

Stromingsgedrag Groutinjectie Delft Cluster

A. M. Talmon	(WL)
L. Aanen	(WL)
W.H. van der Zon	(GeoDelft)

February 2002

Inhoud

Lijst van figuren	v
Lijst van tabellen	vi
Lijst van foto's	vi
Samenvatting	Samenvatting - 1
1 Inleiding	1
2 Vooronderzoek	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Bureaustudie.....	4
2.2.1 Recepturen gangbare grouts en mortels	4
2.2.2 Overzicht injectiedrukken	5
2.2.3 Toegepaste geïnjecteerd volumen	6
2.3 Reologie proeven	6
2.3.1 Inleiding	6
2.3.2 Twee componenten grout	6
2.3.3 1 componenten mortel.....	8
2.4 Laboratoriumproeven	10
2.4.1 Inleiding	10
2.4.2 Twee componenten grout	12
2.4.3 Conventionele mortel	13
2.5 Conclusies en aanbevelingen	15
2.5.1 Conclusies	15
2.5.1.1 Bureaustudies	15
2.5.1.2 Laboratoriumproeven.....	15
2.5.2 Aanbevelingen.....	17
2.5.3 Relaties naar het model	17
3 Modelleringsstroming staartspleet	18
3.1 Inleiding modellering stroming in staartspleet.....	18
3.2 Reologie grout	19
3.3 Lokale drukval door groutstroming in staartspleet	21

3.4	Model tijdsafhankelijkheid stromingsparameters	23
3.5	Verdeling grout in staartspleet	24
3.5.1	Fenomenologische beschrijving groutstroming in staartspleet	24
3.5.2	Randvoorwaarden, input en output rekenmodel	25
3.5.3	Statische plus dynamische drukcomponent.....	26
3.5.4	Oplosmethode groutverdeling	26
3.5.4.1	Verdeling stroming in staartspleet.....	26
3.5.4.2	Berekening druk in staartspleet.....	26
3.5.4.3	Berekening tijd sinds injectie.....	26
3.6	Voorbeeldberekeningen en consequenties voor de proefnemingen (in fase 2).....	27
3.6.1	Standaard 1-component grout	27
3.6.2	Twee componenten grout:	27
3.6.3	Voorbeeldberekeningen drukken in de staartspleet voor een standaard grout:	27
3.6.4	Consequenties proefnemingen fase 2.....	29
3.7	Conclusies en aanbevelingen	30
4	Proeven groutstroming.....	31
4.1	Doel	31
4.2	Opstelling	32
4.2.1	Gebruikte grouts.....	32
4.2.2	Buis	32
4.2.3	Pompen.....	38
4.2.4	Drukken.....	40
4.2.5	Drukopnemers	42
4.2.6	Temperatuur	43
4.2.7	Data-acquisitiesysteem	44
4.2.8	Proevenmatrix	44
4.3	Resultaten.....	45
4.3.1	Snelheden	45
4.3.2	Zand.....	46
4.3.3	Schuifspanningen	47
4.3.4	Eén component grout	48
4.3.4.1	Gladde buis	48
4.3.4.2	Geperforeerde buis.....	50
4.3.4.3	Ruwe buis.....	52
4.3.4.4	Temperatuur	55
4.3.5	Twee componenten grout	55
4.3.5.1	Instroomkanaal.....	56

4.3.5.2	Resultaten.....	56
4.3.5.3	Tijdseffect	61
4.3.5.4	Temperatuur	64
4.4	Conclusies en aanbevelingen	65
4.4.1	Conclusies	65
4.4.2	Aanbevelingen.....	67
5	Synthese Groutstroming	68
5.1	Beoogde resultaten fase 3 “aanpassing stromingsmodel”.....	68
5.2	Synthese kennis voorafgaande fasen.....	68
5.2.1	Algemeen	68
5.2.2	Stromingsweerstand	69
5.2.3	Onderscheid interne en externe schuifweerstand.....	69
5.2.4	Snelheidsprofiel over de dikte van de groutlaag	70
5.2.5	Ontwatering en stromingsprofiel	70
5.2.6	Tijdschaal reologische veranderingen grouteigenschappen.....	71
5.2.7	Vergelijking van conventionele grout en twee-componenten grout	71
5.2.8	Overzicht meetinstrumenten reologische bepalingen	72
5.3	Samenvatting rekenmodel groutstroming in staartspleet	72
5.3.1	Hoofdkenmerken rekenmodel	72
5.3.2	Invoergegevens.....	74
5.4	Analyse groutdrukken in staartspleet	76
5.4.1	Conventioneel grout	76
5.4.2	Twee-componenten grout.....	76
5.4.3	Gevolgtrekkingen groutdrukberekeningen in staartspleet	77
5.5	Lokaal drukverlies bij injectiepunten.....	78
5.6	Weerstand toevoerslangen en leidingen	79
5.6.1	Weerstand verpompen groutmortels.....	79
5.6.2	Theorie wandslip.....	79
5.6.3	Theorie Coulombwrijving.....	79
5.6.4	Analyse wandwrijving stromingsproeven.....	80
5.6.5	Voorbeeldberekening drukval groutleidingen	81
5.6.6	Gevolgtrekkingen drukvalberekening groutleidingen.....	81
5.7	Conclusies en Aanbevelingen	82
5.7.1	Algemeene conclusies	82
5.7.2	Conclusies deelaspecten.....	82
5.7.3	Aanbevelingen.....	83

Literatuur.....Literatuur - 1

Bijlagen bij de hoofdstukken:

Bijlage 2A: Meetresultaten twee componenten grout.....	Bijlage - 1
Bijlage 2B: Meetresultaten conventionele mortel.....	Bijlage - 4
Bijlage 2C: Beschrijving Brookfield viscometer	Bijlage - 7
Bijlage 2D: Beschrijving filterpers	Bijlage - 9
Bijlage 3A: Stromingsmodel verdeling stroming over staartspleet	Bijlage - 11
Bijlage 3B: Berekening druk in staartspleet (dynamisch deel).....	Bijlage - 14
Bijlage 3C: Berekening verblijftijd Grout in staartspleet	Bijlage - 16
Bijlage 5: Handberekening tijdsduur stroming langs achterrand TBM	Bijlage - 18

Lijst van figuren

Figuur 3.1	Schematisch model voor irreversibele afbraak structuur (uit: Tattersall en Banfill, 1983)
Figuur 3.2	Schets reologische eigenschappen vloeistof (flow curve)
Figuur 3.3	Schets basisstroming
Figuur 3.4a,b	Rekenresultaten 6 injectiepunten
Figuur 3.4c,d	Rekenresultaten 6 injectiepunten
Figuur 3.4e	Rekenresultaten 6 injectiepunten
Figuur 3.5a,b	Rekenresultaten 3 injectiepunten
Figuur 3.5c,d	Rekenresultaten 3 injectiepunten
Figuur 3.5e	Rekenresultaten 3 injectiepunten
Figuur 4.1	Een schets van de gebruikte plunjier met afdichtrubbers
Figuur 4.2	Een overzicht van de gebruikte opstelling voor de één-componentgrout proeven
Figuur 4.3	Het instroomkanaal voor de twee componenten grout
Figuur 4.4	Een schets van het gebruikte pomptype
Figuur 4.5	Pompcurven voor water en component A van de gebruikte verdringer pomp
Figuur 4.6	De pompcurve voor de pomp gebruikt voor het verpompen van component B van het twee componenten grout
Figuur 4.7	De gemeten schijnbare schuifspanning in water bij 10 cm/sec
Figuur 4.8	De bij de verschillende proeven gebruikte correctie-waarden voor de verschillen in gevoeligheid van de verschillende drukopnemers
Figuur 4.9	De cumulatieve korrelgrootteverdelingen van de gebruikte zandsoorten
Figuur 4.10	De gemeten wandschuifspanningen bij een snelheid van 100 mm/s als functie van de tijd
Figuur 4.11	De gemeten wandschuifspanningen bij een snelheid van 100 mm/s als functie van de afstand tot de zuiger
Figuur 4.12	De gemeten wandschuifspanningen in de geperforeerde buis, bij een snelheid van 3 mm/s
Figuur 4.13	Het rheogram van het één-component grout zonder zand
Figuur 4.14	De gemeten drukverschillen bij 25 mm/s voor de drie verschillende buizen.
Figuur 4.15	De gemeten wandschuifspanningen in de drie buizen voor het één component grout als functie van de groutsnelheid
Figuur 4.16	Flow curve van twee componenten grout na afloop van proef 66, met een leeftijd van 45 minuten
Figuur 4.17	De bezwijkspanningen van het twee componenten grout als functie van de tijd
Figuur 4.18	De bezwijkspanningen van het twee componenten grout als functie van de tijd
Figuur 4.19	De gemeten wandschuifspanningen bij het twee componenten grout
Figuur 4.20	De gemeten wandschuifspanningen bij het terugduwen van de zuiger
Figuur 4.21	Druksignaal van de eerste opnemer tijdens het leegpersen van de buis
Figuur 4.22	De wandschuifspanning als functie van de tijd bij een snelheid van 92 mm/s
Figuur 4.23	Het temperatuurverschil tussen opnemer 1 en 2 bij proef 66 als functie van de afstand tot de zuiger
Figuur 5.1a,b	Veronderstelde, en geïnterpreteerde snelheidsverdeling buisstroming
Figuur 5.2	Gevolgen vloeistofverlies op de groutstroming
Figuur 5.3	Voorbeeld nabootsing tijdsafhankelijkheid schuifweerstand grout
Figuur A1	Schematische weergave randvoorwaarden rekenmodel, 1 injectiepunt

Lijst van tabellen

Tabel 4.1	Gegevens van een “referentietunnel”.
Tabel 4.2	De samenstelling van de gebruikte grouts.
Tabel 4.3	De verschillende ingelezen signalen.
Tabel 4.4	De beoogde vulsnelheden en bijbehorende vuldebieten
Tabel 4.5	De geteste grout-buis-snelheid combinaties
Tabel 4.6	De gemeten en beoogde groutsnelheden tijdens de proeven.
Tabel 4.7	Een overzicht van de gemeten wandschuifspanningen met de bijbehorendestandaard deviaties in het één component grout
Tabel 4.8	Snelheden en mengverhoudingen tijdens de proeven met twee componentgrout.
Tabel 4.9	Een overzicht van de gemeten wandschuifspanningen met de bijbehorendestandaard deviaties in het twee componenten grout
Tabel 4.10	Een overzicht van de gemeten wandschuifspanningen met de bijbehorendestandaard deviaties tijdens het leegpersen van de buis.
Tabel 5.1	Overzicht karakteristieke weerstanden groutstroming
Tabel 5.2:	Verschillen en overeenkomsten tussen conventioneel grout en twee-componenten grout.
Tabel 5.3	Samenvatting kenmerken rekenmodel DCgrout
Tabel 5.4	Voorbeeld invoergegevens stromingsmodel DCgrout
Tabel 5.5	Berekende stroomtijden bij achterrond TBM bij radiale uitstroming
Tabel 5.6	Berekende stroomtijden bij achterrond TBM bij neerwaartse stroming over een breedte van 0,3 m
Tabel 5.7	Kenmerkende gegevens conventioneel grout
Tabel 5.8	Voorbeeld resultaten weerstandsberekening groutleidingen

Lijst van foto's

Foto 4.1	De bok waaraan de gewichten gehangen worden.
Foto 4.2	De buis met de gemonteerde opnemers
Foto 4.3	Detailopname van een gemonteerde druk- en temperatuuropnemer
Foto 4.4	Het instroomkanaal voor de twee componenten grout

Samenvatting

Tussen de betonnen elementen van een geboorde tunnel en de grond wordt grout aangebracht. De manier waarop grout wordt aangebracht, bepaalt de drukverdeling in de grout. Deze drukverdeling is van belang om maaiveldzakkingen te beheersen en om de belasting op de tunnelementen te beperken.

Er zijn twee sterk verschillende typen grout beschouwd: conventionele één-component grout (mortel) en een chemische twee-componenten grout. Het stromingsgedrag van grouts is gecompliceerd en afhankelijk van vele factoren. Het is niet mogelijk alle aspecten met één proefneming te onderzoeken. Door middel van kleinschalige tests zijn, ter oriëntering, verscheidene stromingseigenschappen van de grout onderzocht. Om de stromingsweerstand van de groutstroming in de staartspleet te bepalen zijn er groutstroming experimenten uitgevoerd onder condities welke zo veel mogelijk overeenkomen met de stromingscondities in de staartspleet.

Er is een rekenmodel voor de stroming van grout in de staartspleet opgesteld. Het model berekent de drukverdeling in een gebied omvattende de volledige omtrek van de tunnelling over een lengte van één of meer tunnelringsegmenten aansluitend aan de achterzijde van de TBM. Het model is tweedimensionaal: de snelheidsverdeling in langs- en tangentiële richting wordt berekend. Invoerparameters van het model zijn, spleethoogte, tunneldiameter, voortgangssnelheid van de TBM, het aantal en de locatie van de injectiepunten, Binghamse reologieparameters van de grout, en hoe deze in de tijd veranderen door hydratatie en cementatie.

Dit onderzoek heeft uitgewezen wat bepalend is voor de drukverdeling in de grout.

Dit onderzoek is gefinancierd door NS Railinfrabeheer, de projectorganisatie HSL-Zuid, Nederlandse Bouwstoffen Combinatie en Delft Cluster. Sector participatie uitvoeringscommissie: ir B. Bruinsma (HSL-Zuid), ir P.A.A. Roelands (NS Railinfrabeheer) en ing. G.J. Speets (NBC).

1 Inleiding

Bij het boren van een tunnel wordt vanuit de tunnelboormachine (TBM) de tunnel opgebouwd. De tunnel bestaat uit betonnen elementen (de lining). De TBM heeft een iets grotere diameter dan de tunnel. Tussen de uitgegraven grond en de lining is daarom ruimte, de zogenaamde staartspleet. Deze staartspleet wordt opgevuld met grout om de tunnel te fixeren en om de maaiveldzakkingen te beperken. De grout wordt toegediend door een aantal injectieopeningen welke zich gewoonlijk in de achterrand van de TBM bevinden

Onderzoek, onder andere bij de 2de Heinenoord tunnel, heeft aangetoond, dat dit zogenaamde grouten een cruciaal proces is tijdens het boren van een tunnel. Het veroorzaakt veelal het grootste gedeelte van de maaiveldzakking en is bepalend voor de spanningsverdeling in de grond. Wanneer door het boren van de tunnel de spanningsverdeling in de grond verandert, kan dit gevolgen hebben voor paalfunderingen in de buurt van de tunnel.

Bepalend bleek de groutdrukverdeling rondom de tunnel, maar ook het volume van het geperste grout is bepalend voor de grootte van de zettingen. Om meer te weten te komen over waardoor deze groutdrukken worden bepaald, is in het kader van het Delft Cluster door GeoDelft en WL | Delft Hydraulics een onderzoek opgestart om de stromingseigenschappen van grout te bepalen en is een rekenmodel opgesteld om de groutdrukken te kunnen berekenen.

Maaiveldzettingen, bij de aanleg van boortunnels, kunnen verschillende oorzaken hebben. Uit ervaringen in het buitenland en bij de aanleg van de Tweede Heinenoordtunnel blijkt echter dat de zettingen in belangrijke mate worden bepaald door de kwaliteit van staartspleetinjectie.

Voor het ondersteunen van de grond rondom de tunnel en de mechanische belasting van de geplaatste tunnelsegmenten is de drukverdeling in de gevulde staartspleet van belang. De drukverdeling en het verloop van de druk in de tijd worden onder andere bepaald door de eigenschappen van de grout, de hoeveelheid geïnjecteerde grout, de injectiedruk, het aantal injectieopeningen, de locaties van de injectieopeningen en de eigenschappen van de omringende grond.

Met name over de stroming van de grout, en de daarbij optredende drukverschillen, is nog maar weinig bekend. De stroming, de mate van vulling van de staartspleet en de drukverdeling in de grout en de omliggende grond zijn gekoppelde problemen. De grout wordt geïnjecteerd door verschillende openingen in het schild van de boormachine of in de tunnelsegmenten en zal rondom de volledige omtrek van de tunnel moeten stromen.

Het onderzoek is als volgt uitgevoerd:

Fase 0: Ter oriëntering zijn er verkennende kleinschalige reologische bepalingen uitgevoerd, en is praktijkervaring met grouting van staartpleetopeningen bij tunnelboorprojecten geïnventariseerd. Dit werk wordt beschreven in hoofdstuk 2. Tevens worden in dit hoofdstuk experimenten beschreven welke bedoeld zijn om de gevolgen van samendrukking van de grout, in de staartspleet, op de stromingseigenschappen te kwantificeren.

Fase 1: Er is een wiskundig model ontwikkeld voor de groutstroming in de staartspleet van tunnelboormachines (TBM's), zie hoofdstuk 3. Bij het ontwerp van het model is daarbij rekening gehouden met de orde grootte van de reologische eigenschappen welke in fase 0 geconstateerd zijn, en met hetgeen in de literatuur soms vermeld wordt. Tevens vormde de ervaring opgedaan met eerste berekeningen een leidraad voor het ontwerp van aansluitende groutstromingsexperimenten.

Fase 2: Er zijn proeven uitgevoerd om de fundamentele eigenschappen van de groutstroming te doorgronden en om de stromingsweerstand te kwantificeren als input voor het model. Dit betreft stromingsproeven onder condities vergelijkbaar met die in een staartspleet. Er zijn proeven op standaard groutmortel en twee-component ETAC grout uitgevoerd, zie Hoofdstuk 4.

Fase 3: Het rekenmodel voor de stroming van grout in de staartspleet is verbeterd aan de hand van de meetresultaten uit het voorafgaande onderzoek. Er wordt een analyse gegeven van de groutstroming in de staartspleet van zowel conventioneel één component grout als twee-componenten grout. Er wordt een rekenmethode gegeven voor de lokale drukval bij stroming van de grout vanuit de injectieleidingen in de staartspleet. Er wordt tevens een methode gegeven voor de berekening van de drukval over de toevoerslangen.

De beoogde eindresultaten van het gehele project zijn de proefresultaten, een (rudimentair) stromingsmodel voor de staartspleetstroming (spreadsheet) en elementaire kennis over het gedrag van grout in de staartspleet.

Conclusies en aanbevelingen welke betrekking hebben op het gehele onderzoek zijn samengevat aan het eind van Hoofdstuk 5.

Het onderzoek is uitgevoerd door: Fase 0 W.H van der Zon, Fase 1 A.M. Talmon, Fase 2 L. Aanen, Fase 3 A.M. Talmon. De projectleiding was in handen van A.M. Talmon. Aanvullende inhoudelijke ondersteuning is verzorgd ir A. Bezuijen (GeoDelft).

2 Vooronderzoek

2.1 Inleiding

In dit rapport wordt een onderscheid gemaakt tussen een grout (het twee componenten materiaal) en een mortel (het traditionele 1 componenten materiaal), omdat een mortel meer het fysisch gedrag heeft van een materiaal dat is opgebouwd uit fijne en grove delen gemengd met water (cement en zand) en een grout is opgebouwd uit fijne delen gedispergeerd in water. Derhalve heeft een grout meer een colloïdaal gedrag dan een mortel. Het onderzoek heeft betrekking op beide materialen.

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het fase 0 onderzoek weergegeven. Het volledige onderzoek is weergegeven in: “Achtergrondrapport: Fase 0, Stromingsgedrag groutproef” [GeoDelft, 2001]. Het in deze fase uitgevoerde onderzoek behelsde de volgende onderwerpen:

1. Bureaustudie naar de volgende zaken:

- de gebruikelijke recepturen van de gangbare grouten en mortels voor het vullen van staartspleten;
- een overzicht van injectiedrukken met de volgende aandachtspunten:
 - de gangbare injectiedrukken in relatie tot de gronddrukken,
 - gemeten drukken in de staartspleet, gemeten spleethoogte staartspleet (grondradar), gemeten maaiveldzakkingen,
 - toegepaste debieten, voortgangssnelheid TBM, geometrie staartspleet, locaties nozzles (wel/niet in gebruik), verhouding debiet tot benodigde grout in de staartspleet.

2. Kleinschalige reologie proeven naar de volgende parameters:

Twee componenten grout

- De orde grootte van de parameters van de flow curve;
- De tijdschaal van de verandering van de reologie met de tijd (initial set);
- Verkenning van de invloed van de menging van de twee componenten op de reologische parameters.

1 componenten mortel

- De orde grootte van de flowcurve (vervormingsweerstand bij lage vervormingssnelheden);
- De tijdschaal van de verandering van de reologie met de tijd (final set);
- De invloed van variatie van de samenstelling van de grout op de reologie;
- De invloed van de initiële menging op de reologie.

3. Kleinschalige laboratoriumproeven:

Tevens worden, vooruitlopend op de originele opzet, reeds volumeverandering (uitpers) proeven uitgevoerd. Uit deze proeven volgt in hoeverre er bij de interpretatie van de berekende groutspleetstroming rekening gehouden zal moeten worden met weerstands- en drukveranderingen ten gevolge van volumeveranderingen als gevolg van uitpersing van water uit de mengsels.

2.2 Bureaustudie

2.2.1 Recepturen gangbare grouts en mortels

1 componenten mortels

De huidige 1 componenten materialen die gebruikt worden zijn onder te verdelen in een drietal soorten mengsels:

1. Water/zand mengsels

Hierbij wordt een mengsel van water en zand in de staartspleet gepompt. Het overmaat aan water wordt uit het mengsel verdrongen en de bedoeling is dat het zandpakket rond de tunnelling weer hersteld wordt. Het nadeel van deze techniek is dat er nooit voldoende zand in de staartspleet wordt gepompt. Derhalve wordt deze mengsels (bijna) nooit meer toegepast.

2. Mortels

Deze mengsels worden momenteel op grote schaal toegepast. De samenstelling bestaat uit de volgende componenten:

- een bentoniet slurry;
- een bindmiddel, dit kan variëren van een puzzolane vliegashuis tot cement of een combinatie van beide materialen;
- grove delen, in het algemeen zand;
- toeslagstoffen, dit zijn: vertragers, verdunners, versnellers en vulstoffen als kalk.

De exacte samenstelling van de mortel zoals die op een werk wordt gebruikt, wordt beschouwd als eigen kennis van de aannemer en is derhalve niet openbaar. Echter de samenstellingen zoals die momenteel in Nederland worden toegepast zijn allen gebaseerd op een mengsel van bentoniet, vliegashuis, cement, zand en toeslagstoffen.

De dichtheid van deze mortels benaderen die van het omliggend grondmassief, 1900 tot 2100 kg/m³.

Een voorbeeld van een mengsel samenstelling is hieronder in tabel 2.1 weergegeven:

Tabel 2.1 Voorbeeld samenstelling 1 componenten mortel per kubieke meter mortel

water	kg	335
bentoniet	kg	9
cement	kg	166
vliegias	kg	120
zand	kg	1480
hulpstof	kg	0,71
dichtheid	kg/m ³	2110

3. Mortels Twee componenten grout

In Japan wordt sinds een twintigtal jaren een twee componenten grout gebruikt als staartspleet injectie materiaal. Recentelijk is dit materiaal ook in Nederland geïntroduceerd en is met succes gebruikt in de Botlekspoortunnel.

De verschillen tussen een 1 componenten mortel en een twee componenten grout liggen in de volgende zaken:

- een twee componenten grout bevat geen grove vaste delen;
- bij een twee componenten grout vindt de bindingsreactie pas plaats indien beide componenten bij elkaar worden gevoegd;
- een twee componenten grout heeft een dichtheid die veel lager is dan een 1 componenten grout, nl. 950 tot 1100 kg/m³.

Een twee componenten grout bestaat uit een A component en een B component. Deze B component is de harder die de bindingsreactie initieert. De A component bestaat uit een mengsel van klei, cement, vertrager en lucht (schuim). Met name de lucht in het mengsel zorgt voor de lage dichtheid.

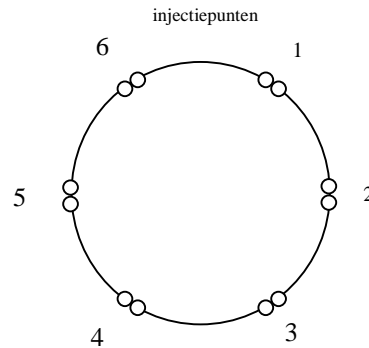
Ook de receptuur van de twee component grout wordt als bedrijfseigendom beschouwd en kan hier niet exact worden weergegeven.

2.2.2 Overzicht injectiedrukken

Ook voor deze gegevens geldt dat de openbaarheid en beschikbaarheid veelal onder embargo van de betrokken aannemers. Er is echter wel een trend te onderscheiden tussen de vigerende gronddrukken, de ontwerp injectiedrukken en daar waar dit gemeten is de werkelijke injectiedrukken.

Het blijkt dat bij het vaststellen van de ontwerp injectiedrukken de gronddruk, als basis parameter gebruikt wordt. Hierbij wordt voor elk van de injectiepunten (zie figuur 2.1) een eigen ontwerpdruk uitgerekend. Het spreekt vanzelf dat de injectiedrukken in punt 3 en 4 hoger zijn dan in 1 en 6. Voor beide materialen geldt dat de pompdruk ca. 1,5 bar hoger is dan de gemeten injectiedruk in de staartspleet.

Hierbij moet worden opgemerkt dat het 1 componenten systeem op volume gestuurd wordt en het twee componenten systeem op druk gestuurd wordt (met het volume als afgeleide hiervan).



Figuur 2.1 Locatie injectiepunten

De lokatie van de injectiepunten variëren over het algemeen niet per tunnelboormachine. Echter het aantal injectiepunten dat daadwerkelijk gebruikt wordt varieert wel. Meestal wordt voor een 1 componenten grout een viertal punten gebruikt, gelijkmatig verdeeld over de cirkel (d.w.z. bijv. 1 en 4 uit). Bij een twee componenten grout wordt in het algemeen twee injectiepunten (bijv. 1 en 6) gebruikt.

Bij “grotere” diameters van de tunnelboormachine wordt een injectiepunt meer gebruikt (bijv. 1, 3 en 5).

2.2.3 Toegepaste geïnjecteerd volumen

De geïnjecteerd volumen die worden toegepast bij een 1 componenten grout zijn ca. 20 % hoger dan het theoretische volume (uitgerekend zonder oversnijding). Bij een twee componenten grout is dat ca. 10 %.

2.3 Reologie proeven

2.3.1 Inleiding

Een beschrijving van de gebruikte apparatuur (een Brookfield viscometer) is in bijlage 2C bijgevoegd. Tijdens de proeven is gebleken dat de afschuifspanning bij het aanzetten van de viscometer veel hoger is dan wanneer de schijf geruime tijd draait. Ook deze curven zijn gemeten. Dit omdat verwacht wordt dat de initiele afschuifspanning en de uiteindelijke afschuifspanning wat meer zou kunnen zeggen van het gedrag van de grout cq. mortel in de staartspleet.

2.3.2 Twee componenten grout

De twee componenten grout bestaat zoals eerder vermeld uit een A component en een B component. Op het moment dat deze twee mengsels met elkaar in contact komen ontstaat er een verhardingsreactie.

De reactie vindt in drie fasen plaats:

1. Vloeibare fase

Dit is de eerste 10 tot 60 seconden waarin het mengsel vloeibaar is. De tijd die deze fase duurt is afhankelijk van het type bindmiddel en de kwaliteit van de menging. Het blijkt dat bij een slechte menging, in het laboratorium tot stand gekomen als zijnde het bij elkaar gieten van de A en B component (dus zonder menging), deze fase aanzienlijk langer is dan de 10 seconden die het mengsel vloeibaar is bij een “homogene” menging. In deze periode is het niet mogelijk om de afschuifsnelheid met de Brookfield te meten.

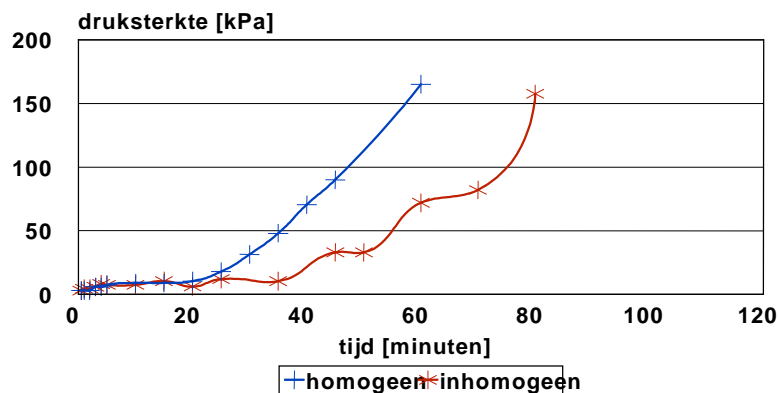
2. Plastische fase

In deze fase gedraagt het mengsel zich als een zachte, plastische klei. Het materiaal is dan ook nog makkelijk vervormbaar, de druksterkte (gemeten met een pocket penetrometer) is ca. 6 kPa. Ter vergelijking bij een druksterkte lager dan 2,5 kPa wordt klei fluïdaal en gaat deze vloeien.

Deze fase duurt, ook weer afhankelijk van menging en type bindmiddel, van 20 minuten tot ca. 2 uur.

In figuur 2.2 is deze druksterkte ontwikkeling in de plastische fase weergegeven.

uithardingsgedrag ETAC



Figuur 2.2 Invloed van menghomogeniteit op de uitharding van het grout

3. Verhardingsfase

In deze fase hard het mengsel uit tot een druksterkte van ca. 2 MPa (uniaxiaal). Het is opvallend dat de eindsterkte van een niet ideaal mengsel ca. 75 % is van die van een homogeen gemengd mengsel. Dit ondanks het feit dat de dichtheid van een niet ideaal mengsel veel hoger is dan die van een homogeen mengsel.

In onderstaande tabel 2.2 staan de gemeten waarden weergegeven voor een homogeen en niet-homogeen gemengde mengsels.

Tabel 2.2 Druksterkte proefstukken twee componenten grout

Ouderdom proefstuk	druksterkte (uniaxiaal) [kPa]	
	Homogeen mengsel	niet-homogeen mengsel
2 uur	245	134
1 dag	870	164
2 dagen	980	481
3 dagen	1180	niet gemeten
7 dagen	niet gemeten	865
28 dagen	1650	1063
56 dagen	1890	1580
Dichtheid proefstuk	1005 kg/m ³	1140 kg/m ³

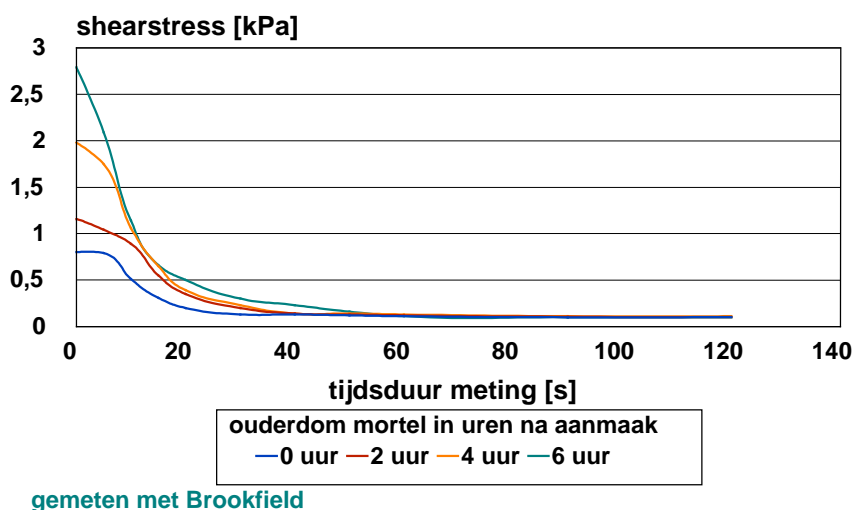
2.3.3 1 componenten mortel

Ten behoeve van de 1 componenten mortel (aangemaakt volgens de receptuur uit het voorbeeld) zijn een aantal metingen uitgevoerd met de “Brookfield viscometer”. Het principe van de Brookfield viscometer is dat een horizontale schijf met een constante snelheid in een suspensie ronddraait. De viscositeit wordt dan afgelezen en omgerekend naar de shearstress. Het blijkt dat deze viscositeit en daarmee de shearstress lager wordt naarmate er langer wordt doorgemeten. Het beeld is nu ontstaan dat er een waterfilmpje gevormd wordt waarin de schijf ronddraait. Zie ook figuur 2.3.

De meting is uitgevoerd met Spindel nr. 4 bij een toerental van 5 omwentelingen per minuut, d.w.z. bij laag toeren.

Afschuifspanning

verloop in de tijd



Figuur 2.3 Verloop Brookfield shearstress

Uit figuur 2.3 zijn de volgende constatering:

- De gemeten shearstress bij aanvang van de meting is afhankelijk van de ouderdom van de mortel.
- De uiteindelijk gemeten shearstress is onafhankelijk van de ouderdom van de mortel, nl. 100 mPa.s. Ook bij andere toerentallen is dit het geval.
- Deze waarde is na ca. 40 seconden meten bereikt.

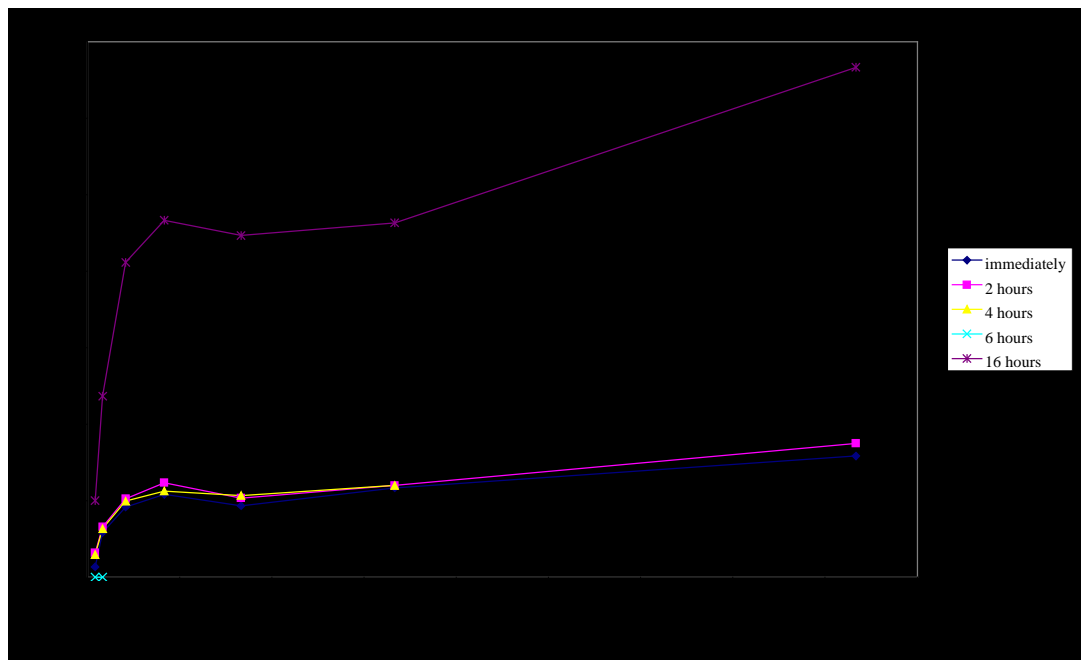
Tevens is van het homogene mengsel de flowcurve gemeten. Hierbij is het toerental gevarieerd en is de initiële shearstress uitgezet van de mortel, gemeten bij een oplopende ouderdom van de mortel slurry.

De gegevens zijn in tabel 2.3 en figuur 2.4 verder weergegeven.

Tabel 2.3 Shearstress van 1 componenten mortel

omwentelingen (1/min)	dvx/dy (1/s)	Direct	2 uur	4 uur	16 uur
0,5	16,67	0,27	0,63	0,58	2,00
1	33,33	1,17	1,31	1,27	4,73
2,5	83,33	1,83	2,05	1,98	8,23
5	166,67	2,17	2,47	2,25	9,33
10	333,33	1,87	2,07	2,13	8,93
20	666,67	2,33	2,40	2,40	9,27
50	1666,67	3,17	3,50		13,33

Opgemerkt moet worden dat de metingen bij een ouderdom van 16 uur niet meer betrouwbaar zijn.



Figuur 2.4 Initiële shearstress gemeten met de Brookfield viscometer

De variatie van de samenstelling van de grout heeft hoegenaamd geen invloed op het reologisch gedrag van de grout. De volgende parameters zijn gevarieerd, waarbij steeds de hoeveelheid water gelijk bleef:

- hoeveelheid bentoniet;
- hoeveelheid vliegass en cement (en daarmee ook de verhouding daar tussen);
- hoeveelheid zand;
- hoeveelheid hulpstof.

Alleen bij de variatie van de hoeveelheid hulpstof worden significante veranderingen in de reologie waargenomen. Dit is te verklaren uit het feit dat de gebruikte hulpstof een vertragende en daarmee ook een verlagend effect heeft op de reologie van de mortel.

Indien de vertrager niet aanwezig was, kon de mortel niet meer verwerkt worden. Terwijl juist bij een overmaat aan vertrager de vaste (granulaire) fractie die in het mengsel aanwezig is uitzakt (segregatie) waardoor boven de mortel een laag vloeistof komt.

2.4 Laboratoriumproeven

2.4.1 Inleiding

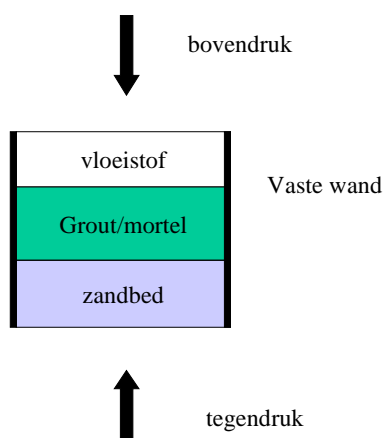
Met behulp van eenvoudige proeven is nagegaan in hoeverre de grout en de mortel vormvast blijft, wanneer deze met een overdruk in contact komt met een zandbed. Voor deze proeven zijn de in tabel 2.4 weergegeven zandmonsters gebruikt:

Tabel 2.4 Overzicht gebruikte zandmonsters

Zandmonster	Korrelmaat	
	D ₅₀ [µm]	uniformiteit coëfficiënt
fijn zand	180	1,7
grof zand	380	2,1

Opmerkingen bij de tabel:

- Het fijne zand is gekozen, omdat dit in de meeste gevallen representatief is voor holocene zandgronden.
- Het grove zand is gekozen omdat dit representatief gesteld kan worden voor pleistocene zanden.
- Er zijn geen proeven met kleigronden uitgevoerd omdat deze te ondoorlatend zijn.
- De uniformiteit coëfficiënt is gedefinieerd als zijnde de D_{60}/D_{10} .



De indringing van grout wordt bestudeerd door een cilinder (lengte 10 cm, diameter 7.9 cm) 40% te vullen met water verzadigd zand en 50% te vullen met grout of mortel (zie principeschets hierboven). Vervolgens werd de cilinder afgevuld met water en werd een constante druk op de cilinder gezet. Als gevolg van deze druk wordt het water uit het zand en eventueel uit het grout geperst. Dit water wordt opgevangen en het volume wordt bepaald. [in bijlage 2D is een volledige apparaatbeschrijving bijgevoegd].

Bij het uitbouwen van de cilinder werd nog de consistentie op twee verschillende niveaus in de cilinder van de grout of mortel gemeten m.b.v. een torr-vane meter.

In tabel 2.5 staan de gehanteerde drukken weergegeven. Omdat het gebruikte apparaat de drukken in p.s.i. (pounds per square inch) weergeeft is een vertaling gemaakt naar drukken in de SI eenheid. In tabel 2.6 staan de gehanteerde tijdsintervallen weergegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van een 1 componenten mortel met een ouderdom van twee uur en een vers aangemaakte twee componenten grout.

Tabel 2.5 Gebruikte drukken

Druk	
P.S.I.	kPa
10	69
15	104
20	138
25	170
30 (max.)	207

Tabel 2.6 Gehanteerde meet tijdstippen in minuten

Tijd [minuten]	
1 componenten mortel	twee componenten grout
10	1
30	5
90	10
120	20

2.4.2 Twee componenten grout

In bijlage 2A zijn de resultaten in tabelvorm weergegeven. In deze paragraaf worden alleen de trends en waarnemingen weergegeven en besproken. De verschillen tussen de testresultaten met fijn en grof zand zijn, daar waar afwijkingen waarneembaar waren, weergegeven. De tabellen 2.4 en 2.5 zijn samengesteld uit de data in bijlage 2A.

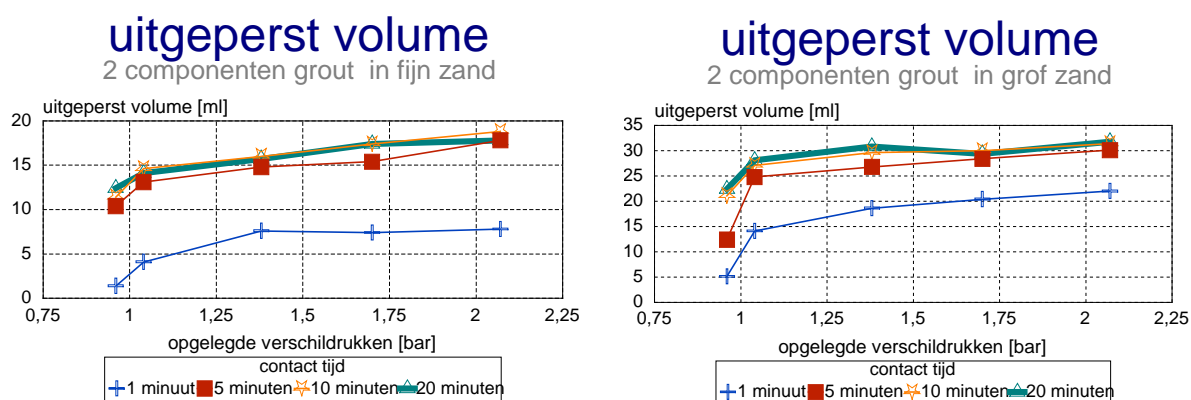
Grensvlak grout zand

Naarmate de proef langer duurt is het grensvlak tussen zand en het grout niet meer te onderscheiden. Als gevolg van het op 1 punt inblazen van de druk wordt de mortel evenredig samengeperst en ontstaat er geen bolle kant tussen het grout en het zand (aan de kant van het zand). Tijdens alle proeven was de mortel moeilijk te verwijderen uit de proefcilinder.

Het is niet waarneembaar of er zand in het grout wordt gedrukt of niet. De filtercake die doorgaans bij deze mortels gevormd wordt is duidelijk waarneembaar.

Uitgeperste water

Het water dat wordt opgevangen is kleurloos dit water is afkomstig uit het zand zelf, omdat wanneer het water uit het grout komt dit geel gekleurd zou zijn door de toevoeging van de vertrager. In figuur 2.6 zijn de uitgeperste volumes als functie van de aangelegde druk en tijdsduur weergegeven voor zowel fijn als grof zand.



Figuur 2.6 Uitgeperst volume water bij verschillende drukverschillen

Uitgevoerde metingen aan de grout

In tabellen 2.7 en 2.8 is de zwichtspanning van de grout weergegeven, daar waar dit nog mogelijk was is dit op twee hoogten in de cilinder uitgevoerd: aan het grensvlak met het zand en aan de, nog vloeibare bovenzijde van het monster. Ook is de, visueel bepaalde, overgang tussen “zachte” grout en het “harde” grout (de cake genoemd) weergegeven in mm. voor de meting bij een overdruk van 1,38 bar in de tijd.

Tabel 2.7 Overzicht meetgegevens bij een drukverschil van 1,38 bar in **fijn zand**

Tijdsduur [min]	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Fronthoogte hard/zacht	
		“zachte grout”	“harde grout”	mm's	% t.o.v. dikte grout
1	7,6	1,8	(1)	3	6
5	14,8	1,95	11,5	8	16
10	16	1,85	12,0	9	18
20	15,7	2,2	12,0	8	16

Opmerking (1): deze waarde kon niet gemeten worden vanwege de geringe verharde fronthoogte.

Tabel 2.8 Overzicht meetgegevens bij een drukverschil van 1,38 bar in **grof zand**

Tijdsduur [min]	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Fronthoogte hard/zacht	
		“zachte grout”	“harde grout”	mm's	% t.o.v. dikte grout
1	18,6	1,7	9,4	6	12
5	26,8	2,06	12,6	13	27
10	29,5	2,34	11,8	15	31
20	30,8	2,25	12,6	14	29

Het lijkt erop dat er een “steady-state” situatie ingesteld wordt, binnen enkele minuten nadat de massa onder druk gezet wordt, waarna geen water meer wordt uitgeperst en de hoedanigheid van de grout in de proefopstelling niet meer veranderd. Zij het dat dit bij een fijner zand eerder plaats vindt dan bij een grover zand.

2.4.3 Conventionele mortel

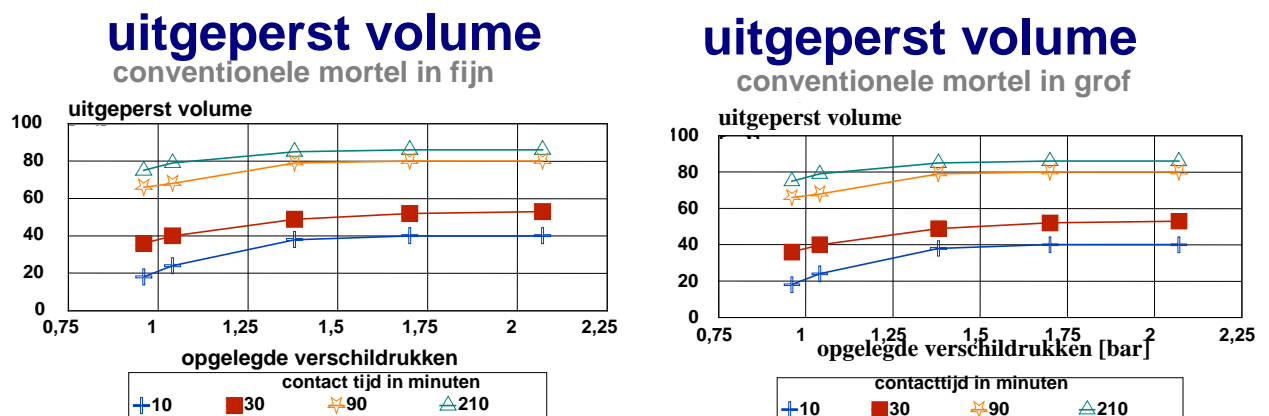
In bijlage 2B zijn de resultaten in tabelvorm weergegeven. In deze paragraaf worden alleen de trends en waarnemingen weergegeven en besproken. Bij de proeven die uitgevoerd zijn met de conventionele mortel zijn significante verschillen waargenomen tussen de twee gebruikte zandsoorten.

Grensvlak mortel zand

Het grensvlak tussen de mortel en het zand blijft duidelijk waarneembaar; het zand blijft korrelig, los van structuur, terwijl de mortel een relatief harde massa vormt. Visueel is het grensvlak echter niet meer waarneembaar. De filtercake die bij deze mortel wel gevormd wordt is dikker naarmate het proefstuk langer of onder hogere druk beproefd wordt. Bij de hoogste druk en onder de langste tijd is het meeste water uit het proefstuk geperst en is er alleen nog spraken van een filtercake en is er geen vloeibare mortel meer aanwezig. Dit betekent dat er een water uitdrijving heeft plaatsgevonden van ca. 80 ml uit het monster, hetgeen ca. 25 % volume verlies heeft plaatsgevonden (de volume van het ingebrachte mortel was telkens ca. 315 ml).

Uitgeperste water

Het water dat is opgevangen was kleurloos, dit water is afkomstig geweest uit het zand zelf, omdat wanneer het water uit het grout komt dit geel gekleurd zou zijn door de toevoeging van de vertrager. In figuur 2.7 zijn de uitgeperste volumes als functie van de aangelegde druk en tijdsduur weergegeven voor zowel fijn als grof zand.



Figuur 2.7 Uitgeperst volume water bij verschillende drukverschillen

Uitgevoerde metingen aan de mortel

In tabellen 2.9 en 2.10 is de zwichtspanning van de grout weergegeven op twee hoogten in de cilinder: aan het grensvlak met het zand en aan de, nog vloeibare bovenzijde van het monster. Ook is de dikte van de filtercake weergegeven in mm. voor de metingen bij een druk van 1,38 bar (praktijk druk) in de tijd.

Tabel 2.9 Overzicht meetgegevens bij een drukverschil van 1,38 bar in **fijn zand**

Tijdsduur [min]	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m^2]		Cake dikte	
		Vloeibare mortel	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
10	15	0,6	(1)	6	12
30	24	0,8	(1)	10	20
90	38	0,8	(1)	17	34
210	41	1,2	(1)	30	60

Opmerking (1): deze waarden konden niet meer gemeten worden vanwege het feit dat de filtercake te hard was.

Tabel 2.10 Overzicht meetgegevens bij een drukverschil van 1,38 bar in **grof zand**

tijdsduur [min]	uitgeperst volume [ml]	gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cakedikte	
		Vloeibare mortel	filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
10	38	0,8	(1)	20	40
30	49	(2)	(1)	35	70
90	79	(2)	(1)	42	84
210	85	(2)	(1)	48	96

Opmerkingen:

- (1) deze waarde kon niet meer worden gemeten, omdat de filtercake te hard was;
- (2) deze waarde kon niet meer worden gemeten, omdat er te weinig vloeibare mortel in het proefstuk was.

Het blijkt dat in fijn zand er beduidend minder volume verlies optreedt dan in een grof, pleistoceen, zand. Ook werd er een duidelijke overgang waargenomen tussen de vloeibare mortel en de filtercake.

Het is niet ondenkbaar dat onder praktijkomstandigheden juist op dat grensvlak stroming van de grout/mortel plaats vindt. Dit leidt dan wel tot een kleinere stromingsopening.

2.5 Conclusies en aanbevelingen

2.5.1 Conclusies

2.5.1.1 Bureaustudie

- Het blijkt dat de receptuur van conventionele grout in zijn algemeenheid dezelfde componenten bevat. De verschillen in de diverse gebruikte mortels liggen meer in de afzonderlijke hoeveelheden en de herkomst van de te gebruiken materialen.
- De toegepaste injectiedrukken zijn voor alle systemen nagenoeg gelijk nl. 1 tot 1,5 bar boven de heersende gronddruk.
- De grote verschillen tussen de conventionele grout en de twee componenten grout is de dichtheid van de grout. Deze is voor de conventionele grout ongeveer gelijk aan de dichtheid van de grond zelf en voor een twee componenten grout is deze ongeveer gelijk aan die van water. Daarnaast is de verwerkingstijd van de beide grouts verschillend.

2.5.1.2 Laboratoriumproeven

- Metingen met de Brookfield viscometer aan 1 componenten mortel toont aan dat er een zeer hoge initiële shearstress is die sterk afneemt (een factor 20) naarmate de massa meer in beweging is. Dit betekent dat het mengsel moeilijk in beweging te krijgen is, maar als het eenmaal in beweging is het dan ook goed stroomt.
- Metingen met een eenvoudig API filterpressapparaat geeft geen goede testresultaten, omdat er kortsluiting ontstaat waarbij de druk wegvloeit. Een apparaat waarbij

tegendruk wordt toegepast geeft testresultaten waarbij een indruk verkregen kan worden over het volumeverlies en het gedrag van zowel grout als mortel op het grensvlak met zand. Een dergelijke methode ligt ook dicht bij de realiteit, omdat de opgelegde druk en de tegendruk (krachtenspel korrelskelet en poriewaterdruk) van het omliggende grondmassief beter gesimuleerd kan worden.

- Bij twee componenten grout treedt er binnen enkele minuten nadat er druk op het proefstuk gezet wordt een situatie op waarbij geen volumeverlies meer optreedt, dit gebeurt zowel in fijn als in grof zand.
- Twee componenten grout blijkt samendrukbaar te zijn hetgeen zich uit in het feit dat er bij het onderdrukzetten van de grout een bolle zijde, aan de kant van het zand, tussen het zand en het grout. Het grout hardt dan ook op deze manier uit.
- Bij conventionele grout is het aannemelijk dat er grote hoeveelheid water uit de mortel wordt geperst zodat er een materiaal overblijft dat een veel lager water vaste stof verhouding heeft dan ingebracht werd. Zie ook onderstaande tabel waar de relatieve uitgeperste volumes zijn weergegeven ten opzichte van de hoeveelheid water in de grout c.q. mortel en de totale hoeveel ingebracht volume (dus inclusief de vaste fractie van grout c.q. mortel). Het opgelegde drukverschil bedroeg 1,38 bar.

Tabel 2.11 Relatieve volumes uitgeperst water 2 componenten grout

Tijdsduur [min]	relatief volume uitgeperst water			
	fijn zand		Grof zand	
	% t.o.v. totaal volume	% t.o.v. waterfractie	% t.o.v. totaal volume	% t.o.v. waterfractie
1	2,4	3,3	5,9	8,2
5	4,7	6,5	8,5	11,8
10	5,1	7,1	9,4	13,0
20	5,0	6,9	9,8	13,6

Tabel 2.12 Relatieve volumes uitgeperst water conventionele grout

Tijdsduur [min]	relatief volume uitgeperst water			
	fijn zand		Grof zand	
	% t.o.v. totaal volume	% t.o.v. waterfractie	% t.o.v. totaal volume	% t.o.v. waterfractie
10	4,8	14,3	12,1	36,1
30	7,6	22,7	15,6	46,6
90	12,1	36,1	25,1	74,9
210	13,0	38,8	27,0	80,6

- Het waterverlies is bij twee componenten grout geleidelijker dan bij conventionele grout.
- Bij conventionele grout wordt bij een drukverschil van 1,38 bar uiteindelijk (bijna) al het water dat in de grout aanwezig was uitgeperst.
- Bij conventionele grout lijkt er geen verband te bestaan tussen de hoeveelheid uitgeperst water en de druk (in de bestudeerde range).

2.5.2 Aanbevelingen

- Het is aan te bevelen om nader onderzoek te plegen naar de methode van het voorspellen van het gedrag van grouts en mortels in vergelijking met een (aangepaste) triaxiaal celapparaat waarbij de materialen onder druk worden toegepast. Het voordeel van het in deze proef gebruikte apparaat is dat dit ook op locatie gebruikt kan worden.
- In de staartspleet wordt de grout samengedrukt. Om dit proces te simuleren zijn er samendrukkingsproeven nodig waarin, in tegenstelling tot de uitgevoerde proeven, ook het korrelskelet van de grout samengeperst wordt.

2.5.3 Relaties naar het model

Reologie

Ten aanzien van de reologische parameters, zoals die bepaald zijn met de Brookfield viscometer zijn op dit moment nog geen concrete data af te leiden die in het model gebruikt zou kunnen worden. Eén van de redenen hiervoor kan zijn dat materialen onder druk een ander reologisch gedrag vertonen.

Groutindringing

De gegevens van de uitgevoerde proeven zijn slecht toe te passen bij de modelontwikkeling, welke in hoofdstuk 3 besproken wordt, en de stromingsproeven uit hoofdstuk 4, omdat de proefomstandigheden (geen samenpersen van het korrelskelet) verschillen van wat er in de staartspleet gebeurt.

3 Modelling stroming staartspleet

3.1 Inleiding modellering stroming in staartspleet

De stroming, de mate van vulling van de staartspleet en de drukverdeling in de grout en de omliggende grond zijn gekoppelde problemen. De grout wordt geïnjecteerd door verschillende openingen in het schild van de boormachine of in de tunnelsegmenten en zal rondom de volledige omtrek van de tunnel moeten stromen.

De stroming zal afhankelijk zijn van de stromingseigenschappen van de grout (bijvoorbeeld viscositeit, zwichtspanning), de drukgradiënt in de grout, de spanningen in de omliggende grondlagen, de ruwheid van de betonnen segmenten en de ruwheid van de boorgatwand. De stromingseigenschappen zijn afhankelijk van de groutsamenstelling (bijvoorbeeld 1-component en 2-component materialen) en zullen variëren in de tijd.

Dit hoofdstuk handelt over de formulering van een stromingsmodel voor de verspreiding van de grout in de staartspleet. Met dit model worden de drukken in de gegroute staartspleet berekend.

In de voorafgaande studie (fase 0, zie hoofdstuk 2) zijn de volgende praktijkgegevens, en ervaringen, t.a.v. de toepassing van grout voor staartspleetvulling bij de uitgevoerde Macro boortunnels (Heinenoord, Botlek, en eventueel Westerschelde) samengevat:

- Receptuur gebruikte grout (bij Botlek ook van twee-componenten grout)
- Reologie en segregatiekenmerken, en een vergelijking met vergelijkbare grouts in de literatuur (om een indruk van de variaties te verkrijgen).
- Gemeten groutdrukken in de staartspleet, gemeten spleethoogte staartspleet (grondradar), gemeten maaiveldzakkingen.
- Toegepaste groutdebieten, voortgangssnelheid TBM, geometrie staartspleet, locaties nozzles (wel/niet in gebruik), verhouding groutdebiet tot benodigde grout in de staartspleet.
- Toegepaste groutinjectiedrukken (en waar gemeten), in relatie tot de heersende gronddrukken.

Deze praktijkgegevens zijn van belang bij het opstellen van het rekenmodel.

De kleinschalige laboratoriumproeven uit de voorafgaande studie (fase 0) hebben de volgende gegevens ten aanzien van de stromingseigenschappen van de grout opgeleverd:

Voor 1 componenten grout:

- De orde-grootte van de flowcurve (=vervormingsweerstand, in Pascal [Pa], bij lage vervormingssnelheden);
- De tijdschaal van de verandering van de reologie met de tijd (final set);
- De invloed van de variatie van de samenstelling van de grout op de reologie, inclusief variatie van de water/cement verhouding;
- De invloed van de initiële menging op de reologie.

Voor de twee-componenten grout:

- De orde-grootte van de (parameters van de) flow curve;
- De tijdschaal van de verandering van de reologie met de tijd (initial set);
- Verkenning van de invloed van de menging van de twee afzonderlijke componenten op de reologische parameters;
- Verkenning van de invloed van niet-optimale menging (variatie component B).

Deze gegevens zijn van belang voor de identificatie van de meest relevante processen en als inputparameters voor het rekenmodel.

Het is de bedoeling om aan de hand van het rekenmodel, dat in dit hoofdstuk besproken wordt, meer duidelijkheid te verkrijgen over de invloed van groutstroming op groutdrukken in de staartspleet en om de instelparameters van de stromingsproeven (fase 2, zie hoofdstuk 4) te selecteren.

3.2 Reologie grout

Grouting is een verzamelnaam voor het vloeibaar mechanisch injecteren van vastestofbestanddelen in de grond, die een binding met de grond aan gaan.

Eén en twee-componenten grout

In Nederland wordt en in het verleden in Japan werd gebruik gemaakt van 1-component injectie-materialen, zoals een mengsel van cement, bentoniet en zand. De belangrijkste nadelen van dit materiaal zijn:

- het materiaal kan slechts over beperkte afstand in de staartspleet stromen. Bij het gebruik van een beperkt aantal injectieopeningen is het daardoor niet mogelijk de staartspleet rondom de tunnelwand volledig te vullen;
- aanvoerleidingen raken verstopt, waardoor het slechts over beperkte afstand verpompbaar is;
- het materiaal is niet volumevast. Na injectie neemt het volume af door uittreding van vrij water en krimpeffecten, waardoor zettingen zullen ontstaan.

Voor het ondervangen van de nadelen van conventionele groutmengsels is in Japan 20 jaar geleden een 2-componenten vulmateriaal ontwikkeld. Inmiddels is hier in de praktijk veel ervaring mee opgedaan. Kennis over het elementaire gedrag van 2-componenten groutmaterialen is echter ook in Japan niet beschikbaar.

Samenstelling gewone grouts

Grouts bestaan uit water, cement, zand of grind, en verschillende toeslagstoffen. De rol van de verschillende ingrediënten wordt in verschillende tekstboeken besproken. Vaak wordt Portland cement toegepast. Portland cement is een mengsel van complexe anorganische bestanddelen. De belangrijkste zijn Calcium-, Aluminium- en Silicium oxyden.

Grout, mortel en beton

Qua vaste-stofbestanddelen kunnen 3 typen onderscheiden worden: verse cementpasta, verse mortel, en vers beton. Bij staartspleetinjectie handelt het om mortel (zie ook Duitse aanduidingen in instrumentatielijsten, en recepten). Dit bestaat uit een cementpasta plus hoge concentraties grovere vaste-stofbestanddelen: bijvoorbeeld zand 0-4 (= zandkorreldiameters tot 4 mm, NEN5905). Bij beton worden er meer grovere bestanddelen toegepast.

Reologisch gedrag traditioneel grout

De reologische kenmerken (= stromingseigenschappen) van de grout hangen af van de samenstelling en zijn een functie van de tijd.

Tijdschalen

In principe zijn er twee tijdschalen van belang: initial set (tijdens of vlak na de aanmaak van de grout), en final set: versteviging aan het einde van de verwerkbare periode. Dit wordt ook wel de inductie- of sluimer-periode genoemd. Deze is in de range 2 a 5 uur. Voor gewone grout is het eind van de inductieperiode maatgevend voor de stroming in de staartspleet. Voor twee-componenten grout is dat nog niet geheel duidelijk.

Cement, menging bij aanmaak en reologie

Wanneer het droge verse cement en water door menging met elkaar in contact gebracht worden, wordt ieder cementdeeltje door een membraan van gehydrateerde mineralen omhuld. Dit is het hydratatieproces, en dit gaat gestaag door tot aan het einde van de inductieperiode. Bij onvoldoende menging kunnen cementdeeltjes bij elkaar blijven, Tattersall en Banfill 1983, figuur 3.1. Bij aanmaak is goede menging van de cement belangrijk. De menging dient tot op colloïdale schaal doorgevoerd te worden, bijvoorbeeld met een high shear mixer, of in de pomp van een gesloten mengtankcircuitje. Domone & Thurairatnam 1988 geven een voorbeeld van high shear gemengde cement en hand gemixte cement. Bij high shear gemengde cement reproduceert de reologische eigenschappen direct. De handgemixte cement daarentegen vertoont geprononceerd thixotroop gedrag: bij stroming neemt de vervormingsweerstand eerst af, en herstelt zich daarna maar langzaam. In tegenstelling tot Bentoniesuspensies zijn de reologische eigenschappen niet reversibel. Grout vertoont, indien goed gemengd, dus geen thixotrope eigenschappen, Tattersall 1955.

Het bijzondere reologische karakter van de grout komt voornamelijk voort uit de cementpasta. De grovere zanddeeltjes verhogen de afschuiving in de cement. Indien de cement slecht gemengd is, zullen de gevolgen meer geprononceerd zijn. Echter indien de cement goed gemengd is, neemt de weerstand tegen vervormingen significant toe (de grout kan hogere schuifspanningen opnemen). De functie van zand wordt wel omschreven als 'frictiemateriaal', Pelova 1996.

Gas-insluitels, druk en reologie

Gas-insluitels kunnen de grout verzwakken, en hebben als zodanig invloed op de reologie: Calloni e.a. 1999. Ten gevolge van de samendrukbaarheid van de gasinsluitels heeft de absolute waarde van de druk invloed op de reologie.

De twee-componenten grout is een voorbeeld van een chemische grout. Bij chemische grouts kan de final set time gestuurd worden door keuze van debiet, concentratie en samenstelling van de katalysator. In de twee componenten grout bevindt zich een luchtbelvormer. Ten gevolge van de samendrukbaarheid van het gas zal de druk invloed hebben op de reologie.

Wiskundige modellering

In paragraaf 3.3 wordt de wiskundige formulering van het reologische model van de grout besproken (zonder tijdsinvloeden). In paragraaf 3.4 wordt de modellering van de tijdsinvloeden op de reologie besproken.

3.3 Lokale drukval door groutstroming in staartspleet

Met stromingsmodellen worden in principe drukverschillen tussen verschillende locaties berekend. De absolute waarde van de druk wordt bepaald door een externe druk welke op de rand van de vloeistofstroming, door andere processen opgelegd wordt.

De stromingsprocessen spelen zich in de staartspleet af in een drukrange van 2 tot 4 bar. De absolute waarde van de druk is van belang voor de reologie van de grout indien er zich luchtbelvormers in de grout bevinden. De absolute waarde is eveneens van belang ten aanzien van de ondersteuning van de grond. Het drukverschil met het grondwater bepaalt eventuele compactieprocessen van de grout (volumeveranderingen van de vaste-stofmatrix) en de verandering van de reologie dientengevolge.

Een definitieschets van de reologie van de vloeistof is gegeven in figuur 3.2. Langs de horizontale as staat de afschuifsnelheid van de stroming, langs de verticale as de weerstand tegen vervorming (de schuifspanning). De afschuifsnelheid is de gradient van de snelheid (= de raakklijn aan het snelheidsprofiel, de afschuifsnelheid is gelijk aan:

$$\frac{\eta u}{\eta z}, \quad \text{met: } u = \text{stroomsnelheid, } z = \text{coördinaat in een richting loodrecht op de stroomsnelheid}.$$

De schijnbare viscositeit is de verhouding van schuifspanning en afschuifsnelheid. Bij een niet-Newtonse vloeistof is deze niet constant, maar varieert met de afschuifsnelheid (bovendien kan deze met de tijd variëren, dat wordt in paragraaf 3.3. besproken). De relatie tussen de afschuifsnelheid en de schuifspanning wordt de flow-curve (= stromingsdiagram) genoemd. De wiskundige relatie is (Herschel-Bulkley model):

$$\tau = \tau_y + K \left(\frac{\eta u}{\eta z} \right)^n$$

met: τ_y = zwichspanning van de grout (eng.: yield-stress)

K = viscositeitscoefficient

n = exponent van de afschuifsnelheid

Daar de range van afschuifsnelheden in de staartspleet in de praktijk maar gering is, volstaat: $n=1$ (Tattersall & Banfill 1983). Een reologisch model met $n=1$ is een Bingham model.

Door de relatief hoge vervormingsweerstand van de grout is de stroming in de staartspleet laminair. Indien de viscositeit van de vloeistof constant is (een Newtonse vloeistof dus) ontstaat er een parabolisch snelheidsprofiel over de hoogte van de spleet. Echter door het sterk niet-Newtonse karakter van de vloeistof (de hoge zwichtspanning) ontstaat er een zogenaamd plugstromingsprofiel. In het midden is het stromingsprofiel vlak (de plug), en aan de wand zijn de snelheidsverschillen groter dan bij een parabolisch profiel.

Bij de berekening van de lokale stromingsweerstand in de spleet wordt het specifieke niet-Newtonse karakter van de grout in rekening gebracht. De wandschuifspanning wordt berekend uit de geschatte afschuifsnelheid aan de wand ($\frac{du}{dz} = \frac{12U}{h}$, met: U = gemiddelde snelheid over de dikte van de groutschil, h = dikte groutschil) vermenigvuldigd met de daarbij behorende schijnbare viscositeit (η) van de vloeistof. De wandschuifspanning wordt aldus berekend uit:

$$\tau_w = \eta \frac{12U}{h}$$

De schijnbare viscositeit, aan de wand, wordt berekend uit:

$$\eta = \frac{\tau_w}{\frac{12U}{h}} + K \left(\frac{12U}{h} \right)^{n-1}$$

Bij de berekening van de schuifspanningen wordt ook rekening gehouden met de richting van de stroming. De berekeningsmethode voor de verdeling van de groutstroming in de staartspleet wordt beschreven in Bijlage 3A. In deze berekeningsmethode wordt er ook rekening mee gehouden dat de stromingsweerstand (ofwel de schijnbare viscositeit) ook een functie van de ouderdom van de grout is. In paragraaf 3.4 wordt een model gegeven voor de modellering van tijdseffecten op de schijnbare viscositeit.

In de toegepaste modellering van de stromingsweerstand zijn twee vereenvoudigingen toegepast:

- De werkelijke afschuifsnelheid aan de wand is groter dan de waarde welke uit het parabolisch profiel volgt. Daardoor is de berekende waarde van de schuifspanning, bij de toegepaste grouts, circa 5% te laag.
- Variaties in de levensduur van de grout over de spleethoogte zijn niet meegenomen. Bij de wanden stroomt de grout langzamer. Daardoor verschilt de ouderdom van de grout aan de wand van die midden in de spleet. De daarmee gepaard gaande variatie van de reologische eigenschappen is verwaarloosd.

Het is in dit stadium niet zinvol een verbeterde modellering van bovengenoemde vereenvoudigingen na te streven, omdat de onnauwkeurigheid in de bepaling van reologische parameters groter is.

Als nabewerking wordt de lokale drukval berekend uit de lokale krachtenbalans van wandschuifspanningen en de drukgradient:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{t_{wi} + t_{wu}}{2h}$$

met : t_{wi} = wandschuifspanning op de tunnelling (langs de inwendige begrenzing van de groutschil)

t_{wu} = wandschuifspanning uitgeoefend op de grond (langs de uitwendige begrenzing van de groutschil)

In Bijlage 3B wordt de berekening van drukgradienten ten gevolge van de stroming in de staartspleet beschreven. Voor berekening van de totale druk dient de statische drukverdeling hier bij opgeteld te worden.

3.4 Model tijdsafhankelijkheid stromingsparameters

Bij grout zijn de stromingseigenschappen een functie van de tijd. Oudere grout stroomt slechter dan verse grout. Dientengevolge kunnen leeftijdsverschillen de groutverdeling, en de groutdrukken, in de staartspleet beïnvloeden.

De tijdsafhankelijkheid wordt gemodelleerd via de reologische parameters.

(opmerking: in numerieke CFD stromingsberekeningen aan cementing in olieboorgaten is het tijdsafhankelijke karakter van de reologie van de cement naar mijn weten nog nooit meegenomen, dus we zijn we wellicht één van de eersten die zoiets doen.)

Wiskundige modellering van de tijdsafhankelijkheid.

Er wordt in principe uitgegaan van een Herschel-Bulkley modelbeschrijving van de reologie, paragraaf 3.3. De tijdsinvloeden zijn verwerkt in de basisparameters van het reologisch model.

Vanwege de beperkte range van afschuifsnelheden in de groutstroming kan de exponent (n) van de afschuifsnelheid gelijk aan n=1 genomen worden, Tattersall and Banfill 1983. Daardoor is het reologisch model, nog zonder tijdsinvloeden, effectief een Bingham model geworden.

Er kunnen twee soorten 'tijdsafhankelijkheid' onderscheiden worden:

1. Een directe tijdsafhankelijkheid door chemische veranderingen in de grout. Deze kunnen bepaald worden aan de hand van proevenseries met rotoviscosimeters- of pijpviscometers. Deze zijn/worden uitgevoerd in fase 0 en fase 2 van dit project.
2. Een indirecte tijdsafhankelijkheid ontstaat door volumeverkleining van het vastestofskelet van de grout ten gevolge van drukverschillen met de poriëndruk in het grondskelet. Dit is vergelijkbaar met de bekende bleeding-eigenschappen van grout: uit de grout stroomt water af naar het grondpakket. Dit is vooralsnog niet gemodelleerd, omdat de primaire doelstelling is de stroming en drukverdeling te modelleren. Om deze

indirecte tijdsafhankelijkheid te verdisconteren dient een combinatie van doorlatendheids-berekeningen van grond en grout uitgevoerd te worden. Bij koppeling met grondvervormingsrekenmodellen (zoals Diana) kan hier wel rekening mee gehouden worden.

De tijdsafhankelijkheid van de reologische parameters is met behulp van een 'relaxatie tijd' T als volgt gemodelleerd:

$$t_y = t_{y0} + (t_{y\infty} - t_{y0})(1 - e^{-t/T})$$

$$K = K_0 + (K_{\infty} - K_0)(1 - e^{-t/T})$$

$$n = 1$$

met: t_{y0} , K_0 = getalswaarde zwichtspanning en viscositeitparameter bij instroming
 $t_{y\infty}$, K_{∞} = getalswaarde zwichtspanning en viscositeitparameter na verstrijken van een veelvoud van de relaxatietijd.

Voor de relaxatietijd T , zal voor 1-component grout, de tijdschaal van de initial set genomen moeten worden. Daarna treedt er een inductieperiode op waarin de vervormingsweerstand constant blijft. Na 2 á 5 uur treedt de final set op (de uitharding). Dat wordt niet gemodelleerd. Voor twee-componenten grout moeten we nog zien hoe het tijdsafhankelijke gedrag is. Eerst zijn de fase 0 proeven nodig, daarna de fase 2 proeven om het gedrag onder de werkelijke omstandigheden te bepalen.

3.5 Verdeling grout in staartspleet

3.5.1 Fenomenologische beschrijving groutstroming in staartspleet

De staartspleetruimte welke ontstaat bij het naar voren bewegen van de TBM wordt direct opgevuld met grout. In de stromingsberekening wordt de dikte van de staartspleet constant verondersteld. Uit de stromingsberekening volgen drukken. Aan de hand van deze drukken kunnen via een toekomstige koppeling met een grondberekeningspakket grondvervormingen berekend worden.

Nadat de grout het injectiepunt verlaat stroomt het voornamelijk in tangentiële richting langs de 'borstelrand' van de TBM. Op deze wijze wordt de ruimte welke ontstaat door de voortgaande beweging van de TBM opgevuld, zie figuur 3.3. Aldus is de druk bij het injectiepunt hoger dan in de omringende grout. De vers geïnjecteerde grout stroomt bovendien beter dan de eerder geïnjecteerde grout, dit om de volgende twee redenen:

1. De oudere grout heeft zich verspreid, en stroomt heel erg langzaam. Tengevolge van het zwichtspanningskarakter van de grout heeft dit een hoge schijnbare viscositeit. De verse grout stroomt sneller, en heeft een lagere schijnbare viscositeit.
2. Door de chemische/hydratatie processen is de stromingsweerstand van de grout sowieso hoger.

De grout volgt aldus de weg van de minste weerstand, en zal via een smal stroomgebied, in radiale richting, langs de achterrand van de TBM stromen.

3.5.2 Randvoorwaarden, input en output rekenmodel

Het rekenmodel is geprogrammeerd in een spreadsheet (EXCEL 97). Het rekenmodel berekent de verdeling (d.i. het stromingspatroon) van de grout in de staartspleet. Het is dus een stromingsprogramma toegesneden op de vulling van de staartspleet bij een voortbewegende TBM (de voorrand van het rekendomein beweegt). Als nabewerking worden de druk, de drukverdeling over de staartspleet, en de druk in de staartspleet bij de injectie-openingen berekend.

De input-parameters van het rekenmodel zijn:

Voortgangssnelheid TBM	
hoogte staartspleet	
aantal en plaats injectiepunten	6 vaste injectiepunten
Debietverdeling over de injectiepunten	
beoogde druk groutschil bovenzijde tunnel	advies: verticale gronddruk.
Waterspanning bovenzijde tunnel	
dichtheid grout	
Reologische parameters grout (Binghams)	eventueel met onderscheid naar gladde, ruwe of doorlatende 'wand'. (fase 2 proeven zullen dit uitwijzen)
Tijdschaal en mate van verandering grouteigenschappen in de tijd	

Het rekenmodel gaat uit van continuïteit: het totale injectiedebiet van de grout is gelijk aan het produkt van de voortgangssnelheid en het oppervlak van de dwarsdoorsnede van de staartspleet. M.a.w er wordt van uitgegaan dat het groutverlies naar het grondpakket beduidend kleiner is dan het debiet benodigd voor de vulling van de staartspleet. Dat zal niet al te veel van de praktijk afwijken, omdat door de hoge dichtheid van de grout al snel verstopping van de eerste korrellagen van het grondkorrelskelet op zal treden door het afstromen van minieme grouthoeveelheden naar de grond.

De output-parameters van het rekenmodel zijn:

Stroomsnelheden in staartspleet
Drukverdeling in staartspleet
Verblijftijd grout in spleet
druk voor de injectieopeningen

De gebruiker kan aan de hand van de rekenresultaten locaties waar zich eventuele blokkades kunnen ontstaan gemakkelijk herkennen. De drukval loopt hoog op, of de tijd verstreken sinds injectie is langer dan de verwerkbare periode van de grout.

De wijze waarop drukken in de nozzle, in de toevoerleidingen en aan de perszijde van de groutpomp berekend kunnen worden wordt behandeld in fase 3 van het project.

3.5.3 Statische plus dynamische drukcomponent

De drukverschillen in de staartspleet zijn de som van een statisch deel en een dynamisch deel. Het statische deel is het gevolg van het eigen gewicht van de grout (niet het 'ondergedompeld gewicht'). Het dynamische deel is een gevolg van de stroming in de staartspleet en is een functie van grouteigenschappen en injectiedebieten en de locatie van de injectie-nozzles.

De dynamische drukken (eigenlijk drukverschillen) worden berekend met het groutstromingsprogramma. Statische drukverschillen worden daarop gesuperponeerd. De gebruiker dient de druk op '12 uur' (buiten de drukbeïnvloedingszone van een eventuele injectie-nozzle op '12 uur') op te geven. Vanuit deze referentiedruk worden absolute drukken in de staartspleet berekend.

3.5.4 Oplosmethode groutverdeling

3.5.4.1 Verdeling stroming in staartspleet

De stromingsberekening geschiedt aan de hand van een stroomfunctie welke via een iteratief proces in de 2-D spleetruimte opgelost wordt. De stroomfunctie, en de daarbij behorende snelheden zijn gedefinieerd in een met de TBM meebewegend coördinaten systeem. De stroomfunctie wordt opgelost in sheet A van het spreadsheet. De basisvergelijkingen van het groutstromingsmodel zijn beschreven in Appendix 3A. Tegelijkertijd wordt ook de schijnbare viscositeit (zie par.3.3) berekend.

De schijnbare viscositeit wordt berekend in sheet C (hierin worden lokale snelheden en leeftijd van de grout verdisconteerd). De daartoe benodigde grootte van de snelheid wordt in sheet B berekend. De leeftijd van de grout wordt in sheet D berekend.

3.5.4.2 Berekening druk in staartspleet

De berekening van de drukken is beschreven in Appendix 3B. De druk heeft geen invloed op de stroming, en wordt als nabewerking berekend. De dynamische druk wordt in sheet E berekend. De som van statische en dynamische druk: de totale druk wordt in sheet F berekend.

3.5.4.3 Berekening tijd sinds injectie

De leeftijd van de grout in de spleet wordt gerekend sinds de instroming bij de nozzles (hier: $t=0$). Dit is nodig om de invloed van de leeftijd van de grout op de reologie mee te kunnen nemen, zie paragraaf 3.4. De berekening van de leeftijd van de grout, een van de moeilijkste 'nabewerkingen', van het stromingsveld, geschiedt iedere keer nadat er een rekenslag stroombeeldberekening uitgevoerd is. De basisvergelijkingen van de tijdsberekening worden beschreven in Appendix 3C.

3.6 Voorbeeldberekeningen en consequenties voor de proefnemingen (in fase 2)

3.6.1 Standaard 1-component grout

Orde grootte reologie volgens fase 0:

Met de vane's zijn zwichtspanningen van de orde 1,5 a 2 kPa gemeten. Met de Brookfield zijn waarden van 0,2 kPa en hoger gemeten. Echter de geometrie van de meetelementen is zodanig dat we niet goed weten welke betekenis we hieraan moeten toekennen. Gemeten zetmaatwaarden zijn in de orde 150 mm. Op basis van de literatuur moet dit ongeveer overeenkomen met een zwichtspanning van 1 kPa.

3.6.2 Twee componenten grout

De interpretatie van de gemeten sterkte in fase 0 roept vragen op. Indien we deze met de pocketpenetrometer gemeten waarde (18 kPa in de verwerkbare periode = inductie periode) gelijkstellen aan de zwichtspanning komen we op veel de hoge stromingsweerstand uit. Er zal nader naar de reologische bepaling in fase 0 gekeken moeten worden, bijvoorbeeld door ook eens een test met een vane uit te voeren. Verder zullen de pijpstromingsproeven uitkomst moeten bieden. In deze proeven worden de condities in de staartspleet zoveel mogelijk nagebootst.

3.6.3 Voorbeeldberekeningen drukken in de staartspleet voor een standaard grout

De proeven dienen bij stroomsnelheden uitgevoerd te worden welke overeenstemmen met de stroomsnelheden in de staartspleet. Uit de stromingsberekeningen volgen de stroomsnelheden in de staartspleet. Deze berekende waarden worden als gids bij het vaststellen van de proevenmatrix gebruikt.

De vulling van de staartspleet is berekend voor twee verschillende fictieve omstandigheden. Een berekening gaat uit van 6 gelijkmatig verdeelde injectieopeningen, en de andere berekening is gebaseerd op enkel 3 injectieopeningen in het bovenste gedeelte van de TBM. De drie injectiepunten bevinden zich op 2, 10 en 12 posities. In het geval van zes injectieopeningen bevinden de injectieopeningen zich op 2, 4, 6, 8, 10 en 12 uur posities. Invoerparameters zijn gegeven in onderstaande tabel.

Tabel 3.1 Invoerparameters stromingsberekeningen

parameter	symbool	waarde	
Buitendiameter tunnelling	D	10	[m]
Hoogte staartspleet	h	0.15	[m]
Lengte tunnelling segmenten		1,5	[m]
Boorsnelheid TBM	v_t	1	[mm/s]
Stop interval plaatsing elementen		60	[min]
Gronddruk kruin tunnel (totale druk)		400000	[Pa]
Waterdruk kruin tunnel		200000	[Pa]
Zwichtspanning op $t=0$	τ_{y0}	1500	[Pa]
Zwichtspanning aan einde verwerkbare periode	$\tau_{y\infty}$	2500	[Pa]
Tijdschaal reologieveranderingen	T	14400	[s]
Binghamse viscositeit K op $t=0$	K_0	50	[Pa s]
Binghamse viscositeit K aan het einde van de verwerkbare periode	K_∞	75	[Pa s]
Dichtheid grout mengsel	ρ	2000	[kg/m ³]

De tijdschaal van reologieveranderingen is bepaald aan de hand van de Brookfield rotoviscometer test uit fase 0. De berekende stroomsnelheden, de tijd sinds injectie, de drukverdeling tengevolge van enkel de stroming en de totale druk in de grout zijn weergegeven in de figuren 3.4 en 3.5. De gridlengte aangegeven in de legenda is: $ds = 0,31$ m. In onderstaande tabel kan gebruikt worden als hulp om de weergegeven afstand achter de TBM uit de figuren af te lezen. Figuur 3.4b en 3.5b betreft de snelheidscomponent in dwarsrichting (n-richting).

Legenda	afstand achter TBM
$s = \frac{1}{2} ds$	$s = 0,15$ m
$s = \frac{3}{2} ds$	$s = 0,47$ m
$s = \frac{5}{2} ds$	$s = 0,79$ m
$s = \frac{7}{2} ds$	$s = 1,10$ m
$s = \frac{9}{2} ds$	$s = 1,41$ m
$s = \frac{11}{2} ds$	$s = 1,73$ m
$s = \frac{13}{2} ds$	$s = 2,04$ m
$s = \frac{15}{2} ds$	$s = 2,36$ m
$s = \frac{17}{2} ds$	$s = 2,67$ m
$s = \frac{19}{2} ds$	$s = 2,98$ m
$s = \frac{21}{2} ds$	$s = 3,30$ m
$s = \frac{23}{2} ds$	$s = 3,61$ m

De berekende groutstroming in de staartspleet is voornamelijk in dwarsrichting direct achter de TBM. De stroming vindt plaats over een breedte van circa 0,5 a 1 m. De stroomsnelheden zijn in de range van 1 tot 10 mm/s. Ze nemen af naar het samenstromingspunt van de verzorgingsgebieden van de verschillende injectie-nozzles. De stroomsnelheden zijn erg klein (bij 6 injectiepunten < 5 mm/s, bij 3 injectiepunten < 2 mm/s).

Bij 6 injectiepunten is midden tussen de injectiepunten de verstreken tijd sinds injectie groter dan de tijd benodigd voor het boren van een afstand gelijk aan één tunnellingsegment. De conclusie is dat de grout welke zich midden tussen de injectiepunten bevindt geïnjecteerd is in een vorige werkcyclus, en voorwaarts gedrukt wordt door de vers geïnjecteerde grout. Bij 3 injectiepunten is de grout onderin ouder.

Deze voorbeeldberekeningen laten zien dat de groutdrukken bij de eerste tunnellingsegmenten achter de TBM sterk beïnvloed worden door de keuze van injectiepunten. De drukverdeling is bij benadering statisch indien de grout toegediend wordt via gelijkmatig verdeelde injectiepunten, met lokaal hogere waarden vlak voor de injectieopening. Als er een klein aantal injectieopeningen toegepast wordt moet de grout over een langere afstand stromen. In dat geval wordt de drukverdeling zodanig beïnvloed dat de statische bijdrage volkomen gemaskeerd kan worden, en de verdeling van de totale druk langs de omtrek van de tunnelling, direct achter de TBM, bij benadering uniform is.

Het is, gezien de hoge gemeten sterkte in fase 0 van dit project, nu niet zinvol om voor het twee-componenten grout berekeningen uit te voeren. De berekende drukverschillen over de omtrek van de tunnelling zullen dan onrealistisch groot worden.

3.6.4 Consequenties proefnemingen fase 2

De gevolgtrekkingen voor de stroomsnelheid toe te passen in de proeven van fase 2 zijn weergegeven in onderstaand lijstje:

karacteristieke laagste snelheid in staartspleet	0,001 m/s
karacteristieke snelheid in staartspleet	0,005 m/s
karacteristieke snelheid in rekenmodel vlak bij injectieopening, wanneer er één of twee injectiepunten gebruikt zullen worden.	0,025 m/s
een snelheid meer van de orde uitstroomsnelheden groutleidingen	0,10 m/s

De stroomsnelheden van 0,001 en 0,005 m/s zijn direct afgeleid uit de groutstromingsberekening in paragraaf 3.6.3.

De proef met een vulsnelheid van 0,025 m/s is bedoeld om gegevens te verkrijgen van de stromingsweerstand direct na uitstroming uit de injectieopeningen. Deze kunnen eventueel later ook gebruikt worden om relaties tussen drukken gemeten in het toevoersysteem en in de staartspleet te leggen. Bovendien zijn bij twee component grout de tijdschalen korter, waardoor de stroming meer ‘gekanaliseerd’ kan worden in een snellere stroom langs de achterrand van de TBM.

De hoogste stroomsnelheid, 0,1 m/s, is geënt op uitstroomsnelheden uit de groutinjectieopeningen. Bij 6 injectieopeningen volgt, bij een veronderstelde diameter van de uitstroomopening van 0,05 m, een injectiesnelheid van 0,4 m/s. Bij minder injectieopeningen neemt de snelheid verder toe. Deze stroomsnelheid is beduidend groter dan de stroomsnelheden welke berekend worden met het groutmodel voor de staartspleetstroming. Dat komt omdat de afmetingen van de gridvakken beduidend groter zijn (0,3 x 0,3 x 0,15 m). Voor het groutstromingsmodel zijn de stroomsnelheden uit de injectieopening een subgridfenomeen.

3.7 Conclusies en aanbevelingen

Er is een spreadsheetmodel gemaakt voor de verdeling van de grout in de staartspleet. Hiermee kunnen drukken in de staartspleet berekend worden.

De voorbeeldberekeningen laten zien dat de keuze van het aantal en de locatie van actieve groutinjectiepunten een grote invloed heeft op de drukverdeling in de grout.

De meest belangrijke parameter is de reologie van de grout, met name de schuifweerstand. Deze dient via experimenten bepaald te worden. Het model is uitgerust met reologische beschrijvingen om deze reologische kenmerken te verdisconteren.

4 Proeven groutstroming

4.1 Doel

Het doel van de proeven is om de stromingsweerstand van de twee verschillende typen grout te bepalen en om daaruit de flowcurve van de grouts af te leiden. De proeven bootsen de stromingscondities van de tangentiële groutstroming vlak achter de achterrاند van de TBM na. Op basis van de reologische kenmerken van het grout bepaald in fase 0 van het onderzoek en de operationele praktijkparameters zijn met het model voor de staartspleetvulling, dat ontwikkeld is in fase 1, de in te stellen proefomstandigheden vastgesteld. Dit omdat op deze wijze een zo goed mogelijke indruk verkregen is van de heersende stromingscondities (debiet en druk) in de staartspleet.

Om de stromingseigenschappen te bepalen, worden er een aantal experimenten gedaan. Iedere proef bestaat uit een serie van maximaal 4 proefnemingen bij dezelfde grout/buis combinatie, maar bij verschillende groutdebieten. Uit lokale drukverschillen (interval afzonderlijke drukopnemers tenminste 0,3 m) wordt de schuifspanning welke de grout op de pijp wand uitoefent berekend. Gedurende de proef neemt de leeftijd van de eerst geïnjecteerde grout toe. Deze passeert, met gelijk blijvende snelheid de verschillende drukopnemers. Op deze wijze kan de stromingsweerstand bepaald worden als functie van de tijd. Voor dezelfde grout/buis combinatie wordt de proef voor nog drie andere injectiesnelheden uitgevoerd. Op deze wijze hebben we voor vier stroomsnelheden de stromingsweerstand van de grout.

Afschatting van in de praktijk voorkomende groutsnelheden

De gegevens van een “referentietunnel” staan weergegeven in tabel 4.1. Uit deze gegevens blijkt dat de debieten per injectiepunt in de orde van 0.8 l/s is. Bij een nozzle diameter van 10 cm geeft dit als typische snelheid 10 cm/s. Dit is dan ook de maximale snelheid waarbij er proeven gedaan zijn. De snelheden van het grout in de staartspleet gaan uit eindelijk naar nul. De laagste snelheden waarbij gemeten is, worden dan ook bepaald door de grenzen van de gebruikte pompen. In tabel 4.4 en tabel 4.5 zijn de uiteindelijk beoogde en gerealiseerde snelheden waarmee de proeven gedaan zijn weergegeven.

Tabel 4.1 Gegevens van een “referentietunnel”

Boordiameter	10 m
breedte staartspleet	15 cm
voortgangssnelheid tijdens boring	1 mm/s
Aantal groutinjectiepunten	6
Groutdebiet per injectiepunt tijdens boren	0,79 l/s

4.2 Opstelling

4.2.1 Gebruikte grouts

Zoals eerder vermeld, zijn proeven gedaan met een conventionele één component grout en met een twee componenten grout. De samenstelling van de gebruikte grouts is weergegeven in tabel 4.2. De aangegeven hoeveelheden zijn goed voor ongeveer 1 m³ van de beide grouts. De gebruikte verharder heeft een dichtheid van 1251,5 kg/m³.

Het gebruikte zand voldoet aan de specificaties die in de praktijk gebruikt worden, namelijk dat het valt binnen de grenzen van zand met een korrelgrootteverdeling 0-4 volgens NEN5905. De gebruikte bentoniet is Colclay.

Tabel 4.2 De samenstelling van de gebruikte grouts

één component grout		twee componenten grout			
		component 1		component 2	
Water	335 kg	water	650 kg	ETAC 3S (verharder)	115 kg
Portland cement	166 kg	ETAC MENT	240 kg		
Vliegas	120 kg	ETAC β	130 kg		
Bentoniet	9,1 kg	(klei zand)			
Zand	1481 kg	ETAC RX	4,5 kg		
Plastificeerder	0,71 kg	(vertrager)			
		luchtbelvormer	0,5 kg		

4.2.2 Buis

De laboratoriumproeven zijn uitgevoerd om de ontwikkeling van de rheologische kenmerken van de grout nader te meten onder condities welke zo veel mogelijk overeenkomen met stromingscondities in een staartspleet van een tunnel met staartspleet breedte van 6 cm. Zoveel mogelijk onverschaald zijn: stroomlengte, stroomtijd, heersende druk en wandruwheden.

Het één en ander heeft er toe geleid dat grout is geïnjecteerd in een 5 m lange buis met een inwendige diameter van 0,1 m. Dit is equivalent aan een staartspleethoogte van 0,06 m. Dit is iets kleiner dan de in de praktijk voorkomende staartspleethoogtes, maar wel van de zelfde orde van grootte, zodat de hier gevonden resultaten eenvoudig te vertalen zijn naar in de praktijk voorkomende staartspleethoogtes.

Zoals aangegeven in figuur 4.2, wordt de grout aan één zijde van de buis geïnjecteerd (de eigenlijke meetbuis begint bij de klep), waarna het van links naar rechts door de buis gepompt wordt, totdat de buis geheel gevuld is met grout. De manier waarop de verschillende grouts in de meetbuis gebracht worden, is aan de consistentie van de grouts aangepast. Het vuldebiet wordt opgelegd met een verdringerpomp. De andere zijde van de vulkamer is afgesloten met een beweegbare plunjer. De grout wordt op druk gehouden met behulp van een gewicht dat via een tweetal katrollen aan het dak is opgehangen. Bij het injecteren van de grout wordt het gewicht verder naar boven gedrukt (zie figuur 4.2.) Er zijn verschillende gewichten aanwezig om het mogelijk te maken de druk in de buis aan de proefomstandigheden aan te passen. Door de aanwezigheid van een teruglooprem wordt

voorkomen dat, als de druk in de buis weg mocht vallen, het gewicht naar beneden valt. Omdat het gewicht via een takel opgehangen is, kan na het einde van de proef het gewicht eenvoudig naar beneden gehaald worden. Beneden gekomen wordt het gewicht op een tweetal bokken geplaatst.

De gebruikte plunjer voorzien is van een zuiger met een tweetal afsluitrubbers (zie figuur 4.1). Na het einde van de proef wordt de plunjer uit de buis getrokken, waarna de zuiger met de rubbers van de plunjer geschroefd wordt. De plunjer wordt daarna in de buis terug geschoven, waarna de zuiger weer op de plunjer geschroefd wordt. Er zijn twee rubbers achter elkaar gebruikt om er voor te zorgen dat er geen lekkage van grout via de plunjer optreedt op het moment dat de zuiger een montage opening voor de opnemers passeert. Doordat de vlakke opnemers in een ronde buis gemonteerd zijn, is het niet mogelijk de opnemers geheel flush met de wand te maken.

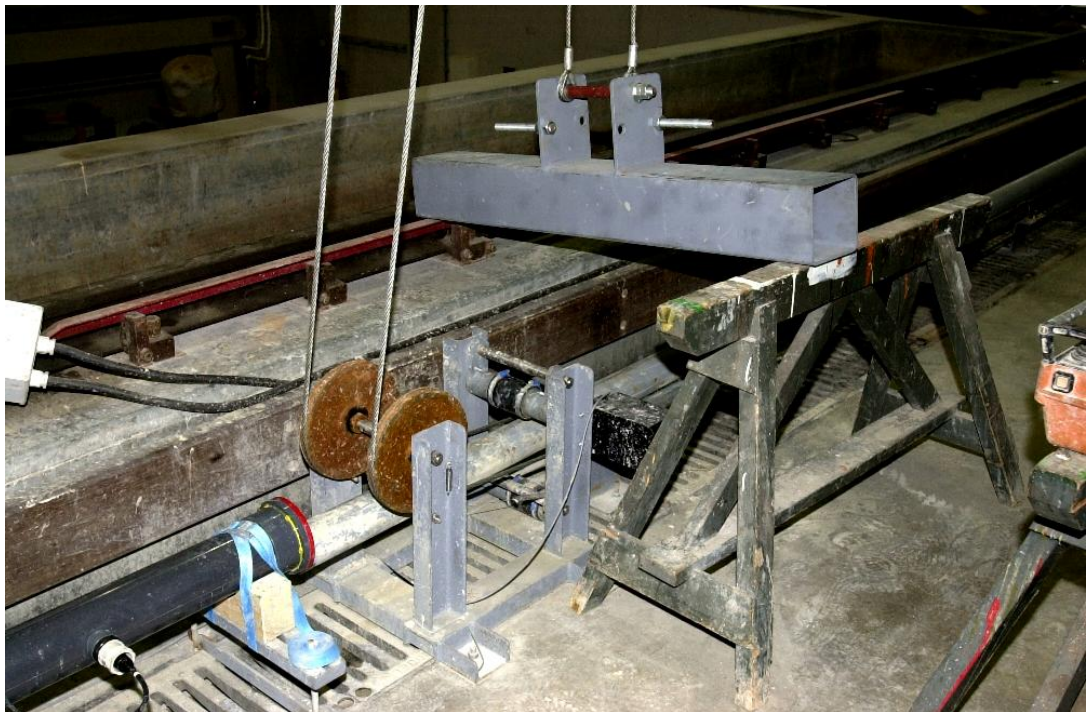
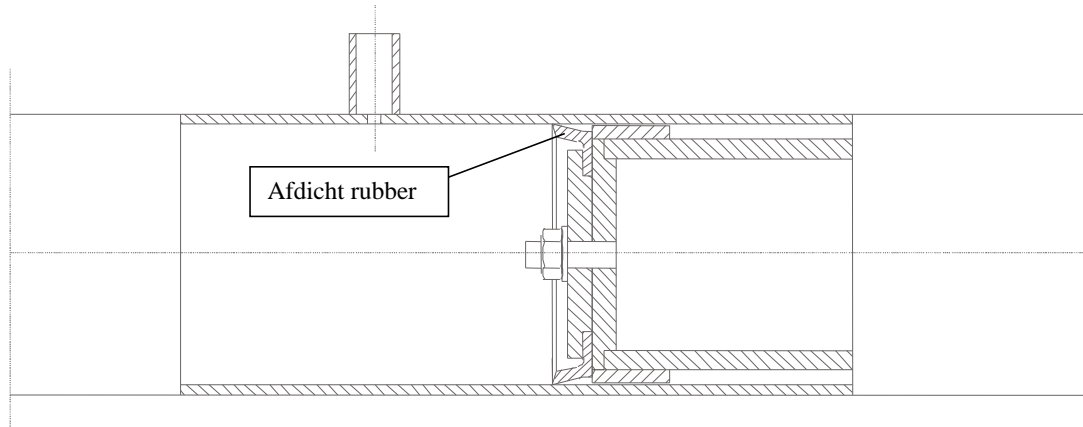


Foto 4.1 De bok waaraan de gewichten gehangen worden



Figuur 4.1 Een schets van de gebruikte plunjer met afdichtrubbers. In de uiteindelijke uitvoering is er niet één, maar zijn er twee rubbers gebruikt met een tussen ruimte, groter dan de afmeting van de gebruikte opnemers.

Er zijn 3 verschillende buizen geprepareerd. Eén van de buizen heeft een glad binnenoppervlak, één heeft een ruw binnenoppervlak en in een van de buizen zijn een aantal kleine gaatjes aangebracht. De gladde buis is bedoeld voor de simulatie van de betonwand, de ruwe buis is bedoeld voor de simulatie van het min of meer ongestoorde en ondoorlatende grondpakket. De doorlatende buiswand is bedoeld om een eventuele vloeistoffilm t.g.v. segregatie bij de buiswand af te voeren. De doorlatende buis is niet bedoeld voor simulatie van filtercakevorming bij doorlatende grond. De buizen zijn gemaakt van PVC. De ruwe buis is gemaakt door een van de buizen van binnen te verven met verf waaraan zand met een d_{50} van $200\ \mu\text{m}$ is toegevoegd. De plunjer is gemaakt van een stalen buis met een diameter die net iets kleiner is dan de diameter van meet buis.

De opstelling is geschikt voor zowel snel-gellerende twee componenten grouts, als meer conventionele 1-component grouts. De menging van de twee componenten grout zal op de zelfde wijze geschieden als in de praktijk.



Foto 4.2 De buis met de gemonteerde opnemers

Langs de buis zijn met een 0,3 m interval montageopeningen gemaakt voor drukopnemers en temperatuuropnemers. Er worden 8 drukopnemers (totaaldruk) gemonteerd. Uit de drukval wordt de wandschuifspanning bepaald. Via een snaaropnemer vindt de plaatsbepaling van de plunjer plaats.

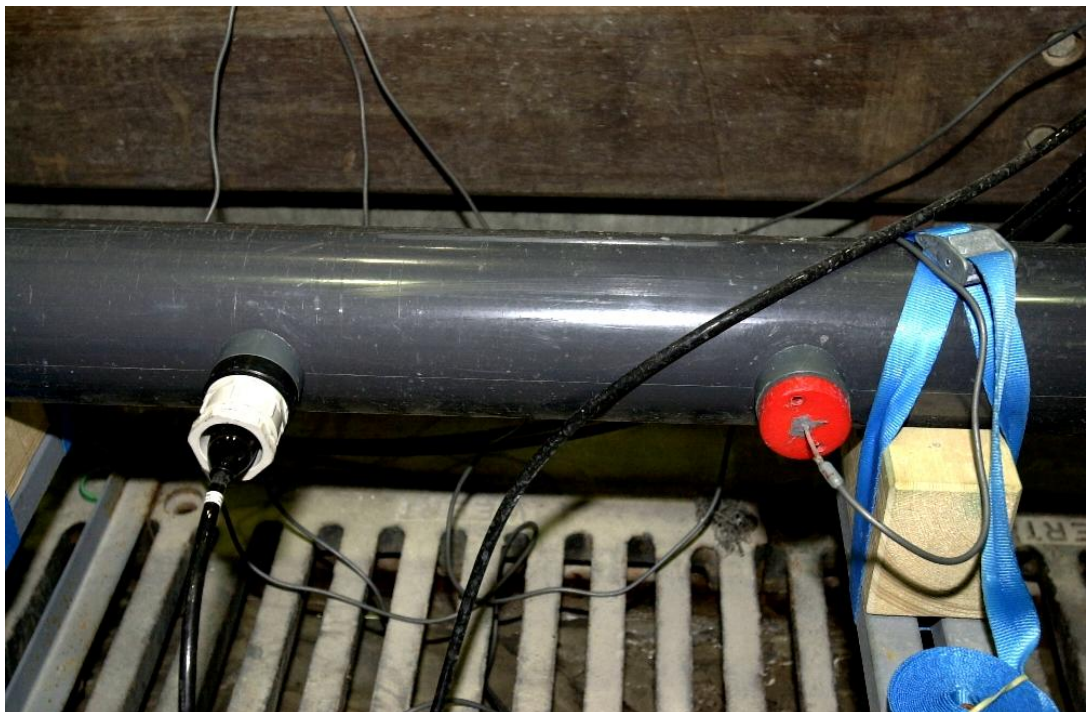
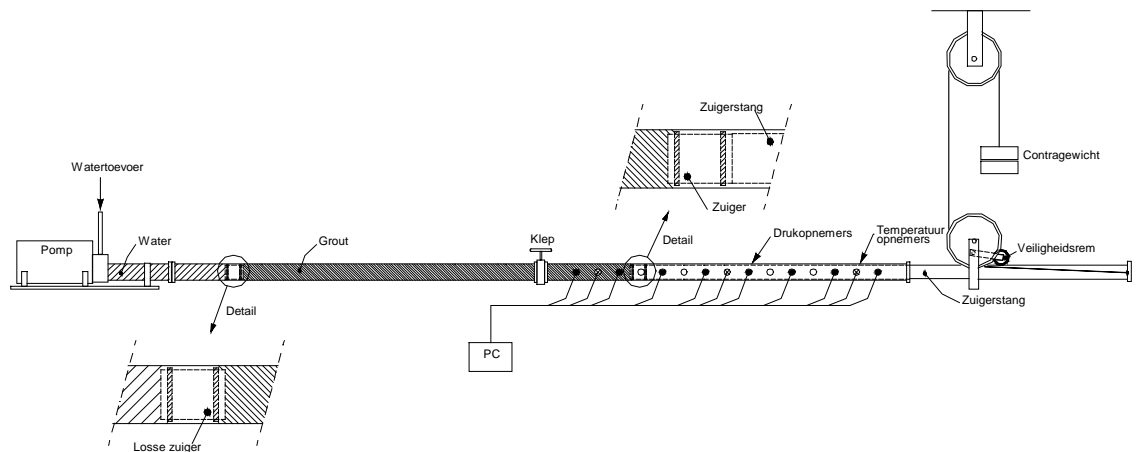


Foto 4.3 Detail opname van een gemonteerde druk- (links) en temperatuuropnemer (rechts)

Er worden vulsnelheden in de range van 0,10 m/s (karakteristiek bij injectiepunten in een tunnelboormachine) tot 0,001 m/s (voortgangssnelheid tunnelboormachine) toegepast, voor zover de tijdschaal van de uitharding van de grout dat toelaat. De bijbehorende debieten zijn 0,47 l/min tot 47 l/min. De proefduur (= vultijd) is daarmee in de range van 50 s tot 5000 s.



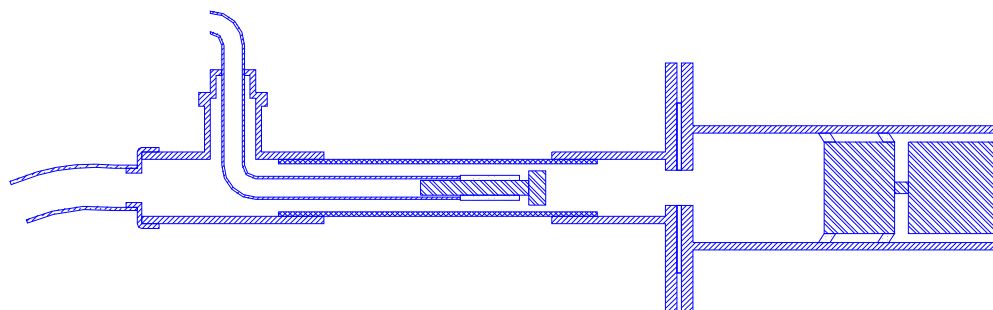
Figuur 4.2 Een overzicht van de opstelling zoals die gebruikt is bij de één component grout proeven

Eén component grout

Omdat het verpompen van het één component grout problemen opleverde, is voor het één component grout uiteindelijk gekozen voor een indirecte injectie methode. Eerst wordt een tweede buis gevuld met grout. Deze buis is aan 1 kant afgesloten met een flens met daarachter een beweegbare zuiger. Aan de andere kant is een afsluiter geplaatst. Het één en ander is geschetst in figuur 4.2. De gevulde buis wordt tegen de meetbuis geplaatst, waarna de afsluiter geopend wordt. Door water door de flens te persen wordt de zuiger in beweging gezet en daarmee het grout in de meetbuis geperst. Ondanks het feit dat de klep slechts een klein gedeelte van het doorstroomde oppervlak blokkeert, en de grouts een goede verwerkbaarheid hebben, is bij een aantal proeven (bij lage snelheden) de grout vastgelopen op korrelspanningen. Door de toegepaste constructie was het niet mogelijk de buis volledig te vullen, zodat de laatste opnemers niet gebruikt zijn in de proeven.

Twee componenten grout

Het twee componenten grout wordt via een speciaal daarvoor geconstrueerd instroomkanaal in de meetbuis geperst. Het mengproces van de twee componenten vindt in het instroomkanaal plaats. Een schets van het instroomkanaal is gegeven in figuur 4.3.



Figuur 4.3 Het instroomkanaal voor de twee componenten grout.

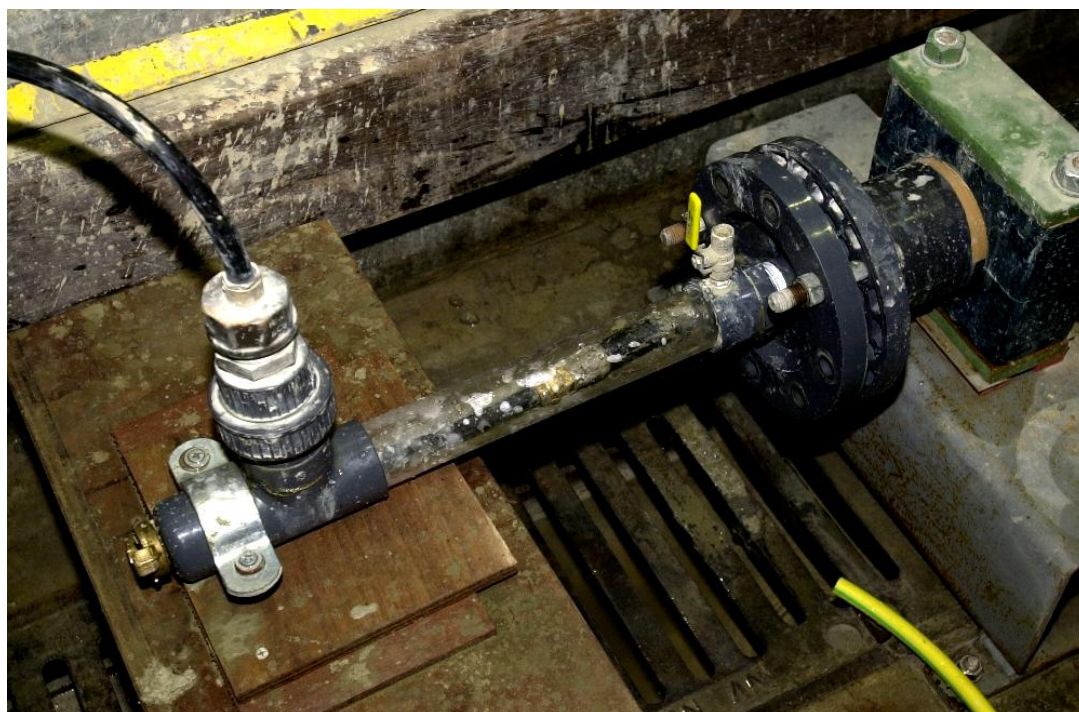
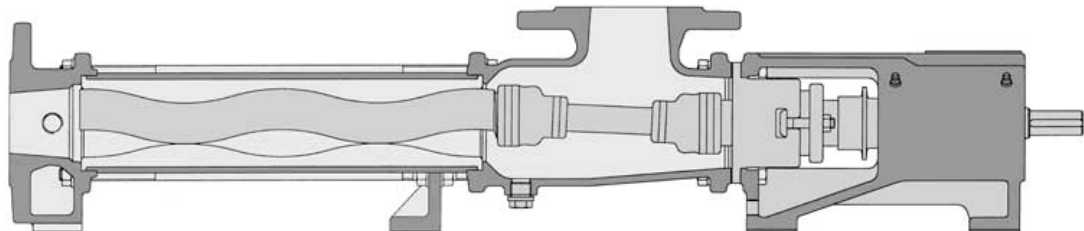


Foto 4.4 Het instroomkanaal voor het twee componenten grout

4.2.3 Pompen

Bij het ontwerp van de opstelling was een van de moeilijke punten de keuze van de pomp. Deze moet bij zeer lage debieten (0,47 l/min) en hoge drukken (tot 3,5 bar) een zo constant mogelijk debiet geven. Daarbij komt in het geval van het één component grout het feit dat het materiaal een zwichtspanning heeft van orde 1 kPa en zand met een brede korrel verdeling. Geen van de beschikbare pompen bleek hier geschikt voor te zijn. Zoals beschreven in paragraaf 4.2.2 is daarom voor de één component grout proeven gekozen voor een indirecte injectie methode. Voor het twee componenten grout liggen de zaken nog moeilijker omdat het debiet van component B ongeveer 10 maal kleiner is dan het debiet van component A.

Voor het verpompen van het water bij de één component grout proeven is uiteindelijk gekozen voor een Seeberg SNP positieve verdringer pomp. De pomp kan zowel mechanisch via een vertragingskast (variomatic), als elektronisch via de frequentie van de motor geregeld worden. Op deze manier is een breed bereik aan debieten mogelijk met één pomp. Gezien het feit dat er maar 1 verdringer pomp van dit type voor handen is, is het niet mogelijk dit type pomp voor het twee componenten grout te gebruiken omdat dat daar afzonderlijke pompen voor de beide componenten nodig zijn. Daarnaast kan de gebruikte uitvoering van de pomp de extreem lage debieten nodig voor component B niet aan. Een doorsnede van de gebruikte pomp is te zien in figuur 4.4.

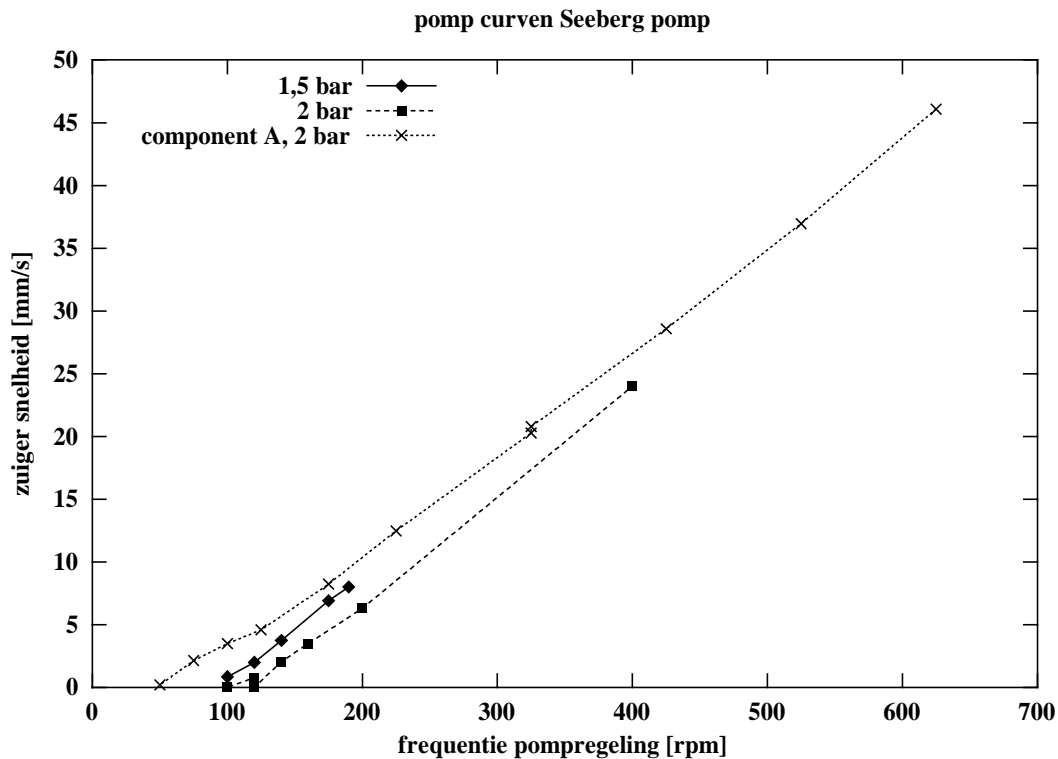


Figuur 4.4 Een schets van het gebruikte pomptype

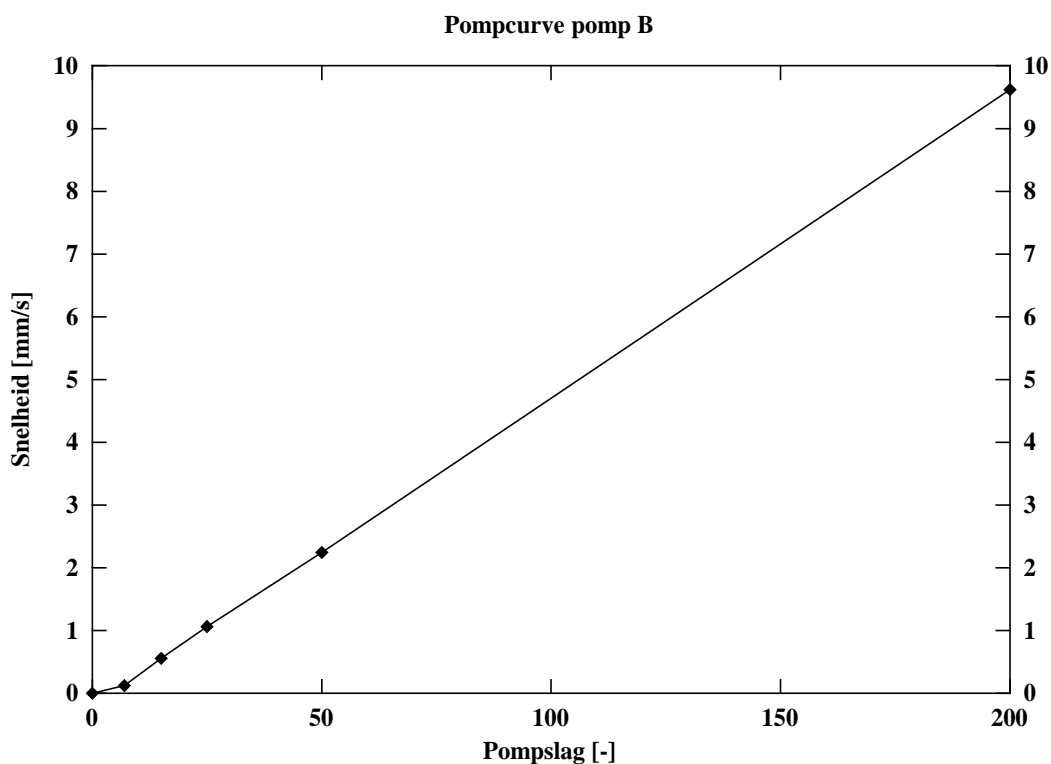
Het door de pomp geleverde debiet is niet helemaal constant in de tijd. Het gevolg daarvan is dat het grout in de buis en daarmee ook het gewicht waarmee de buis op druk gehouden wordt per slag steeds een versnelling en een vertraging ondergaan, die evenredig is met de afgeleide van het debiet van de pomp. Een van de problemen met de pomp is dat het debiet niet geheel drukval onafhankelijk is. Op een bepaald punt van de slag is de pomp niet helemaal dicht (waarschijnlijk door slijtage aan de pomp). Bij hoge tegendrukken zal op dat punt in de slag vloeistof door de pomp terug lopen. In figuur 4.5 is het verband tussen het toerental van de motor en het geleverde pompdebiet weergegeven voor twee verschillende drukken over de pomp. De variometric stond bij alle snelheden behalve de hoogste op de laagste stand. Zoals te zien is, is het verloop van het debiet wel lineair met de frequentie van de motor, maar is er een offset die afhankelijk is van de te overwinnen druk. De pompcurve blijkt ook afhankelijk te zijn van de verpompte vloeistof. In dezelfde figuur staat de gemeten pompcurve voor dezelfde pomp, maar nu met component A van het twee componenten grout als vloeistof. De curve is gemeten met een druk van 1.8 bar op de buis.

Zoals te zien is, is de frequentie-offset waarbij de pomp begint kleiner dan de offset die optreedt als er water verpompt wordt. Dit kan verklaard worden uit de hogere viscositeit

van component A. Door deze hogere viscositeit zal er bij eenzelfde drukverschil minder vloeistof lekken door kleine openingen tijdens de slag.



Figuur 4.5 Pompcurven voor water en component A van de gebruikte verdringer pomp. Voor water is de curve gemeten bij 2 verschillende druken over de pomp



Figuur 4.6 De pompcurve voor de pomp gebruikt voor het verpompen van component B van het twee componenten grout

Voor het twee componenten grout is naast bovengenoemde pomp een één-cilinder verdringerpomp gebruikt. Component A is verpompt met de Seeberg pomp, component B met de 1-cilinder verdringerpomp. Een pompcurve van de laatste pomp staat gegeven in figuur 4.6. Het pompdebiet is regelbaar door de slag van de cilinder te veranderen. De pomp heeft een vaste frequentie van 1.6 Hz. De pompcurve is gemeten onder praktijk condities: met de buis op 1.8 bar, waarbij de vloeistof door de injectie nozzle geperst wordt.

Door de lek in de pomp en het discontinue karakter van de pomp voor component B zal de stroming, en daarmee ook het druksignaal een behoorlijk discontinu karakter hebben. Een van de effecten zal zijn dat de momentane drukken hoger zullen zijn dan de drukval bij een stationaire stroming. Gelukkig is gezien het feit dat de gemiddelde snelheid van de plunjer wel constant blijft deze extra drukval wisselend positief en negatief, zodat de gemiddelde drukval gelijk blijft.

4.2.4 Drukken

Bij het selecteren van de drukopnemers die tijdens de proeven gebruikt zijn is een schatting gemaakt van de verwachte optredende drukken en drukgradienten in de buis tijdens de experimenten. Voor een buis gevuld met grout met een lengte L kan voor het drukverloop over de buis bij een versnelling a van de plunjer geschreven worden:

$$p = \frac{M(g+a)}{\frac{1}{4}\pi d^2} + (L-x)ra + \frac{4t_w}{d}(L-x) + \Delta p_z + p_0 \quad (1)$$

Hierin is de eerste term de druk in de buis ten gevolge van het gewicht van de massa waarmee de pijp op druk gehouden wordt. De tweede term is de druk nodig voor het versnellen van de grout in de buis. De derde term is de term die we willen meten, de druk t.g.v. de wandschuifspanning tussen het grout en de buis. De drukval t.g.v. de weerstand van de zuiger e.d. wordt gerepresenteerd door de factor Δp_z , de stationaire luchtdruk door p_0 . De in de vergelijking voorkomende versnelling a is het gevolg van het niet constant zijn van het debiet van de verdringerpomp. Bij het berekenen van de druk is verondersteld dat het grout incompressibel is en er tijdens de versnelling geen rek optreedt in de kabels waarmee het gewicht is opgehangen. Het incompressibel zijn van de grout is in geval van het één component grout een heel goede veronderstelling. Het twee componenten grout bevat echter een aanzienlijke hoeveelheid lucht. Door de compressibiliteit van de lucht zullen de druk fluctuaties in het twee componenten grout kleiner zijn dan in het geval van een één component grout onder de zelfde omstandigheden. Ook in het geval van de één component grout metingen waren de druk fluctuaties kleiner dan verwacht. Dit wordt veroorzaakt door de indirecte injectie methode van het grout. Door de constructie van de gebruikte klep is er altijd een luchtlaag van een aantal centimeter tussen de klep en de zuiger aanwezig. Deze luchtlaag functioneert als demper tussen de grout en het gewicht waarmee het grout op druk gehouden wordt.

Als we uit de uitdrukking voor de druk in de buis de drukgradiënt berekenen, vinden we:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{4t_w}{d} \quad (2)$$

Hier komt de druk t.g.v. de aangehangen massa niet meer in voor. Voor de absolute druk moet echter wel bekeken worden of deze de voor de drukopnemers gespecificeerde maximale druk niet overschrijdt. Met deze vergelijking kunnen we de wand schuifspanning uit de gemeten drukval bepalen met de vergelijking

$$t_w = -\frac{d}{4} \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

waarin Δp de drukval over een pijplengte Δx is.

Uit de proefjes gedaan in fase 0, blijkt dat het gebruikte conventionele één component grout zich waarschijnlijk gedraagt als een Bingham vloeistof. Voor een Bingham vloeistof is de relatie tussen schuifspanning en afschuifsnelheid:

$$t = t_0 + h\dot{\gamma} \quad (4)$$

Voor de relatie tussen drukval en debiet in stationaire buisstroming kan afgeleid worden (zie bijvoorbeeld Tattersall (1983)):

$$j_v = \frac{pR^3}{h} \left(\frac{dp}{dx} \right)^{-3} \frac{t_0^4}{R^3} + \frac{R}{8} \frac{dp}{dx} - \frac{t_0}{3} \quad (5)$$

De diameter waarover plugflow aanwezig is, kan worden berekend met:

$$r = \frac{t_0}{t_w} R \quad (6)$$

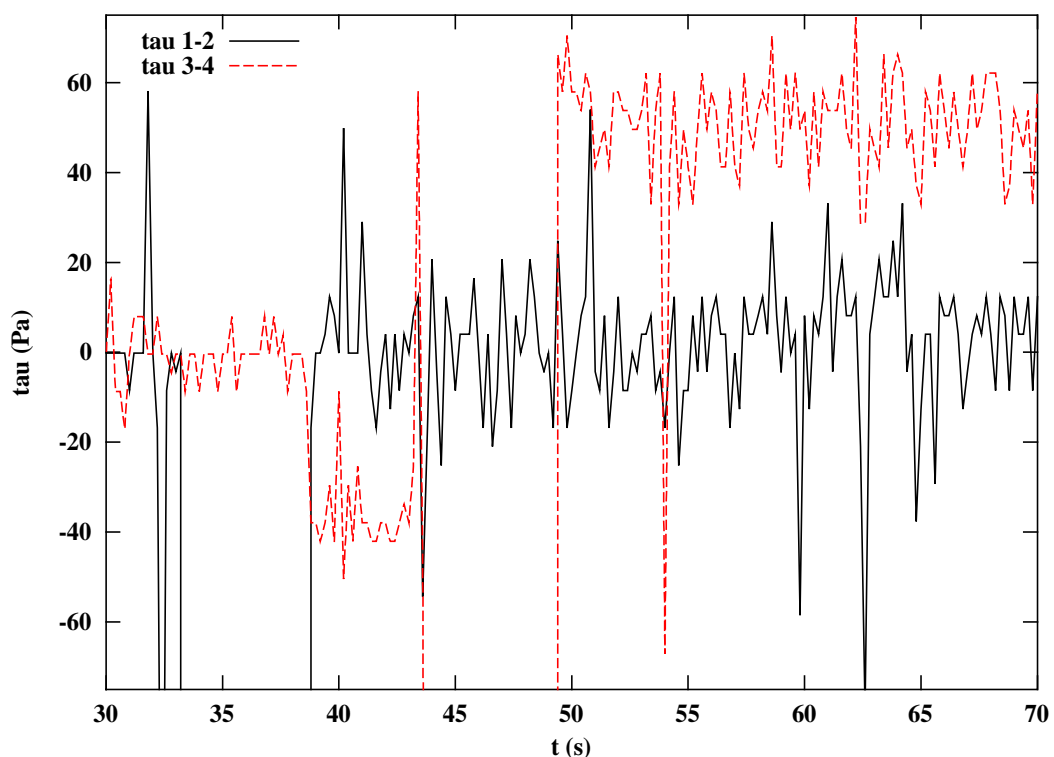
Met een geschatte zwichtspanning van 2 kPa en een viscositeit van 0,5 Pa s krijgen we zelfs bij de hoogste plunjersnelheden (100 mm/s), zonder de drukfluctuatie t.g.v. het niet stationair zijn van het debiet, een wandschuifspanning van 2,065 kPa met een plugflow diameter van 97 mm. De drukval is dus vrijwel gelijk aan de drukval die behoort bij de zwichtspanning van het materiaal, dus ongeveer 0,8 bar/m. Als dit het geval is zal tijdens de proef de druk aan het begin van de buis met 4,0 bar stijgen. Dit zou met de gebruikte drukopnemers niet gemeten kunnen worden. Bij een viscositeit van 50 Pa s worden de schuifspanningen wel merkbaar groter. Bij een zuigersnelheid van 10 mm/s is de schuifspanning 2,2 kPa, bij een plugflow diameter van 90 mm. Verwacht wordt echter dat door het ontstaan van een smeerfilm deze waarde voor de schuifspanning sterk reduceert. Of tengevolge van het perforeren van de buis de smeerfilm zo goed zou worden afgevoerd dat deze drukval wel op zou treden was bij het begin van het proevenprogramma niet duidelijk.

De minimale druk ten gevolge van de weerstand van de afsluitrubbers en het gewicht van het frame waar de gewichten aan gehangen kunnen worden is 1,2 bar.

4.2.5 Drukopnemers

De gebruikte drukopnemers zijn Druck-opnemers met een bereik van 3,5 bar. De opnemers hebben maximale uitgangsspanning van ongeveer 100 mV. Elke drukopnemer is afzonderlijk geijkt. De maximale afwijking van de opnemers door temperatuurinvloeden is 0,30% van de volle schaal. Omdat de temperatuur van de opnemers tijdens de metingen vrijwel gelijk zal zijn, heeft dit echter geen invloed op de gemeten verschildrukken. De onnauwkeurigheid t.g.v. niet-lineairiteit en hysteresis is 0,04%. Bijverschil tussen twee opnemers zal het verschil dus maximaal 0,08% zijn. Dit levert een onnauwkeurigheid in de geschatte wandschuifspanningen op van 11,7 Pa.

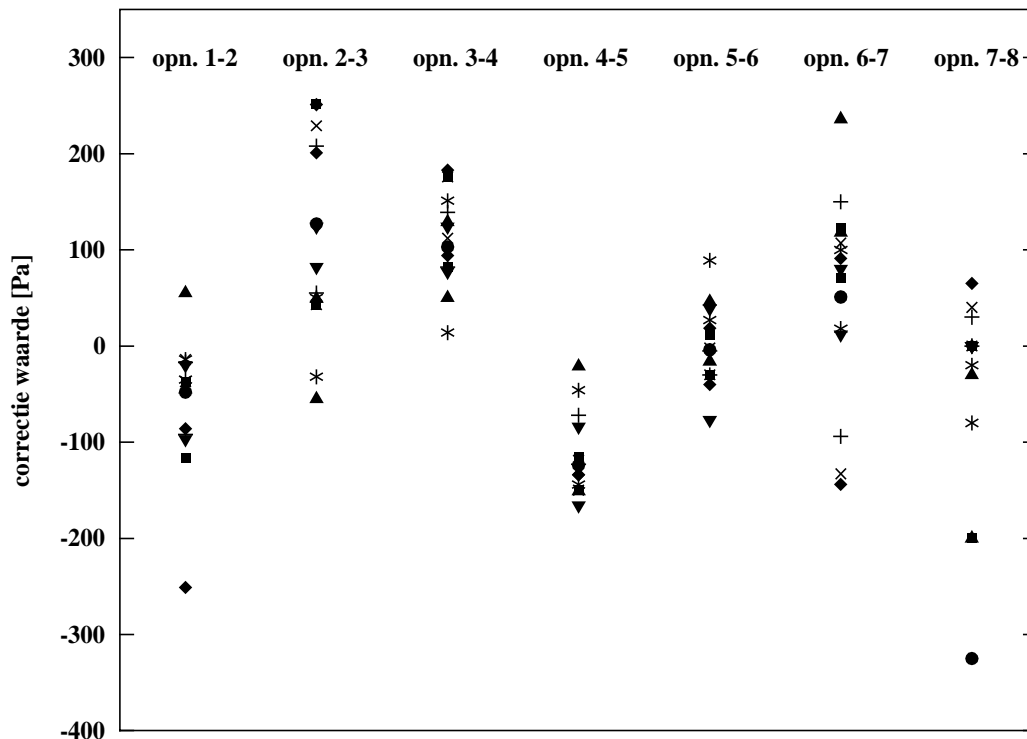
Om een indruk te krijgen van de precisie van de drukopnemers en de ijking daarvan, is een test uitgevoerd, waarbij er geen grout, maar water in de buis is gepompt. Gezien de zeer lage viscositeit van water zou dit geen meetbare drukverschillen over de lengte van de buis mogen geven. De gemeten “schuifspanningen” op twee posities in de buis, bij een snelheid van 10 cm/sec zijn weergegeven in figuur 4.7.



Figuur 4.7 De gemeten schijnbare schuifspanningen in water bij 10 cm/sec

In de figuur zijn zowel de schuifspanning zoals gemeten door drukopnemers 1 en 2 en door drukopnemers 3 en 4 gegeven. Zoals te zien is in de figuur kan door een kleine afwijking in de ijking van de drukopnemers een fout van orde 50 Pa ontstaan. De ruis op de ongefilterde signalen is ongeveer 25 Pa.

Om voor de fout in de calibratie te corrigeren is voor elke meting de buis een keer vol gepompt met water. Op deze manier kunnen de verschillende drukopnemers bij een druk van 2 bar met elkaar vergeleken worden. De verschillen in de drukopnemers kunnen gecorrigeerd worden met behulp van de gemeten verschillen. De afwijkingen blijken systematisch te zijn. In figuur 4.8 zijn de correcties weergegeven die voor de verschillende drukopnemerparen gebruikt zijn.



Figuur 4.8 De bij de verschillende proeven gebruikte correctie waarden voor de verschillen in gevoeligheid van de verschillende drukopnemers.

4.2.6 Temperatuur

Het uitharden van grout is een exotherm proces. In de loop van de tijd zal er dan ook een verloop van de temperatuur te zien zijn. Dit temperatuurverloop is te koppelen aan het uitharden van het grout. Het is de bedoeling dat de proeven worden gedaan in de periode waarin de warmte productie het laagst is. Deze periode komt overeen met de verwerkbare periode van het grout. Om te controleren of dit inderdaad het geval is, zijn op 3 posities in de buis temperaturopnemers aangebracht. Als de tijd nodig voor diffusie van warmte uit de buis naar de omgeving groot is t.o.v. de duur van een experiment, zal de temperatuur aan de buiswand een indicatie zijn van de totale warmte productie gedurende de proef. Als de tijd nodig voor diffusie van warmte uit de buis naar de omgeving klein is t.o.v. de duur van een experiment, zal de temperatuur aan de buiswand een indicatie zijn van de momentane warmteproductie in het grout. De tijdschaal waarop een buis afkoelt, kan afgeschat worden met behulp van het Fourier getal:

$$Fo = \frac{at}{d^2} \quad (7)$$

waarin a de warmtediffusiecoëfficiënt is, t een karakteristieke tijdschaal en d een karakteristieke afstand. Voor de karakteristieke tijdschaal t nemen we de tijd nemen nodig voor het convectief transport tussen twee temperatuuropnemers. Voor de karakteristieke afstand wordt de halve buisdiameter genomen. De warmtediffusiecoëfficiënt a voor het één component grout wordt afgeschat met die van water, dus $a=1,43 \times 10^{-7}$. Dit is niet helemaal correct gezien het feit dat er slechts 30% water in het grout aanwezig is. Bij een afstand tussen de opnemers van 2 meter en de laagste snelheid wordt het bijbehorende Fourier getal dan 0,11. Bij hogere snelheden wordt het Fourier getal evenredig lager. In de meeste gevallen zal de gemeten temperatuur dus het resultaat zijn van de volledige voorgeschiedenis van het grout in de buis en niet zozeer van de warmteontwikkeling op de locatie van de opnemer. Daarnaast zullen door de eindige reactie tijd van de temperatuuropnemers bij de snelle proeven de resultaten van de meting niet bruikbaar zijn.

4.2.7 Data-acquisitiesysteem

De verschillende signalen zijn ingelezen met behulp van een AD-converter gekoppeld aan een PC. Alle signalen zijn bemonsterd met een frequentie van 5Hz. Voor bemonstering zijn de signalen gefilterd met een laagdoorlaatfilter met een afkapfrequentie van 2 Hz, om aliasing tegen te gaan. In tabel 4.3 is een overzicht gegeven van de ingelezen kanalen.

Tabel 4.3 De verschillende ingelezen signalen

Kanaal	Signaal	output	bereik
1	druk 1	0-10 V	0-3,5 bar
2	druk 2	0-10 V	0-3,5 bar
3	druk 3	0-10 V	0-3,5 bar
4	druk 4	0-10 V	0-3,5 bar
5	druk 5	0-10 V	0-3,5 bar
6	druk 6	0-10 V	0-3,5 bar
7	druk 7	0-10 V	0-3,5 bar
8	druk 8	0-10 V	0-3,5 bar
9	temperatuur 1	0-10 V	0-50 °C
10	temperatuur 2	0-10 V	0-50 °C
11	temperatuur 3	0-10 V	0-50 °C
12	positie	0-10 V	0-10 m

4.2.8 Proevenmatrix

Het proevenprogramma is als volgt opgebouwd. Er worden 5 proevenseries uitgevoerd, ieder bestaand uit maximaal 4 proeven. Per proevenserie wordt er met één soort grout gewerkt, en één buis gebruikt. Per buis worden proeven gedaan bij maximaal 4 vulsnelheden.

De eerste drie proevenseries worden met het traditionele één component grout uitgevoerd (gladde, ruwe en geperforeerde buis), de resterende met het 2-component grout. Bij de proeven met het twee componenten grout is de volumeverhouding tussen het A en het B materiaal 10:1. In tabel 4.4 staan de verschillende vulsnelheden en de bijbehorende debieten voor zowel het één component als het twee componenten grout weergegeven. In tabel 4.5 staat een overzicht met welke grout-buis-snelheid combinaties proeven uitgevoerd zijn. Er is steeds zoveel gewicht voor het op druk brengen van de grout gebruikt, dat de drukken bij

een buis gevuld met water ongeveer 2 bar zijn. Dit geeft voldoende ruimte op de drukopnemers om bij volledig vullen van de buis een wandschuifspanning van 815 Pa op te nemen. Boven deze wandschuifspanning zal er tengevolge van de drukopbouw over de buis overbelasting van de gebruikte drukopnemers optreden.

Tabel 4.4 De beoogde vulsnelheden en bijbehorende vuldebieten

Vulsnelheid	Debiet 1 comp. Grout	Debiet A mat. 2 comp. Grout	Debiet B mat. 2 comp. Grout
100 mm/s	48 l/min	43,6 l/min	4,36 l/min
25 mm/s	11,8 l/min	10,7 l/min	1,07 l/min
5 mm/s	2,4 l/min	2,18 l/min	0,22 l/min
1 mm/s	0,5 l/min	0,45 l/min	0,05 l/min

Tabel 4.5 De geteste grout-buis-snelheid combinaties

Proef nr.	Buis	grout	snelheden [mm/s]
1	glad	één component	1
2	glad	één component	5
3	glad	één component	25
4	glad	één component	100
5	ruw	één component	1
6	ruw	één component	5
7	ruw	één component	25
8	ruw	één component	100
9	geperforeerd	één component	1
10	geperforeerd	één component	5
11	geperforeerd	één component	25
12	geperforeerd	één component	100
13	glad	twee componenten	1
14	glad	twee componenten	5
15	glad	twee componenten	25
16	glad	twee componenten	100
17	ruw	twee componenten	1
18	ruw	twee componenten	5

4.3 Resultaten

4.3.1 Snelheden

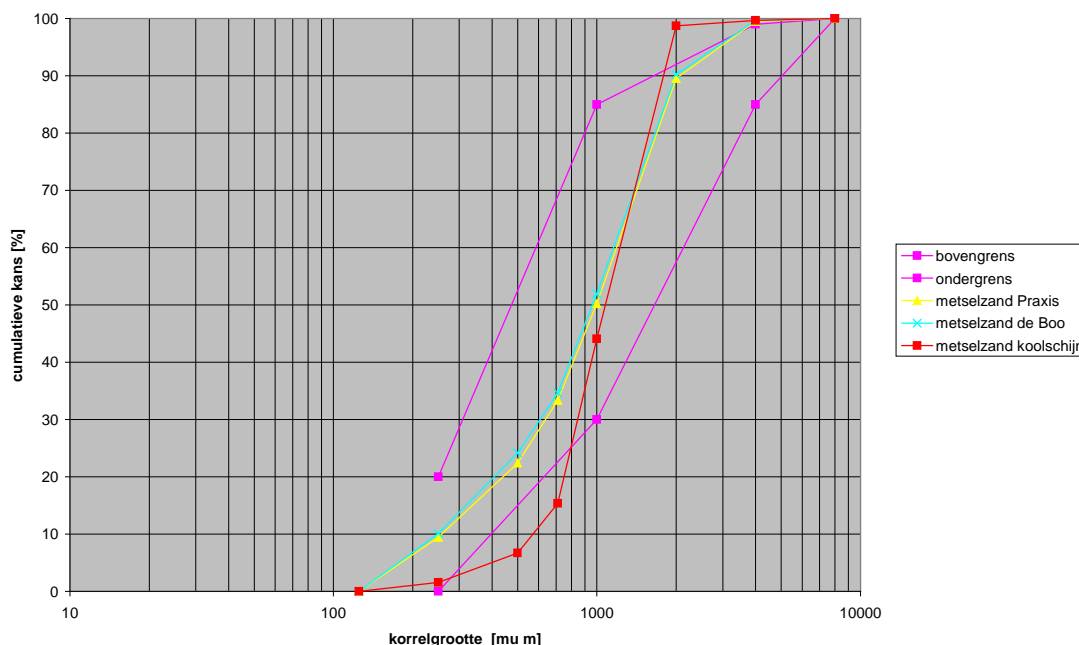
Door de drukafhankelijkheid van het pompdebiet en de voorafgaand aan de metingen onbekende weerstand van het grout was het niet mogelijk het gewenste debiet exact in te stellen. In tabel 4.6 staan de tijdens de experimenten gemeten gemiddelde snelheden weergegeven. Opgemerkt moet worden dat door de constructie van de pomp en de aanwezigheid van lucht in de buis de instantane snelheden afwijken van deze gemiddelde snelheden. Zolang de schuifspanning bij benadering een lineaire functie is van de snelheid is dit geen probleem, omdat door middeling alsnog de gezochte waarde gevonden wordt.

Tabel 4.6 De gemeten en beoogde grout snelheden tijdens de proeven

Proef nr.	file nr.	Buis	grout	Beoogd	Gemeten
1	30	glad	één component	1	vast gelopen
2	25		één component	5	8,8
3	27		één component	25	24,1
4	32		één component	100	108
5	39	geperforeerd	één component	1	3,0
6	36		één component	5	5,43
7	34		één component	25	25,0
8	41		één component	100	101,8
9	53	ruw	één component	1	vast gelopen
10	47		één component	5	8,8
11	49		één component	25	24,7
12	51		één component	100	98
13	67	glad	twee componenten	1	0,9/1,2
14	66		twee componenten	5	5,5
15	61		twee componenten	25	25
16	62		twee componenten	100	92
17	70	ruw	twee componenten	1	2
18	71		twee componenten	5	4,7

4.3.2 Zand

Uit de eerste proeven met één component grout in de gladde buis bleek dat de samenstelling van het zand grote invloed heeft op de stromingseigenschappen van het grout. Bij een te smalle korrelgrootte verdeling is er te veel ruimte tussen de korrels aanwezig en stroomt het grout niet omdat er korrelspanningen ontstaan. Daarnaast veroorzaakt het een snelle ontwatering van het grout. Bij een bredere korrelgrootteverdeling heeft het grout betere stromingseigenschappen. De eerste oriënterende proeven zijn gedaan met een smalbandig 200 μm zand. Bij proeven met dit zand ontwaterde het grout zeer snel en was het niet mogelijk het grout te verpompen. Er is daarom gezocht naar zand met een bredere korrelverdeling. In figuur 4.9 zijn de korrelgrootteverdelingen van de verschillende zandsoorten met een bredere korrelgrootteverdeling die beproefd zijn weergegeven. Daarnaast zijn de onder- en bovengrens voor zand met korrelverdeling 0-4 volgens NEN5905 weergegeven. Het Praxis en het Boo metselzand bleken vrijwel exact de zelfde korrelgrootteverdeling te hebben, en zijn beide gebruikt in de proeven. Het metselzand van Koolschijn heeft een voor de proeven te smalle korrelgrootteverdeling en veroorzaakte vastlopen van het grout door korrelspanningen op de klep voor de meetbuis. Het was niet mogelijk het Boo of het Praxis zand in grote hoeveelheden te bestellen en daarom is er met zakken van 25 kg gewerkt. Dit heeft als nadeel dat het watergehalte van het zand niet exact gelijk was voor alle metingen. Uit praktische overwegingen was het niet mogelijk voor elke zak het watergehalte te bepalen (dit kost een halve dag) en is voor alle metingen hetzelfde watergehalte aangehouden. Een afwijking in het watergehalte in het zand veroorzaakt een kleine afwijking in het watergehalte van het grout op, dat invloed heeft op de consistentie van het grout.



Figuur 4.9 De cumulatieve korrelgrootteverdelingen van de gebruikte zandsorten

4.3.3 Schuifspanningen

Voor ieder experiment zijn de gemeten drukverschillen naar schuifspanningen omgewerkt, en, indien relevant, gerangschikt naar de tijd (sinds aanmaken van het grout).

Er moet bij de verwerking van de proeven een verschil gemaakt worden tussen de één en de twee componenten grout proeven. Bij de één component grout proeven wordt er een hoeveelheid grout aangemaakt die voldoende is om de hele buis te vullen. Na het aanmaken wordt het grout twee uur gemengd in een betonmolen. Dit om de proeven zo veel mogelijk overeen te laten komen met de praktijk, waar om logistieke redenen er ook altijd enige tijd zit tussen het aanmaken en injecteren van het grout. Daarna wordt de buis gevuld. Bij de laagste injectiesnelheid neemt de leeftijd van het net geïnjecteerde grout neemt significant toe naarmate de buis verder gevuld wordt. Tussen ieder drukopnemerpaar kan dus de drukval als functie van de leeftijd van het grout bepaald worden, waarbij de leeftijd van het grout overall in de buis gelijk is.

Als bij de hogere snelheden de verschillende drukopnemer paren met elkaar vergeleken worden zal er wel een verschil te zien zijn. Bij de hoogste injectiesnelheden is er geen sprake van significante veroudering van het grout tijdens injectie. In dit geval duurt de totale injectie slechts 2 minuten, wat verwaarloosbaar is in verhouding tot de leeftijd van grout bij het begin van injectie. Inhomogeniteiten in het grout en plaatsafhankelijke ontwatering zullen echter zorgen voor fluctuaties in de schuifspanning over de lengte van de buis.

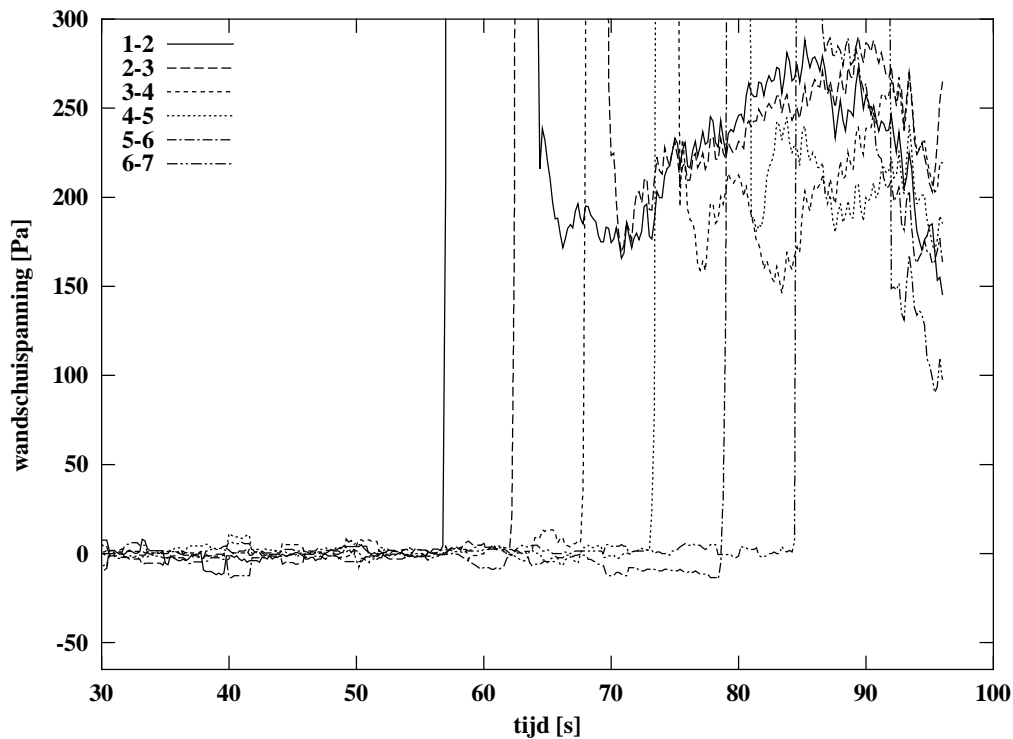
In geval van het twee componenten grout, worden de twee componenten pas aan het begin van de buis bij elkaar gebracht, zodat als de snelheid van het grout constant is, op een bepaalde positie in de buis het grout dat langs komt altijd de zelfde leeftijd heeft. Om een indruk te krijgen van het verloop van de grouteigenschappen als functie van de tijd zullen dus de verschillende drukopnemerparen met elkaar vergeleken moeten worden.

Voor ieder van de proeven wordt indien relevant een t-u grafiek gemaakt. Indien relevant wordt de schuifspanning gegeven als functie van de tijd.

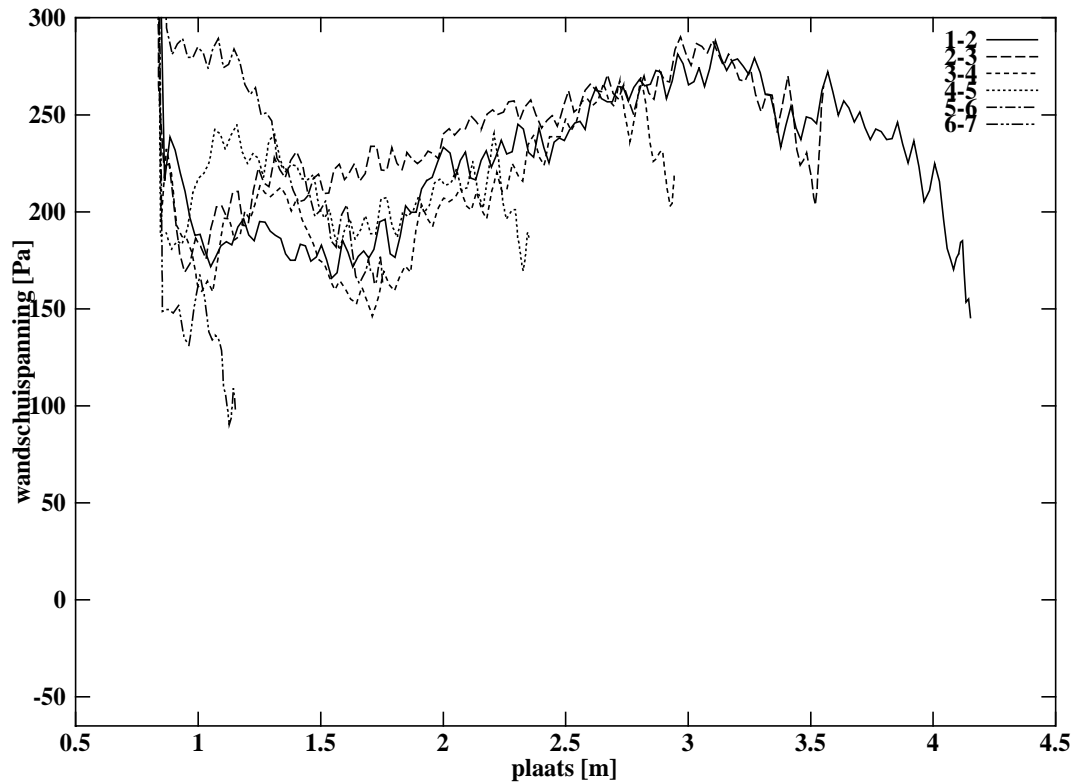
4.3.4 Eén component grout

4.3.4.1 Gladde buis

Bij alle injectiesnelheden behalve de hoogste was de voortgangssnelheid van de zuiger niet constant. Dit wordt gedeeltelijk verklaard door de eigenschappen van de pomp. Daarbij kan het feit dat er altijd wat lucht tussen de meetbuis en de voor de proef gevulde buis zit zorgen voor onregelmatigheid in de voortgangssnelheid van de plunjer, omdat de compressibele lucht in combinatie met een hogere stationaire dan dynamische weerstand van de zuiger kan zorgen voor slip-stick verschijnselen. Bij de laagste snelheid liep de plunjer na korte tijd vast op korrelspanningen bij de klep.



Figuur 4.10 De gemeten wandschuifspanningen bij een snelheid van 100 mm/s als functie van de tijd



Figuur 4.11 De gemeten wandschuifspanningen bij een snelheid van 100 mm/s als functie van de afstand tot de zuiger

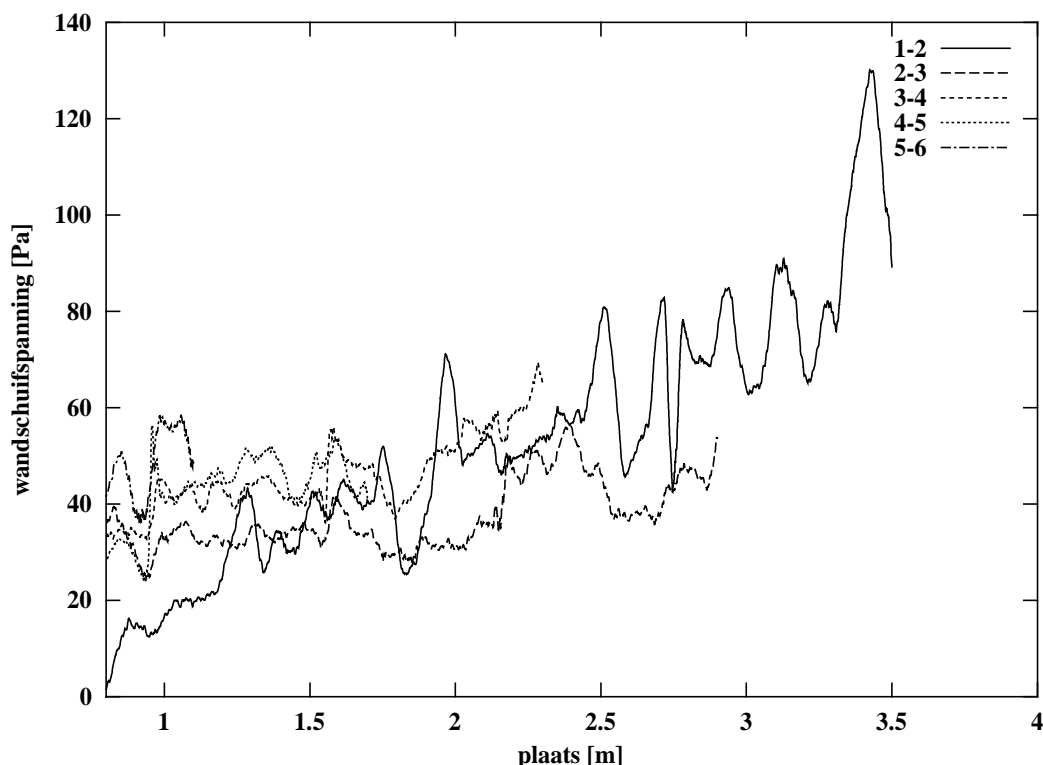
De gevonden schuifspanningen zijn een orde van grootte lager dan de zwichspanningen van het grout, zoals gemeten in Fase 0. Het grout zal dus als een perfecte propstroming door de buis schuiven. De schuifspanningen die optreden zijn het gevolg van de afschuiving van de vloeistof tussen de zandkorrels aan de wand en de mechanische weerstand van de korrels die langs de wand schuren. Pas bij hogere snelheden zal daadwerkelijk afschuiven van het grout zelf optreden. Dat de afschuifsnelheid van de vloeistof een belangrijke rol speelt in de drukval, kan geconcludeerd worden uit het feit dat de schuifspanningen toenemen bij toenemende snelheid. Als de weerstand volledig bepaald zou zijn door de mechanische weerstand van de korrels aan de wand zou dit niet het geval zijn, omdat deze geen functie is van de snelheid van de korrels.

Voor de lagere snelheden is het moeilijk de gemeten schuifspanningen te koppelen aan de voortgangssnelheid van het grout, vanwege het discontinue karakter van de stroming. Zoals eerder opgemerkt is dit geen probleem als de schuifspanning een lineaire functie van de snelheid is. De grote fouten marge die op de in figuur 4.15 weergegeven schuifspanningen zit is het gevolg van het niet constant zijn van de schuifspanning gedurende de meting. Hierbij is niet de veroudering van het grout de bepalende factor, maar de inhomogeniteit van het grout over de lengterichting van de buis. In figuur 4.10 en 4.11 zijn de gemeten schuifspanningen in de gladde buis bij een injectiesnelheid van 100 mm/s op twee manieren weergegeven, in figuur 4.10 als functie van de tijd, in figuur 4.11 als functie van de positie t.o.v. de plunjer. Zoals te zien is, vallen de curven voor de verschillende opnamerparen gesorteerd naar afstand t.o.v. de plunjer veel beter samen dan die gesorteerd op tijd.

4.3.4.2 Geperforeerde buis

Om een eventuele waterfilm aan de wand die ontstaat door ontwatering van het grout tijdens de proef af te voeren, is een buis gemaakt die op een aantal plaatsen rondom voorzien is van gaatjes (6 gaatjes met een diameter van 3 mm). De eerste 5 ringen met gaatjes zijn aangebracht op een onderlinge afstand van 30 cm. Daarna volgen nog 5 ringen met een onderlinge afstand van 60 cm. Om elke ring met gaatjes is een strook geotextiel geplaatst die tegen de gaatjes aangedrukt wordt door een slangeklem. De slangeklem wordt zo strak aangedraaid dat er een niet te grote stroom water uit komt als de buis gevuld wordt met water en op druk gebracht wordt. In de praktijk bleek dat tijdens de proeven er zeer weinig water uit de gaatjes kwam, ook als het geotextiel veel losser om de buis zat. Door de brede korrelverdeling van het grout en de aanwezigheid van het cement en de vlieg-as zaten de meeste gaatjes snel dicht, waarna er alleen door porienstroming nog wat vloeistof uit de gaatjes geperst werd. Bij de proeven trad er dan ook zeer weinig water uit.

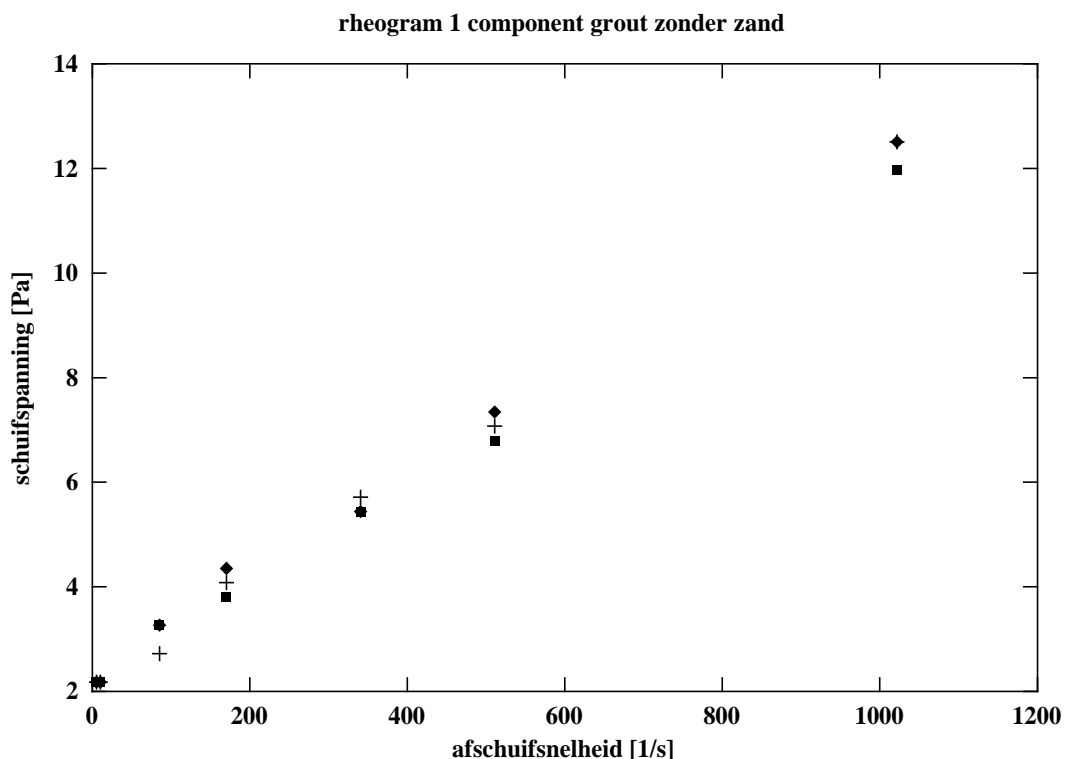
Bij de laagste snelheid, die gezien de ervaring bij de proeven met de gladde buis iets hoger gehouden was (3 mm/s), is het grout na 1,5 uur i.p.v. na twee uur geïnjecteerd. Vlak voor de pluunjer het einde van de buis bereikte, liep de grout alsnog vast op korrelspanningen. De leeftijd van het grout was op moment van vastlopen ongeveer 2 uur. Wellicht is dit het gevolg van het hydratatieproces in het grout, waardoor water aan het grout onttrokken wordt en de kans op vastlopen door korrelspanningen groter is. Als de gemeten schuifspanningen in het voorste stuk grout, als functie van de afstand tot de pluunjer bekeken worden (zie figuur 4.12) zien we echter nauwelijks hogere waarden voor opnemerparen die verder van het begin van de buis geplaatst zijn.



Figuur 4.12 De gemeten wandschuifspanningen in de geperforeerde buis, bij een snelheid van 3 mm/s

De drukverschillen in de buis worden blijkbaar niet erg beïnvloed door de consistentie van het grout (die gezien het vastlopen waarschijnlijk wel veranderd is) maar voornamelijk door de viscositeit van de vloeistof tussen de korrels en de mechanische wrijving tussen de korrels en de buis. Dit is in overeenstemming met de relatief lage wandschuifspanningen die gemeten zijn. De getoonde signalen zijn gefilterd met een lopend gemiddelde met een lengte van 20 seconde om periodieke fluctuaties ten gevolge van de slag van de pomp uit te filteren.

Als de gemeten schuifspanningen vergeleken worden met die van de niet geperforeerde buis, zien we dan ook dat deze niet significant van elkaar verschillen. Uit de resultaten kunnen we dus wel concluderen dat de resultaten reproduceerbaar zijn, ondanks het feit dat er wel enig verschil in de consistentie van het grout waarneembaar was bij de verschillende proeven. Het vermoeden is dat de drukval niet zo zeer wordt bepaald door de consistentie van de bulk van het grout, maar door de viscositeit van het cement-watermengsel. Een oriënterende tor-vane meting aan een net aangemaakte grout gaf overigens een piekwaarde voor de vervormingsweerstand van de bulk van de grout van de orde van 1 kPa. Om deze hypothese te testen is er een Fann-rotoviscometerproef uitgevoerd. De proef is drie maal uitgevoerd met mengsels van 0,5, 1 en 2 uur oud. De schuifspanningen van het cement-watermengsel zijn een factor 10 lager dan die verwacht worden op grond van de tijdens de proef gemeten schuifspanningen. De resultaten van de Fann-rotoviscometerproef staan in figuur 4.13. Zoals te zien is heeft de leeftijd van het mengsel geen significante invloed op de consistentie. Deze hypothese is dus onjuist gebleken. Het vermoeden is dat het gaat om de viscositeit van het cement-watermengsel inclusief de fines van het zand, waarbij ook rekening gehouden moet worden met het volume dat de overige zanddeeltjes innemen.

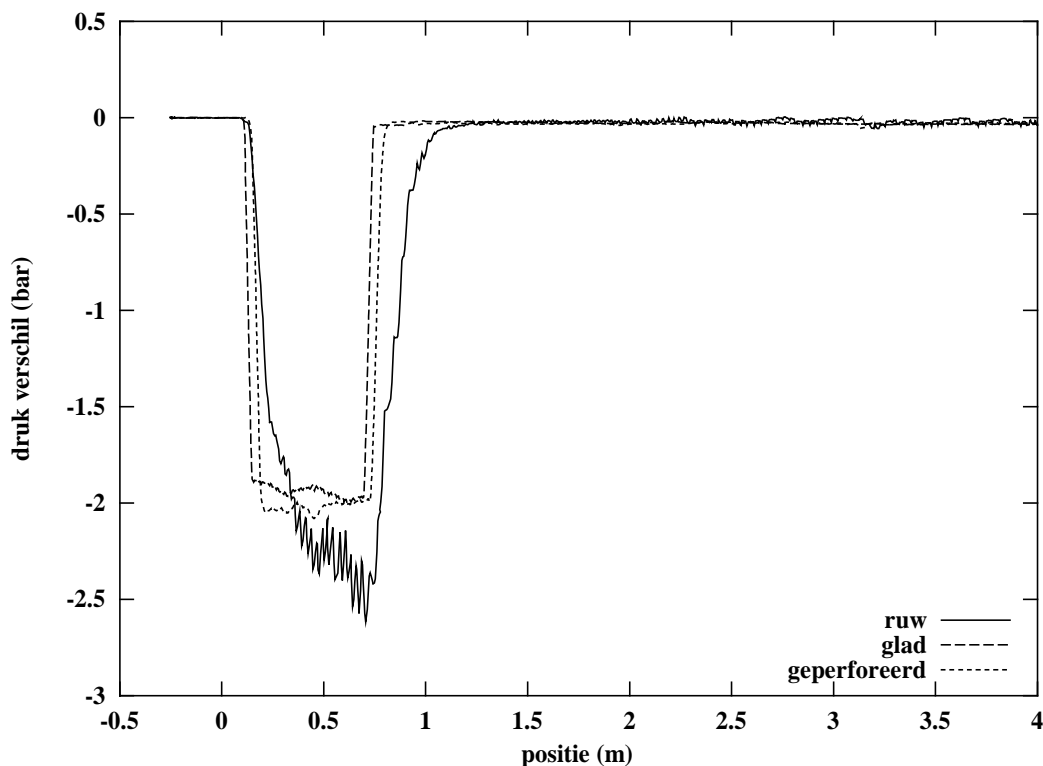


Figuur 4.13 Het rheogram van het één component grout zonder zand

4.3.4.3 Ruwe buis

Om het effect van wandruwheid op de stroming te onderzoeken, zijn er ook proeven gedaan met een buis die van binnen geverfd is met een verf-zand mengsel. Het gebruikte zand heeft een mediane korreldiameter van 200 μm . Bij de waterproeven lekte er een aanzienlijke hoeveelheid water langs de zuiger. Blijkbaar is het rubber van de zuigers te stijf om de ruimte tussen de zandkorrels aan het oppervlak van de buis geheel af te sluiten. De drukken in de buis bij het vullen de buis met water zijn vrijwel gelijk aan de drukken bij het vullen van de gladde en de geperforeerde buis. Waarschijnlijk fungeert het lekwater als smeermiddel tussen de zuiger en de buis. De drukval tijdens groutinjectie is wel veel hoger dan die bij de gladde en de geperforeerde buis. Bij de metingen was er vrijwel geen lek langs de zuiger. Dit is logisch gezien de verwachte lage doorlatendheid van de gebruikte grout. Er is wel wat grout tussen de zuiger en de buis kunnen dringen, waardoor er een behoorlijke wrijving tussen de zuiger en de buis is ontstaan. Er ontstond een veel grotere druk in de buis. Dit kan komen door grout tussen de zuiger en de buis, maar ook door ontwatering van de grout direct achter de zuiger. Om hier voor te compenseren zijn bij de proeven de gewichten van de bok gehaald, en werd de buis alleen op druk gehouden door de weerstand van de zuigen en het gewicht van de bok. Omdat de weerstand van de zuiger niet constant is over de buis zien we redelijk grote drukfluctuaties tijdens de proef, maar de drukken zijn wel altijd van de zelfde orde van grootte als tijdens de andere proeven.

Wat verder op valt als de gemeten drukken bekeken worden, is dat de drukken niet zoals bij de eerdere metingen vrijwel gelijk de druk in de buis aannemen. Dit is duidelijk te zien in figuur 4.14 waar de gemeten drukverschillen tussen de eerste en de tweede drukopnemer bij groutsnelheden van 25 mm/s voor de drie verschillende buizen staan weergegeven.

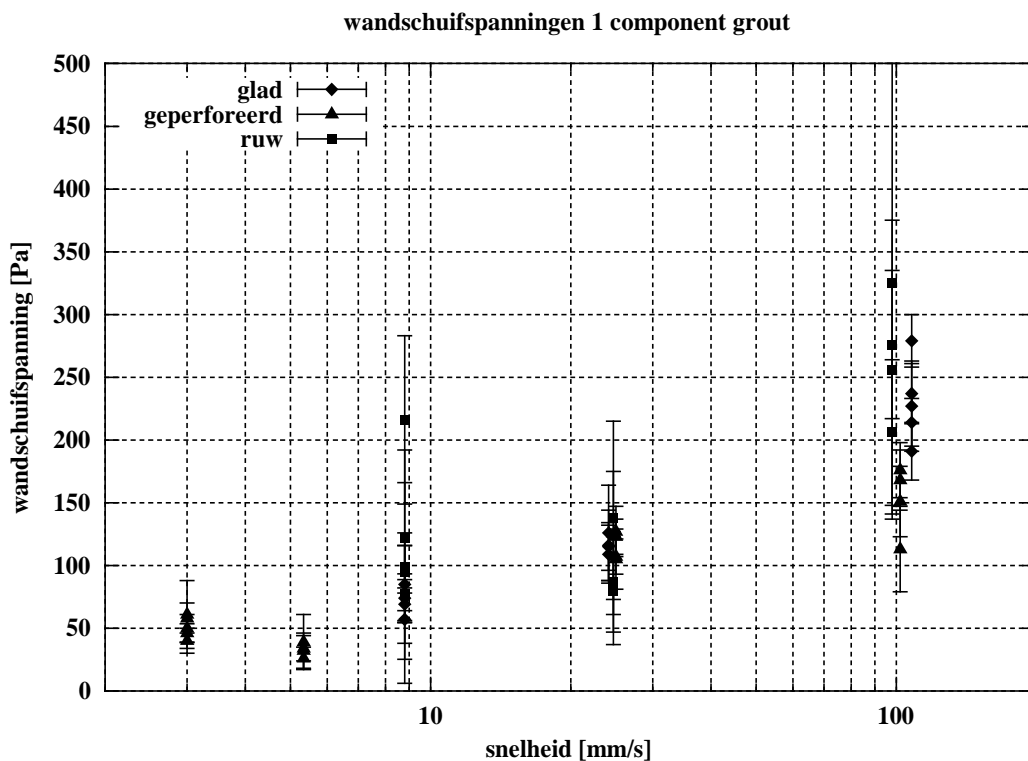


Figuur 4.14 De gemeten drukverschillen bij 25 mm/s voor de drie verschillende buizen

Als de zuiger de eerste drukopnemer passeert (bij een zuigerverplaatsing van 0,1 m), is in geval van de gladde en de geperforeerde buis het druk verschil tussen de eerste en de tweede opnemer vrijwel direct gelijk aan de absolute overdruk van het grout. Als de zuiger de tweede drukopnemer passeert, reduceert het druk verschil tussen de twee zuigers tot het drukverschil tengevolge van de wandwrijving. In geval van de ruwe buis neemt het drukverschil veel langzamer toe en af. De verklaring hiervoor is, dat er hoewel veel minder dan bij de watermetingen wel lek langs de zuiger op treedt, waardoor de grout achter de zuiger ontwatert. De zuiger wordt niet meer alleen op vloeistofdruk, maar ook gedeeltelijk op korrelspanningen voortbewogen (de vloeistofdruk op de zuiger gaat naar nul aan de randen van de zuiger door de lek tussen zuiger en buiswand). De reden dat door de smalle spleet tussen zuiger en buiswand wel ontwatering optreedt terwijl dat door de geperforeerde buis niet het geval was, is dat er in de geperforeerde buis stilstaand grout in de gaatjes aanwezig was dat de gaatjes verstopte, terwijl in het geval van de zuiger-wand combinatie er een constant beweging is in de spleet.

Deze ontwatering verklaart waarschijnlijk ook de hoge drukval over de zuiger. Door de ontwatering maakt de grout korrelkontakt met de wand, waardoor grotere krachten nodig zijn voor het voortbewegen van de ontwaterde groutprop net achter de zuiger.

Een overzicht van alle gemeten schuifspanningen in het één component grout staat gegeven in figuur 4.15 en tabel 4.7.



Figuur 4.15 De gemeten wandschuifspanningen in de drie buizen voor het één component grout als functie van de groutsnelheid

Tabel 4.7 Een overzicht van de gemeten wandschuifspanningen met de bijbehorende standaard deviaties in het één component grout.

File nr.	druk opnemers	snelheid [mm/s]	wandschuifspanning [Pa]	rms [Pa]
gladde buis				
25	1-2	8,8	74	19,3
25	2-3	8,8	69	13
25	3-4	8,8	57	31,8
25	4-5	8,8	85	30,8
25	5-6	8,8		
27	1-2	24,1	115	19
27	2-3	24,1	109	23
27	3-4	24,1	116	28
27	4-5	24,1	126	38
27	5-6	24,1		
32	1-2	108	227	36
32	2-3	108	237	24
32	3-4	108	191	23
32	4-5	108	214	19
32	5-6	108	279	21
geperforeerde buis				
34	1-2	25	127	20
34	2-3	25	107	14
34	3-4	25	123	14
34	4-5	25	105	24
34	5-6	25		
36	1-2	5,34	34	10
36	2-3	5,34	26	8,8
36	3-4	5,34	32	14
36	4-5	5,34		
36	5-6	5,34	39	22
39	1-2	3	61	27
39	2-3	3	40	10
39	3-4	3	50	11
39	4-5	3	46	7,5
39	5-6	3	58	12
41	1-2	102	176	22
41	2-3	102	168	24
41	3-4	102	151	28
41	4-5	102	113	34
41	5-6	102		

ruwe buis				
47	1-2	24.7	80	43
47	2-3	24.7	87	40
47	3-4	24.7	124	51
47	4-5	24.7	138	77
47	5-6	24.7		
49	1-2	8.8	99	93
49	2-3	8.8	77	39
49	3-4	8.8	122	44
49	4-5	8.8	216	67
49	5-6	8.8	95	31
51	1-2	98	276	59
51	2-3	98	206	58
51	3-4	98	256	119
51	4-5	98	557	209
51	5-6	98	325	184

4.3.4.4 Temperatuur

Als er significante warmteontwikkeling optreedt, moet dit op alle opnemers synchroon waar te nemen zijn, gezien het feit dat alle grout op hetzelfde tijdstip aangemaakt is. Tijdens de proeven treden er echter geen significante temperatuureffecten op. Doordat de opnemers ingebouwd zijn in de buiswand, reageren ze redelijk traag. De geschatte tijdsconstante van de opnemers is ongeveer 100 seconden. Het temperatuurverschil tussen de lucht en de grout is wel duidelijk waarneembaar, maar er is geen significante temperatuurontwikkeling in de tijd. Dit kan verklaard worden door de beperkte nauwkeurigheid van de opnemers of door het feit dat de proeven allemaal in de verwerkbare periode gedaan zijn, zodat er vrijwel geen warmte ontwikkeling in de buis plaats vindt.

4.3.5 Twee componenten grout

Een van de eerste dingen die opvalt als een kleine hoeveelheid 2 component grout aangemaakt wordt, is dat het geen enkele neiging tot ontwateren heeft. Het is daarom dan ook niet zinvol om experimenten te doen met een geperforeerde buis. De 2 component grout proeven zijn dan ook uitgevoerd met de gladde en de ruwe buis.

Eén van de speciale eigenschappen van het gebruikte twee componenten grout, is dat het zoals het in de praktijk gebruikt wordt 15% lucht bevat. Het inbrengen van lucht in het grout mengsel is niet heel eenvoudig. Bij het aanmaken van de grout is de volgende procedure gevolgd:

Het kleizand (Etac β) wordt gemengd met de helft van de benodigde hoeveelheid water. Dit mengsel wordt gedurende een uur gemengd. In een tweede vat wordt het cement met de vertrager en de luchtbelvormer met de andere helft van de benodigde hoeveelheid water gemengd. Dit gebeurt met een menger met een hoge snelheid, zodat er zoveel mogelijk lucht in het mengsel geslagen wordt. Als het kleizand-water mengsel een uur gedraaid heeft, worden de twee mengsels bij elkaar gebracht, waarna het geheel nog minstens 2 uur de tijd krijgt om te rijpen.

Uit een eerste proefje op kleine schaal, bleek dat bij menging met de verharder, zoals ook uit de resultaten van fase 0 naar voren kwam, er heel snel (binnen enkele seconden) een duidelijk waarneembare zwichtspanning optreedt. Deze was groot genoeg om een vaatje met een diameter van 15 cm te kantelen zonder dat het grout begon te stromen.

4.3.5.1 Instroomkanaal

Voor de eerste metingen met het twee component grout is eerst gekeken vanaf welke injectiesnelheid de nozzle waarin de componenten samenkomen, goed werkt. Er is een minimaal debiet nodig om het “ventiel” waar component B, de verharder, uit geperst wordt goed aan te sturen. Dit debiet blijkt echter zo laag te zijn, dat er bij alle snelheden gemeten kan worden. Wel is het zo, dat bij lage debieten de menging van de twee componenten waarschijnlijk niet geheel optimaal zal zijn, wat een inhomogeniteit in de resulterende grout op zal leveren. Dit wordt mede veroorzaakt door het discontinue karakter van de beide pompen.

4.3.5.2 Resultaten

Tabel 4.8 Snelheden en mengverhoudingen tijdens de proeven met twee componenten grout

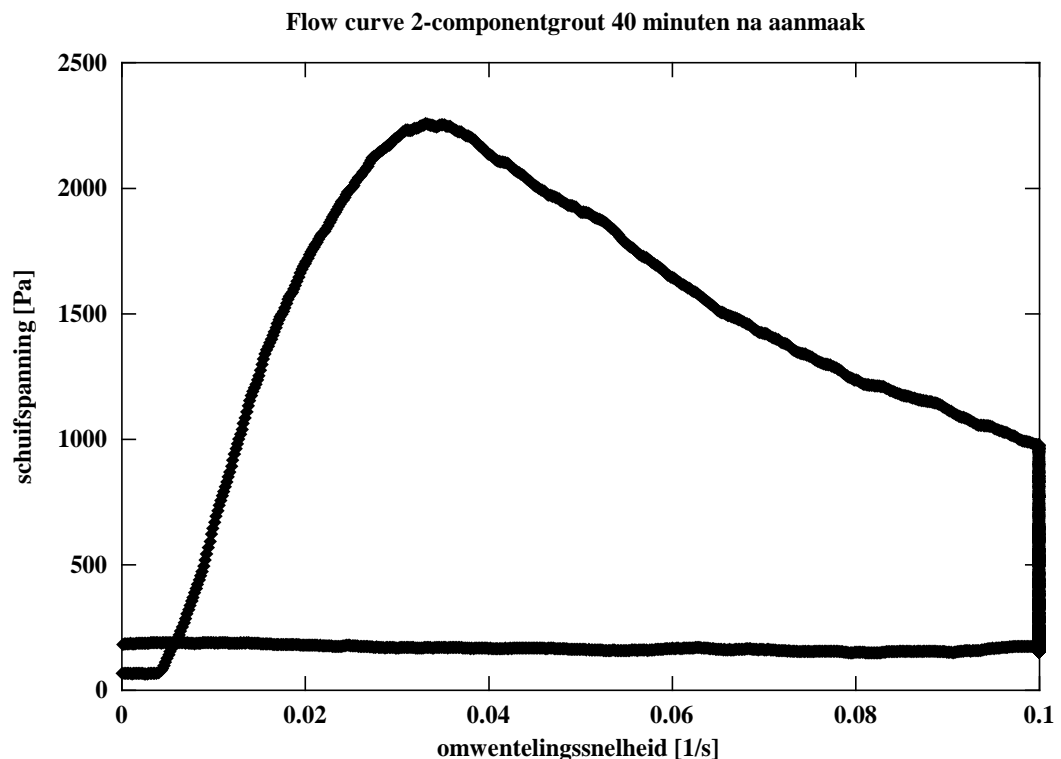
Proef	snelheid (mm/s)	mengverhouding (vol)
gladde buis		
061	25	1:10
062	92	1:9
066	5,5	1:12,7
067	0,90/1,22	1:6,3/1:9
ruwe buis		
070	2,0/1,6	1:15/1:12
071	4,7	1:11

Een van de problemen bij twee component grout is, dat bij een afwijking van het ingestelde debiet door het niet volledig reproduceerbaar zijn van de pompcurve van de pomp voor component A, de mengverhouding van component A en B ook verandert. In tabel 4.8 staan de gemeten snelheden en de bijbehorende mengverhoudingen van de proeven met twee componenten grout weergegeven.

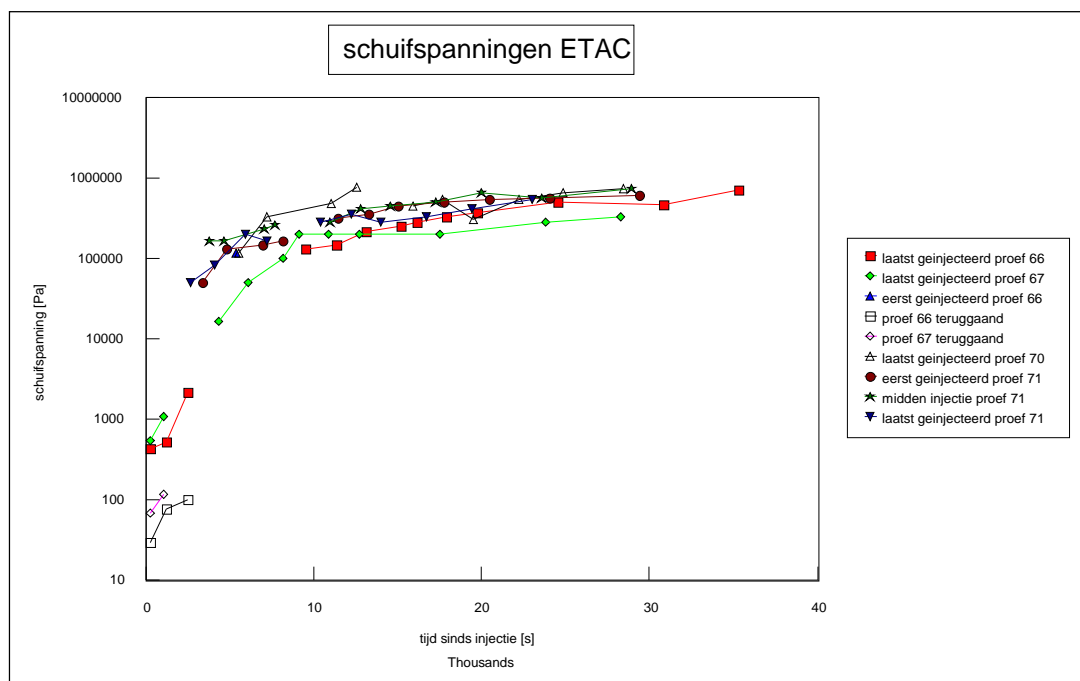
Naast de drukval zijn bij een aantal proeven ook de zwichtspanning als functie van de tijd bepaald. Voor korte tijden na aanmaak is dit gedaan met behulp van een rotoviscometer met een vane als meetelement, voor grouts waarvan de sterkte te groot werd voor de rotoviscometer is dit gedaan met behulp van een pocket penetrometer.

In figuur 4.16 is een voorbeeld gegeven van een rotoviscometer proef. Langs de horizontale as staat de omwentelingssnelheid van de vane, langs de verticale as de schuifspanning die op het materiaal uitgeoefend wordt. Tijdens de proef wordt de vane, die een diameter heeft van 23 mm, vanuit stilstand langzaam in beweging gezet, wat resulteert in de opgaande lijn in de flowcurve. Na een maximum in de gemeten schuifspanning, dat geassocieerd wordt met de bezwijkspanning van het materiaal, neemt de gemeten spanning weer af. Bij het

maximale toerental blijft de rotoviscometer 5 minuten draaien. Daarna neemt het toerental weer langzaam af. Dit resulteert in de horizontale lijn onderin de figuur. Deze schuifspanning wordt geïnterpreteerd als de geroerde schuifspanning van het materiaal. Zoals te zien is, is deze geroerde schuifspanning een orde kleiner dan de bezwijkspanning van het ongeroerde materiaal en onafhankelijk van de hoeksnelheid van de vane. De gemeten geroerde schuifspanning is wat hoger, maar van de zelfde orde als de tijdens de proeven gemeten schuifspanningen. Het verschil tussen de tijdens de proeven gemeten schuifspanning en de bij de rotoviscometer gemeten schuifspanning kan verklaard worden uit het leeftijdsverschil tussen de grouts bij de proeven en de rotoviscometerproef en het feit dat in de pijp gemeten wordt vanuit een situatie waar bij er aan de rand altijd al beweging aanwezig geweest is, terwijl er in de rotoviscometerproef uitgegaan wordt van een grout die in stilstand eerst een zekere sterkte opgebouwd heeft.

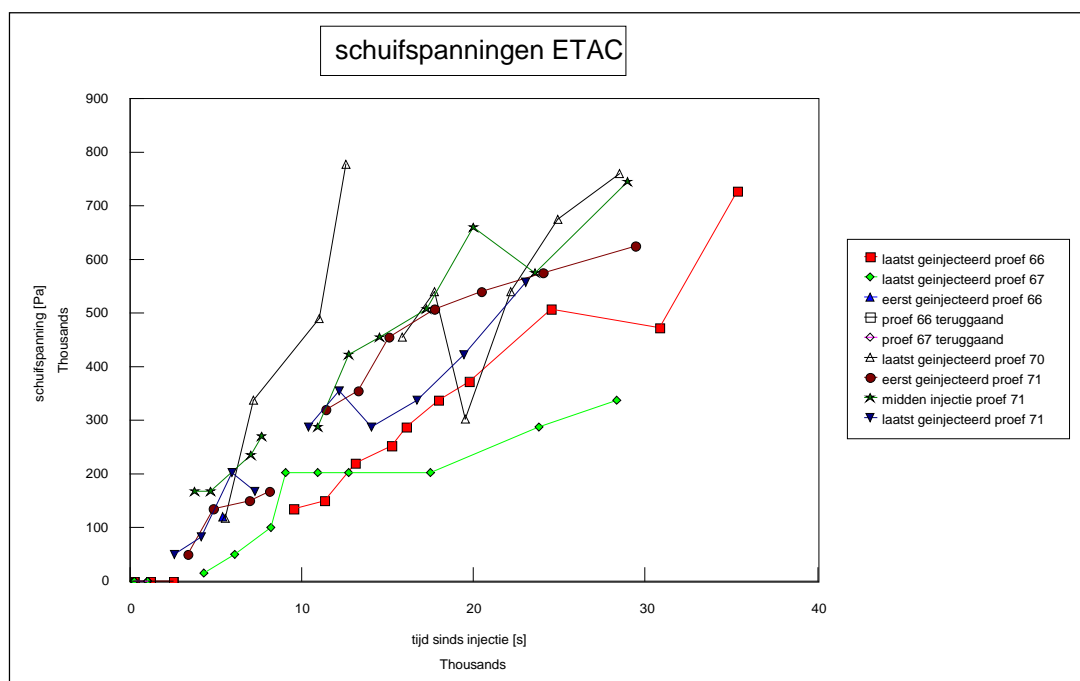


Figuur 4.16 Flowcurve van twee componenten grout na afloop van proef 66, met een leeftijd van 45 minuten

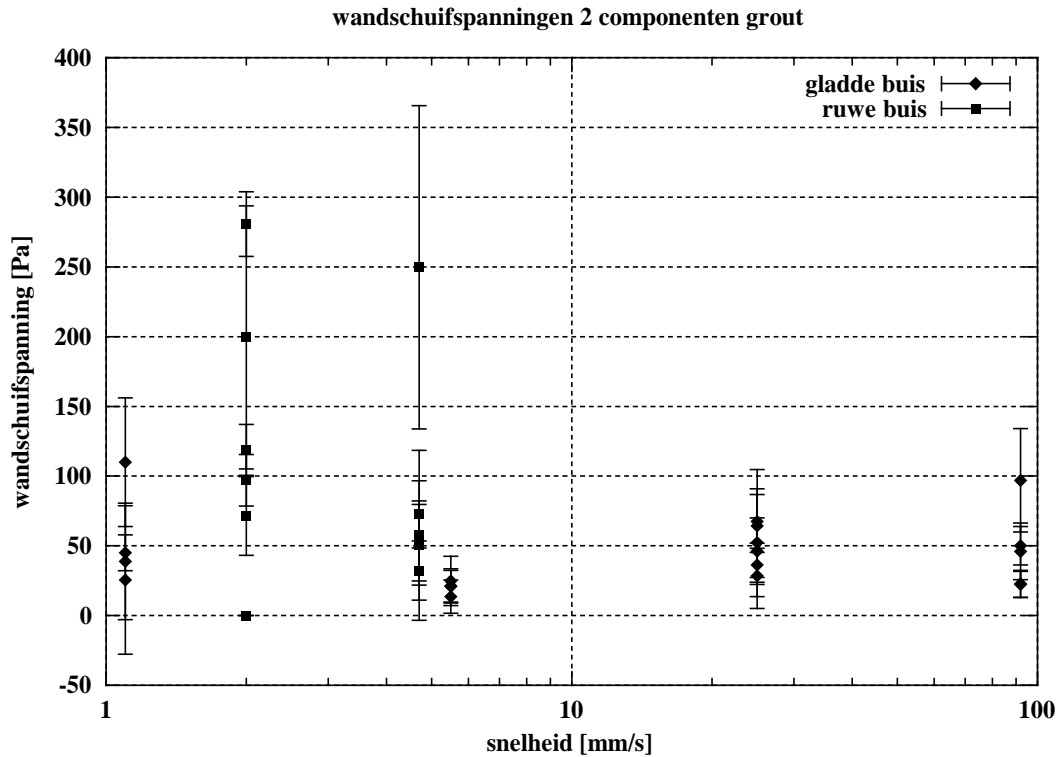


Figuur 4.17 De bezwijkspanning van het twee componenten grout als functie van de tijd

De resultaten van deze bepalingen staan weergegeven in figuur 4.17 en figuur 4.18. In figuur 4.17 staan de gemeten bezwijkspanningen logaritmisches uitgezet, in figuur 4.18 lineair. Zoals duidelijk te zien is in de laatste figuur 4. is de zwichtspanning in eerste instantie erg laag (< 5 kPa). Na ongeveer 40 minuten begint de zwichtspanning snel toe te nemen. Deze 40 minuten geven de verwerkbare periode van het 2 componenten grout aan.



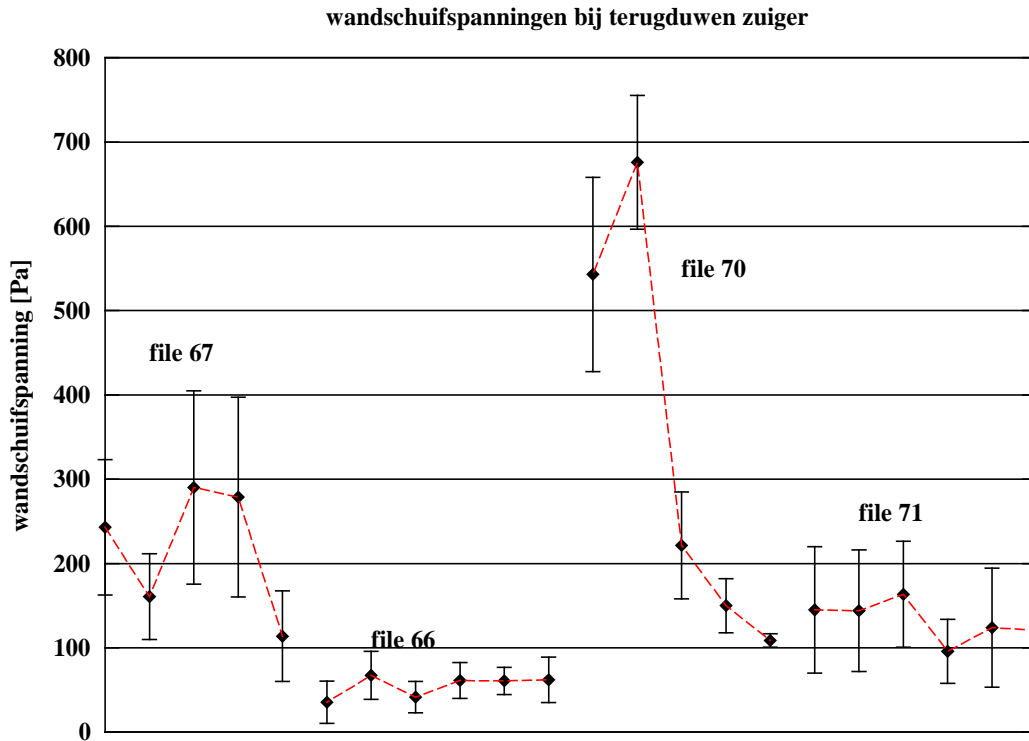
Figuur 4.18 De bezwijkspanning van het twee componenten grout als functie van de tijd



Figuur 4.19 De gemeten wandschuifspanningen bij het twee componenten grout

De gemeten wandschuifspanningen blijken net als bij de één component grout proeven zeer laag te zijn in vergelijking met de zwichspanning van het materiaal. De gemeten wandschuifspanningen staan per drukopnemerpaar weergegeven in figuur 4.19 en tabel 4.9.

Bij de laatste 4 proeven is ook tijdens het terugduwen van de zuiger de wandschuifspanning bepaald. De resultaten van de metingen staan weergegeven in figuur 4.20 en tabel 4.10. Voor de 4 files zijn voor de verschillende drukopnemerparen steeds de berekende wandschuifspanningen weergegeven, beginnend bij het drukopnemerpaar het dichtst bij de injectie nozzle. De gegeven wandschuifspanningen zijn gemiddelden over de buis, voor zover er grout langs komt. Het uitpersen gebeurt met behulp van de takel. De snelheid waarmee de zuiger terug geduwd wordt is heel constant en heeft een waarde van 21 mm/s.

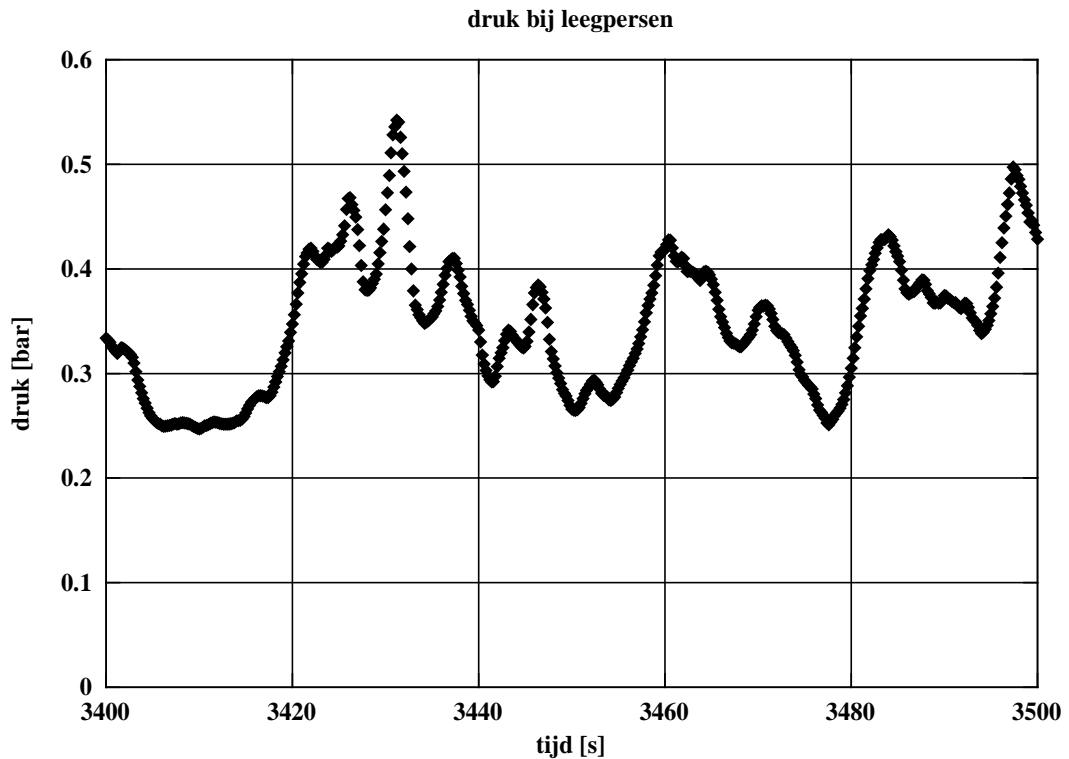


Figuur 4.20 De gemeten wandschuifspanningen tijdens terugduwen van de zuiger

Om een indruk te krijgen van de interne bezwijkspanning van het materiaal is bij de laatste 2 proeven de buis leeggeperst door een ronde opening. De drukval over de opening is een functie van de interne bezwijkspanning en verhouding in oppervlak tussen de buis en de uitstroomopening. De gebruikte uitstroomopening heeft een diameter van 38 mm. Hiermee is de oppervlakte verhouding tussen doorstroomopening en buis 6,9. Voor deze oppervlakte verhouding geldt in een “plain strain” situatie de volgende relatie tussen de drukval over de uitstroomopening en de interne bezwijkspanning (Hill 1976, figuur 42):

$$t_y = \frac{p}{5.6}$$

Voor de drukval over de uitstroomopening nemen we de druk van de eerste drukopnemer. Op deze manier vinden we voor de interne bezwijkspanning bij proef 70 $\tau_y = 6.2$ kPa bij een leeftijd van tussen de 17 (laatst geïnjecteerde grout) en 55 (eerst geïnjecteerde grout) minuten en bij proef 71 $\tau_y = 8.5$ kPa bij een grout leeftijd van tussen de 25 en 38 minuten. Opgemerkt moet worden dat deze methode niet erg nauwkeurig is en dat er een grote spreiding aanwezig is op de gemeten drukken. Bij proef 70 liggen de gemeten bezwijkspanningen tussen de 4,5 en de 9,8 kPa. De gevonden waarden liggen boven de piekwaarden gevonden bij de rotoviscometer proeven. Van proef 70 staat het druksignaal tijdens uitpersen weergegeven in figuur 4.21.

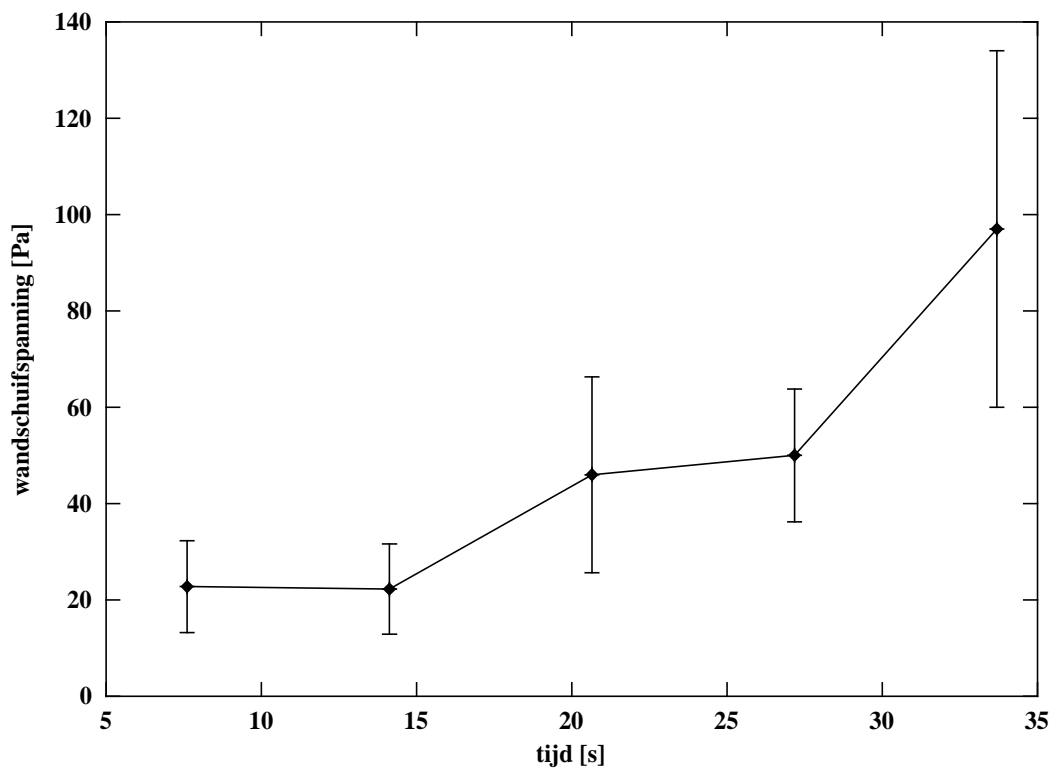


Figuur 4.21 Druksignaal van de eerste opnemer tijdens het leegpersen van de buis

De verklaring voor de zeer lage wandschuifspanningen die zijn gemeten, ligt evenals bij het één component grout in de aanwezigheid van een glijfilm. Er is echter wel een groot verschil met het één component grout. Bij het één component grout bestaat het glijlaagje voornamelijk uit het water/cement/bentoniet mengsel dat tussen de zandkorrels aanwezig is. In geval van het twee componenten grout is er niet een duidelijke grove fractie aanwezig, en ontstaat het glijlaagje door verbreken van de door de chemie opgebouwde structuur. Dit wordt duidelijk geïllustreerd door het spanningsverloop tijdens de rotoviscometer bepalingen.

4.3.5.3 Tijdseffect

Door de continue aanwezigheid van deformatie aan de wand wordt er geen sterkte opgebouwd in het smeerfilmpje aan de wand. Daardoor is er ook geen significante opbouw van de drukval als functie van de tijd. De enige meting waarin een significant tijdseffect te zien is, is de meting met de hoogste snelheid. Hierin is echter niet het uitharden van het grout, maar de initiële snelle reactie de oorzaak van het tijdsverloop. In figuur 4.22 is de gemeten wandschuifspanning bij een snelheid van 92 mm/s in de gladde buis uitgezet tegen de tijd. Als tijd is de gemiddelde leeftijd van het grout tussen de twee drukopnemers genomen.



Figuur 4.22 De wandschuifspanning als functie van de tijd bij een snelheid van 92 mm/s

Tabel 4.9 Een overzicht van de gemeten schuifspanningen met de bijbehorende standaard deviaties tijdens het vullen met twee componenten grout.

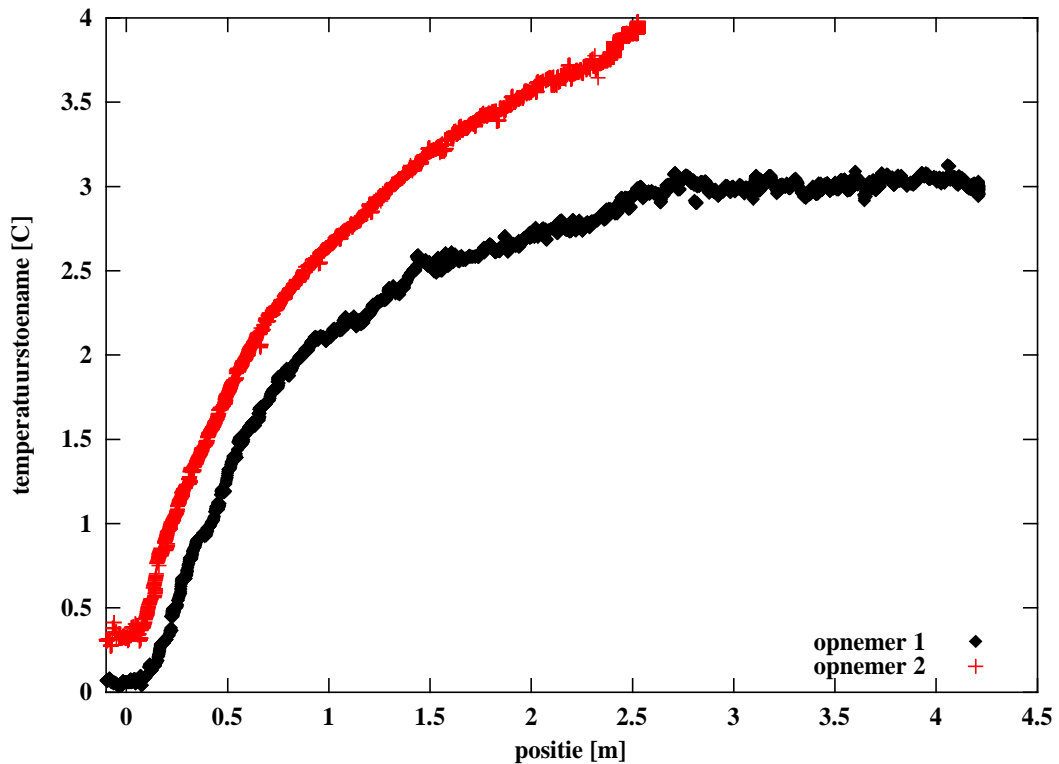
File	kanaal	snelheid [mm/s]	schuif-spanning [Pa]	sigm [Pa]
gladde buis				
62	1-2	92	0	
62	2-3	92	22,8	9,6
62	3-4	92	22,3	9,3
62	4-5	92	46	20,3
62	5-6	92	50	13,8
62	6-7	92	97	37,0
61	1-2	25	28,5	23,4
61	2-3	25	52,3	38,8
61	3-4	25	64,3	40,4
61	4-5	25	46,3	23,9
61	5-6	25	36,3	9,0
61	6-7	25	67,5	19,2
67	1-2	0,9	0	
67	2-3	0,9	38,8	41,7
67	3-4	0,9	25,5	53,2
67	4-5	0,9	110	46,2
67	5-6	0,9	45	12,8
66	1-2	5,5	24,8	17,7
66	2-3	5,5	0	
66	3-4	5,5	13,5	12,0
66	4-5	5,5	21	11,4
66	5-6	5,5	21,3	12,2
ruwe buis				
70	1-2	2	161,5	
70	2-3	2	0	0
70	2-3	2	199,5	94,3
70	3-4	2	0	
70	4-5	2	97	18,5
70	4-5	2	280,8	23,1
70	5-6	2	71,4	28,3
70	6-7	2	118,8	18,2
71	1-2	4,7	249,8	116,0
71	2-3	4,7	57,5	60,9
71	3-4	4,7	53,5	28,8
71	4-5	4,7	50,8	28,9
71	5-6	4,7	72,5	24,1
71	6-7	4,7	32,3	21,2

Tabel 4.10 Een overzicht van de gemeten schuifspanningen met de bijbehorende standaard deviaties bij het leegpersen van de buis

File	kanaal	snellheid [mm/s]	schuif-spanning [Pa]	sigm [Pa]
gladde buis				
67	1-2	21	243	80,4
67	2-3	21	160,8	50,8
67	3-4	21	290,3	114,5
67	4-5	21	278,8	118,5
67	5-6	21	113,8	53,9
66	1-2	21	35,5	25,0
66	2-3	21	67,3	28,5
66	3-4	21	41,5	18,7
66	4-5	21	61,3	21,2
66	5-6	21	60,8	16,1
66	6-7	21	62	26,8
ruwe buis				
70	1-2	21	543	115,3
70	2-3	21	676	79,3
70	3-4	21	221,5	63,3
70	4-5	21	150	32,1
70	5-6	21	108,8	7,8
71	1-2	21	145	75,0
71	2-3	21	144	72,2
71	3-4	21	163,5	62,9
71	4-5	21	95,8	38,0
71	5-6	21	124	70,6
71	6-7	21	121	23,3

4.3.5.4 Temperatuur

Als er significante warmteontwikkeling is tijdens de proef, moet dat te zien zijn als een verschil in temperatuur tussen de verschillende opnemers. Er treden echter evenals bij de één component grout proeven geen significante temperatuureffecten op. De enige proef waarbij er eventueel sprake is van een significant temperatuureffect is proef 66. In figuur 4.23 is de temperatuurtoename t.o.v. de initiële (lucht)temperatuur gegeven voor de eerste twee temperatuurnemmers. De temperatuur is gegeven als functie van de plaats, waarbij evenals bij de presentatie van de schuifspanningen de afstand tot de zuiger op de horizontale as uitgezet is. Duidelijk is te zien dat de opnemers langzaam naar een eindwaarde lijken te gaan. Het schijnbare temperatuurverloop over de afstand is in werkelijkheid het opwarmen van de opnemers van de lucht- naar de grouttemperatuur. Het maximale temperatuurverschil is ongeveer 1 graad.



Figuur 4.23 Het temperatuurverschil tussen temperatuuropnemer 1 en 2 bij proef 66 als functie van de afstand tot de zuiger.

4.4 Conclusies en aanbevelingen

4.4.1 Conclusies

Het heeft geen zin om, zoals in eerste instantie de bedoeling was, uit de τ -u-grafiek een reogram te maken. Bij de oorspronkelijke opzet was uitgegaan van een homogene massa, welke met een “vloeiend” snelheidsverloop stroomt. Daaruit kan goed een rheogram (τ - du/dz) bepaald worden. In het rekenmodel moet nu de directe relatie τ -u opgenomen worden.

Eén component grout

De exacte samenstelling van het grout heeft grote invloed op de consistentie. Door de hoge zandfractie heeft een kleine verandering in het watergehalte grote invloed op de consistentie van het materiaal. Ook de breedte van de korrelverdeling van het zand heeft grote invloed op de consistentie. Bij een te steile korrelgroteverdeling ontwatert het grout zeer snel en zal verpompen van het grout onmogelijk worden door het optreden van korrelspanningen.

De gemeten wandschuifspanningen zijn laag door de aanwezigheid van een smeerfilmpje langs de wand. De wandschuifspanningen worden bepaald door de rheologie van deze smeerfilm, die bestaan uit de vloeistof tussen de zand korrels en de fijne fractie van het zand.

In de huidige proeven is er geen tijdseffect gemeten. Dit wordt verklaard door de redelijk lange verwerkbare periode van het grout.

De verschillen in wandschuifspanning tussen de verschillende buizen zijn niet significant.

Als de geperforeerde en de gladde buis met elkaar vergeleken worden kan dit verklaard worden uit het niet goed functioneren van de gaatjes die voor de afwatering moesten zorgen en de ongevoeligheid van de wandschuifspanning voor het exacte watergehalte van de grout. Uit de proeven met de ruwe buis kan echter wel geconcludeerd worden dat ontwatering de consistentie van het grout wel beïnvloedt, en wel door het snel optreden van korrelspanningen in het grout.

De smeerfilm die langs de wand van de buis gevormd wordt is dun, maar dik genoeg om er voor te zorgen dat de wandschuifspanningen in de ruwe buis vrijwel het zelfde zijn als die in de gladde buis (dus ongeveer 200 μm). Verwacht mag worden dat de combinatie van ontwatering en een ruw oppervlak wel zal leiden tot hogere wandschuifspanningen, omdat in dat geval de korrelspanningen op een zeer effectieve manier overgebracht kunnen worden op de wand. Dit verklaart ook de grote drukval over de zuiger bij de proeven met de ruwe wand.

Omdat er alleen in de verwerkbare periode gemeten is, zijn er tijdens de proeven geen significante temperatuureffecten gemeten.

Twee componenten grout

De wandschuifspanningen bij het twee componenten grout worden evenals bij het één component grout bepaald door een dunne smeerfilm. De smeerfilm wordt veroorzaakt door het mechanisch verbreken van de door de chemie opgebouwde structuur in de grout. Dit gebeurt aan de wand omdat de schuifspanningen bij de wand het grootst zijn.

Door het continu verbreken van de structuur in de grout aan de wand is er ook geen significant verloop in de tijd van de wandschuifspanning meetbaar.

Door de lage injectiesnelheden en het discontinue karakter van de gebruikte pompen blijft bij de lage snelheden door een niet volledige menging van de twee componenten de sterkte van het grout waarschijnlijk achter bij de sterkte ontwikkeling bij volledig gemengd grout.

4.4.2 Aanbevelingen

Algemeen

Er zal onderzoek gedaan moeten worden waarin, zoals in een echte staartspleet er een gedwongen gradient in de stroming aanwezig is, zodat er niet zoals in de huidige opstelling een perfecte propstroming met een smeerfilm aan de buitenkant kan ontstaan. Het is niet onmogelijk dat in de praktijk de interne wrijving van het materiaal een substantiële rol speelt in de drukval.

Eén component grout

Om een goede inschatting te kunnen maken van de in de staartspleet optredende drukgradiënten zal onderzoek gedaan moeten worden waarin een combinatie van ontwateren en een ruwe wand onderzocht wordt.

Twee componenten grout

Het is niet bekend of er enige invloed door ontwateren van het grout op schuifspanningen tussen grout en grond is. Het is aan te bevelen een proef te doen, waarbij dit onderzocht wordt.

5 Synthese Groutstroming

5.1 Beoogde resultaten fase 3 “aanpassing stromingsmodel”:

Dit hoofdstuk betreft de derde en laatste fase van het Delft Cluster project, ‘Stromingsmodel Grout’. Desbetreffende werkzaamheden zijn als volgt verwoord in het projectplan:

“Aan de hand van de gegevens van de stromingsproeven (fase 2, en hoofdstuk 4 van de ‘reader’) wordt in fase 3 het stromingsmodel voor de spleetstroming, binnen grenzen van de mogelijkheden, aangepast.

In dit hoofdstuk wordt de invloed van verschillende fysische processen op de groutdruk, en groutdrukverdeling, besproken. Dit betreft: de weerstand van de grout, tijdsinvloeden op de reologie, ontstaan eventuele wandglijfilm, en de verandering van de eigenschappen van de grout door volumeverandering. Ook worden verschillen tussen de staartspleetstroming van één- en twee-componenten grout, en de daarbij optredende drukken, besproken.

In dit hoofdstuk wordt een synthese gegeven van de verkregen kennis in de voorgaande fasen van het onderzoek, zie paragraaf 5.2. In paragraaf 5.3 wordt een samenvatting van het stromingsmodel voor de groutstroming in de staartspleet gegeven. Er worden voorbeeldberekeningen gegeven in paragraaf 5.4. Er wordt een berekeningsmethode gegeven voor de stromingsweerstand van de grout in slangen/leidingen, met inachtneming van de reologische kenmerken van de grouts, paragraaf 5.6. De conclusies en aanbevelingen welke betrekking hebben op het gehele onderzoek zijn vermeld in paragraaf 5.7.

5.2 Synthese kennis voorafgaande fasen

5.2.1 Algemeen

De groutdruk in de staartspleet is belangrijk ten aanzien van de ondersteuning van het doorboorde grondpakket, de uitwendige belasting van het doorboorde grondpakket en de uitwendige belasting op de tunnelling. Zolang de grout nog goed verwerkbaar is gedraagt deze zich als een één fase mengsel: een continuüm. Van deze eigenschap is gebruik gemaakt in de modellering van de groutstroming.

De kennis opgedaan in voorafgaande fasen van het onderzoek wordt geïmplementeerd in het groutmodel en de rekenmethodiek voor de berekening van de groutstroming door groutleidingen.

5.2.2 Stromingsweerstand

De groutstromingsproeven in de buis (het proevenprogramma van fase 2 van het onderzoek) waren bedoeld om de stromingsweerstand van de grout op een zo realistisch mogelijke manier te bepalen, ter voorkoming van schaaleffecten.

Het was de verwachting dat de stromingsweerstand vanwege de chemische veranderingen in de grout met de tijd toe zou nemen en dat de stromingsweerstand ook toeneemt met de stroomsnelheid, zie figuur 3.2.

Het was op voorhand niet zeker welke orde grootte de stromingsweerstand zou zijn. Uitgaande van getalswaarden in de literatuur betreffende de inwendige weerstand van de grout gemeten in speciaal geprepareerde rotoviscometers, en interpretatie van Kegel van Abrams testen volgen waarden van de orde 1 kPa en meer. Er wordt in de literatuur echter ook gewaarschuwd voor een wandslip-fenomeen, dan kunnen de wandschuifspanningen een orde lager uitkomen. Het experiment, en de nauwkeurigheid van de instrumentatie, was zodanig ingericht dat zowel hoge als lage stromingsweerstand goed bepaald konden worden.

De meetresultaten laten zien dat de stromingsweerstand klein zijn. Het veronderstelde tijdseffect is niet waarneembaar. De stromingsweerstand neemt toe met de stroomsnelheid, zie figuren 4.15 en 4.19 van hoofdstuk 4.

5.2.3 Onderscheid interne en externe schuifweerstand

Het experimentele onderzoek heeft duidelijk gemaakt dat het essentieel is de inwendige en uitwendige weerstand van de grout te onderscheiden. We kunnen dit ook wel aanduiden met cohesie en adhesie. In onderstaande tabel is aangegeven in welke procesonderdelen respectievelijk de inwendige en de uitwendige eigenschappen van belang zijn:

Tabel 5.1 Overzicht karakteristieke weerstanden groutstroming

	inwendige weerstand	uitwendige weerstand (glijfilm)
grout-tunnellining		zie hfdst 4 & paragraaf 5.2.2
grout-grond	zie paragraaf 5.2.5	
grout-grout: uitstroming groutleidingen	zie paragraaf 5.5	
Groutstroming door leidingen en slangen		zie paragraaf 5.6

Bij trage groutstroming, zoals in de staartspleet, is de zwichtspanning de bepalende reologische parameter. De snelheidsafhankelijkheid is daar uiterst gering, en is dus de K-waarde uit het reologisch model van ondergeschikt belang. Bij betrekkelijk snelle stromingen, zoals in de toevoerleidingen, is de stromingsweerstand snelheidsafhankelijk. Daar wordt de weerstand bepaald door de zwichtspanning en visceuze kenmerken van het wandglijfilmmechanisme.

5.2.4 Snelheidsprofiel over de dikte van de groutlaag

Uit de stromingsmetingen concluderen we op basis van de gemeten stromingsweerstand dat het snelheidsprofiel over de dikte van de staartspleet anders is dan hetgeen we verwacht hadden. Uitgaande van een continuumbenadering hadden we snelheidsprofielen verwacht met een onvervormd middengedeelte, een zogenaamde plug, met in de wandgebieden een geleidelijke overgang naar een snelheid nul aan de wand, zie figuur 5.1a. Bij een dergelijk snelheidsprofiel hoort een wandschuifspanning welke iets groter is dan de (interne) zwichtspanning van het mengsel.

De wandschuifspanningen in de proeven blijken veel kleiner te zijn dan de interne zwichtspanning van de grout. Daaruit is geconcludeerd dat er wandlip optreedt en het mengsel als één geheel door de buis gestroomd is, zie figuur 5.1b.

Dit heeft consequenties voor de modellering van de wandschuifspanningen, echter de wandschuifspanningen zijn zo klein dat dit op het geheel van de groutstroming in de spleet niets uitmaakt.

Voor de berekening van de stromingsweerstand van de grout in slangen en leidingen is de modellering van wandlip echter wel van belang. De daartoe te volgen methode wordt in paragraaf 5.6 besproken.

5.2.5 Ontwatering en stromingsprofiel

Op het grensvlak tussen de grout en de grond kunnen t.g.v. het drukverschil tussen de grout en het grondwater de vloeibare bestanddelen uit de grout gedeeltelijk afstromen. Dit zal leiden tot een verstopping van het grondpakket en een compactering van de grout aan de wand. Indicatieve torvane-testen hebben laten zien dat hier de schuifweerstand sterk toeneemt. Uit de 'samendrukkingsproeven, zie hoofdstuk 2' valt niet goed op te maken hoeveel dit in de praktijk zal zijn omdat de spanningstoestand in de praktijk, en die in de proeven nogal verschillen.

Omdat er geen scherpe overgang tussen de gecompacteerd grout bij de wand en de overige grout in de spleet is, zal er naar verwachting geen schuifvlak optreden. Dan is voor de stromingsweerstand langs de grond de interne schuifweerstand van de grout bepalend.

Daar vloeistofverlies en de vorming van de gecompacteerd zone enkel aan één zijde van de groutschil plaats vindt, treden er maar aan één zijde van de groutlaag hoge schuifspanningen op. Deze schuifspanningsverdeling is getekend in figuur 5.2. Bij de gecompacteerd zone is de schuifspanning het hoogst. Voor stroming van de grout is het noodzakelijk op een enkele locatie in de grout de schuifspanning hoger is dan de interne zwichtspanning. Dit is het geval bij de overgang naar de gecompacteerd grout, zie figuur 5.2. Hier vindt een afschuifstroming plaats. In het overige deel van de grout is de schuifspanning in de grout lager dan de interne zwichtspanning. Dat deel stroomt en-bloc, zie figuur 5.2.

Er zal dus sprake zijn van een en-bloc stromende groutlaag. De indruk is dat de dikte van deze groutlaag iets kleiner zal zijn dan de vrije staartspleetopening ten gevolge van de gecompacteerd laag welke niet meestroomt. De proeven in hoofdstuk 2 kunnen niet gebruikt worden om de dikte van de gecompacteerd laag te kwantificeren omdat vrijwel het gehele cementskelet verdrongen is door water. Dat zal in de praktijk niet gebeuren, daar is sprake van een samendrukking van de grout. Er wordt gesteld dat de ontwikkeling van een gecompacteerd laag geen grote consequenties heeft voor berekende drukverschillen.

5.2.6. Tijdschaal reologische veranderingen grouteigenschappen

In het rekenmodel wordt de tijd sinds injectie van de grout bijgehouden. Daarmee worden de reologische veranderingen in rekening gebracht. Tevens biedt dit in principe de mogelijkheid de invloed van vloeistofverlies op de stromingseigenschappen te modelleren. Uit het voorgaande volgt dat het vloeistofverlies maar een geringe invloed op de stroming zal hebben en volstaat het de tijd sinds injectie enkel op de reologie in rekening te brengen. Indien we overigens de aangroei van de gecompacteerd laag zouden willen simuleren dient bedacht te worden dat dit een functie is van de tijd sinds passage van de achterrand van de TBM en de samenstelling van de aldaar tangentieel stromende grout (deze zal niet veel anders zijn dan die van de ongestoorde grout, anders stroomde de grout niet in tangentiële richting). Het rekenmodel is geldig tot dat de grout uithardt, d.i. tot de final set intreedt.

5.2.7 Vergelijking van conventionele grout en twee-componenten grout

Aandachtspunten bij toepassing van conventioneel grout dan wel twee-componenten grout kunnen op basis van verschillen en overeenkomsten van hun fysische eigenschappen verklaard worden. In onderstaande tabel worden dit samengevat:

Tabel 5.2 Verschillen en overeenkomsten tussen conventioneel grout en twee-componenten grout

	conventioneel grout	twee-componenten¹ grout	opmerking
verwerkbare periode	tenmiste 4 a 5 uur	½ uur, met een snelle ontwikkeling binnen 30 s.	
interne weerstand in verwerkbare periode	1 a 2 kPa	10 kPa 2,5 kPa	recept 1 (fase 0) recept 2 (fase 2)
externe weerstand in verwerkbare periode	10-200 Pa	10-50 Pa	
weerstand met grond	inwendige parameters	inwendige parameters	veronderstelling + praktijk
weerstand met tunnelling	glijfilmvorming	glijfilmvorming	gelijke weerstand
weinig weerstand in slangen en leidingen	glijfilmvorming	n.v.t.	

De stromingsweerstanden van beide typen grout zijn van gelijke orde.

Bij toepassing van conventionele grout worden vaak 4 tot 6 injectiepunten toegepast. De grout dient tot halverwege de injectiepunten te stromen om de staartspleet te vullen. De berekende stroomduur voor een conventionele grout tot het punt halverwege tussen de injectiepunten is van de orde een ½ tot 1 uur.

Bij twee-componenten grout, dat in de praktijk veelal bovenin geïnjecteerd wordt, kan is het dus belangrijk zijn dat de verwerkbare periode van de chemische grout afgestemd is op de tijd welke de grout benodigt om de staartspleet volledig te vullen.

Bij conventioneel grout dient gelet te worden op vloeistofverlies. Het drukverschil tussen

¹ fysische eigenschappen na menging

de groutdruk en de waterspanning van het grondpakket is daarbij een belangrijke factor.

5.2.8 Overzicht meetinstrumenten reologische bepalingen

Met veelal eenvoudige meetinstrumenten kunnen de noodzakelijke reologische gegevens bepaald worden. Een juiste interpretatie van de meetgegevens is cruciaal. In de staartspleet is, vanwege de trage stroming, de viscositeitsparameter (K) van ondergeschikt belang.

Op de site kunnen ten behoeve van de bepaling van indicatieve waarden voor de inwendige zwichtspanning van de grout meetinstrumenten als de kegel van Abrams en Torvane gebruikt worden. Het verloop van de uitharding kan gemeten worden met een pocketpenetrometer. Goede nauwkeurige waarden voor de inwendige zwichtspanning kunnen het beste met een Haake vane-rotoviscosimeter in het laboratorium bepaald worden (alhoewel de apparatuur ook op de site opgesteld kan worden).

Bij twee-componenten grout is in stromende toestand de zogenaamde remoulded strength van belang (=teruggaande curve van figuur 4.18). Een Haake vane rotoviscosimeter is daartoe een geschikt meetinstrument. Bij lage waarden van deze inwendige weerstand kan het twee-componenten grout in een smalle baan neerwaarts langs de achterrand van de TBM stromen, zie paragraaf 5.4. Deze remoulded strength vormt echter geen inputparameter van het DCgrout model.

De uitwendige schuifweerstand welke van belang is in de toevoerleidingen, is lastiger op kleinschalige manier te bepalen. Bovendien is de snelheidsafhankelijkheid van belang. De Brookfield rotoviscosimeter, met het vlakke schijfelement, zou toegepast kunnen worden om indicatieve waarden te verkrijgen. Er is echter nog wel een interpretatieslag nodig. Groutmengsels kunnen echter ook systematisch in een daartoe geëigende Haake rotoviscosimeter op wandslip getest worden. Daartoe dienen specifieke systematische gevarieerde combinaties van bob- en cup-elementen toegepast te worden.

Voor conventioneel grout (mortel) moet in het laboratorium de relatie tussen samendrukking en stromingsverstand beter systematisch onderzocht worden. De reologische bepalingen dienen daarbij met een Haake vane gedaan te worden.

5.3 Samenvatting rekenmodel groutstroming in staartspleet

5.3.1 Hoofdkenmerken rekenmodel

Het rekenmodel DCgrout berekent de groutverdeling in de staartspleet. Daartoe worden de continuïteitsbalans en de krachtenbalans toegepast. Via de krachtenbalans wordt de wrijving van de groutstroming met de tunnelling en de grond in rekening gebracht. In dit hoofdstuk worden de resultaten van berekeningen van het groutdrukverloop rondom de tunnelling gegeven. In onderstaande tabel zijn de belangrijkste kenmerken van het rekenmodel samengevat.

Tabel 5.3 Samenvatting kenmerken rekenmodel DCgrout

Het model is twee dimensionaal. Het berekent de verdeling van de grout en groutdrukken in de staartspleet.
Het aantal injectie-openingen, de locatie van de injectie-openingen en de debietverdeling over de injectie-openingen kan gevarieerd worden.
Een 'shallow flow' benadering wordt toegepast. De stromingsvergelijkingen zijn gemiddeld over de dikte van de groutlaag.
Het ontstaan van een gecompacteerd laag wordt niet in rekening gebracht op de dikte van de stromende groutlaag.
De dikte van de groutlaag wordt constant verondersteld.
De eindige differentie methode wordt toegepast.
In de grout wordt er geen onderscheid gemaakt naar korrel- en waterspanningen omdat verse grouts gekenmerkt worden door goede stroombaarheid en verwerkbaarheid.
De reologische eigenschappen van de grout zijn gemodelleerd als een één-fase viscoplastische Bingham vloeistof.
De reologische eigenschappen kunnen opgegeven worden als een functie van de tijd sinds injectie in de staartspleet.
De hydratatie van de cement leidt tot tijdsafhankelijkheid van de reologische eigenschappen.
Gevolgen van vloeistofverlies van de grout naar de omringende grond kunnen verdisconteerd worden in de tijdsafhankelijkheid van de reologische eigenschappen.
De stromingsweerstand wordt bepaald door wrijvingsweerstand van de grout met de tunnelling en de omringende grond.
De normaalspanningen in de grout zijn isotroop verondersteld.
Inwendige schuifspanningen tengevolge van snelheidsverschillen met aangrenzende gridpunten worden verwaarloosd.
Het extra grout dat geïnjecteerd wordt om vloeistofverlies te compenseren is niet inbegrepen in de continuïteitsverl ijkingen van het model.
Rekengebied omvat de gehele omtrek van de tunnelling, direct aansluitend aan de achterkant van de TBM tot een afstand van 3 of meer tunnelsegmentringen achter de TBM.

De injectieopeningen van de grout bevinden zich op 12 vaste posities: op 1 uur, 2 uur, 3 uur, 4 uur, 5 uur, 6 uur, 7 uur, 8 uur, 9 uur, 10 uur, 11 uur en 12 uur. De instroomopeningen bevinden zich overigens niet precies op deze locaties. Het aantal gridpunten in dwarsrichting is namelijk geen veelvoud van 12.

Het debiet door alle injectiepunten is constant in de tijd. Per injectieopening kan het aandeel aan het totale groutdebiet opgegeven worden.

Het spreadsheet rekent niet volledig rond de omtrek. Op 6 uur, onderaan de tunnel is het rekengebied gesplitst. Dit is gedaan uit stabiliteitsoverwegingen. Op deze plaats kan er, in het rekenmodel, geen grout van de ene zijde van de buis naar de andere zijde stromen. Aan de bovenkant, bij de kruin van de tunnel, kan dat overigens wel. Deze splitsing onderaan bij 6 uur is eigenlijk alleen gerechtvaardigd bij een symmetrisch injectiepatroon (gezien t.o.v. de verticaal door 6 uur). Er wordt opgemerkt dat door draaiing van het rekengebied (bij nabewerking) het mogelijk is het symmetriepunt op andere locaties te leggen. Dit biedt de mogelijkheden verschillende injectiestrategie en/of uitval van injectieleidingen te simuleren.

Het rekenprogramma is volgens afspraak geprogrammeerd in een EXCEL 97 spreadsheet. Het bevat de fundamentele stromingsvergelijkingen voor de groutstroming in de staartspleet. De invoergegevens dienen in het eerste blad opgegeven te worden. In het laatste blad bevindt zich de grafische uitvoer. De groutstroming wordt via een iteratief proces opgelost.

Er vinden iteraties plaats tussen de getallenmatrixes in de eerste 5 bladen.

Opmerking:

Bijzondere manipulaties van het tijdsveld om stilstand en onderbrekingen te simuleren zijn opgenomen in blad D2 van het spreadsheet. De directe resultaten van de manipulaties op het tijdsveld zijn goed te zien in de figuur 'leeftijd grout' in het laatste blad van het spreadsheet. De gebruiker wordt geadviseerd hier voorzichtig mee om te gaan. Drukken welke in uitgeharde grout berekend worden hebben weinig fysische betekenis.

De gebruiker wordt geadviseerd ten alle tijde een origineel spreadsheet te bewaren. Het is namelijk niet uitgesloten dat gedurende het rekenproces instabiliteiten optreden, en er ERRORS optreden. Dit is niet eenvoudig te verhelpen en het is beter verder te werken met het origineel.

5.3.2 Invoergegevens

De getalswaarden van de reologische parameters, en hun tijdsafhankelijkheid, vormen één van de invoergegevens.

Tabel 5.4 Voorbeeld invoergegevens stromingsmodel DCgrout

Invoergegeven		eenheid
Buitendiameter tunnelling	10	[m]
Hoogte staartspleet	0.15	[m]
Voortgangssnelheid TBM	0,001	[m/s]
Bovenbelasting (bij circa 15 m dekking)	300000	[Pa]
Waterspanning bovenzijde	150000	[Pa]
Dichtheid grout	2100	[kg/m ³]
Zwichtspanning (gemiddelde van grond en lining)	1500	[Pa]
Viscositeitsparameter K (gemiddelde van grond en lining)	50	[Pa s]

Opmerking:

Het is niet nodig afzonderlijk de wandwrijving van de grout met de tunnelling en de wandwrijving van de grout met de grond in rekening te brengen. Het volstaat de gemiddelde waarde van wandwrijving van de tunnelling en de grond als invoerparameter op te geven. De wrijving met de grond is circa 3 kPa. De wandwrijving met de tunnelling is verwaarloosbaar klein: 10 à 100 Pa.

Met name ten behoeve van het twee-componenten grout is de tijdsafhankelijkheid van de reologische parameters uitgebreid met de sterkteontwikkeling tijdens het uitharden. De uitharding (gelling) begint in het model op $t = t_{gel}$. Naar aanleiding van de gemeten uitharding van de ETAC zijn, in aanvulling op de vergelijkingen in hoofdstuk 3, de daarbij optredende schuifweerstand gemodelleerd door (zie figuur 4.18):

$$t_y = 20(t - t_{gel}) , \text{ voor } t > t_{gel}$$

Een grafische illustratie van de wiskundige vergelijking voor ontwikkeling van de interne

schuifspanning als functie van de tijd sinds injectie is gegeven in figuur 5.3.

Aanvullende mogelijkheden:

Aanvullend op de berekening van de basisstroming uit de injectiepunten zijn er andere mogelijkheden welke vermeldenswaard zijn.

1. Het is mogelijk de onderbreking voor het plaatsen van ringen mee te nemen in de berekening. Op ieder gewenst tijdstip na hervatting van de boorbeweging kan een momentopname gegeven worden van de groutdrukken in de staartspleet: Opgegeven dienen te worden: tijdstip na hervatting, en de duur van het plaatsen van een tunnelring. Hetzelfde kan voor een eerder geplaatste ring opgegeven worden.
2. Het model kan toegepast worden voor situaties waar 1 of meerdere injectiepunten uitgevallen zijn. Indien situatie op '6 uur' niet meer symmetrisch is kan het rekengebied zelfs gedraaid worden naar een locatie waar in het specifieke geval wel sprake van symmetrie is. Dit laatste vereist specifieke voor- en nabewerkingen welke hier niet verder beschreven zullen worden.
3. Een handige methode om de rekenresultaten weer te geven, is deze uit te zetten in een zogenaamde drukroos. Dergelijke postprocessingsoftware is niet meegeleverd.

Eventuele geldigheidsbeperkingen aan de dikte van de groutlaag.

Een eventuele beperking van het groutstromingsmodel kan de dikte van de groutlaag vormen. In het model is de inwendige afschuiving tussen naburige gridcellen niet meegenomen. Een dergelijke afschuiving van de grout zal aanleiding geven tot anisotropie van normaalspanningen geven. Deze anisotropie is van de orde 2 maal de inwendige zwichtspanning van de grout (denk aan de cirkel van Mohr!). Bij het op gang brengen van de stroming spreken we over een dus hoogstens over een paar kPa. Als het eenmaal stroomt is de remoulded strenght bepalend, bij twee-componenten grout gaat het dan om circa 100 Pa. Op het grote geheel zijn dergelijke waarden verwaarloosbaar. Enkel lokaal bij de injectieopeningen is tengevolge van inwendig bezwijken van de grout het drukverschil groter. Dat kan in rekening gebracht worden met de methode beschreven in paragraaf 5.5.

Geldigheidsbeperking stromingsmodellering.

Het stromingsmodel is geldig tot aan de eerste uitharding van de grout. Een bovengrens aan toepassing bij transitie van een verwerkbare substantie naar uitgehard grout is niet te geven. Arbitrair wordt gesteld dat 15 kPa wel eens de bovengrens zou kunnen vormen, dan wordt de berekende drukval onrealistisch groot.

Eventuele toekomstige uitbreidingen:

- Er wordt aanbevolen het model in langsrichting uit te breiden tot in het gebied waar opdrijven van de tunnel overheerst. Dat vereist een uitbreiding van het aantal gridpunten, en de randvoorwaarden. Daarbij dient rekening gehouden te worden met het gewicht en de buigstijfheid van de tunnelling.
- Onze huidige kennis van de gevolgen van de samendrukking van de grout is beperkt. Momenteel wordt de invloed van de samendrukking verdisconteerd d.m.v. een hoge (interne) wrijvingsweerstand van de grondstroming met de grond. De reden is beschreven in paragraaf 5.2.5. In de toekomst, wanneer we een beter begrip hebben van dit proces, kan dit meegenomen worden in het model. In de huidige opzet van het model is er vanuitgegaan dat dit via de tijdsafhankelijkheid van de reologische parameters van

de grout kan geschieden. Wellicht dient dit in de toekomst uitgebreid te worden met een tijdsafhankelijkheid vanaf het moment sinds het blootstellen van de grond aan groutdrukken.

- De twee-component grout heeft laten zien, thixotroop gedrag te vertonen, zie figuur 4.18. Het rekenmodel gaat, gebaseerd op literatuurgegevens van goed geprepareerde cement, uit van irreversibel gedrag: de stromingsweerstand neemt toe met de tijd. Het kan zijn dat een dergelijke benadering alsnog de toepassingsmogelijkheden van het model beperkt.
- Naar mate er meer opties aangebracht worden lopen we tegen de beperkingen van het spreadsheet aan. Er dient overwogen te worden op een gegeven moment over te stappen om een Fortranmodel, of de kennis te implementeren in een bestaand stromingsmodel.

5.4 Analyse groutdrukken in staartspleet

5.4.1 Conventioneel grout

In paragraaf 3.6 zijn voorbeeldberekeningen voor gewone grout gegeven. De literatuur geeft aan dat inwendige weerstand van de grout van de orde 1,5 a 3 kPa is. De pijpstromingsproeven hebben geleerd dat de wrijvingsweerstand met vlakke wanden gering is: 50 a 200 Pa. De samendrukkingproeven hebben laten zien de bezwijkweerstand vlak bij het grondpakket van de orde is van de inwendige weerstand van de grout. De wrijving tussen de grout en de grond heeft dientengevolge de grootste invloed op het drukverloop in de staartspleet.

In het model is het niet nodig een onderscheid te maken naar weerstand met de grond en weerstand met de tunnelling. Het volstaat het gemiddelde van de weerstand met grond en tunnelling op te geven. In de voorbeeldberekening van paragraaf 3.6 is een zwichtspanning van 1,5 kPa opgegeven. Dat is dus gelijk aan circa 3 kPa zwichtspanning op het grensvlak grond-grout, hetgeen een realistische waarde is.

Bij conventioneel grout speelt, zolang de grout nog verwerkbaar, de tijdsafhankelijkheid een ondergeschikte rol. Vanaf een half uur na aanmaak tot 4 a 5 uur later (= inductieperiode) neemt de weerstand maar weinig toe.

Het is niet nodig nieuwe voorbeeldberekeningen uit te voeren, de lezer wordt verwezen naar paragraaf 3.6.

Het model zal voor conventionele grout (mortel) aan de praktijk getoetst worden bij de boring van de Sophiaspoortunnel. Dit geschiedt in het kader van een ander project, een monitoringsproject, dat een samenwerking is tussen het COB en het Delft-Cluster.

5.4.2 Twee-componenten grout

De reologische parameters, en hun tijdsafhankelijkheid, vormen de bepalende factor voor het drukverloop in de staartspleet.

De meting van de inwendige weerstand met de pocketpenetrometer tijdens de oriënterende bepalingen (fase 0) gaven een weerstand van de orde 10 kPa gedurende een periode van circa 30 minuten. Daarna nam de weerstand snel toe door uitharding. Deze test heeft duidelijk een veel te hoge, maar vooral verwarringwekkende, waarde geleverd. In de praktijk wordt twee-componenten grout bovenin geïnjecteerd, en moet het helemaal naar beneden stromen. Bij een spleetdikte van 15 cm zou dit een druktoename van 10 bar over 10 meter hoogte betekenen.

Het twee-componenten grout gaf daarentegen weinig weerstand in de stromingsproef. De wrijvingsweerstand lag tussen de 50 en 100 Pa (met maximaal 300 Pa bij een ruwe pijpwand). In de vane proeven, uitgevoerd na afloop van de stromingsproeven volgde een piekwaarde (= inwendige weerstand) van 2,3 kPa. De remoulded strength waarde was circa 100 Pa. Deze laatste waarde ligt dicht bij de uitwendige weerstand (de inwendige structuur van het mengsel is verbroken).

De wrijvingsweerstand kan ook uit praktijkgegevens teruggerekend worden. Het praktijkgegeven dat gebruikt wordt in Talmon e.a. 2001 heeft betrekking op twee-componenten grout bij de Botlekspoortunnel. De diameter van de tunnel is circa 10 meter. De dikte van de staartspleet is circa 0,15 m. De dichtheid van de grout is ongeveer 1000 kg/m³. Het gemeten drukverschil onder-boven is circa -150 kPa. Het statisch drukverschil is dan circa 100 kPa. De stromingsweerstand is aldus circa 250 kPa. De wrijvingsweerstand met de grond wordt vervolgens geschat uit (daarin is de wrijving met de tunnelling verwaarloosd):

$$t = \frac{h}{p / 2 D} \Delta p = \frac{0,15}{15,7} 250.000 = 2.500 Pa$$

Het rekenvoorbeeld in Talmon e.a. 2001 is gebaseerd op deze teruggerekende zwichtspanning van 2,5 kPa. Het rekenvoorbeeld wordt hier niet verder behandeld. Er wordt echter opgemerkt dat, zelfs zonder onderbreking voor het plaatsen van tunnelsegmenten, de groutstroming er volgens het DCgroutmodel circa een uur over doet om beneden te komen. Dit is strijdig met de gemeten lengte van de verwerkbare periode van de grout. Daar de twee componenten grout vrij snel (binnen 30 minuten) uithardt zal de stroming bij voorkeur langs de achterrand van de TBM stromen om het door de voortbewegende TBM gecreëerde ruimte op te vullen. Het rekenmodel is niet fijnmazig genoeg om dit te berekenen. Een betere indruk van de verblijftijd van de grout bij de achterrand van de TBM kan d.m.v. handberekeningen verkregen worden, zie Bijlage 5.

5.4.3 Gevolgtrekkingen groutdrukberekeningen in staartspleet

Conventioneel grout stroomt zowel langs de achterrand van de TBM als dieper in de reeds gegroute laag. De dwarsstroming bij de TBM is het sterkst. Bij conventioneel grout dient voorkomen te worden dat door samenpersing de groutstroming vastloopt. Het rekenmodel berekent de condities in de staartspleet, maar is niet gemaakt om de samenpersing zelf te berekenen.

Bij conventioneel grout kan met name kan de invloed van het aantal toegepaste injectieopeningen op de drukverdeling goed onderzocht worden. Dit is belangrijk omdat de

drukken in de staartspleet zo veel mogelijk op de heersende gronddrukken afgestemd moeten worden. Daarmee kunnen veranderingen in de grout ten gevolge van samendrukken en vloeistofverlies zoveel mogelijk beperkt worden.

Groutdrukberekeningen voor conventioneel grout kunnen zonder bijzondere aandacht voor tijdsafhankelijke fenomenen uitgevoerd worden. Voor twee-componenten grout luistert het nauwkeuriger. Dat komt door de korte verwerkbare periode en de weinige groutinjectieopeningen.

Uit het feit dat we voor beide typen grout de hoge interne weerstand moeten gebruiken bij de stroming langs de grond wordt geconcludeerd dat er zich hier geen schuifvlak weet te vormen. Dat wordt geweten aan het drukverschil grout-poriewater waardoor er geleidelijk een geringe hoeveelheid grout in de grond geperst wordt, en schuifvlakvorming geen kans krijgt.

Bij twee-componenten grout treedt er waarschijnlijk een gekanaliseerde stroming direct langs de achterrand van de TBM op. Dat komt doordat na stilstand voor het plaatsen van tunnelling-segmenten de reeds geïnjecteerde grout verhard is, en de nieuwe grout enkel in een smalle baan naar beneden kan stromen. Door verdere toename van de weerstand van geïnjecteerde grout wordt een dergelijke stroming in stand gehouden.

5.5 Lokaal drukverlies bij injectiepunten

De grout stroomt vanuit rechte leidingen van constante diameter in de staartspleet. Indien de grout zich als een snelstromende Newtonse vloeistof in de staartspleet gespoten zou worden is de druk aan het einde van de injectieleiding gelijk aan de druk in de staartspleet. Bij een plastisch materiaal is de situatie echter anders.

De instroming van een traag stromend plastisch materiaal is analoog aan het indrukken van een 'punch' in het plastisch materiaal. De 'punch' is dan de uitstromende grout. Deze geïdealiseerde situatie is gelijk aan de spanningstoestand bij het indrukken van een 'pocket-penetrometer' in een plastisch materiaal. Het drukverlies bij instroming is in een dergelijke situatie is gelijk aan:

$$\Delta p = 5.15 t_y$$

Hierin is de t_y de inwendige zwichtspanning van de grout, welke bijvoorbeeld met een vane of een m.b.v. de kegel van Abrams gemeten kan worden.

In dit model is het drukverlies onafhankelijk van de stroomsnelheid. Er zijn geen aanwijzingen welke duiden op een snelheidsafhankelijkheid van dit instroomverlies.

Bij twee-componenten grout worden de bestanddelen vlak voor injectie gemengd. Het mengsel is dan nog heel erg vloeibaar. Bij instroming in de staartspleet zal er aldus geen drukval optreden.

Bij een conventionele grout met een interne zwichtspanning van circa 3 kPa valt er aldus bij instroming in de staartspleet plaatselijk een drukval van **15,5 kPa** te verwachten.

5.6 Weerstand toevoerslangen en leidingen

5.6.1 Weerstand verpompen groutmortels

Ondanks de relatief hoge bezwijkweerstand van de bulk van groutmortels, blijkt uit ervaring dat dit soort mengsels met betrekkelijk weinig weerstand verpompt kan worden. In deze paragraaf wordt een model gegeven/afgeleid voor de stromingsweerstand in groutleidingen. Dezelfde theorie is overigens ook van toepassing op groutstroming in de staartspleet langs de tunnelling en de achterrand van de TBM.

De drukval over de groutleidingen bestaat uit drie componenten, een statische component t.g.v. plaatshoogteverschillen, een statische component t.g.v. Coulombwrijving van de mortel met de wand, en een dynamische component t.g.v. de stroming door de leidingen. De reologische eigenschappen op het mortel-wand grensvlak zijn bepalend voor de dynamische component.

5.6.2 Theorie wandslip

Naar alle waarschijnlijkheid treedt er zogenaamde wandslip op. Het grout stroomt, over de gehele doorsnede van de leiding, en bloc door de leiding. De vaste stoffbestanddelen (het vulzand) slippen langs de wand en er is sprake van een minuscuul dun glijfilmpje langs de wand. Gezien de reologische kenmerken van de dragervloeistof treedt er naar verwachting een laminaire stroming op in dit glijfilmpje. De oorzaak van het glijfilmfenomeen is het granulaire karakter van het mengsel. De modellering van de optredende fysische processen en de voorspelling van de wrijvingsweerstand blijken moeilijk te zijn. Disperse systemen, bijvoorbeeld emulsies als olie in water, blijken het slipverschijnsel ook te vertonen.

Als model voor de schuifspanning in het glijfilmpje wordt een Bingham relatie verondersteld. Dit in analogie met de literatuur betreffende Newtonse dragervloeistoffen:

$$\tau = \tau_y + K \frac{u_s}{d}$$

met: τ = schuifspanning in glijfilm, u_s = slipsnelheid deeltjes bij de wand (in dit geval is dit gelijk aan de gemiddelde snelheid van de grout in de leiding), d = dikte glijfilm, τ_y = zwichtspanning dragervloeistof, K = viscositeit dragervloeistof.

5.6.3 Theorie Coulombwrijving

In een mortel worden de zanddeeltjes door middel van de dragervloeistof in suspensie gehouden. Bij lage stroomsnelheden is er sprake van een 'solide' kern. Ook het zand aangrenzend aan de wand maakt deel uit van deze kern. Deze zanddeeltjes ondervinden een Coulombwrijving met de wand. De 'solide' kern ondervindt een opdrijvende kracht van het glijfilmpje langs de wanden. De normaalkracht op de onderzijde van de leiding is per eenheid van lengte:

$$F_n = \frac{1}{4} p D^2 (r_{mix} - r_f) g$$

de equivalente Coulomb wandschuifspanning is:

$$t_c = \frac{mF_n}{pD}$$

met: μ = wrijvingscoëfficiënt Coulomb wrijving (0,3).

5.6.4 Analyse wandwrijving stromingsproeven

Tabel 5.7 Kenmerkende gegevens conventioneel grout

inwendige diameter leiding	0,1 m
de stroomsnelheid	0,01 tot 0,1 m/s
v% zand	0.559
v % water	0.335
v % (cement +vliegas + bentoniet + plastificeerder)	0.106
d50 mediaan diameter vulzand	1 mm
soortelijke massa mortel	2111 kg/m ³
soortelijke massa dragervloeistof (totaal - zand)	1230 kg/m ³

Uit de literatuur volgt dat de orde grootte van de dikte van de glijfilm 1/10 a 1/20 van de mediaandiameter van de vaste stof bestanddelen is (in dit geval de zandfractie). Dit heeft overigens betrekking op stromingscondities waarin de bulk van de stroming laminair, dan wel turbulent, stroomt. De huidige omstandigheden zijn anders. De ervaring met emulsies is dat de weerstandsrelatie van de wandglijfilm (=de relatie tussen wandschuifspanning en slipsnelheid) in sterke mate afhankelijk is van de wandschuifspanning, Princen 1985. Dit kan betekenen dat de dikte van de glijfilm nog kleiner is dan bovengenoemde waarden.

Uitgaande van een dynamische Coulombwrijving van 0,3 is de wandschuifspanning berekend volgens paragraaf 5.6.3 gelijk aan: $\tau=65$ Pa, omtrekgemiddeld. Dit is vergelijkbaar met de weerstand gemeten bij de kleinste stroomsnelheden in de groutstroomproeven. Deze Coulombwrijving is onafhankelijk van de stroomsnelheid.

De afzonderlijk bepaalde reologie van de dragervloeistof is (mortel zonder zand), zie figuur 4.13: $\tau_y= 2$ [Pa], $K=0.01$ [Pa s]. Wanneer dit gecombineerd wordt met het wandschuifspanningsmodel van paragraaf 5.6.2 volgen er wandschuifspanningen welke beduidend kleiner zijn dan gemeten.

Er is nog geen sluitende verklaring voor wat hier aan de hand is. Duidelijk is wel dat er sprake moet zijn van een wandglijfilmpje, en dat de Coulombwrijving een rol speelt. Mogelijke verklaringen zijn:

- De dikte van de wandglijlaag is een orde kleiner dan volgens de literatuur.
- De fijne bestanddelen komen tussen de zandkorrels en de wand, en hinderen het voortglijden van het zand (vergroten kortdurend de Coulombwrijving).
- De normaalspanningen fluctueren.
- Individuele zandkorrels raken los uit de 'kern' en verhogen de normaalspanning totdat ze een 'nieuw' plekje gevonden hebben. Het losraken is een functie van de snelheid.

We kunnen op basis van de meetgegevens een formule voor de wandwrijving opstellen. De lineaire toename van de wandschuifspanning duidt er op dat de stroming in de glijfilm

laminair is. Voor de eenvoud wordt de dikte van de wandglijfilm gelijk aan $1/10 \cdot d_{50}$ verondersteld. De wandschuifspanning wordt dan als volgt gemodelleerd:

$$\tau = \tau_y + K \frac{\alpha}{0,1 d_{50}} u_s$$

met: $\alpha = 10$ (empirisch)

Het Reynoldsgetal van de glijfilm is kleiner dan 1, meer dan voldoende om laminaire theorie toe te passen.

5.6.5 Voorbeeldberekening drukval groutleidingen

Neem de volgende kenmerkende situatie: tunneldiameter 10 m, spleethoogte 0,15 m, voortgangsneldheid TBM 0,001 m/s. Er worden 6 groutleidingen toegepast met een diameter van 0,1 m. De stroomsnelheid in de leidingen is dan 0,1 m/s. We gaan verder uit van eenzelfde samenstelling van de mortel als in onze proeven.

Er wordt uitgegaan van het volgende verloop van de groutleiding: De grout stroomt 10 m door een horizontale slang (of leiding). De grout stroomt 4 m vertikaal omhoog.

Er volgt bij een stroomsnelheid van 0,1 m/s een stromingsweerstand van $\tau = 102$ Pa. De berekende Coulombwrijving in een horizontale leiding is dan $\tau = 65$ Pa. Onderstaand zijn als voorbeeld de resultaten van de stromingsweerstandberekening gegeven.

Tabel 5.8 Voorbeeld resultaten weerstandsberekening groutleidingen

	dp/ds [kPa/m]	sectie	Drukval [kPa]
statische druk	-21	vertikaal	84
weerstand tgv stroming	- 4,1	horizontaal + vertikaal	57
Coulombwrijving	- 2,6	horizontaal	26
totaal			167

Uit deze voorbeeldberekening volgt dat de statische component het grootst is, gevolgd door stromingscomponent. De drukval t.g.v. de Coulombwrijving is het kleinst.

5.6.6 Gevolgtrekkingen drukvalberekening groutleidingen

Er worden directe reologische metingen van het wandwrijvingsfenomeen bij groutmortels aanbevolen. Dat kan in verschillende typen een rotoviscometers. Er is daarbij aandacht nodig voor de keuze van het meetelementen en interpretatie van de uitkomsten.

Door analyse van het gemeten debiet van de groutpompen en de drukval over de toevoerslangen in tunnelboorprojecten, in combinatie met monitoring van de reologische eigenschappen van de mortel en cementieuze dragervloeistof, kan bovenstaande theorie gevalideerd worden.

5.7 Conclusies en Aanbevelingen

5.7.1 Algemene conclusies

Het onderzoek heeft bijgedragen tot het vergroten van de kennis over de stromingseigenschappen van het grout en het begrip hoe de groutdrukverdeling tot stand komt. Het ontwikkelde rekenmodel voor de stroming in de staartspleet heeft bewezen goede mogelijkheden te bieden tot de berekening van groutdrukken in de staartspleet. Door de toegenomen kennis van de groutdrukverdeling is het nu mogelijk om te voorspellen hoe de drukverdeling zal zijn, afhankelijk van de verdeling van de groutinjectiepunten aan de TBM, het debiet door die punten en de eigenschappen van de grout. Zo kan er dus bewust worden gestreefd naar een drukverdeling die minimale grondvervormingen geeft, of minimale belasting op de lining

5.7.2 Conclusies deelaspecten

- Er is een groot verschil tussen de interne weerstand van de grout en de wrijving langs de vaste wanden.
- Bij samendrukking en het uittreden van vloeistof kan de stromingsweerstand flink toenemen. Vlak bij het samengedrukte grout zal een afschuifstroming optreden. De interne weerstand is daarbij bepalend voor de groutstroming.
- Bij groutmortel veranderen de eigenschappen van de grout maar weinig tijdens stroming.
- Uit de gemeten lage stromingsweerstand wordt geconcludeerd dat er een glijfilmpje ontstaat tussen de grout en de pijpwanden. Ook in de ruwe buis.
- Het is niet zo eenvoudig om de reologische eigenschappen op éénduidige wijze te bepalen.
- Voor de inwendige weerstand van mortel kunnen we uitgaan van eenvoudige, weliswaar grove en indicatieve, testen als de kegel van Abrams en Torvane testen. Het is echter beter genormaliseerde vane-rotoviscometertesten uit te voeren.
- Er worden goede resultaten verkregen met het groutstromingsmodel indien er uitgegaan wordt van een hoge wrijvingweerstand tussen de grond en grout welke gelijk is aan de interne weerstand van de grout.

Niet beantwoorde vragen op deelaspecten:

- De invloedsfactoren op de weerstand van de groutstroming langs de grond zijn onbekend. Uit de samendrukkingsproeven komen enkel indicatieve waarden.
- Er is geen goed protocol voor kleinschalige reologietesten opgesteld. Het oriënterende karakter van de fase 0 proeven is daar debet aan. Ervaring in vervolgprojecten moet leren wat het beste is.
- De reologische kenmerken van de groutstroming langs de grond, als functie van samendrukking en vloeistofverlies, zijn onvoldoende bekend. Er zijn twee alternatieven om betere gegevens te verkrijgen:
 1. Een systematisch onderzoek bestaande uit proevenseries waarin samendrukkingsproeven en reologische bepalingen gecombineerd worden.
 2. Stromingssimulatie: Er zouden in een vergelijkbare pijpopstelling als in het huidige programma, maar met nabootsing van een poreus zandpakket,

stromingsweerstand bepaald kunnen worden.

5.7.3 Aanbevelingen

- Een praktijkverificatie is nodig. Momenteel worden in een gecombineerd COB/Delft Cluster onderzoek groutdrukken gemeten bij de Sophia spoortunnel. Dit betreft conventionele groutmortel. Eveneens is er een Delft Cluster initiatieproject gaande met betrekking tot grouting bij de Groen Hart Tunnel. Voor een betere validatie van onze inzichten ten aanzien van het twee-componenten grout is een systematische analyse nodig van de Noordbuis van de Botlekspoortunnel.
- Modelleren van de transitie naar een opdrijvende tunnelling. Een conceptueel model voor het opdrijven is beschikbaar. Wat nog niet is bekend is, is hoe het verloop is van de druk in het tussengebied waar groutstroming en opdrijven de druk bepalen.
- Een modellering van het samendrukkingsfenomeen, de stromingsweerstand, met vloeistofverlies naar de grond, en incorporatie van deze modellering in het groutstromingsmodel.

Literatuur

- Banfill, P.F.G., 1981, A viscometric study of cement pastes containing superplasticizers with a note on experimental techniques, Magazine of Concrete Research, vol.33, no.144, pp.37-47.
- Banfill, P.F.G., 1990, The rheology of cement paste: progress since 1973, in: Properties of fresh concrete by H.J. Wierig, Chapman Hall.
- Banfill, P.F.G. and D.C. Saunders, 1981, On the viscometric examination of cement pastes, Cement and Concrete Research, vol.11, pp.363-370.
- Calloni, G., Antona P. and N. Moroni, 1999, A new rheological approach helps formulation of gas impermeable cement slurries, Cement and Concrete Research, vol.29, pp523-526.
- Hill, R. The mathematical theory of plasticity 1976
- NEN5905 Toeslagmaterialen voor beton zand en grind, 1ste druk nov., 1988.
- Pelova, G.I, 1996, BML-viscometer Measurements of rheological characteristics of fresh concrete: Preliminary experimental study, Progress in Concrete Research; Annual Report Delft University, vol.5.
- Princen, H.M., 1983, Rheology of foams and highly concentrated emulsions, Journal of Colloid and interface science, vol.91, no., pp160-175.
- Talmon A.M., Bezuijen A. Aanen L & W.H. van der Zon, 2001, Grout pressures around a tunnelling, proc. IS-Kyoto 2001 conference on Modern tunneling Science and Technology (in preparation).
- Tattersall, G.H., 1955, The rheology of Portland cement pastes, British Journal of Applied Physics, vol.6, no.5, pp.165-167.
- Tattersall, G.H., 1955, Structural breakdown of cement paste at constant rate of shear, Nature, vol.175, pp166-166
- Tattersall, G.H., 1982, Control of high workability concrete, Concrete, vol.16, no.3, pp.21-24.
- Tattersall, G.H. and P.F.G. Banfill, 1983, The Rheology of Fresh Concrete, Pitman.

Bijlage 2A: Meetresultaten twee componenten grout

Metingen uitgevoerd met fijn zand

Tabel 1.1 Resultaten drukproeven twee componenten grout met tijdsduur 1 minuut

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	1,4	1,6	(1)	0	0
1.04	4.1	1,8	(1)	2	4
1.38	7.6	1,8	(1)	3	6
1.70	7.4	1,7	(1)	4	8
2.07	7.8	2,2	(1)	4	8

Opmerking (1): filtercake is te dun om te meten.

Tabel 1.2 Resultaten drukproeven twee componenten grout met tijdsduur 5 minuten

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	10,4	1,8	(1)	5	10
1.04	13.1	1,8	10	6	12
1.38	14,8	1,95	11,5	8	16
1.70	15.4	1,7	11	9	18
2.07	17.8	2,2	12	10	20

Tabel 1.3 Resultaten drukproeven twee componenten grout met tijdsduur 10minuten

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	11,4	1,6	12,8	8	16
1.04	14,6	1,45	11,0	9	18
1.38	16	1,85	12,0	9	18
1.70	17.4	1,7	14,9	11	22
2.07	18.8	2,2	12,8	12	24

Tabel 1.4 Resultaten drukproeven twee componenten grout met tijdsduur 20 minuten

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	12,4	1,6	11	6	12
1.04	14.1	1,8	10,8	6	12
1.38	15,7	2,2	12,0	8	16
1.70	17.4	1,7	12,8	7	14
2.07	17.8	2,2	10,0	8	16

Metingen uitgevoerd met grof zand

Tabel 1.5 Resultaten drukproeven twee componenten grout met tijdsduur 1 minuut

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	5,1	1,6	(1)	1	2
1.04	14,1	1,8	5,2	4	8
1.38	18,6	1,9	9,4	6	12
1.70	20,4	2,0	12,9	11	22
2.07	22,0	2,05	13,0	13	26

Opmerking (1): filtercake is te dun om te meten.

Tabel 1.6 Resultaten drukproeven twee componenten grout met tijdsduur 5 minuten

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	12,4	3,0	13,9	8	16
1.04	24,8	1,75	14,9	12	24
1.38	26,8	2,06	12,0	13	26
1.70	28,4	2,1	16,8	14	28
2.07	30,1	2,05	13,9	14	28

Tabel 1.7 Resultaten drukproeven twee componenten grout met tijdsduur 10minuten

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	21,1	2,8	13,4	11	23
1.04	27,1	2,5	9,0	15	31
1.38	29,6	2,34	11,8	15	31
1.70	30,0	2,12	9,9	16	33
2.07	31,4	2,43	9,4	15	31

Tabel 1.8 Resultaten drukproeven twee componenten grout met tijdsduur 20 minuten

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	22,4	2,67	13	13	27
1.04	28,1	2,84	11,0	15	31
1.38	30,8	2,34	11,8	15	31
1.70	29,4	1,80	13,1	14	29
2.07	31,8	1,91	11,2	14	29

Bijlage 2B: Meetresultaten conventionele mortel

Metingen uitgevoerd met fijn zand

Tabel 2.1 Resultaten drukproeven conventionele grout met tijdsduur 10 minuut

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare mortel	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	9	0,9	(1)	3	6
1.04	8	1,0	(1)	4	8
1.38	15	0,8	(1)	10	20
1.70	22	1,0	(1)	11	22
2.07	26	1,0	(1)	13	26

Opmerking (1): filtercake is te hard om te meten.

Tabel 2.2 Resultaten drukproeven conventionele grout met tijdsduur 30 minuut

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare mortel	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	11	0,8	(1)	3	6
1.04	18	0,8	(1)	8	16
1.38	24	0,8	(1)	10	20
1.70	28	1,0	(1)	15	30
2.07	29	0,9	(1)	16	32

Tabel 2.3 Resultaten drukproeven conventionele grout met tijdsduur 90 minuut

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare mortel	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	13	0,9	(1)	14	28
1.04	29	0,8	(1)	15	30
1.38	38	0,8	(1)	17	34
1.70	41	(2)	(1)	21	42
2.07	40	(2)	(1)	20	40

Opmerking (2): er was niet meer voldoende grout boven de filtercake om een meting uit te voeren

Tabel 2.4 Resultaten drukproeven conventionele grout met tijdsduur 210 minuut

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare mortel	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	16	0,8	(1)	12	24
1.04	31	1,0	(1)	25	50
1.38	41	1,2	(1)	30	60
1.70	48	(2)	(1)	33	66
2.07	47	(2)	(1)	32	64

Metingen uitgevoerd met grof zand

Tabel 2.5 Resultaten drukproeven conventionele grout met tijdsduur 10 minuut

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	18	0,8	(1)	9	18
1.04	24	0,8	(1)	14	28
1.38	38	0,8	(1)	20	40
1.70	40	(2)	(1)	19	38
2.07	40	(2)	(1)	21	42

Opmerking (1): filtercake is te hard om te meten.

Opmerking (2): er was niet meer voldoende grout boven de filtercake om een meting uit te voeren

Tabel 2.6 Resultaten drukproeven conventionele grout met tijdsduur 30 minuut

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	36	(2)	(1)	22	44
1.04	40	(2)	(1)	23	46
1.38	49	(2)	(1)	35	70
1.70	52	(2)	(1)	34	68
2.07	53	(2)	(1)	35	70

Tabel 2.7 Resultaten drukproeven conventionele grout met tijdsduur 90 minuut

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	66	(2)	(1)	38	76
1.04	68	(2)	(1)	38	76
1.38	79	(2)	(1)	42	84
1.70	80	(2)	(1)	44	88
2.07	80	(2)	(1)	44	88

Tabel 2.8 Resultaten drukproeven conventionele grout met tijdsduur 210 minuut

Druk verschil Bar	uitgeperst volume [ml]	Gemeten zwichtspanning [N/m ²]		Cake dikte	
		Vloeibare grout	Filtercake	mm's	% t.o.v. dikte mortel
0.69	75	(2)	(1)	40	80
1.04	79	(2)	(1)	44	88
1.38	85	(2)	(1)	48	96
1.70	86	(2)	(1)	47	94
2.07	86	(2)	(1)	48	96

Bijlage 2C: Beschrijving Brookfield viscometer

Principe werking Brookfielviscometer:

Een Brookfield viscometer is een type rotatieviscometer waarbij een staaf of een schijf, van een bepaalde grootte, met een constante snelheid ronddraait in een vloeistof. Doordat de vloeistof een viscositeit bezit wordt een wrijvingskracht op de schijf uitgeoefend waardoor een torsie ontstaat. Door deze torsie te meten en relateren aan het schijfoppervlak en de rotatiesnelheid kan een afschuifspanning worden bepaald. Door deze afschuifspanning te meten, direct afleesbaar, bij verschillende rotatiesnelheden (afschuifsnellheden) kan een flowcurve worden bepaald. Uit deze flowcurve kan de viscositeit en de zwichtspanning worden bepaald.

In figuur 2c.1 is een afbeelding van de Brookfieldviscometer gegeven. In figuur 2c.2 is het afleesvenster te zien, waar de afschuifspanning (in Pa.s) wordt afgelezen.



Figuur 2c.1



Figuur 2c.2

Bijlage 2D: Beschrijving Filterpers

Beschrijving principe filterpers

De filterpers die bij de proeven werd gebruikt is een zogenaamde HPHT filterpress volgens API RP 13B-1 “Recommend Practice Standard Procedures for Field Testing Waterbased Drilling Fluids”.

het apparaat bestaat uit de volgende onderdelen:

Een stalen cilinder, figuur 2d.1, met aan de boven en onderkant een filtergaasje (250 μm). Zowel de boven als onderkant van de cilinder wordt afgesloten met een stalen deksel, waarin een gat zit waar een buisje op gemonteerd wordt. Aan zowel de boven als de onderkant wordt een ventiel bevestigd waar druk op gezet kan worden, hetzij met CO₂ patronen, hetzij met stikstof drukcilinders. De maximale druk die het apparaat kan hebben bedraagt ca. 100 atmosfeer (1500 psi). Door de cilinder in een mantel te plaatsen kan deze ook nog verwarmd worden (tot boven 100 °C).

Tijdens de metingen met grouts is geen gebruik gemaakt van de mogelijkheden voor verwarming, en is de druk d.m.v. CO₂ patronen opgelegd.



Figuur 2d.1



Figuur 2d.2

Bijlage 3A: Stromingsmodel verdeling stroming over staartspleet

De stroomsnelheden worden berekend in een coördinatensysteem dat meebeweegt met de TBM. De twee snelheidscomponenten in dit coördinatensysteem worden via een stroomfunctie f beschreven:

$$V_s = \frac{\partial f}{\partial n} \quad , \quad V_n = -\frac{\partial f}{\partial s}$$

Door deze definitie wordt automatisch aan de continuïteitsvergelijking voldaan (indien de spleethoogte h constant is, en het vloeistofverlies naar het grondpakket verwaarloosd wordt).

Aldus hoeven de afzonderlijke snelheidscomponenten niet berekend te worden, en volstaat het de stroomfunctie te berekenen. Voor de wrijving met de grond en de tunnelling is de snelheid t.o.v. de stilstaande lining en grond bepalend. De snelheidscomponenten t.o.v. deze lining en grond zijn:

$$U_s = V_s - v_t \quad , \quad U_n = V_n$$

De bewegingsvergelijkingen in s- en n-richting (in het meebewegende coördinatensysteem) zijn:

$$h \frac{\partial p}{\partial s} = -2t_s$$

$$h \frac{\partial p}{\partial n} = -2t_n + rg \sin q$$

Via kruisdifferentiatie wordt de drukterm geëlimineerd ($h=\text{constant}$):

$$\frac{\partial t_s}{\partial n} - \frac{\partial t_n}{\partial s} = 0$$

De wandschuifspanning wordt gemodelleerd m.b.v. een variabele maar isotrope (= in alle richtingen gelijk) viscositeit:

$$t_s = h \frac{12U_s}{h} \quad , \quad t_n = h \frac{12U_n}{h}$$

Substitutie van de stroomfunctie geeft:

$$t_s = h \frac{12}{h} \left(\frac{\partial f}{\partial n} - v_t \right) \quad , \quad t_n = -h \frac{12}{h} \frac{\partial f}{\partial s}$$

De schijnbare viscositeit wordt gegeven door:

$$h = \frac{t_y}{|U|} \frac{h}{12} + K \left(\frac{12|U|}{h} \right)^{n-1}$$

met:

$$|U| = \sqrt{(V_s - v_t)^2 + V_n^2}$$

Substitutie van de schuifspanningen in de resterende bewegingsvergelijking geeft:

$$\frac{\eta_h \frac{\eta f}{\eta s}}{\eta s} + \frac{\eta_h \frac{\eta f}{\eta n}}{\eta n} - v_t \frac{\eta h}{\eta n} = 0$$

Deze vergelijking wordt in een 2-D veld numeriek opgelost. De randvoorwaarden zijn schematisch weergegeven in figuur A1. De voorrand aansluitend aan de TBM: $\frac{\eta f}{\eta n} = 0$.

De injectie opening(en) bij de ‘borstelrand’ TBM: $\frac{\eta f}{\eta n} = u_{nozzle}$. De op te geven uitstroomsnelheid in de nozzle-instroomgridcel is in feite de uitstroomsnelheid welke bij de gegeven afmetingen van de instroomgridcel benodigd is om aan het opgegeven groutinjectiedebiet te voldoen. De symmetrielyn midden onder de tunnelbuis (of begrenzing van verzorgingsgebied nozzles): $\frac{\eta f}{\eta s} = 0$. De achterrand van het rekengebied ter hoogte van

eerder geplaatste tunnelling elementen: $\frac{\eta f}{\eta n} = v_t$

De lijnen van gelijke stroomfunctiewaarden zijn onder stationaire omstandigheden de stroomlijnen van het gegroute materiaal. De stroomlijnen zijn gedefinieerd t.o.v. de bewegende TBM. Tussen stroomlijnen is het debiet constant: dus bij verbreding van de afstand tussen de stroomlijnen wordt de stroomsnelheid lager.

Bijlage 3B: Berekening druk in staartspleet (dynamisch deel)

Druk in staartspleet

De druk wordt berekend aan de hand van een opgelegde druk aan de bovenzijde van de tunnel (buiten het gebied waar de instroming van de bovenste nozzle merkbaar is). Vanuit dit punt wordt via onderstaande vergelijkingen voor drukgradienten de druk t.g.v. de stroming in de staartspleet berekend.

$$\frac{dp}{ds} = \frac{2}{h} h \frac{12}{h} \left(-\frac{df}{dn} + v_t \right)$$

$$\frac{dp}{dn} = \frac{2}{h} h \frac{12}{h} \frac{df}{ds}$$

Bij de berekende drukken moet de statische groutdruk nog opgeteld worden. Deze druk moet tbv afstroming, van de fijnere deeltjes uit de cement, naar het grondpakket vergeleken worden met de waterdruk in de grond.

Bijlage 3C: Berekening verblijftijd Grout in staartspleet

Om de tijd verstreken sinds de injectie van de grout in de staartspleet te berekenen zou het tijdsverloop langs de stroomlijnen bepaald moeten worden.

Bij een expliciete numerieke methode levert dat grote moeilijkheden op bij aangrenzende verzorgingsgebieden als door asymmetrie van het stromingspatroon de verstreken tijd verschillend is. Dan moet namelijk heel precies bepaald worden uit welk verzorgingsgebied de stroming vandaan komt. Dat lukt niet goed door de grid-discretisatie.

Een andere methode is de tijd als een scalar door het stroomveld mee te laten stromen. Bij iedere iteratiestap van de rekenmethode wordt de tijd 1 tijdsstap ouder. De tijd bij injectie wordt op nul gesteld. De behoudsvergelijking voor de scalar (c) is:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial s} + \frac{\partial vc}{\partial n} = S$$

Met S is een bronterm, dimensie [c/s]. Hiermee wordt de toename van c met de tijd gemodelleerd.

Substitutie van de stroomfunctie geeft:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial n} \frac{\partial c}{\partial s} - \frac{\partial f}{\partial s} \frac{\partial c}{\partial n} = S$$

Deze vergelijking is gediscretiseerd als:

$$c_{ij\Delta t} = c_{ij} - \frac{\Delta t}{4\Delta s\Delta n} (f_{i,j+1} - f_{i,j-1})(c_{i+1,j} - c_{i-1,j}) + \frac{\Delta t}{4\Delta s\Delta n} (f_{i+1,j} - f_{i-1,j})(c_{i,j+1} - c_{i,j-1}) + S\Delta t$$

We nemen voor (c) de tijd (t). Dan is de bronterm S=1.

Op basis van het berekende stroomveld wordt in een afzonderlijk sheet de tijd berekend volgens:

$$t_{ij\Delta t} = t_{ij} - \frac{\Delta t}{4\Delta s\Delta n} (f_{i,j+1} - f_{i,j-1})(t_{i+1,j} - t_{i-1,j}) + \frac{\Delta t}{4\Delta s\Delta n} (f_{i+1,j} - f_{i-1,j})(t_{i,j+1} - t_{i,j-1}) + \Delta t$$

per iteratie neemt de tijd met 1 s toe dus: $\Delta t=1$

In de berekening wordt, tbv stabiliteit, t_{ij} een weinig gesmooth (met k=20 of zelf 100):

$$t_{ij} := \frac{k t_{ij} + t_{i-1,j} + t_{i+1,j} + t_{i,j-1} + t_{i,j+1}}{k + 4}$$

De randvoorwaarde bij de achterrand is:

$$\frac{\partial t}{\partial s} = \frac{1}{v_t}$$

Op de overige randen wordt een symmetrierandvoorwaarde opgelegd: $\frac{\partial t}{\partial n} = 0$.

Aangrenzend aan de achterrand van de TBM wordt opgelegd: $\frac{\partial t}{\partial s} = 0$

Met deze impliciete methode is een goede berekening van de tijd sinds injectie verkregen, welke bovendien redelijk stabiel is.

Bijlage 5: Handberekening tijdsduur stroming langs achterrand TBM

Laten we eens een bijzonder geval van de stromingsverdeling bekijken. De TBM beweegt voorwaarts met een snelheid van 0.001 m/s. Er zijn 100 rekenvakken langs de achterrand (gridafmetingen: lengte~ 0,3 m, breedte 0,3 m). Stel er is 1 injectiepunt bovenin. In het bovenste rekenpunt splitst de stroming zich in twee tegengestelde richtingen: links en rechtsom. Bovenin is de stroomsnelheid in dwarsrichting dan 0.05 m/s. De stroomsnelheid moet tot nul afnemen onderin. Het snelheidsverloop langs de achterrand is dan:

$$v = v_{\max} \left(1 - \frac{n}{p/2D}\right)$$

met, in dit rekenvoorbeeld: $v_{\max}=0,05$ m/s

De stroomtijd van de grout sinds injectie volgt uit de integraal:

$$t = \int_0^n \frac{1}{v} dn = \frac{D}{v_{\max}} \frac{p}{2} \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{n}{p/2D}}\right)$$

Voor karakteristieke posities langs de achterrand is de altijd stroomtijd sinds injectie gegeven in onderstaande tabel.

Tabel 5.5 Berekende stroomtijden bij achterrand TBM bij neerwaartse stroming over een breedte van 0,3 m

positie	n/D [-]	tijd [-]	tijd bij $v_{\max}=0,05$ m/s, $D=10$ m [s]
half 2	$\pi/8$	$0,45 D/v_{\max}$	90
3 uur	$\pi/4$	$1,1 D/v_{\max}$	220
half 5	$3\pi/8$	$2,2 D/v_{\max}$	440
half 6	$11\pi/24$	$3,9 D/v_{\max}$	780
6 uur	$\pi/2$	∞	∞

Uit bovenstaande tabel blijkt dat indien deze geconcentreerde dwarsstroming langs de achterrand daadwerkelijk optreedt, dit is ruim binnen de verwerkbare periode van het twee-componenten grout is. Er dient hierbij opgemerkt te worden dat door de drukopbouw er ook groutstroming in de naburige gridcellen op zal treden. Bovenstaande benadering is dus een extreem geval, dat niet zonder bijzondere ingrepen met het rekenmodel nagerekend kan worden.

Een andere bijzondere situatie is radiale uitstroming uit het injectiepunt. Dit treedt enkel bij een Newtonse vloeistof op (d.i. zonder zwichtspanning, en met constante viscositeit). Bij radiale uitstroming vanuit het injectiepunt wordt de leeftijd van de grout gegeven door de volgende wiskundige relatie:

$$t = \int_0^r \frac{1}{v} dr = \frac{D}{v_t} \frac{1}{2} \left(\frac{r}{D}\right)^2, \text{ met } v = v_t \frac{D}{r}$$

In onderstaande tabel zijn de berekende stroomtijden gegeven:

Tabel 5.6 De berekende stroomtijden bij de achterrand van de TBM, radiale uitstroming

positie	r/D [-]	tijd [-]	tijd bij $v_{\max}=0,001$ m/s, $D=10$ m [s]
half 2	$\pi/8$	$0,076 D/v_t$	760
3 uur	$\pi/4$	$0,31 D/v_t$	3100
half 5	$3\pi/8$	$0,69 D/v_t$	6900
half 6	$11\pi/24$	$1,04 D/v_t$	10400
6 uur	$\pi/2$	∞	∞

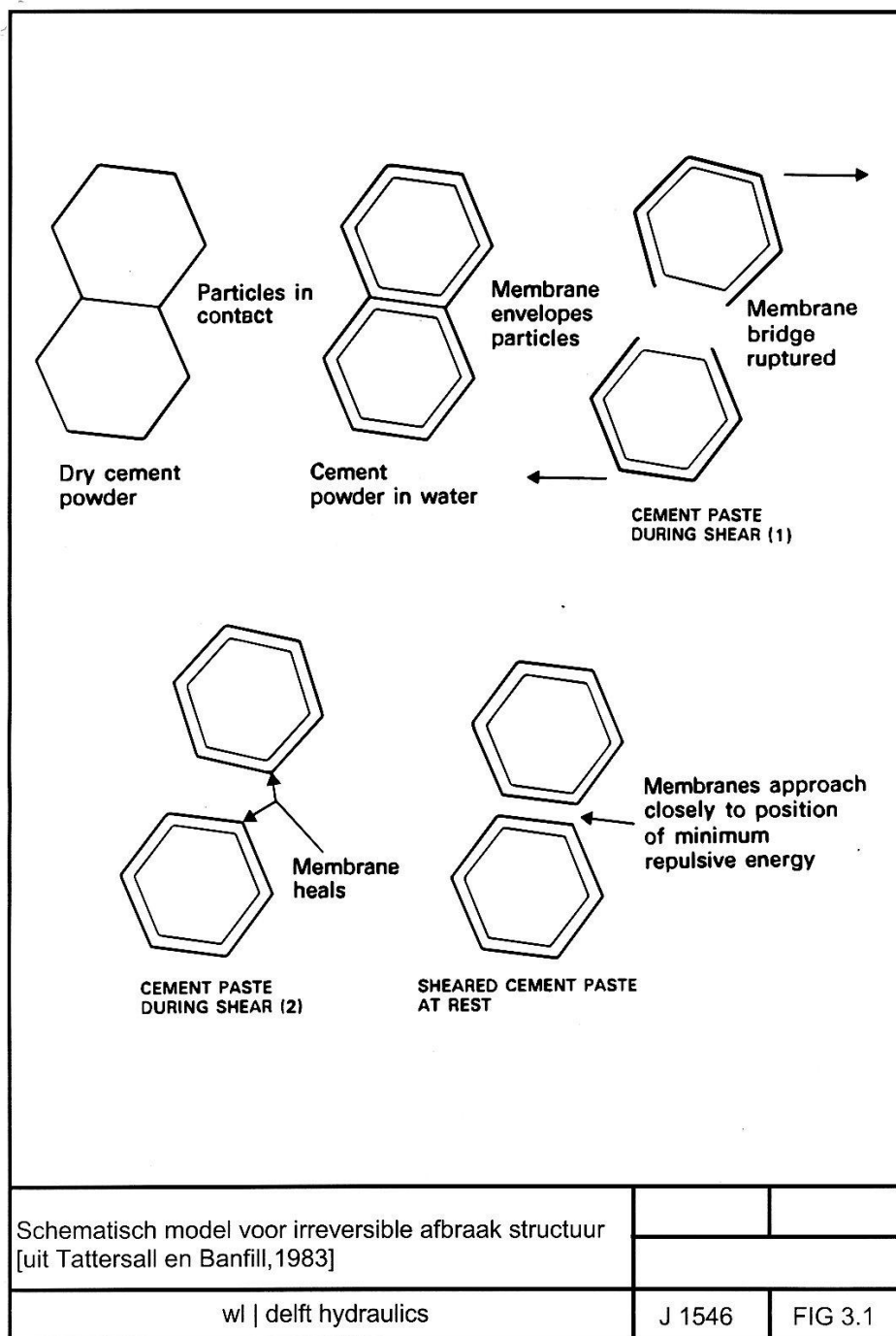
Dit is dus beduidend meer dan de verwerkbare periode van de grout. Een dergelijke radiale uitstroming kan dus niet bij twee-componenten grout optreden.

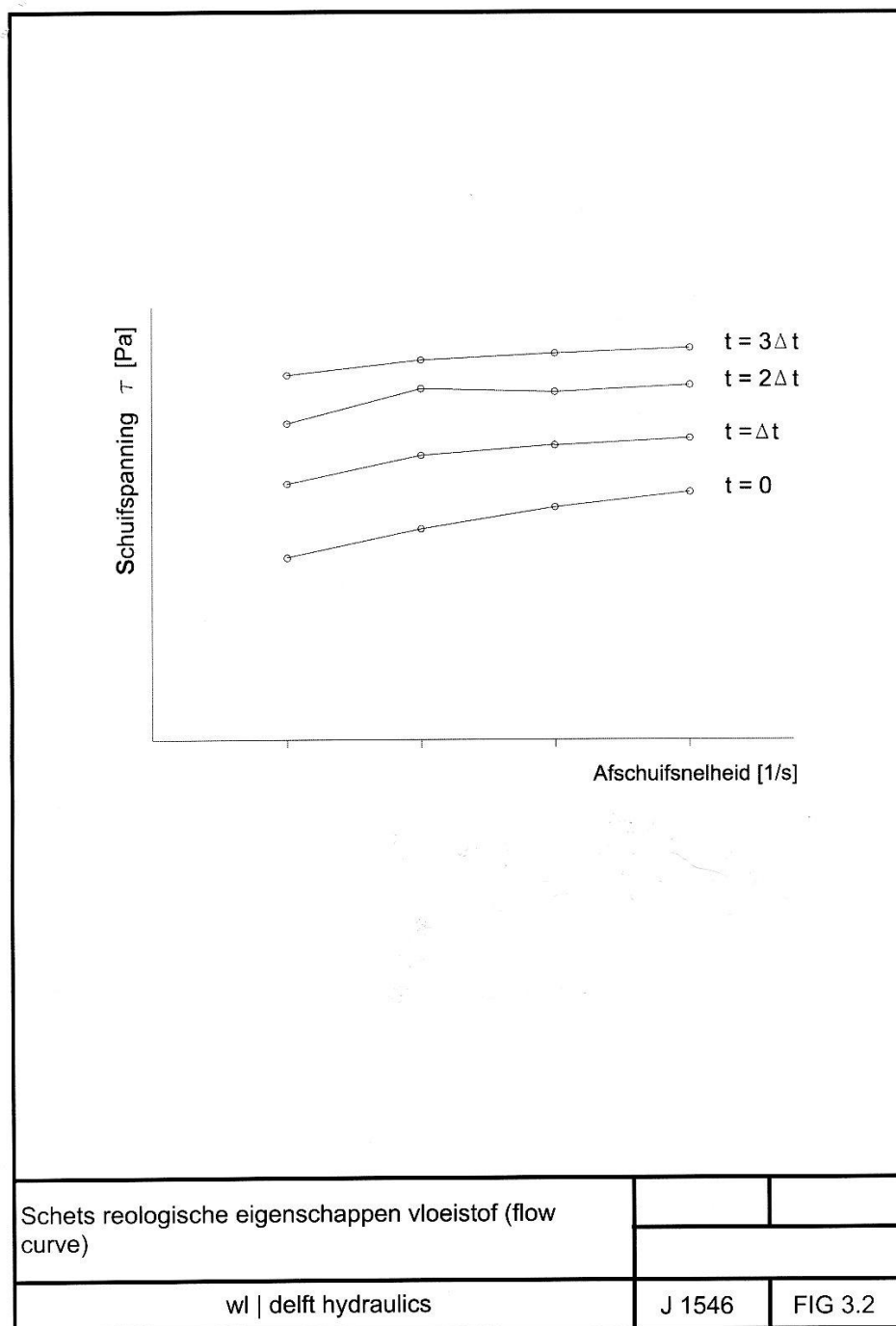
De werkelijke situatie ligt tussen beide beide handberekeningen in, maar zal gezien de lengte van de verwerkbare periode het meest overeenkomen met de situatie waarin de groutstroming in een smalle baan achter de TBM naar beneden stroomt.

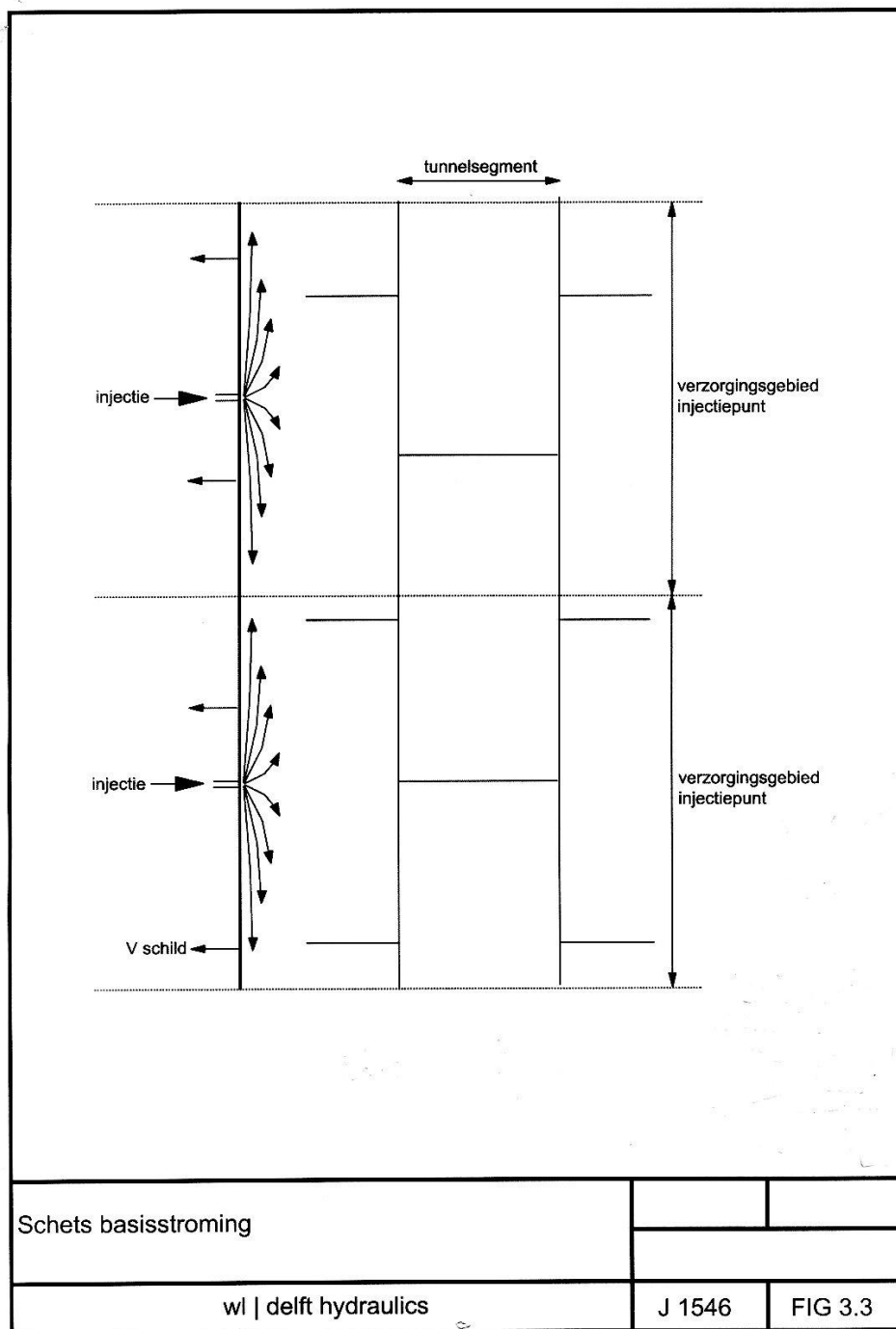
Vanuit aanvang van de groutinjectie kan dit goed verklaard worden. Bij aanvang bevindt er zich geharde grout in de staartspleet. Door de gecombineerde voortgangsbeweging, de samendrukbaarheid van de grout en groutinjectie wordt een smalle strook direct achter de TBM met verse grout gevuld. Immers de grout volgt de weg van de minste weerstand.

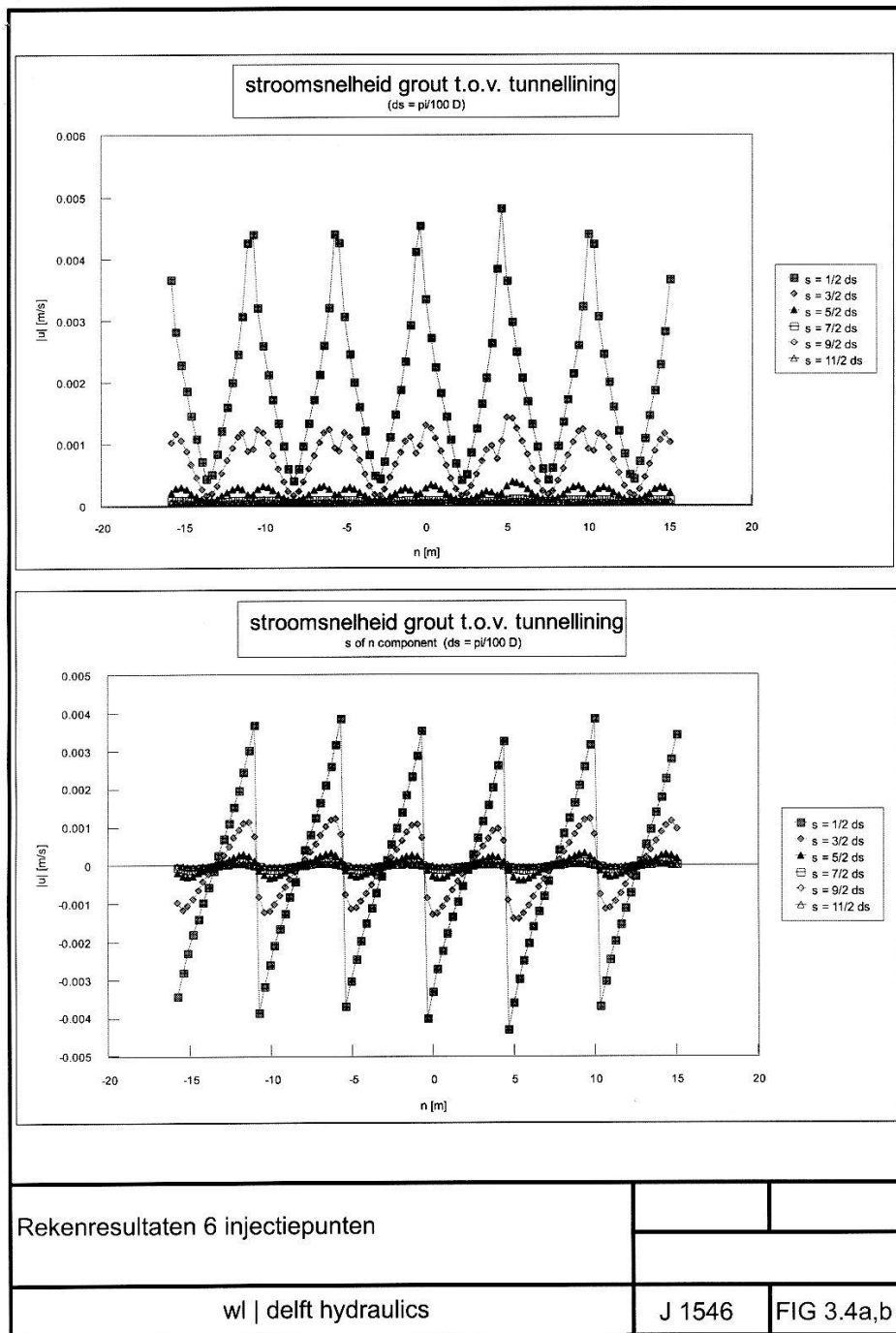
In het rekenmodel kan dit overigens gesimuleerd worden door een getruceerde simulatie van het opstarten van de groutinjectie. De leeftijd van de grout in de tweede rij gridpunten, en verder, wordt op +1 uur gesteld. Daardoor stroomt het in deze gridcellen niet meer, en kan er enkel nog een dwarsstroming direct langs de achterrand van de TBM optreden. Door de gebezigde discretisatie van het model zijn de uitkomsten van deze bijzondere getruceerde berekening ten gevolge van randeffecten echter onnauwkeurig. De berekende stroomsnelheden zijn te laag. Dit zou opgelost kunnen worden met een fijnere gridverdeling in het rekenmodel, echter in het spreadsheet is dit niet eenvoudig door te voeren.

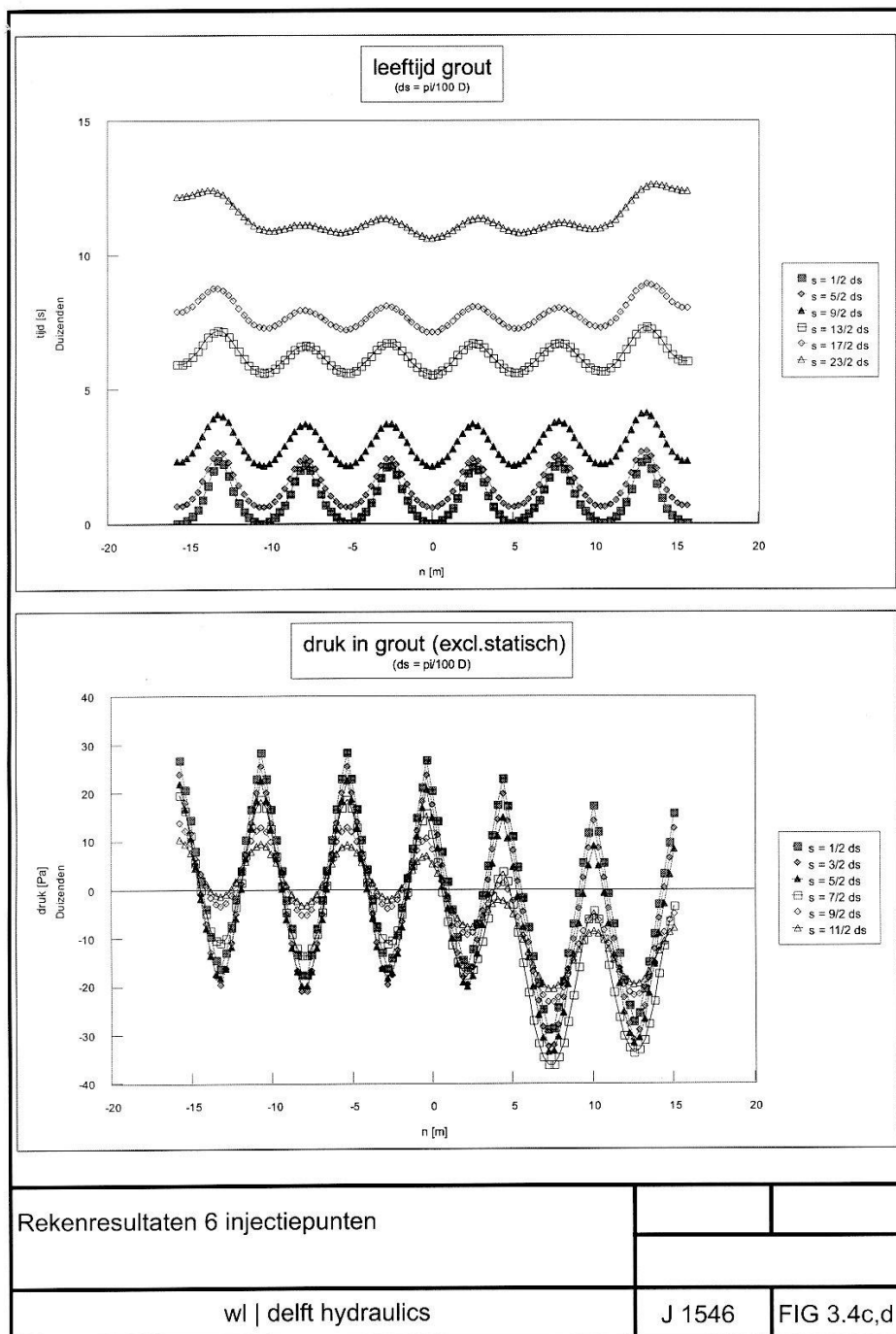
Figuren

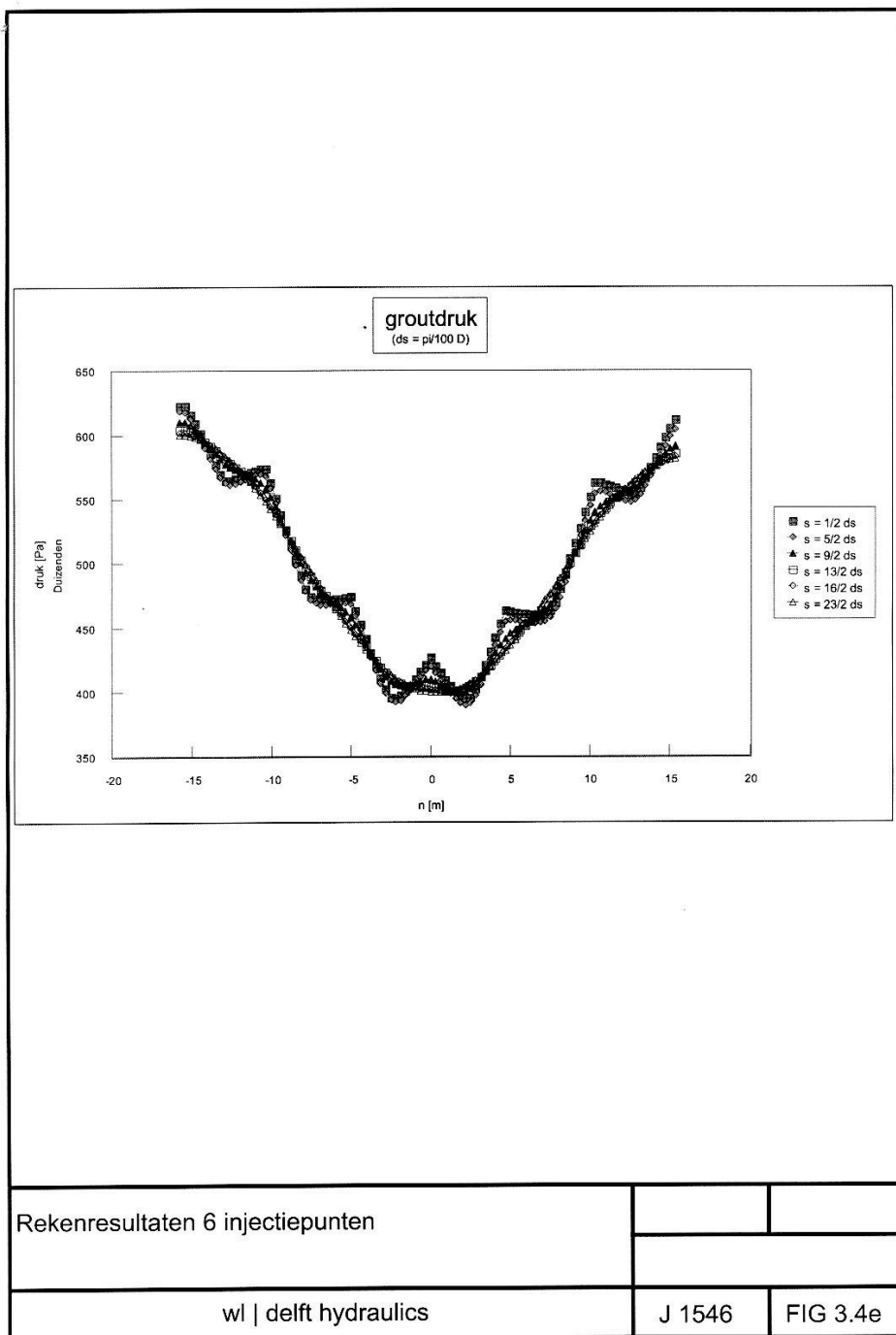


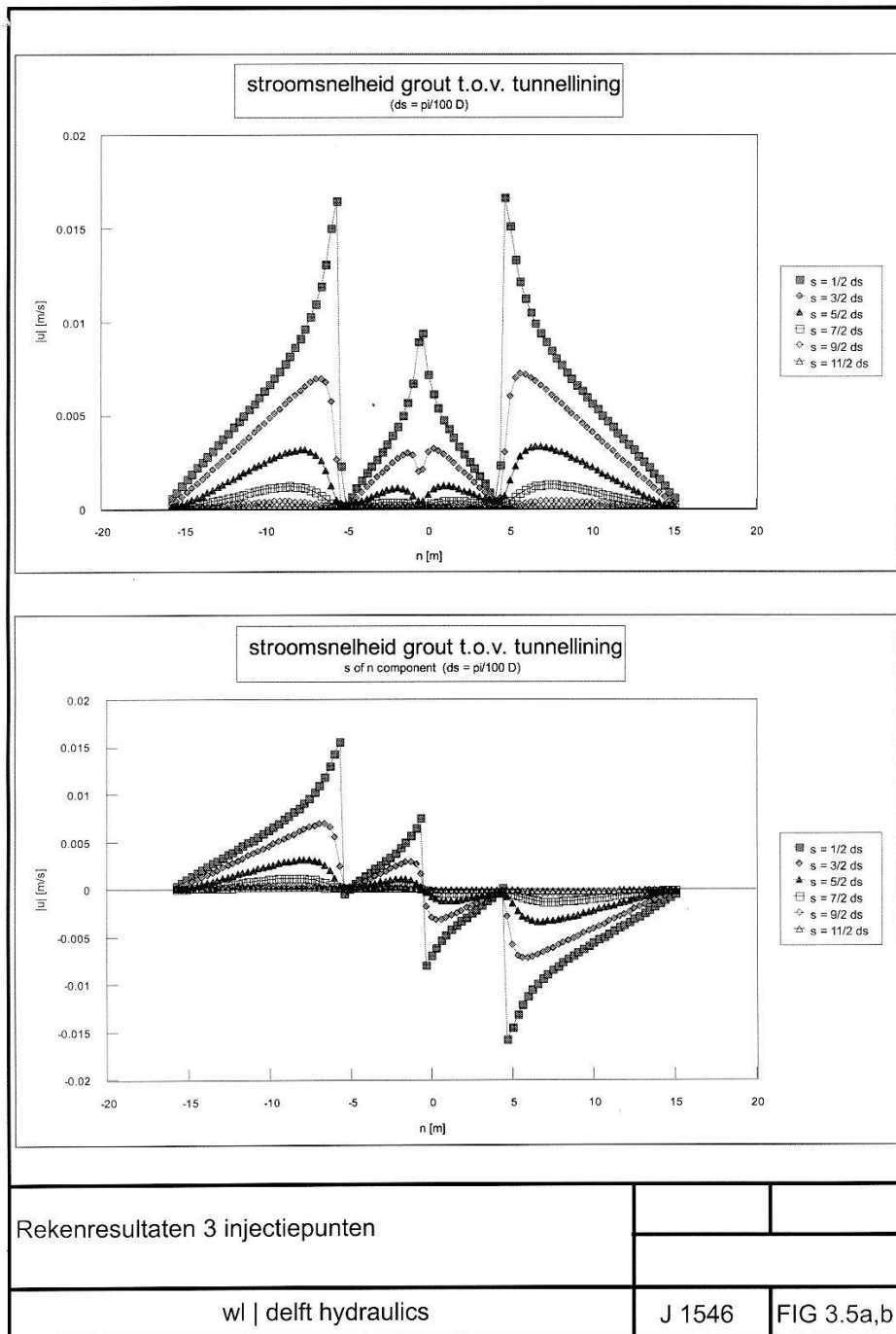


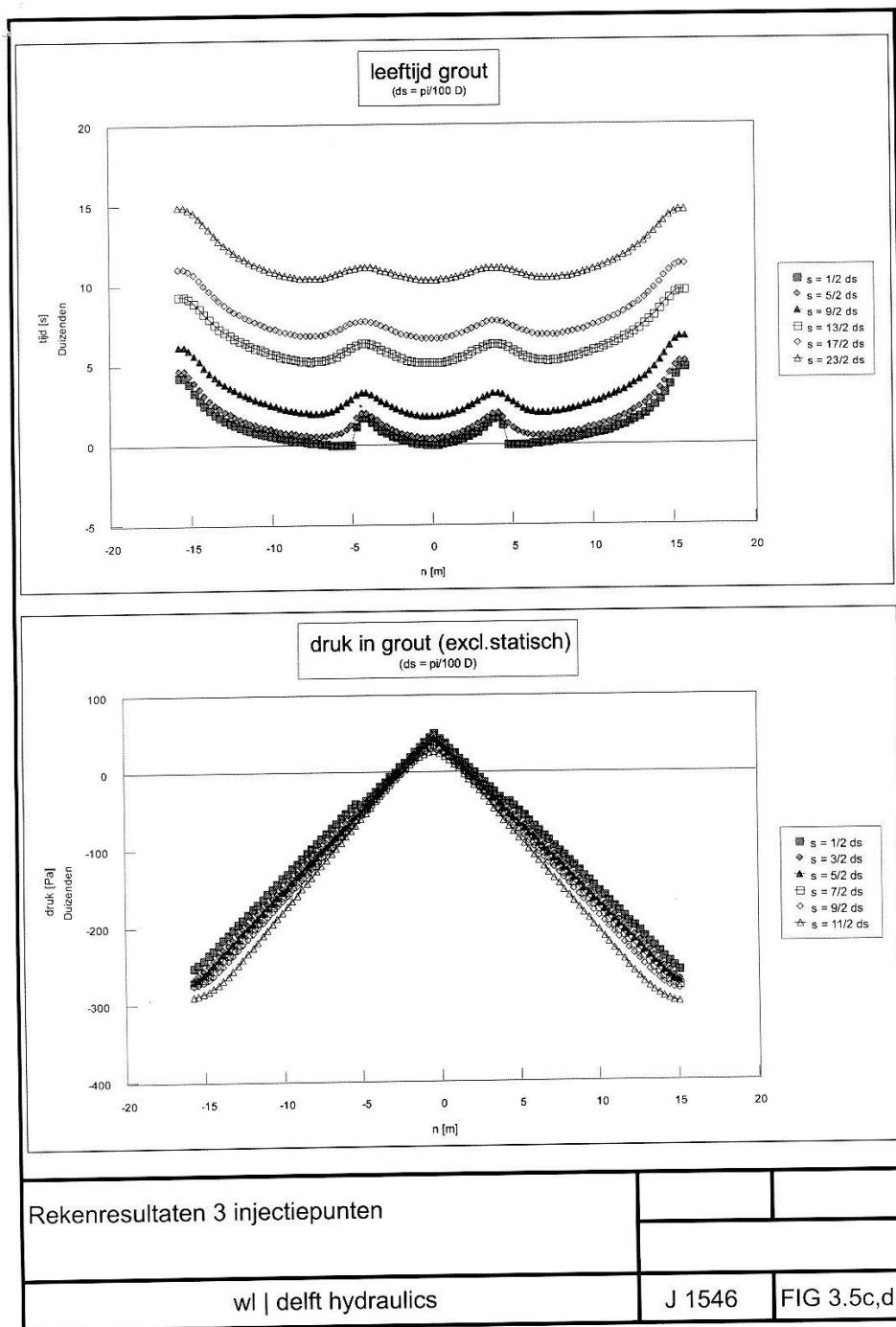


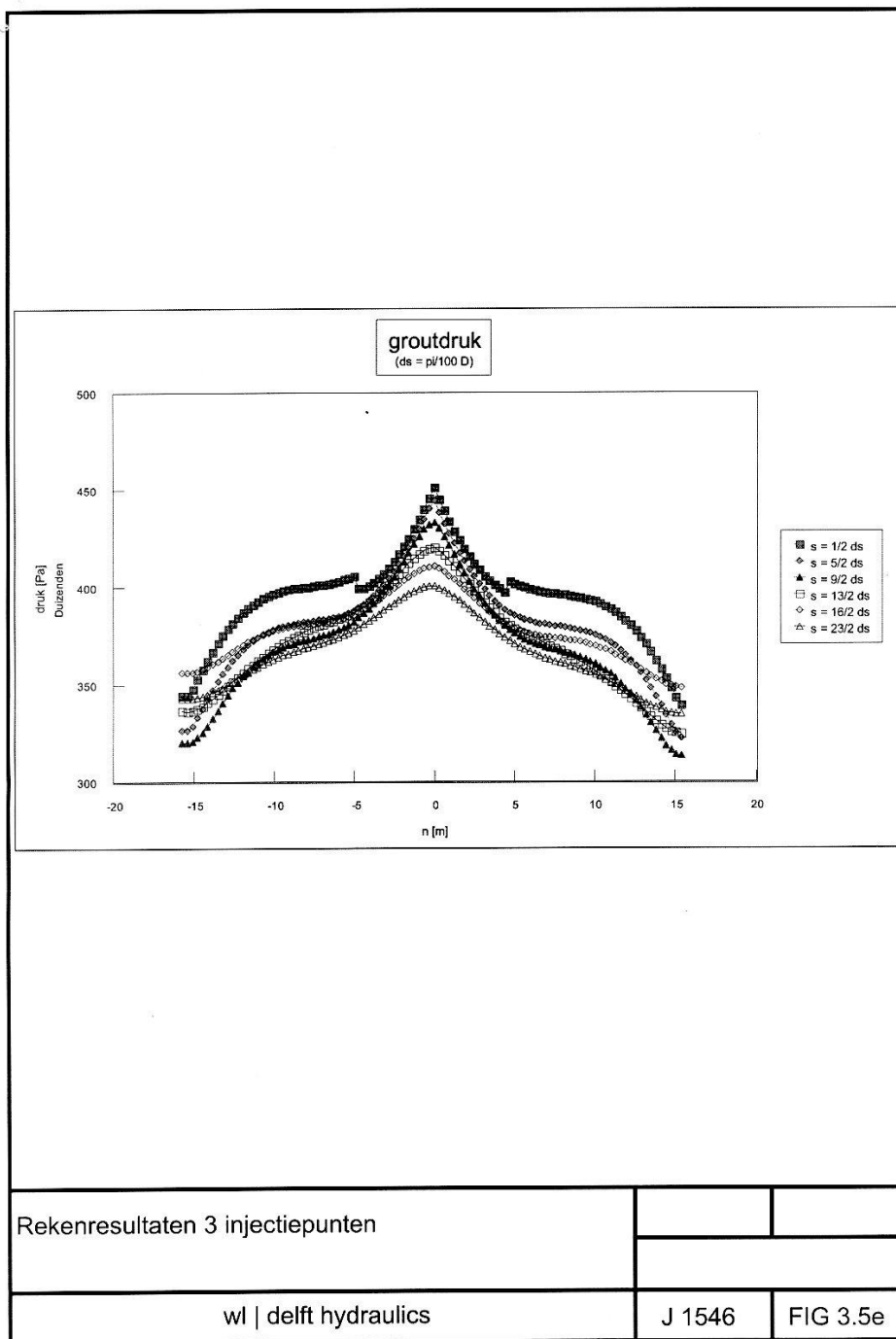












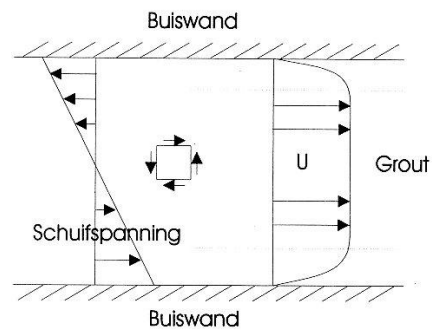


Fig 5.1 a

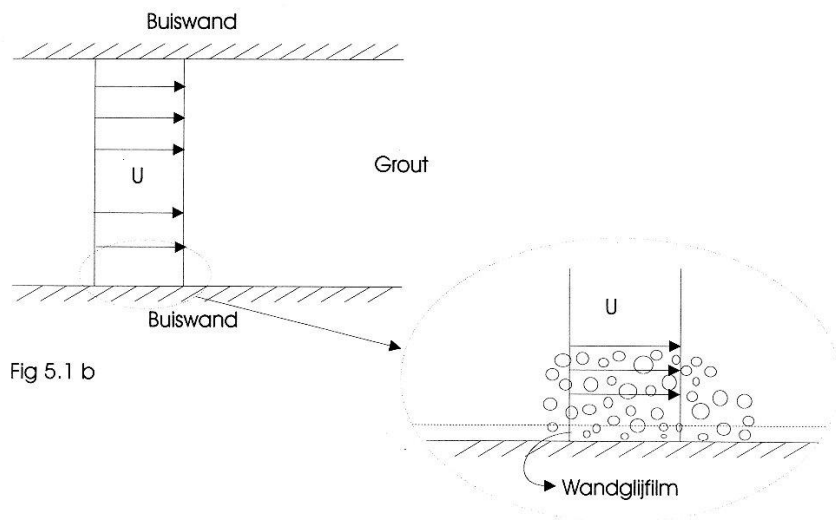


Fig 5.1 b

A Veronderstelde snelheidsverdeling buisstroming
B Geïnterpreteerde snelheidsverdeling buisstroming

WL | DELFT HYDRAULICS

Z-3047

Fig. 5.1a
Fig. 5.1b

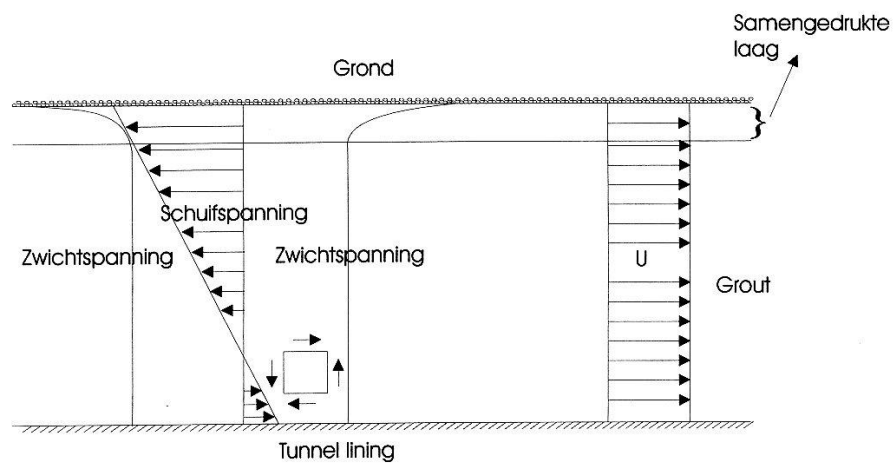


Fig 5.2

Gevolgen vloeistofverlies op de groutstroming		
WL DELFT HYDRAULICS	Z-3047	Fig. 5.2

