gedeelte Prinsegracht/Kalvermarkt



10 Ontwerp stations Spui en Grote Markt

ma's zijn de vervormingen van het gebouw en de bijkomende vervormingen ten gevolge van het ontgraven van het Souterrain berekend.

Deze vervormingen, uitgedrukt in relatieve rotaties, zijn getoetst aan de toelaatbare grenswaarden die in nauw overleg met de dienst Bouwen en Wonen zijn vastgesteld. De gehanteerde grenswaarden zijn samengevat in tabel 1.

De toelaatbare waarden zijn afhankelijk gesteld van vier factoren. Indien de stijfheid van de draagconstructie is afgenomen, zijn strengere eisen van toepassing. Bij een opbuiging van de fundering worden de eisen eveneens zwaarder. Voor de aanwezige monumentale panden gelden kleinere grenswaarden, waarbij een vermenigvuldigingsfactor van 1,67 wordt toegepast. De grenswaarden voor skeletbouw kunnen met een delingsfactor van 1,5 worden verruimd. Deze vervormingseisen hebben geleid tot het toepassen van de bijzondere groutboogconstructie in de Grote Marktstraat.

Tabel 1  
Grenswaarden relatieve rotaties metselwerkgebouwen (stapelconstructies)

kwalificatie draagconstructie metselwerkgebouwen	type buiging	
	neerwaarts	opwaarts
Goed, geen verlies aan stijfheid	1:500	1:700 à 900
Matig, enig verlies aan stijfheid	1:700	1:950 à 1200
Slecht, veel verlies aan stijfheid	1:1000	1:1300 à 1600

**HOOFDCONSTRUCTIES**

Vanwege de situatie ter plaatse en de gekozen bouwfasering zijn in constructief opzicht vier hoofdconstructies te onderscheiden.

**Open bakconstructie toerit Muzenstraat**  
Deze toerit sluit aan op vier tramsporen van en naar het Centraal Station. Het afslaande spoor van CS naar Schedeldoekshaven wordt via een fly-over over het stijgende spoor uit de tunnel geleid. De betonnen bakconstructie (fig. 8) wordt gemaakt in een bouwput met tijdelijke damwanden. De stabiliteit tegen opdrijven wordt verzekerd door verticale ankers. De bouw gebeurt in fasen, afgestemd op het omleggen van de bestaande tramsporen en de bouw van het plan de Resident. Dit omvangrijke stedenbouwkundig plan overkluist de gehele toerit en wordt min of meer gelijktijdig gerealiseerd.

**Tramtunnel Prinsegracht en Kalvermarkt**  
Het ontwerp van de tunneldelen in de Prinsegracht en Kalvermarkt bestaat uit permanente damwanden met daartussen een ter

plaatse gestorte gewapend-betonnen dak- en funderingsvloeren (fig. 9). De vloeren dienen tevens als stempel tussen de wanden. De keuze voor de damwanden volgt uit de beschikbare ruimte tijdens de bouw, terwijl ook het verkeer aan weerszijden van het werkterrein doorgang moet vinden.

Voor het intrillen van de wanden zijn strenge eisen gesteld aan het trillingsniveau ter plaatse van de gebouwen om eventuele schade te voorkomen. Inmiddels is gebleken dat het intrillen goed mogelijk is binnen de norm van 1,9 mm per seconde.

Na het inbrengen van de wanden wordt de bestaande wegverharding verwijderd en de tijdelijke voorzieningen voor het bemalen van de bouwput inclusief de eventuele injectie van de bodemafluiting aangebracht. De dakvloer wordt direct op een door het zandbed ondersteunde bekisting gestort. Daarna wordt de tunnel onder het dak verder ontgraven en de funderingsvloer aangebracht.

Het ontgraven onder het dak vindt in twee lagen van elk circa 3 m plaats. Tijdens het graven drukt de gronddruk de damwanden naar binnen, waardoor ook maaieldzakkingen kunnen optreden. Om deze vervormingen te beperken wordt na ontgraving van de eerste laag een stempelraam aangebracht. Om dezelfde reden zijn de verbindingen tussen vloer en damwand als stijve verbindingen ontworpen.

**Stations Grote Markt en Spui**  
De constructie ter plaatse van de 110 m lange perrons heeft de vorm van een doos, uit-

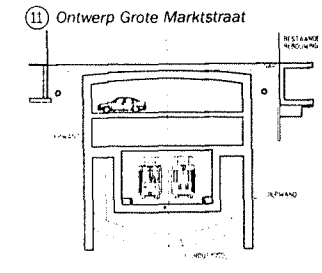
gevoerd met diepwanden en een betonnen dak- en funderingsvloer. De dikte van de funderingsvloer, die maximaal 14 meter waterdruk moet weerstaan bij een overspanning tot circa 30 m wordt beperkt door de verticale ankers. De ankers zorgen er ook voor dat de tunnel niet gaat opdrijven. Voor het station Spui worden 1,2 m dikke diepwanden tot omstreeks NAP -28 m toegepast. Twee tijdelijke, zwaar uitgevoerde stempelaamwerken zijn nodig om de uitbuiging van deze wand te beperken tot ca 30 mm.

Voor de ingang van het station Grote Markt is het dak aan één zijde van de doos opgetild, zoals aangegeven in figuur 10. Een ruimtelijk verloopend stempelraamwerk en scheef geplaatste kolommen zorgen voor de benodigde stabiliteit van de wanden en het dak. Dit constructief ingewikkelde ontwerp is in nauw overleg met het architectenbureau OMA tot stand gekomen, waarbij de constructieve randvoorwaarden met de architectonische inzichten zijn verenigd.

De verticale ankers worden voor dit deel van het station ook toegepast voor het aanbrengen van een extra bovenbelasting via bodemplaten.

Deze bodemvermageling zorgt voor voldoende veiligheid tegen opbarsten van de bouwputbodem bij een aangepaste ontgravingsmethode. Tevens wordt met de alzijdige overspanning van de grond tussen de diepwanden, dik 0,80 m, en de bodemplaten, de uitbuiging van de wanden beperkt.

**Souterrain Grote Marktstraat**  
Van dit 320 m lange gedeelte geeft figuur 11 een dwarsdoorsnede. De 0,80 m dikke diepwanden worden op circa 1,5 m uit de gevels aangebracht, nadat de kabels en leidingen tegen de gevels zijn verlegd. De aanwezige verharding wordt verwijderd, zodat vanaf het maaiveld de groutkolommen in de vorm van steunwanden en de groutboog met behulp van jetgrouting kunnen worden aangelegd.



11 Ontwerp Grote Marktstraat

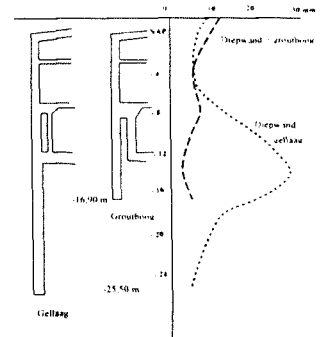
Voorafgaand aan het maken van het dak worden ook de bemalingsvoorzieningen geplaatst. Onder het dak wordt elke diepere gelegen vloerlaag fasegewijs ontgraven en ter plaatse gestort, totdat ook de funderingsvloer en de bijbehorende wanden zijn gerealiseerd. De groutboog functioneert hierbij als waterkerende afsluitlaag en als stempel tussen de diepwanden. Ook dient de drukboog als funderingsplaat voor de constructie tijdens de ontgravingen, waarbij de diepwanden de resulterende trekbelasting ten gevolge van de opwaartse gronddruk opnemen.

De steunwanden aan de binnenzijde van de diepwanden zorgen ervoor dat tijdens de ontgravingen voor de diepst gelegen vloer de verticale belasting wordt overgedragen naar de hoger gelegen vloerlaag. Dit ontwerp is het resultaat van een uitgebreide studie naar de mogelijkheden voor het beperken van de uitbuigingen van de diepwand en de bijkomende zakkingen van de belendingen. De verschillen in de uitbuiging van de wand, ca 30 mm ten opzichte van circa 8 à 9 mm zijn samengevat in figuur 12. De variant met een gellaag leidt tot langere diepwanden. Daarbij moet tevens een extra tijdelijk stempelraamwerk boven de funderingsvloer worden gemaakt.

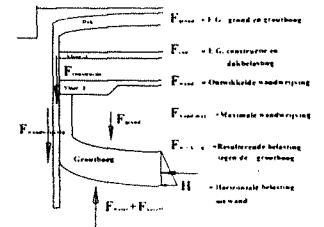
Het bepalen van de resulterende krachten op de groutboog is samengevat in figuur 13. Het krachtenevenwicht is een functie van de optredende zwel en de bijbehorende waterverplaatsing. Als gevolg van de ontgraving komt de grond onder de boog omhoog door de ontspanning van de korreldruk. De groutboog tilt daardoor de constructie op, waardoor de wandwrijving aan de buitenzijde van de diepwand wordt ontwikkeld. Daardoor neemt de gronddruk onder de boog toe totdat evenwicht is gevonden met het totaal van de neerwaartse belasting, inclusief de ontwikkelde wandwrijving. Voor het bepalen van de belastingen op de groutboog, de dimensionering en de controle voor de uiterste grenstoestanden is een apart berekeningsmodel ontwikkeld. Het model is gecontroleerd door middel van computerberekeningen (PLAXIS) voor de totale dwarsdoorsnede.

**START UITVOERING**

De minister van Verkeer en Waterstaat heeft in maart 1996 persoonlijk de start van de werkzaamheden verricht door het laten intrillen van de eerste damwandplanken. De werkzaamheden voor de eerste bouwfa-



12 Berekende uitbuiging van de diepwand



13 Krachtswerking groutboog

se in de Muzenstraat, Prinsegracht en Kalvermarkt zijn daarmee begonnen. In februari 1997 zullen de tramsporen uit de Grote Marktstraat zijn omgeleid, zodat in de tweede bouwfase de diepwanden en de dakconstructie in de Grote Marktstraat kunnen worden aangebracht. Begin 1998 zullen de openbare functies op straat weer volledig in gebruik zijn gesteld. Voor het zover is zullen de bouwactiviteiten ondanks al de getroffen maatregelen niet ongemerkt aan de omgeving voorbijgaan. Door reeds in een vroeg stadium met de bewoners, winkeliers en passanten met gedachten te wisselen over het ontwerp en de wijze van uitvoering en dit ook tijdens de uitvoering voort te zetten, wordt de overlast door de bouw tot acceptabele grenzen teruggebracht.

- II.2: Stroomschema's proeven, 2 en 3 fasen**
- Jetgrouten**
- Uitvoeringsparameters, totaaloverzicht**
- Tekening proefput**
- Jetgroutstaat en registratieform. kolom 14**

JETGROUTPROEVEN t.b.v. Souterrain Kalvermarkt

3-Fasen systeem

1	snijdruk	450	[bar]
	snijdebiet	140	[ltr/min]
	nozzles	2 x 2,0	[mm]
	luchtdruk	10	[bar]
	luchtdebiet	10	[m3/min]
	vuldruk		[bar]
	vuldebiet	200	[ltr/min]
	nozzles	3 x 4,2	[mm]
	w.c.f.	0,8	[-]
	treksnelh.	0,20	[m/min]
	draaisnelh.	5	[omw/min]
	kolomdiam.		[m]

Extra proeven:

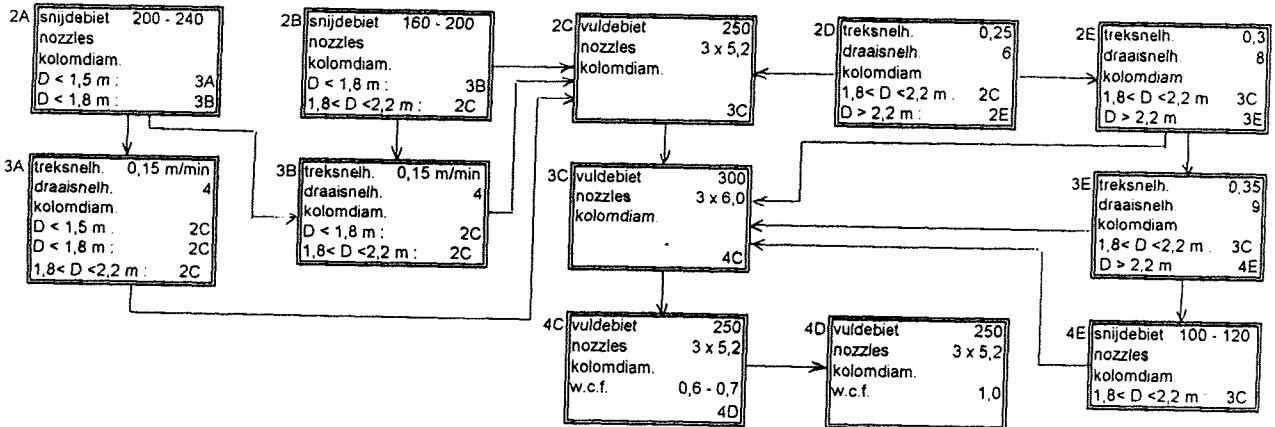
na 4D:

5	snijdebiet	grout	
	vuldebiet		150
	nozzles		
	kolomdiam.		
	w.c.f.		0,8

na 4D

6	treksnelh.	0,5
	draaisnelh.	12
	kolomdiam.	
	D < 1,0 m	langzamer
	D > 1,2 m	sneller

D < 1,5 m : 2A  
 D < 1,8 m : 2B  
 1,8 < D < 2,2 m : 2C  
 D > 2,2 m : 2D  
 D > 2,5 m : 2E



JETGROUTPROEVEN t.b.v. Souterrain Kalvermarkt

2-Fasen systeem

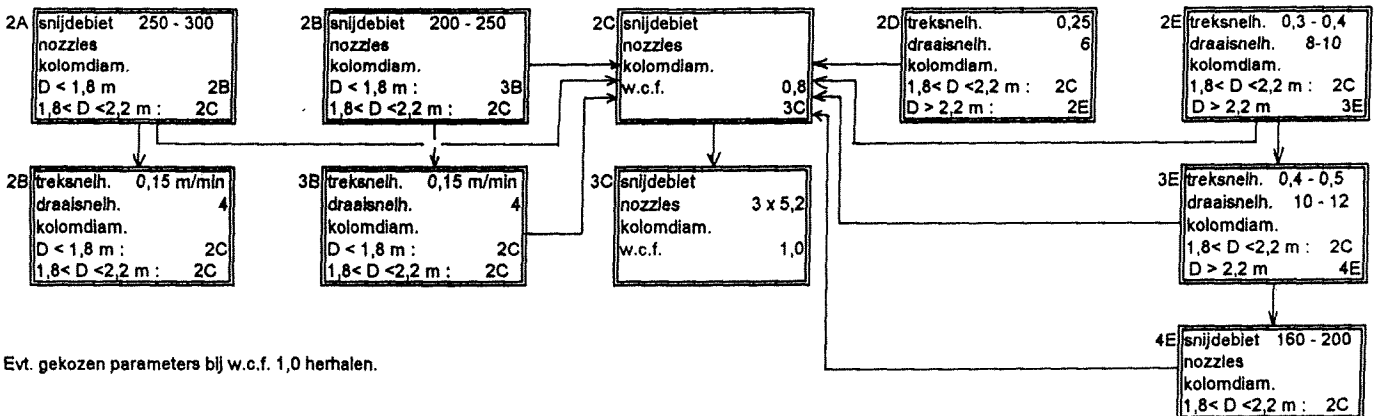
1	snijdruk	400	[bar]
	snijdebiet	200	[ltr/min]
	nozzles	2 x 2,75	[mm]
	luchtdruk	10	[bar]
	luchtdebiet	10	[m3/min]
	w.c.f.	1,0	[-]
	treksnelh.	0,20	[m/min]
	draaisnelh.	5	[omw/min]
	kolomdiam.		[m]

Extra proeven:

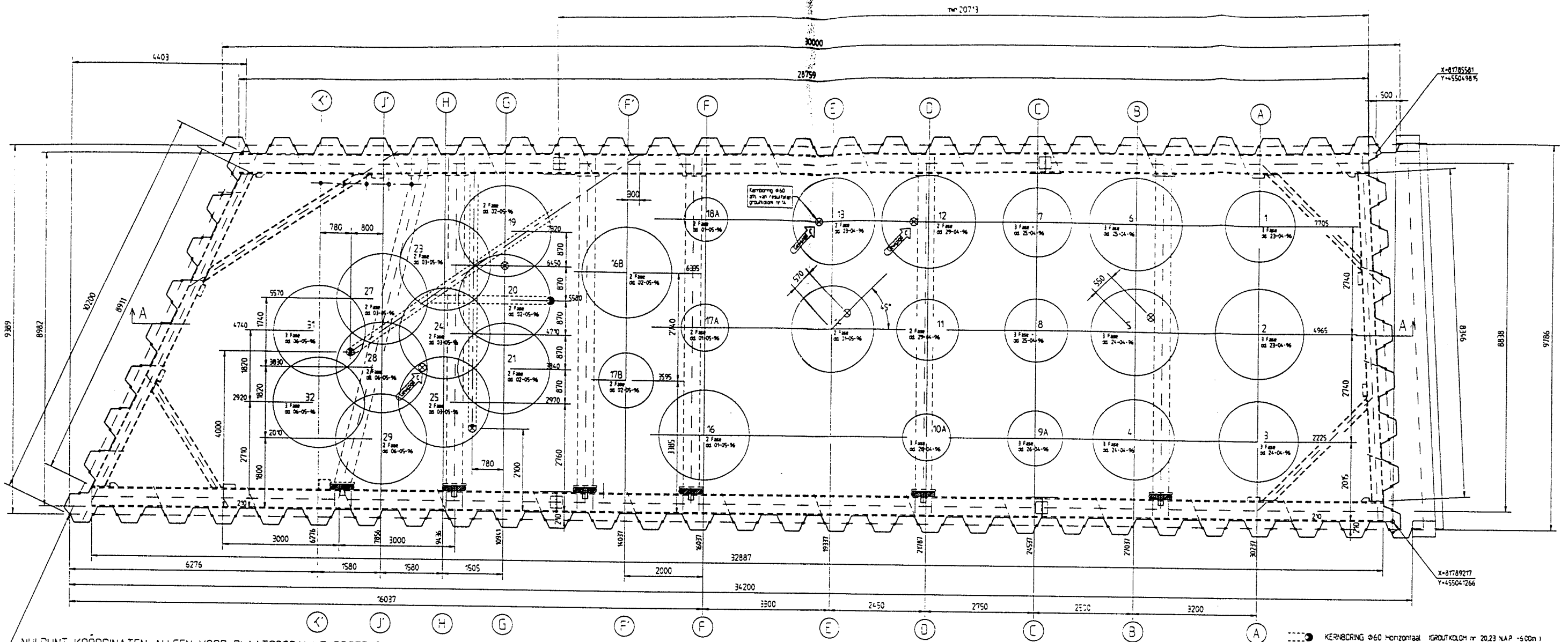
na 3C:

	treksnelh.	0,5
	draaisnelh.	12
	kolomdiam.	
	D < 1,0 m	langzamer
	D > 1,2 m	sneller

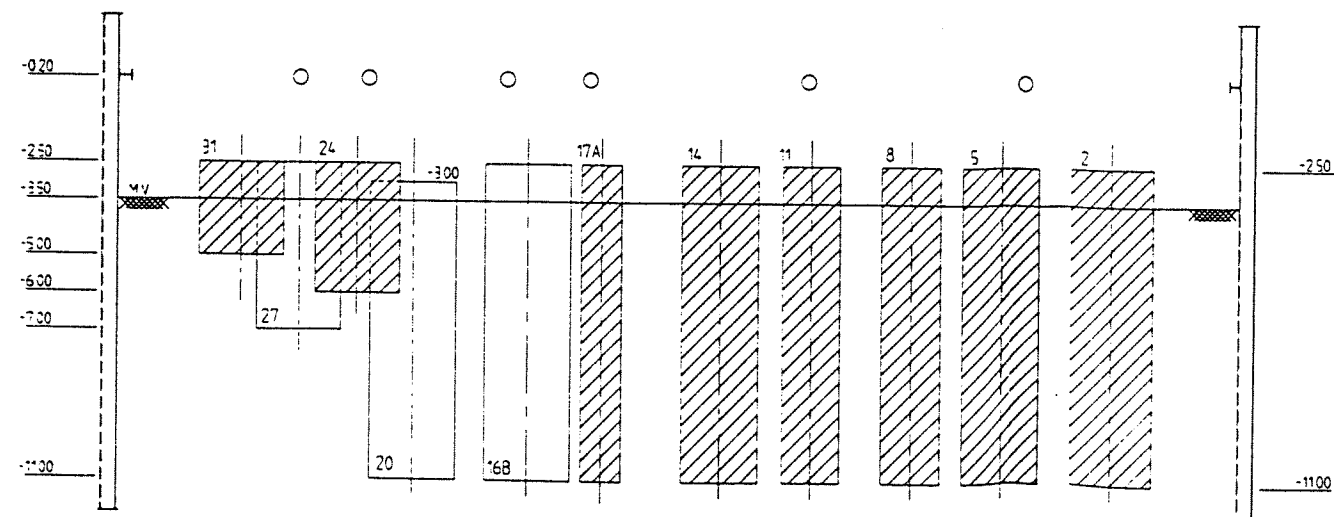
D < 1,5 m : 2A  
 D < 1,8 m : 2B  
 1,8 < D < 2,2 m : 2C  
 D > 2,2 m : 2D  
 D > 2,5 m : 2E



Evt. gekozen parameters bij w.c.f. 1,0 herhalen.



VAK 18



DOORSNEDE A-A  
SCHAAL 1:100  
HOOGTEMATEN N.M. 10v. NAP

kolomnr	X-Koördinaat	Y-Koördinaat	OK	BK
1	30237	7705	-1100	-250
2	30237	4965	-1100	-250
3	30237	2225	-1100	-250
4	27037	2225	-1100	-250
5	27037	4965	-1100	-250
6	27037	7705	-1100	-250
7	24537	7705	-1100	-250
8	24537	4965	-1100	-250
9A	24537	2225	-600	-250
10A	21787	2225	-600	-250
11	21787	4965	-1100	-250
12	21787	7705	-1100	-250
13	19337	7705	-1100	-250
14	19337	4965	-1100	-250
16	16037	2225	-1100	-250
16B	14037	5335	-1100	-250
17A	16037	3595	-1100	-250
17B	14037	3595	-1100	-250
18A	16037	7705	-1100	-250
19	10941	7705	-1100	-300
20	10941	5580	-1100	-300
21	10941	3840	-600	-250
23	9436	5550	-1100	-300
24	9436	7705	-600	-250
25	9436	2970	-600	-250
27	7856	3570	-700	-250
28	7856	1830	-700	-250
29	7856	2970	-700	-250
31	6276	4740	-500	-250
32	6276	2920	-500	-250

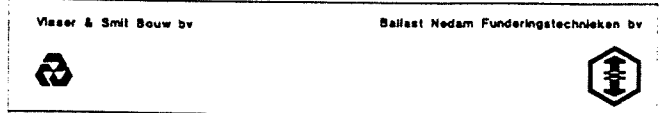
- KERNBRING Ø60 Horizontaal (GROUTKOLM nr 20,23 NAP -600m)
  - ⊗ KERNBRING Ø60 Verticaal (GROUTKOLM nr 5,12,14,19/20 en 24/25/28)
  - ⊗ KERNBRING Ø60 onder 55° (GROUTKOLM nr 25)
  - ⊗ KERNBRING Ø60 onder 60° (GROUTKOLM nr 31)
- 1) Boring afhankelijk van resultaten groutkolen nr 14

NULPUNT KOÖRDINATEN ALLEEN VOOR PLAATSBEPALING PROEFKOLONNEN

Letter	omschrijving	datum	get	gezet
F				
E				
D				
C	Kernring 60 in kolom 11/17 verspanning kernring 60 in kolom 13/17 en 14/25/28	21-05-96	AM	AM
B	Kernring 60 als uitgevoerd in kernring 60	19-05-96	AM	AM
A	Diverse wijzigingen	19-05-96	AM	AM

**Kombinatie Funderingstechnieken Den Haag**

Visser & Smil Bouw bv  
Baljaar Nedom Funderingstechnieken bv



Schaal 1:50  
Datum 12-04-1996  
Get AM  
Gez AM  
Wissingsdata  
A-17-04-96 B-13-05-96 C-21-05-96  
D-...  
Formaat A0  
Werk nr 56118  
T-SGMK-KM-J-002  
56118004 C

# KFD

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

## Jetgroutstaat proefkuip

<b>Kolomnummer: 14</b>		<b>datum:</b> 1-5-'96		
		starttijd boren:	eindtijd boren:	
		starttijd grouten: 8.10	eindtijd grouten: 9.19	
Jetgroutsysteem:	2 fase	[-]	opmerkingen:	
Treksnelheid:	17	[cm/min]		
Draaisnelheid:	4	[omw/min]		
Snijdruk:	460	[bar]		
Snijdebiet:	300	[ltr/min]		
Nozzle-grootte/aantal snijstraal:		[mm]/[-]	2 x 4.0 mm	
Groutdruk:	-	[bar]		
Groutdebiet:	-	[ltr/min]		
Nozzle-grootte/aantal groutstraal:		[mm]/[-]	-	
Luchtdruk:	9	[bar]		
Luchtdebiet:		[m3/min]		
Wcf:	0.70	[-]		
Onderzijde kolom:	-11.00	NAP [m]		
Bovenzijde kolom:	-2.50	NAP [m]		
Kolomhoogte:	8.50	[m]	-	
Boordiepte:	-11.35	NAP [m]		
Totaal debiet:	15883	[ltr]		
Schat. retourstroom:	18	[m3]		
Diamtr op diepte NAP -5.00	2.08	[m]	problemen met puin	
Diamtr op diepte NAP -6.00	2.37	[m]		
Diamtr op diepte NAP -8.00	2.20	[m]		
Diamtr op diepte NAP -9.00	2.42	[m]		
Diamtr op diepte NAP -10.00	2.24	[m]		
Monster retour 1	-10.00	NAP [m]	9 cylinders gemaakt en filterproef uitgevoerd:	ja
Monster retour 2	-8.75	NAP [m]	9 cylinders gemaakt en filterproef uitgevoerd:	ja
Monster kolom 1	-10.00	NAP [m]	9 cylinders gemaakt en filterproef uitgevoerd:	ja
Monster kolom 2	-4.00	NAP [m]	9 cylinders gemaakt en filterproef uitgevoerd:	ja
Hellingmeting uitgevoerd:	nee			

opmerkingen algemeen: Kolom 15 niet uitgevoerd ivm andere maatvoering peilbuis, dan vooraf bekend.

Invloed lucht wellicht significant.

Cementgehalte geschat: 300 kg/m3

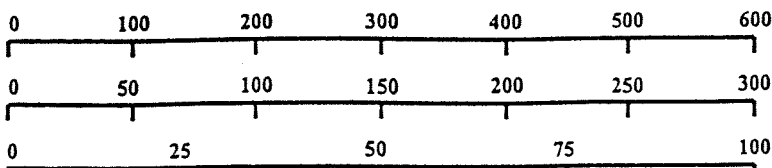




KFD

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

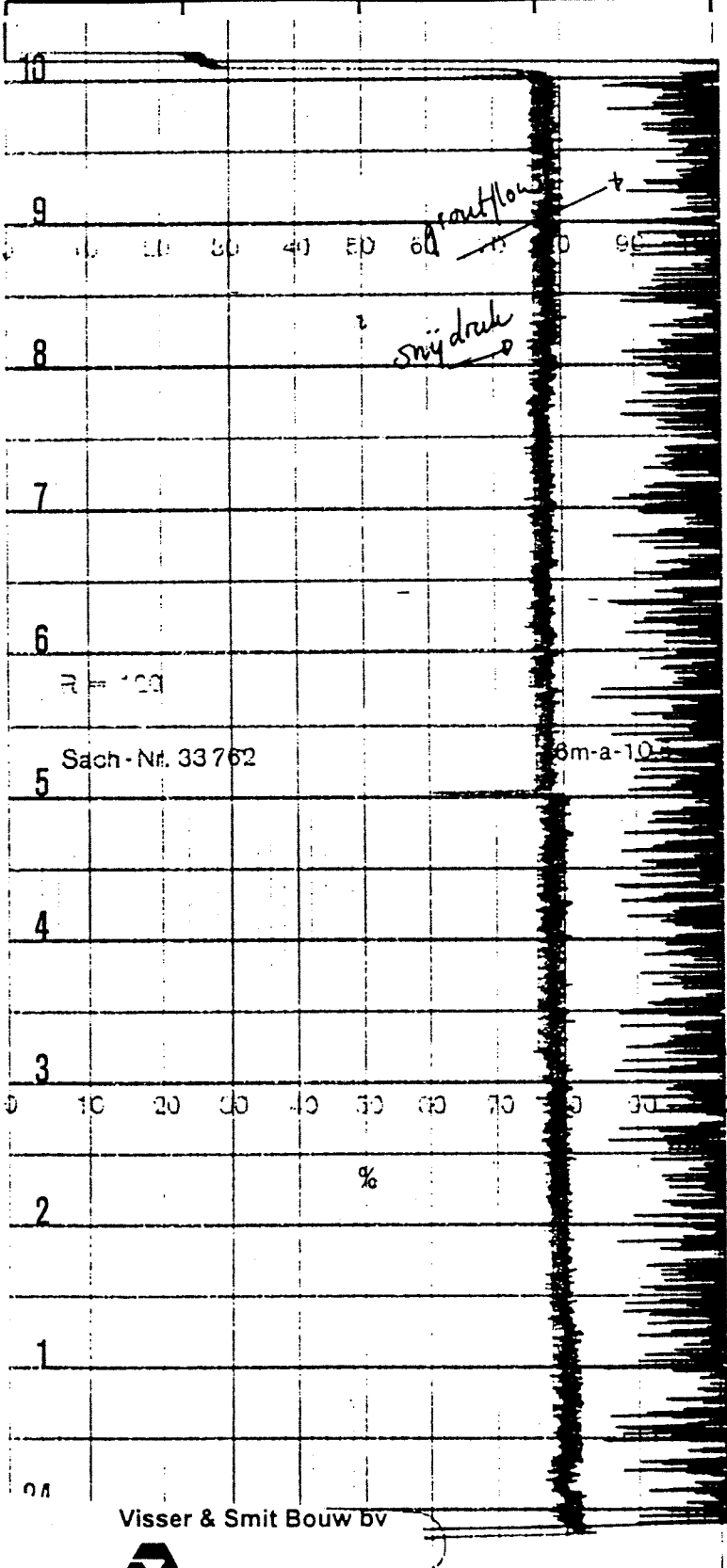
# Registratie groutparameters



Snijdruk (bar)

Groutflow (ltrs/min)

Vuldruk (bar)



kolomnr:	14	-
datum:	01/05	-
snijdruk:	450	bar
groutflow:	300	ltrs/min
vuldruk:	-	bar
loopsnelheid schrijver:	4 mm/min	
treksnelheid kolom:	17 cm/min	
lengte kolom:	8.5 m	
verklaringen:		



werknummer 66020  
paalnummer 14  
volnummer 17  
meetdatum 1/5/1996

maaiveldhoogte peil 0.00  
paallengte 11.00 m  
puntniveau peil -11.00 m  
starttijd 8:10:13

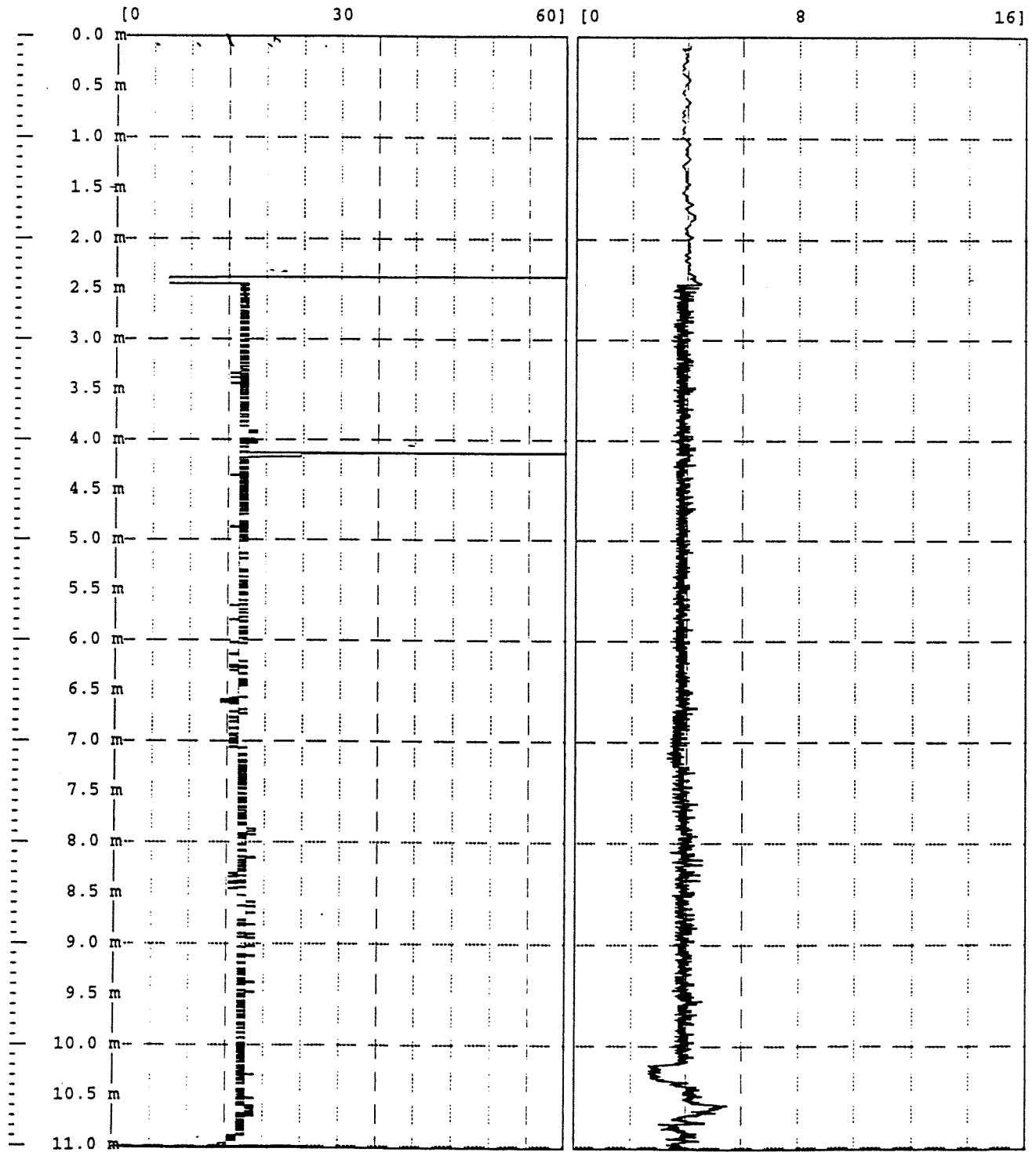
paaltype  
geboorde paallengte 11.02 m  
puntniveau peil -11.02 m  
eindtijd 9:19:44

### TREKKEN

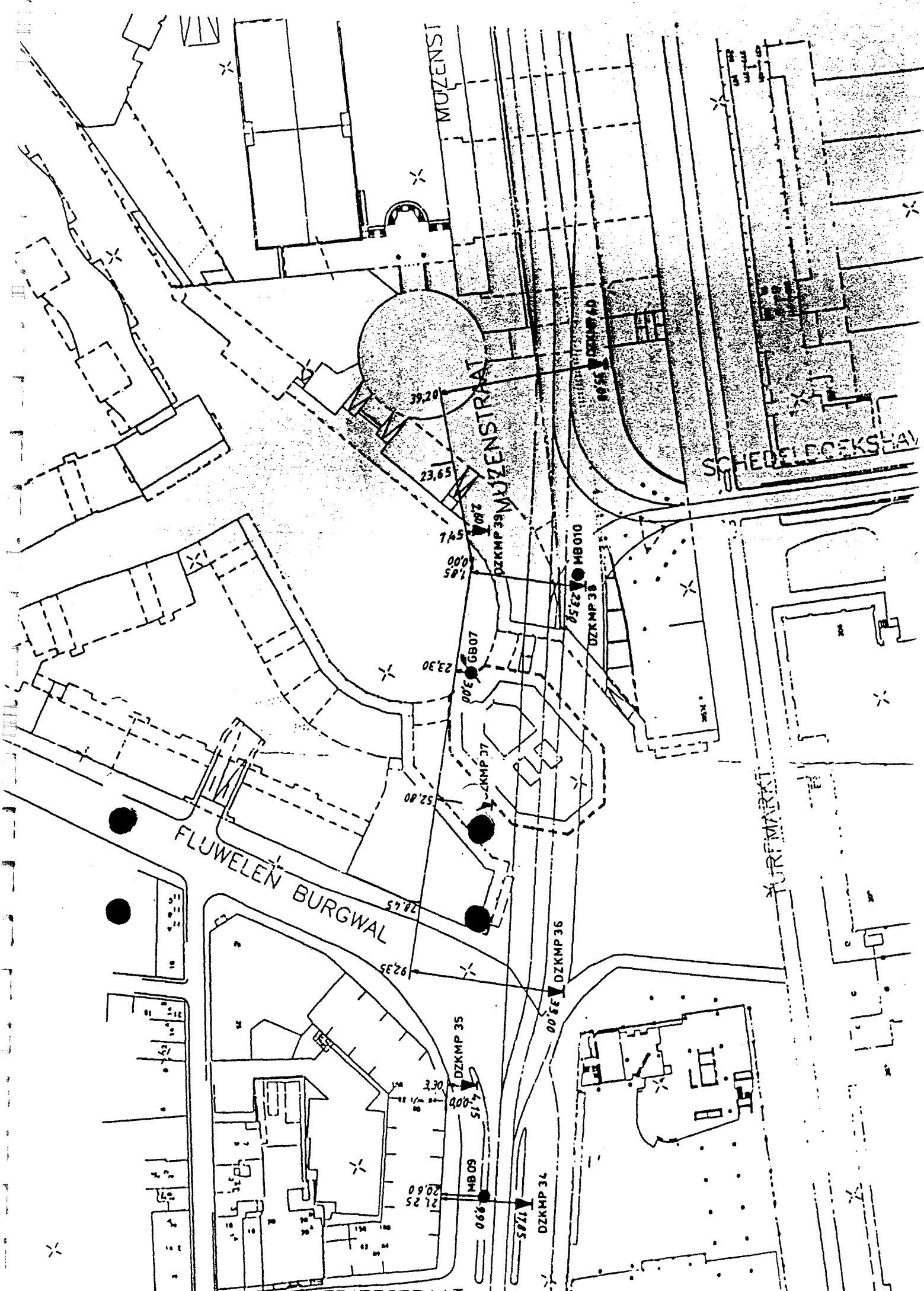
diepte  
tov maaiveld  
[m]

trek-  
snelheid  
[cm/min]

boor-  
toeren  
[omw/min]



**II.3:      Sondering DKMP 37  
                 Boring GB-07  
                 Boring MB-09  
                 Sondering S6 t/m S8**



MUZENST

MUZENSTRAAT

FLUWELENBURGWAL

SCHEDERDEKSTRAAT

TURFMARKT

KOEDIEFSTRAAT

39.20

23.65

7.45

00.00

1.85

23.30

52.80

78.65

92.35

3.30

21.25

20.60

DZKMP 40

MB010

DZKMP 38

23.58

MB07

DZKMP 37

DZKMP 36

00.55

DZKMP 35

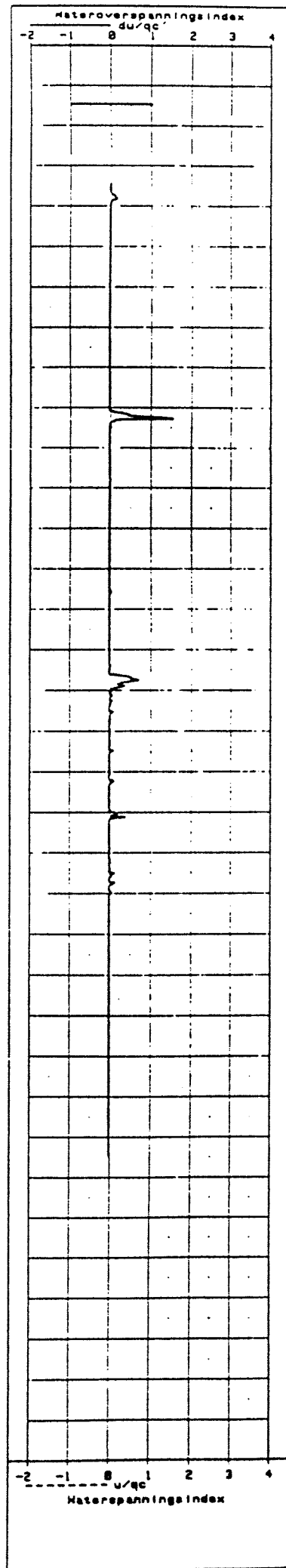
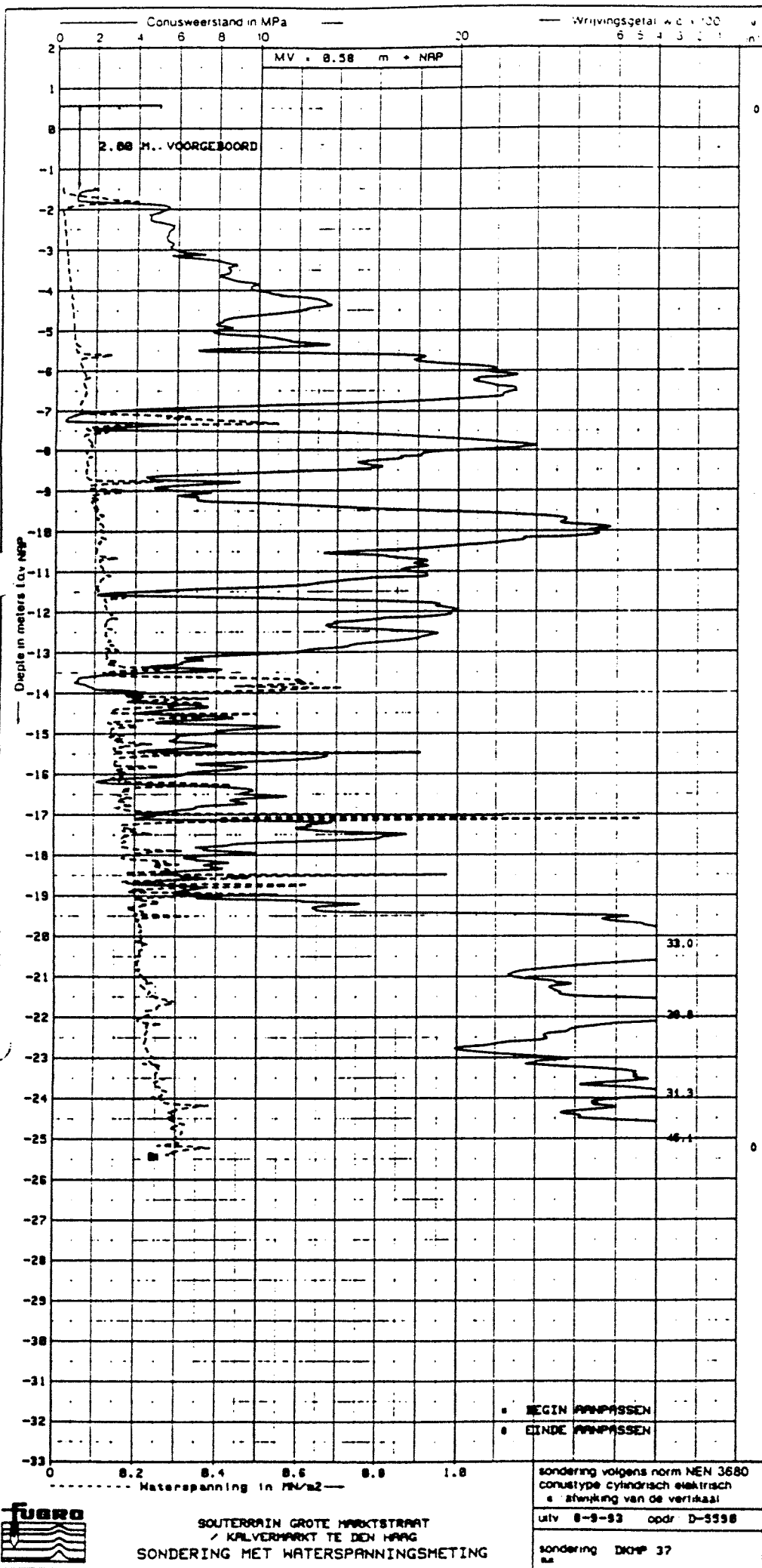
00.00

51.7

MB09

DZKMP 34

58.11



SOUTERRAIN GROTE MARKTSTRAAT  
/ KALVERMARKT TE DEN HAAG  
SONDERING MET WATERSPANNINGSMETING

MONSTER NR	DIEPTE tov NAP (m)	BODEM PROFIEL	BESCHRIJVING BODEM PROFIEL	TEST NR	VOLUMIEKE GEWICHT			WATER- GEHALTE w (massa %)	PORIEN GEHALTE n (%)	VERZAD. GRAAD S (%)	ONGEDR. SCHUIF STERKTE f <sub>undr</sub> (kPa)	HOEK INNEKENDIGE WRIJVING φ' (°)	COHESIE c' (kPa)	OPMERKINGEN
					γ (kN/m <sup>3</sup> )	VERZAD. γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	DROOG γ <sub>or</sub> (kN/m <sup>3</sup> )							
	1													
	0		.39 ZAND (mf), zwak siltig, zwak humeus, bruin/grijs met puinresten											
	-1		-21 ZAND (mf), zwak siltig, zwak humeus, bruin met puinresten											
	-1		-91 VEEN, sterk zandig, zwart											
	-1		-1.31 VEEN, zwak zandig, zwart met houtrestjes											
	-1		-1.61 VEEN, mineraalarm, bruin met houtrestjes											
1	-2		-1.86 ZAND (mf), zwak siltig, grijs/geel	1	14.5		6.5	70.1	67.1	91.0				
2	-2		-2.01 ZAND (mf), zwak siltig, zwak humeus, bruin/grijs											
3	-2		-2.31 ZAND (mf), zwak siltig, zwak humeus, grijs/bruin met wat veenresten	3	18.9		15.4	22.7	40.9	87.0				
4	-3		-2.56 ZAND (mf), grijs met enkele kleilagen en wat schelpenrestjes											
5	-3													
6	-4	V V		6	19.1		15.6	22.4	40.1	88.5				
7	-4													
8	-5			8	19.1		15.6	22.0	39.9	87.9				
9	-5													
10	-6			10	19.1		15.6	22.5	40.0	89.4				
11	-6	V		11	19.3		15.9	21.1	38.7	88.6				
12	-6													
13	-7			13	18.6		15.1	23.7	42.1	86.7				
14	-7													
15	-7		-7.36 ZAND (mg), grijs met enkele kleilagen en schelpenrestjes	15	14.7		7.9	86.1	69.6	99.8				
16	-8		-7.86 ZAND (mf), grijs met enkele kleilagen en wat schelpenrestjes											
17	-8													
18	-9	V V		18	15.1		9.1	66.1	65.1	94.1				
19	-9													
20	-10			20	19.2		15.7	22.1	39.6	89.5				
21	-10													
22	-10			22	19.5		16.1	21.4	38.1	91.9				
23	-11													
24	-11													
25	-11			25	19.2		15.6	23.2	39.9	92.3				
26	-12													
27	-12													
28	-12	V V		28	19.0		15.6	22.4	40.2	88.5				
29	-13													
30	-13		-13.21 ZAND (mf), zwak siltig, grijs met klei- en veenlagen (	30	17.2		12.0	42.6	63.7	97.3				
31	-13		-13.61 ZAND (mf), zwak siltig, grijs met klei en veenlagen (sterk geleagd)											
32	-14		-14.26 KLEI, sterk siltig, grijs met zand en veenlagen (sterk geleagd)	33	17.4		13.0	34.1	50.0	90.4				
33	-14													
34	-15		-15.26 ZAND (zf), matig siltig, grijs met klei en veenlagen (sterk geleagd)	35	17.1		13.2	29.3	49.2	80.4				
35	-15													
36	-16													
37	-16													
38	-17		-16.61 ZAND (zf), matig siltig, grijs met enkele klei en veenlagen	38	17.0		12.3	38.0	52.6	91.0				
39	-17													
40	-17			40	17.2		12.3	39.8	52.6	95.0				
41	-18		-17.61 ZAND (mf), grijs met enkele kleilagen											
42	-18													
43	-19			43	18.4		14.3	28.6	45.0	92.6				
44	-19													

met de v.d. 01-11-1983 Drukted by v.d. 01-11-1983  
 met de v.d. 01-11-1983 Drukted by v.d. 01-11-1983

Uitvoering : 7 tot 8 September 1993 HV - 0.38 m tov NAP  
 Peiling Pd : 8 September 1993 Samen OMS - 2.10 n - HV  
 Boring bij : DHP30 OMS - 8 - HV  
 Booroperator : Hls OLS - 8 - HV

BORING VOLGENS NEN 5119  
 SOUTERHAAN GROTE MARKTSTRAAT / KALVERMARKT TE DEN HAAG

Opdr. D 5590  
 Boring 68-07

Pelli - Ongedreerd monster  
 Suis - Gedreerd monster

MONSTER NR	DIEPTE tov MV (m)	BODEM PROFIEL	BESCHRIJVING BODEM PROFIEL
1	0		.00 ZAND (matig fijn), bruin
2			.20 BETONLAAG
3	1		.40 ZAND (matig fijn), zwak humeus, bruin, puin, beton
4			
5	2		2.00 ZAND (matig fijn), zwak humeus, bruin/grijs, puin, beton
6			2.50 ZAND (matig fijn), zwak siltig, zwak puinhoudend, zwak grindig, grijs
7	3		3.00 ZAND (matig fijn), zwak siltig, grijs
8			3.70 ZAND (matig fijn), zwak kleiig, zwak siltig, grijs
9	4		
10			4.50 ZAND (matig fijn), zwak siltig, grijs
11	5		
12	6		
13	7		6.50 ZAND (matig fijn), zwak kleiig, matig siltig, plaatselijk kleilaagjes, grijs
14	8		
15	9		8.50 ZAND (matig fijn), zwak siltig, grijs
16	10		
17	11	V V	10.25 ZAND (matig fijn), zwak siltig, grijs, schelpresten
			11.25 Einde boring
	12		
	13		
	14		
	15		
	16		
	17		
	18		
	19		
	20		

dd

Made by: dd 28 sep 93 Checked by

IMP 00 07 n1 / 16 27 50

Uitboring: 10 September 1993

Peiling: PS

Boring 01:

Boorheester: 2M

M.

Geneten GWS =

-0.75 m tov NAP

2.25 m - M.

SMG =

SLG =

m - M.

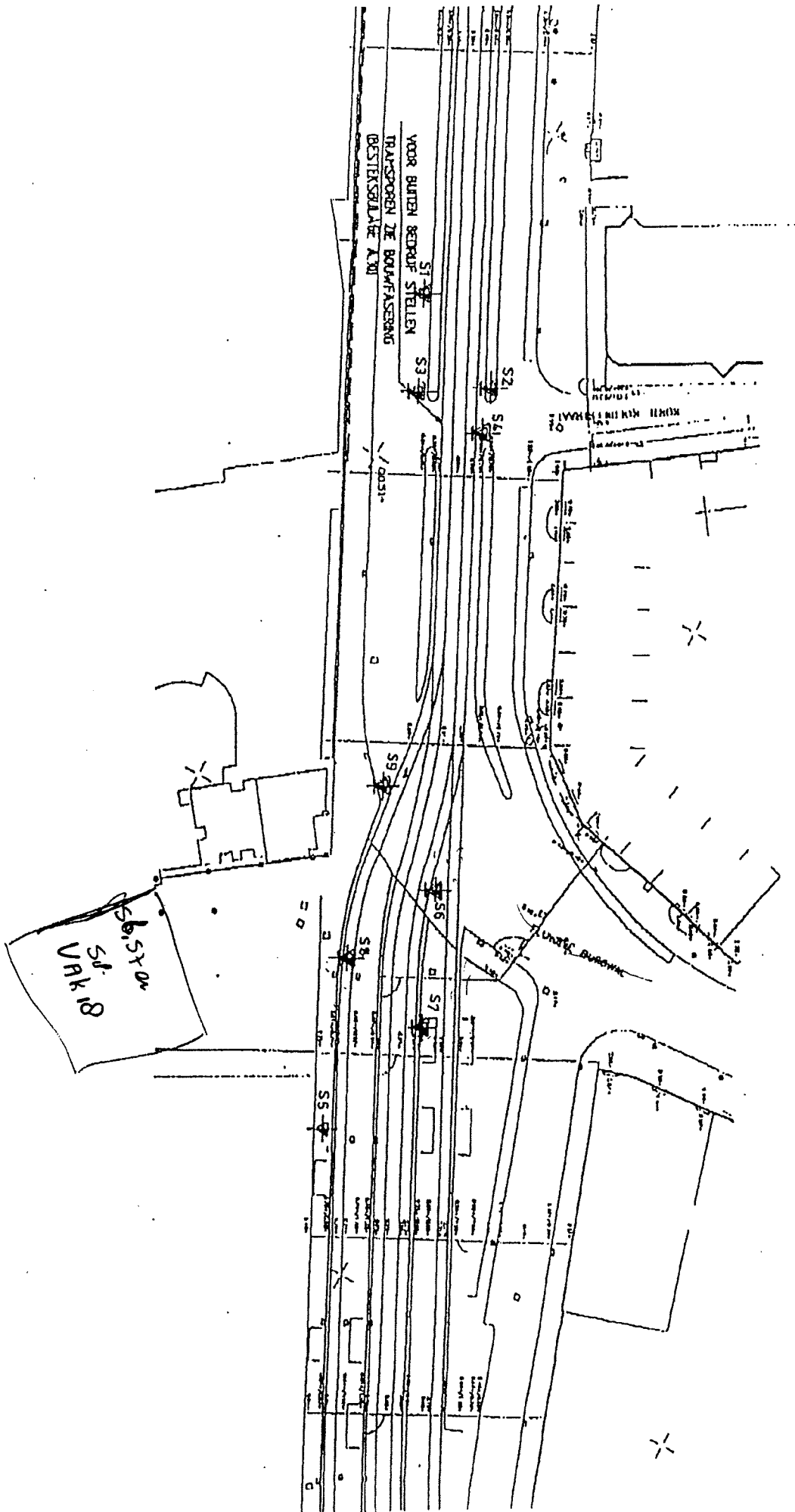
m - M.

BORING VOLGENS NEN 5119

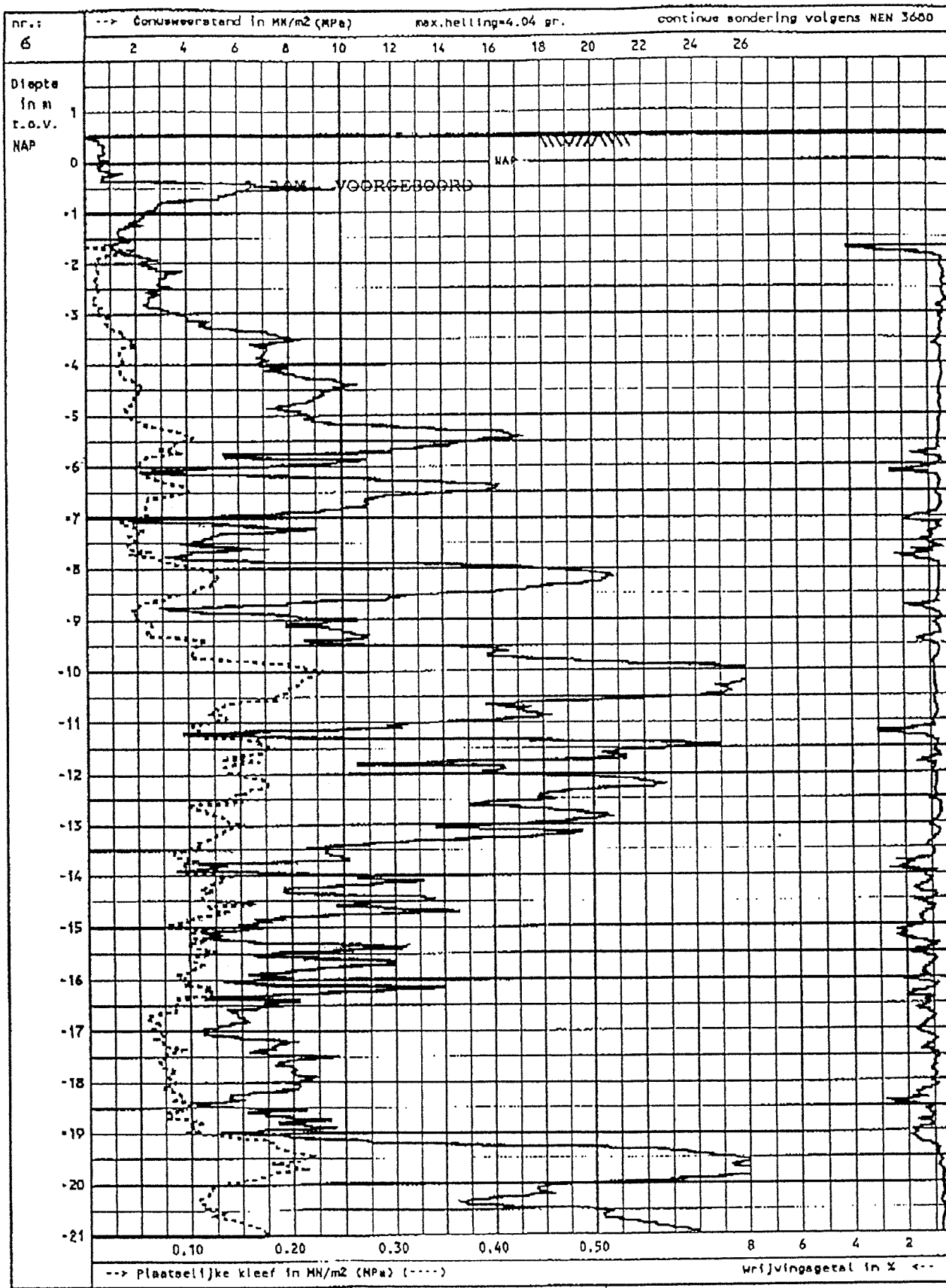
SCUTERRAIN GROTE MARKTSTRAAT/KALVERMARKT TE DEN HAAG

Opdr. D-5590

Boring MB09







Project  
Muzenstraat/Kalvermarkt  
te Den Haag.

KOND Proceccertificaat  
voor Elektrisch sonderen  
Certificaatnr.: K2517/94

Electrische mantelconus/GD.100.1000.15

nv = NAP +0.54 m

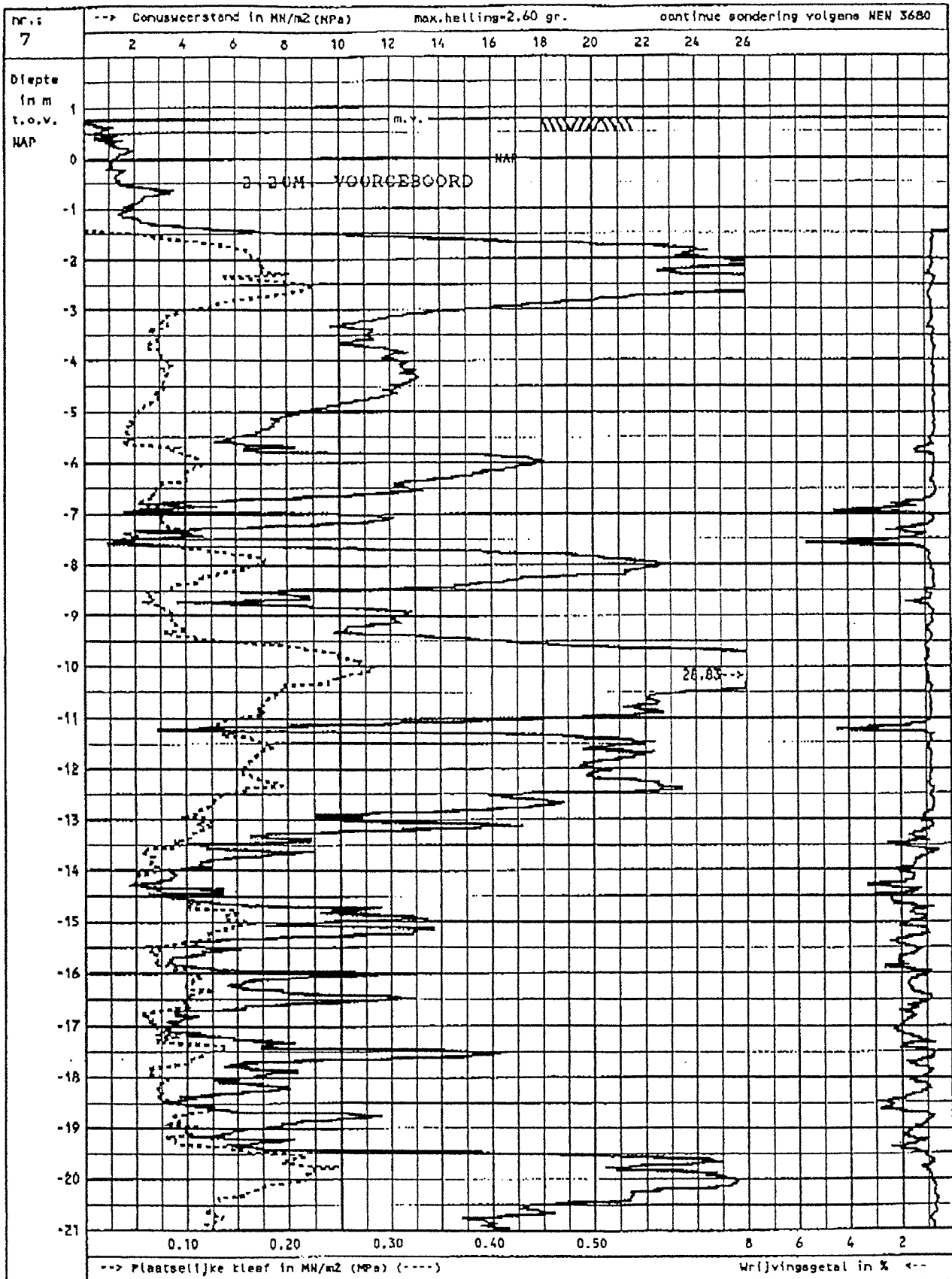
opdr. S 96.069

uitv.:19-03-96 15:06

nr.:

get.: 21-03-96

nr.: 6



Project  
Muzenstraat/Kalvermarkt  
te Den Haag.

KOMO Proovcertificaat  
voor Elektrisch sonderen  
Certificaatnr.: K2517/94

Electrische mantelconus/DD.100.1000.15

mv = NAP +0.77 m

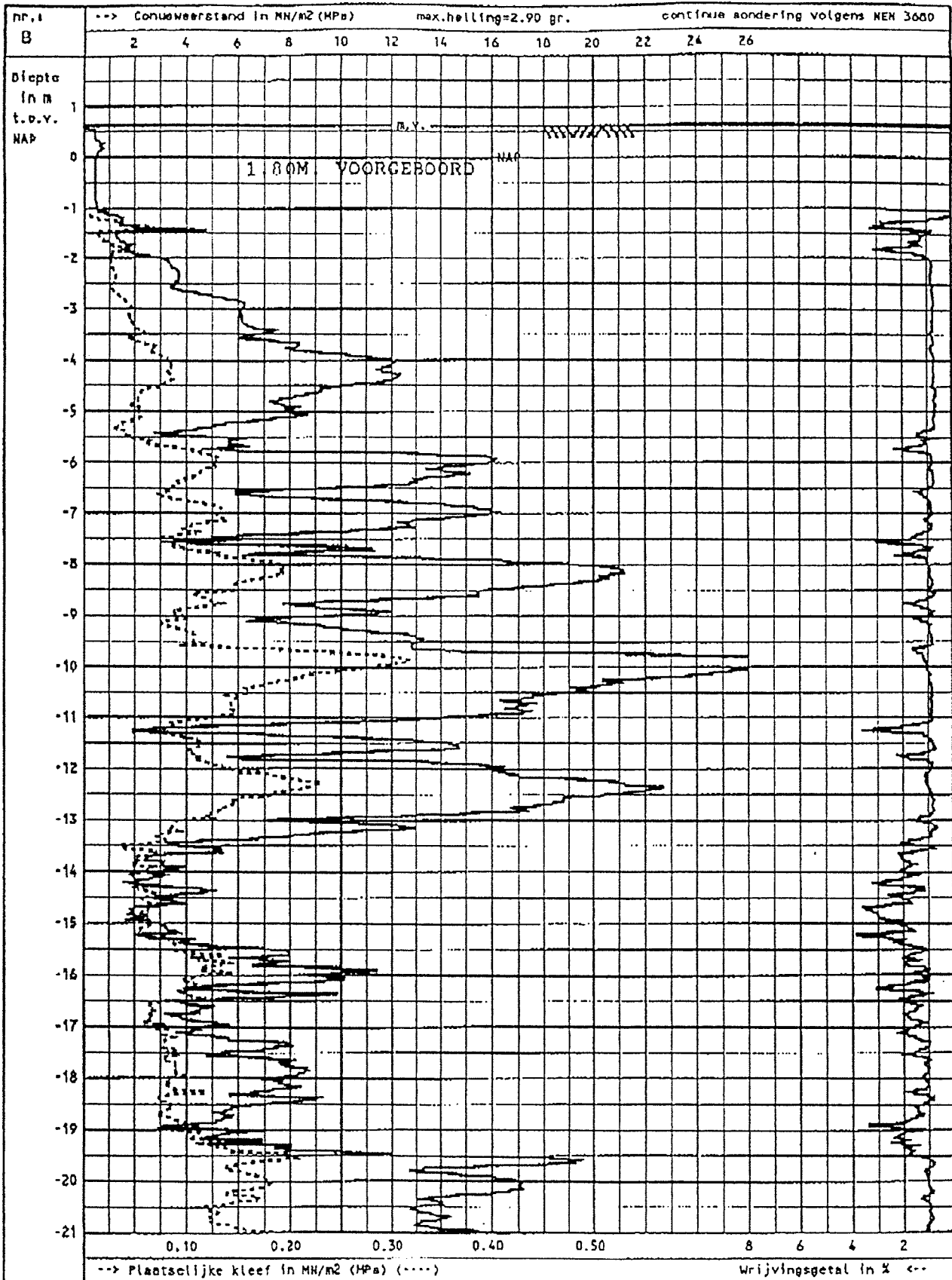
uitv. 19-03-96 10:52

get.: 21-03-96

opdr. S 96.069

nr.:

nr. 7



Project  
Muzenstraat/Kalvermarkt  
te Den Haag.

KOMO Proceercertificaat  
voor Elektrisch sonderen  
Certificatienr.: K2517/94

Elektrische mantelconus/00.100.1000.15

mv = NAP +0.64 m

opdr. S 96.069

uitv. 12-03-96 15134

nr.:

Ret.: 21-03-96

nr.: 8

## **II.4: Verklaring hellingmeting**

De helling is gemeten met behulp van een flexibele kokerprofiel.

**Verklaring van de verschillende kolommen.**

**Kolom A/C:** Eerste meting van milliVolts in x- en y-richting, spanningsverschil is maat voor helling.

**Kolom B/D:** Contra meting in tegenoverliggende richting (-x- en -y-richting).

De gemiddelde waarde van de beide metingen is de nulbalans. Bij deze nulbalans is de helling tussen het boorgat en de verticaal precies nul.

**Kolom E/G:** De afwijking van de nulbalans wordt vermenigvuldigd met de factor 0.002433. De hellingmeter is geijkt op  $1\text{mV} = 0.002433\text{ deg}$ .

**Kolom F/H:** Cumulatieve afwijking in mm berekend door helling te vermenigvuldigen met afstand van 1 m en op te tellen bij de vorige waarde.

**Kolom I:** Totale afwijking berekend met de stelling van Pythagoras.



**KFD**  
**Kombinatie**  
**Funderingstechnieken**  
**Den Haag vof**

Hellingmeting bij jetgrouproeven project Souterrain Grote Marktstr / Kalvermarkt		Verklaring hellingmeting	
Kolomnummer	:	13	
Datum meting	:	29-04-96	
Bovenkant meetbuis	:	0,30 [m + maaiveld]	
Nulbalans	:	X-as 278	Y-as 245

Hoogte t.o.v. bovenkant meetbuis [m]	Hoogte t.o.v. maaiveld [m N.A.P.]	Waarneming X 1 [mV] A	Waarneming X2 [mV] B	Waarneming Y 1 [mV] C	Waarneming Y 2 [mV] D	Helling X verticaal [deg] E	Afwijking X [mm] F	Helling Y verticaal [deg] G	Afwijking Y [mm] H	Afwijking totaal [mm] I
0,00	+ 0,30						0		0	0
0,50	- 0,20						0		0	0
1,00	- 0,70	84	383	184	317	-0,3637		-0,1619		
1,50	- 1,20						-6		-3	7
2,00	- 1,70	93	375	193	310	-0,3431		-0,1424		
2,50	- 2,20						-12		-5	13
3,00	- 2,70	112	352	203	288	-0,2920		-0,1035		
3,50	- 3,20						-17		-7	19
4,00	- 3,70	134	344	219	278	-0,2555		-0,0718		
4,50	- 4,20						-22		-8	23
5,00	- 4,70	215	374	211	283	-0,1934		-0,0877		
5,50	- 5,20						-25		-10	27
6,00	- 5,70	229	354	182	304	-0,1521		-0,1485		
6,50	- 6,20						-28		-12	31
7,00	- 6,70	245	349	178	310	-0,1265		-0,1607		
7,50	- 7,20						-30		-15	34
8,00	- 7,70	266	320	183	321	-0,0657		-0,1680		
8,50	- 8,20						-31		-18	36
9,00	- 8,70	269	302	185	303	-0,0401		-0,1437		
9,50	- 9,20						-32		-21	38
10,00	- 9,70	279	276	193	276	0,0036		-0,1011		
10,50	- 10,20						-32		-23	39
11,00	- 10,70	244	338	196	285	-0,1144		-0,1084		
11,50	- 11,20						-34		-24	42
12,00	- 11,70	270	323	195	293	-0,0645		-0,1193		
12,50	- 12,20						-35		-26	44
13,00	- 12,70	289	302	189	298	-0,0158		-0,1327		
13,50	- 13,20						-35		-29	46
14,00	- 13,70	307	288	185	306	0,0231		-0,1473		
14,50	- 14,20						-35		-31	47
15,00	- 14,70	315	279	176	310	0,0438		-0,1631		
15,50	- 15,20						-34		-34	48
16,00	- 15,70	328	259	152	336	0,0839		-0,2240		
16,50	- 16,20						-33		-38	50

Visser & Smit Bouw bv

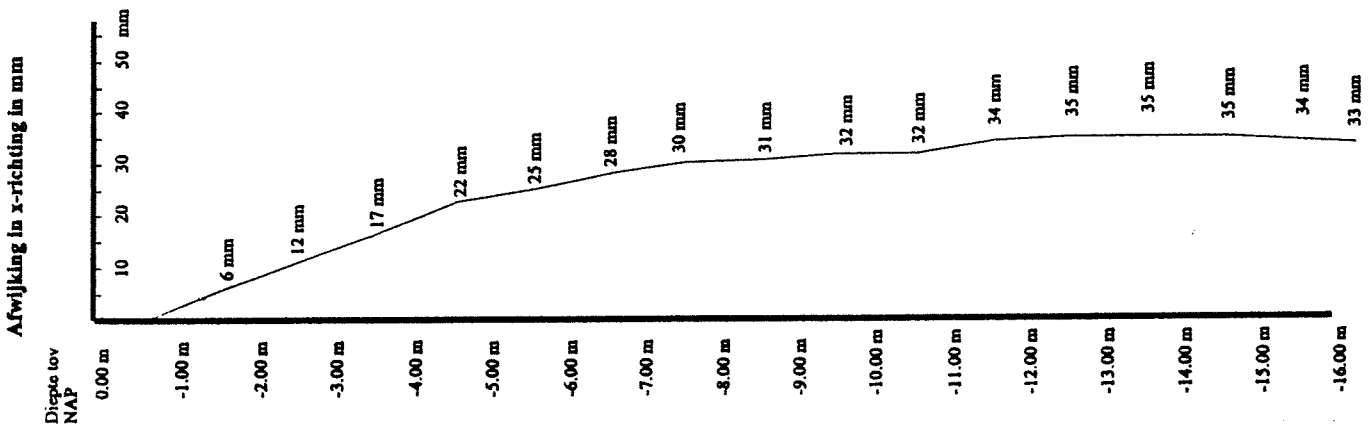
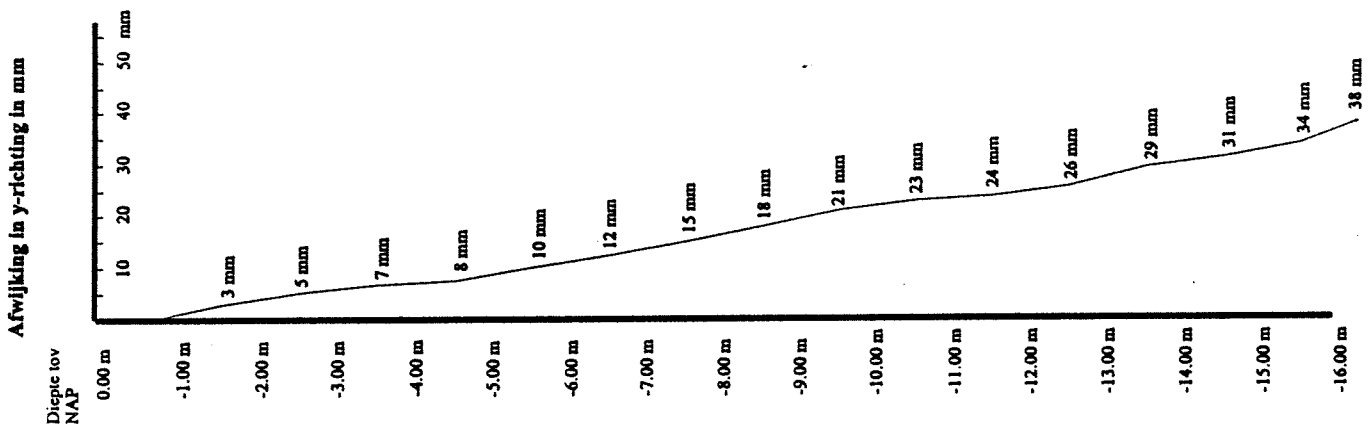
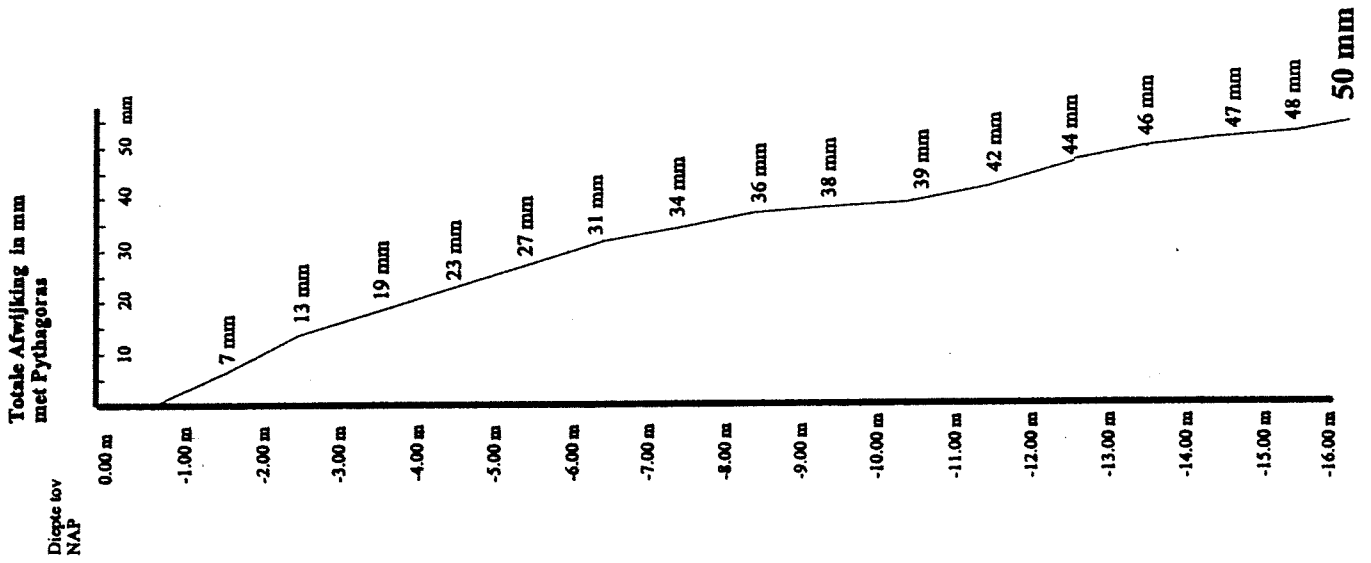


Ballast Nedam Funderingstechnieken bv



# KFD

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof



## **II.5: Resultaten druk- en splijtproeven Verklaring monstercode Mos**



**KFD**  
Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Jetgroutproeven tbv tramtunnel Den Haag**

**Onderwerp: Verklaringen monstercode Mos**

**Resultaten een-axiale drukproeven**

nr.	code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
1	K2K4A	2	KOLOM	-4.00
2	K2K4B	2	KOLOM	-4.00
3	K2K4C	2	KOLOM	-4.00
4	K2K5A	2	KOLOM	-5.25
5	K2K5B	2	KOLOM	-5.25
6	K2K5C	2	KOLOM	-5.25
7	K2R8A	2	RETOUR	-8.75
8	K2R8B	2	RETOUR	-8.75
9	K2R8C	2	RETOUR	-8.75
10	K2R10A	2	RETOUR	-10.00
11	K2R10B	2	RETOUR	-10.00
12	K2R10C	2	RETOUR	-10.00
13	K5K4A	5	KOLOM	-4.00
14	K5K4B	5	KOLOM	-4.00
15	K5K4C	5	KOLOM	-4.00
16	K5K7A	5	KOLOM	-7.50
17	K5K7B	5	KOLOM	-7.50
18	K5K7C	5	KOLOM	-7.50
19	K5R8A	5	RETOUR	-8.75
20	K5R8B	5	RETOUR	-8.75
21	K5R8C	5	RETOUR	-8.75
22	K5R10A	5	RETOUR	-10.00
23	K5R10B	5	RETOUR	-10.00
24	K5R10C	5	RETOUR	-10.00
25	K8K4A	8	KOLOM	-4.00
26	K8K4B	8	KOLOM	-4.00
27	K8K4C	8	KOLOM	-4.00
28	K8K8A	8	KOLOM	-8.25
29	K8K8B	8	KOLOM	-8.25
30	K8K8C	8	KOLOM	-8.25
31	K8R8A	8	RETOUR	-8.75
32	K8R8B	8	RETOUR	-8.75
33	K8R8C	8	RETOUR	-8.75
34	K8R10A	8	RETOUR	-10.00
35	K8R10B	8	RETOUR	-10.00
36	K8R10C	8	RETOUR	-10.00
37	K12K4A	12	KOLOM	-4.00
38	K12K4B	12	KOLOM	-4.00
39	K12K4C	12	KOLOM	-4.00
40	K12K8A	12	KOLOM	-8.50
41	K12K8B	12	KOLOM	-8.50
42	K12K8C	12	KOLOM	-8.50
43	K12R8A	12	RETOUR	-8.75
44	K12R8B	12	RETOUR	-8.75
45	K12R8C	12	RETOUR	-8.75
46	K12R10A	12	RETOUR	-10.00
47	K12R10B	12	RETOUR	-10.00
48	K12R10C	12	RETOUR	-10.00
49	KOL5B2	5	KERN	-3.50
50	KOL5D1	5	KERN	-4.25
51	KOL5E2	5	KERN	-4.55
52	KOL5F1	5	KERN	-4.90
53	KOL5H1	5	KERN	-5.40
54	KOL5N2	5	KERN	-7.90
55	KOL5O1	5	KERN	-8.10
56	KOL5P1	5	KERN	-8.35
57	KOL5P3	5	KERN	-8.50
58	KOL5P5	5	KERN	-8.65
59	KOL5P7	5	KERN	-8.80
60	KOL5Q1	5	KERN	-8.95
61	KOL5Q3	5	KERN	-9.10
62	KOL5R1	5	KERN	-9.30
63	KOL5R3	5	KERN	-9.45
64	KOL5R5	5	KERN	-9.60
65	KOL5S1	5	KERN	-9.85
66	KOL5S3	5	KERN	-10.00
67	K14K4A	14	KOLOM	-4.00
68	K14K4B	14	KOLOM	-4.00
69	K14K4C	14	KOLOM	-4.00
70	K14R8A	14	RETOUR	-8.75

Visser & Smit Bouw bv



nr.	code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
71	K14R8B	14	RETOUR	-8.75
72	K14R8C	14	RETOUR	-8.75
73	K14K10A	14	KOLOM	-10.00
74	K14K10B	14	KOLOM	-10.00
75	K14K10C	14	KOLOM	-10.00
76	K14R10A	14	RETOUR	-10.00
77	K14R10B	14	RETOUR	-10.00
78	K14R10C	14	RETOUR	-10.00
79	KOL14C1	14	KERN	-3.35
80	KOL14E1	14	KERN	-4.15
81	KOL14E2	14	KERN	-4.25
82	KOL14I1	14	KERN	-5.45
83	KOL14J1	14	KERN	-5.90
84	KOL14J3	14	KERN	-6.00
85	KOL14R1	14	KERN	-8.35
86	KOL14S2	14	KERN	-8.80
87	KOL14S4	14	KERN	-9.00
88	KOL14T2	14	KERN	-9.25
89	KOL14T4	14	KERN	-9.40
90	KOL14T6	14	KERN	-9.55
91	KOL14U1	14	KERN	-9.75
92	KOL14U3	14	KERN	-9.90
93	KOL14V2	14	KERN	-10.30
94	KOL14W1	14	KERN	-10.60
95	KOL14W3	14	KERN	-10.75
96	KOL14W5	14	KERN	-10.90
97	KOL2C1	2	KERN	-3.35
98	KOL2E1	2	KERN	-3.70
99	KOL2F3	2	KERN	-4.25
100	KOL2G2	2	KERN	-4.45
101	KOL2G3	2	KERN	-4.60
102	KOL2H1	2	KERN	-4.80
103	KOL2P1	2	KERN	-7.00
104	KOL2R2	2	KERN	-7.70
105	KL10AB1	10A	KERN	-2.80
106	KL10AC1	10A	KERN	-3.00
107	KL10AD2	10A	KERN	-3.30
108	KL10AD4	10A	KERN	-3.60
109	KL10AD6	10A	KERN	-3.75
110	KL10AD8	10A	KERN	-3.90
111	KL10AE1	10A	KERN	-4.00
112	KL10AE3	10A	KERN	-4.15
113	KL10AE5	10A	KERN	-4.25
114	KL10AF1	10A	KERN	-4.35
115	KL10AF3	10A	KERN	-4.45
116	KL10AH1	10A	KERN	-4.70
117	KL10AJ2	10A	KERN	-5.20
118	KL10AJ4	10A	KERN	-5.35
119	KL10AJ6	10A	KERN	-5.50
120	KL10AJ8	10A	KERN	-5.65
121	KL10AK1	10A	KERN	-5.80
122	KL10AK3	10A	KERN	-5.95
123	KOL24B1	24/25/28	KERN	-3.25
124	KOL24B3	24/25/28	KERN	-3.40
125	KOL24B5	24/25/28	KERN	-3.55
126	KOL24B7	24/25/28	KERN	-3.70
127	KOL24B9	24/25/28	KERN	-3.85
128	KOL24B11	24/25/28	KERN	-4.00
129	KOL24E3	24/25/28	KERN	-4.85
130	KOL24E5	24/25/28	KERN	-4.95
131	KOL24F1	24/25/28	KERN	-5.05
132	KOL24F3	24/25/28	KERN	-5.20
133	KOL24F5	24/25/28	KERN	-5.35
134	KOL24F7	24/25/28	KERN	-5.50
135	KOL24H1	24/25/28	KERN	-5.85
136	KOL24I1	24/25/28	KERN	-6.10
137	KOL24J1	24/25/28	KERN	-6.20
138	KOL24K1	24/25/28	KERN	-6.40
139	KOL24K3	24/25/28	KERN	-6.55
140	KOL24K6	24/25/28	KERN	-6.80

Ballast Nedam Funderingstechnieken bv



**KFD**  
Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

nr.	code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
141	KOL12A3	12	KERN	-3.00
142	KOL12A1	12	KERN	-2.80
143	KOL12B2	12	KERN	-3.30
144	KOL12C1	12	KERN	-3.40
145	KOL12G1	12	KERN	-3.95
146	KOL12J1	12	KERN	-4.60
147	KOL12Q1	12	KERN	-6.70
148	KOL12Q3	12	KERN	-6.90
149	KOL12S1	12	KERN	-7.40
150	KOL12S3	12	KERN	-7.60
151	KOL12V1	12	KERN	-8.30
152	KOL12X1	12	KERN	-9.00
153	KOL12X2	12	KERN	-9.15
154	KOL12Z2	12	KERN	-9.45
155	KOL12AA1	12	KERN	-9.75
156	KOL12AA3	12	KERN	-9.95
157	KOL12CC2	12	KERN	-10.40
158	KOL12DD3	12	KERN	-10.80
159	KOL8BB1	8	KERN	-2.85
160	KOL8BE2	8	KERN	-3.70
161	KOL8BE4	8	KERN	-3.90
162	KOL8F2	8	KERN	-4.10
163	KOL8BH1	8	KERN	-4.50
164	KOL8BK2	8	KERN	-5.30
165	KOL8BF1	8	KERN	-8.40
166	KOL8BF3	8	KERN	-8.60
167	KOL8BP5	8	KERN	-8.80
168	KOL8BQ1	8	KERN	-8.90
169	KOL8BQ3	8	KERN	-9.10
170	KOL8BS1	8	KERN	-9.85
171	KOL8BS3	8	KERN	-10.00
172	KOL8BS5	8	KERN	-10.15
173	KOL8BT1	8	KERN	-10.25
174	KOL8BV1	8	KERN	-10.70
175	KOL8BV2	8	KERN	-10.80
176	KOL20C1	20	KERN	1.20 HOR
177	KOL20C3	20	KERN	1.40 HOR
178	KOL20E1	20	KERN	1.80 HOR
179	KOL20E3	20	KERN	2.00 HOR
180	KOL20E5	20	KERN	2.20 HOR
181	KOL20E7	20	KERN	2.35 HOR
182	KOL20I1	20	KERN	2.45 HOR
183	KOL20I3	20	KERN	2.65 HOR
184	KOL20J2	20	KERN	3.75 HOR
185	KOL20K1	20	KERN	3.85 HOR
186	KOL20K3	20	KERN	3.95 HOR
187	KOL17B1	17A	KERN	-2.80
188	KOL17I1	17A	KERN	-4.50
189	KOL17J2	17A	KERN	-4.80
190	KOL17K2	17A	KERN	-5.30
191	KOL17L1	17A	KERN	-5.50
192	KOL19AA1	19/20	KERN	-9.10
193	KOL19AA3	19/20	KERN	-9.30
194	KOL19BB1	19/20	KERN	-9.40
195	KOL19BB2	19/20	KERN	-9.50
196	KOL19CC1	19/20	KERN	-9.90
197	KOL19CC3	19/20	KERN	-10.10
198	KOL19D1	19/20	KERN	-3.80
199	KOL19E1	19/20	KERN	-4.00
200	KOL19E1	19/20	KERN	-10.40
201	KOL19F1	19/20	KERN	-4.30
202	KOL19FF2	19/20	KERN	-10.60
203	KOL19G1	19/20	KERN	-4.50
204	KOL19GG2	19/20	KERN	-10.90
205	KOL19X1	19/20	KERN	-8.10
206	KOL19Y2	19/20	KERN	-8.80
207	KOL19Y3	19/20	KERN	-8.70
208	KOL19Z1	19/20	KERN	-8.90

Visser & Smit Bouw bv



Ballast Nedam Funderingstechnieken bv



OPDRACHT : 038196  
PLAATS : DEN HAAG  
WERK : TRANTUNNEL

OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM) FILE: HAAGDRUK

datum : 6/12/1996  
pagina : 1

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRANTUNNEL  
RESULTATEN EEN-AXIALE DRUKPROEVEN EN DOORLATENDEISPROEVEN

MONSTER- AANMAAK DATUM	MONSTER CODE	TEST DATUM	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER	SIGMA MAX.	E-MOD. [MPa]	EL.REK [%]	BRKREK [%]	VOL. GEV. [kg/m3]	f'brep [MPa]	
[mm,dd,jj]		[mm,dd,jj]		[DAGEN]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[kg/m3]	[MPa]	
1	4/23/96	K2K4A	05/21/96	21	28	1.9	.227	.8	1	1956	1.62
2	4/23/96	K2K4B	05/21/96	21	28	2.1	.231	.87	1	1963	1.79
3	4/23/96	K2K4C	05/21/96	21	28	1.9	.219	.84	1	1956	1.62
4	4/23/96	K2K5A	05/21/96	21	28	2.3	.299	.76	.88	1962	1.96
5	4/23/96	K2K5B	05/21/96	21	28	2.3	.260	.87	.98	1946	1.96
6	4/23/96	K2K5C	05/21/96	21	28	2.4	.287	.82	.84	1958	2.04
7	4/23/96	K2R8A	05/21/96	21	28	2.7	.390	.7	.78	1962	2.3
8	4/23/96	K2R8B	05/21/96	21	28	2.9	.388	.73	.83	1951	2.47
9	4/23/96	K2R8C	05/21/96	21	28	2.4	.335	.42	.71	1925	2.04
10	4/23/96	K2R10A	05/21/96	21	28	2.7	.376	.67	.88	1942	2.3
11	4/23/96	K2R10B	05/21/96	21	28	2.5	.285	.84	1.1	1949	2.13
12	4/23/96	K2R10C	05/21/96	21	28	2.6	.308	.84	.94	1943	2.21
13	4/24/96	K5K4A	05/22/96	21	28	5.2	.658	.72	.98	1947	4.42
14	4/24/96	K5K4B	05/22/96	21	28	4.8	.758	.6	.73	1962	4.08
15	4/24/96	K5K4C	05/22/96	21	28	5	.707	.68	.79	1941	4.25
16	4/24/96	K5K7A	05/22/96	21	28	5.3	.703	.72	.97	1948	4.51
17	4/24/96	K5K7B	05/22/96	21	28	4.1	.652	.62	.72	1922	3.49
18	4/24/96	K5K7C	05/22/96	21	28	4.1	.604	.62	.84	1930	3.49
19	4/24/96	K5R8A	05/22/96	21	28	3.5	.436	.8	.9	1979	2.98
20	4/24/96	K5R8B	05/22/96	21	28	2.6	.397	.65	.67	1955	2.21
21	4/24/96	K5R8C	05/22/96	21	28	2.7	.412	.65	.86	1959	2.3
22	4/24/96	K5R10A	05/22/96	21	28	5.3	.804	.62	.82	1983	4.51
23	4/24/96	K5R10B	05/22/96	21	28	4.2	.599	.66	.84	1965	3.57
24	4/24/96	K5R10C	05/22/96	21	28	3.8	.646	.56	.66	1946	3.23
25	4/25/96	K8K4A	05/23/96	21	28	9.5	.1727	.44	.71	1985	8.08
26	4/25/96	K8K4B	05/23/96	21	28	7.4	.1420	.45	.7	1927	6.29
27	4/25/96	K8K4C	05/23/96	21	28	9.5	.1702	.45	.81	1957	8.08
28	4/25/96	K8K8A	05/23/96	21	28	9.2	.1530	.49	.74	1971	7.82
29	4/25/96	K8K8B	05/23/96	21	28	7.6	.1251	.57	.75	1931	6.46
30	4/25/96	K8K8C	05/23/96	21	28	8.8	.1601	.46	.72	2089	7.48
31	4/25/96	K8R8A	05/23/96	21	28	14	.2444	.51	.73	2015	11.9
32	4/25/96	K8R8B	05/23/96	21	28	10	.1628	.56	.68	1974	8.5
33	4/25/96	K8R8C	05/23/96	21	28	5.4	.1052	.51	.55	1957	4.59
34	4/25/96	K8R10A	05/23/96	21	28	8.6	.1117	.68	.94	2017	7.31
35	4/25/96	K8R10B	05/23/96	21	28	8.9	.1363	.48	.81	1987	7.57
36	4/25/96	K8R10C	05/23/96	21	28	7	.1223	.47	.74	1973	5.95
37	4/29/96	K12K4A	05/28/96	22	29	1.7	.232	.71	.93	1928	1.45
38	4/29/96	K12K4B	05/28/96	22	29						0
39	4/29/96	K12K4C	05/28/96	22	29	1.4	.158	.58	.84	1932	1.19
40	4/29/96	K12K8A	05/28/96	22	29	2.1	.286	.7	.97	1912	1.79
41	4/29/96	K12K8B	05/28/96	22	29	2.3	.298	.72	.88	1907	1.96
42	4/29/96	K12K8C	05/28/96	22	29	2.5	.337	.73	.85	1929	2.13
43	4/29/96	K12R8A	05/28/96	22	29	5.6	.755	.73	.82	1993	4.76
44	4/29/96	K12R8B	05/28/96	22	29	5.2	.902	.47	.85	1995	4.42
45	4/29/96	K12R8C	05/28/96	22	29	5.8	.853	.62	.83	1986	4.93
46	4/29/96	K12R10A	05/28/96	22	29	6.4	.856	.73	.85	1996	5.44
47	4/29/96	K12R10B	05/28/96	22	29	6.8	.1116	.54	.83	2019	5.78
48	4/29/96	K12R10C	05/28/96	22	29	6.5	.1064	.55	.73	1982	5.53
49	4/24/96	KOL5B2	05/29/96	22	35	6.6	.1052	.49	.77	2027	5.61
50	4/24/96	KOL5D1	05/29/96	22	35	8.2	.1398	.5	.9	2038	6.97
51	4/24/96	KOL5E2	05/29/96	22	35	8.7	.1785	.44	.75	2029	7.4

OPDRACHT : 038196  
PLAATS : DEN HAAG  
WERK : TRANTUNNEL

OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM) FILE: HAAGDRUK

datum : 6/12/1996  
pagina : 2

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRANTUNNEL  
RESULTATEN EEN-AXIALE DRUKPROEVEN EN DOORLATENDEISPROEVEN

MONSTER- AANMAAK DATUM	MONSTER CODE	TEST DATUM	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER	SIGMA MAX.	E-MOD. [MPa]	EL.REK [%]	BRKREK [%]	VOL. GEV. [kg/m3]	f'brep [MPa]	
[mm,dd,jj]		[mm,dd,jj]		[DAGEN]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[kg/m3]	[MPa]	
52	4/24/96	KOL5F1	05/29/96	22	35	9.1	.1561	.4	.81	2052	7.74
53	4/24/96	KOL5H1	05/29/96	22	35	9.1	.1671	.48	.71	2037	7.74
54	4/24/96	KOL5H2	05/29/96	22	35	7.1	.1103	.63	.72	2063	6.04
55	4/24/96	KOL5O1	05/29/96	22	35	11	.1866	.54	.63	2013	9.35
56	4/24/96	KOL5P1	05/29/96	22	35	7.9	.1269	.61	.69	2037	6.72
57	4/24/96	KOL5P3	05/29/96	22	35	8.3	.1600	.42	.67	2051	7.06
58	4/24/96	KOL5P5	05/29/96	22	35	7.7	.1313	.57	.69	2040	6.55
59	4/24/96	KOL5P7	05/29/96	22	35	7.7	.1299	.51	.73	2045	6.55
60	4/24/96	KOL5Q1	05/29/96	22	35	9.5	.1721	.45	.77	2051	8.08
61	4/24/96	KOL5Q3	05/29/96	22	35	8.5	.1483	.53	.7	2041	7.23
62	4/24/96	KOL5R1	05/29/96	22	35	11	.1825	.58	.73	2051	9.35
63	4/24/96	KOL5R3	05/29/96	22	35	10	.1698	.58	.76	2038	8.5
64	4/24/96	KOL5R5	05/29/96	22	35	9.6	.1682	.5	.72	2048	8.16
65	4/24/96	KOL5S1	05/29/96	22	35	6.1	.1063	.49	.72	2029	5.19
66	4/24/96	KOL5S3	05/29/96	22	35	7.7	.1272	.53	.78	2038	6.55
67	5/1/96	K14K4A	05/29/96	22	28	3.4	.489	.65	.91	1938	2.89
68	5/1/96	K14K4B	05/29/96	22	28	3.7	.664	.53	.69	1936	3.15
69	5/1/96	K14K4C	05/29/96	22	28	4	.680	.54	.76	1940	3.4
70	5/1/96	K14R8A	05/29/96	22	28	7.8	.1313	.53	.86	2030	6.63
71	5/1/96	K14R8B	05/29/96	22	28	7.1	.1257	.46	.86	2021	6.04
72	5/1/96	K14R8C	05/29/96	22	28	7.8	.1242	.55	.84	2032	6.63
73	5/1/96	K14K10A	05/29/96	22	28	8.7	.1362	.56	.75	1999	7.4
74	5/1/96	K14K10B	05/29/96	22	28	9.8	.1455	.61	.9	1991	8.33
75	5/1/96	K14K10C	05/29/96	22	28	10	.1755	.51	.79	1997	8.5
76	5/1/96	K14R10A	05/29/96	22	28	5.2	.856	.55	.81	2014	4.42
77	5/1/96	K14R10B	05/29/96	22	28	5.1	.803	.55	.92	2010	4.34
78	5/1/96	K14R10C	05/29/96	22	28	4.7	.735	.55	1.1	2012	4
79	5/1/96	KOL14C1	05/29/96	22	28	.13	.24	.34	.81	1902	.11
80	5/1/96	KOL14E1	05/29/96	22	28	4.2	.628	.48	1.1	1990	3.57
81	5/1/96	KOL14E2	05/29/96	22	28	2.7	.335	.67	.98	1944	2.3
82	5/1/96	KOL14I1	05/29/96	22	28	9.2	.1500	.6	.68	1988	7.82
83	5/1/96	KOL14J1	05/29/96	22	28	12	.3931	.27	.44	1981	10.2
84	5/1/96	KOL14J3	05/29/96	22	28	17	.2991	.31	.59	3483	14.45
85	5/1/96	KOL14R1	05/29/96	22	28	18	.2449	.65	.9	2140	15.3
86	5/1/96	KOL14S2	05/29/96	22	28	14	.2501	.68	.69	2079	11.9
87	5/1/96	KOL14S4	05/29/96	22	28	15	.2868	.48	.73	2126	12.75
88	5/1/96	KOL14T2	05/29/96	22	28	13	.2281	.47	.75	2083	11.05
89	5/1/96	KOL14T4	05/29/96	22	28	14	.2037	.64	.74	2082	11.9
90	5/1/96	KOL14T6	05/29/96	22	28	18	.2967	.56	.78	2104	15.3
91	5/1/96	KOL14U1	05/29/96	22	28	13	.2114	.48	.82	2074	11.05
92	5/1/96	KOL14U3	05/29/96	22	28	15	.2670	.44	.73	2072	12.75
93	5/1/96	KOL14V2	05/29/96	22	28	15	.2620	.51	.64	2054	12.75
94	5/1/96	KOL14W1	05/29/96	22	28	14	.2024	.6	1	2097	11.9
95	5/1/96	KOL14W5	05/29/96	22	28	15	.2664	.52	.75	2074	12.75
96	5/1/96	KOL14W5	05/29/96	22	28	12	.2112	.54	.8	2066	10.2
97	4/23/96	KOL2C1	05/31/96	22	38	2.1	.289	.64	1	1954	1.79
98	4/23/96	KOL2E1	05/31/96	22	38	1.5	.191	.65	1.1	1943	1.28
99	4/23/96	KOL2F3	05/31/96	22	38	1.9	.294	.6	.92	1960	1.62
100	4/23/96	KOL2G2	05/31/96	22	38	2.2	.320	.57	1.1	1998	1.87
101	4/23/96	KOL2G3	05/31/96	22	38	1.9	.283	.65	.9	1959	1.62
102	4/23/96	KOL2H1	05/31/96	22	38	1.4	.165	.79	.97	1964	1.19



OPDRACHT : 038196  
 PLAATS : DEN HAAG  
 WERK : TRAMTUNNEL  
 OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM)

FILE: HAAGDRUK

datum : 6/12/1996  
 pagina : 3

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRAMTUNNEL  
 RESULTATEN EEN-AXIALE DRUKPROEVEN EN DOORLATENDHEIDSPROEVEN

MONSTER- AANMAAK DATUM	MONSTER CODE	TEST DATUM	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER	SIGMA MAX.	E-MOD.	EL.REK	BRKREK	VOL. GEV.	f'brep	
[mm,dd, jj]	[mm,dd, jj]	[mm,dd, jj]	[DAGEN]	[DAGEN]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	
103	4/23/96	KOL2P1	05/31/96	22	38	2.9	430	.61	.89	1951	2.47
104	4/23/96	KOL2R2	05/31/96	22	38	2.8	330	.77	1.3	1929	2.38
105	4/26/96	KL10A81	06/03/96	23	38	2.4	377	.6	.84	2000	2.04
106	4/26/96	KL10AC1	06/03/96	23	38	3.2	616	.49	.64	2003	2.72
107	4/26/96	KL10AD2	06/03/96	23	38	4	754	.46	.75	2007	3.4
108	4/26/96	KL10AD4	06/03/96	23	38	3.5	669	.47	.78	1991	2.98
109	4/26/96	KL10AD6	06/03/96	23	38	3.7	750	.46	.59	2010	3.15
110	4/26/96	KL10ADB	06/03/96	23	38	3.6	680	.51	.68	2006	3.06
111	4/26/96	KL10AE1	06/03/96	23	38	4.2	765	.48	.85	2015	3.57
112	4/26/96	KL10AE3	06/03/96	23	38	3.8	717	.49	.68	2007	3.23
113	4/26/96	KL10AE5	06/03/96	23	38	4.3	736	.52	.74	2018	3.66
114	4/26/96	KL10AF1	06/03/96	23	38	5.3	860	.58	.81	2023	4.51
115	4/26/96	KL10AF3	06/03/96	23	38	4.5	735	.5	.85	1992	3.83
116	4/26/96	KL10AH1	06/03/96	23	38	4.6	728	.6	.83	2017	3.91
117	4/26/96	KL10AJ2	06/03/96	23	38	5.1	798	.49	.97	2006	4.34
118	4/26/96	KL10AJ4	06/03/96	23	38	4.1	542	.71	.92	2006	3.49
119	4/26/96	KL10AJ6	06/03/96	23	38	4.7	654	.66	.96	1998	4
120	4/26/96	KL10AJ8	06/03/96	23	38	4.1	589	.6	.9	1994	3.49
121	4/26/96	KL10AK1	06/03/96	23	38	5.1	901	.47	1.1	2060	4.34
122	4/26/96	KL10AK3	06/03/96	23	38	4.2	544	.61	1	2010	3.57
123	5/ 3/96	KOL24B1	06/04/96	23	32	8.9	1394	.62	.74	2003	7.57
124	5/ 3/96	KOL24B3	06/04/96	23	32	11	2728	.3	.61	2005	9.35
125	5/ 3/96	KOL24B5	06/04/96	23	32	10	2249	.43	.58	2011	8.5
126	5/ 3/96	KOL24B7	06/04/96	23	32	8.1	1946	.34	.56	2027	6.89
127	5/ 3/96	KOL24B9	06/04/96	23	32	12	2482	.43	.62	2033	10.2
128	5/ 3/96	KOL24B11	06/04/96	23	32	13	3196	.37	.54	2058	11.05
129	5/ 3/96	KOL24E3	06/04/96	23	32	7.4	1512	.37	.84	2086	6.29
130	5/ 3/96	KOL24E5	06/04/96	23	32	20	5879	.29	.39	2182	17
131	5/ 3/96	KOL24F1	06/04/96	23	32	10	1854	.49	.78	2003	8.5
132	5/ 3/96	KOL24F3	06/04/96	23	32	11	2541	.32	.64	2039	9.35
133	5/ 3/96	KOL24F5	06/04/96	23	32	12	2208	.52	.63	2026	10.2
134	5/ 3/96	KOL24F7	06/04/96	23	32	9.9	2245	.41	.57	2016	8.42
135	5/ 3/96	KOL24H1	06/04/96	23	32	17	3830	.34	.64	2113	14.45
136	5/ 3/96	KOL24I1	06/04/96	23	32	19	4527	.3	.71	2177	16.15
137	5/ 3/96	KOL24J1	06/04/96	23	32	12	2501	.42	.68	2061	10.2
138	5/ 3/96	KOL24K1	06/04/96	23	32	16	3021	.42	.72	2060	13.6
139	5/ 3/96	KOL24K3	06/04/96	23	32	13	2538	.46	.62	2067	11.05
140	5/ 3/96	KOL24K6	06/04/96	23	32	12	2562	.43	.57	2066	10.2
141	4/29/96	KOL12A3	06/06/96	23	38	4.7	1115	.41	.49	2009	4
142	4/29/96	KOL12A1	06/06/96	23	38	6.1	1468	.37	.65	2034	5.19
143	4/29/96	KOL12B2	06/06/96	23	38	3	641	.39	.66	2001	2.55
144	4/29/96	KOL12C1	06/06/96	23	38	7.3	1955	.29	.5	2030	6.21
145	4/29/96	KOL12G1	06/06/96	23	38	5.4	1518	.28	.48	2031	4.59
146	4/29/96	KOL12J1	06/06/96	23	38	6.9	1317	.4	.74	2036	5.87
147	4/29/96	KOL12Q1	06/06/96	23	38	7.6	1762	.33	.68	2014	6.44
148	4/29/96	KOL12Q3	06/06/96	23	38	7.3	1648	.37	.64	2025	6.21
149	4/29/96	KOL12S1	06/06/96	23	38	4.6	1138	.37	.62	1911	3.91
150	4/29/96	KOL12S3	06/06/96	23	38	5.6	1389	.31	.63	1934	4.76
151	4/29/96	KOL12V1	06/06/96	23	38	4.2	753	.55	.64	1869	3.57
152	4/29/96	KOL12X1	06/06/96	23	38	6.6	1377	.4	.6	2033	5.61
153	4/29/96	KOL12X2	06/06/96	23	38	6.5	1579	.34	.61	2052	5.53

MOS GRONDMECHANICA

OPDRACHT : 038196  
 PLAATS : DEN HAAG  
 WERK : TRAMTUNNEL  
 OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM)

FILE: HAAGDRUK

datum : 6/12/1996  
 pagina : 4

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRAMTUNNEL  
 RESULTATEN EEN-AXIALE DRUKPROEVEN EN DOORLATENDHEIDSPROEVEN

MONSTER- AANMAAK DATUM	MONSTER CODE	TEST DATUM	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER	SIGMA MAX.	E-MOD.	EL.REK	BRKREK	VOL. GEV.	f'brep	
[mm,dd, jj]	[mm,dd, jj]	[mm,dd, jj]	[DAGEN]	[DAGEN]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	
154	4/29/96	KOL12Z2	06/06/96	23	38	7	185	.3	.58	2031	5.95
155	4/29/96	KOL12AA1	06/06/96	23	38	6.2	1222	.46	.63	2007	5.27
156	4/29/96	KOL12AA3	06/06/96	23	38	5.9	1432	.36	.51	2034	5.02
157	4/29/96	KOL12CC2	06/06/96	23	38	6.9	1518	.4	.63	2034	5.87
158	4/29/96	KOL12DD3	06/06/96	23	38	4.7	785	.43	.89	1914	4
159	4/25/96	KOL8BB4	06/05/96	23	41	16	3864	.3	.71	2023	13.6
160	4/25/96	KOL8BE2	06/05/96	23	41	12	2650	.3	.6	2001	10.2
161	4/25/96	KOL8BE4	06/05/96	23	41	12	3419	.26	.48	2009	10.2
162	4/25/96	KOL8BF2	06/05/96	23	41	13	2838	.4	.61	1995	11.05
163	4/25/96	KOL8BH1	06/05/96	23	41	11	2501	.39	.57	2018	9.35
164	4/25/96	KOL8BK2	06/05/96	23	41	15	3709	.29	.62	2045	12.75
165	4/25/96	KOL8BR1	06/05/96	23	41	12	2179	.42	.85	1934	10.2
166	4/25/96	KOL8BP3	06/05/96	23	41	15	3340	.41	.55	1962	12.75
167	4/25/96	KOL8BP5	06/05/96	23	41	15	4001	.34	.42	1978	12.75
168	4/25/96	KOL8BQ4	06/05/96	23	41	12	3119	.37	.51	1928	10.2
169	4/25/96	KOL8BQ3	06/05/96	23	41	14	3326	.33	.56	1928	11.9
170	4/25/96	KOL8BS1	06/05/96	23	41	15	3569	.28	.57	1957	12.75
171	4/25/96	KOL8BS3	06/05/96	23	41	15	3300	.32	.54	1994	12.75
172	4/25/96	KOL8BS5	06/05/96	23	41	17	4148	.31	.62	1978	14.45
173	4/25/96	KOL8BT1	06/05/96	23	41	19	4599	.38	.61	1964	16.15
174	4/25/96	KOL8BV2	06/05/96	23	41	20	4092	.49	.48	1999	17
175	4/25/96	KOL8BV2	06/05/96	23	41	16	3784	.32	.53	1970	13.6
176	5/ 2/96	KOL20C1	06/07/96	23	36	13	3364	.33	.58	2026	11.05
177	5/ 2/96	KOL20C3	06/07/96	23	36	16	3265	.38	.61	2031	13.6
178	5/ 2/96	KOL20E1	06/07/96	23	36	9.5	2240	.34	.63	1995	8.08
179	5/ 2/96	KOL20E3	06/07/96	23	36	11	2076	.46	.8	2013	9.35
180	5/ 2/96	KOL20E5	06/07/96	23	36	10	2345	.36	.58	2008	8.5
181	5/ 2/96	KOL20E7	06/07/96	23	36	8.6	1730	.44	.66	1992	7.31
182	5/ 2/96	KOL20I1	06/07/96	23	36	11	2417	.31	.74	2024	9.35
183	5/ 2/96	KOL20L3	06/07/96	23	36	10	2345	.3	.6	2019	8.5
184	5/ 2/96	KOL20J2	06/07/96	23	36	13	3253	.31	.65	2018	11.05
185	5/ 2/96	KOL20K1	06/07/96	23	36	14	2795	.41	.69	2048	11.9
186	5/ 2/96	KOL20K3	06/07/96	23	36	15	3370	.36	.57	2045	12.75
187	5/ 1/96	KOL17B1	06/07/96	23	37	3.1	638	.42	.6	2141	2.64
188	5/ 1/96	KOL17I1	06/07/96	23	37	2.5	396	.59	.85	2005	2.13
189	5/ 1/96	KOL17J2	06/07/96	23	37	3.1	501	.51	1.1	2009	2.64
190	5/ 1/96	KOL17K2	06/07/96	23	37	4.2	649	.46	1	2077	3.57
191	5/ 1/96	KOL17L1	06/07/96	23	37	4.2	572	.51	1.5	2145	3.57
192	5/ 2/96	KOL19AA1	06/07/96	23	36	13	2907	.39	.57	1986	11.05
193	5/ 2/96	KOL19AA3	06/07/96	23	36	14	3494	.3	.59	1989	11.9
194	5/ 2/96	KOL19BB1	06/07/96	23	36	16	3523	.37	.55	2025	13.6
195	5/ 2/96	KOL19BB2	06/07/96	23	36	14	2888	.34	.7	2035	11.9
196	5/ 2/96	KOL19CC1	06/07/96	23	36	16	3892	.34	.64	2065	13.6
197	5/ 2/96	KOL19CC3	06/07/96	23	36	16	3919	.35	.67	2061	13.6
198	5/ 2/96	KOL19D1	06/07/96	23	36	11	2469	.4	.56	2005	9.35
199	5/ 2/96	KOL19E1	06/07/96	23	36	9.4	2231	.34	.64	2000	7.99
200	5/ 2/96	KOL19EE1	06/07/96	23	36	15	3208	.42	.62	2067	12.75
201	5/ 2/96	KOL19FF1	06/07/96	23	36	10	2486	.37	.54	2006	8.5
202	5/ 2/96	KOL19FF2	06/07/96	23	36	18	4959	.28	.62	2091	15.3
203	5/ 2/96	KOL19G1	06/07/96	23	36	11	2772	.33	.53	1978	9.35
204	5/ 2/96	KOL19GG2	06/07/96	23	36	18	3028	.55	.77	2090</	

OPDRACHT : 038196

PLAATS : DEN HAAG

WERK : TRAMTUNNEL

OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM)

FILE: HAAGDRUK

datum : 6/12/1996

pagina : 5

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRAMTUNNEL  
RESULTATEN EEN-AXIALE DRUKPROEVEN EN DOORLATENDHEIDSPROEVEN

MONSTER- AANMAAK DATUM [mm,dd,jj]	MONSTER CODE	TEST DATUM [mm,dd,jj]	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER [DAGEN]	SIGMA MAX. [MPa]	E-MOD. [MPa]	EL.REK [X]	BRKREK [X]	VOL. GEW. [kg/m <sup>3</sup> ]	f'brep [MPa]
205 5/ 2/96	KDL19X1	06/07/96	23	36	12	2944	.32	.54	2007	10.2
206 5/ 2/96	KDL19Y2	06/07/96	23	36	13	2824	.42	.58	1984	11.05
207 5/ 2/96	KDL19Y3	06/07/96	23	36	12	2874	.38	.53	1984	10.2
208 5/ 2/96	KDL19Z1	06/07/96	23	36	13	2243	.54	.67	1979	11.05

Totaal 207  
een-axiale drukproeven

MOS GRONDMECHANICA



**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Jetgroutproeven tbv tramtunnel Den Haag**

Onderwerp: Verklaringen monstercode Mos

Resultaten indirecte trekproeven

nr.	code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
1	BK2R10A	2	RETOUR	-10.00
2	BK2R10B	2	RETOUR	-10.00
3	BK2R10C	2	RETOUR	-10.00
4	BK2R10D	2	RETOUR	-10.00
5	BK2R10E	2	RETOUR	-10.00
6	BK2R10F	2	RETOUR	-10.00
7	BK2R8A	2	RETOUR	-8.75
8	BK2R8B	2	RETOUR	-8.75
9	BK2R8C	2	RETOUR	-8.75
10	BK2R8D	2	RETOUR	-8.75
11	BK2R8E	2	RETOUR	-8.75
12	BK2R8F	2	RETOUR	-8.75
13	BK2K5A	2	KOLOM	-5.25
14	BK2K5B	2	KOLOM	-5.25
15	BK2K5C	2	KOLOM	-5.25
16	BK2K5D	2	KOLOM	-5.25
17	BK2K5E	2	KOLOM	-5.25
18	BK2K5F	2	KOLOM	-5.25
19	BK2K4A	2	KOLOM	-4.00
20	BK2K4B	2	KOLOM	-4.00
21	BK2K4C	2	KOLOM	-4.00
22	BK2K4D	2	KOLOM	-4.00
23	BK2K4E	2	KOLOM	-4.00
24	BK2K4F	2	KOLOM	-4.00
25	BK5K4A	5	KOLOM	-4.00
26	BK5K4B	5	KOLOM	-4.00
27	BK5K4C	5	KOLOM	-4.00
28	BK5K4D	5	KOLOM	-4.00
29	BK5K4E	5	KOLOM	-4.00
30	BK5K4F	5	KOLOM	-4.00
31	BK5K7A	5	KOLOM	-7.50
32	BK5K7B	5	KOLOM	-7.50
33	BK5K7C	5	KOLOM	-7.50
34	BK5K7D	5	KOLOM	-7.50
35	BK5K7E	5	KOLOM	-7.50
36	BK5K7F	5	KOLOM	-7.50
37	BK5R8A	5	RETOUR	-8.75
38	BK5R8B	5	RETOUR	-8.75
39	BK5R8C	5	RETOUR	-8.75
40	BK5R8D	5	RETOUR	-8.75
41	BK5R8E	5	RETOUR	-8.75
42	BK5R8F	5	RETOUR	-8.75
43	BK5R10A	5	RETOUR	-10.00
44	BK5R10B	5	RETOUR	-10.00
45	BK5R10C	5	RETOUR	-10.00
46	BK5R10D	5	RETOUR	-10.00
47	BK5R10E	5	RETOUR	-10.00
48	BK5R10F	5	RETOUR	-10.00
49	BK8K4A	8	KOLOM	-4.00
50	BK8K4B	8	KOLOM	-4.00
51	BK8K4C	8	KOLOM	-4.00
52	BK8K4D	8	KOLOM	-4.00
53	BK8K4E	8	KOLOM	-4.00
54	BK8K4F	8	KOLOM	-4.00
55	BK8K8A	8	KOLOM	-8.25
56	BK8K8B	8	KOLOM	-8.25
57	BK8K8C	8	KOLOM	-8.25
58	BK8K8D	8	KOLOM	-8.25
59	BK8K8E	8	KOLOM	-8.25
60	BK8K8F	8	KOLOM	-8.25
61	BK8R8A	8	RETOUR	-8.75
62	BK8R8B	8	RETOUR	-8.75
63	BK8R8C	8	RETOUR	-8.75
64	BK8R8D	8	RETOUR	-8.75
65	BK8R8E	8	RETOUR	-8.75
66	BK8R8F	8	RETOUR	-8.75
67	BK8R10A	8	RETOUR	-10.00
68	BK8R10B	8	RETOUR	-10.00
69	BK8R10C	8	RETOUR	-10.00
70	BK8R10D	8	RETOUR	-10.00
71	BK8R10E	8	RETOUR	-10.00
72	BK8R10F	8	RETOUR	-10.00

Visser & Smit Bouw bv



nr.	code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
73	K12K4A	12	KOLOM	-4.00
74	K12K4B	12	KOLOM	-4.00
75	K12K4C	12	KOLOM	-4.00
76	K12K4D	12	KOLOM	-4.00
77	K12K4E	12	KOLOM	-4.00
78	K12K4F	12	KOLOM	-4.00
79	BK12K8A	12	KOLOM	-8.50
80	BK12K8B	12	KOLOM	-8.50
81	BK12K8C	12	KOLOM	-8.50
82	BK12K8D	12	KOLOM	-8.50
83	BK12K8E	12	KOLOM	-8.50
84	BK12K8F	12	KOLOM	-8.50
85	BK12R10A	12	RETOUR	-10.00
86	BK12R10B	12	RETOUR	-10.00
87	BK12R10C	12	RETOUR	-10.00
88	BK12R10D	12	RETOUR	-10.00
89	BK12R10E	12	RETOUR	-10.00
90	BK12R10F	12	RETOUR	-10.00
91	BK12R8A	12	RETOUR	-8.75
92	BK12R8B	12	RETOUR	-8.75
93	BK12R8C	12	RETOUR	-8.75
94	BK12R8D	12	RETOUR	-8.75
95	BK12R8E	12	RETOUR	-8.75
96	BK12R8F	12	RETOUR	-8.75
97	KOL2AA3	2	KERN	-10.40
98	KOL2CC2	2	KERN	-3.45
99	KOL2E2	2	KERN	-3.80
100	KOL2F1	2	KERN	-3.90
101	KOL2F2	2	KERN	-4.00
102	KOL2F4	2	KERN	-4.35
103	KOL2G1	2	KERN	-4.40
104	KOL2O1	2	KERN	-6.70
105	KOL2Q1	2	KERN	-7.25
106	KOL2W2	2	KERN	-8.90
107	KOL2Y4	2	KERN	-9.15
108	KOL2X1	2	KERN	-9.55
109	KOL2Z2	2	KERN	-9.70
110	KOL2Z1	2	KERN	-9.70
111	KOL2Z2	2	KERN	-9.80
112	KOL2Z4	2	KERN	-9.95
113	KOL2Z5	2	KERN	-10.05
114	KOL5B1	5	KERN	-3.40
115	KOL5B3	5	KERN	-3.65
116	KOL5E1	5	KERN	-4.45
117	KOL5E3	5	KERN	-4.65
118	KOL5G1	5	KERN	-5.10
119	KOL5H2	5	KERN	-5.45
120	KOL5N1	5	KERN	-7.80
121	KOL5P2	5	KERN	-8.45
122	KOL5P4	5	KERN	-8.90
123	KOL5P6	5	KERN	-8.75
124	KOL5P8	5	KERN	-8.85
125	KOL5Q2	5	KERN	-9.00
126	KOL5R2	5	KERN	-9.35
127	KOL5R4	5	KERN	-9.50
128	KOL5R6	5	KERN	-9.70
129	KOL5S2	5	KERN	-9.95
130	KOL5S4	5	KERN	-10.10
131	KOL5U1	5	KERN	-10.50
132	K14R8A	14	RETOUR	-8.75
133	K14R8B	14	RETOUR	-8.75
134	K14R8C	14	RETOUR	-8.75
135	K14R8D	14	RETOUR	-8.75
136	K14R8E	14	RETOUR	-8.75
137	K14R8F	14	RETOUR	-8.75
138	K14K10A	14	KOLOM	-10.00
139	K14K10B	14	KOLOM	-10.00
140	K14K10C	14	KOLOM	-10.00
141	K14K10D	14	KOLOM	-10.00
142	K14K10E	14	KOLOM	-10.00
143	K14K10F	14	KOLOM	-10.00

Ballast Nedam Funderingstechnieken bv

**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

nr.	code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
144	K14R10A	14	RETOUR	-10.00
145	K14R10B	14	RETOUR	-10.00
146	K14R10C	14	RETOUR	-10.00
147	K14R10D	14	RETOUR	-10.00
148	K14R10E	14	RETOUR	-10.00
149	K14R10F	14	RETOUR	-10.00
150	K14K4A	14	KOLOM	-4.00
151	K14K4B	14	KOLOM	-4.00
152	K14K4C	14	KOLOM	-4.00
153	K14K4D	14	KOLOM	-4.00
154	K14K4E	14	KOLOM	-4.00
155	K14K4F	14	KOLOM	-4.00
156	K12K4B	12	KOLOM	-4.00
157	KOL14C2	14	KERN	-3.45
158	KOL14E3	14	KERN	-4.35
159	KOL14I2	14	KERN	-5.55
159	KOL14I3	14	KERN	-5.60
160	KOL14J2	14	KERN	-5.95
160	KOL14J4	14	KERN	-6.10
161	KOL14R2	14	KERN	-8.45
161	KOL14S1	14	KERN	-8.75
162	KOL14S3	14	KERN	-8.90
162	KOL14S5	14	KERN	-9.10
163	KOL14T1	14	KERN	-9.20
163	KOL14T3	14	KERN	-9.35
164	KOL14T5	14	KERN	-9.50
164	KOL14U2	14	KERN	-9.85
165	KOL14V1	14	KERN	-10.20
165	KOL14V3	14	KERN	-10.40
166	KOL14W2	14	KERN	-10.65
166	KOL14W4	14	KERN	-10.85
160	KL10AB2	10A	KERN	-2.65
161	KL10AC2	10A	KERN	-3.10
162	KL10AD1	10A	KERN	-3.20
163	KL10AD3	10A	KERN	-3.40
164	KL10AD5	10A	KERN	-3.65
165	KL10AD7	10A	KERN	-3.85
166	KL10AD9	10A	KERN	-3.95
167	KL10AE2	10A	KERN	-4.10
168	KL10AE4	10A	KERN	-4.20
169	KL10AF2	10A	KERN	-4.30
170	KL10AG1	10A	KERN	-4.60
171	KL10AH2	10A	KERN	-4.75
172	KL10AJ1	10A	KERN	-5.10
173	KL10AJ3	10A	KERN	-5.30
174	KL10AJ5	10A	KERN	-5.45
175	KL10AJ7	10A	KERN	-5.60
176	KL10AJ9	10A	KERN	-5.70
177	KL10AK2	10A	KERN	-5.85
178	KOL24B2	24/25/28	KERN	-3.30
179	KOL24B4	24/25/28	KERN	-3.45
180	KOL24B6	24/25/28	KERN	-3.65
181	KOL24B8	24/25/28	KERN	-3.75
182	KOL24B10	24/25/28	KERN	-3.90
183	KOL24B12	24/25/28	KERN	-4.10
184	KOL24C1	24/25/28	KERN	-4.20
185	KOL24E1	24/25/28	KERN	-4.60
186	KOL24E2	24/25/28	KERN	-4.70
187	KOL24E4	24/25/28	KERN	-4.90
188	KOL24F2	24/25/28	KERN	-5.10
189	KOL24F4	24/25/28	KERN	-5.30
190	KOL24F6	24/25/28	KERN	-5.40
191	KOL24J2	24/25/28	KERN	-6.30
192	KOL24J3	24/25/28	KERN	-6.45
193	KOL24K2	24/25/28	KERN	-6.50
194	KOL24K4	24/25/28	KERN	-6.60
195	KOL24K5	24/25/28	KERN	-6.70
196	KOL24K7	24/25/28	KERN	-6.85
197	KOL8BD1	8	KERN	-3.30
198	KOL8BD2	8	KERN	-3.40
199	KOL8BE1	8	KERN	-3.50
200	KOL8BE3	8	KERN	-3.80
201	KOL8BF1	8	KERN	-4.00
202	KOL8BI1	8	KERN	-4.70
203	KOL8BO1	8	KERN	-7.70

Visser & Smit Bouw bv



nr.	code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
204	KOL8BO2	8	KERN	-7.80
205	KOL8BP2	8	KERN	-8.50
206	KOL8BP4	8	KERN	-8.70
207	KOL8BP6	8	KERN	-8.85
208	KOL8BQ2	8	KERN	-9.00
209	KOL8BR1	8	KERN	-9.30
210	KOL8BS2	8	KERN	-9.95
211	KOL8BS4	8	KERN	-10.10
212	KOL8BT2	8	KERN	-10.35
213	KOL8BU1	8	KERN	-10.50
214	KOL8BV3	8	KERN	-10.90
215	KOL12A2	12	KERN	-2.90
216	KOL12B1	12	KERN	-3.10
217	KOL12B3	12	KERN	-3.35
218	KOL12G2	12	KERN	-4.05
219	KOL12J2	12	KERN	-4.70
220	KOL12N1	12	KERN	-5.90
221	KOL12Q2	12	KERN	-6.80
222	KOL12Q4	12	KERN	-7.00
223	KOL12S2	12	KERN	-7.50
224	KOL12S4	12	KERN	-7.70
225	KOL12T1	12	KERN	-7.65
226	KOL12X3	12	KERN	-9.25
227	KOL12Y1	12	KERN	-9.35
228	KOL12Z1	12	KERN	-9.40
229	KOL12A2A	12	KERN	-9.85
230	KOL12C1	12	KERN	-10.30
231	KOL12C3	12	KERN	-10.50
232	KOL12C3	12	KERN	-10.50
233	KOL12E1	12	KERN	-10.90
234	KOL20C2	20	KERN	1.30 HOR
235	KOL20G4	20	K	

OPDRACHT : 038196  
 PLAATS : DEN HAAG  
 WERK : TRAMTUNNEL  
 OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM) FILE : HAAGTREK

datum : 6/12/1996  
 pagina: 1

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRAMTUNNEL  
 RESULTATEN INDIRECTE TREKPROEVEN (BRAZILIAANSE SPLIJTPROEF)

MONSTER- AANMAAK DATUM	MONSTER CODE	TEST DATUM	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER	DIKTE [mm]	DIAMETE D/DIAM [mm]	Fmax [N]	Ti(max) [MPa]	k- factor [m/s]	
[mm,dd,jjj]	[mm,dd,jjj]	[mm,dd,jjj]	[dagen]	[dagen]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[m/s]	
1	4/23/96	BK2R10A	05/21/96	21	28	39.8	59.7	.7	730	.2
2	4/23/96	BK2R10B	05/21/96	21	28	34.9	59.6	.6	1000	.31
3	4/23/96	BK2R10C	05/21/96	21	28	39.3	59.7	.7	1110	.3
4	4/23/96	BK2R10D	05/21/96	21	28	38.7	59.5	.7	540	.15
5	4/23/96	BK2R10E	05/21/96	21	28	38.2	59.4	.6	550	.15
6	4/23/96	BK2R10F	05/21/96	21	28	39.4	59.3	.7	800	.22
7	4/23/96	BK2R8A	05/21/96	21	28	34.6	59.8	.6	280	.09
8	4/23/96	BK2R8B	05/21/96	21	28	37.5	59.9	.6	640	.18
9	4/23/96	BK2R8C	05/21/96	21	28	37.4	59.8	.6	630	.18
10	4/23/96	BK2R8D	05/21/96	21	28	39.6	59.3	.7	470	.13
11	4/23/96	BK2R8E	05/21/96	21	28	38.4	59.3	.6	430	.12
12	4/23/96	BK2R8F	05/21/96	21	28	39.3	59.3	.7	460	.13
13	4/23/96	BK2K5A	05/21/96	21	28	28.4	59.8	.5	330	.12
14	4/23/96	BK2K5B	05/21/96	21	28	36.9	59.8	.6	410	.12
15	4/23/96	BK2K5C	05/21/96	21	28	34.9	59.8	.6	510	.16
16	4/23/96	BK2K5D	05/21/96	21	28	37.7	59.7	.6	360	.1
17	4/23/96	BK2K5E	05/21/96	21	28	36.4	59.7	.6	510	.15
18	4/23/96	BK2K5F	05/21/96	21	28	37.2	59.7	.6	330	.09
19	4/23/96	BK2K4A	05/21/96	21	28	44.5	59.3	.8	440	.11
20	4/23/96	BK2K4B	05/21/96	21	28	36.3	59.8	.6	520	.15
21	4/23/96	BK2K4C	05/21/96	21	28	35	59.6	.6	430	.13
22	4/23/96	BK2K4D	05/21/96	21	28	36.9	59.4	.6	270	.08
23	4/23/96	BK2K4E	05/21/96	21	28	34.2	59.5	.6	290	.09
24	4/23/96	BK2K4F	05/21/96	21	28	35.5	59.4	.6	350	.11
25	4/24/96	BK5K4A	05/22/96	21	28	39.1	59.4	.7	2150	.59
26	4/24/96	BK5K4B	05/22/96	21	28	39	59.3	.7	2070	.57
27	4/24/96	BK5K4C	05/22/96	21	28	40.43	59.3	.7	2800	.74
28	4/24/96	BK5K4D	05/22/96	21	28	36.2	59.5	.6	1120	.33
29	4/24/96	BK5K4E	05/22/96	21	28	32.8	59.4	.6	2350	.77
30	4/24/96	BK5K4F	05/22/96	21	28	38.2	59.4	.6	2770	.78
31	4/24/96	BK5K7A	05/22/96	21	28	35.2	59.3	.6	710	.22
32	4/24/96	BK5K7B	05/22/96	21	28	36	59.3	.6	1150	.34
33	4/24/96	BK5K7C	05/22/96	21	28	38.4	59.4	.6	2770	.77
34	4/24/96	BK5K7D	05/22/96	21	28	39.1	59.3	.7	2040	.56
35	4/24/96	BK5K7E	05/22/96	21	28	38.6	59.2	.7	1720	.48
36	4/24/96	BK5K7F	05/22/96	21	28	39.1	59.4	.7	2420	.66
37	4/24/96	BK5R8A	05/22/96	21	28	39.2	59.3	.7	910	.25
38	4/24/96	BK5R8B	05/22/96	21	28	39.1	59.8	.7	1230	.33
39	4/24/96	BK5R8C	05/22/96	21	28	37.5	59.3	.6	1560	.45
40	4/24/96	BK5R8D	05/22/96	21	28	37.3	59.2	.6	1260	.36
41	4/24/96	BK5R8E	05/22/96	21	28	34.3	59.2	.6	1070	.34
42	4/24/96	BK5R8F	05/22/96	21	28	37.9	59.8	.6	1420	.4
43	4/24/96	BK5R10A	05/22/96	21	28	37.1	59.4	.6	2100	.61
44	4/24/96	BK5R10B	05/22/96	21	28	37.7	59.1	.6	1780	.51
45	4/24/96	BK5R10C	05/22/96	21	28	37.1	59.3	.6	2540	.73
46	4/24/96	BK5R10D	05/22/96	21	28	35.8	59.3	.6	2520	.76
47	4/24/96	BK5R10E	05/22/96	21	28	38.9	59.3	.7	2000	.55
48	4/24/96	BK5R10F	05/22/96	21	28	37.9	59.3	.6	2280	.65
49	4/25/96	BK2K4A	05/23/96	21	28	47.33	101.32	.5	7400	.98
50	4/25/96	BK2K4B	05/23/96	21	28	47.4	101.35	.5	9144	1.21



OPDRACHT : 038196  
 PLAATS : DEN HAAG  
 WERK : TRAMTUNNEL  
 OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM) FILE : HAAGTREK

datum : 6/12/1996  
 pagina: 2

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRAMTUNNEL  
 RESULTATEN INDIRECTE TREKPROEVEN (BRAZILIAANSE SPLIJTPROEF)

MONSTER- AANMAAK DATUM	MONSTER CODE	TEST DATUM	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER	DIKTE [mm]	DIAMETE D/DIAM [mm]	Fmax [N]	Ti(max) [MPa]	k- factor [m/s]	
[mm,dd,jjj]	[mm,dd,jjj]	[mm,dd,jjj]	[dagen]	[dagen]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[m/s]	
51	4/25/96	BK2K4C	05/23/96	21	28	47.47	101.3	.5	9739	1.29
52	4/25/96	BK2K4D	05/23/96	21	28	47.6	101.45	.5	10414	1.37
53	4/25/96	BK2K4E	05/23/96	21	28	46.67	101.47	.5	9076	1.22
54	4/25/96	BK2K4F	05/23/96	21	28	48	101.32	.5	10125	1.33
55	4/25/96	BK2K8A	05/23/96	21	28	46.93	101.3	.5	10651	1.43
56	4/25/96	BK2K8B	05/23/96	21	28	47.3	101.38	.5	9200	1.22
57	4/25/96	BK2K8C	05/23/96	21	28	48.2	101.35	.5	10262	1.34
58	4/25/96	BK2K8D	05/24/96	21	29	47.4	101.3	.5	11068	1.47
59	4/25/96	BK2K8E	05/24/96	21	29	47.47	101.3	.5	10000	1.32
60	4/25/96	BK2K8F	05/24/96	21	29	47.6	101.4	.5	10898	1.44
61	4/25/96	BK2R8A	05/24/96	21	29	48.13	101.25	.5	11406	1.49
62	4/25/96	BK2R8B	05/24/96	21	29	47.07	101.38	.5	11915	1.59
63	4/25/96	BK2R8C	05/24/96	21	29	47.1	101.38	.5	11761	1.57
64	4/25/96	BK2R8D	05/24/96	21	29	47.9	101.3	.5	10546	1.38
65	4/25/96	BK2R8E	05/24/96	21	29	46.6	101.4	.5	10675	1.44
66	4/25/96	BK2R8F	05/24/96	21	29	46	101.2	.5	12090	1.65
67	4/25/96	BK2R10A	05/24/96	21	29	48.2	101.1	.5	9276	1.21
68	4/25/96	BK2R10B	05/24/96	21	29	47.7	101.4	.5	9902	1.3
69	4/25/96	BK2R10C	05/24/96	21	29	47.1	101.3	.5	8951	1.19
70	4/25/96	BK2R10D	05/24/96	21	29	47.4	101.4	.5	5656	.75
71	4/25/96	BK2R10E	05/24/96	21	29	47.8	101.1	.5	9281	1.22
72	4/25/96	BK2R10F	05/24/96	21	29	47.9	101.4	.5	9157	1.2
73	4/29/96	K12K4A	05/28/96	22	29	47.1	101.42	.5	1799	.24
74	4/29/96	K12K4B	05/28/96	22	29	46.77	101.38	.5	1786	.24
75	4/29/96	K12K4C	05/28/96	22	29	47.73	101.35	.5	1990	.26
76	4/29/96	K12K4D	05/28/96	22	29				ERROR	ERROR
77	4/29/96	K12K4E	05/28/96	22	29				ERROR	ERROR
78	4/29/96	K12K4F	05/28/96	22	29				ERROR	ERROR
79	4/29/96	BK12K8A	05/28/96	22	29				ERROR	ERROR
80	4/29/96	BK12K8B	05/28/96	22	29	55.5	101.38	.5	2542	.29
81	4/29/96	BK12K8C	05/28/96	22	29	55.23	101.38	.5	2956	.34
82	4/29/96	BK12K8D	05/28/96	22	29	47.43	59.38	.8	900	.2
83	4/29/96	BK12K8E	05/28/96	22	29	29.17	59.15	.5	810	.3
84	4/29/96	BK12K8F	05/28/96	22	29				ERROR	ERROR
85	4/29/96	BK12R10A	05/28/96	22	29	33.4	101.4	.3	5240	.98
86	4/29/96	BK12R10B	05/28/96	22	29	47.23	101.32	.5	5467	.73
87	4/29/96	BK12R10C	05/28/96	22	29	47.47	101.33	.5	6227	.82
88	4/29/96	BK12R10D	05/28/96	22	29	46.83	101.38	.5	5923	.79
89	4/29/96	BK12R10E	05/28/96	22	29	47.13	101.32	.5	6423	.86
90	4/29/96	BK12R10F	05/28/96	22	29	47.27	101.35	.5	6340	.84
91	4/29/96	BK12R8A	05/28/96	22	29	47.5	101.2	.5	6210	.82
92	4/29/96	BK12R8B	05/28/96	22	29	48	101.4	.5	6199	.81
93	4/29/96	BK12R8C	05/28/96	22	29	47.6	101.3	.5	6120	.81
94	4/29/96	BK12R8D	05/28/96	22	29	49.3	101.3	.5	6184	.79
95	4/29/96	BK12R8E	05/28/96	22	29	47.4	101.2	.5	6310	.84
96	4/29/96	BK12R8F	05/28/96	22	29				ERROR	ERROR
97	4/23/96	KOL2AA3	05/30/96	22	37	34.2	71	.5	1397	.37
98	4/23/96	KOL2C2	05/31/96	22	38	34.5	73.8	.5	588.2	.15
99	4/23/96	KOL2E2	05/31/96	22	38	37.8	71.4	.5	258	.06
100	4/23/96	KOL2F1	05/31/96	22	38	35.7	72.7	.5	509	.12



OPDRACHT : 038196  
 PLAATS : DEN HAAG  
 WERK : TRAMTUNNEL

OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM) FILE : HAAGTREK

datum : 6/12/1996  
 pagina: 3

OPDRACHT : 038196  
 PLAATS : DEN HAAG  
 WERK : TRAMTUNNEL

OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM) FILE : HAAGTREK

datum : 6/12/1996  
 pagina: 4

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRAMTUNNEL  
 RESULTATEN INDIRECTE TREKPROEVEN (BRAZILIAANSE SPLIJTPROEF)

MONSTER- AANMAAK DATUM	MONSTER CODE	TEST DATUM	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER	DIKTE	DIAMETE D/DIAM	Fmax	Ti(max)	k- factor	
[mm,dd,jj]	[mm,dd,jj]	[mm,dd,jj]	[dagen]	[mm]	[mm]	[-]	[N]	[MPa]	[m/s]	
102	4/23/96	KOL2F4	05/31/96	22	38	36	73.2	.5	371	.09
103	4/23/96	KOL2G1	05/30/96	22	37	36.4	72.9	.5	964	.23
104	4/23/96	KOL2O1	05/30/96	22	37	36.3	70.8	.5	1586	.39
105	4/23/96	KOL2O1	05/30/96	22	37	36.5	73.3	.5	2146	.51
106	4/23/96	KOL2V2	05/30/96	22	37	36.5	73	.5	2212	.53
107	4/23/96	KOL2W4	05/30/96	22	37	36.8	72.6	.5	2050	.49
108	4/23/96	KOL2X1	05/30/96	22	37	37.2	74.5	.5	1824	.42
109	4/23/96	KOL2Y2	05/30/96	22	37	37.1	72.4	.5	1121	.27
110	4/23/96	KOL2Z1	05/30/96	22	37	38	73.2	.5	1986	.45
111	4/23/96	KOL2Z2	05/30/96	22	37	37.7	73.4	.5	1988	.46
112	4/23/96	KOL2Z4	05/30/96	22	37	37.2	73.4	.5	1977	.46
113	4/23/96	KOL2Z5	05/30/96	22	37	37.3	73	.5	2380	.56
114	4/24/96	KOL5B1	05/31/96	22	37	40.8	83.3	.5	2275	.43
115	4/24/96	KOL5B3	05/31/96	22	37	41	83.2	.5	2723	.51
116	4/24/96	KOL5E1	05/31/96	22	37	40.4	82.8	.5	5337	1.02
117	4/24/96	KOL5E3	05/31/96	22	37	40.2	82.9	.5	5043	.96
118	4/24/96	KOL5G1	05/31/96	22	37	38.4	74.1	.5	5886	1.32
119	4/24/96	KOL5H2	05/31/96	22	37	38.3	74.4	.5	3906	.87
120	4/24/96	KOL5N1	05/31/96	22	37	37.9	73.3	.5	4282	.98
121	4/24/96	KOL5P2	05/31/96	22	37	38.4	73.3	.5	4476	1.01
122	4/24/96	KOL5P4	05/31/96	22	37	38.1	73.2	.5	4685	1.07
123	4/24/96	KOL5P6	05/31/96	22	37	38.3	72.6	.5	3842	.88
124	4/24/96	KOL5P8	05/31/96	22	37	37.2	73.7	.5	2652	.62
125	4/24/96	KOL5Q2	05/31/96	22	37	37.6	73.5	.5	4743	1.09
126	4/24/96	KOL5R2	05/31/96	22	37	38.2	73.3	.5	5849	1.33
127	4/24/96	KOL5R4	05/31/96	22	37	37.8	73.3	.5	5560	1.28
128	4/24/96	KOL5R6	05/31/96	22	37	38.8	73.3	.5	4375	.98
129	4/24/96	KOL5S2	05/31/96	22	37	37.3	73.9	.5	3109	.72
130	4/24/96	KOL5S4	05/31/96	22	37	37.9	74.3	.5	2524	.57
131	4/24/96	KOL5U1	05/31/96	22	37	38.2	71.8	.5	2147	.5
132	5/ 1/96	K14R8A	05/31/96	22	30	50.3	99.8	.5	6862	.87
133	5/ 1/96	K14R8B	05/31/96	22	30	50.7	99.5	.5	5309	.67
134	5/ 1/96	K14R8C	05/31/96	22	30	50.3	99.5	.5	6042	.77
135	5/ 1/96	K14R8D	05/31/96	22	30	50.7	99.4	.5	6637	.84
136	5/ 1/96	K14R8E	05/31/96	22	30	50.7	99.7	.5	5599	.71
137	5/ 1/96	K14R8F	05/31/96	22	30	50.8	99.6	.5	6756	.85
138	5/ 1/96	K14K10A	05/31/96	22	30	50.4	99.3	.5	9036	1.15
139	5/ 1/96	K14K10B	05/31/96	22	30	49.8	99.8	.5	9859	1.26
140	5/ 1/96	K14K10C	05/31/96	22	30	50.3	99.7	.5	8425	1.07
141	5/ 1/96	K14K10D	05/31/96	22	30	29.8	59.6	.5	2363	.85
142	5/ 1/96	K14K10E	05/31/96	22	30	29.6	59.9	.5	2606	.94
143	5/ 1/96	K14K10F	05/31/96	22	30	30.6	59.3	.5	2668	.94
144	5/ 1/96	K14R10A	05/31/96	22	30	50.5	99.7	.5	4987	.63
145	5/ 1/96	K14R10B	05/31/96	22	30	50.6	99.6	.5	4471	.56
146	5/ 1/96	K14R10C	05/31/96	22	30	50.5	99.4	.5	3784	.48
147	5/ 1/96	K14R10D	05/31/96	22	30	50.5	99.4	.5	2534	.32
148	5/ 1/96	K14R10E	05/31/96	22	30	50.3	99.3	.5	4143	.53
149	5/ 1/96	K14R10F	05/31/96	22	30	50.8	99.4	.5	3566	.45
150	5/ 1/96	K14K4A	05/31/96	22	30	49.6	99.6	.5	3127	.4
151	5/ 1/96	K14K4B	05/31/96	22	30	50.1	99.6	.5	3969	.51
152	5/ 1/96	K14K4C	05/31/96	22	30	50.4	99.5	.5	3437	.44

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRAMTUNNEL  
 RESULTATEN INDIRECTE TREKPROEVEN (BRAZILIAANSE SPLIJTPROEF)

MONSTER- AANMAAK DATUM	MONSTER CODE	TEST DATUM	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER	DIKTE	DIAMETE D/DIAM	Fmax	Ti(max)	k- factor	
[mm,dd,jj]	[mm,dd,jj]	[mm,dd,jj]	[dagen]	[mm]	[mm]	[-]	[N]	[MPa]	[m/s]	
153	5/ 1/96	K14K4D	05/31/96	22	30	29.9	59.8	.5	665	.24
154	5/ 1/96	K14K4E	05/31/96	22	30	30	59.7	.5	680	.24
155	5/ 1/96	K14K4F	05/31/96	22	30	27.5	59.5	.5	673	.26
156	4/29/96	K12X4BB	05/31/96	22	32	30.7	59.8	.5	894	.31
157	5/ 1/96	KOL14C2	05/31/96	22	30	38.6	79.1	.5	175	.04
158	5/ 1/96	KOL14E3	05/31/96	22	30	40.2	80.6	.5	271	.05
159	5/ 1/96	KOL14I2	05/30/96	22	29	36.5	71.6	.5	5910	1.44
159	5/ 1/96	KOL14I3	05/31/96	22	30	36.6	71.6	.5	5800	1.41
160	5/ 1/96	KOL14J2	05/30/96	22	29	36.6	71.6	.5	4898	1.19
160	5/ 1/96	KOL14J4	05/30/96	22	29	36.7	71.9	.5	3743	.9
161	5/ 1/96	KOL14R2	05/30/96	22	29	36.4	72.1	.5	8213	1.99
161	5/ 1/96	KOL14S1	05/29/96	22	28	36.8	72.3	.5	6326	1.51
162	5/ 1/96	KOL14S3	05/30/96	22	29	36.8	72.3	.5	3823	.91
162	5/ 1/96	KOL14S5	05/30/96	22	29	36.6	71.4	.5	9637	2.3
163	5/ 1/96	KOL14T1	05/29/96	22	28	36.6	71.8	.5	6089	1.48
163	5/ 1/96	KOL14T3	05/29/96	22	28	37	72.4	.5	8521	2.03
164	5/ 1/96	KOL14T5	05/29/96	22	28	36.9	72.3	.5	10026	2.39
164	5/ 1/96	KOL14U2	05/29/96	22	28	37.1	71.5	.5	6749	1.62
165	5/ 1/96	KOL14V1	05/29/96	22	28	36.8	70.9	.5	6313	1.54
165	5/ 1/96	KOL14V3	05/29/96	22	28	37	71.7	.5	6737	1.62
166	5/ 1/96	KOL14W2	05/29/96	22	28	36.8	72.7	.5	7700	1.83
166	5/ 1/96	KOL14W4	05/29/96	22	28	36.9	72.5	.5	7348	1.75
160	4/26/96	KL10AB2	06/03/96	23	38	41.2	83.5	.5	1408	.26
161	4/26/96	KL10AC2	06/03/96	23	38	37.4	73.1	.5	1979	.46
162	4/26/96	KL10AD1	06/03/96	23	38	36.4	73.5	.5	1937	.46
163	4/26/96	KL10AD3	06/03/96	23	38	36.3	73.2	.5	1983	.48
164	4/26/96	KL10AD5	06/03/96	23	38	36.5	73.5	.5	2178	.52
165	4/26/96	KL10AD7	06/03/96	23	38	36.4	73.5	.5	1814	.43
166	4/26/96	KL10AD9	06/03/96	23	38	36.7	73.1	.5	1771	.42
167	4/26/96	KL10AE2	06/03/96	23	38	36.6	73.1	.5	1839	.44
168	4/26/96	KL10AE4	06/03/96	23	38	36.7	73	.5	2448	.58
169	4/26/96	KL10AF2	06/03/96	23	38	36.1	72.9	.5	2118	.51
170	4/26/96	KL10AG1	06/03/96	23	38	36.6	72.9	.5	2271	.54
171	4/26/96	KL10AH2	06/03/96	23	38	36.8	73.2	.5	2261	.53
172	4/26/96	KL10AJ1	06/03/96	23	38	36.7	72.8	.5	2306	.55
173	4/26/96	KL10AJ3	06/03/96	23	38	37	73.4	.5	2815	.66
174	4/26/96	KL10AJ5	06/03/96	23	38	36.6	73.4	.5	1757	.42
175	4/26/96	KL10AJ7	06/03/96	23	38	35.5	73.1	.5	2275	.56
176	4/26/96	KL10AJ9	06/03/96	23	38	36.5	73.1	.5	1845	.44
177	4/26/96	KL10AK2	06/03/96	23	38	36	73.7	.5	2743	.66
178	5/ 3/96	KOL24B2	06/04/96	23	32	37.6	73.7	.5	6220	1.43
179	5/ 3/96	KOL24B4	06/04/96	23	32	37.5	73.8	.5	5399	1.24
180	5/ 3/96	KOL24B6	06/04/96	23	32	37.6	73.7	.5	5390	1.24
181	5/ 3/96	KOL24B8	06/04/96	23	32	37.5	73.7	.5	3464	.8
182	5/ 3/96	KOL24B10	06/04/96	23	32	37.8	73.9	.5	7278	1.66
183	5/ 3/96	KOL24B12	06/04/96	23	32	37.5	73.8	.5	8337	1.92
184	5/ 3/96	KOL24C1	06/04/96	23	32	37.3	73.9	.5	13487	3.11
185	5/ 3/96	KOL24E1	06/04/96	23	32	37.3	73.4	.5	5511	1.28
186	5/ 3/96	KOL24E2	06/04/96	23	32	37.3	73.4	.5	5351	1.24
187	5/ 3/96	KOL24E4	06/04/96	23	32	37.6	73.9	.5	16515	3.78
188	5/ 3/96	KOL24E9	06/04/96	23	32	37.7	73.9	.5	4001	1.77



OPDRACHT : 038196  
 PLAATS : DEN HAAG  
 WERK : TRAMTUNNEL

OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM) FILE : HAAGTREK

datum : 6/12/1996  
 pagina: 5

OPDRACHT : 038196  
 PLAATS : DEN HAAG  
 WERK : TRAMTUNNEL

OPDRACHTGEVER: KFD (V&S BOUW BALLAST NEDAM) FILE : HAAGTREK

datum : 6/12/1996  
 pagina: 6

MOS GROENMECHANIEK

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRAMTUNNEL  
 RESULTATEN INDIRECTE TREKPROEVEN (BRAZILIAANSE SPLIJTPROEF)

MONSTER- AANMAAK DATUM	MONSTER CODE	TEST DATUM	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER	DIKTE	DIAMETE D/DIAM	Fmax	Ti(max)	k- factor	
[mm, dd, jj]		[mm, dd, jj]		[dagen]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[m/s]	
189	5/ 3/96	KOL24F4	06/04/96	23	32	37.7	73.9	.5	6838	1.56
190	5/ 3/96	KOL24F6	06/04/96	23	32	37.7	74	.5	5379	1.23
191	5/ 3/96	KOL24J2	06/04/96	23	32	37.5	73.8	.5	7121	1.64
192	5/ 3/96	KOL24J3	06/04/96	23	32	37.7	73.8	.5	4969	1.14
193	5/ 3/96	KOL24K2	06/04/96	23	32	37.3	74.1	.5	8400	1.93
194	5/ 3/96	KOL24K4	06/04/96	23	32	37.8	74.4	.5	6720	1.52
195	5/ 3/96	KOL24K5	06/04/96	23	32	37.6	74.4	.5	6628	1.51
196	5/ 3/96	KOL24K7	06/04/96	23	32	37.5	74.2	.5	7103	1.63
197	4/25/96	KOL8801	06/06/96	23	42	42.7	84.1	.5	7048	1.25
198	4/25/96	KOL8802	06/06/96	23	42	42.7	83.8	.5	7942	1.41
199	4/25/96	KOL88E1	06/06/96	23	42	42.7	84.1	.5	7199	1.28
200	4/25/96	KOL88E3	06/06/96	23	42	43.2	84.2	.5	5810	1.02
201	4/25/96	KOL88F1	06/06/96	23	42	42.8	83.8	.5	9093	1.61
202	4/25/96	KOL88I1	06/06/96	23	42	43.1	83.3	.5	10105	1.79
203	4/25/96	KOL88O1	06/06/96	23	42	38	74.5	.5	8143	1.83
204	4/25/96	KOL88O2	06/06/96	23	42	38	74.4	.5	9721	2.19
205	4/25/96	KOL88P2	06/06/96	23	42	37.7	73.9	.5	10433	2.38
206	4/25/96	KOL88P4	06/06/96	23	42	37.8	73.7	.5	7245	1.66
207	4/25/96	KOL88P6	06/06/96	23	42	38.2	74.6	.5	8717	1.95
208	4/25/96	KOL88Q2	06/06/96	23	42	37.6	74.4	.5	8364	1.9
209	4/25/96	KOL88R1	06/06/96	23	42	37.5	74.1	.5	7633	1.75
210	4/25/96	KOL88S2	06/06/96	23	42	37.8	74.4	.5	9429	2.13
211	4/25/96	KOL88S4	06/06/96	23	42	38	74.1	.5	9404	2.13
212	4/25/96	KOL88T2	06/06/96	23	42	37.7	73.2	.5	10198	2.35
213	4/25/96	KOL88U1	06/06/96	23	42	37.6	74.1	.5	9289	2.12
214	4/25/96	KOL88V3	06/06/96	23	42	37.9	74.2	.5	9011	2.04
215	4/29/96	KOL12A2	06/06/96	23	38	41.9	82.8	.5	4629	.85
216	4/29/96	KOL12B1	06/06/96	23	38	42	82.7	.5	2518	.46
217	4/29/96	KOL12B3	06/06/96	23	38	43.3	82.6	.5	5182	.92
218	4/29/96	KOL12G2	06/06/96	23	38	41.6	82.6	.5	3190	.59
219	4/29/96	KOL12J2	06/06/96	23	38	37	73.4	.5	3240	.76
220	4/29/96	KOL12N1	06/06/96	23	38	37.6	74.4	.5	5864	1.33
221	4/29/96	KOL12Q2	06/06/96	23	38	37.8	73.8	.5	4562	1.04
222	4/29/96	KOL12Q4	06/06/96	23	38	37.7	74.4	.5	4750	1.08
223	4/29/96	KOL12S2	06/06/96	23	38	38.2	74.2	.5	3644	.82
224	4/29/96	KOL12S4	06/06/96	23	38	38.1	74.2	.5	4779	1.08
225	4/29/96	KOL12T1	06/06/96	23	38	37.4	74.5	.5	8499	1.94
226	4/29/96	KOL12X3	06/06/96	23	38	37.4	74.5	.5	3204	.73
227	4/29/96	KOL12Y1	06/06/96	23	38	37.8	74.6	.5	4811	1.09
228	4/29/96	KOL12Z1	06/06/96	23	38	41.7	82.8	.5	5046	.93
229	4/29/96	KOL12AA2	06/06/96	23	38	37.7	74.1	.5	2971	.68
230	4/29/96	KOL12CC1	06/06/96	23	38	37.4	74.3	.5	4009	.92
231	4/29/96	KOL12CC3	06/06/96	23	38	37.8	74.3	.5	2695	.61
232	4/29/96	KOL12CC3	06/07/96	23	39					7.6e-10
233	4/29/96	KOL12EE1	06/06/96	23	38	38.2	74.3	.5	5196	1.17
234	5/ 2/96	KOL20C2	06/07/96	23	36	41.8	83.1	.5	12823	2.35
235	5/ 2/96	KOL20C4	06/07/96	23	36	42.2	83	.5	12171	2.21
236	5/ 2/96	KOL20D1	06/07/96	23	36	37.5	73.9	.5	14388	3.31
237	5/ 2/96	KOL20E2	06/07/96	23	36	37.4	72.6	.5	6328	1.48
238	5/ 2/96	KOL20E4	06/07/96	23	36	37.2	72.3	.5	7439	1.76
239	5/ 2/96	KOL20E6	06/07/96	23	36	37	72.6	.5	5024	1.43

VOORONDERZOEK JET-GROUTMONSTERS TRAMTUNNEL  
 RESULTATEN INDIRECTE TREKPROEVEN (BRAZILIAANSE SPLIJTPROEF)

MONSTER- AANMAAK DATUM	MONSTER CODE	TEST DATUM	WEEK NUMMER	LEEFTIJD MONSTER	DIKTE	DIAMETE D/DIAM	Fmax	Ti(max)	k- factor	
[mm, dd, jj]		[mm, dd, jj]		[dagen]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[m/s]	
240	5/ 2/96	KOL20I2	06/07/96	23	36	38.1	74.1	.5	6320	1.43
241	5/ 2/96	KOL20I4	06/07/96	23	36	38.1	74.2	.5	5580	1.26
242	5/ 2/96	KOL20I6	06/07/96	23	36	38	74.2	.5	8055	1.82
243	5/ 2/96	KOL20J1	06/07/96	23	36	38	74	.5	8593	1.95
244	5/ 2/96	KOL20J3	06/07/96	23	36	38	74.1	.5	7479	1.69
245	5/ 2/96	KOL20K2	06/07/96	23	36	37.7	73.9	.5	8881	2.03
246	5/ 1/96	KOL17A1	06/10/96	24	40	39	81.6	.5	1683	.34
247	5/ 1/96	KOL17B1	06/10/96	24	40	42.4	83.7	.5	3308	.59
248	5/ 1/96	KOL17B3	06/10/96	24	40	43	83.1	.5	2163	.39
249	5/ 1/96	KOL17J1	06/10/96	24	40	36.5	72.5	.5	2144	.52
250	5/ 1/96	KOL17K1	06/10/96	24	40	36.5	73.4	.5	1705	.41
251	5/ 1/96	KOL17M1	06/10/96	24	40	35.1	72.6	.5	2776	.69
252	5/ 2/96	KOL19AA2	06/07/96	23	36	37.7	73.4	.5	7566	1.74
253	5/ 2/96	KOL19AA4	06/07/96	23	36	37.9	73.6	.5	8038	1.83
254	5/ 2/96	KOL19B3	06/07/96	23	36	37.4	74.3	.5	9047	2.07
255	5/ 2/96	KOL19CC2	06/07/96	23	36	37.5	73.8	.5	8388	1.93
256	5/ 2/96	KOL19D2	06/10/96	24	39	42.5	83.6	.5	8044	1.44
257	5/ 2/96	KOL19D01	06/07/96	23	36	37.7	73.5	.5	7972	1.83
258	5/ 2/96	KOL19E2	06/10/96	24	39	37.5	73.3	.5	6498	1.5
259	5/ 2/96	KOL19EE2	06/07/96	23	36	37.4	73.4	.5	8970	2.08
260	5/ 2/96	KOL19FF1	06/07/96	23	36	36.7	73.2	.5	7680	1.82
261	5/ 2/96	KOL19F2	06/10/96	24	39	35.5	73.3	.5	6409	1.57
262	5/ 2/96	KOL19FF3	06/07/96	23	36	36.9	73.8	.5	7428	1.74
263	5/ 2/96	KOL19GG1	06/07/96	23	36	36.2	72.8	.5	7222	1.74
264	5/ 2/96	KOL19G2	06/10/96	24	39	37.4	73.9	.5	6691	1.54
265	5/ 2/96	KOL19W1	06/10/96	24	39	37	72.8	.5	7868	1.86
266	5/ 2/96	KOL19Y2	06/10/96	24	39	36.9	72.5	.5	8294	1.97
267	5/ 2/96	KOL19Y4	06/10/96	24	39	36.7	72.7	.5	6831	1.63
268	5/ 2/96	KOL19Z2	06/10/96	24	39	37.6	73.7	.5	7959	1.83

Totaal  
 Braziliaanse splijtproef 276



## **II.6: Bewerkte resultaten beproevingen**

## Verticale kernboring kolom 5

### Verklaring monstercode

Resultaten een-axiale drukproeven en indirecte trekproeven

code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
KOL5B2	5	KERN	-3.50
KOL5D1	5	KERN	-4.25
KOL5E2	5	KERN	-4.55
KOL5F1	5	KERN	-4.90
KOL5H1	5	KERN	-5.40
KOL5N2	5	KERN	-7.90
KOL5O1	5	KERN	-8.10
KOL5P1	5	KERN	-8.35
KOL5P3	5	KERN	-8.50
KOL5P5	5	KERN	-8.65
KOL5P7	5	KERN	-8.80
KOL5Q1	5	KERN	-8.95
KOL5Q3	5	KERN	-9.10
KOL5R1	5	KERN	-9.30
KOL5R3	5	KERN	-9.45
KOL5R5	5	KERN	-9.60
KOL5S1	5	KERN	-9.85
KOL5S3	5	KERN	-10.00
KOL5B1	5	KERN	-3.40
KOL5B3	5	KERN	-3.65
KOL5E1	5	KERN	-4.45
KOL5E3	5	KERN	-4.65
KOL5G1	5	KERN	-5.10
KOL5H2	5	KERN	-5.45
KOL5N1	5	KERN	-7.80
KOL5P2	5	KERN	-8.45
KOL5P4	5	KERN	-8.60
KOL5P6	5	KERN	-8.75
KOL5P8	5	KERN	-8.85
KOL5Q2	5	KERN	-9.00
KOL5R2	5	KERN	-9.35
KOL5R4	5	KERN	-9.50
KOL5R6	5	KERN	-9.70
KOL5S2	5	KERN	-9.95
KOL5S4	5	KERN	-10.10
KOL5U1	5	KERN	-10.50

### Druksterkte:

Monster	Druksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL5B2	5,61	-1,66	2,756
KOL5D1	6,97	-0,30	0,090
KOL5E2	7,40	+0,13	0,017
KOL5F1	7,74	+0,47	0,221
KOL5H1	7,74	+0,47	0,221
KOL5N2	6,04	-1,23	1,513
KOL5O1	9,35	+2,08	4,326
KOL5P1	6,72	-0,55	0,303
KOL5P3	7,06	-0,21	0,044
KOL5P5	6,55	-0,72	0,518
KOL5P7	6,55	-0,72	0,518
KOL5Q1	8,08	+0,81	0,656
KOL5Q3	7,23	-0,04	0,0016
KOL5R1	9,35	+2,08	4,326
KOL5R3	8,50	+1,23	1,513
KOL5R5	8,16	+0,89	0,792
KOL5S1	5,19	-2,08	4,326
KOL5S3	6,55	-0,72	0,518
Σ	130,79		22,659

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 130,789/18 = 7,27 \text{ N/mm}^2$

Variantie :  $S^2 = 22,659/(18-1) = 1,333$

Standaardafwijking :  $S = 1,16 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92

Factor voor éénassige spanningstoestand: 0,85

Materiaalfactor: 1,2

De rekenwaarde voor de druksterkte kan zodoende worden bepaald op:  
 $0,92 \cdot 0,85 \cdot (7,27 - 1,53 \cdot 1,16) / 1,2 = 3,59 \text{ N/mm}^2$ .



**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Treksterkte:**

Monster	Treksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL5B1	0,43	-0,47	0,221
KOL5B3	0,51	-0,39	0,152
KOL5E1	1,02	+0,12	0,0144
KOL5E3	0,96	+0,06	0,0036
KOL5G1	1,32	+0,42	0,176
KOL5H2	0,87	-0,03	0,0009
KOL5N1	0,98	+0,08	0,0064
KOL5P2	1,01	+0,11	0,0121
KOL5P4	1,07	+0,17	0,0289
KOL5P6	0,88	-0,02	0,0004
KOL5P8	0,62	-0,28	0,078
KOL5Q2	1,09	+0,19	0,036
KOL5R2	1,33	+0,43	0,185
KOL5R4	1,28	+0,38	0,144
KOL5R6	0,98	-0,02	0,0004
KOL5S2	0,72	-0,18	0,032
KOL5S4	0,57	-0,33	0,109
KOL5U1	0,50	-0,40	0,160
Σ	16,14		1,300

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 16,14/18 = 0,90 \text{ N/mm}^2$

Variantie :  $S^2 = 1,300/(18-1) = 0,076$

Standaardafwijking :  $S = 0,28 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92

Factor voor éénassige spanningstoestand: n.v.t.

Materiaalfactor: 1,4

De rekenwaarde voor de treksterkte kan zodoende worden bepaald op:

$0,92 \cdot (0,90 - 1,53 \cdot 0,28) / 1,4 = 0,313 \text{ N/mm}^2$ .

Visser & Smit Bouw bv



Ballast Nedam Funderingstechnieken bv

**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Elasticiteitsmodulus:**

Monster	E-modulus X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL5B2	1052	-429	184041
KOL5D1	1398	-83	6889
KOL5E2	1785	+304	92416
KOL5F1	1561	+80	6400
KOL5H1	1671	+190	36100
KOL5N2	1103	-378	142884
KOL5O1	1866	+385	148225
KOL5P1	1269	-212	44944
KOL5P3	1600	+119	14161
KOL5P5	1313	-168	28224
KOL5P7	1299	-182	33124
KOL5Q1	1721	+240	57600
KOL5Q3	1483	+2	4
KOL5R1	1825	+344	118336
KOL5R3	1698	+217	47089
KOL5R5	1682	+201	40401
KOL5S1	1063	-418	174724
KOL5S3	1272	-209	43681
Σ	26661		1219243

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 26661/18 = 1481 \text{ N/mm}^2$

Variantie :  $S^2 = 1219243/(18-1) = 71720$

Standaardafwijking :  $S = 268 \text{ N/mm}^2$

Visser & Smit Bouw bv



Ballast Nedam Funderingstechnieken bv



# KFD

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

## Volumieke massa:

Monster	Vol. massa X [kg/m <sup>3</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL5B2	2027	-13	169
KOL5D1	2038	-2	4
KOL5E2	2029	-11	121
KOL5F1	2052	+12	144
KOL5H1	2037	-3	9
KOL5N2	2063	+23	529
KOL5O1	2013	-27	729
KOL5P1	2037	-3	9
KOL5P3	2051	+11	121
KOL5P5	2040	0	0
KOL5P7	2045	+5	25
KOL5Q1	2051	+11	121
KOL5Q3	2041	+1	1
KOL5R1	2051	+11	121
KOL5R3	2038	-2	4
KOL5R5	2048	+8	64
KOL5S1	2029	-11	121
KOL5S3	2038	-2	4
Σ	36728		2296

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 36728/18 = 2040 \text{ kg/m}^3$

Variantie :  $S^2 = 2296/(18-1) = 135$

Standaardafwijking :  $S = 12 \text{ kg/m}^3$



## Verticale kernboring kolom 12

### Verklaring monstercode

Resultaten een-axiale drukproeven en indirecte trekproeven.

code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
KOL12A3	12	KERN	-3.00
KOL12A1	12	KERN	-2.80
KOL12B2	12	KERN	-3.30
KOL12C1	12	KERN	-3.40
KOL12G1	12	KERN	-3.95
KOL12J1	12	KERN	-4.60
KOL12Q1	12	KERN	-6.70
KOL12Q3	12	KERN	-6.90
KOL12S1	12	KERN	-7.40
KOL12S3	12	KERN	-7.60
KOL12V1	12	KERN	-8.30
KOL12X1	12	KERN	-9.00
KOL12X2	12	KERN	-9.15
KOL12Z2	12	KERN	-9.45
KOL12AA1	12	KERN	-9.75
KOL12AA3	12	KERN	-9.95
KOL12CC2	12	KERN	-10.40
KOL12DD3	12	KERN	-10.80
KOL12A2	12	KERN	-2.90
KOL12B1	12	KERN	-3.10
KOL12B3	12	KERN	-3.35
KOL12G2	12	KERN	-4.05
KOL12J2	12	KERN	-4.70
KOL12N1	12	KERN	-5.90
KOL12Q2	12	KERN	-6.80
KOL12Q4	12	KERN	-7.00
KOL12S2	12	KERN	-7.50
KOL12S4	12	KERN	-7.70
KOL12T1	12	KERN	-7.85
KOL12X3	12	KERN	-9.25
KOL12Y1	12	KERN	-9.35
KOL12Z1	12	KERN	-9.40
KOL12AA2	12	KERN	-9.85
KOL12CC1	12	KERN	-10.30
KOL12CC3	12	KERN	-10.50
KOL12CC3	12	KERN	-10.50
KOL12EE1	12	KERN	-10.90

### Druksterkte:

Monster	Druksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL12A3	4,00	-1,03	1,061
KOL12A1	5,19	+0,16	0,026
KOL12B2	2,55	-2,48	6,150
KOL12C1	6,21	+1,18	1,392
KOL12G1	4,59	-0,44	0,194
KOL12J1	5,87	+0,84	0,706
KOL12Q1	6,46	+1,43	2,045
KOL12Q3	6,21	+1,18	1,392
KOL12S1	3,91	-1,12	1,254
KOL12S3	4,76	-0,27	0,073
KOL12V1	3,57	-1,46	2,132
KOL12X1	5,61	+0,58	0,336
KOL12X2	5,53	+0,50	0,250
KOL12Z2	5,95	+0,92	0,846
KOL12AA1	5,27	+0,24	0,058
KOL12AA3	5,02	-0,01	0,0001
KOL12CC2	5,87	+0,84	0,706
KOL12DD3	4,00	-1,03	1,061
Σ	90,57		19,683

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 90,57/18 = 5,03 \text{ N/mm}^2$

Variatie :  $S^2 = 19,683/(18-1) = 1,16$

Standaardafwijking :  $S = 1,08 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92

Factor voor éénassige spanningstoestand: 0,85

Materiaalfactor: 1,2

De rekenwaarde voor de druksterkte kan zodoende worden bepaald op:  
 $0,92 \cdot 0,85 \cdot (5,03 - 1,53 \cdot 1,08) / 1,2 = 2,20 \text{ N/mm}^2$ .



**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Treksterkte:**

Monster	Treksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL12A2	0,85	-0,09	0,0081
KOL12B1	0,46	-0,48	0,2304
KOL12B3	0,92	-0,02	0,0004
KOL12G2	0,59	-0,35	0,123
KOL12J2	0,76	-0,18	0,032
KOL12N1	1,33	+0,39	0,152
KOL12Q2	1,04	+0,10	0,010
KOL12Q4	1,08	+0,14	0,020
KOL12S2	0,82	-0,12	0,014
KOL12S4	1,08	+0,14	0,020
KOL12T1	1,94	+1,00	1,000
KOL12X3	0,73	-0,21	0,044
KOL12Y1	1,09	+0,15	0,023
KOL12Z1	0,93	-0,01	0,0001
KOL12AA2	0,68	-0,26	0,068
KOL12CC1	0,92	-0,02	0,0004
KOL12CC3	0,61	-0,33	0,109
KOL12EE1	1,17	+0,23	0,053
Σ	17,00		1,907

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 17,00/18 = 0,94 \text{ N/mm}^2$

Variantie :  $S^2 = 1,907/(18-1) = 0,112$

Standaardafwijking :  $S = 0,335 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92

Factor voor éénassige spanningstoestand: n.v.t.

Materiaalfactor: 1,4

De rekenwaarde voor de treksterkte kan zodoende worden bepaald op:

$0,92 \cdot (0,94 - 1,53 \cdot 0,335) / 1,4 = 0,28 \text{ N/mm}^2$ .

**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Elasticiteitsmodulus:**

De kolomnummers KOL12B2, KOL12V1, KOL12Z2 en KOL12DD3 zijn niet representatief en worden niet in de berekening meegenomen.

Monster	E-modulus X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL12A3	1115	-345	119025
KOL12A1	1468	+8	64
KOL12C1	1955	+495	245025
KOL12G1	1518	+58	3364
KOL12J1	1317	-143	20449
KOL12Q1	1762	+302	91204
KOL12Q3	1648	+188	35344
KOL12S1	1138	-322	103684
KOL12S3	1389	-71	5041
KOL12X1	1377	-83	6889
KOL12X2	1579	+119	14161
KOL12AA1	1222	-238	56644
KOL12AA3	1432	-28	784
KOL12CC2	1518	+58	3364
Σ	20438		705042

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 20438/14 = 1460 \text{ N/mm}^2$

Variantie :  $S^2 = 705042/(14-1) = 54234$

Standaardafwijking :  $S = 233 \text{ N/mm}^2$



# KFD

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

## Volumieke massa:

Monster	Vol. massa X [kg/m <sup>3</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL12A3	2009	+9	81
KOL12A1	2034	+34	1156
KOL12B2	2001	+1	1
KOL12C1	2030	+30	900
KOL12G1	2031	+31	961
KOL12J1	2036	+36	1296
KOL12Q1	2014	+14	196
KOL12Q3	2025	+25	625
KOL12S1	1911	-89	7921
KOL12S3	1934	-76	5776
KOL12V1	1869	-131	17161
KOL12X1	2033	+33	1089
KOL12X2	2052	+52	2704
KOL12Z2	2031	+31	961
KOL12AA1	2007	+7	49
KOL12AA3	2034	+34	1156
KOL12CC2	2034	+34	1156
KOL12DD3	1914	-86	7396
Σ	35999		50585

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 35999/18 = 2000 \text{ kg/m}^3$

Variantie :  $S^2 = 50585/(18-1) = 2976$

Standaardafwijking :  $S = 55 \text{ kg/m}^3$



## Verticale kernboring kolom 14

### Verklaring monstercode

Resultaten een-axiale drukproeven en indirecte trekproeven

code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
KOL14C1	14	KERN	-3.35
KOL14E1	14	KERN	-4.15
KOL14E2	14	KERN	-4.25
KOL14I1	14	KERN	-5.45
KOL14J1	14	KERN	-5.90
KOL14J3	14	KERN	-6.00
KOL14R1	14	KERN	-8.35
KOL14S2	14	KERN	-8.80
KOL14S4	14	KERN	-9.00
KOL14T2	14	KERN	-9.25
KOL14T4	14	KERN	-9.40
KOL14T6	14	KERN	-9.55
KOL14U1	14	KERN	-9.75
KOL14U3	14	KERN	-9.90
KOL14V2	14	KERN	-10.30
KOL14W1	14	KERN	-10.60
KOL14W3	14	KERN	-10.75
KOL14W5	14	KERN	-10.90
KOL14C2	14	KERN	-3.45
KOL14E3	14	KERN	-4.35
KOL14I2	14	KERN	-5.55
KOL14I3	14	KERN	-5.60
KOL14J2	14	KERN	-5.95
KOL14J4	14	KERN	-6.10
KOL14R2	14	KERN	-8.45
KOL14S1	14	KERN	-8.75
KOL14S3	14	KERN	-8.90
KOL14S5	14	KERN	-9.10
KOL14T1	14	KERN	-9.20
KOL14T3	14	KERN	-9.35
KOL14T5	14	KERN	-9.50
KOL14U2	14	KERN	-9.85
KOL14V1	14	KERN	-10.20
KOL14V3	14	KERN	-10.40
KOL14W2	14	KERN	-10.65
KOL14W4	14	KERN	-10.85

### Druksterkte:

De kolomnummers KOL14C1, KOL14E1, KOL14E2 en KOL14I1 zijn niet representatief omdat deze cilinders uit het bodemgedeelte zijn gehaald waar obstakels in de vorm van puin aanwezig zijn geweest.

Monster	Druksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL14J1	10,20	-2,25	5,0625
KOL14J3	14,45	+2,00	4,0000
KOL14R1	15,30	+2,85	8,1225
KOL14S2	11,90	-0,55	0,3025
KOL14S4	12,75	+0,30	0,0900
KOL14T2	11,05	-1,40	1,9600
KOL14T4	11,90	-0,55	0,3025
KOL14T6	15,30	+2,85	8,1225
KOL14U1	11,05	-1,40	1,9600
KOL14U3	12,75	+0,30	0,0900
KOL14V2	12,75	+0,30	0,0900
KOL14W1	11,90	-0,55	0,3025
KOL14W3	12,75	+0,30	0,0900
KOL14W5	10,20	-2,25	5,0625
Σ	174,25		35,5575

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 174,25/14 = 12,45 \text{ N/mm}^2$   
 Variantie :  $S^2 = 35,5575/(14-1) = 2,7352$   
 Standaardafwijking :  $S = 1,65 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92  
 Factor voor éénassige spanningstoestand: 0,85  
 Materiaalfactor: 1,2

De rekenwaarde voor de druksterkte kan zodoende worden bepaald op:  
 $0,92 \cdot 0,85 \cdot (12,45 - 1,53 \cdot 1,65) / 1,2 = 6,5 \text{ N/mm}^2$   
 Dit is ruimschoots voldoende.





**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Treksterkte:**

De kolomnummers KOL14C2, KOL14E3, KOL14I2 en KOL14I3 zijn niet representatief omdat deze cilinders uit het bodemgedeelte zijn gehaald waar obstakels in de vorm van puin aanwezig zijn geweest.

Monster	Treksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL14J2	1,19	-0,46	0,2116
KOL14J4	0,90	-0,75	0,5625
KOL14R2	1,99	+0,34	0,1156
KOL14S1	1,51	-0,14	0,0196
KOL14S3	0,91	-0,74	0,5476
KOL14S5	2,30	+0,65	0,4225
KOL14T1	1,48	-0,17	0,0289
KOL14T3	2,03	+0,38	0,1444
KOL14T5	2,39	+0,74	0,5476
KOL14U2	1,62	-0,03	0,0009
KOL14V1	1,54	-0,11	0,0121
KOL14V3	1,62	-0,03	0,0009
KOL14W2	1,83	+0,18	0,0324
KOL14W4	1,75	+0,10	0,0100
Σ	23,06		2,6566

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 23,06/14 = 1,65 \text{ N/mm}^2$

Variantie :  $S^2 = 2,6566/(14-1) = 0,2044$

Standaardafwijking :  $S = 0,45 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92

Factor voor éénassige spanningstoestand: n.v.t.

Materiaalfactor: 1,4

De rekenwaarde voor de treksterkte kan zodoende worden bepaald op:

$0,92 \cdot (1,65 - 1,53 \cdot 0,45) / 1,4 = 0,63 \text{ N/mm}^2$

Dit is ruimschoots voldoende.

**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Elasticiteitsmodulus:**

De kolomnummers KOL14C1, KOL14E1, KOL14E2 en KOL14I1 zijn niet representatief omdat deze cilinders uit het bodemgedeelte zijn gehaald waar obstakels in de vorm van puin aanwezig zijn geweest. De waarde van kolomnummer KOL14J1 is ook niet meegenomen vanwege de zeer sterk afwijkende waarde.

Monster	E-modulus X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL14J3	2991	+507	257049
KOL14R1	2449	-35	1225
KOL14S2	2501	+17	289
KOL14S4	2868	+384	147456
KOL14T2	2281	-203	41209
KOL14T4	2037	-447	199809
KOL14T6	2967	+483	233289
KOL14U1	2114	-370	136900
KOL14U3	2670	+186	34596
KOL14V2	2620	+136	18496
KOL14W1	2024	-460	211600
KOL14W3	2664	+180	32400
KOL14W5	2112	-372	138384
Σ	32298		1452702

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 32298/13 = 2484 \text{ N/mm}^2$

Variantie :  $S^2 = 1452702/(13-1) = 121059$

Standaardafwijking :  $S = 348 \text{ N/mm}^2$



## KFD

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

### Volumieke massa:

De kolomnummers KOL14C1, KOL14E1, KOL14E2 en KOL14I1 zijn niet representatief omdat deze cilinders uit het bodemgedeelte zijn gehaald waar obstakels in de vorm van puin aanwezig zijn geweest. De waarde van kolomnummer KOL14J3 is ook niet meegenomen vanwege de zeer sterk afwijkende waarde.

Monster	Vol. massa X [kg/m <sup>3</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL14J1	1981	-98	9604
KOL14R1	2140	+61	3721
KOL14S2	2079	0	0
KOL14S4	2126	+47	2209
KOL14T2	2083	+4	16
KOL14T4	2082	+3	9
KOL14T6	2104	+25	625
KOL14U1	2074	-5	25
KOL14U3	2072	-7	49
KOL14V2	2054	-25	625
KOL14W1	2097	+18	324
KOL14W3	2074	-5	25
KOL14W5	2066	-13	169
Σ	27032		17401

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 27032/13 = 2079 \text{ kg/m}^3$

Variantie :  $S^2 = 17401/(13-1) = 1450$

Standaardafwijking :  $S = 38 \text{ kg/m}^3$



## Verticale kernboring kolom 19/20

### Verklaring monstercode

Resultaten een-axiale drukproeven en indirecte trekproeven.

code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
KOL19AA1	19/20	KERN	-9.10
KOL19AA3	19/20	KERN	-9.30
KOL19BB1	19/20	KERN	-9.40
KOL19BB2	19/20	KERN	-9.50
KOL19CC1	19/20	KERN	-9.90
KOL19CC3	19/20	KERN	-10.10
KOL19D1	19/20	KERN	-3.60
KOL19E1	19/20	KERN	-4.00
KOL19EE1	19/20	KERN	-10.40
KOL19F1	19/20	KERN	-4.30
KOL19FF2	19/20	KERN	-10.60
KOL19G1	19/20	KERN	-4.50
KOL19GG2	19/20	KERN	-10.90
KOL19X1	19/20	KERN	-8.10
KOL19Y2	19/20	KERN	-8.60
KOL19Y3	19/20	KERN	-8.70
KOL19Z1	19/20	KERN	-8.90
KOL19AA2	19/20	KERN	-9.20
KOL19AA4	19/20	KERN	-9.35
KOL19BB3	19/20	KERN	-9.60
KOL19CC2	19/20	KERN	-10.00
KOL19D2	19/20	KERN	-3.70
KOL19DD1	19/20	KERN	-10.30
KOL19E2	19/20	KERN	-4.10
KOL19EE2	19/20	KERN	-10.50
KOL19FF1	19/20	KERN	-10.55
KOL19F2	19/20	KERN	-4.40
KOL19FF3	19/20	KERN	-10.70
KOL19GG1	19/20	KERN	-10.80
KOL19G2	19/20	KERN	-4.60
KOL19W1	19/20	KERN	-7.90
KOL19Y2	19/20	KERN	-8.60
KOL19Y4	19/20	KERN	-8.80
KOL19Z2	19/20	KERN	-9.00

### Druksterkte:

Monster	Druksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL19AA1	11,05	-0,52	0,2704
KOL19AA3	11,90	+0,33	0,1089
KOL19BB1	13,60	+2,03	4,1209
KOL19BB2	11,90	+0,33	0,1089
KOL19CC1	13,60	+2,03	4,1209
KOL19CC3	13,60	+2,03	4,1209
KOL19D1	9,35	-2,22	4,9284
KOL19E1	7,99	-3,58	12,8164
KOL19EE1	12,75	+1,18	1,3924
KOL19F1	8,50	-3,07	9,4249
KOL19FF2	15,30	+3,73	13,9129
KOL19G1	9,35	-2,22	4,9284
KOL19GG2	15,30	+3,73	13,9129
KOL19X1	10,20	-1,37	1,8769
KOL19Y2	11,05	-0,52	0,2704
KOL19Y3	10,20	-1,37	1,8769
KOL19Z1	11,05	-0,52	0,2704
Σ	169,69		78,4618

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 169,69/17 = 11,57 \text{ N/mm}^2$

Variante :  $S^2 = 78,4618/(17-1) = 4,9039$

Standaardafwijking :  $S = 2,21 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92

Factor voor éénassige spanningstoestand: 0,85

Materialfactor: 1,2

De rekenwaarde voor de druksterkte kan zodoende worden bepaald op:

$0,92 \cdot 0,85 \cdot (11,57 - 1,53 \cdot 2,21) / 1,2 = 5,4 \text{ N/mm}^2$

Dit is ruimschoots voldoende.



**Treksterkte:**

Monster	Treksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL19AA2	1,74	-0,03	0,0009
KOL19AA4	1,83	+0,06	0,0036
KOL19BB3	2,07	+0,30	0,0900
KOL19CC2	1,93	+0,16	0,0256
KOL19D2	1,44	-0,33	0,1089
KOL19DD1	1,83	+0,06	0,0036
KOL19E2	1,50	-0,27	0,0729
KOL19EE2	2,08	+0,31	0,0961
KOL19FF1	1,82	+0,05	0,0025
KOL19F2	1,57	-0,20	0,0400
KOL19FF3	1,74	-0,03	0,0009
KOL19GG1	1,74	-0,03	0,0009
KOL19G2	1,54	-0,23	0,0529
KOL19W1	1,86	+0,09	0,0081
KOL19Y2	1,97	+0,20	0,0400
KOL19Y4	1,63	-0,14	0,0196
KOL19Z2	1,83	+0,06	0,0036
<b>Σ</b>	<b>30,12</b>		<b>0,5701</b>

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 30,12/17 = 1,77 \text{ N/mm}^2$   
 Variantie :  $S^2 = 0,5701/(17-1) = 0,03563$   
 Standaardafwijking :  $S = 0,189 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92  
 Factor voor éénassige spanningstoestand: n.v.t.  
 Materiaalfactor: 1,4

De rekenwaarde voor de treksterkte kan zodoende worden bepaald op:  
 $0,92 \cdot (1,77 - 1,53 \cdot 0,189) / 1,4 = 0,97 \text{ N/mm}^2$   
 Dit is ruimschoots voldoende.



**Elasticiteitsmodulus:**

Monster	E-modulus X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL19AA1	2907	-197	38809
KOL19AA3	3494	+390	152100
KOL19BB1	3523	+419	175561
KOL19BB2	2888	-216	46656
KOL19CC1	3892	+788	620944
KOL19CC3	3919	+815	664225
KOL19D1	2469	-635	403225
KOL19E1	2331	-773	597529
KOL19EE1	3208	+104	10816
KOL19F1	2486	-618	381924
KOL19FF2	4959	+1855	3441025
KOL19G1	2772	-332	110224
KOL19GG2	3028	-76	5776
KOL19X1	2944	-160	25600
KOL19Y2	2824	-278	77284
KOL19Y3	2874	-230	52900
KOL19Z1	2243	-861	741321
<b>Σ</b>	<b>52761</b>		<b>7545919</b>

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 52761/17 = 3104 \text{ N/mm}^2$   
 Variantie :  $S^2 = 7545919/(17-1) = 471620$   
 Standaardafwijking :  $S = 687 \text{ N/mm}^2$



**KFD**Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof**Volumieke massa:**

Monster	Vol. massa X [kg/m <sup>3</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL19AA1	1986	-35	1225
KOL19AA3	1989	-32	1024
KOL19BB1	2025	+4	16
KOL19BB2	2035	+14	196
KOL19CC1	2065	+44	1936
KOL19CC3	2061	+40	1600
KOL19D1	2005	-16	256
KOL19E1	2000	-21	441
KOL19EE1	2067	+46	2116
KOL19F1	2006	-15	225
KOL19FF2	2091	+70	4900
KOL19G1	1978	-43	1849
KOL19GG2	2090	+69	4761
KOL19X1	2007	-14	196
KOL19Y2	1984	-37	1369
KOL19Y3	1984	-37	1369
KOL19Z1	1979	-42	1764
Σ	34352		25243

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 34352/17 = 2021 \text{ kg/m}^3$ Variantie :  $S^2 = 25243/(17-1) = 1578$ Standaardafwijking :  $S = 40 \text{ kg/m}^3$ 

## Verticale kernboring kolom 24/25/28

### Verklaring monstercode

Resultaten een-axiale drukproeven en indirecte trekproeven.

code	kolomnr.	type	diepte tov NAP [m]
KOL24B1	24/25/28	KERN	-3.25
KOL24B3	24/25/28	KERN	-3.40
KOL24B5	24/25/28	KERN	-3.55
KOL24B7	24/25/28	KERN	-3.70
KOL24B9	24/25/28	KERN	-3.85
KOL24B11	24/25/28	KERN	-4.00
KOL24E3	24/25/28	KERN	-4.85
KOL24E5	24/25/28	KERN	-4.95
KOL24F1	24/25/28	KERN	-5.05
KOL24F3	24/25/28	KERN	-5.20
KOL24F5	24/25/28	KERN	-5.35
KOL24F7	24/25/28	KERN	-5.50
KOL24H1	24/25/28	KERN	-5.85
KOL24I1	24/25/28	KERN	-6.10
KOL24J1	24/25/28	KERN	-6.20
KOL24K1	24/25/28	KERN	-6.40
KOL24K3	24/25/28	KERN	-6.55
KOL24K6	24/25/28	KERN	-6.80
KOL24B2	24/25/28	KERN	-3.30
KOL24B4	24/25/28	KERN	-3.45
KOL24B6	24/25/28	KERN	-3.65
KOL24B8	24/25/28	KERN	-3.75
KOL24B10	24/25/28	KERN	-3.90
KOL24B12	24/25/28	KERN	-4.10
KOL24C1	24/25/28	KERN	-4.20
KOL24E1	24/25/28	KERN	-4.60
KOL24E2	24/25/28	KERN	-4.70
KOL24E4	24/25/28	KERN	-4.90
KOL24F2	24/25/28	KERN	-5.10
KOL24F4	24/25/28	KERN	-5.30
KOL24F6	24/25/28	KERN	-5.40
KOL24J2	24/25/28	KERN	-6.30
KOL24J3	24/25/28	KERN	-6.45
KOL24K2	24/25/28	KERN	-6.50
KOL24K4	24/25/28	KERN	-6.60
KOL24K5	24/25/28	KERN	-6.70
KOL24K7	24/25/28	KERN	-6.85

### Druksterkte:

De kolomnummers KOL24E5 en KOL24I1 zijn niet representatief en worden niet in de berekening meegenomen.

Monster	Druksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL24B1	7,57	-2,17	4,71
KOL24B3	9,35	-0,39	0,15
KOL24B5	8,50	-1,24	1,54
KOL24B7	6,89	-2,85	8,12
KOL24B9	10,20	+0,46	0,21
KOL24B11	11,05	+1,31	1,72
KOL24E3	6,29	-3,45	11,90
KOL24F1	8,50	-1,24	1,54
KOL24F3	9,35	-0,39	0,15
KOL24F5	10,20	+0,46	0,21
KOL24F7	8,42	-1,32	1,74
KOL24H1	14,45	+4,71	22,18
KOL24J1	10,20	+0,46	0,15
KOL24K1	13,60	+3,86	14,90
KOL24K3	11,05	+1,31	1,72
KOL24K6	10,20	+0,46	0,21
Σ	155,82		71,16

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 155,82/16 = 9,74 \text{ N/mm}^2$

Variantie :  $S^2 = 71,16/(16-1) = 4,74$

Standaardafwijking :  $S = 2,18 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92

Factor voor éénassige spanningstoestand: 0,85

Materiaalfactor: 1,2

De rekenwaarde voor de druksterkte kan zodoende worden bepaald op:  
 $0,92 \cdot 0,85 \cdot (9,74 - 1,53 \cdot 2,18) / 1,2 = 4,2 \text{ N/mm}^2$



**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Treksterkte:**

De kolomnummers KOL24C1 en KOL24E4 zijn niet representatief en worden niet in de berekening meegenomen.

Monster	Treksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL24B2	1,43	0	0
KOL24B4	1,24	-0,19	0,0361
KOL24B6	1,24	-0,19	0,0361
KOL24B8	0,80	-0,63	0,3969
KOL24B10	1,66	+0,23	0,0529
KOL24B12	1,92	+0,49	0,2401
KOL24E1	1,28	-0,15	0,0225
KOL24E2	1,24	-0,19	0,0361
KOL24F2	1,37	-0,06	0,0036
KOL24F4	1,56	+0,13	0,0169
KOL24F6	1,23	-0,20	0,04
KOL24J2	1,64	+0,21	0,0441
KOL24J3	1,14	-0,29	0,0841
KOL24K2	1,93	+0,50	0,25
KOL24K4	1,52	+0,09	0,0081
KOL24K5	1,51	+0,08	0,0064
KOL24K7	1,63	+0,20	0,04
<b>Σ</b>	<b>24,34</b>		<b>1,3139</b>

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 24,34/17 = 1,43 \text{ N/mm}^2$   
 Variantie :  $S^2 = 1,3139/(17-1) = 0,0821$   
 Standaardafwijking :  $S = 0,287 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92

Factor voor éénassige spanningstoestand: n.v.t.

Materiaalfactor: 1,4

De rekenwaarde voor de treksterkte kan zodoende worden bepaald op:  
 $0,92 \cdot (1,43 - 1,53 \cdot 0,287) / 1,4 = 0,65 \text{ N/mm}^2$

**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Elasticiteitsmodulus:**

De kolomnummers KOL24E5, KOL24H1 en KOL24I1 zijn niet representatief en worden niet in de berekening meegenomen.

Monster	E-modulus X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL24B1	1394	-938	879844
KOL24B3	2728	+396	156816
KOL24B5	2249	-83	6889
KOL24B7	1946	-386	148996
KOL24B9	2482	+150	22500
KOL24B11	3196	+864	746496
KOL24E3	1512	-820	672400
KOL24F1	1854	-478	228484
KOL24F3	2541	+209	43681
KOL24F5	2208	-124	15376
KOL24F7	2245	-87	7569
KOL24J1	2501	+169	28561
KOL24K1	3021	+689	474721
KOL24K3	2538	+206	42436
KOL24K6	2562	+230	52900
<b>Σ</b>	<b>34977</b>		<b>3527669</b>

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 34977/15 = 2332 \text{ N/mm}^2$   
 Variantie :  $S^2 = 3527669/(15-1) = 251976$   
 Standaardafwijking :  $S = 502 \text{ N/mm}^2$



# KFD

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

## Volumieke massa:

Monster	Vol. massa X [kg/m <sup>3</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL24B1	2003	-54	2916
KOL24B3	2005	-52	2704
KOL24B5	2011	-46	2116
KOL24B7	2027	-30	900
KOL24B9	2033	-24	576
KOL24B11	2058	+1	1
KOL24E3	2086	+29	841
KOL24E5	2182	+25	625
KOL24F1	2003	-54	2916
KOL24F3	2039	-18	324
KOL24F5	2026	-31	961
KOL24F7	2016	-41	1681
KOL24H1	2113	+56	3136
KOL24I1	2177	+120	14400
KOL24J1	2061	+4	16
KOL24K1	2060	+3	9
KOL24K3	2067	+10	100
KOL24K6	2066	+9	81
Σ	37033		34303

Gemiddelde afwijking :  $X_{\text{gem}} = 37033/18 = 2057 \text{ kg/m}^3$

Variantie :  $S^2 = 34303/(18-1) = 2018$

Standaardafwijking :  $S = 45 \text{ kg/m}^3$





**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Horizontale kernboring kolom 20**

## Verklaring monstercode

Resultaten een-axiale drukproeven en indirecte drukproeven.

code	kolomnr.	type	diepte
KOL20C1	20	KERN	1.20 HOR
KOL20C3	20	KERN	1.40 HOR
KOL20E1	20	KERN	1.80 HOR
KOL20E3	20	KERN	2.00 HOR
KOL20E5	20	KERN	2.20 HOR
KOL20E7	20	KERN	2.35 HOR
KOL20I1	20	KERN	2.45 HOR
KOL20I3	20	KERN	2.65 HOR
KOL20J2	20	KERN	3.75 HOR
KOL20K1	20	KERN	3.85 HOR
KOL20K3	20	KERN	3.95 HOR
KOL20C2	20	KERN	1.30 HOR
KOL20C4	20	KERN	1.50 HOR
KOL20D1	20	KERN	1.70 HOR
KOL20E2	20	KERN	1.90 HOR
KOL20E4	20	KERN	2.10 HOR
KOL20E6	20	KERN	2.30 HOR
KOL20I2	20	KERN	2.55 HOR
KOL20I4	20	KERN	2.75 HOR
KOL20I6	20	KERN	2.85 HOR
KOL20J1	20	KERN	3.65 HOR
KOL20J3	20	KERN	3.80 HOR
KOL20K2	20	KERN	3.90 HOR

zie ook bijgevoegde tekening boring

**KFD**

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

**Druksterkte:**

Monster	Druksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL20C1	11,05	+0,92	0,8464
KOL20C3	13,60	+3,47	12,0409
KOL20E1	8,08	-2,05	4,2025
KOL20E3	9,35	-0,78	0,6084
KOL20E5	8,50	-1,63	2,6569
KOL20E7	7,31	-2,82	7,9524
KOL20I1	9,35	-0,78	0,6084
KOL20I3	8,50	-1,63	2,6569
KOL20J2	11,05	+0,92	0,8464
KOL20K1	11,90	+1,77	3,1329
KOL20K3	12,75	+2,62	6,8644
Σ	111,44		42,4165

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 111,44/11 = 10,13 \text{ N/mm}^2$

Variantie :  $S^2 = 42,4165/(11-1) = 4,2417$

Standaardafwijking :  $S = 2,06 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92

Factor voor éénassige spanningstoestand: 0,85

Materiaalfactor: 1,2

De rekenwaarde voor de druksterkte kan zodoende worden bepaald op:

$0,92 \cdot 0,85 \cdot (10,13 - 1,53 \cdot 2,06) / 1,2 = 4,55 \text{ N/mm}^2$

Dit is voldoende.



Treksterkte:

Monster	Treksterkte X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL20C2	2,35	+0,46	0,2116
KOL20C4	2,21	+0,32	0,1024
KOL20D1	3,31	+1,41	1,9881
KOL20E2	1,48	-0,41	0,1681
KOL20E4	1,76	-0,13	0,0169
KOL20E6	1,43	-0,46	0,2116
KOL20I2	1,43	-0,46	0,2116
KOL20I4	1,26	-0,63	0,3969
KOL20I6	1,82	-0,07	0,0049
KOL20J1	1,95	+0,06	0,0036
KOL20J3	1,69	-0,20	0,0400
KOL20K2	2,03	+0,14	0,0196
Σ	22,72		3,3753

Gemiddelde waarde :  $X_{gem} = 22,72/12 = 1,89 \text{ N/mm}^2$   
 Variantie :  $S^2 = 3,3753/(12-1) = 0,3068$   
 Standaardafwijking :  $S = 0,55 \text{ N/mm}^2$

Factor voor langeduursterkte: 0,92  
 Factor voor éénassige spanningstoestand: n.v.t.  
 Materiaalfactor: 1,4

De rekenwaarde voor de treksterkte kan zodoende worden bepaald op:  
 $0,92 \cdot (1,89 - 1,53 \cdot 0,55) / 1,4 = 0,69 \text{ N/mm}^2$   
 Dit is ruimschoots voldoende.

Elasticiteitsmodulus:

Monster	E-modulus X [N/mm <sup>2</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL20C1	3364	+709	502681
KOL20C3	3265	+610	372100
KOL20E1	2240	-415	172225
KOL20E3	2076	-579	335241
KOL20E5	2345	-310	96100
KOL20E7	1730	-925	855625
KOL20I1	2417	-238	56644
KOL20I3	2345	-310	96100
KOL20J2	3253	+598	357604
KOL20K1	2795	+140	19600
KOL20K3	3370	+715	511225
Σ	29200		3375145

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 29200/11 = 2655 \text{ N/mm}^2$   
 Variantie :  $S^2 = 3375145/(11-1) = 337515$   
 Standaardafwijking :  $S = 581 \text{ N/mm}^2$

# KFD

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

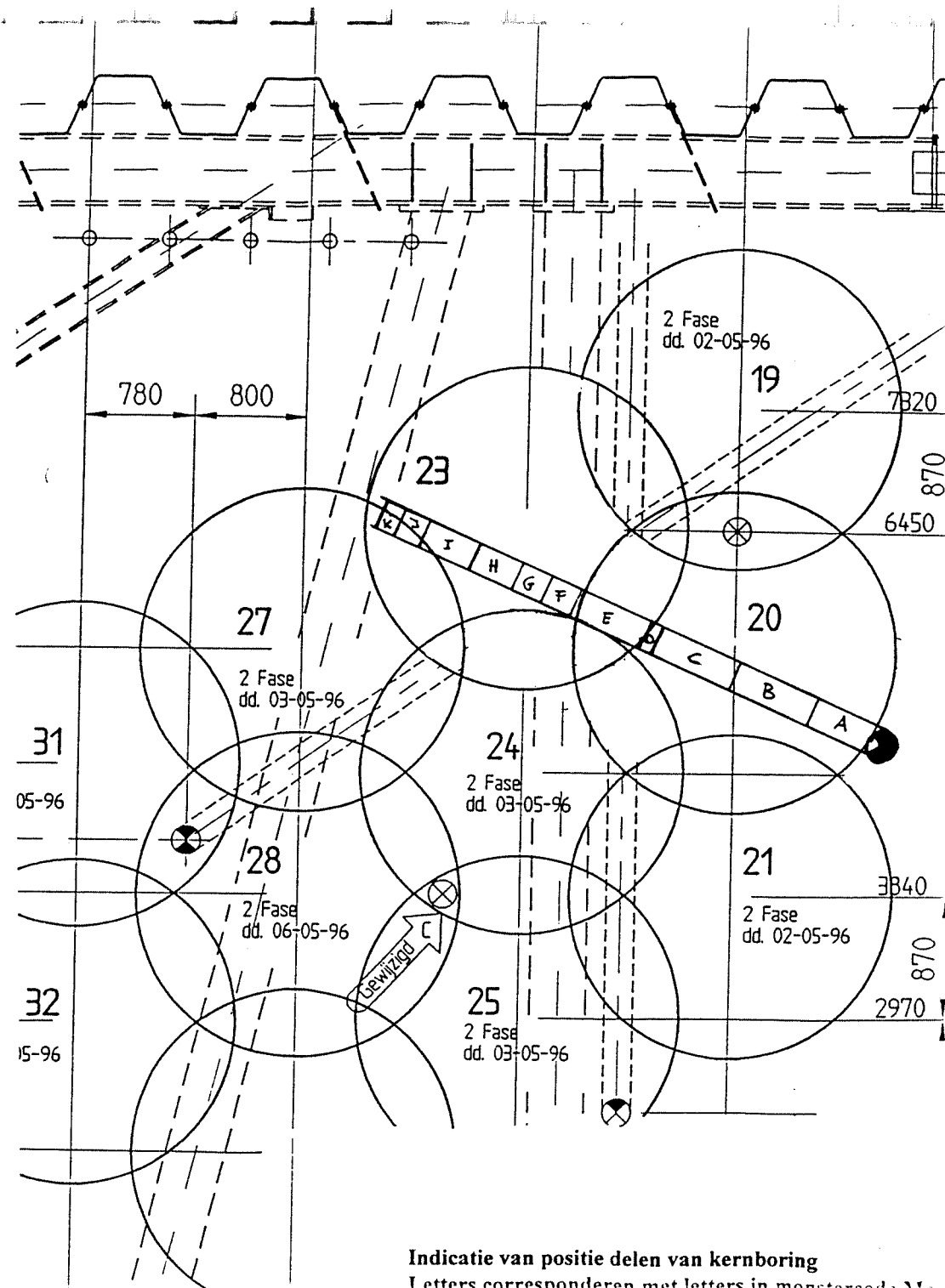
## Volumieke massa:

Monster	Vol. massa X [kg/m <sup>3</sup> ]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
KOL20C1	2026	+6	36
KOL20C3	2031	+11	121
KOL20E1	1995	-25	225
KOL20E3	2013	-7	49
KOL20E5	2008	-12	144
KOL20E7	1992	-28	784
KOL20I1	2024	+4	16
KOL20I3	2019	-1	1
KOL20J2	2018	-2	4
KOL20K1	2048	+28	784
KOL20K3	2045	+25	225
Σ	22219		2389

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 22219/11 = 2020 \text{ kg/m}^3$

Variance :  $S^2 = 2389/(11-1) = 239$

Standaardafwijking :  $S = 15 \text{ kg/m}^3$



Indicatie van positie delen van kernboring

Letters corresponderen met letters in monstercode: M



## **II.7: Berekening kans op falen overlappingsgebied**

## 2. ONDERBOUWING JETGROUSTRASTER

### Uitgangspunt:

Voor de rasterafstand is uitgegaan van een tolerantie van  $2 \cdot 0,10$  m, conform het bestek. De diameter van de kolommen is vastgesteld op 2,30 m. Dat betekent een rasterafstand van  $\frac{1}{2} \sqrt{3} \cdot (2,30 - 2 \cdot 0,10) = 1,82$  m.

### Onderbouwing:

#### **Globale resultaten:**

De jetgroutproeven geven globaal de volgende resultaten:

- het 3 fasen systeem geeft te lage druksterkten;
- het 3 fasen plus systeem geeft druksterkten die voldoen aan de bestekseisen, doch de diameters zijn aanzienlijk kleiner en de hoeveelheid verbruikte cement is veel groter;
- het 2 fasen systeem geeft druksterkten die voldoen aan de bestekseisen en geeft bovendien acceptabele kolomdiameters.

Op grond van bovenstaande bevindingen is gekozen voor het 2 fasen systeem met de jetgroutparameters die behoren bij kolom nr. 14 (tek. T-SGMK-KM-J-002 rev.C).



### **Afwijkingen:**

De afwijkingen die een tekortkoming in de overlapping van de jetgroutkolommen tot gevolg kunnen hebben, kunnen worden onderscheiden in:

- afwijking van de plaatsbepaling;
- afwijking van de helling;
- afwijking van de diameter;
- menselijke fouten.

### **Afwijkingen plaatsbepaling:**

Deze afwijkingen betreffen het verschil tussen het theoretisch middelpunt van de kolommen en de praktisch gemeten waarde. De afwijkingen kunnen ontstaan door uitzetfouten, een misplaatsing van het boorapparaat, enz.

Kolom	Afwijking X [mm]	$X - X_{\text{gem}}$	$(X - X_{\text{gem}})^2$
5	60	+22	484
10a	20	-18	324
11	20	-18	324
14	30	-8	64
16b	60	+22	484
$\Sigma$	190		1680

Gemiddelde afwijking :  $X_{\text{gem}} = 190/5 = 38$  mm

Variantie :  $S^2 = 1680/(5-1) = 420$

Standaardafwijking :  $S = 20$  mm



**Afwijkingen hellingmetingen:**

Deze afwijkingen betreffen het verschil in afstand tussen het theoretisch en praktisch middelpunt op diepte als gevolg van afwijkingen in de helling van de boorbuis. Als diepte is aangehouden NAP -16,50 m. De resultaten van de hellingmetingen zijn opgenomen in documentnr. 227, 'Overzicht uitvoeringsparameters jetgroutproeven t.b.v. tramtunnel Den Haag'.

Kolom	Afwijking X [mm]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
2	54	+ 4	16
3	61	+11	121
7	70	+20	400
11	29	-21	441
12	4	-46	2116
13	50	0	0
33	64	+14	196
34	65	+15	225
35	50	0	0
Σ	447		3515

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 447/9 = 50$  mm

Variantie :  $S^2 = 3515/(9-1) = 439$

Standaardafwijking :  $S = 21$  mm



**Afwijkingen diameter:**

De afwijkingen van de diameter kunnen ontstaan door verschillen in grondlagen. Aan de bovenzijde van de jetgroutkolommen zijn verstoringen ontstaan door aanwezig puin in de bovenste laag van de bodem. De resultaten van de diameterbepaling van kolomnummer 14 zijn opgenomen in documentnr. 227, 'Overzicht uitvoeringsparameters jetgroutproeven t.b.v. tramtunnel Den Haag'.

NAP	Afwijking X [m]	X-X <sub>gem</sub>	(X-X <sub>gem</sub> ) <sup>2</sup>
-6,0	2,37	+0,06	0,0036
-8,0	2,20	-0,11	0,0121
-9,0	2,42	+0,11	0,0121
-10,0	2,24	-0,07	0,0047
Σ	9,23		0,0327

Gemiddelde afwijking :  $X_{gem} = 9,23/4 = 2,31$  m

Variantie :  $S^2 = 0,0327/(4-1) = 0,0109$

Standaardafwijking :  $S = 0,104$  m



**3. KANS OP FALEN VAN HET OVERLAPPINGSGEBIED**

**Kans op falen van de overlapping van de jetgroutkolommen:**

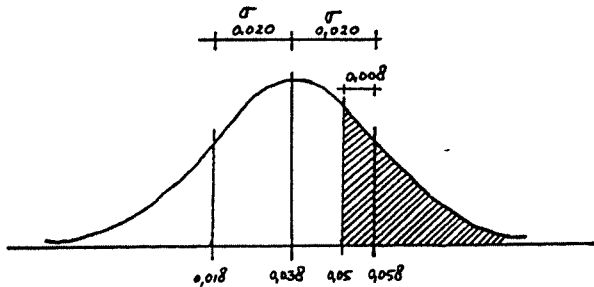
Indien de kolomdiameter is gereduceerd tot 2,10 m dan sluiten de drie aansluitende kolommen precies op elkaar aan zonder een overlap. Als wordt uitgegaan van de hiervoor berekende gemiddelden en standaardafwijkingen dan wordt de diameter:

$$2,31 - 0,104 - (0,050 + 0,021) - (0,038 + 0,020) = 2,077 \text{ m}$$

Dit is dus 0,023 m teveel. Indien voor de drie gebeurtenissen dit surplus (0,023/3=0,008) in mindering wordt gebracht, kan de bijbehorende kans worden berekend.

**Kans op overschrijding van de plaatsbepaling:**

$$u = (0,050 - 0,038) / 0,020 = 0,60 \rightarrow P = 0,2743$$



Omdat deze afwijking van de plaatsbepaling ook gunstig kan zijn, is gesteld dat over een hoek van maximaal 45° de afwijking ongunstig werkt voor zijn maximale waarde (veilige benadering). De bijbehorende kans is dan:

$$P = 45 / 360 = 0,125$$

$$\text{De totale kans is zodoende: } P = 0,2743 * 0,125 = 0,0343$$



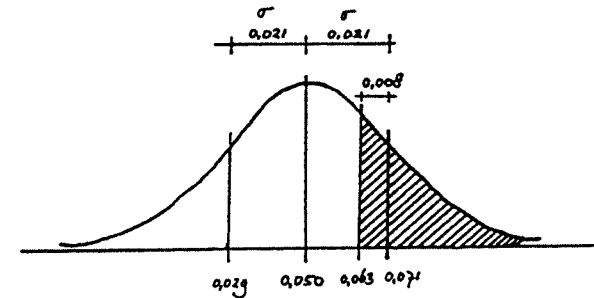
**Kans op overschrijding van de helling:**

$$u = (0,063 - 0,050) / 0,021 = 0,62 \rightarrow P = 0,2676$$

Omdat deze afwijking van de helling ook gunstig kan zijn, is gesteld dat over een hoek van maximaal 45° de afwijking ongunstig werkt voor zijn maximale waarde (veilige benadering). De bijbehorende kans is dan:

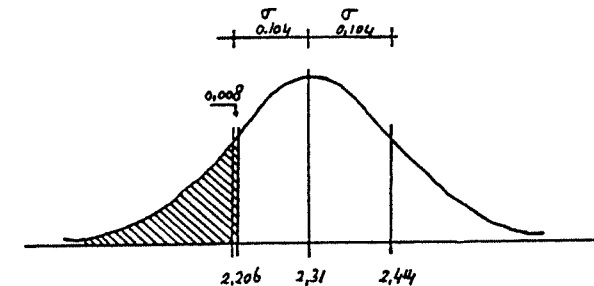
$$P = 45 / 360 = 0,125$$

$$\text{De totale kans is zodoende: } P = 0,2676 * 0,125 = 0,0335$$



**Kans op onderschrijding van de diameter:**

$$u = (2,31 - 2,214) / 0,104 = 0,92 \rightarrow P = 0,1788$$



**Kans op het optreden van een diameter van 2,10 m:**

Dit is de gezamenlijke kans van de hiervoor berekende gebeurtenissen:

$$P = 0,0343 * 0,0335 * 0,1788 = 205 * 10^{-6}$$



## KFD

Kombinatie  
Funderingstechnieken  
Den Haag vof

8

### **Kans op falen van de overlapping van de jetgroutkolommen:**

Dit is de kans op het gelijktijdig optreden van de hierboven berekende kans voor 3 kolommen:

$$P = (205 \cdot 10^{-6})^3 = 9 \cdot 10^{-12}$$

Indien er op dit werk in totaal 2000 overlapping moeten worden uitgevoerd, is de kans van optreden op het falen van de overlapping gelijk aan:

$$P = 9 \cdot 10^{-12} \cdot 2000 = 2 \cdot 10^{-8}$$

### **Gunstige invloeden:**

Bij bovenstaande kansberekening dienen nog de volgende aanvullende opmerkingen te worden gemaakt:

- uit de praktijkproef blijkt dat tussen de gemeten diameters op verschillende hoogten, de kolomdiameter groter is;
- uit de praktijkproef blijkt tevens dat de grond ter plaatse van de overlappende kolommen gemakkelijker wordt gegroot dan bij een allenstaande kolom.

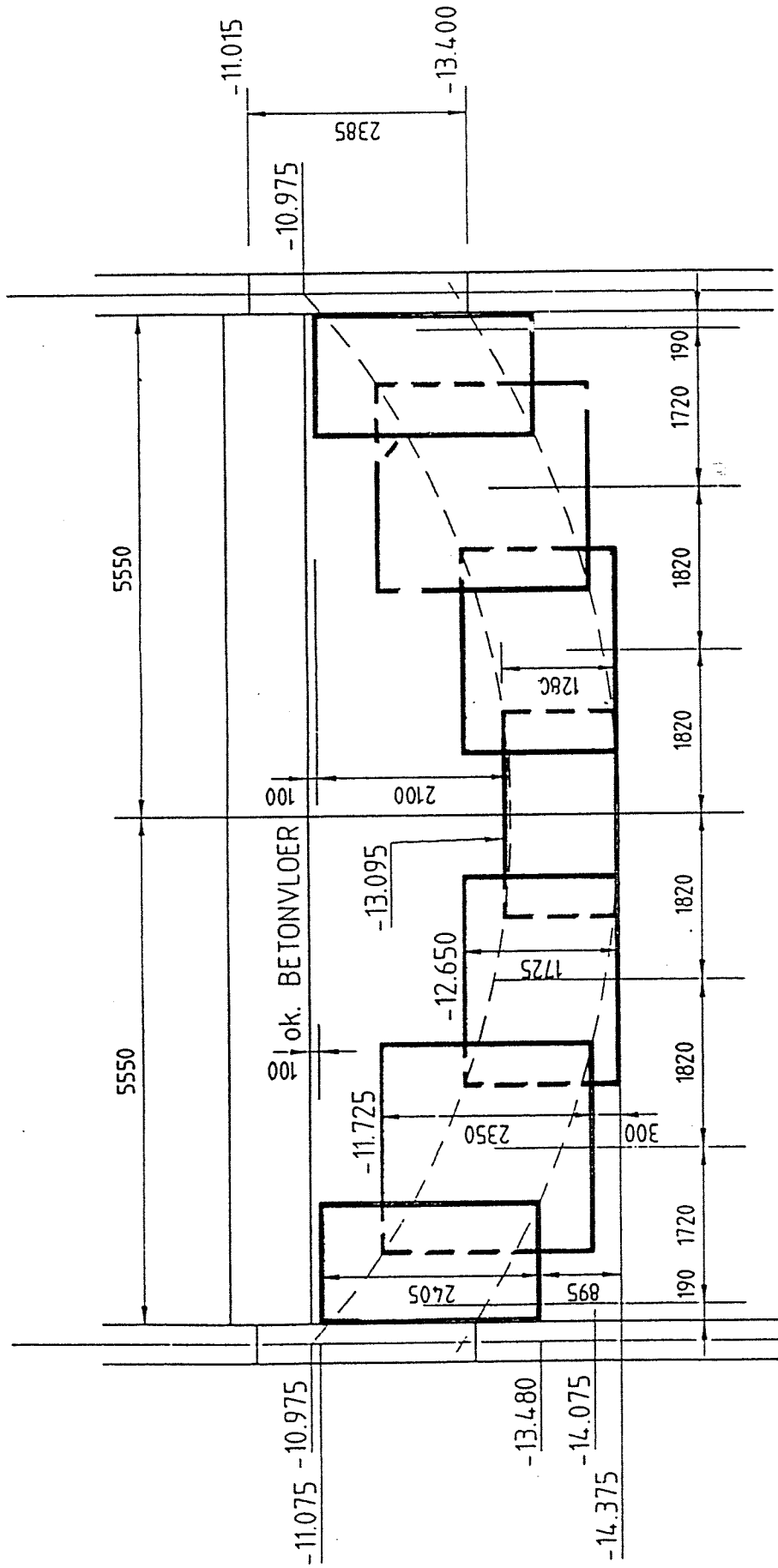
Deze praktijkbevindingen zullen een gunstige bijdrage leveren aan de kans van optreden van het falen van het overlappingsgebied.



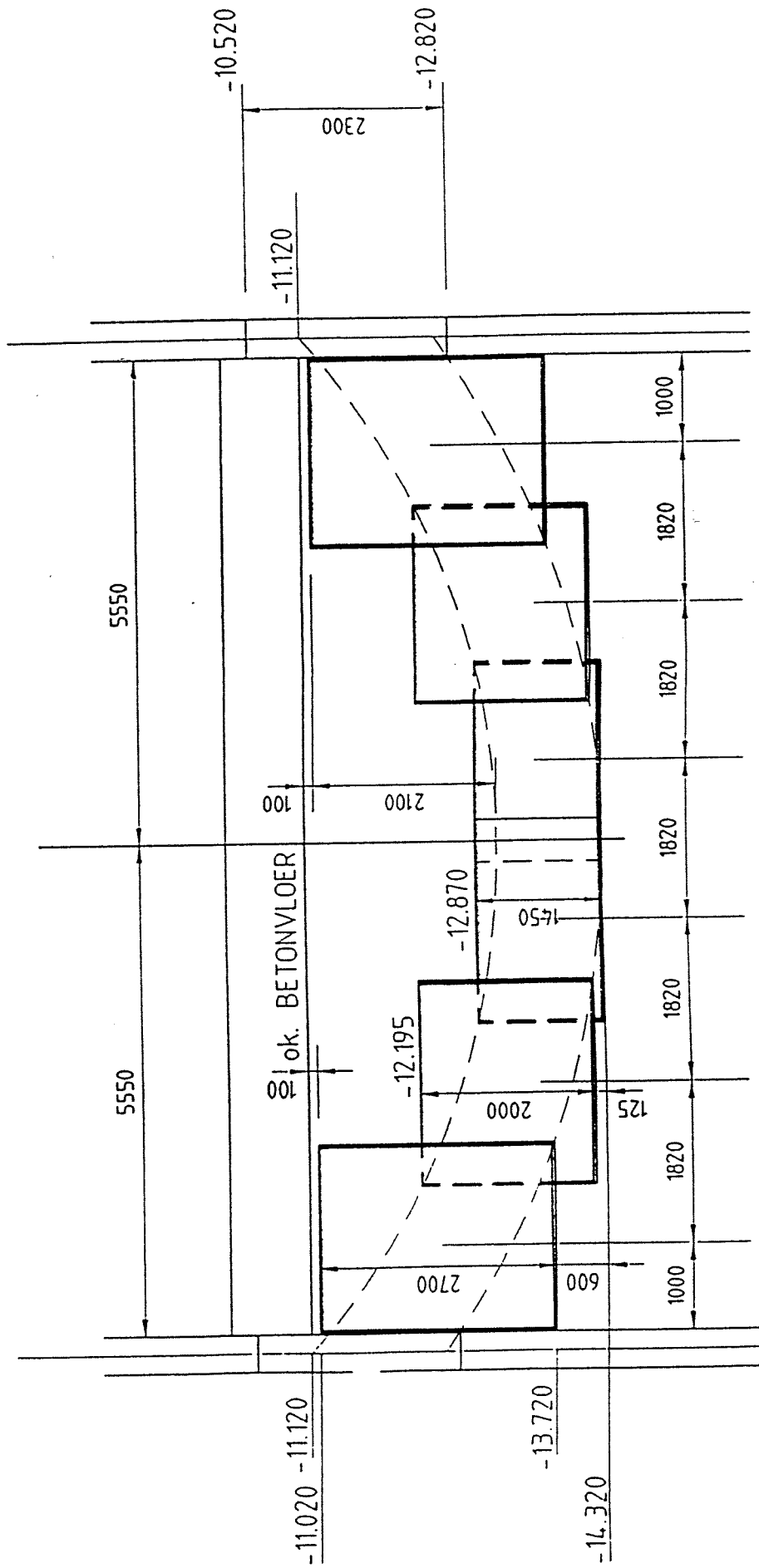


## **II.8: Tekeningen jetgroutwerk Kalvermarkt**



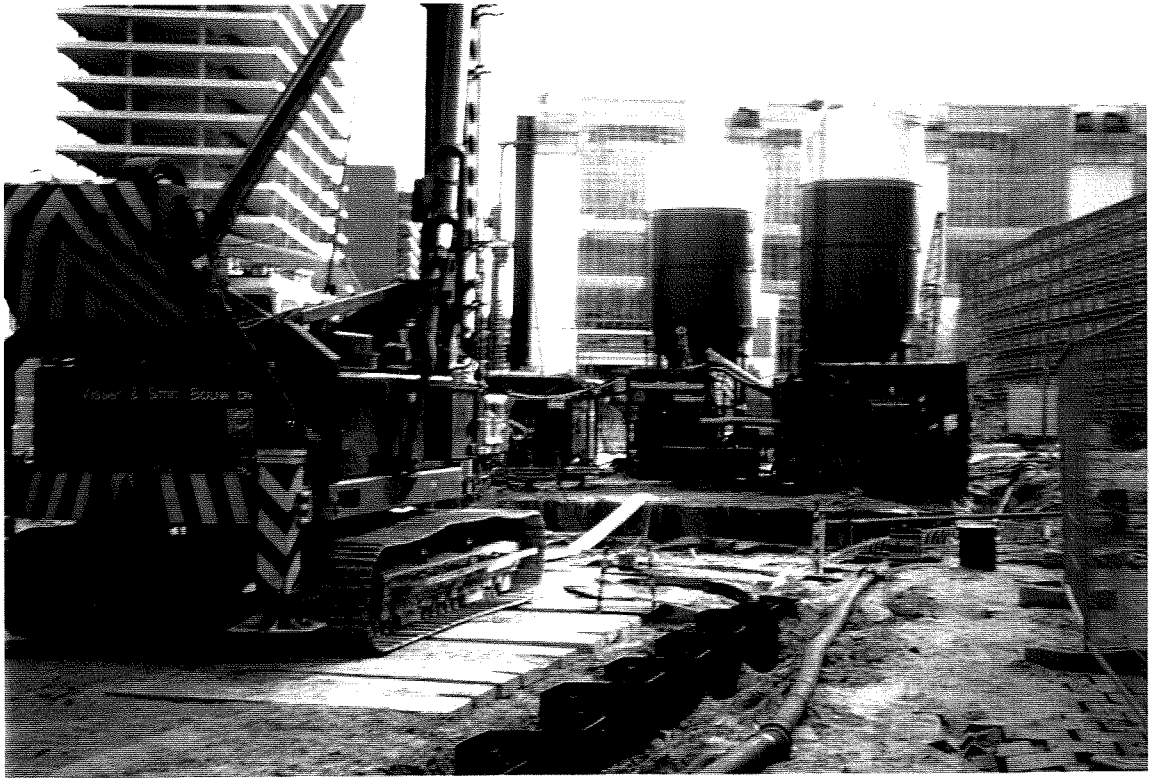


DOORSNEDE IIIa



## II.9: Foto's jetgroutproef

fotonr.	verklaring
1	Opstelling jetgroutproef Souterrain Den Haag met op de voorgrond boorstelling en op de achtergrond de jetgroutinstallatie;
2	Waterbak waarin monsters van retour- en kolomspoeling onder voorgeschreven condities zijn bewaard;
3	Steekapparaat voor het nemen van monsters uit de verse kolom. Klepje aan de onderzijde is door een ruk aan het touwtje te sluiten;
4	Spinapparaat (VSB) in uitgeklapte toestand voor het uitvoeren van diameterbepalingen aan de kolom;
5	Filterpers waarmee het cementgehalte geprobeerd is te bepalen;
6	Afpompen van de retourspoeling;
7	Overzicht van de proefput na ontgraving, met op de voorgrond kolom 16B, de foto is genomen vanaf het massief;
8	Kolom 14, de modelkolom voor het uitvoeren van de jetgroutwerkzaamheden in de Klavermarkt, na vrijgraven. Door puin is de diameter op enkele plaatsen aanmerkelijk groter dan het gemiddeld;
9	Bovenkant van het goed aanééngesloten massief na ontgraving. De kolommen zijn niet allemaal tot op dezelfde diepte gerealiseerd. Het hoogteverschil is bewust aangebracht;
10	De bovenkant van een overlap van een drietal kolommen. De kolommen zijn over elkaar heen gevloeid. De aansluiting was volledig;
11	Rechtsvoor kolom 11. I.v.m. puin of grind heeft de kolom een stekelig uiterlijk. Kolom 14 staat links van kolom 11;
12	Rechtsvoor kolom 10, een kleine 3 fasen kolom, zeer gelijkmatig van diameter;
13	De koppen van de kolommen zijn iets afgerond. De diameter is wel volledig op grootte op het niveau waar het jetgrouten is gestopt. Er vormt zich dus een hoedje;
14	Overzicht van de proefput na 5 meter ontgraven;
15	Kern uit kolom 14. Bij kernboren breken de kernen en worden ze in delen omhoog gehaald. De sterkte van deze kernen voldeed ruimschoots aan de gestelde eisen;
16	Kern van een schuine boring uit een overlap van 3 kolommen, In de kern is duidelijk de overgang tussen de kolommen te zien;
17	Kern van een schuine boring dwars door het massief, geen grote insluitingen van zand zijn gevonden;
18	Een kleine veeninsluiting in een kern, diameter kern circa 7 cm;
19	Het slopen en afvoeren van de kolommen geschiedde in delen;
20	Afvoeren kolom 9 (kleine 3 fasen kolom);
21	Diameter terugval bij een vette kleilaag. Onder en boven de terugval ontstaat een uitstulping t.o.v. de gemiddelde diameter;
22	Uitvoering jetgroutwerkzaamheden in de Kalvermarkt. Voor de stelling van Visser&Smit Bouw, in het midden de kleine stelling van Keller Grundbau. Daarachter de jetgroutcentrales. Rechts het nieuwe stadhuis van Den Haag;
23	Speciale jetgroutmachine van Keller Grundbau;
24	Met een stalen draad tussen de damwanden, is het hart van de verschillende kolommen aangegeven;
25	Voor een diameterbepaling wordt de spin ingezet;
26	Grondstop d.m.v. jetgrouten voor de bouw van het metrostation Wilhelminaplein te Rotterdam;
27	Jetgroutwerkzaamheden bij het Wilhelminaplein door Smet-Boring.



1



2



3







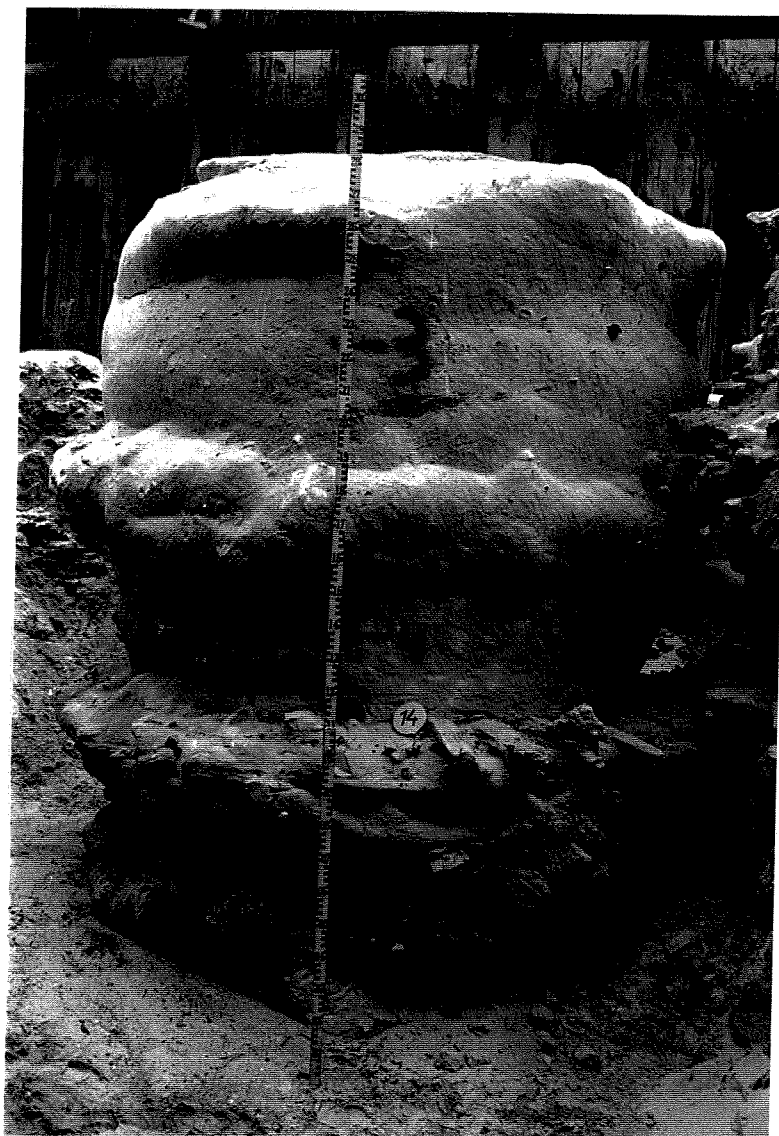
5



6



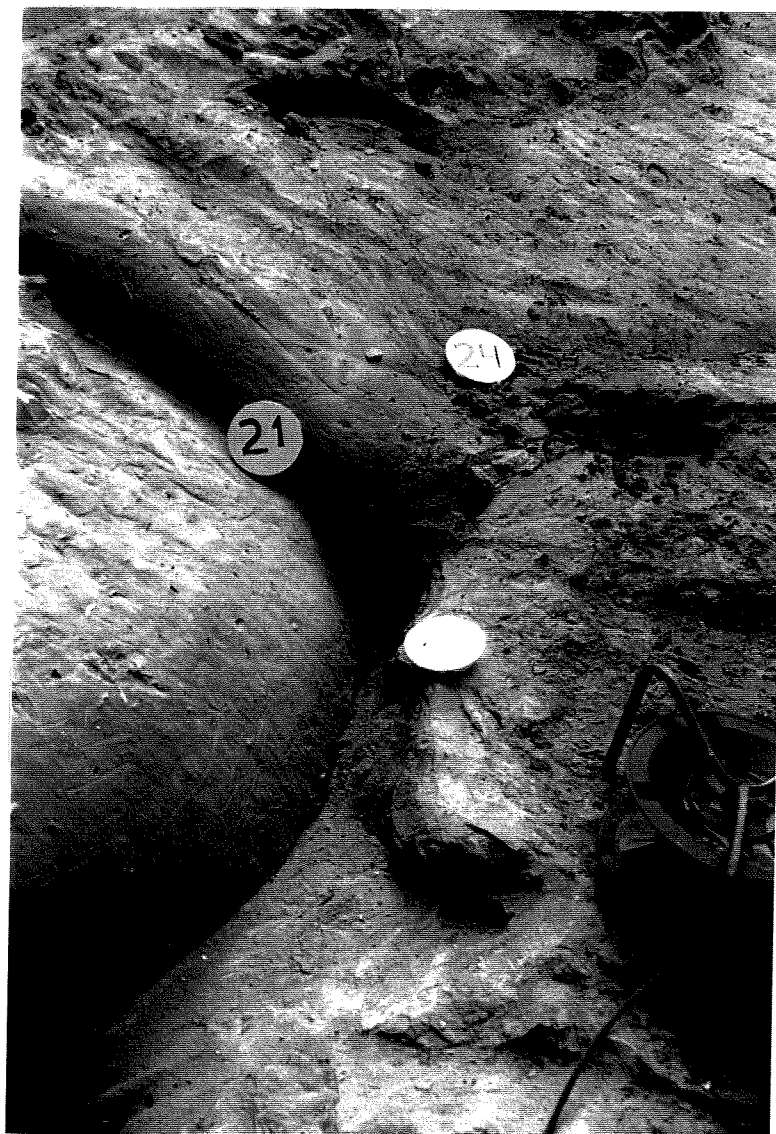
7



8



9



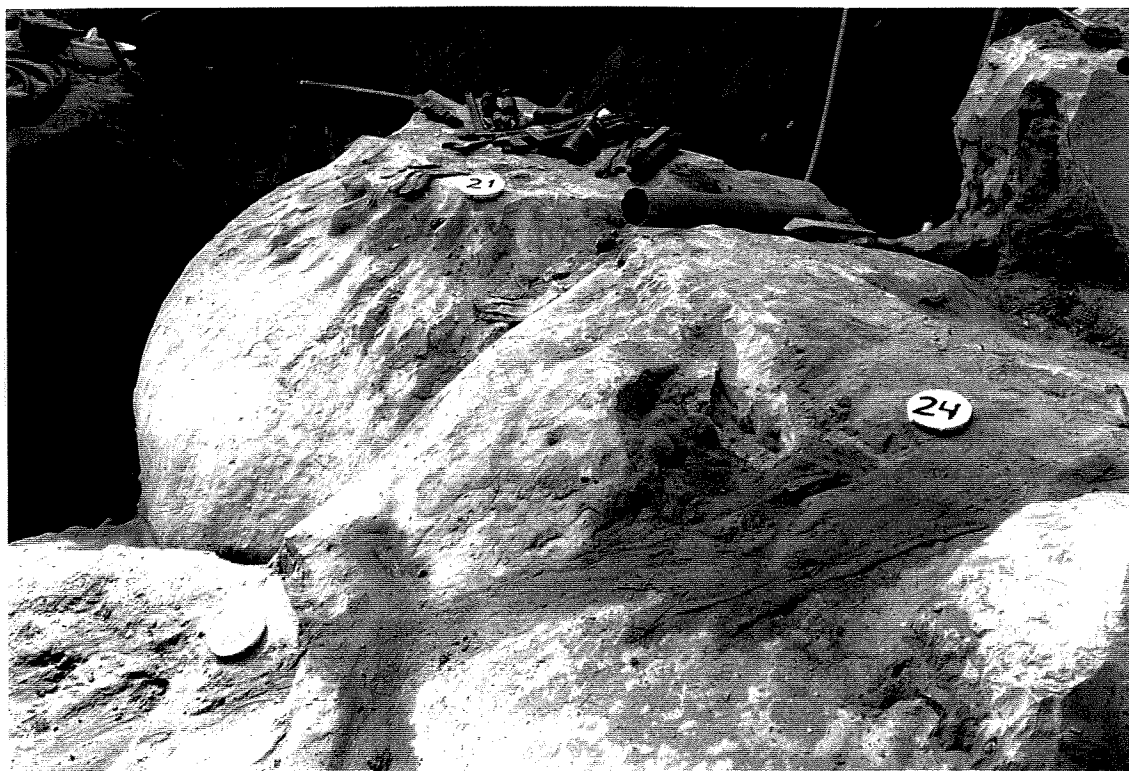
10



11



12



13



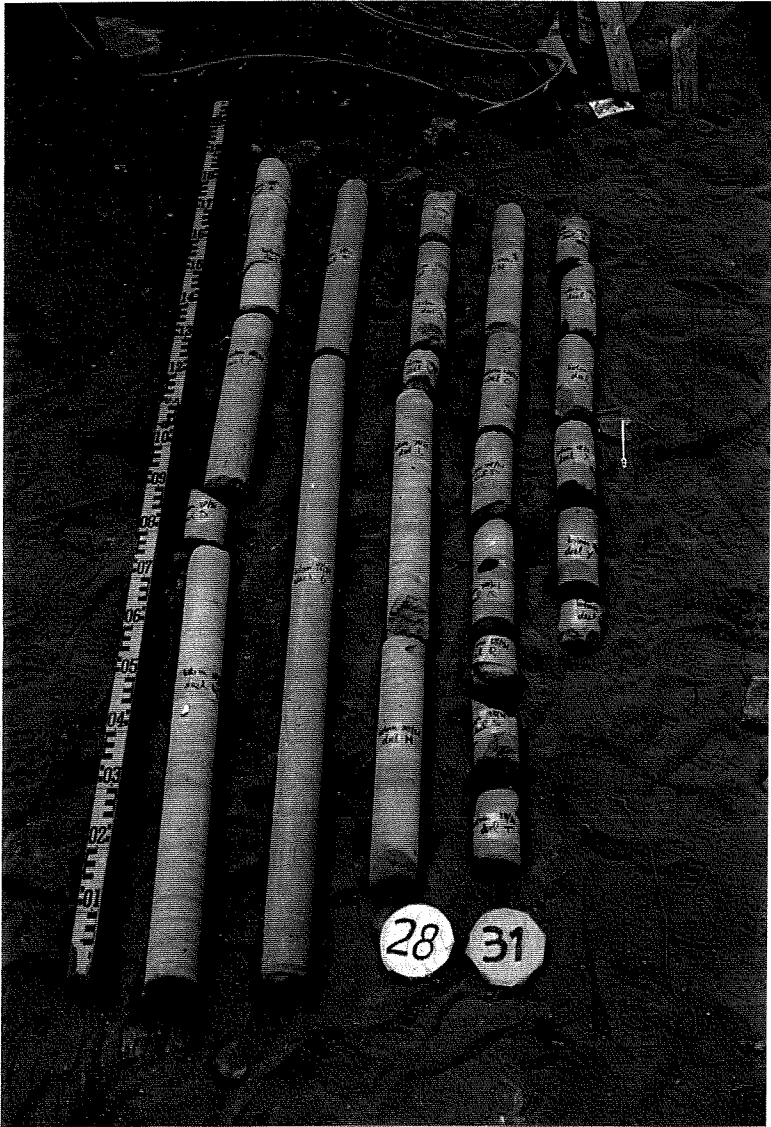
14



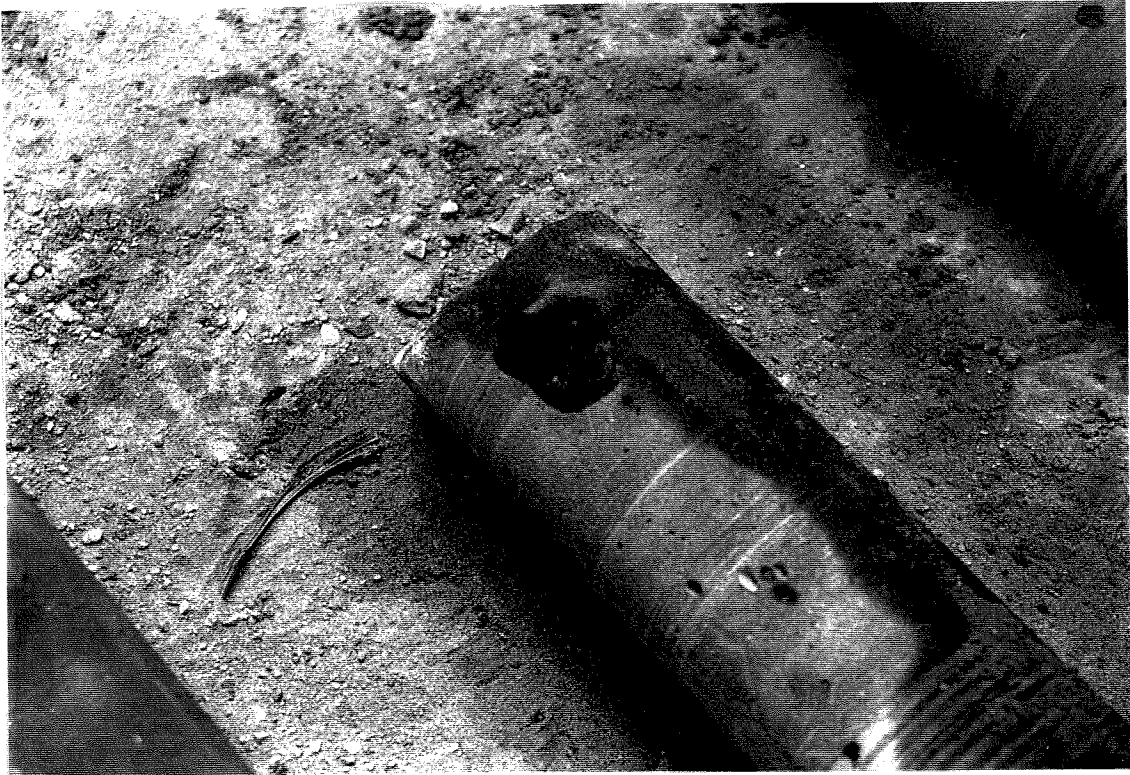
15



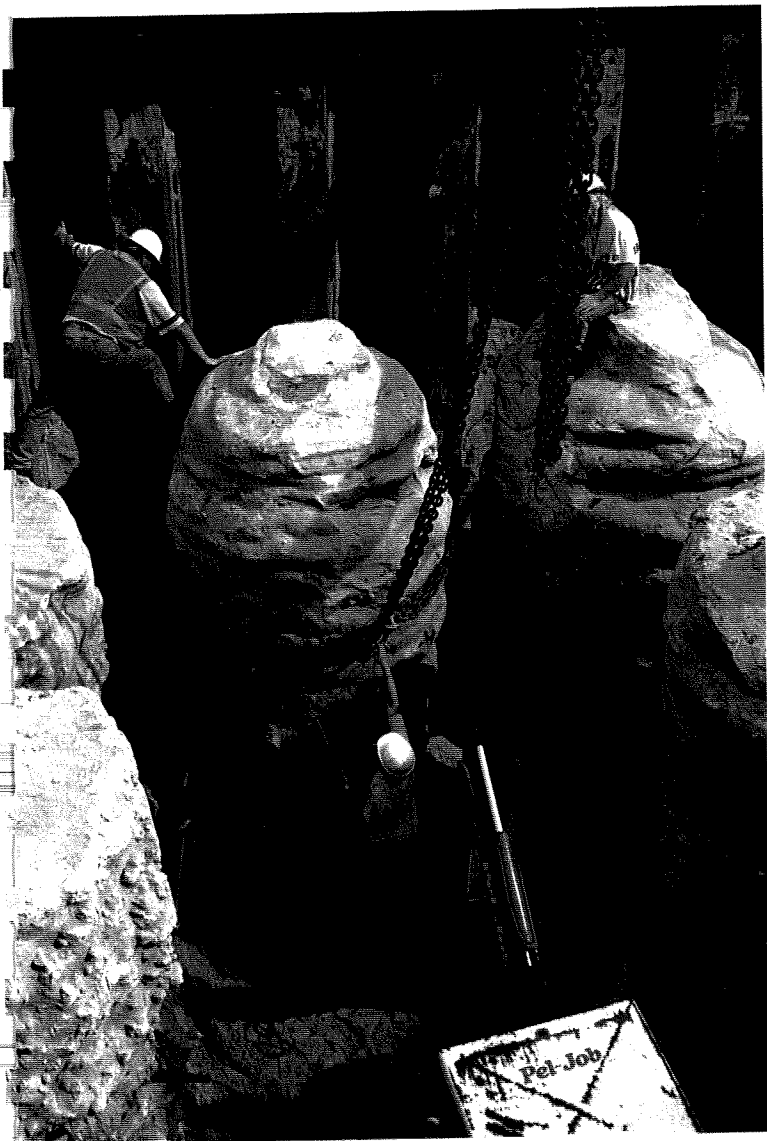
16



17



18



19



20

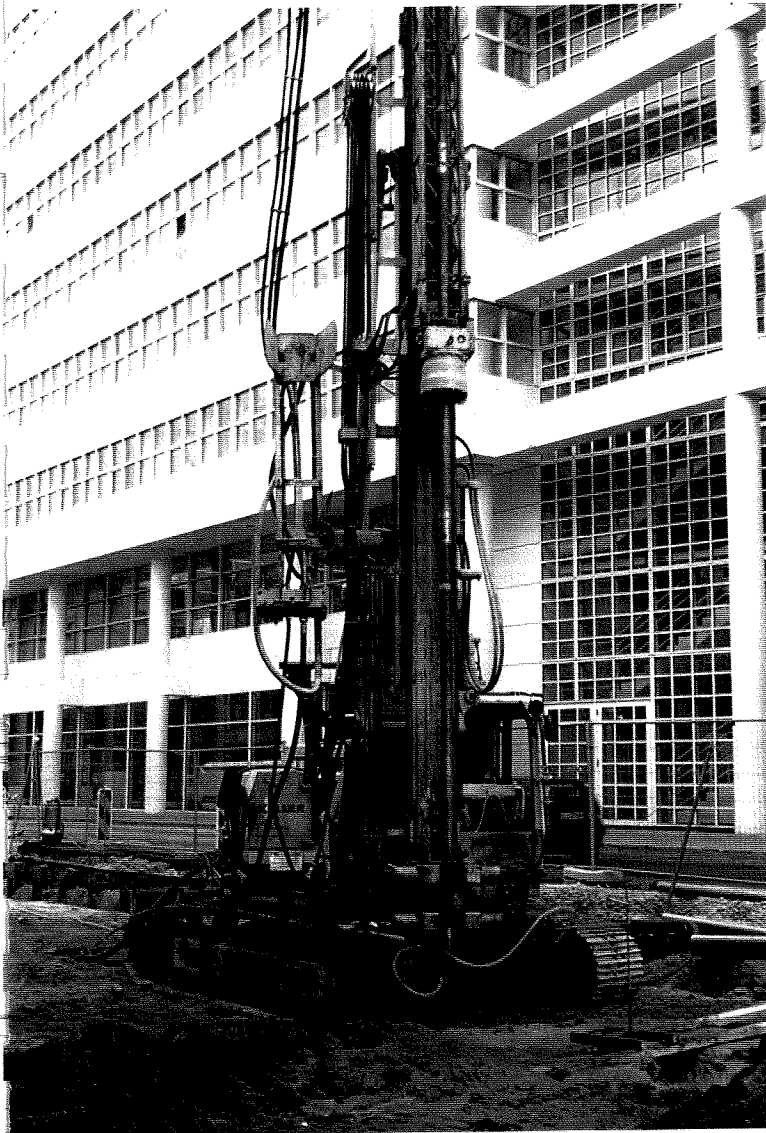




21



22



23



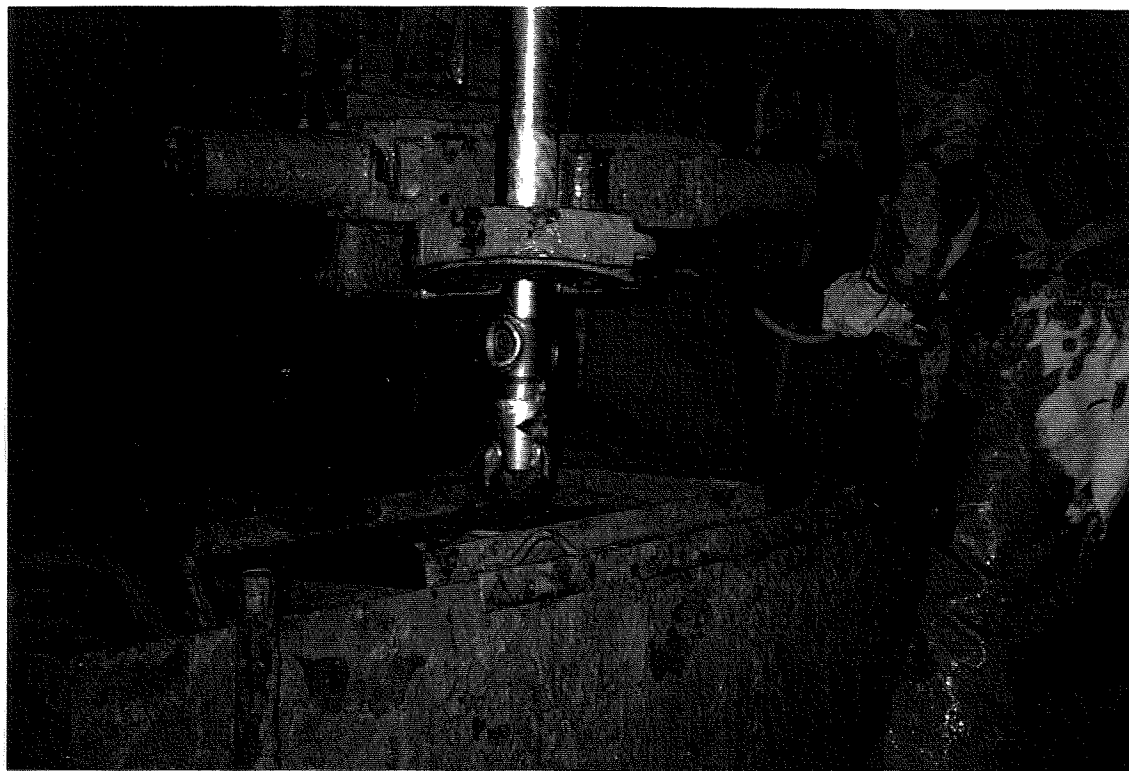
24



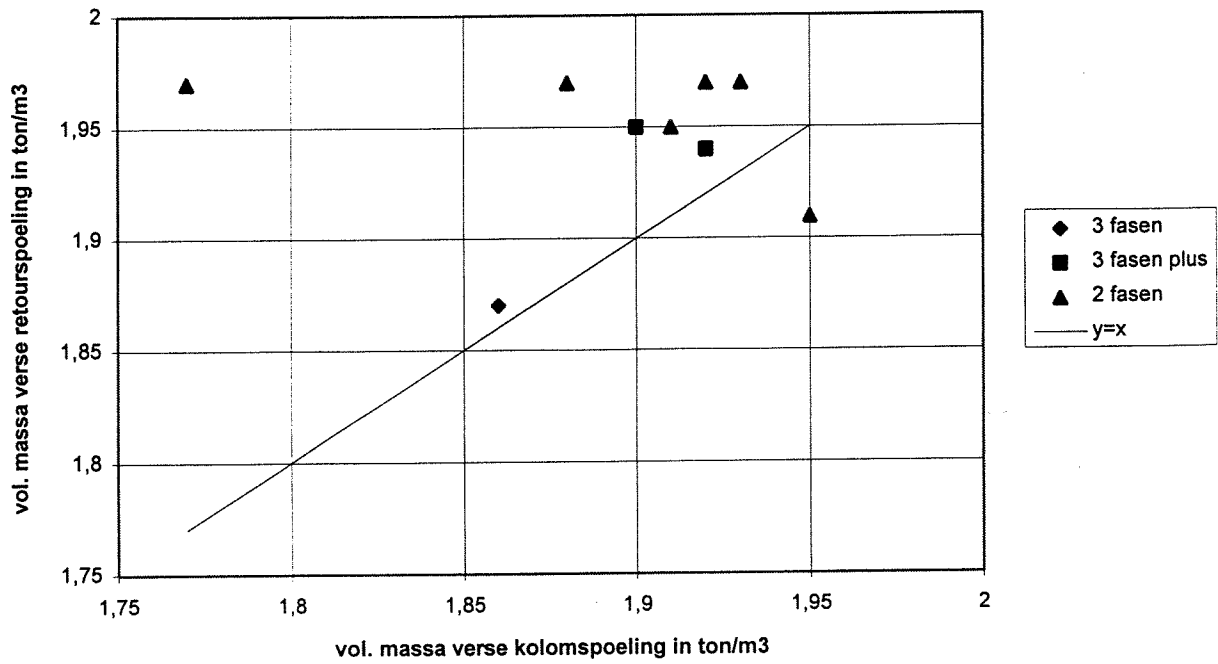
25



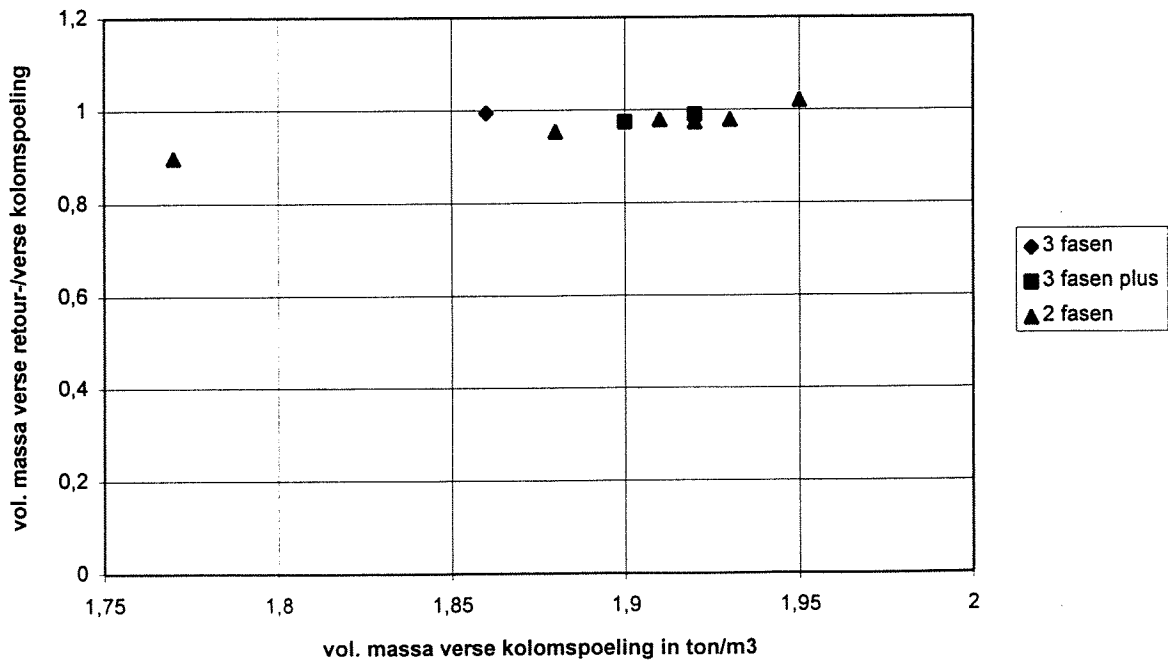
26



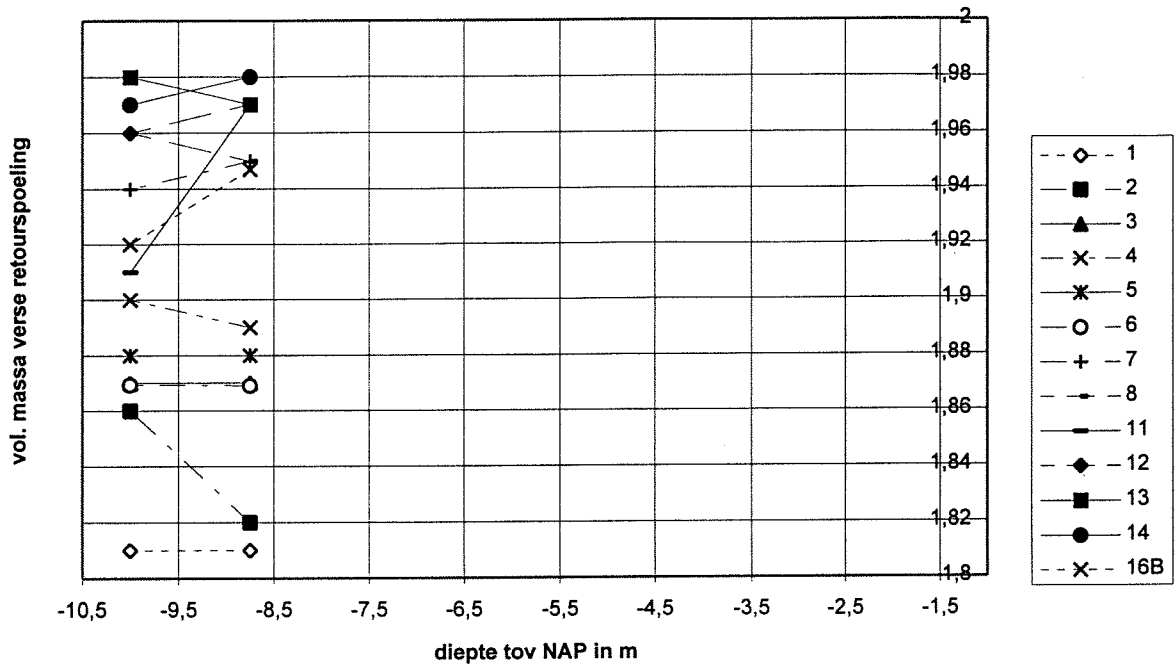
## **Bijlage deel III: Grafieken**



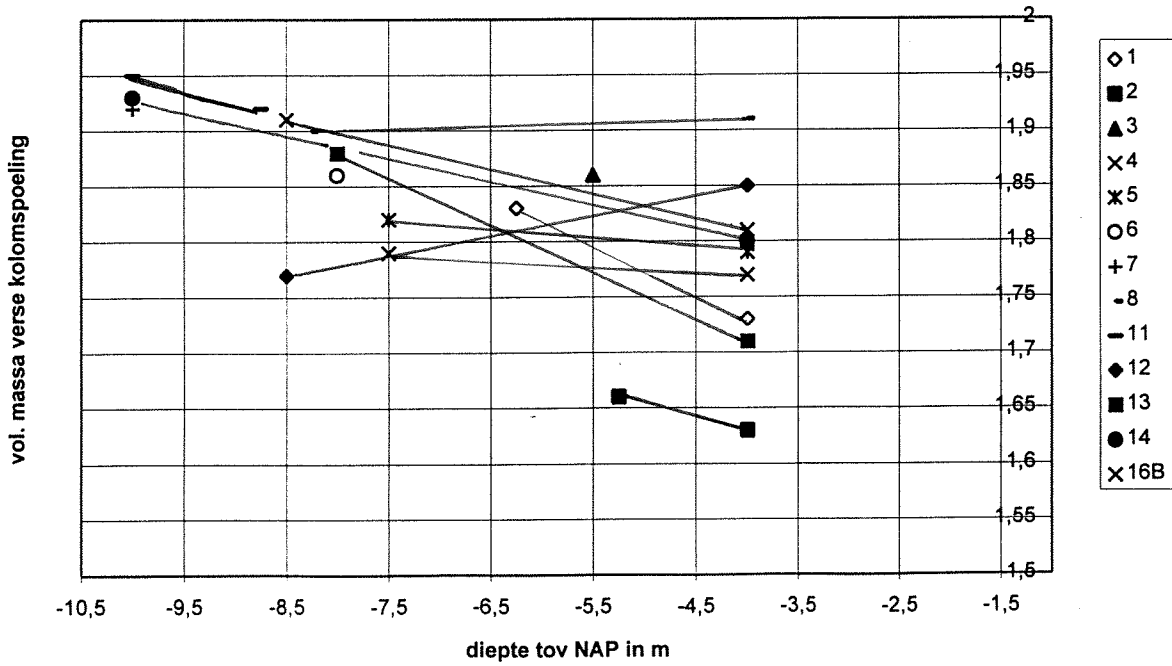
grafiek III.2.1: vergelijking volumieke massa retour- en kolomspoeling.



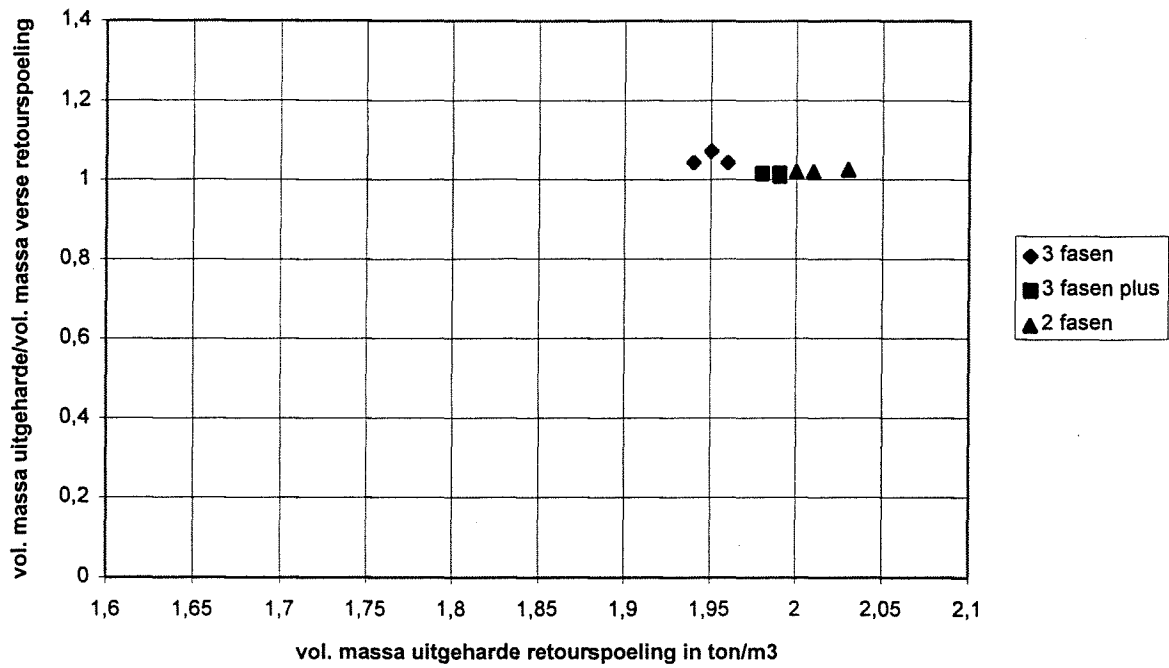
grafiek III.2.2: relatieve vergelijking volumieke massa retour- en kolomspoeling.



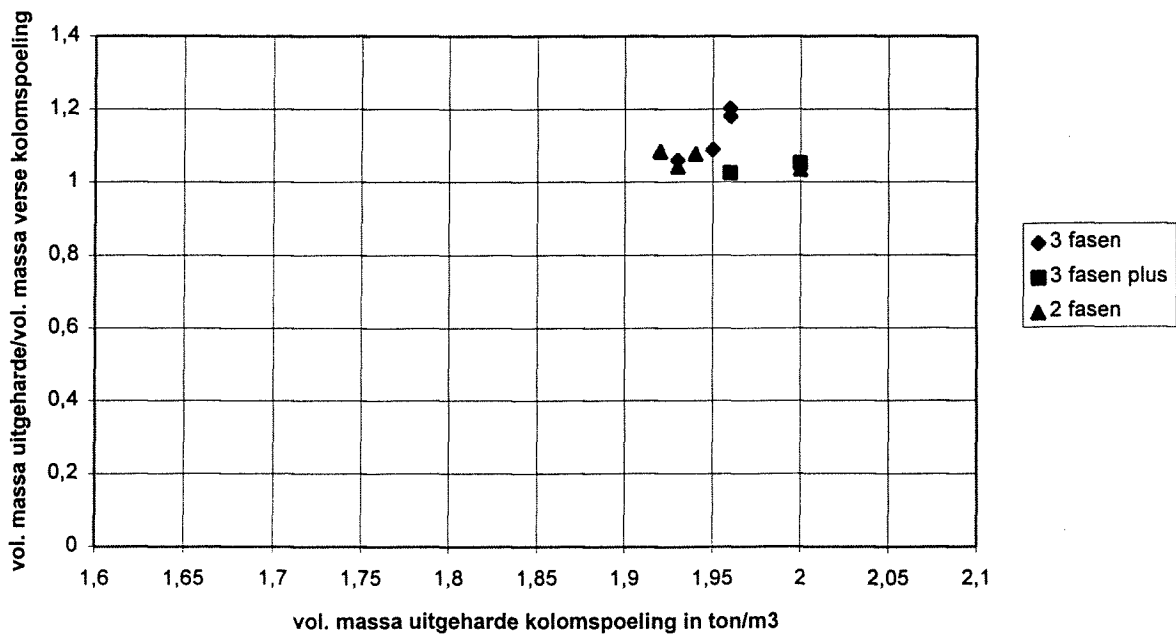
grafiek III.2.3: volumieke massa retourspoeling over de diepte.



grafiek III.2.4: volumieke massa kolomspoeling over de diepte.

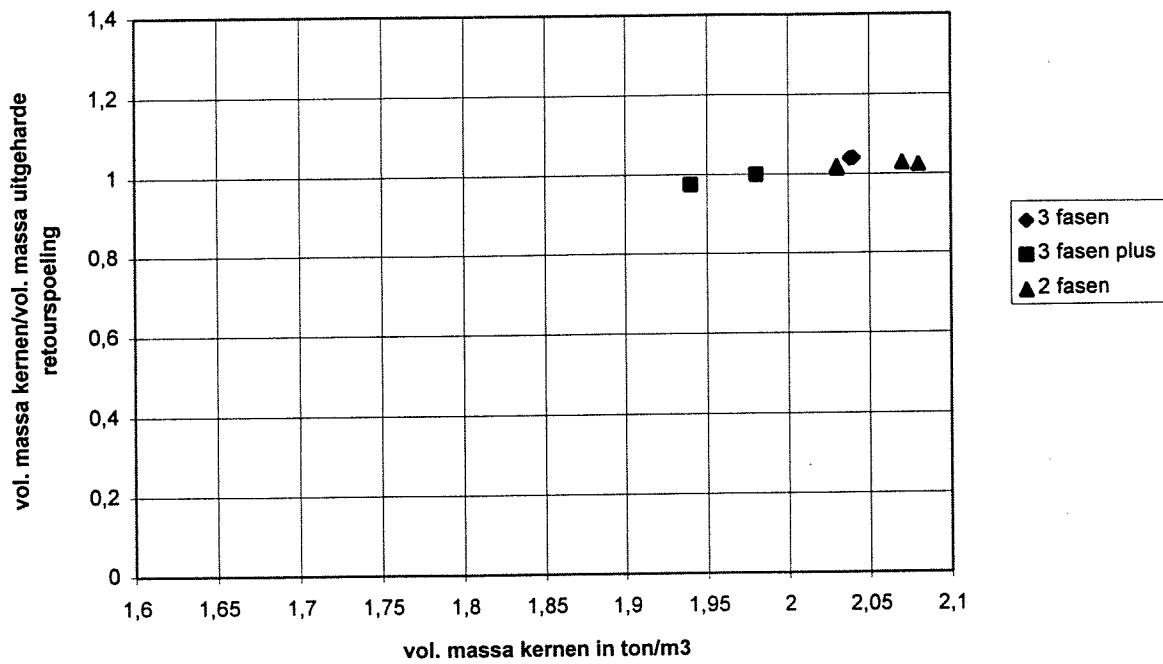


grafiek III.2.5: relatieve vergelijking volumieke massa verse en uitgeharde retourspoeling.

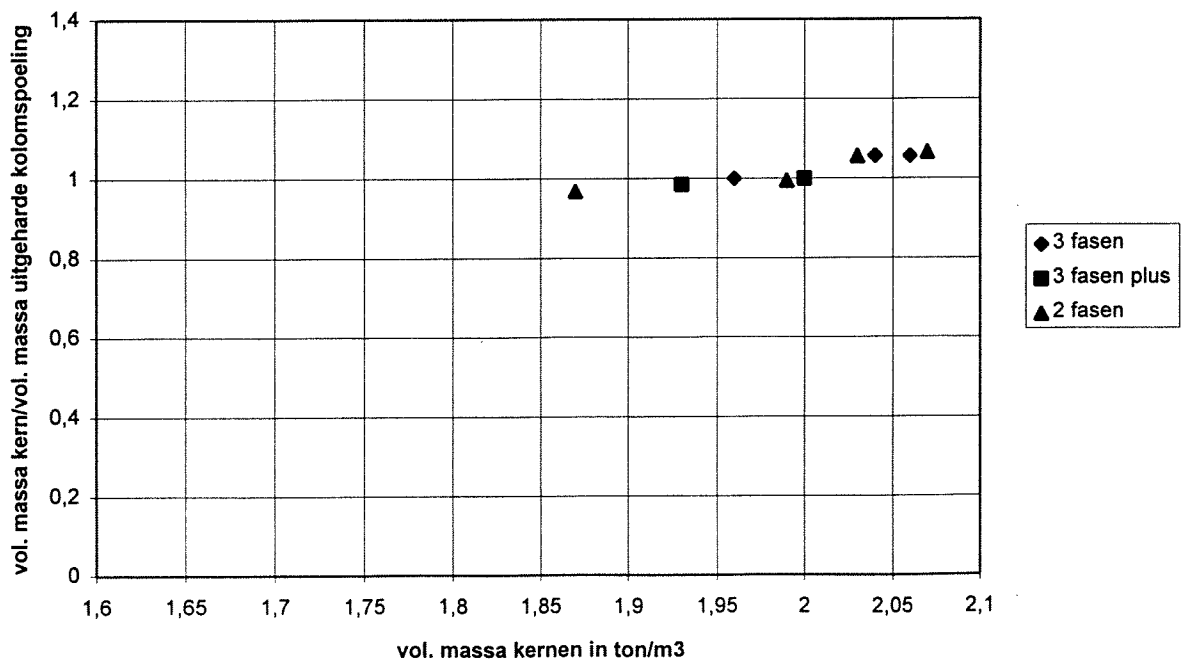


grafiek III.2.6: relatieve vergelijking volumieke massa verse en uitgeharde kolomspoeling.

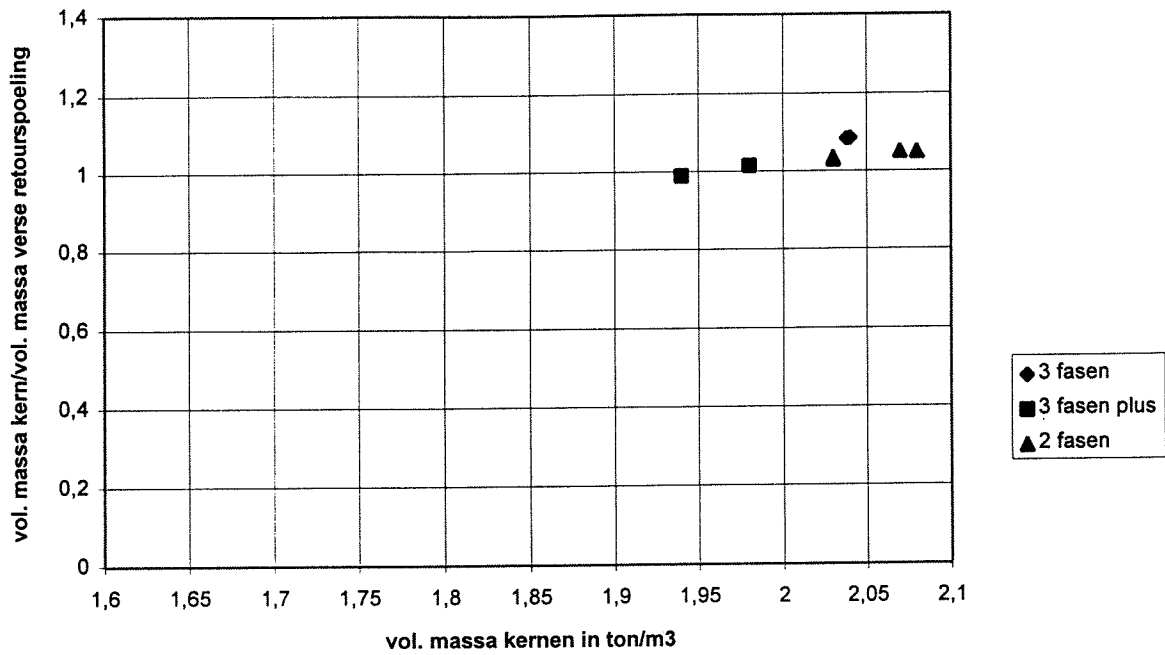




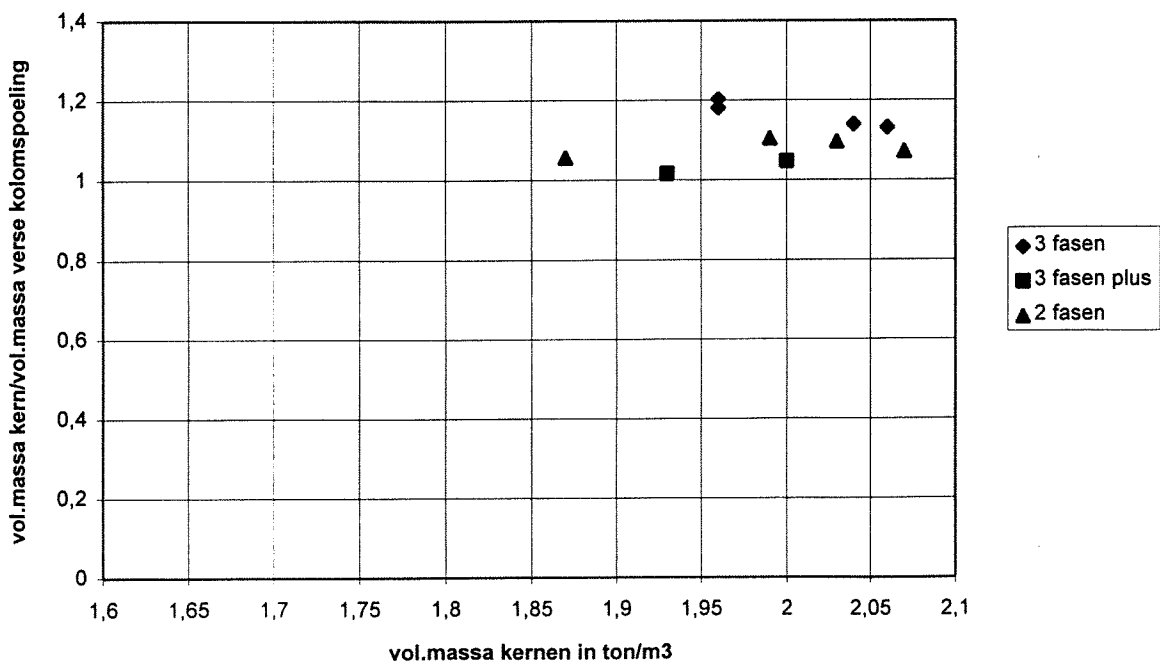
grafiek III.2.7: relatieve vergelijking volumieke massa kernen en uitgeharde retourspoeling.



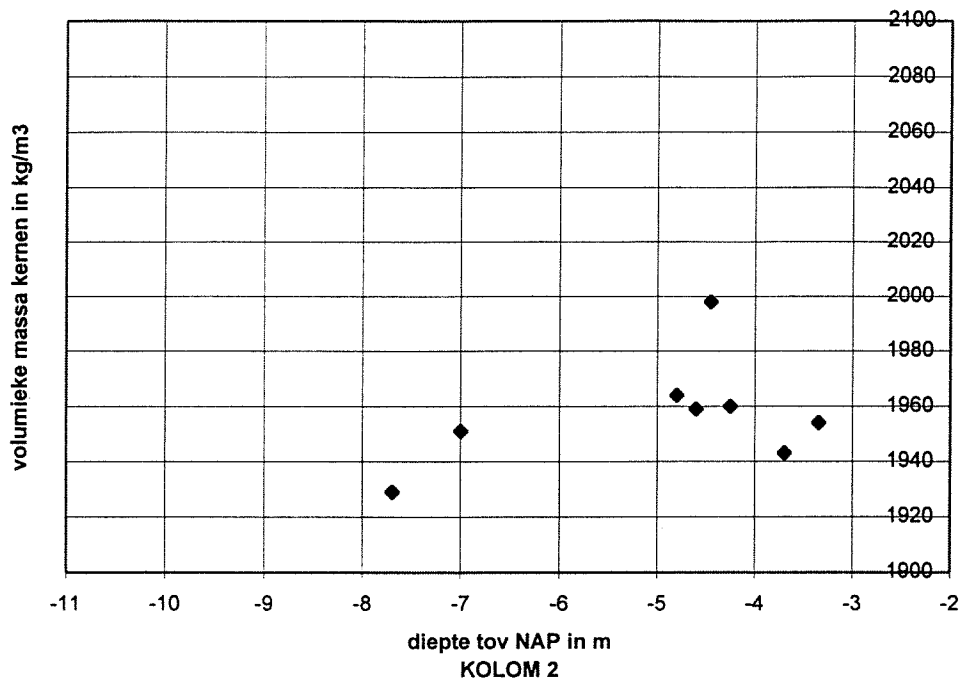
grafiek III.2.8: relatieve vergelijking volumieke massa kernen en uitgeharde kolomspoeling.



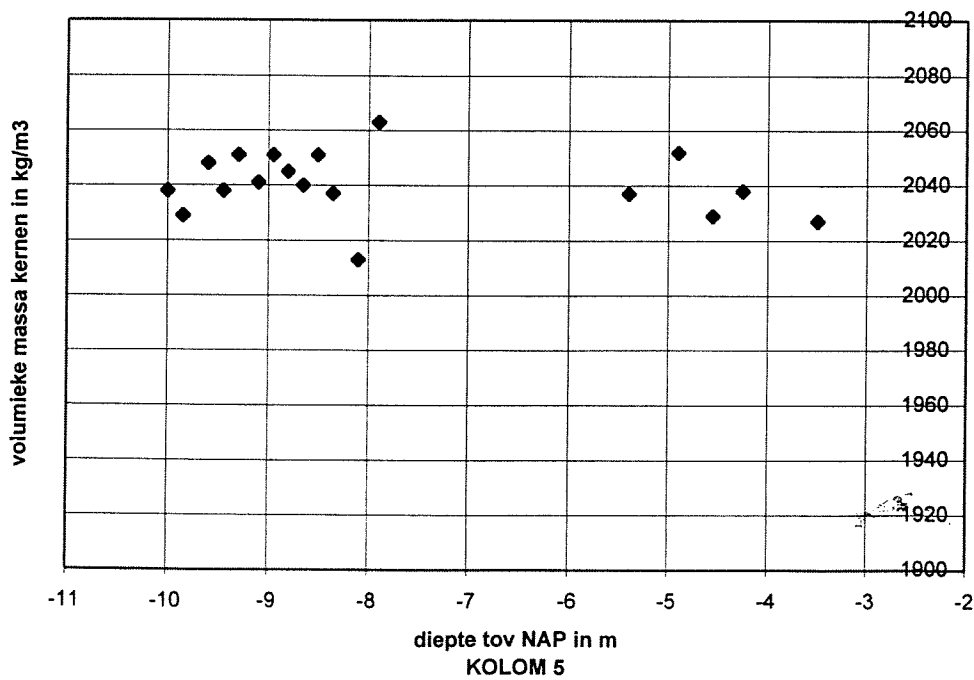
grafiek III.2.9: relatieve vergelijking volumieke massa kernen en verse retourspoeling.



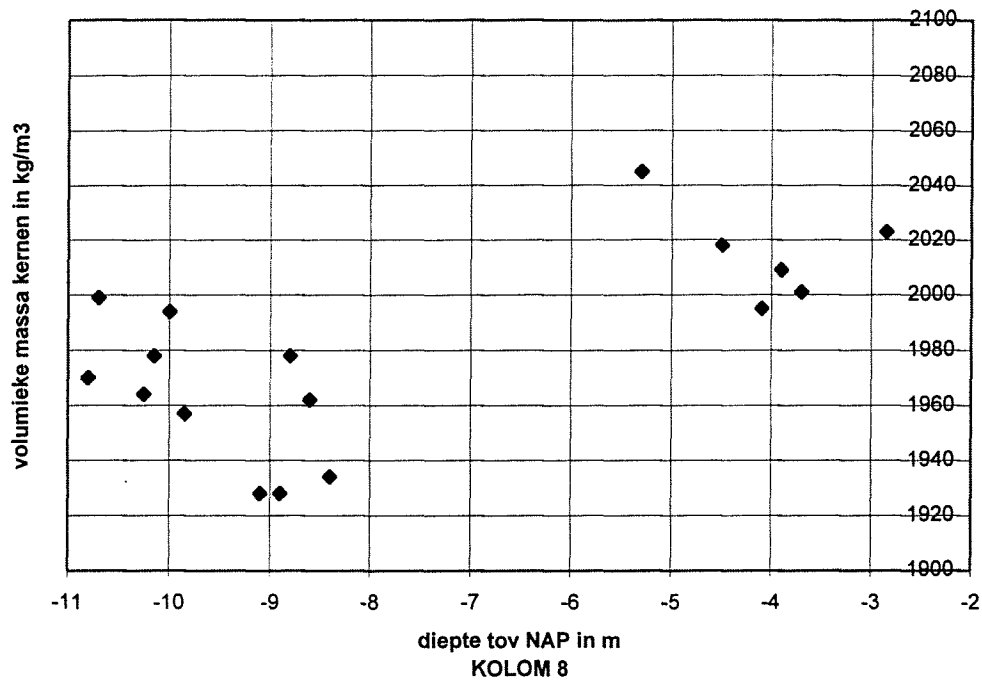
grafiek III.2.10: relatieve vergelijking volumieke massa kernen en verse kolomspoeling.



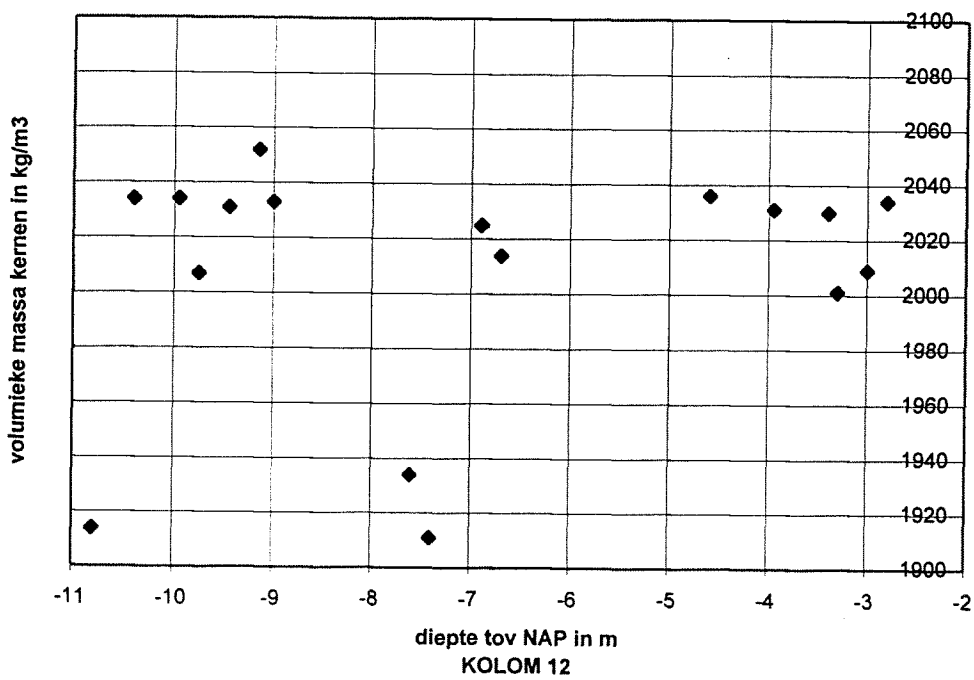
grafiek III.2.11: volumieke massa kernen over de diepte, kolom 2.



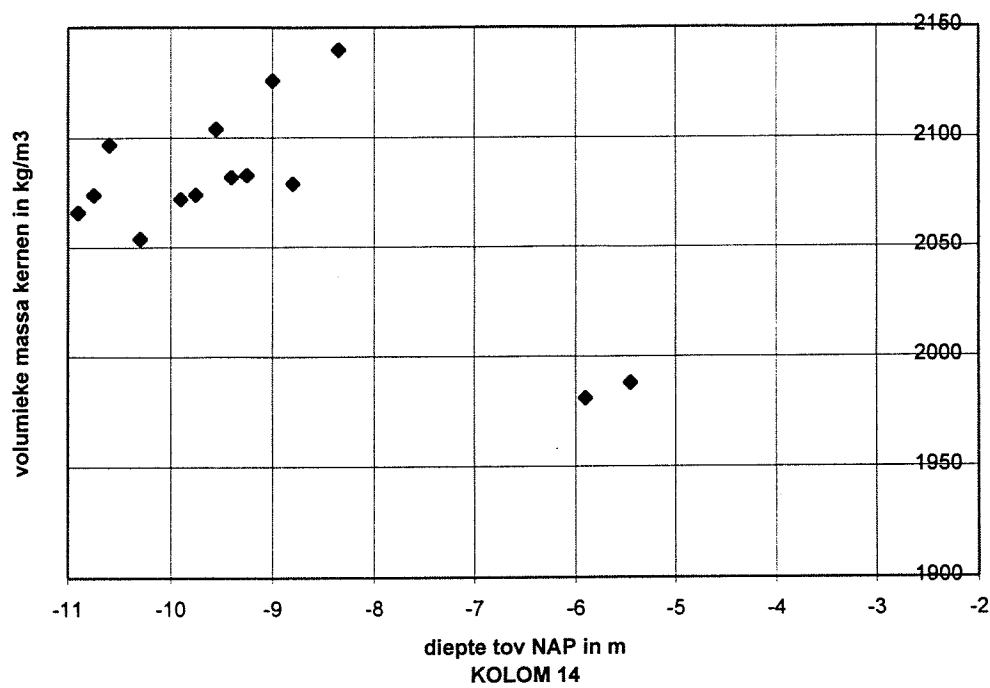
grafiek III.2.12: volumieke massa kernen over de diepte, kolom 5.



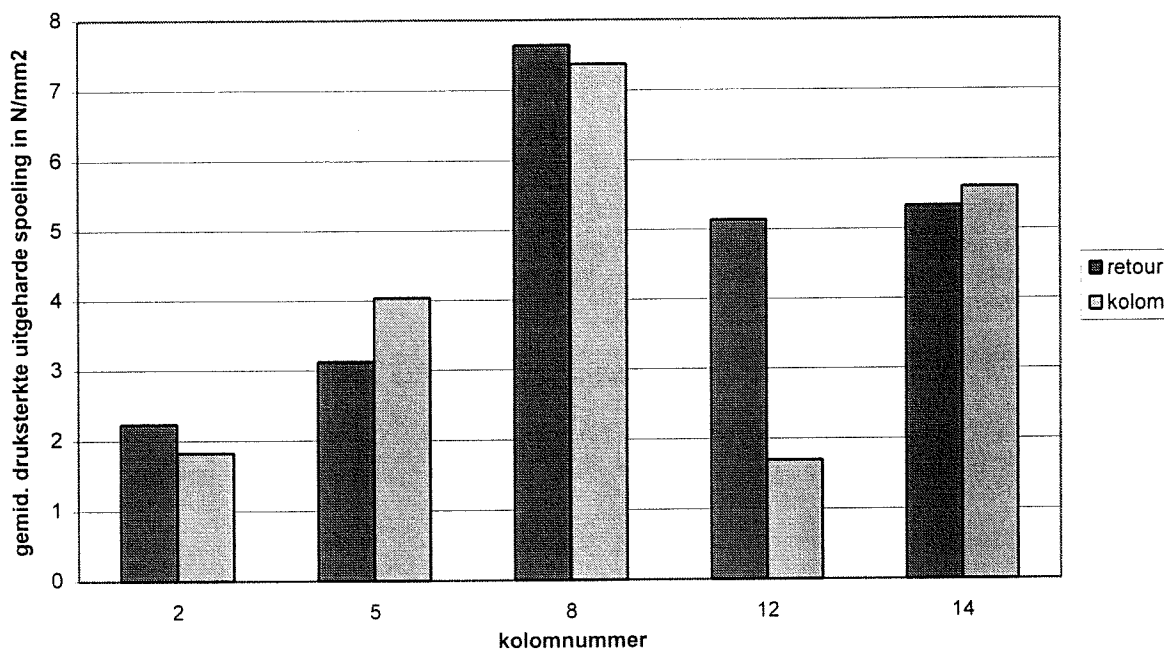
grafiek III.2.13: volumieke massa kernen over de diepte, kolom 8.



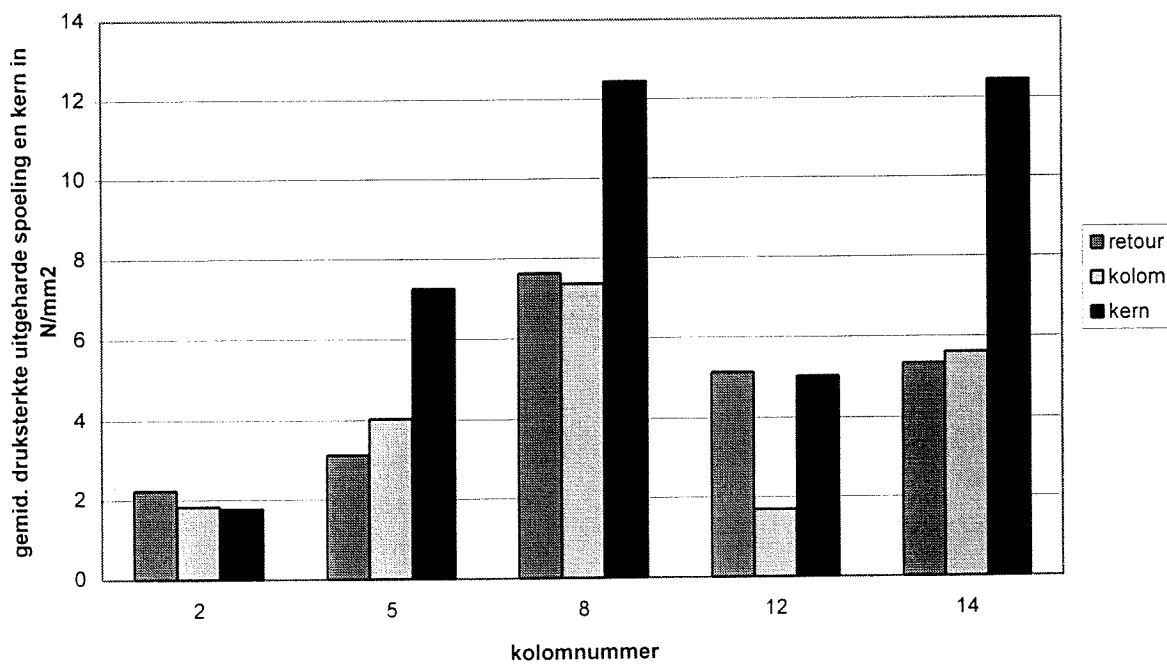
grafiek III.2.14: volumieke massa kernen over de diepte, kolom 12.



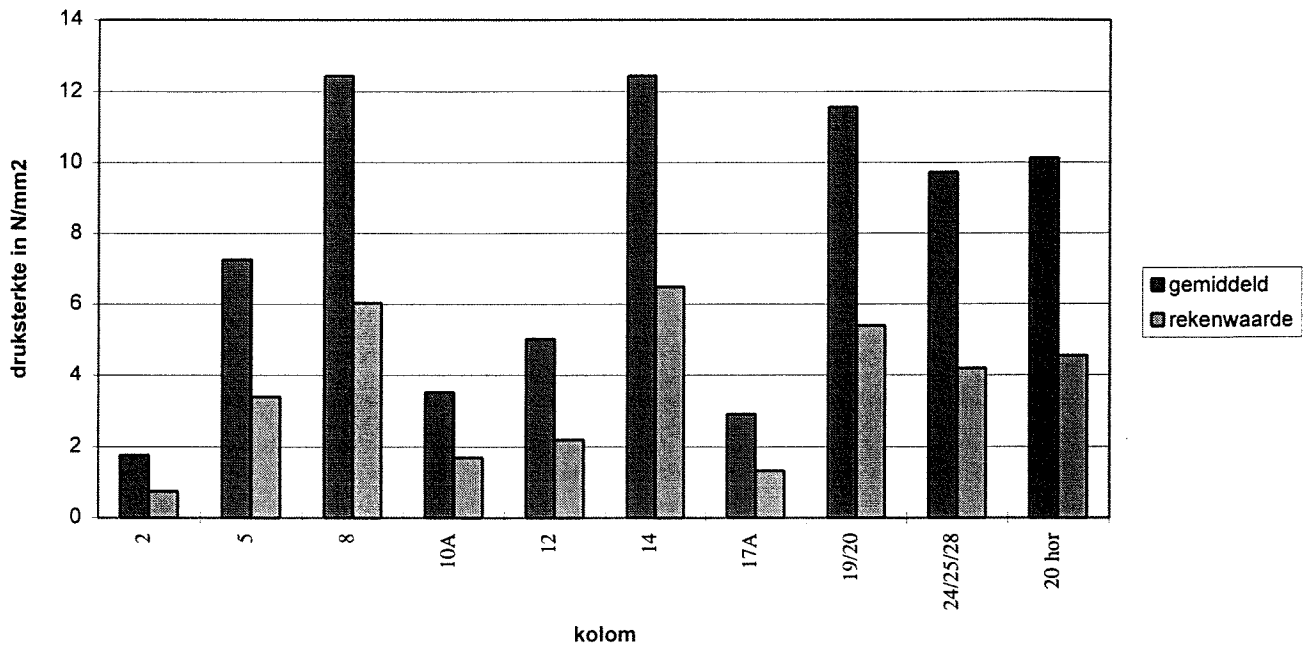
grafiek III.2.15: volumieke massa kernen over de diepte, kolom 14.



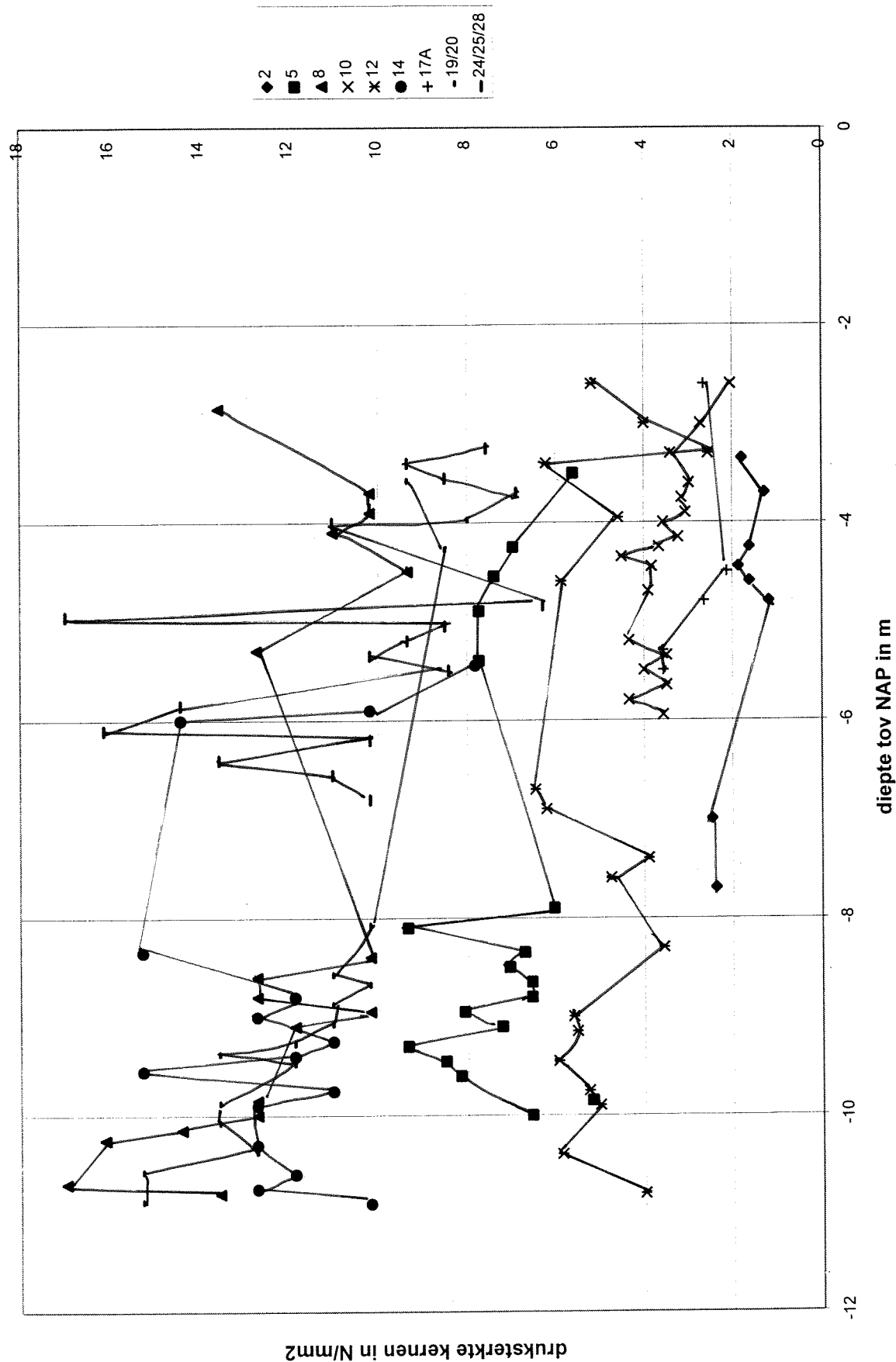
grafiek III.3.1: vergelijking gemiddelde druksterkte retour- en kolomspoeling.



grafiek III.3.2: vergelijking gemiddelde druksterkte kernen en spoelingen.

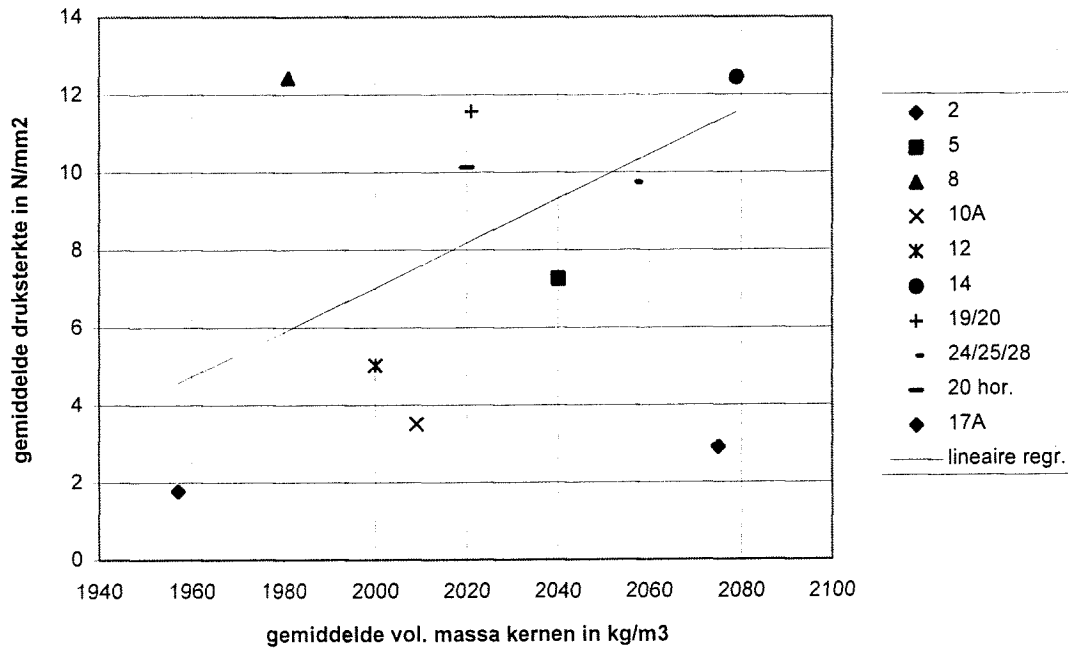


grafiek III.3.3: vergelijking gemiddelde en rekenwaarde druksterkte.

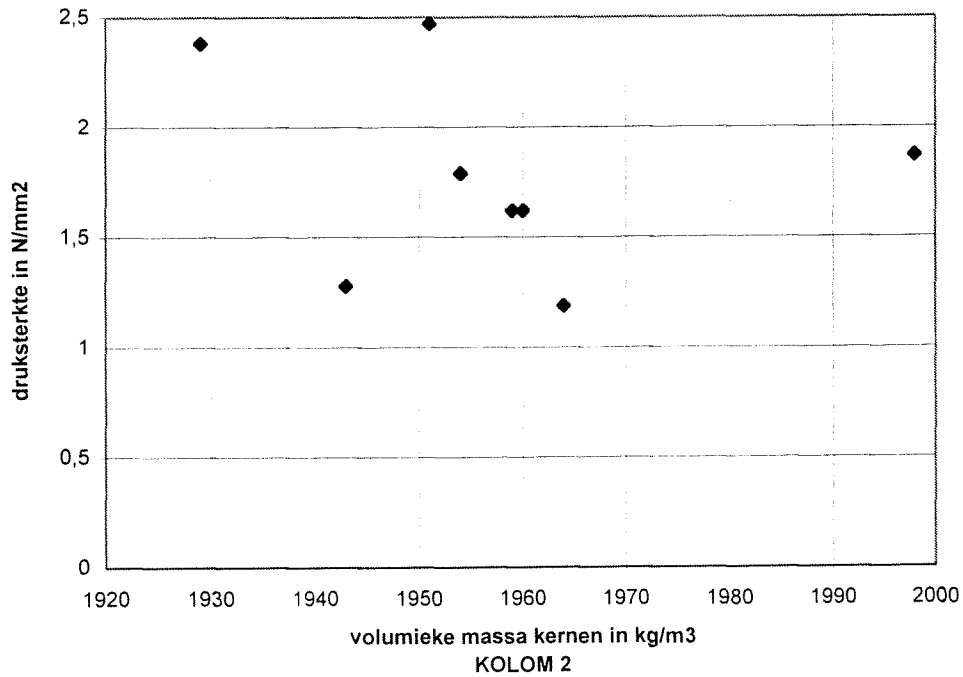


grafiek III.3.4: druksterkte kernen over de diepte.

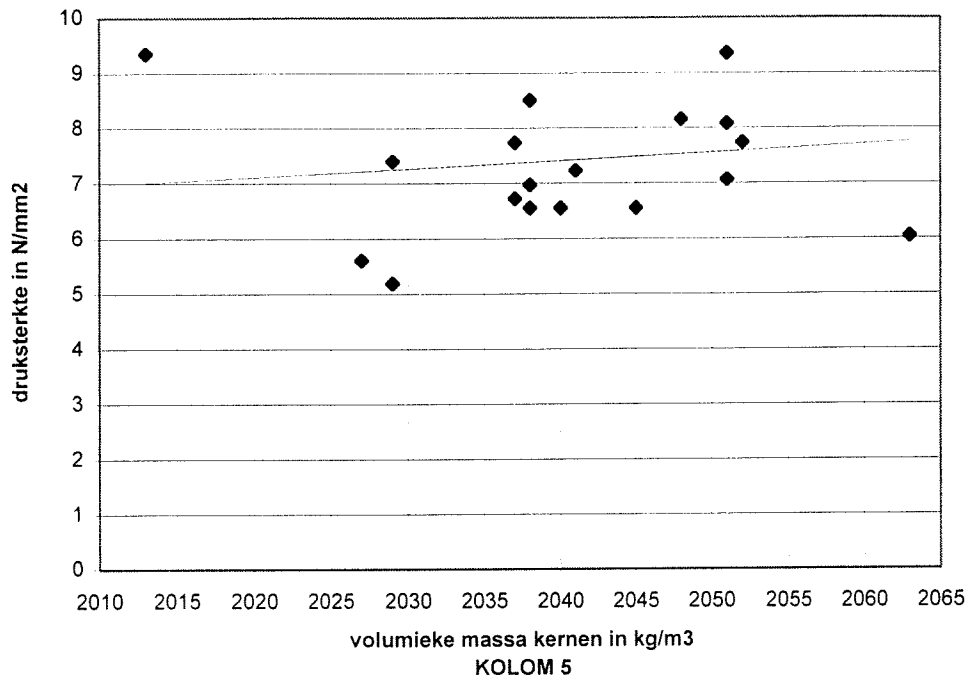




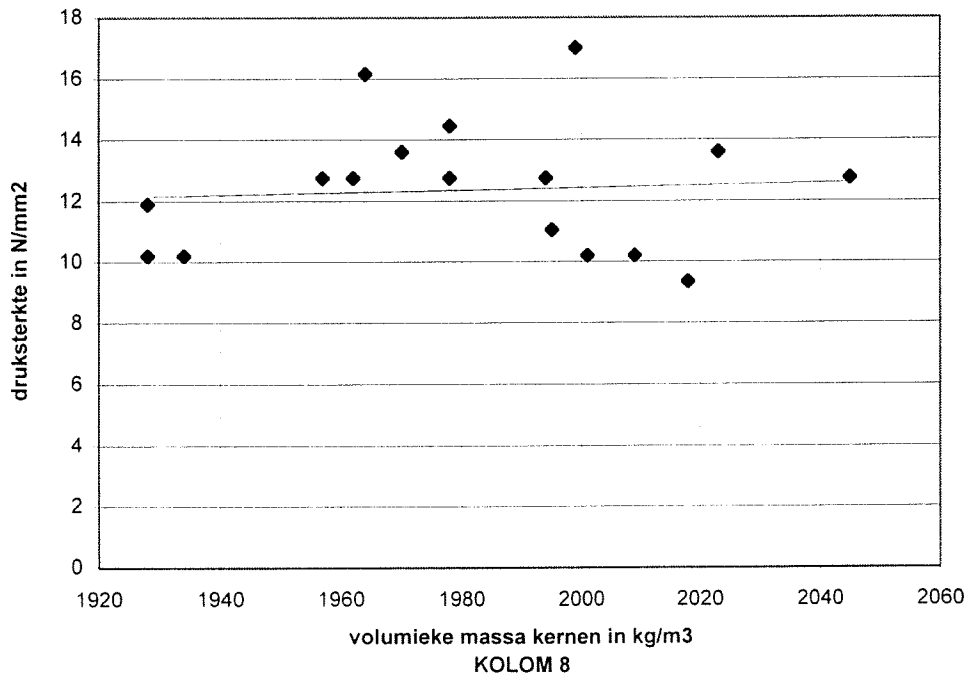
grafiek III.3.5: gemiddelde volumieke massa kernen tov gemiddelde druksterkte.



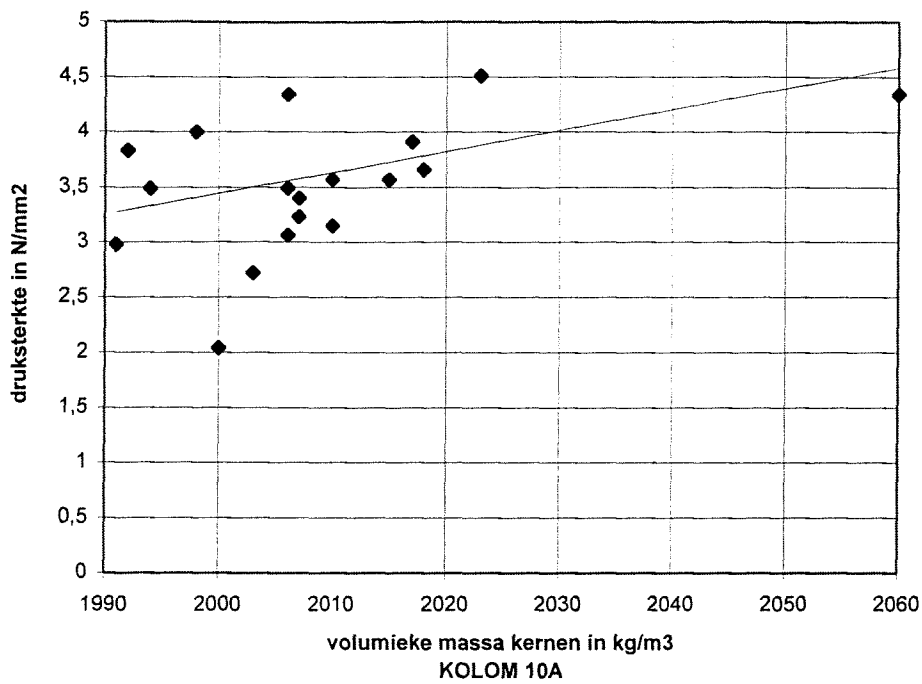
grafiek III.3.6: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 2.



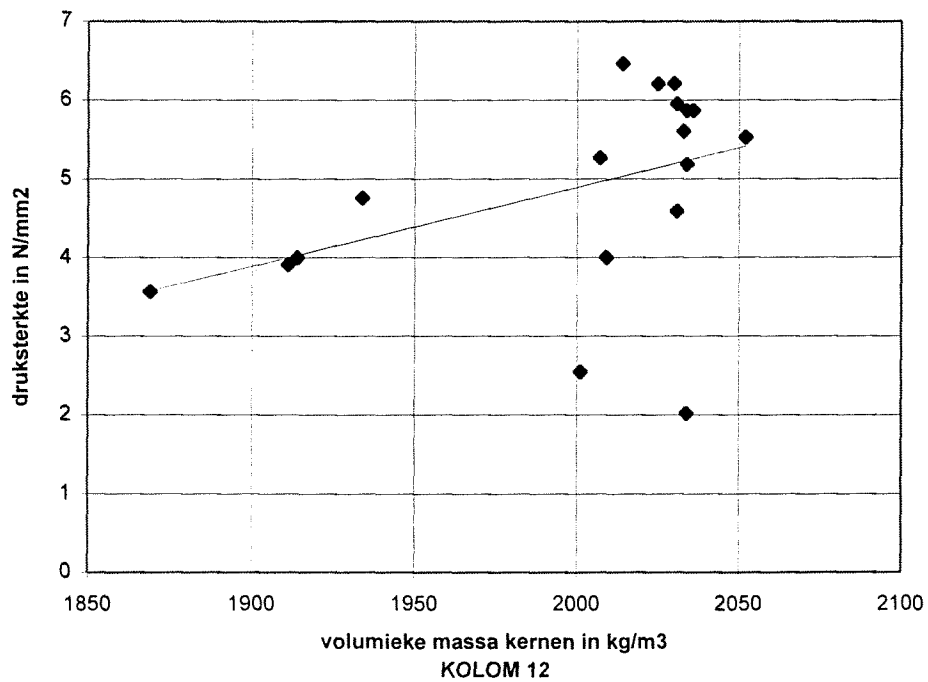
grafiek III.3.7: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 5.



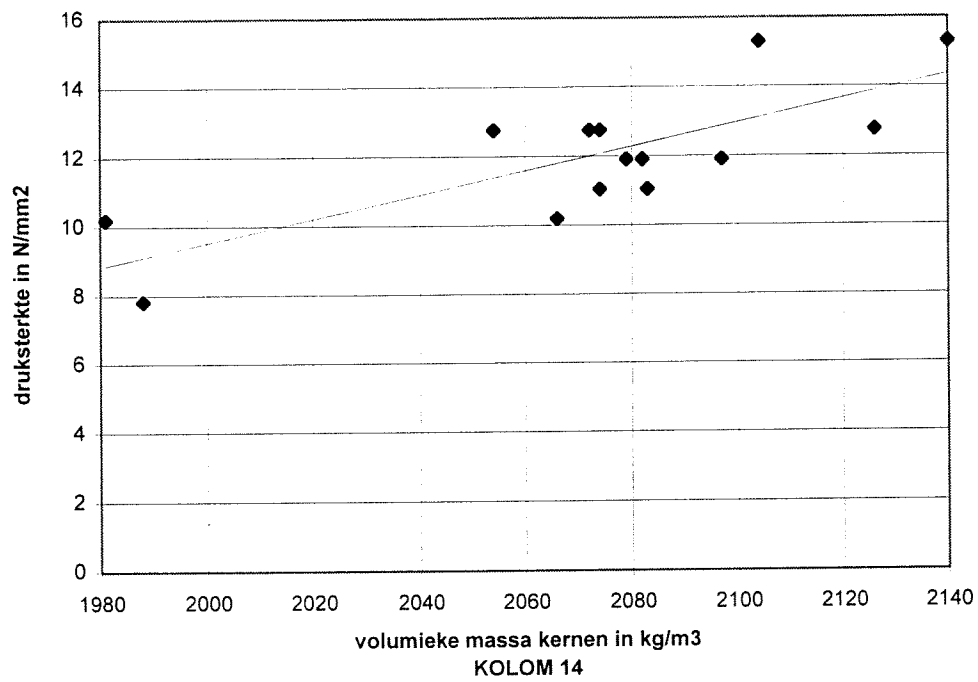
grafiek III.3.8: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 8.



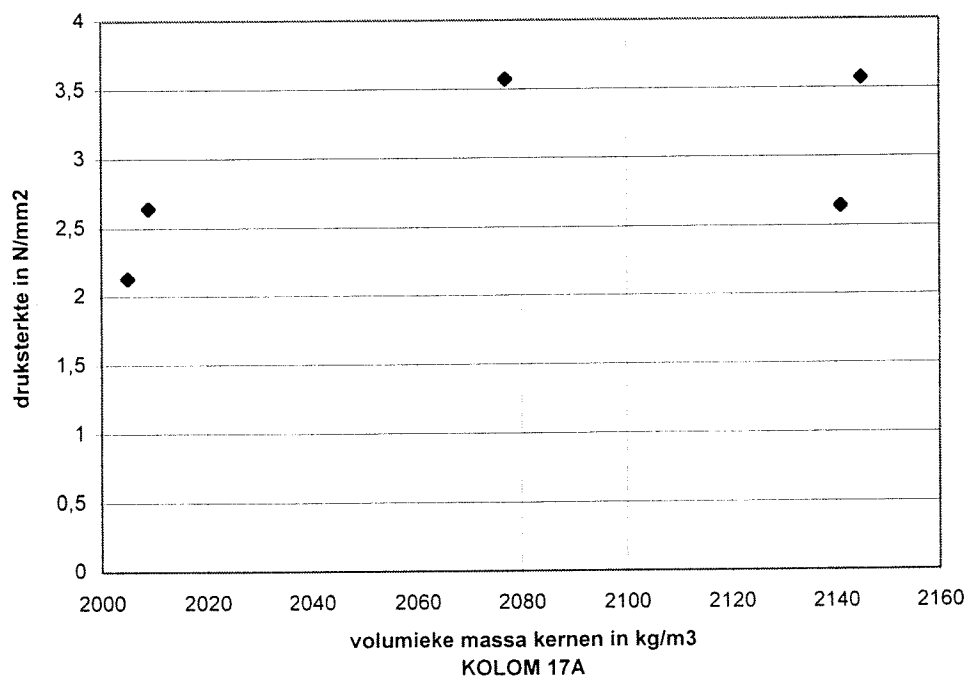
grafiek III.3.9: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 10A.



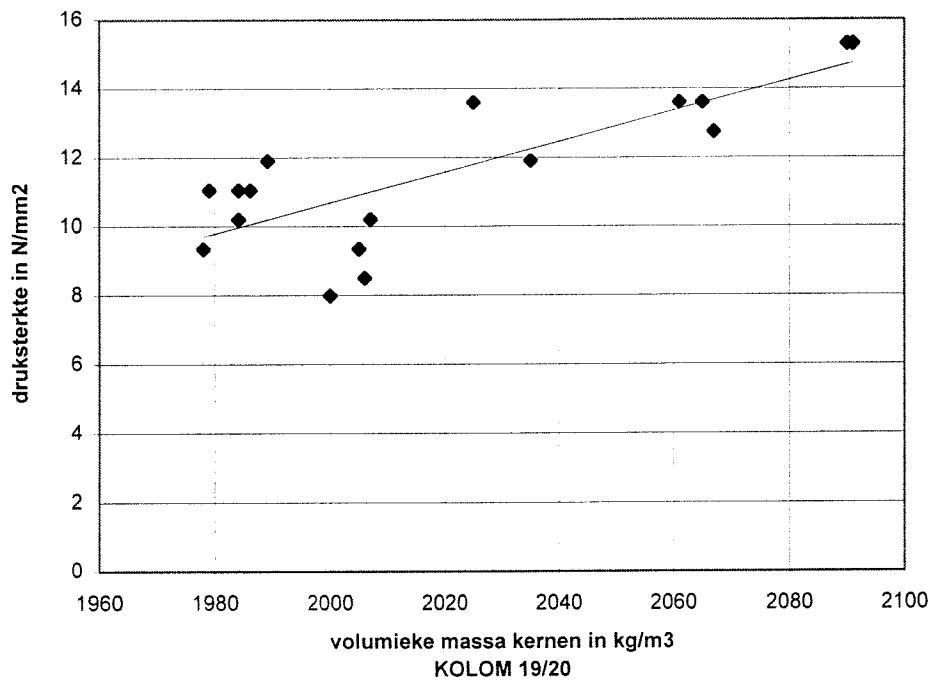
grafiek III.3.10: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 12.



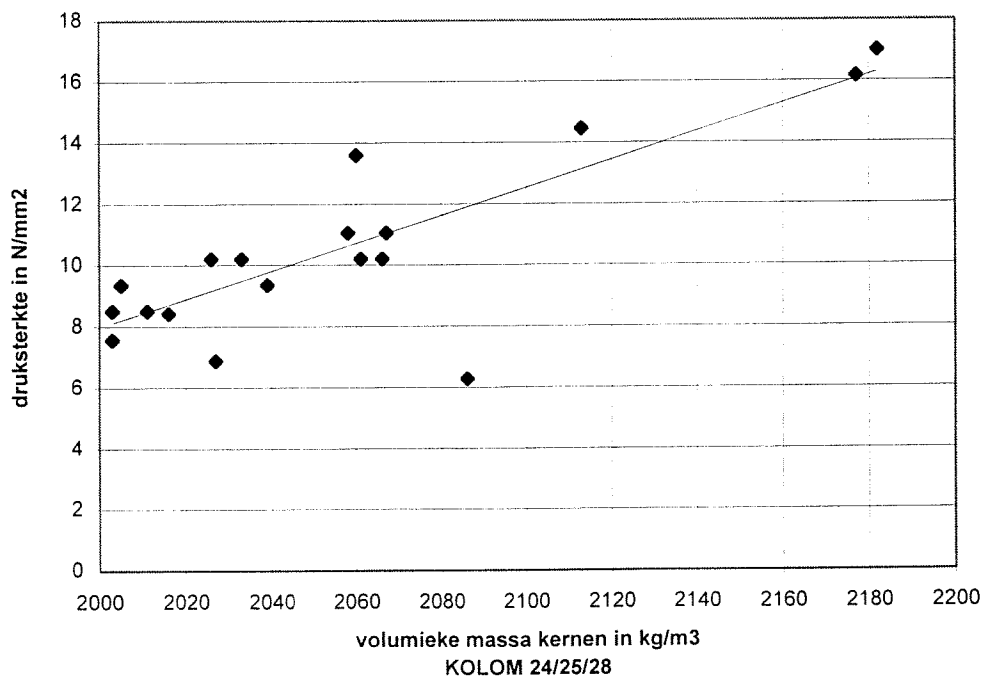
grafiek III.3.11: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 14.



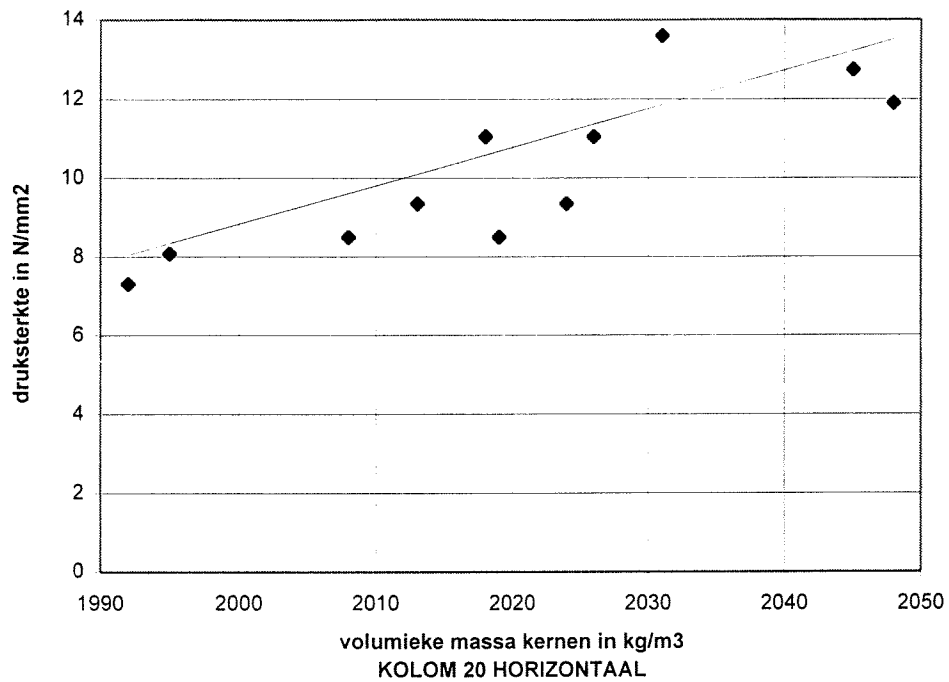
grafiek III.3.12: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 17A.



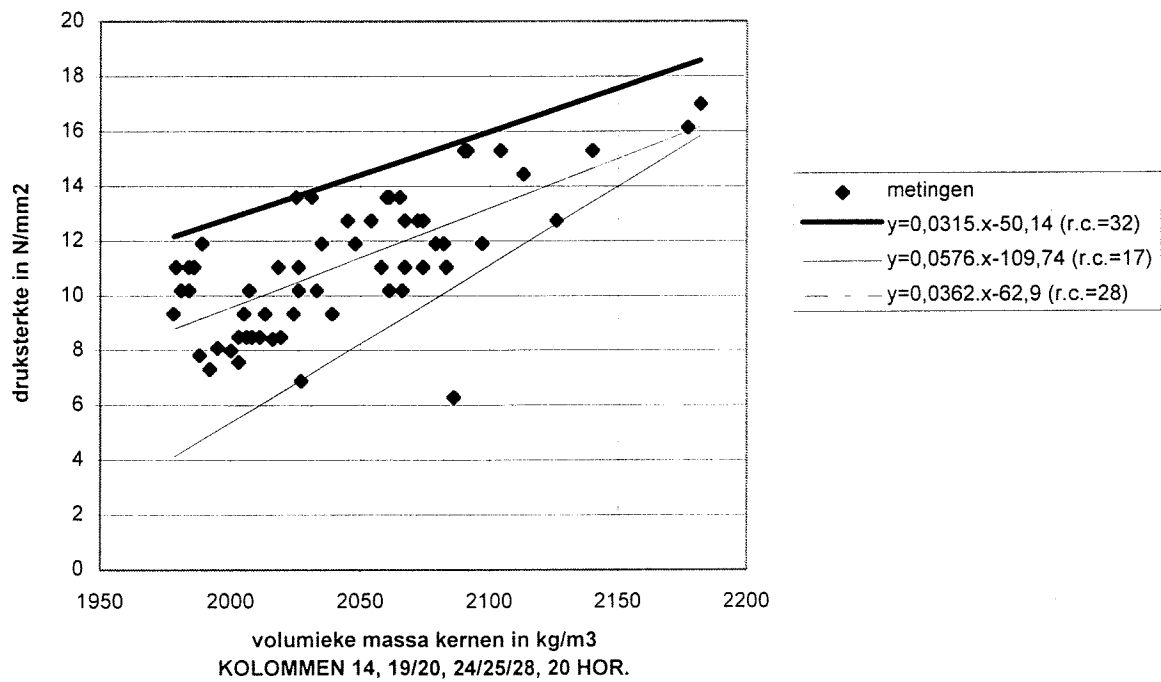
grafiek III.3.13: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 19/20.



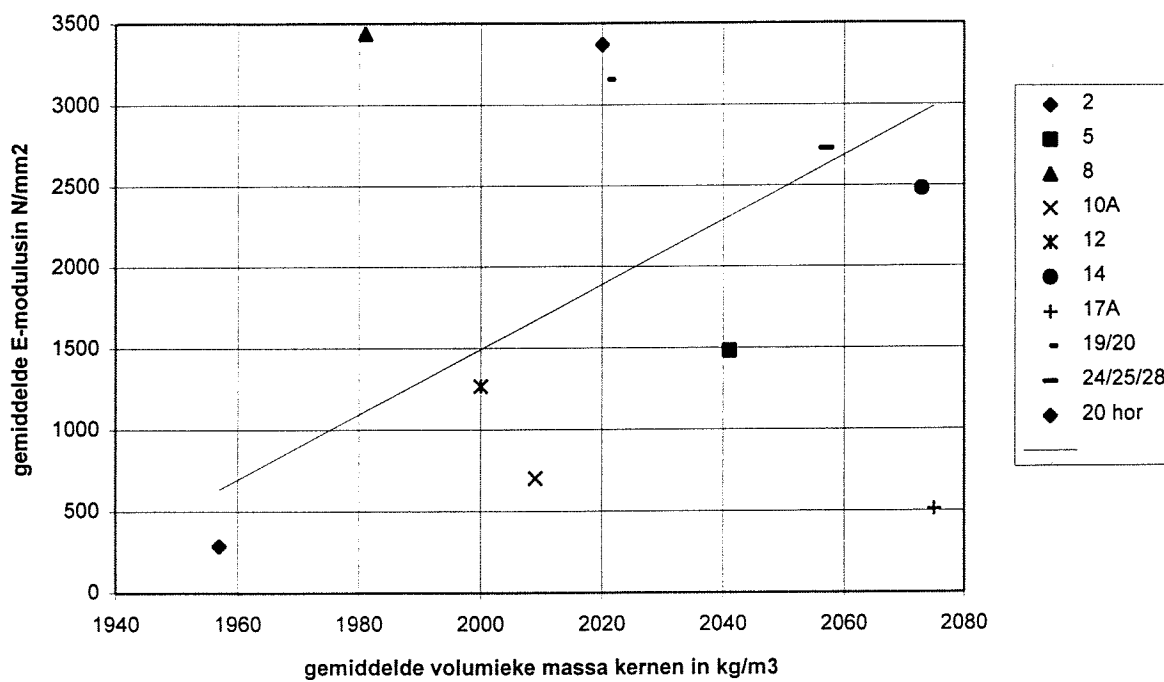
grafiek III.3.14: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 24/25/28.



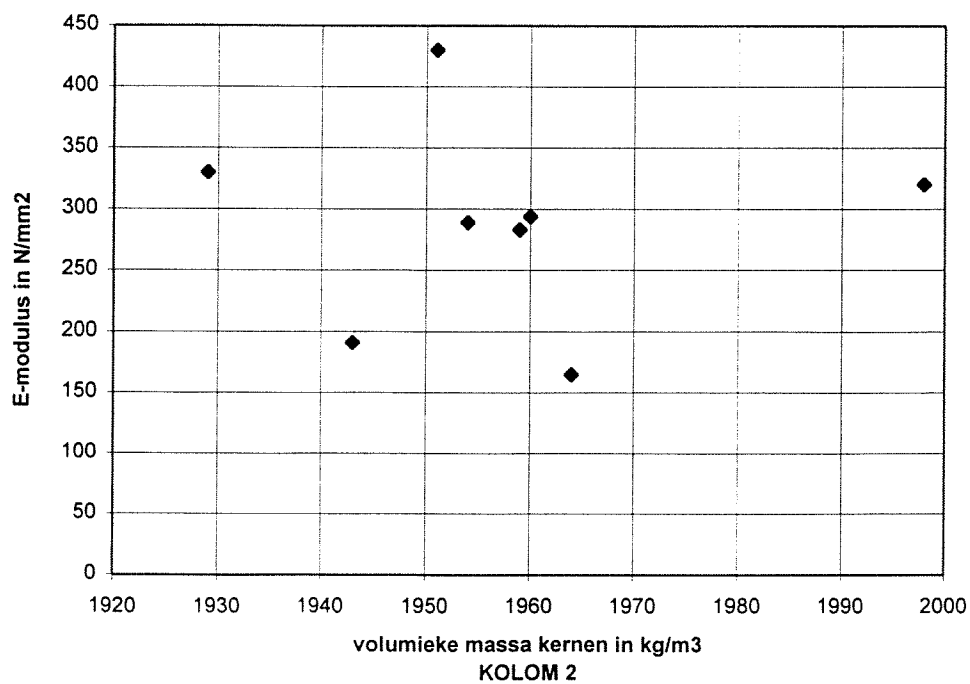
grafiek III.3.15: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 20 horizontaal.



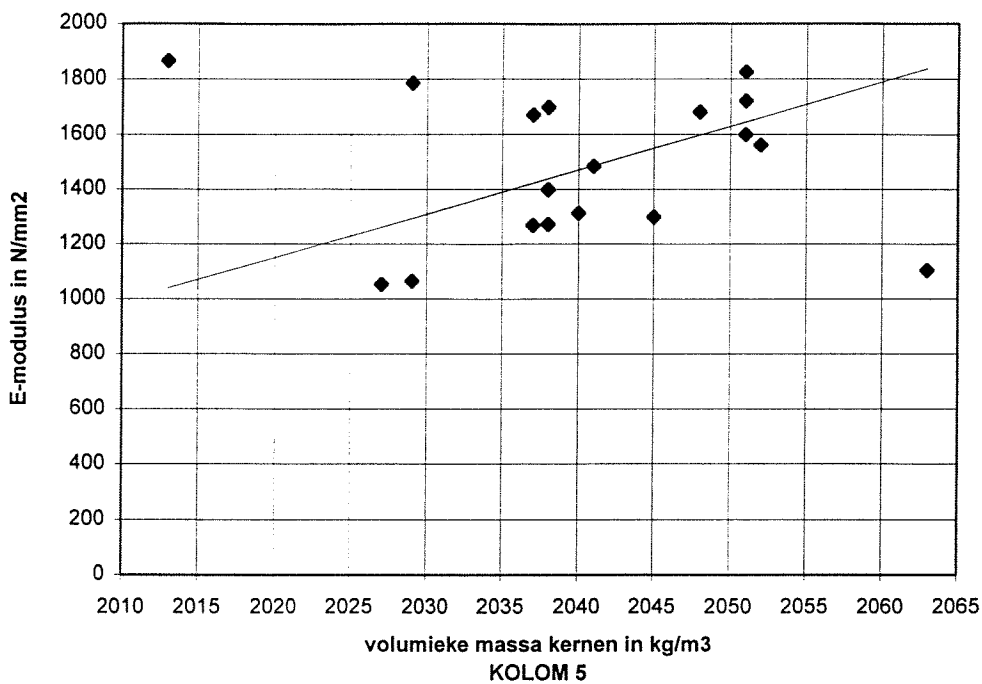
grafiek III.3.16: druksterkte tov volumieke massa kernen, kolom 14, 19/20, 24/25/28 en 20 horizontaal.



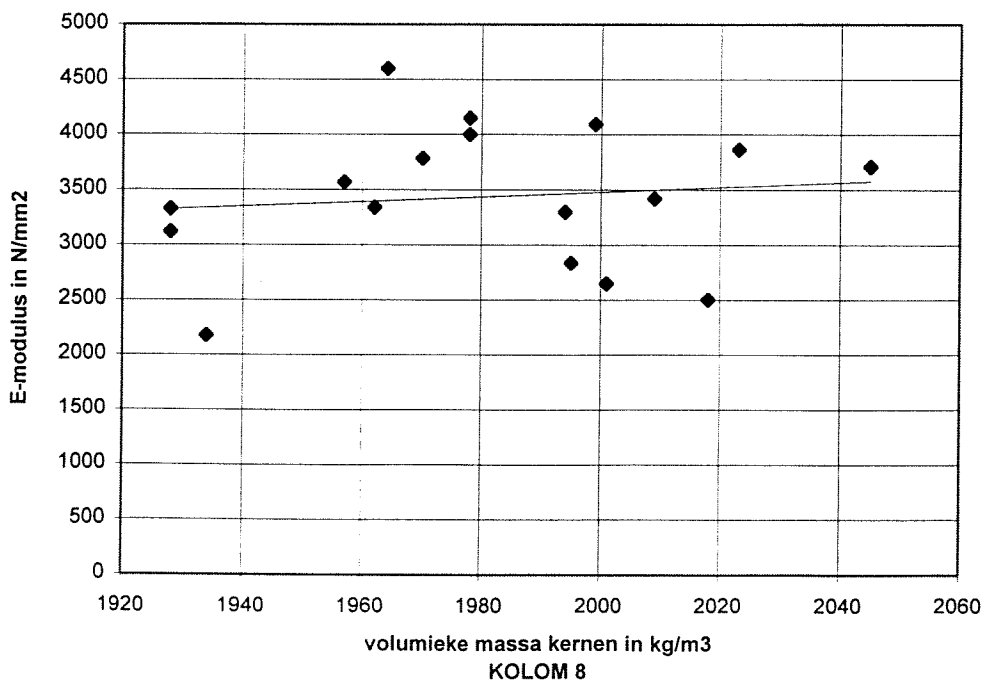
grafiek III.3.17: gemiddelde E-modulus kernen tov gemiddelde volumieke massa.



grafiek III.3.18: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 2.

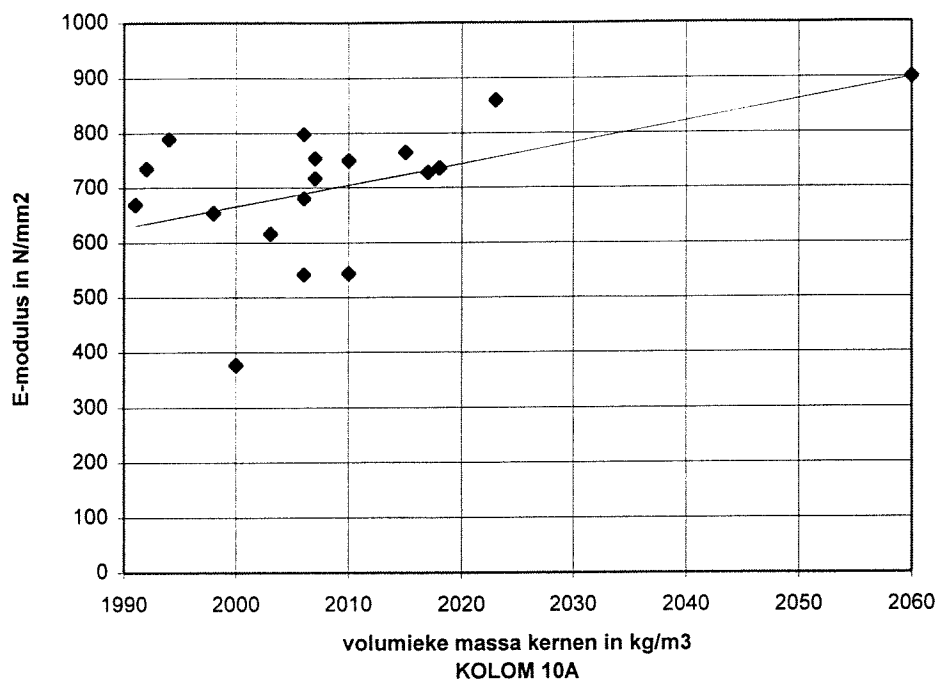


grafiek III.3.19: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 5.

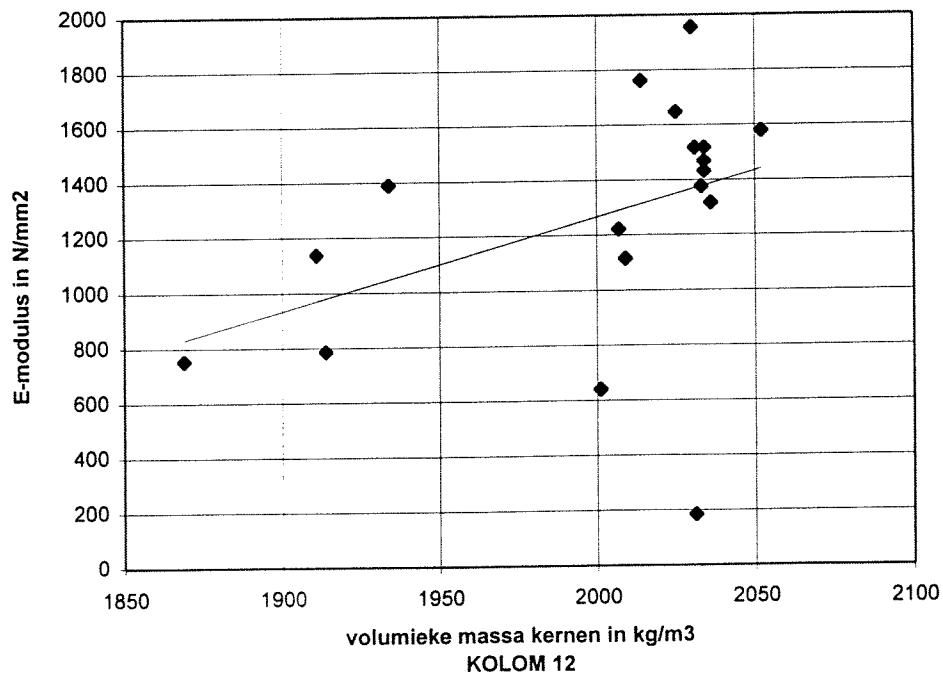


grafiek III.3.20: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 8.

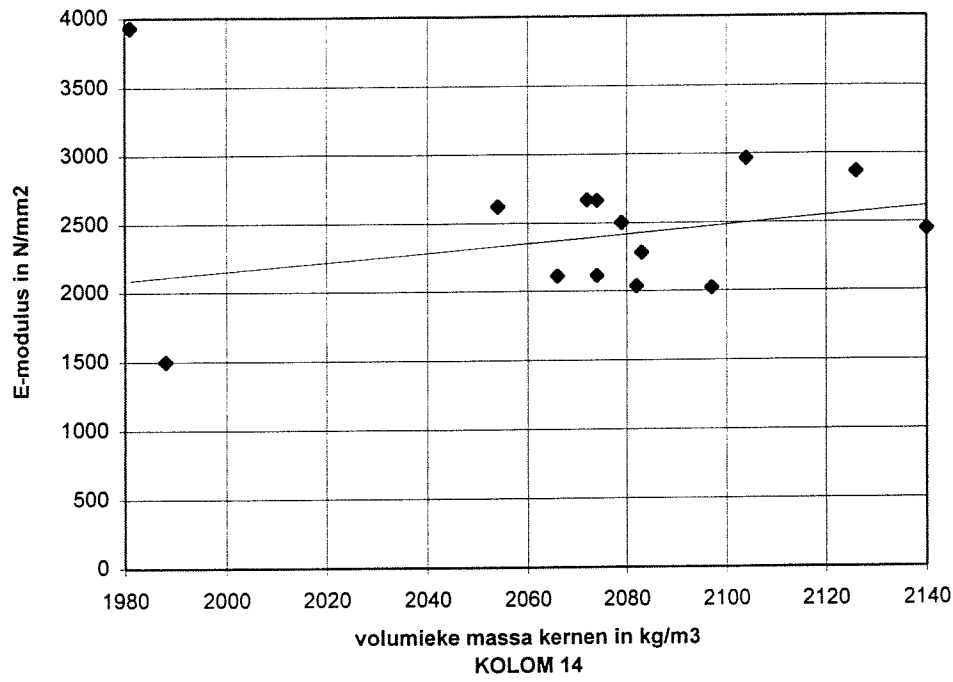




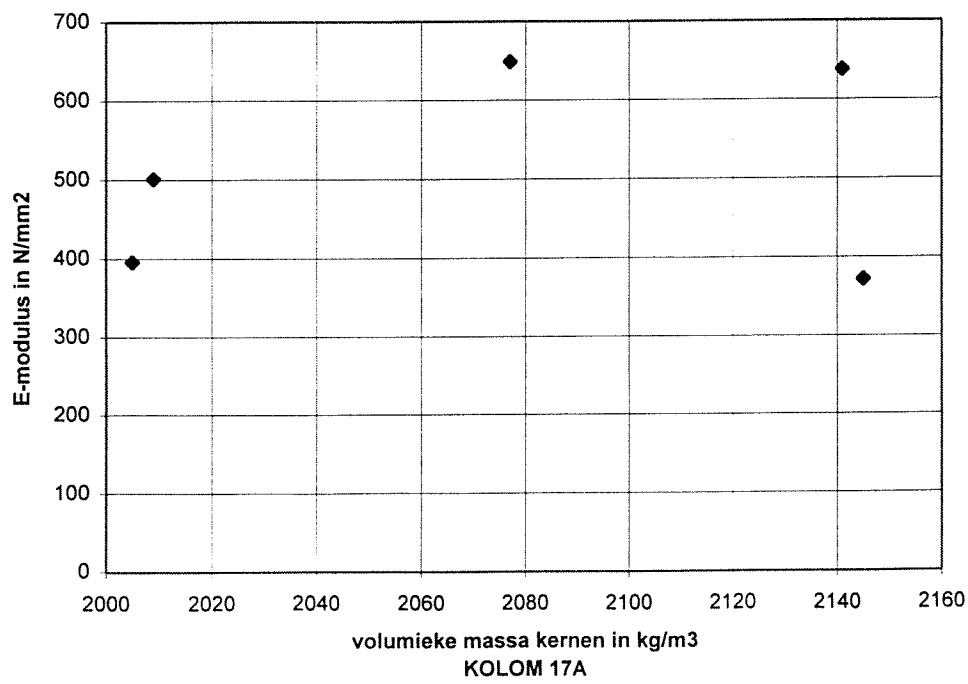
grafiek III.3.21: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 10A.



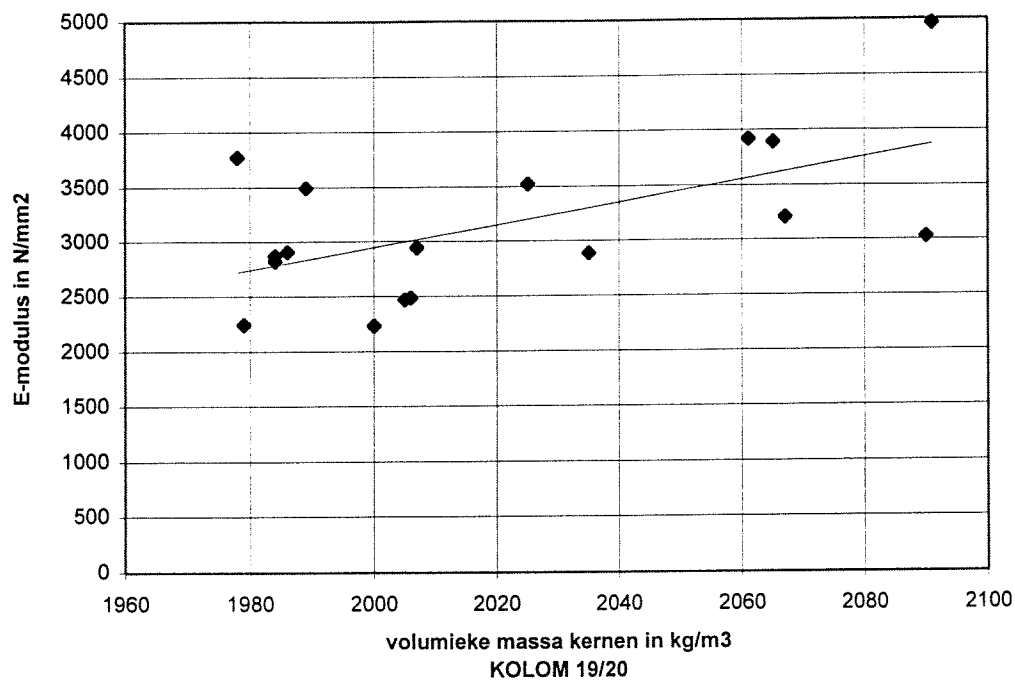
grafiek III.3.22: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 12.



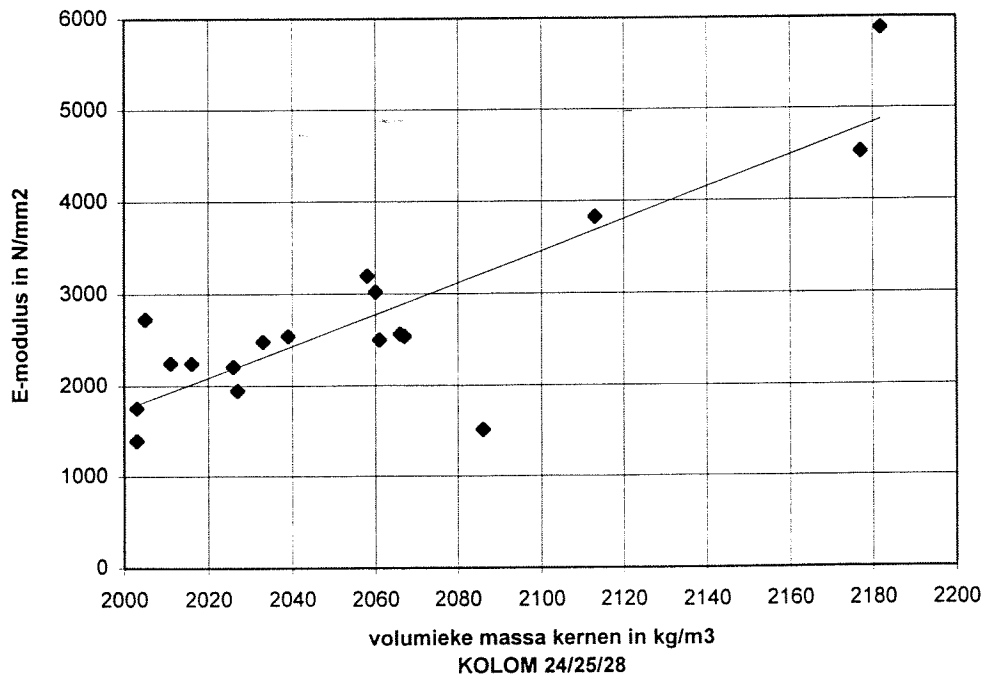
grafiek III.3.23: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 14.



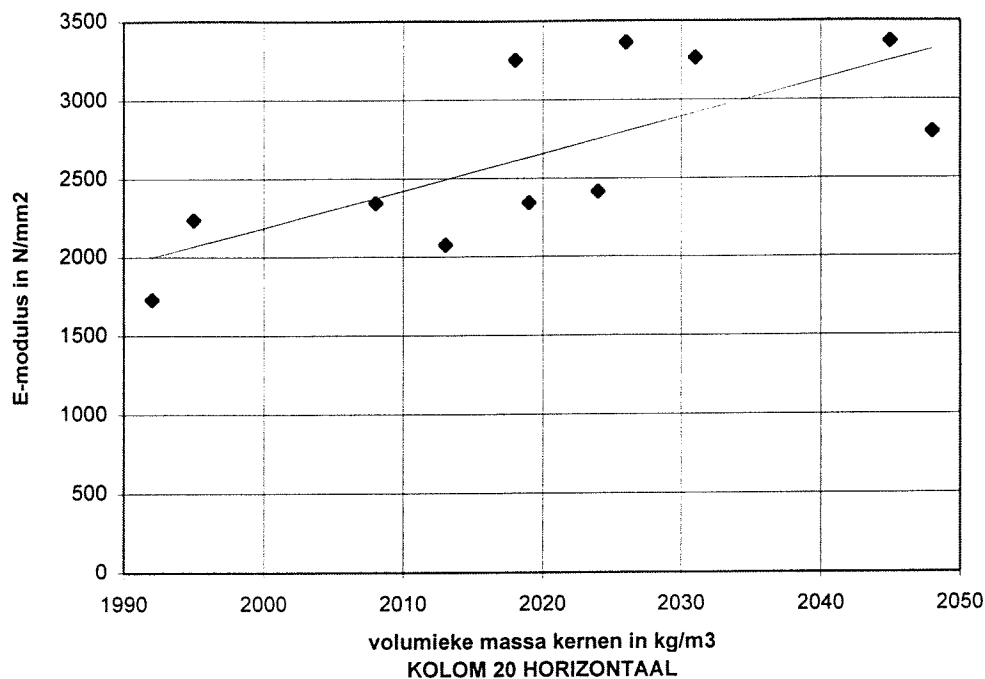
grafiek III.3.24: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 17A.



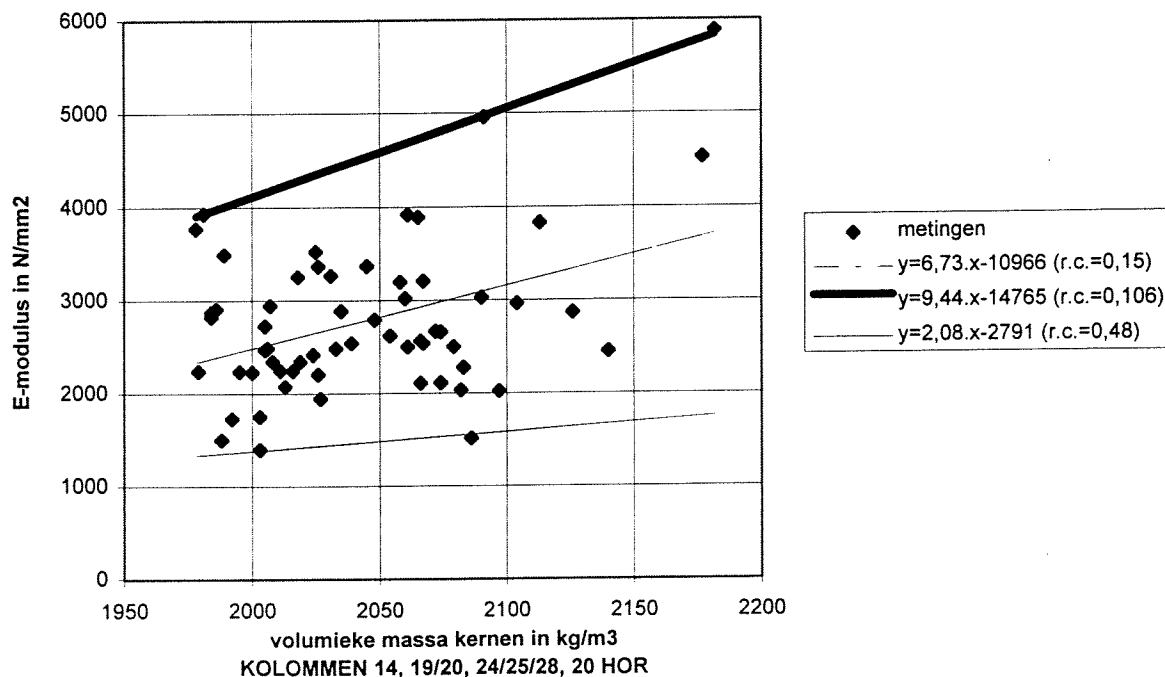
grafiek III.3.25: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 19/20.



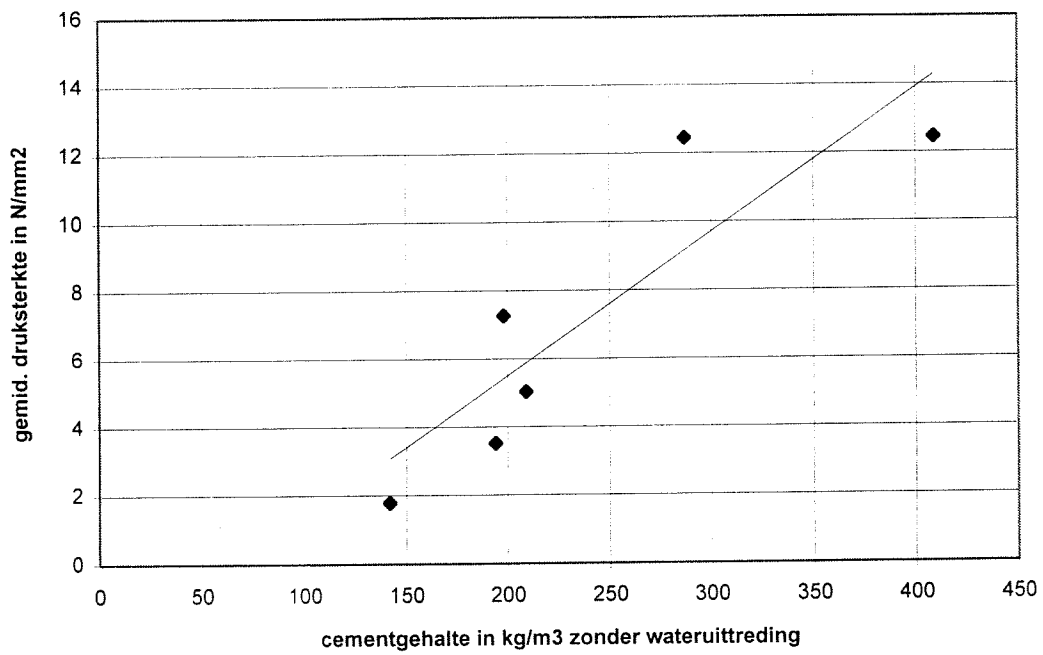
grafiek III.3.26: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 24/25/28.



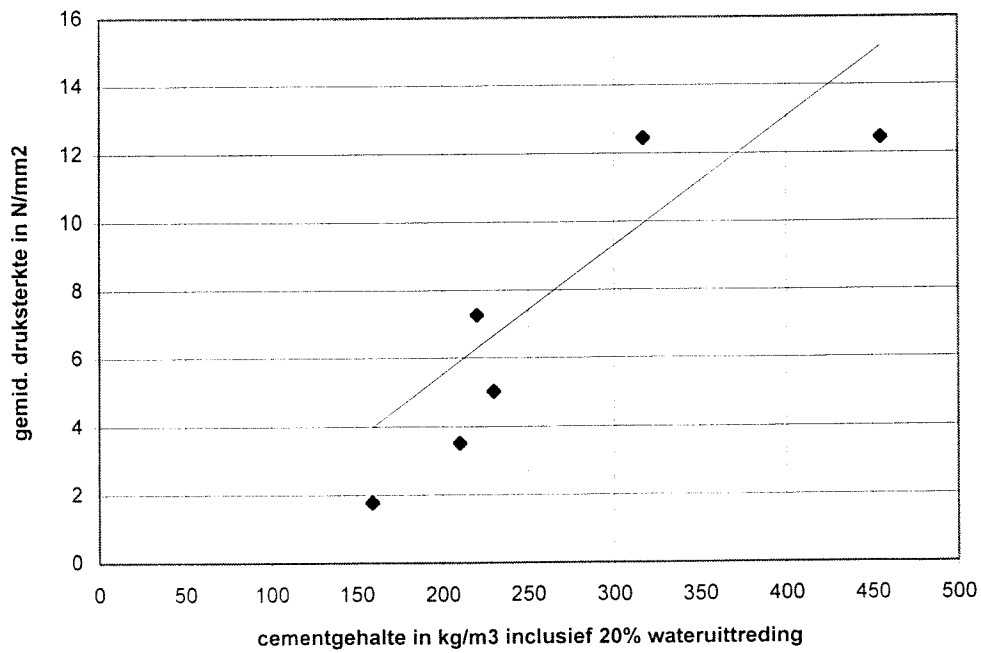
grafiek III.3.27: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 20 horizontaal.



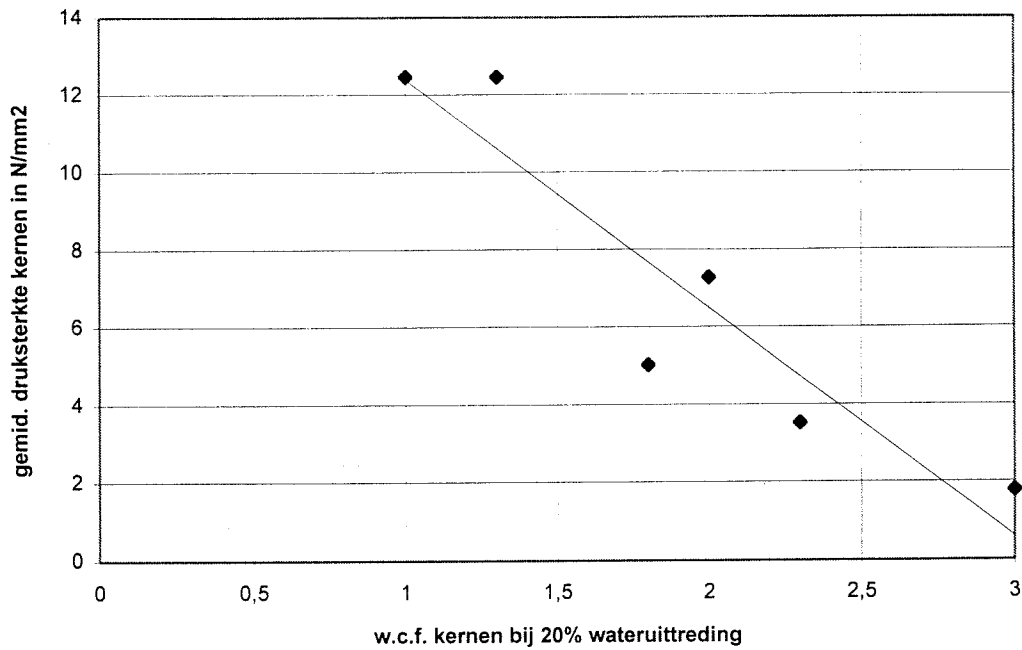
grafiek III.3.28: E-modulus tov volumieke massa kernen, kolom 14, 19/20, 24/25/28 en 20 horizontaal.



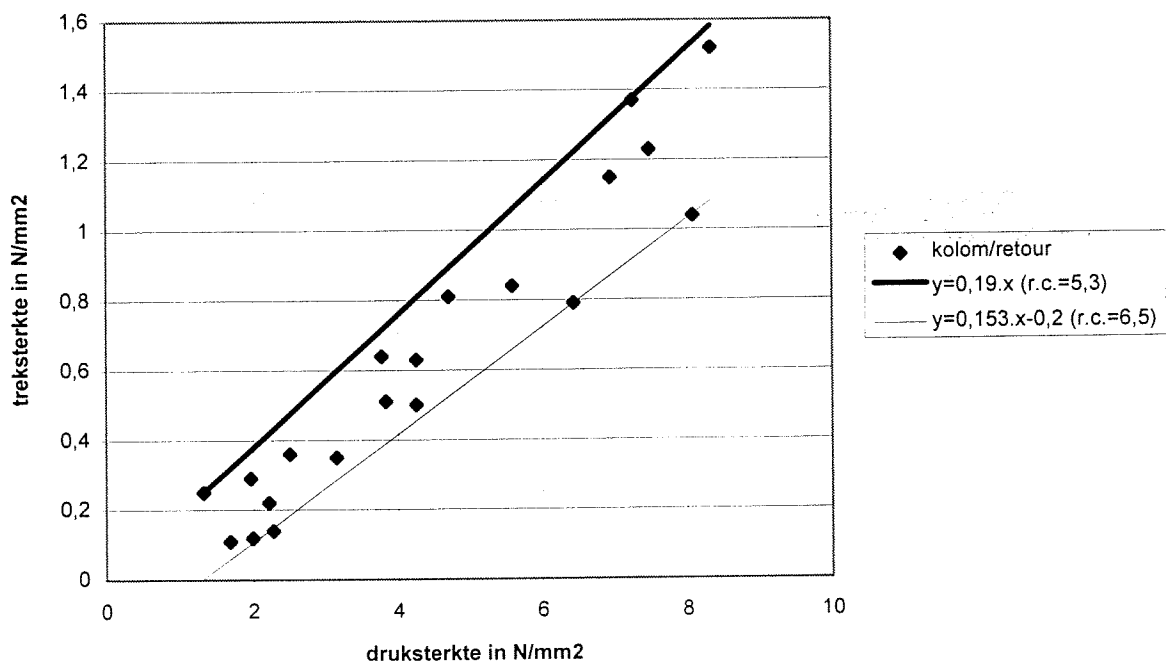
grafiek III.3.29: berekend cementgehalte zonder wateruittreding tov gemiddelde druksterkte kernen.



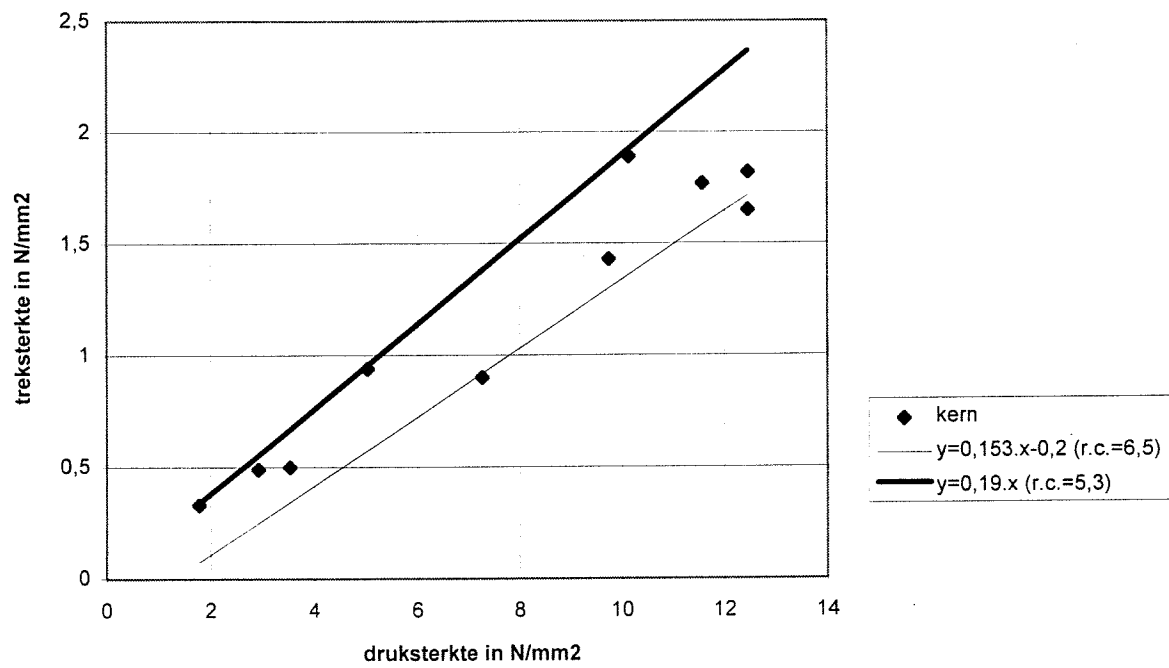
grafiek III.3.30: berekend cementgehalte bij 20% wateruittreding tov gemiddelde druksterkte kernen



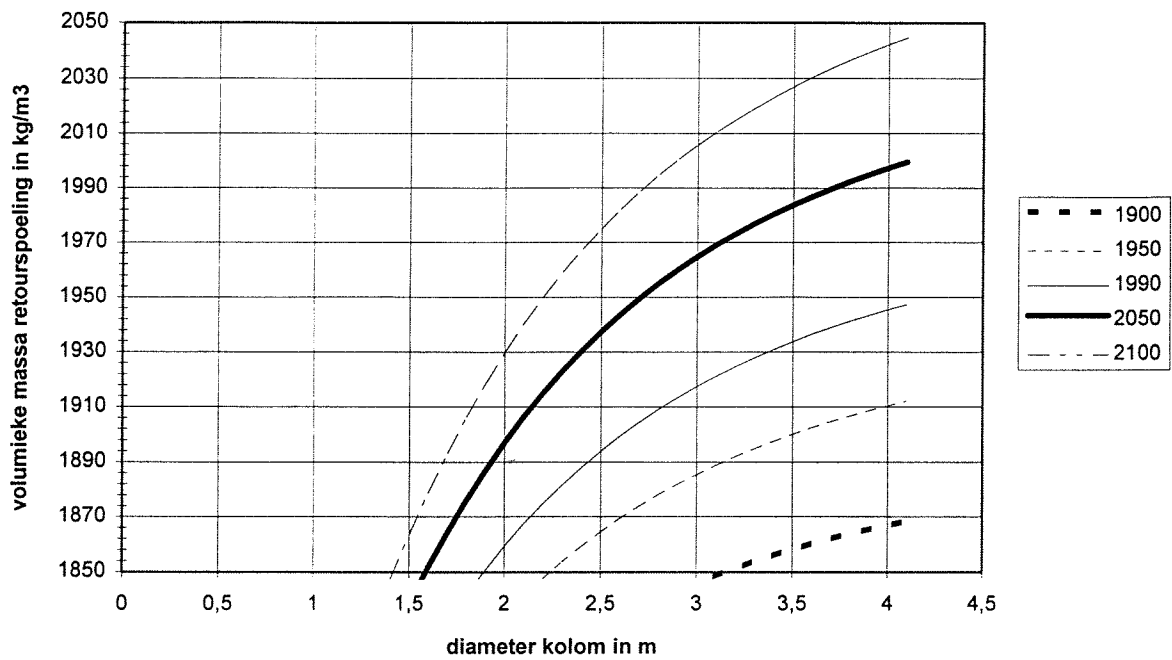
grafiek III.3.31: berekende w.c.f. bij 20% wateruittreding tov gemiddelde druksterkte kernen.



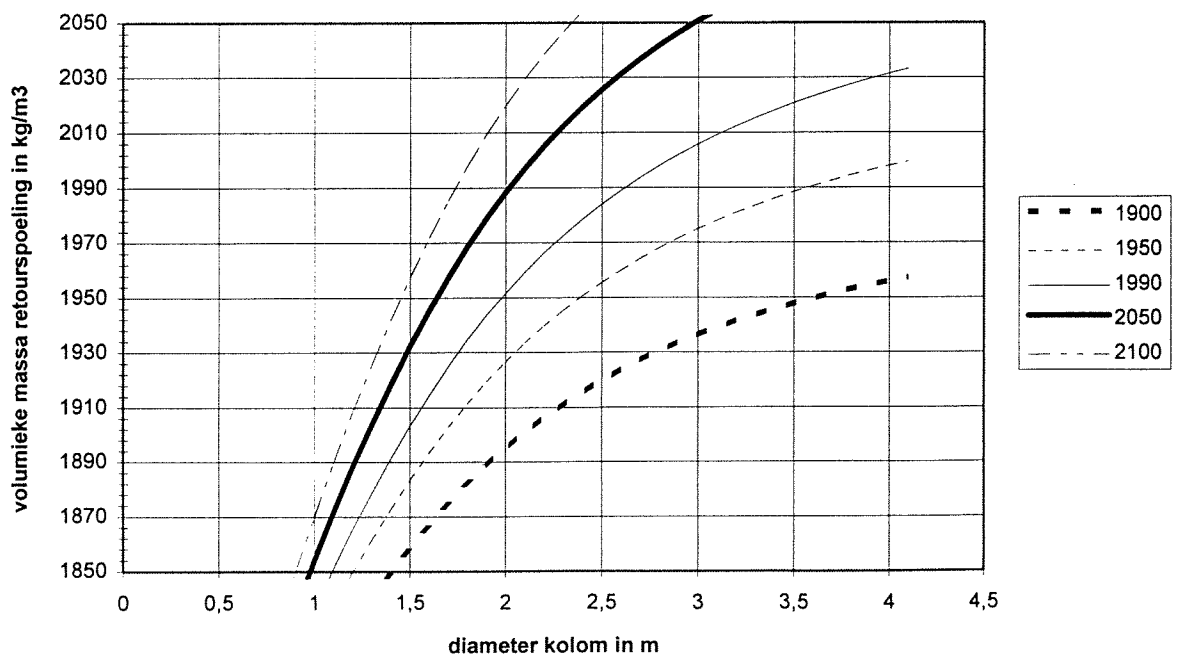
grafiek III.3.32: vergelijking druk- en treksterkte retour- en kolomspoeling.



grafiek III.3.32: vergelijking druk- en treksterkte kernen.

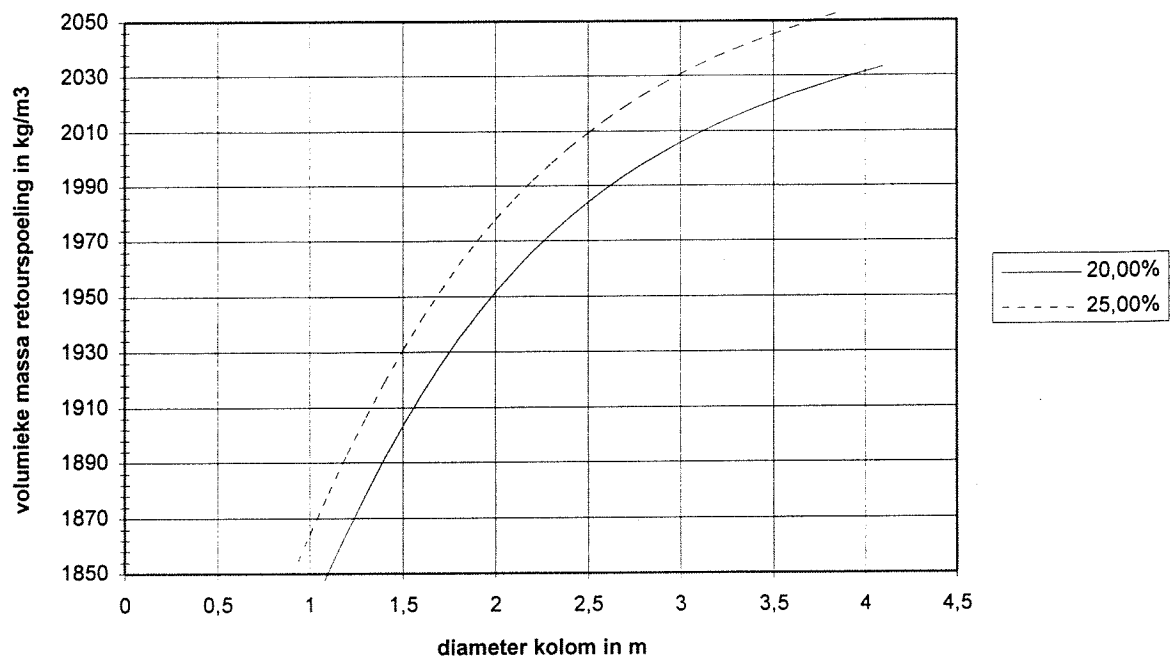


grafiek III.4.1: diameter kolom op basis van volumieke massa retourspoeling zonder wateruittreding, bij verschillende volumieke massa's van het oorspronkelijke bodemmateriaal.

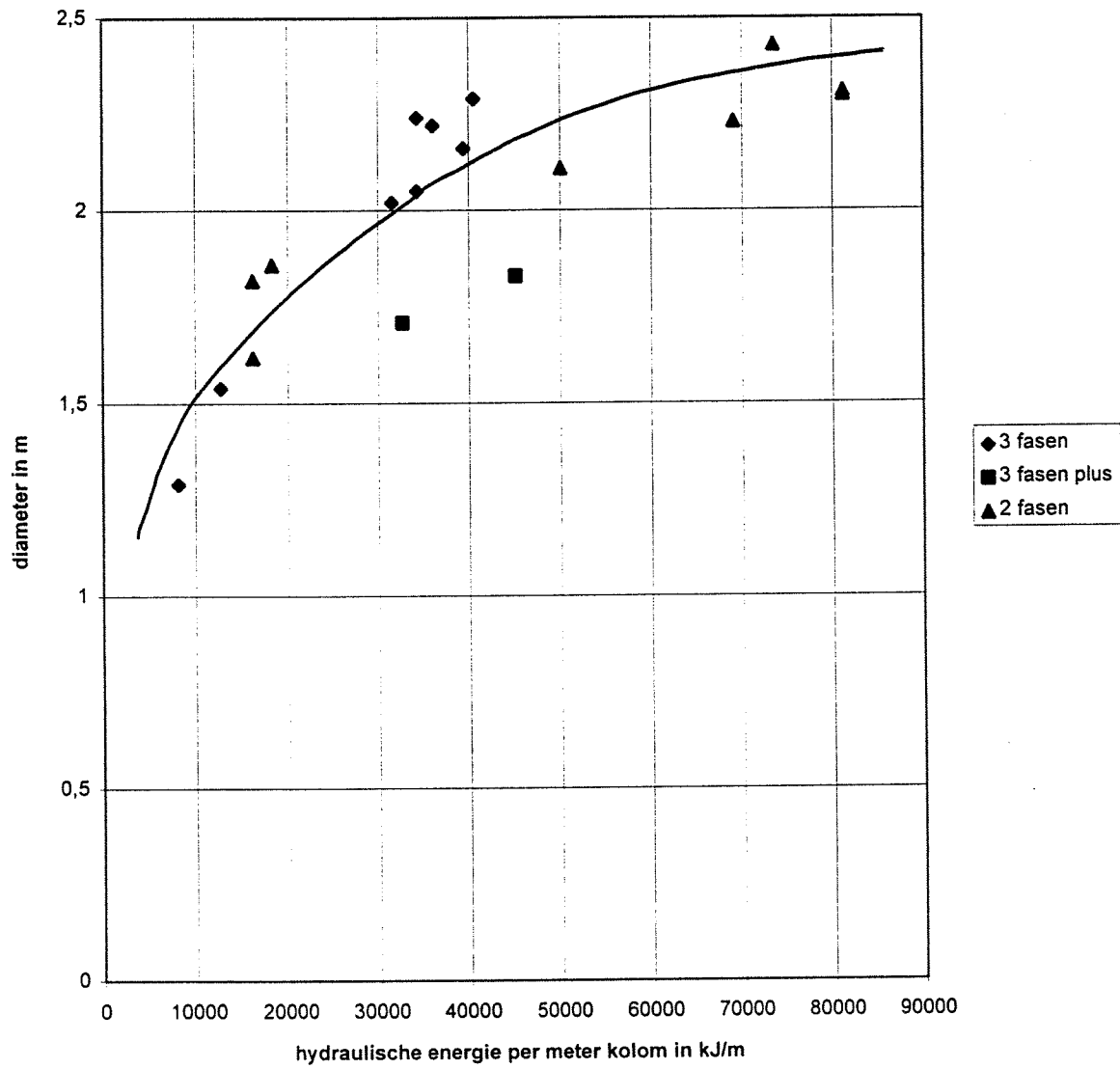


grafiek III.4.2: diameter kolom op basis van volumieke massa retourspoeling met 20% wateruittreding, bij verschillende volumieke massa's van het oorspronkelijke bodemmateriaal.

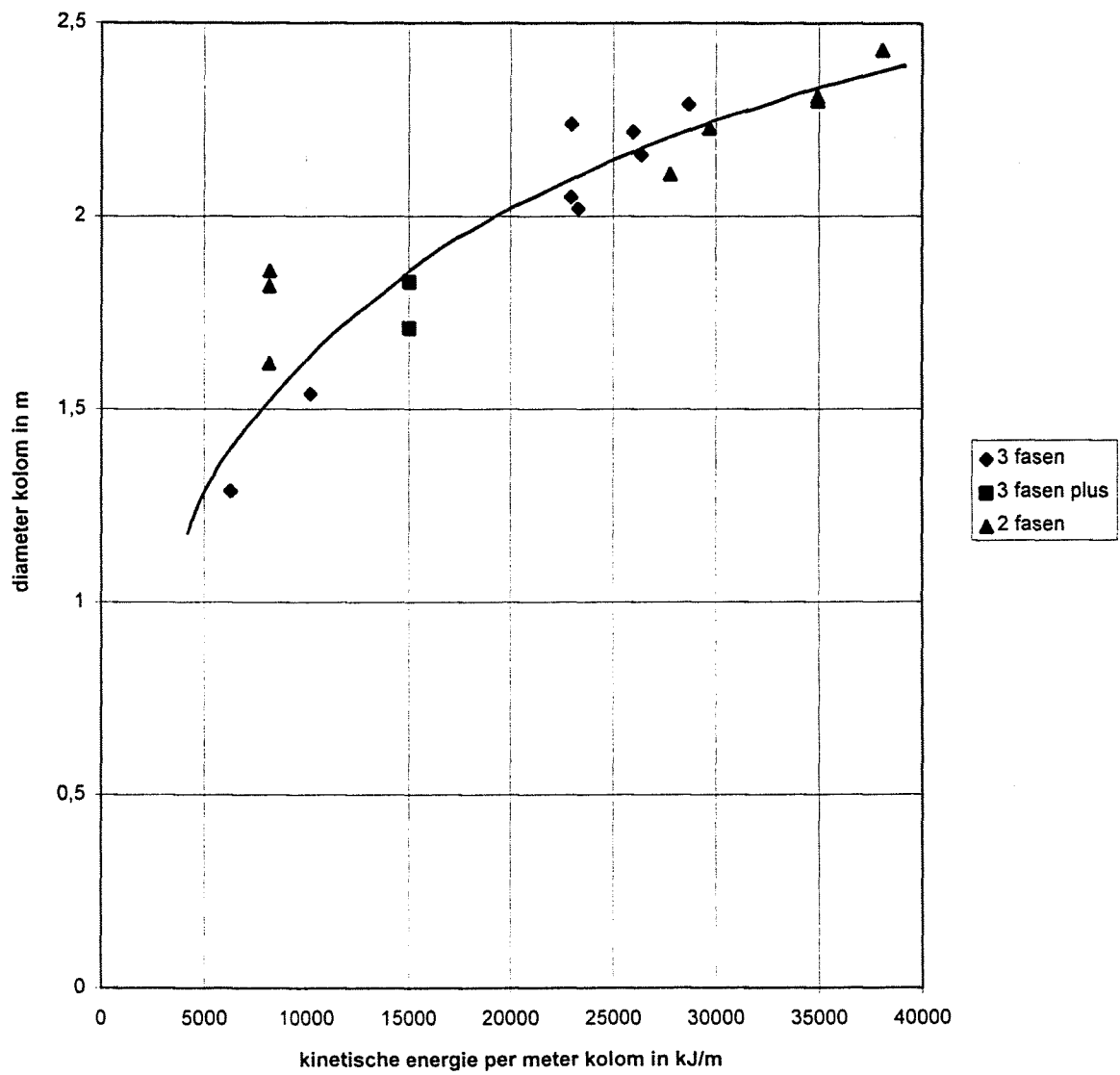




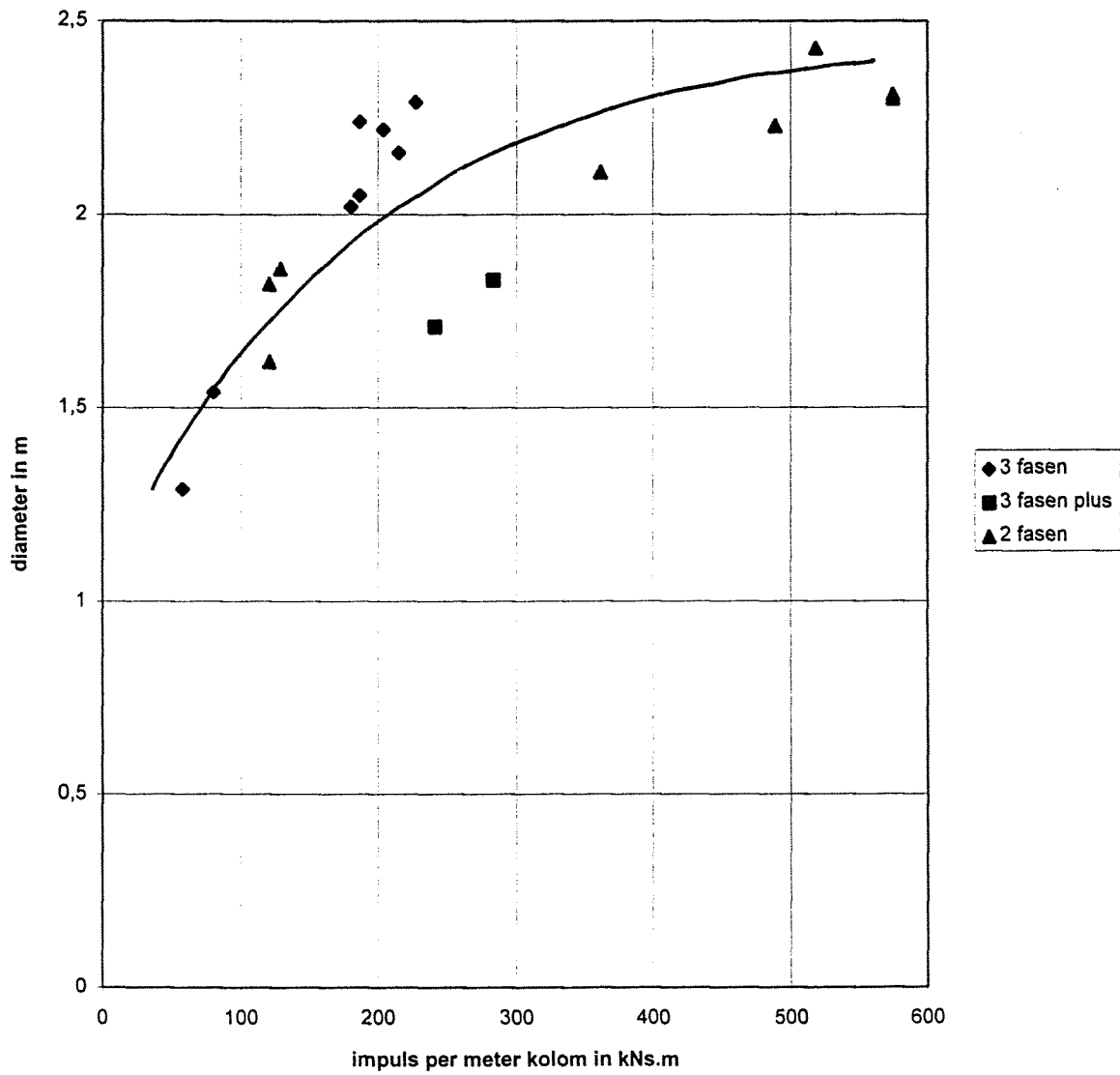
grafiek III.4.3: diameter op basis van volumieke massa retourspoeling bij een volumieke massa van het oorspronkelijke bodemmateriaal van  $1990 \text{ kg/m}^3$  en bij 20% en 25% wateruittreiding.



grafiek III.4.4: diameter kolom tov hydraulische energie per meter kolom.



grafiek III.4.5: diameter kolom tov kinetische energie per meter kolom.



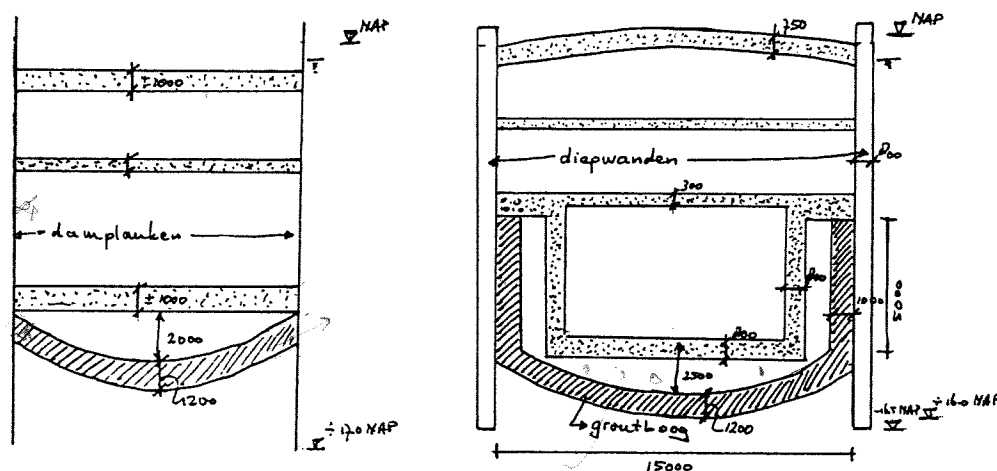
grafiek III.4.6: diameter kolom tov impuls per meter kolom.

**Bijlagen deel V:**  
**Berekening bouwput Souterrain**  
**Den Haag**

Verticaal evenwicht  
Dimensioneren groutboog  
Plaxis-som bouwput Grote Marktstraat

## Verticaal evenwicht

Beschouwd worden een doorsnede van de bouwput in de Kalvermarkt en een doorsnede van de bouwput in de Grote Marktstraat. Voor beide doorsneden geldt dat ze ongeveer bij het diepste ontgravningsniveau zijn gekozen. In de tekeningen hieronder zijn de globale afmetingen in de twee doorsneden gegeven. Er wordt gebouwd volgens de wanden-(vloer)-dakmethode. De verticale wanden (dam- of diepwanden) worden als eerste aangebracht, waarna de groutboog volgt. Vervolgens wordt de dakplaat gestort en wordt de bouwput voor een deel ontgraven, een nieuwe vloer wordt gestort en er wordt verder ontgraven etc.



Voor de berekening van het verticaal evenwicht zijn de volgende gegevens gebruikt:

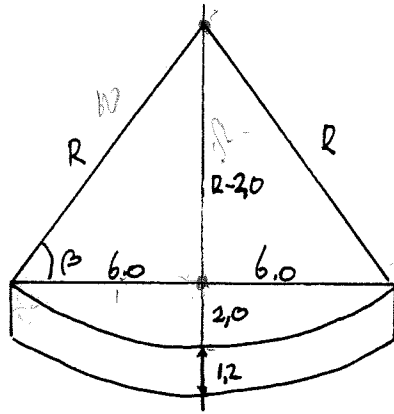
- |  |                          |
|--|--------------------------|
| • volumieke massa grout  | : 20 kN/m <sup>3</sup>   |
| • volumieke massa droog zand                                     | : 16 kN/m <sup>3</sup>   |
| • volumieke massa nat zand                                       | : 19,5 kN/m <sup>3</sup> |
| • volumieke massa beton  | : 24 kN/m <sup>3</sup>   |
| • maximale grondwaterstand buitenzijde bouwput Kalvermarkt       | : NAP -0,70 m            |
| • maximale grondwaterstand buitenzijde bouwput Grote Marktstraat | : NAP -0,65 m            |
| • onderkant boog Kalvermarkt                                     | : NAP -14,85 m           |
| • onderkant boog Grote Marktstraat                               | : NAP -16,0 m            |
| • dikte groutboog  | : 1,20 m                 |

### Kalvermarkt:

Het verticaal evenwicht wordt berekend in de situatie dat de groutboog de maximale opwaartse waterdruk krijgt, dat wil zeggen, als de bouwput is ontgraven tot de onderkant van de diepste vloer en in de definitieve situatie als er van uit wordt gegaan dat de groutboog lek is geraakt en de volledige waterdruk tegen de onderste vloer staat.

Afmetingen:

- |                    |          |
|--------------------|----------|
| • boogdikte        | : 1,20 m |
| • pijl van de boog | : 2,0 m  |
| • breedte bouwput  | : 12,0 m |



boogstraal R:  $\cos^2\beta + \sin^2\beta = 1 \rightarrow R = 10,0 \text{ m}$

Verticaal evenwicht per m <sup>1</sup> bouwput	Waterdruk tegen groutboog	Waterdruk tegen groutboog met veiligheidsfactoren <sup>*4</sup>
Opwaartse waterdruk	1698 kN/m <sup>1</sup>	1698 kN/m <sup>1</sup>
zweel	- <sup>*1</sup>	-
massa groutboog	327 kN/m <sup>1</sup>	294 kN/m <sup>1</sup>
massa grond op boog	262,4 kN/m <sup>1</sup>	236 kN/m <sup>1</sup>
gewicht damplanken	65,3 kN/m <sup>1</sup> <sup>*2</sup>	65,3 kN/m <sup>1</sup>
gewicht dakconstructie	288 kN/m <sup>1</sup>	260 kN/m <sup>1</sup>
maximale wrijving damwanden	2530 kN/m <sup>1</sup> <sup>*3</sup>	1807 kN/m <sup>1</sup>
<b>Resultante naar beneden</b>	<b>1775 kN/m<sup>1</sup></b>	<b>964 kN/m<sup>1</sup></b>

\*1 De zwelspanning is moeilijk te bepalen en gezien de slechts geringe kleilenzen en veeninsluitingen wordt de zweel hier verwaarloosd.

\*2 Feitelijk dient hier het onderwater gewicht genomen te worden van de twee damplanken, gezien de geringe invloed en inhoud van de planken is dit niet gedaan.

\*3

- De maximale positieve kleeft van de damwanden is bepaald met de conusweerstand via:

$$P_{r,max;schacht} = \alpha_s \cdot q_c$$

- De waarde voor  $\alpha_s$  is vastgesteld op 0,0075 (stalen profielen NEN 6743).
- Damwand profiel Larssen 607 K (zie bijlage) oppervlak per m<sup>2</sup> wand: 1,4 m<sup>2</sup>
- Totale wrijvingskracht per plank per m<sup>1</sup>:
  - 2,5 m x 3 MPa x  $\alpha_s$  x 1,4 = 0,0788 MN
  - 3,0 m x 10 MPa x  $\alpha_s$  x 1,4 = 0,315 MN
  - 2,0 m x 6 MPa x  $\alpha_s$  x 1,4 = 0,126 MN
  - 3,5 m x 10 MPa x  $\alpha_s$  x 1,4 = 0,3675 MN
  - 4,0 m x 6 MPa x  $\alpha_s$  x 1,4 = 0,252 MN
  - 2,0 m x 6 MPa x  $\alpha_s$  x 1,4 = 0,126 MN
  - Totaal = 1,265 MN

1265 kN per plank ( 2 planken 2530 kN/m<sup>1</sup>)

\*4 De volgende veiligheidsfactoren zijn aangehouden

waterdruk	1,0
beton-/grout-/grondmassa	0,9
damwand	1,0
wrijving	1,4

In de definitieve fase geldt:

Verticaal evenwicht per m <sup>1</sup> bouwput	Waterdruk tegen vloerconstructie	Waterdruk tegen vloerconstructie met veiligheidsfactoren
Opwaartse waterdruk	1320 kN/m <sup>1</sup>	1320 kN/m <sup>1</sup>
zweel	-	-
massa groutboog	-	-
massa grond op boog	-	-
gewicht damplanken	65,3 kN/m <sup>1</sup>	65,3 kN/m <sup>1</sup>
gewicht dakconstructie	288 kN/m <sup>1</sup>	260 kN/m <sup>1</sup>
gewicht vloerconstructie	288 kN/m <sup>1</sup>	260 kN/m <sup>1</sup>
maximale wrijving damwanden	2530 kN/m <sup>1</sup>	1807 kN/m <sup>1</sup>
<b>Resultante naar beneden</b>	<b>1851 kN/m<sup>1</sup></b>	<b>1072 kN/m<sup>1</sup></b>

Niet meegenomen positieve effecten:

- De groutboog is veel zwaarder uitgevoerd.
- Het gewicht van een tussenwand is verwaarloosd.
- Het gewicht van een circa 1 m hoge gronddekking is niet meegenomen.

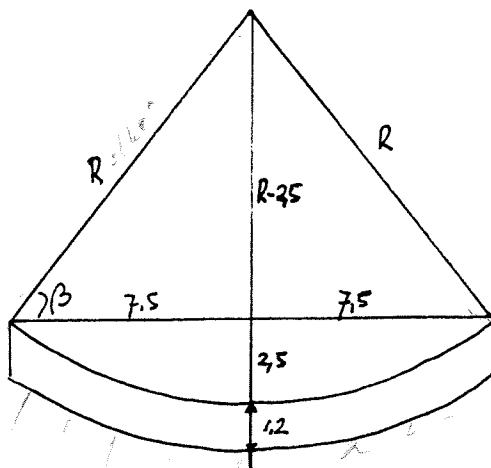
**Conclusie: Verticaal evenwicht gewaarborgd.**

### Grote Marktstraat:

Voor de Grote Marktstraat geschiedt eenzelfde berekening.

Afmetingen:

- |                    |          |
|--------------------|----------|
| • boogdikte        | : 1,20 m |
| • pijl van de boog | : 2,5 m  |
| • breedte bouwput  | : 15,0 m |



boogstraal  $R$ :  $\cos^2\beta + \sin^2\beta = 1 \rightarrow R = 12,5 \text{ m}$



Verticaal evenwicht per m <sup>1</sup> bouwput	Waterdruk tegen groutboog	Waterdruk tegen groutboog met veiligheidsfactoren <sup>*4</sup>
Opwaartse waterdruk	2228 kN/m <sup>1</sup>	2228 kN/m <sup>1</sup>
zweel	-	-
massa groutboog	486 kN/m <sup>1</sup>	437 kN/m <sup>1</sup>
massa verticale groutkolommen	200 kN/m <sup>1</sup>	180 kN/m <sup>1</sup>
massa grond op boog	410 kN/m <sup>1</sup>	369 kN/m <sup>1</sup>
gewicht diepwanden (onder water.)	358 kN/m <sup>1</sup>	323 kN/m <sup>1</sup>
gewicht dak+ vloerconstructie	414 kN/m <sup>1</sup>	373 kN/m <sup>1</sup>
maximale wrijving diepwanden	1968 kN/m <sup>1</sup> <sup>*1</sup>	1406 kN/m <sup>1</sup>
<b>Resultante naar beneden</b>	<b>1608 kN/m<sup>1</sup></b>	<b>860 kN/m<sup>1</sup></b>

\*1

- De maximale positieve kleef van de diepwanden is bepaald met de conusweerstand via:  
 $P_{r,max,schacht} = \alpha_s \cdot q_c$
- De waarde voor  $\alpha_s$  is vastgesteld op 0,006 (palen gemaakt met grondverwijdering NEN 6743).

- Totale wrijvingskracht per wand per m<sup>1</sup>:
 

5,0 m x 10 MPa x $\alpha_s$	= 0,300 MN
6,0 m x 12 MPa x $\alpha_s$	= 0,432 MN
3,0 m x 6 MPa x $\alpha_s$	= 0,108 MN
2,0 m x 6 MPa x $\alpha_s$	= 0,072 MN
2,0 m x 6 MPa x $\alpha_s$	= <u>0,072 MN</u>
Totaal	= 0,984 MN

984 kN per wand ( 2 wanden 1968 kN/m<sup>1</sup>)

De volgende veiligheidsfactoren zijn aangehouden:

waterdruk	1,0
beton-/grout-/grondmassa	0,9
diepwand	0,9
wrijving	1,4

In de definitieve fase geldt:

Verticaal evenwicht per m <sup>1</sup> bouwput	Waterdruk tegen vloerconstructie	Waterdruk tegen vloerconstructie met veiligheidsfactoren
Opwaartse waterdruk	1790 kN/m <sup>1</sup>	1790 kN/m <sup>1</sup>
zweel	-	-
massa groutboog	-	-
massa grond op boog	-	-
gewicht diepwanden (onder water)	358 kN/m <sup>1</sup>	323 kN/m <sup>1</sup>
gewicht dak+ vloerconstructie	414 kN/m <sup>1</sup>	373 kN/m <sup>1</sup>
gewicht onderste vloer	470 kN/m <sup>1</sup>	423 kN/m <sup>1</sup>
maximale wrijving diepwanden	1968 kN/m <sup>1</sup>	1406 kN/m <sup>1</sup>
<b>Resultante naar beneden</b>	<b>1420 kN/m<sup>1</sup></b>	<b>735 kN/m<sup>1</sup></b>

Niet meegenomen positieve effecten:

- De groutboog is veel zwaarder uitgevoerd.
- Het gewicht van een circa 1 m hoge gronddekking is niet meegenomen.

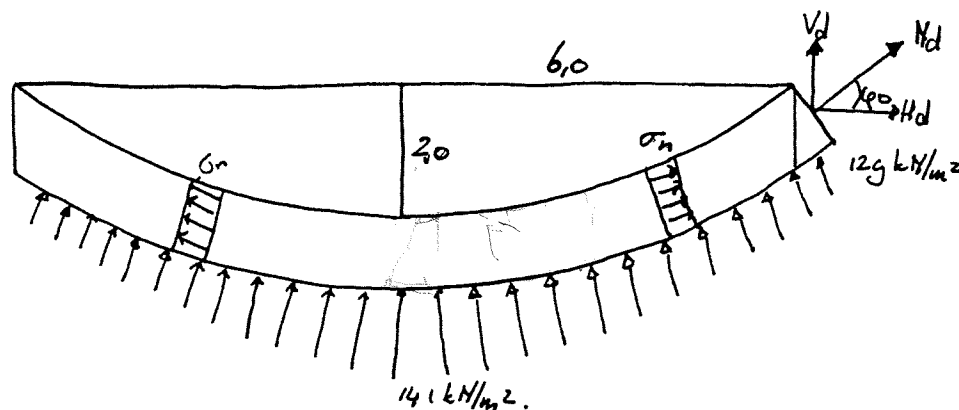
Ook nu conclusie: Verticaal evenwicht gewaarborgd.

## Spanningen in groutboog

Ten gevolge van de opwaartse waterdruk onder de groutboog, ontstaan normaalspanning in de groutboog. De waarde van de normaalspanning is afhankelijk van de straal en de pijl van de boog, en uiteraard van de waterspanningen.

### Kalvermarkt:

De waterspanning op het hoogste punt van de boog bedraagt circa  $129 \text{ kN/m}^2$ , aan de onderzijde  $141 \text{ kN/m}^2$ . Voor de berekening van de normaalspanningen wordt aangenomen dat de waterdruk constant is en circa  $135 \text{ kN/m}^2$  bedraagt. Het eigen gewicht en eventuele geringe bovenbelasting verlagen de normaalspanningen maar worden niet in de berekening meegenomen.



Berekening:

$$\begin{aligned} \text{tg } \phi_0 &= 6,0 / (10,0 - 2,0) = 3/4 \\ V_d &= 6,0 \text{ m} \times 135 \text{ kN/m}^2 = 810 \text{ kN/m}^1 \\ H_d &= 4/3 \times 810 \text{ kN/m}^1 = 1080 \text{ kN/m}^1 \\ N_d &= 1350 \text{ kN/m}^1 \\ \sigma_n &= N_d / (1000 \times 12000) = 1,13 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Of wel  $\sigma_n = q_d \times R / t$

waarin,

$q_d$  de waterdruk

$R$  de straal

$t$  de boogdikte

De gedachte is nu dat in verband met de inhomogeniteit van het groutmateriaal, insluitingen en maatafwijkingen gerekend moet worden met een beperkte dikte van de boog, circa 1/3 deel van de totale hoogte. De normaalspanning bedraagt dan  $3,4 \text{ N/mm}^2$ .

**Grote Marktstraat:**

Voor de Grote Marktstraat geldt eenzelfde soort berekening.

Berekening:

$$\operatorname{tg} \phi_0 = 7,5 / (12,5 - 2,5) = 3/4$$

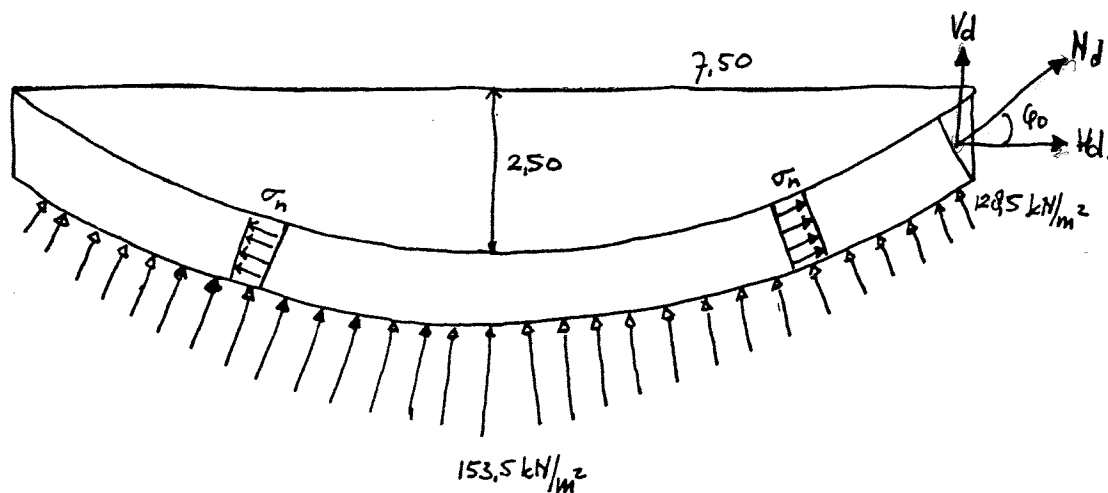
$$V_d = 7,5 \text{ m} \times 142 \text{ kN/m}^2 = 1065 \text{ kN/m}^1$$

$$H_d = 4/3 \times 810 \text{ kN/m}^1 = 1420 \text{ kN/m}^1$$

$$N_d = 1775 \text{ kN/m}^1$$

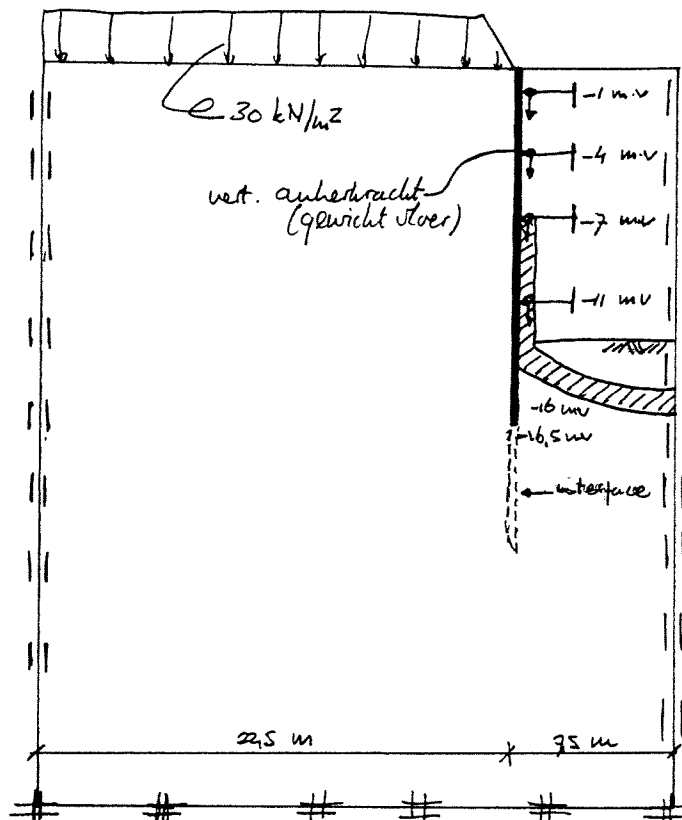
$$\sigma_n = N_d / (1000 \times 12000) = 1,48 \text{ N/mm}^2$$

Indien met de beperkte doorsnede wordt gerekend, is een sterkte van  $4,45 \text{ N/mm}^2$  vereist. Dit sluit aan bij de gestelde rekendruksterkte-eis van  $4,5 \text{ N/mm}^2$ . Als gevolg van stempelkrachten (zie ook PLAXIS-berekening) kunnen momenten in de boog optreden, die de normaalspanningen kunnen verhogen en verminderen.



## Plaxis-som

Met behulp van het computerprogramma PLAXIS is getracht de bouwput in de Grote Marktstraat te berekenen. Daartoe is een elementen mesh gegenereerd met 6 knoeps elementen. De Mesh is zichtbaar op de eerste bijgevoegde uitvoer. Op onderstaande tekening is de bouwput gegeven, zoals deze na de laatste ontgravingsstap eruit zou moeten hebben gezien. Voor de volledigheid volgt hier de invoer



- 6 knoeps elementen
- 6 grondlagen, waarbij laag 6 de groutboog voorstelt (zie uitvoer 2)
- Een bovenbelasting aan de linkerkzijde van  $30 \text{ kN/m}^2$
- Een anker op -1 m mv (dak van de tunnel)
- Een verticale ankerbelasting van  $210 \text{ kN/m}$  ( $110 \text{ kN/m}$  gewicht dak +  $100 \text{ kN/m}$  gewicht opliggende grond) op -1 m mv.
- Een anker op -4 m mv met een verticale belasting van  $70 \text{ kN/m}$
- Een anker op -7 m mv met een verticale belasting van  $110 \text{ kN/m}$
- Een anker op -11 m mv met een verticale belasting van  $70 \text{ kN/m}$
- Een diepwand met aan beide zijde een interface tot een element dieper dan de diepwand

De volgende bouwfasen zijn berekend:

fase	beschrijving	step
1	initiële situatie	0-1
2	aanbrengen bovenbelasting	1-5
3	aanbrengen diepwand	5-6
4	aanbrengen groutboog + verticale groutkolommen	6-8
5	grondwater verlagen naar -4 m mv	8-10
6	ontgraven tot -1 m mv	10-11
7	anker aanbrengen op -1 m mv	11-12
8	ankerbelasting (verticaal) aanbrengen	12-14
9	ontgraven tot -2 m mv	14-17
10	grondwater verlagen tot -7 m mv	17-19
11	ontgraven tot -4 m mv	19-22
12	anker aanbrengen op -4 m mv	22-25
13	ankerbelasting (verticaal) aanbrengen	25-27
14	grondwater verlagen tot -9 m mv	27-29
15	ontgraven tot -7 m mv deel A	29-31
16	grondwater verlagen tot -11 m mv	31-35
17	ontgraven tot -7 m mv deel B	35-37
18	grondwater volledig weg uit bouwput	37-40
19	ontgraven tot -7 m mv deel C	40-43
20	ontgraven tot -7 m mv deel D	43-47
21	anker aanbrengen op -7 m mv	47-51
22	ankerbelasting (verticaal) aanbrengen	51-53
23	ontgraven tot -9 m mv deel A	53-58
24	ontgraven tot -9 m mv deel B	58-60
25	anker aanbrengen op -11,0 m mv	60-65
26	ontgraven tot -9 m mv deel C	65-70
27	ontgraven tot -9 m mv deel D	bezwijken

De invoer van de groutboog gaf in het begin enkele problemen. Uiteindelijk is de boog ingebracht als een non-porous layer. De interface-krachten tussen de boog en de diepwand maken het mogelijk de spanningen in de boog te bestuderen. Helaas echter is ondanks de vele moeite de bouwput in een vroeg stadium bezweken verklaard. De reden hiervan blijken de grote vervormingen te zijn ter plaatse van de groutboog. Dit verschijnsel kon binnen de beschikbare tijd niet ongedaan worden gemaakt.

Het verticaalevenwicht is berekend en in orde. De boogkrachten kunnen ook worden bepaald, door zuiver alleen de boog te beschouwen. Het doel van de PLAXIS-som was te bekijken of de stempelfunctie van de boog grote stempelkrachten zou opleveren, zodanig dat er momenten in de boog zouden kunnen optreden. Gezien de plaats van de boog (bijna onderaan de diepwand) moeten niet al te grote stempelkrachten worden verwacht.

Het bezwijken van de boog in de PLAXIS-som wordt hier vooralsnog toegeschreven aan de parameterkeuze van de groutlaag. Omdat de boog als grondlaag moet worden ingevoerd kunnen niet de werkelijke eigenschappen optimaal in het model worden ingevoerd. Dit ook

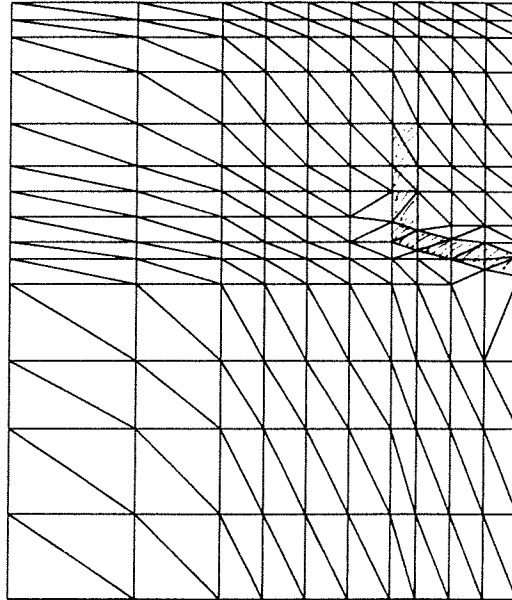
omdat de parameters niet al te groot kunnen worden verkozen ten opzichte van omringende grondlagen.

De uitvoer van de laatste succesvol verlopen ontgravingstap is opgenomen. Duidelijk zichtbaar zijn de grote verplaatsingen boven de boog. De boog barst als het ware op. Dit betekent niet dat voor het werk in Den Haag gevreesd moet worden dat de bouwput zal opbarsten. Het geeft aan dat de bouwput, zoals die in Den Haag wordt uitgevoerd, op deze wijze in PLAXIS moeilijk te berekenen valt als de aandacht uitgaat naar de spanningen in de groutboog.

Mesh Scale [m]

0 4 8 12

Plane Strain



Mesh.  
plaats v.d boog  
en verticale  
kolommen.

Mesh with Gauss points

**PLAXIS**

Professional  
Version 6.30

MARKT3 Step 1

7-2-97

Visser & Smit Bouw B.V.

M-C	No.	Typ.	wdry	Wwet	Permx	Permy	Nu	G	C	phi	psi	KO	TC	Rint
6	NP	20.0	-	0.0E+00	0.0E+00	0.20	>>	>>	0	0	-	Y	1.000	
5	DR	16.0	19.0	0.0E+00	0.0E+00	0.33	7500	1	30	0	-	Y	0.670	
4	DR	11.0	11.0	0.0E+00	0.0E+00	0.40	400	5	20	0	-	Y	0.500	
3	DR	16.5	20.0	0.0E+00	0.0E+00	0.30	20000	1	35	5	-	Y	0.670	
2	DR	16.0	20.0	0.0E+00	0.0E+00	0.30	10000	1	30	0	-	Y	0.670	
1	DR	16.9	20.0	0.0E+00	0.0E+00	0.30	40000	1	35	5	-	Y	1.000	

groutlaag

Material data sets

**PLAXIS**

Professional  
Version 6.30

MARKT3 Step 1

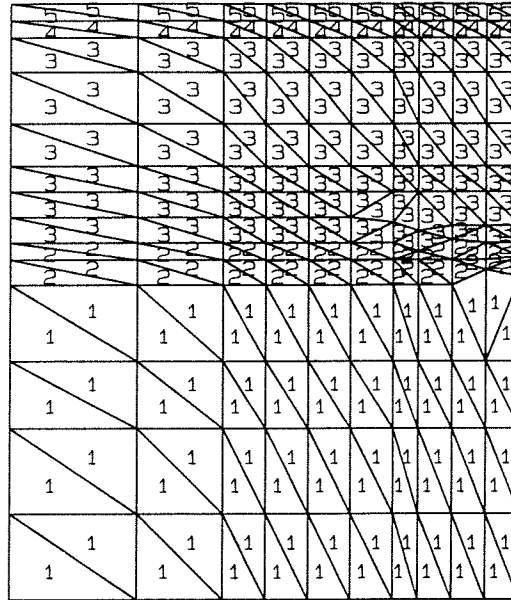
7-2-97

Visser & Smit Bouw B.V.

Mesh Scale [m]

0 4 8 12

Plane Strain



grondlagen in  
Initiele situatie

Mesh with material sets

**PLAXIS**

Professional  
Version 6.30

MARKT3 Step 1

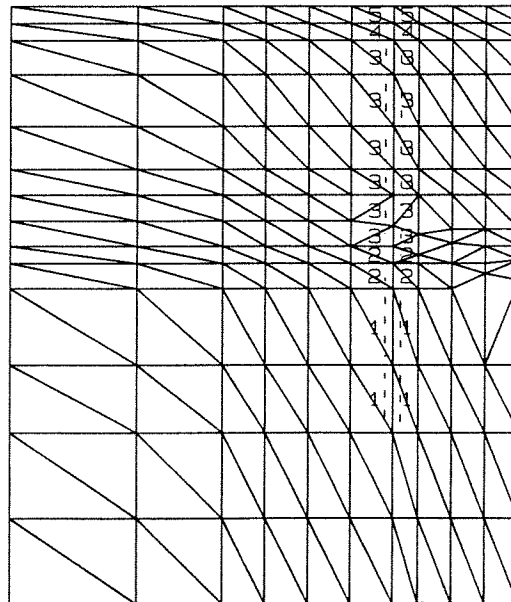
7-2-97

Visser & Smit Bouw B.V.

Mesh Scale [m]

0 4 8 12

Plane Strain



interfaces

Mesh with material sets

**PLAXIS**

Professional  
Version 6.30

MARKT3 Step 1

7-2-97

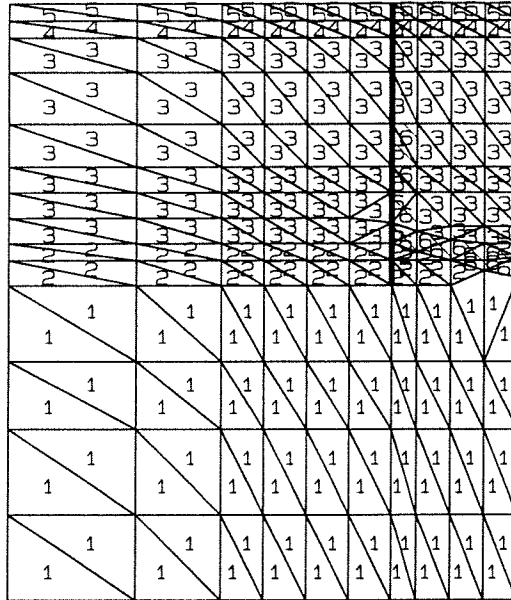
Visser & Smit Bouw B.V.



Mesh Scale [m]

Plane Strain

0 4 8 12



diepwand + groutboog  
en kolommen zijn  
aangebracht.

Mesh with material sets

**PLAXIS**

Professional  
Version 6.30

MARKT3 Step 8

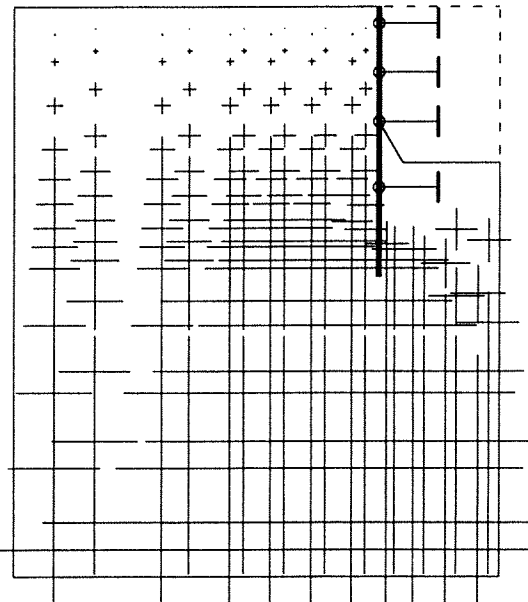
7-2-97

Visser & Smit Bouw B.V.

Mesh Scale [m]

Plane Strain

0 4 8 12



waterspanning bij  
bezwijken.

Active pore pressure

Extreme pore pressure  $-3.32E+02$  kN/m<sup>2</sup>

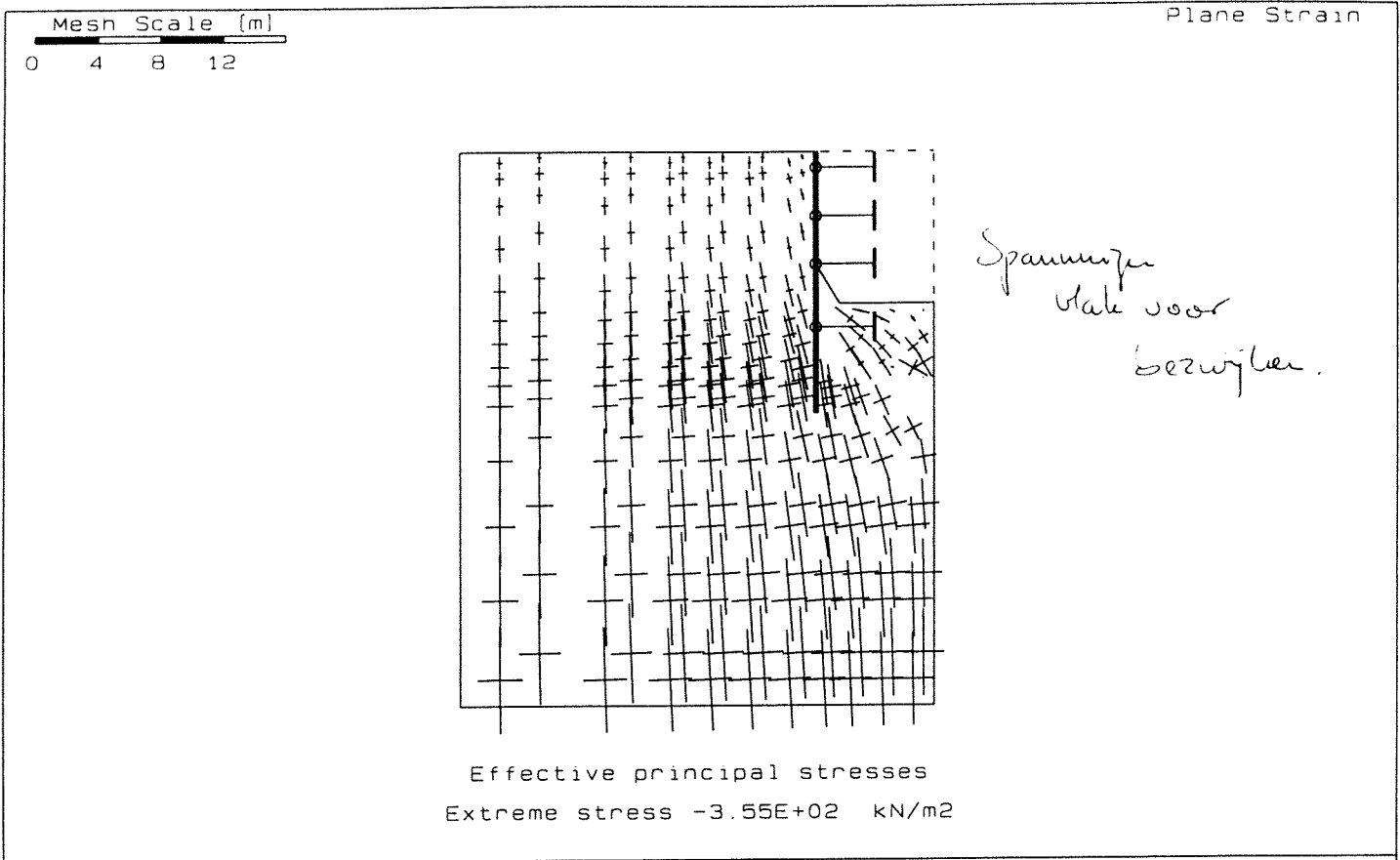
**PLAXIS**

Professional  
Version 6.30

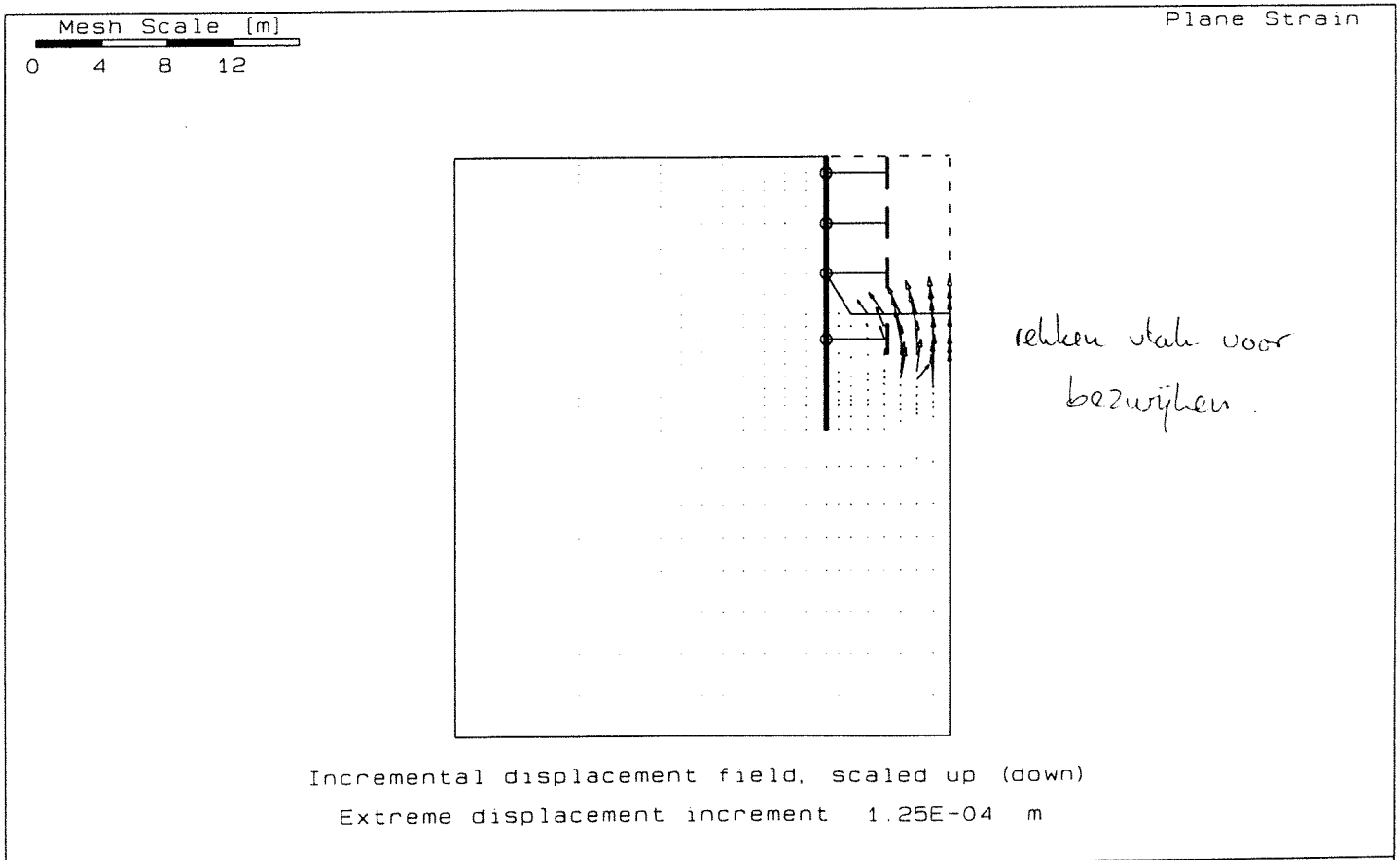
MARKT3 Step 70

7-2-97

Visser & Smit Bouw B.V.



<b>PLAXIS</b> Professional Version 6.30			
	MARKT3 Step 70	7-2-97	Visser & Smit Bouw B.V.

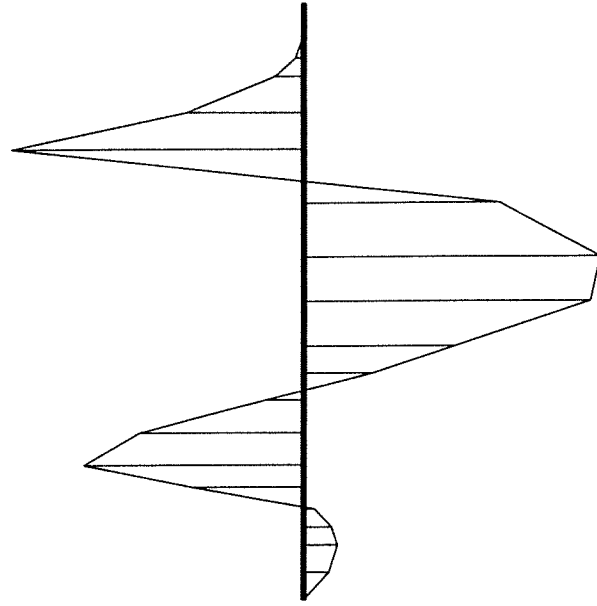


<b>PLAXIS</b> Professional Version 6.30			
	MARKT3 Step 70	7-2-97	Visser & Smit Bouw B.V.

Mesh Scale [m]

Plane Strain

0 2 4 6



laatste voltooide  
 stap.  
 momenten  
 in diepwand

Moments in beam chain 1  
 Extreme moment  $-1.01E+02$  kNm/m

**PLAXIS**

Professional  
Version 6.30

MARKT3 Step 70

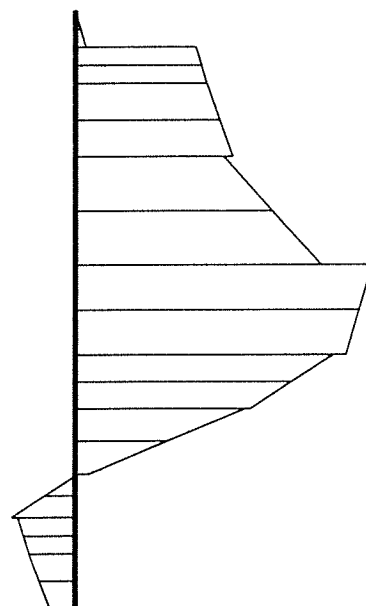
7-2-97

Visser & Smit Bouw B.V.

Mesh Scale [m]

Plane Strain

0 2 4 6



normaal kr. in diepwand

Normal forces in beam chain 1  
 Extreme force  $-5.76E+02$  kN/m

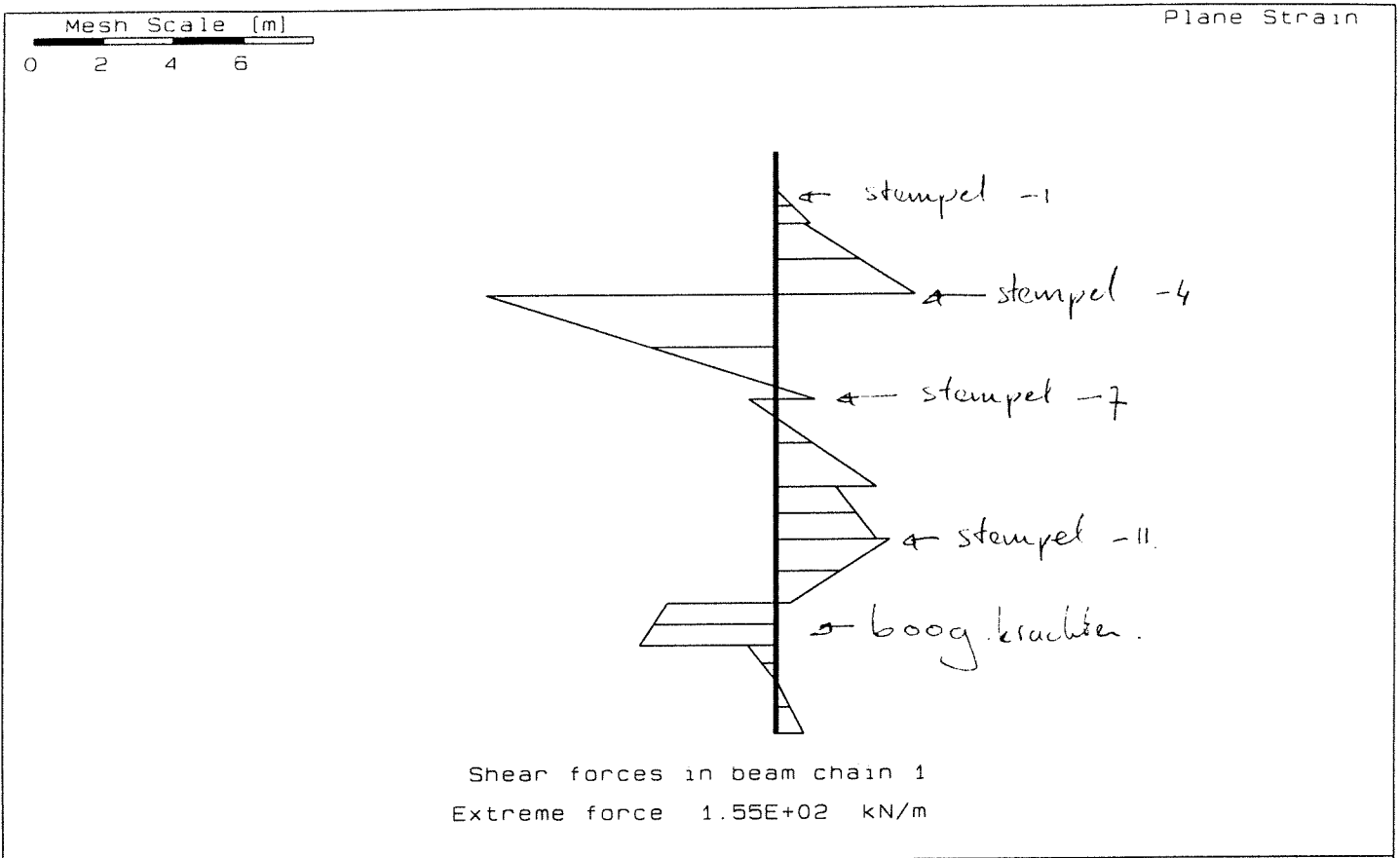
**PLAXIS**

Professional  
Version 6.30

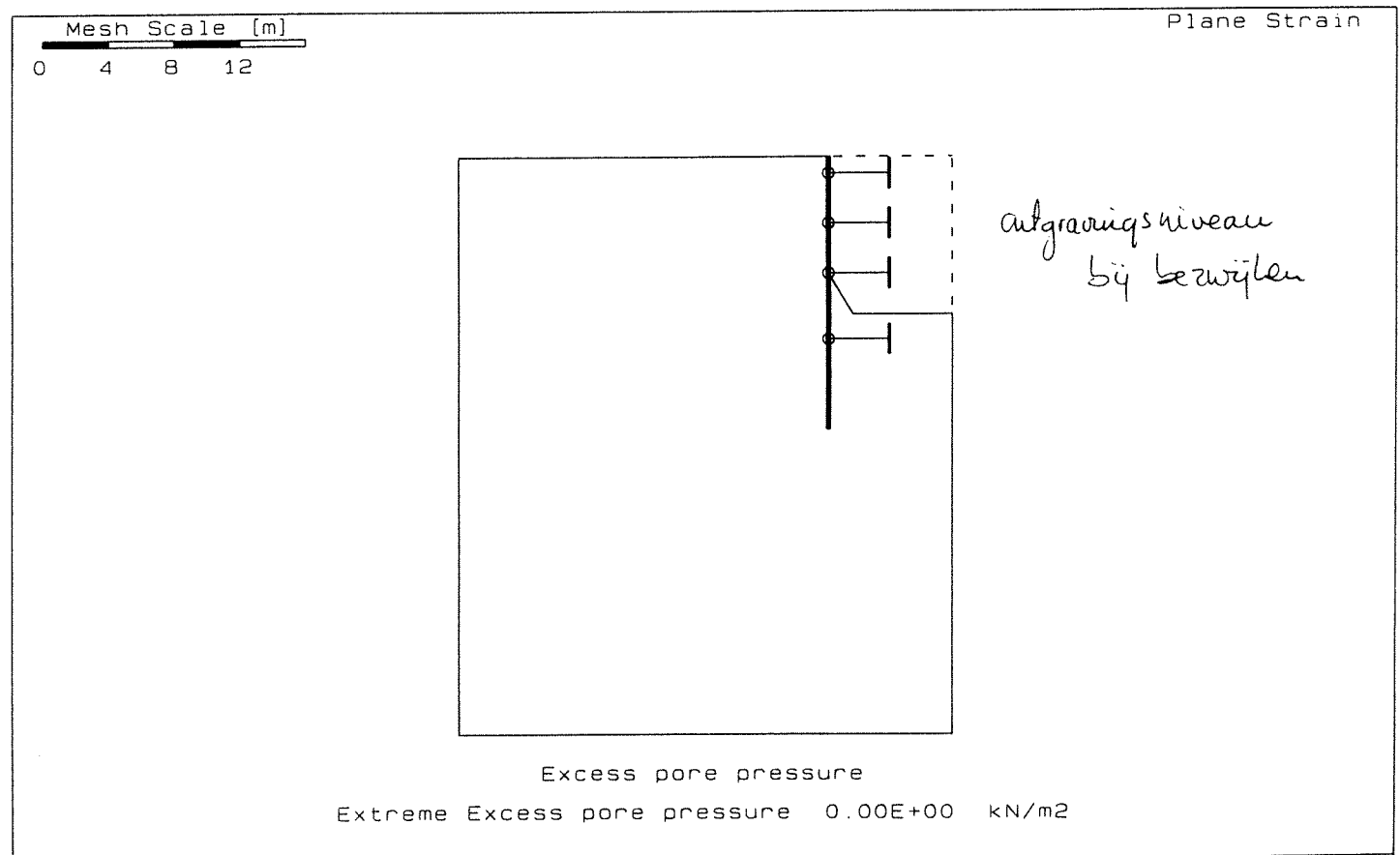
MARKT3 Step 70

7-2-97

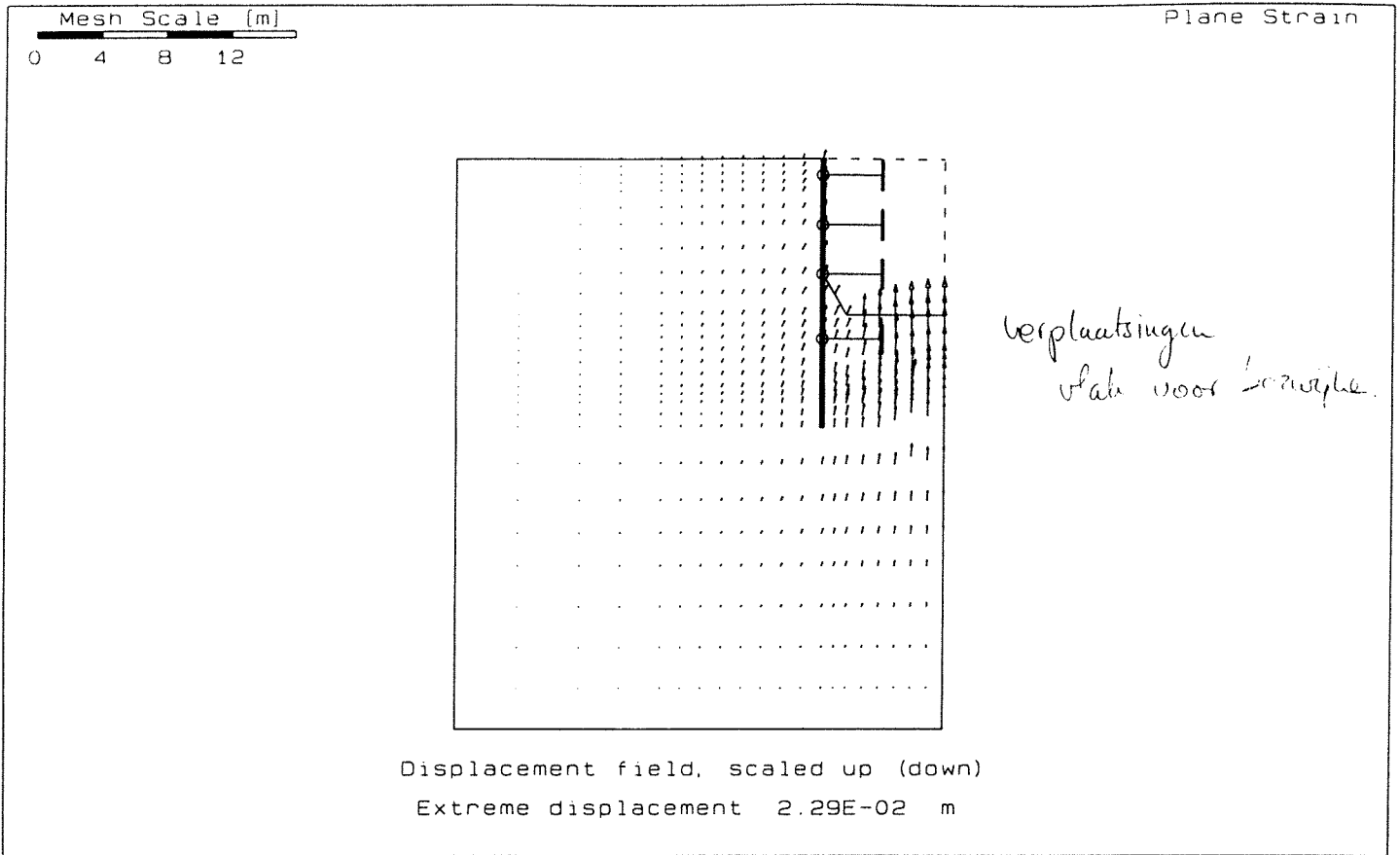
Visser & Smit Bouw B.V.



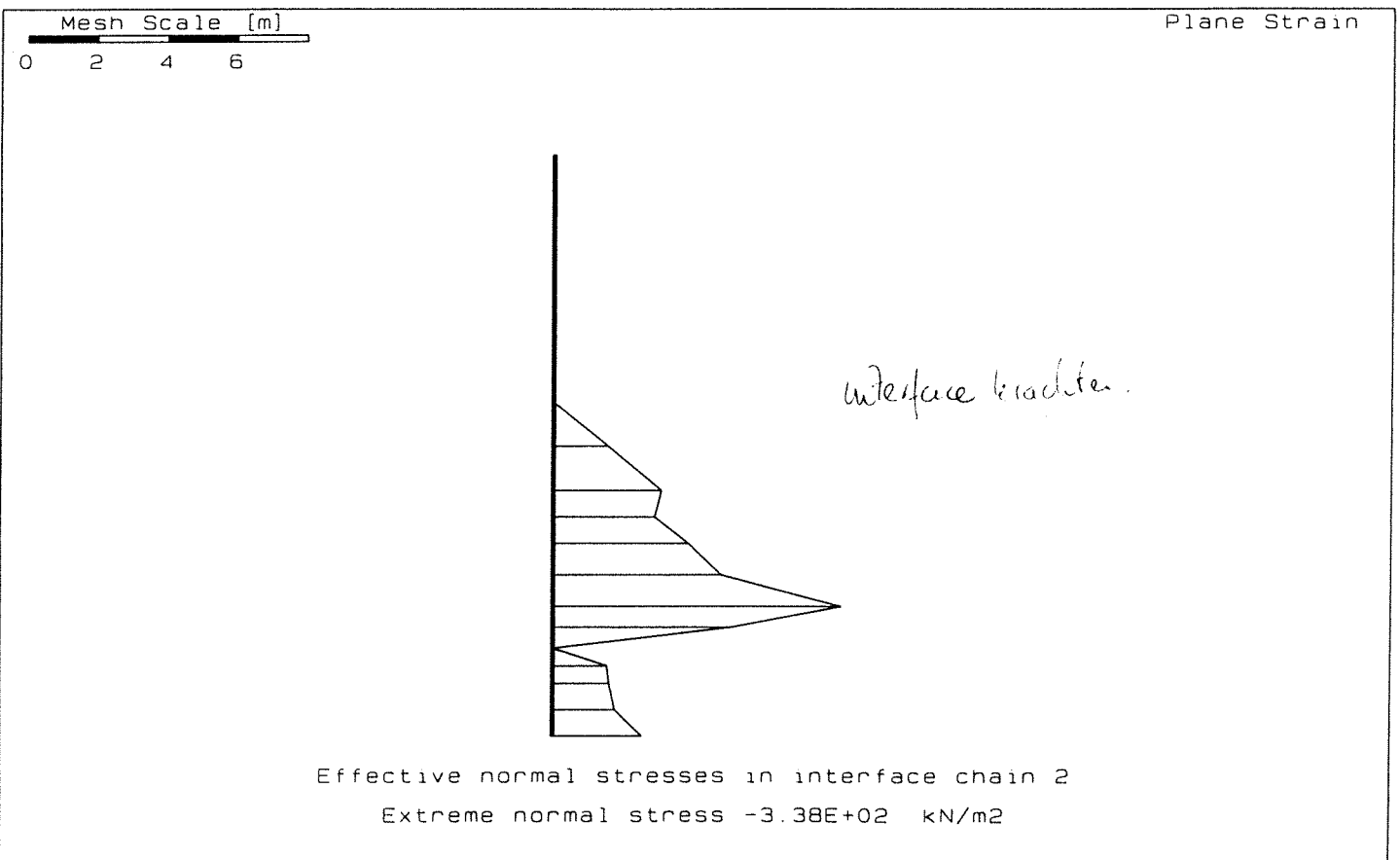
<b>PLAXIS</b> Professional Version 6.30			
	MARKT3 Step 70	7-2-97	Visser & Smit Bouw B.V.



<b>PLAXIS</b> Professional Version 6.30			
	MARKT3 Step 70	7-2-97	Visser & Smit Bouw B.V.



<b>PLAXIS</b> Professional Version 6.30			
	MARKT3 Step 70	7-2-97	Visser & Smit Bouw B.V.

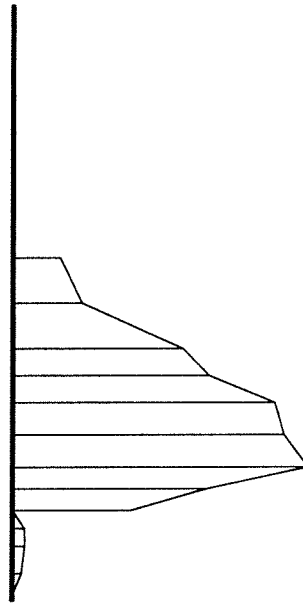


<b>PLAXIS</b> Professional Version 6.30			
	MARKT3 Step 70	7-2-97	Visser & Smit Bouw B.V.

Mesh Scale [m]

Plane Strain

0 2 4 6



*interfaces krachten.*

Shear stresses in interface chain 2  
Extreme shear stress  $-2.25E+02$  kN/m<sup>2</sup>

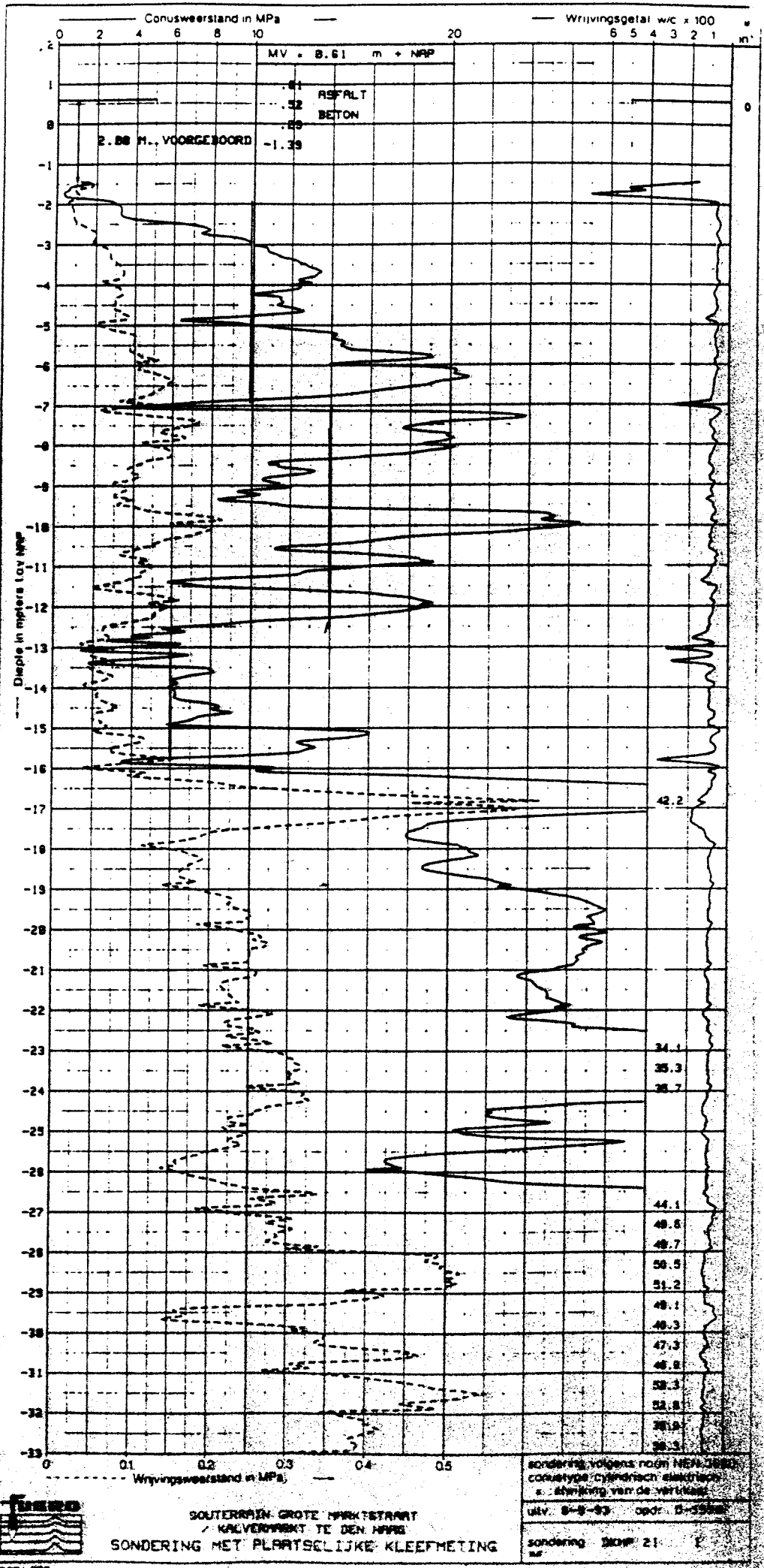
**PLAXIS**

Professional  
Version 6.30

MARKT3 Step 70

7-2-97

Visser & Smit Bouw B.V.



SOUTERRAÏN GROTE MARKTSTRAAT  
 / KALVERBEEK TE DEN HAAG  
 SONDERING MET PLAATSELIJKE KLEEFMETING

sondering volgens norm NEN 5880  
 conus-type cilindrisch elektrische  
 s. afwijking van de verticaal  
 ultv. 8-9-93 opdr. B-3598  
 sondering 2107 21

