



Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat

Dienst Weg- en Waterbouwkunde



## Toegepast Geotextielonderzoek

AFGEHANDELD  
AFGEHANDELD

Filterwerking van geotextielconstructies

Meetverslag van modelonderzoek in de Golftunnel

Oktober 1994

	<b>bibliotheek</b> postbus 177 - 2600 MH Delft waterloopkundig laboratorium/WL
<b>BB</b>	<b>VERVALLEN</b> 63037
<b>WL</b>	
<b>EXPL</b>	 R0002318 <b>VERVALLEN</b>

## Toegepast Geotextielonderzoek

Filterwerking van geotextielconstructies



1. Rapport nr.	2. Serie nr.	3. Ontvanger catalogus nummer	
4. Titel en sub-titel  Toegepast geotextielonderzoek Filterwerking in geotextielconstructies		5. Datum rapport  Oktober 1994	6. Kode uitvoerende organisatie  H 2080
		8. Nr. rapport uitvoerende organisatie	
7. Schrijvers  H.J. van Wijhe		10. Projektnaam  Toegepast geotextielonderzoek	
9. Naam en adres opdrachtnemer  Waterloopkundig Laboratorium Voorsterweg 28, Marknesse Postbus 152 8300 AD Emmeloord		11. Kontraktnummer  DWW-890	
		13. Type rapport  Meetverslag golftunnelonderzoek	
12. Naam en adres opdrachtgever  Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044 2600 GA Delft		14. Kode andere opdrachtgever	
		15. Opmerkingen  Verplichtingnummer: 3100/1840 Projectleider opdrachtgever: Ir. E. Berendsen	
16. Referaat  In de golftunnel werden proeven uitgevoerd ten behoeve van de bepaling van ontwerprelaties voor geotextielen op fijn zand en klei, onder cyclische belasting. De proeven richtten zich op het verkrijgen van kwantitatieve informatie met betrekking tot de hydraulische belasting waarbij een geotextiel zijn beschermende functie tegen erosie nog vervult. Dit rapport geeft een verslag van de verrichte metingen en de belangrijkste uitkomsten.			
17. Trefwoorden  Geotextielen, filters, erosie		18. Distributie systeem	
19. Classificatie	20. Classificatie deze pagina	21. Aantal blz.	22. Prijs

# Inhoud

Lijst van tabellen  
Lijst van figuren  
Lijst van foto's  
Lijst van symbolen

	blz.
<b>1 Inleiding</b> . . . . .	1
1.1 Achtergrond . . . . .	1
1.2 Opdracht . . . . .	1
1.3 Doelstelling . . . . .	2
<b>2 Meetopstelling</b> . . . . .	3
2.1 Meetopstelling in de tunnel . . . . .	3
2.2 Materialen . . . . .	3
2.3 Meetopstelling voor proeven met steenslag . . . . .	4
2.4 Meetopstelling voor proeven met steenzetting . . . . .	5
<b>3 Proevenprogramma en proefverloop</b> . . . . .	6
3.1 Proevenprogramma . . . . .	6
3.2 Beschrijving proefseries . . . . .	6
<b>4 Meetresultaten</b> . . . . .	8

**Referenties**

**Tabellen**

**Figuren**

**Foto's**

## Lijst van tabellen

- 1 Index-testresultaten van de beproefde geotextielen
- 2 Overzicht van de uitgevoerde proeven
- 3 Overzicht van de bepaalde kritieke verhangen
- 4 Overzicht van de ijkcoëfficiënten
- 5 Overzicht van de uitgevoerde proeven ten behoeve van series I en II

## Lijst van figuren

- 1 Overzicht opstelling met steenslag in golftunnel
- 2 Overzicht opstelling met steenzetting in golftunnel
- 3 Detail van de opstelling met steenzetting
- 4 Meetregistratie proeven 101-104
- 5 Proef: 101, basis: klei, doek: F3S
- 6 Proef: 102, basis: klei, doek: S201-3
- 7 Proef: 103d, basis: klei, doek: F300
- 8 Proef: 104, basis: klei, doek: S351
- 9 Proef: 105, basis: klei, doek: NF180
- 10 Proef: 106, basis: klei, doek: R400/50
- 11 Proef: 107, basis: klei, doek: T600
- 12 Proef: 108, basis: klei, doek: S1004
- 13 Proef: 109, basis: zand, doek: F3S
- 14 Proef: 110, basis: zand, doek: S351
- 15 Proef: 111, basis: zand, doek: T600
- 16 Proef: 112, basis: zand, doek: S1004
- 17 Proef: 301, basis: klei, doek: S201, filter
- 18 Proef: 302, basis: klei, doek: NF180, filter
- 19 Proef: 303, basis: klei, doek: NF180
- 20 Proef: 401, basis: klei, doek: NF180 met geul
- 21 Proef: 403, basis: klei, doek: S201 met geul
- 22 Proef: 501d, basis: klei, doek: NF180 met 8.5 mm geul
- 23 Proef: 503-504, basis: klei, doek: NF180 met 8.5 mm geul
- 30 Steenslag korrelgrootte - verdelingskrommen
- 31 Steenslag korrelgrootte - verdelingskrommen
- 32 Steenslag korrelgrootte - verdelingskrommen
- 33 Steenslag korrelgrootte - verdelingskrommen
- 34 Korrelgrootte-verdeling, klei en classificatie driehoek

## Lijst van foto's

- 1 Modelsectie zoals gebruikt tijdens proef 303
- 2 Opgetreden erosie tijdens proef 303
- 3 Detail van de proefopstelling met een voorgevormde geul in de klei
- 4 Opgetreden erosie tijdens proef 404
- 5 Filterstenen met een diameter van ongeveer 8 mm
- 6 Filterstenen met een diameter van ongeveer 25 mm
- 7 Filterstenen met een diameter van ongeveer 65 mm
- 8 Filterstenen met een diameter van ongeveer 150 mm
- 9 Onderzijde van de steenzetting in de modelsectie
- 10 Opgetreden erosie tijdens proef 501 zonder vooraf gemaakte geul
- 11 Voorbeeld van een voorgevormde geul ten behoeve van de proeven 501 - 504
- 12 Opgetreden erosie tijdens proef 501D

## Lijst van symbolen

a	laminaire Forchheimer coëfficiënt in de filterdoorlatendheidsrelatie	(s/m)
$A_o$	orbitaal amplitude	(m)
A	doorstroom-oppervlak	(m <sup>2</sup> )
b	turbulente Forchheimer coëfficiënt in de filterdoorlatendheidsrelatie	(s/m) <sup>2</sup>
$B_g$	breedte van het geotextiel	(m)
C	concentratie	(g/l)
$D_{bx}$	korrelgrootte van het basismateriaal die door x% op basis van gewicht wordt onderschreden	(m)
$D_{fx}$	korrelgrootte van het filtermateriaal die door x% op basis van gewicht wordt onderschreden	(m)
g	versnelling door de zwaartekracht	(m/s <sup>2</sup> )
h	waterdiepte (in een open waterloop)	(m)
i	verhang in het filter	(-)
$i_{cr}$	kritieke verhang in het filter	(-)
$k_n$	geotextiel doorlatendheid uit $v_f = k_n i^m$	(m/s)
$K_g$	debiet dat stroomt door 1 m <sup>2</sup> van het geotextiel bij een verval van 100 mm	(l/m <sup>2</sup> /s)
$L_g$	lengte van het geotextiel	(m)
m	exponent in doorlatendheidsrelatie $v_f = k_n i^m$	(-)
$n_b$	porositeit van het basismateriaal	(-)
$n_f$	porositeit van het filter	(-)
$O_{90}$	karakteristieke openingsgrootte van het geotextiel	(m)
Q	debiet	(m <sup>3</sup> /s)
S	massatransport per m breedte	(g/s/m)
T	golfperiode	(s)
$T_g$	dikte van het geotextiel bij een druk van 2 Kn/m <sup>2</sup>	(mm)
$v_f$	filtersnelheid	(m/s)
$\bar{v}$	gemiddelde snelheid	(m/s)



# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Het onderzoeksproject geotextielen is voornamelijk gericht op het verkrijgen van meer inzicht in de factoren die een rol spelen bij de erosie-processen door een geotextiel. Deze erosie kan optreden onder invloed van stroming en golven. Speciale aandacht wordt besteed aan de ontwikkeling en de verificatie van ontwerpcriteria voor verschillende toepassingen van geotextielen.

In dit kader is door de werkgroep Waterbouw van de CUR onderzoekscommissie C80 de afgelopen jaren in samenwerking met de Dienst Weg- en Waterbouwkunde de beschikbare kennis op het gebied van de gebruikstoestand, het ontwerp, het beheer en de testmethoden van geotextielen in de waterbouw geïnventariseerd. De inventarisatiestudie werd in 1993 afgerond. De tweede fase van het project betreft onderzoek naar de in de inventarisatiestudie geconstateerde gebieden waar kennis ontbreekt. Eén van deze gebieden betreft de invloed die de dikte van geotextielen heeft op de filterwerking. De toepassing van geometrisch dichte geotextielconstructies, in het bijzonder voor wat betreft de toepassing op cohesieve gronden, lijkt nog een probleem. Het is niet altijd mogelijk aan de geometrische ontwerpisen te voldoen omdat dit zou resulteren in zeer dichte geotextielen. Zeer dichte geotextielen zijn namelijk gevoelig voor dichtslibben. Het ontwikkelen van geometrisch open ontwerpregels voor geotextielen op cohesieve gronden is daarom noodzakelijk.

Het toepassingsgebied van de tot nog toe opgestelde geometrisch open ontwerpcriteria voor geotextielen op klei en zand is beperkt. Uitbreiding van het toepassingsgebied van de open ontwerpcriteria kan bewerkstelligen dat de mate van acceptatie door degenen die met deze regels werken kan worden vergroot. Dit is van belang uit het oogpunt van kostenbesparingen. Immers, geometrisch open geotextielconstructies zijn vanuit productie- en uitvoeringstechnisch oogpunt goedkoper dan geometrisch dichte geotextielconstructies.

Vanuit de werkgroep waterbouw van de CUR C80 commissie en vanuit de Nederlandse afvaardiging van de CEN/TC 189 commissie is de wens naar voren gekomen de bovengenoemde problemen nader te onderzoeken.

## 1.2 Opdracht

De opdracht voor het uitvoeren van een studie naar de ontwerpcriteria voor geometrisch open geotextielconstructies werd verleend in een brief van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van het Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat met kenmerk WB/CX 943811. De overeenkomst tussen de Dienst Weg- en Waterbouw en WL (Waterloopkundig Laboratorium) heeft het nummer DWW-890 toegekend gekregen. De proeven zijn uitgevoerd in de periode van augustus tot oktober 1994. Van de zijde van de opdrachtgever is de studie begeleid door ir. E. Berendsen. Van WL-zijde is het project begeleid door G.M. Smith, M.Sc. terwijl de uitvoering werd verzorgd door ing. H.J. van Wijhe.

De beproefde geotextielen werden beschikbaar gesteld door Nicolon bv, Civiele Techniek Nederland en Robusta Technical Fabrics.

### 1.3 Doelstelling

De doelstelling van het project is tweeledig, namelijk:

- 1 het verkrijgen van inzicht in de invloed van ontwerptechnische aspecten op de (filter)werking van geotextielen;
- 2 het verbreden van het toepassingsgebied van de geometrisch-open ontwerprelaties voor geotextielen op fijn zand en klei.

Voor beide onderdelen richtte het onderzoek zich op het verkrijgen van kwantitatieve informatie met betrekking tot de hydraulische belasting waarbij een geotextiellaag op zand of klei onder de ontwerpomstandigheden nog juist zijn beschermende functie tegen erosie vervult. Het gedrag van de te onderzoeken geotextielen met betrekking tot erosie diende het inzicht in de relaties tussen de karakteristieke hydraulische belasting en het begin van transport voor verschillende ondergronden vergroten.

Ten behoeve van de eerste doelstelling werden acht verschillende geotextielen onderzocht. De keuze werd bepaald op grond van de karakteristieke openingsgrootte en de dikte van het geotextiel.

Ten behoeve van de tweede doelstelling werden er proeven uitgevoerd op twee grondsoorten, namelijk fijn zand en klei. Tevens werd voor enige proeven het effect van een initiële geul in de klei onderzocht. Bovendien werden vier sorteringen van steenslag en een steenzetting op het geotextiel beproefd. De verschillende filtersorteringen hebben als doel een definitief antwoord te geven of de korrelgrootte van het filter wel of geen invloed heeft op de kritieke snelheid. Tenslotte werden er vier proeven met een langere duur uitgevoerd om na te gaan of het verloop van het transport van basismateriaal, bij die belasting waarbij juist transport plaatsvond, in de tijd veranderde.

## 2 Meetopstelling

### 2.1 Meetopstelling in de tunnel

Alle proeven zijn in de golftunnel van WL uitgevoerd. In deze golftunnel kunnen proeven worden uitgevoerd onder invloed van regelmatige en onregelmatige golfcondities. De tunnel is uitgevoerd met een pomp die het mogelijk maakt een combinatie van golven en stroom op te wekken.

De meetopstelling is nagenoeg gelijk aan de opstelling die eerder werd gebruikt in het kader van het toegepaste geotextielonderzoek (Smith; 1994). Er werden twee meetopstellingen in de golftunnel gebruikt die onderling enigszins afweken. De overzichten van de meetopstellingen staan afgebeeld in Figuur 1 en 2. De meetopstelling die werd gebruikt tijdens proeven met steenslag staat afgebeeld in Figuur 1. Figuur 2 toont de opstelling tijdens proeven met steenzetting.

Gemeten werden: de watersnelheid, de drukken voor en achter de testsectie en de concentratie van het uitgespoelde basismateriaal aan de benedenstroomse kant van de testsectie. Tijdens proeven met steenzetting werd de druk onder het middenblok van de steenzetting aan weerszijden van het waterdichte schot gemeten. De posities van de drukopnemers worden in Figuur 2 aangegeven. De meetinstrumenten werden op dezelfde wijze ingebouwd als tijdens het in 1993 uitgevoerde onderzoek (Smith; 1994).

De drukken werden gemeten met drukopnemers (DRO's) met een bereik van -5 tot +5 m waterkolom (mwk). Hierin wordt 1 mwk goed benaderd met een druk van 10 kPa. De DRO's werden aan het valse dak vastgemaakt op ca. 0,1 m van de einden van de testsectie. Een overzicht van de verscheidene ijkcoëfficiënten wordt in Tabel 4 gegeven.

De concentratie van het uitgespoelde basismateriaal werd gemeten met een optische concentratiemeter (OpCon). Deze OpCon werd gemonteerd op ca. 0,75 m van de benedenstroomse kant van de testsectie, in de middellijn van de tunnel. Dit instrument kon ook in hoogte versteld worden van ca. 0,02 m tot ca. 0,15 m boven de valse bodem. De hoogte van de OpCon tijdens de proeven was 0,15 m. Dit instrument meet de intensiteit van een lichtstroom die uit één peilstift wordt gezonden en in een andere peilstift wordt ontvangen. Deze intensiteit wordt vertaald naar een elektrische spanning. De op een willekeurig tijdstip gemeten intensiteit wordt vergeleken met de intensiteit in schoon water om de concentratie te kunnen bepalen. De verhouding tussen de gemeten intensiteit (voltage) en concentratie is lineair. Echter, de richtingscoëfficiënt van de lijn is sterk afhankelijk van het materiaal in het water. Daarom moest de OpCon geijkt worden voor elk soort basismateriaal om de goede ijkcoëfficiënten te kunnen bepalen.

De stroomsnelheid van het water werd bepaald met behulp van een laser doppler snelheidsmeter. Alle signalen werden door een penschrijver als functie van de tijd vastgelegd.

### 2.2 Materialen

#### Filter

Er zijn vier filters beproefd. De kenmerkende korrelgroottes ( $D_{f50}$ ) waren 8, 22, 75 en 145 mm. Monsters van de gebruikte filterstenen worden in de foto's met nummers 5 tot en met 8 getoond.

## Steenzetting

De afmetingen van de steenzetting in de modelsectie staan afgebeeld in Figuur nr. 3. De onderzijde van de steenzetting wordt getoond in foto nummer 9.

## Geotextielen

De studie maakt gebruik van acht geotextielen (drie geweven en vijf niet-geweven). Voor elk geotextiel is een index-test uitgevoerd ter bepaling van de karakteristieke openingsgrootte ( $O_{90}$ ), de waterdoorlatendheid ( $K_g$ ) en de dikte ( $T_g$ ). Een overzicht van de geotextielen en hun eigenschappen staat in Tabel nr. 1.

De proefstukken hadden een lengte van 0.48 m en een breedte van 0.26 m. De randen werden afgeplakt om randerosie zoveel mogelijk te voorkomen. Het effectieve meetoppervlak bedroeg 0.42 bij 0.2 m<sup>2</sup>

## Basismateriaal

Er werden twee basismaterialen gebruikt, te weten klei en fijn zand. Het korrelverdelingsdiagram van de klei staat in Figuur 34 afgebeeld. Het gebruikte zand wordt gekarakteriseerd door een  $D_{10}$  van 52  $\mu\text{m}$ , een  $D_{50}$  van 70  $\mu\text{m}$  en een  $D_{90}$  van 80  $\mu\text{m}$ .

## 2.3 Meetopstelling met steenslag

De afmetingen van de meetsectie waren 0.50 m lang bij 0.25 m breed en 0.55 m hoog. De meetsectie bestond uit een laag basismateriaal (klei of zand) van 0.05 m dik. Op het basismateriaal werd het te beproeven geotextiel gelegd en rondom ingeklemd met behulp van een stalen raamwerk. Boven het geotextiel werd de modelsectie opgevuld met de betreffende steenslag. De modelsectie kon in zijn geheel in en uit de tunnel getild worden.

Zowel stationaire als cyclische stroming, of een combinatie ervan kunnen in de tunnel ingesteld worden. De stationaire stroming stroomt van links naar rechts op de tekening in Figuren 1 en 2. Links van de testsectie wordt hierna de "bovenstroomse" zijde en rechts de "benedenstroomse" zijde genoemd. De cyclische stroming werd opgewekt door het aandrijven van een ronde verticale hydraulische zuiger met een diameter van 1,0 m. Golfperiodes van 2 tot 14 s konden ingesteld worden.

Op vier lokaties in de tunnel werden pakketten opgestapelde pijpjes met een diameter van 32 mm aangebracht om grootschalige turbulentie te onderdrukken. Op deze wijze werd bereikt dat de stroming in de meetsectie horizontaal was. Drie van deze pakketten bevonden zich aan de bovenstroomse kant van de testsectie. Dit had tot doel de stroomlijnen rondom de snelheidsmeter zoveel mogelijk gelijk en horizontaal te verdelen over de meetsectie.

Ervaring uit eerder onderzoek in de golftunnel heeft geleerd dat wanneer er een grote weerstand in de tunnel aanwezig is een kleine zuigerslag al tot zeer hoge watersnelheden leidt. De tunnel is echter niet ontworpen voor gebruik met zeer kleine zuigerslagen. Dat heeft tot gevolg dat bij een zuigerslag van minder dan ca. 2 cm de zuigerbeweging (en dus ook het snelheidssignaal) niet langer zuiver is. In het onderhavige onderzoek moesten echter ook proeven met lage snelheden worden uitgevoerd. Hiertoe werd, wanneer dat noodzakelijk was,

een deel van de stroming onder de testsectie langs geleid, dit wordt verder de "by-pass" genoemd. Op deze manier kon meer water door een langere zuigerslag in beweging worden gebracht terwijl de snelheid in de meetsectie toch voldoende klein bleef.

De mate van deze onderstroming werd geregeld door middel van een verstelbare klep, die onder de testsectie ingebouwd werd. Deze klep kon de opening onder de testsectie regelen van 0 m, waarbij dus nagenoeg geen onderstroming plaatsvindt, tot ca. 0,1 m. Op deze manier kon de gewenste snelheid toch bereikt worden terwijl de zuigerslag groot genoeg bleef om een zuiver snelheidsprofiel te genereren.

## 2.4 Meetopstelling met steenzetting

Ten behoeve van de proeven met steenzetting werd de meetopstelling aangepast. Er werd een waterdicht schot geplaatst zoals aangegeven in Figuur 2. Dit schot dwong het water door de spleten van de steenzetting. Om het debiet dat door de steenzetting gaat voldoende nauwkeurig te kunnen bepalen werd aan de benedenstroomse kant een schot geplaatst met een cirkelvormig gat. De snelheid van het door het gat uittredende water kon direct achter het gat in het middelpunt worden bepaald met behulp van een Laser Doppler snelheidsmeter. Het drukverschil werd ook onder het blok gemeten. De positie van de drukopnemers is in fotonummer 9 te zien.

## 3 Proevenprogramma en proevenverloop

### 3.1 Proevenprogramma

Het proevenprogramma omvatte 23 proeven (zie Tabel 2). Alle proeven werden uitgevoerd met een cyclische periode van 4 s en een stationaire stroming. De stationaire stroming droeg er zorg voor dat het uitgespoelde materiaal uit de meetsectie naar de optische concentratiemeter werd getransporteerd. Een proef bestond uit het stap voor stap verhogen van de verhangamplitude totdat het begin van transport ( $S = 0.2 \text{ g/m/s}$ ) werd bereikt of totdat het maximaal instelbare verhang van 4 werd bereikt.

Nadat de bak met de meetsectie in de tunnel was geplaatst werd iedere proef als volgt uitgevoerd:

- een stationaire stroomsnelheid van 0,02 m/s werd ingesteld met uitzondering van de proeven met steenzetting: hier was de hoogst bereikbare stationaire stroomsnelheid 0.006 m/s,
- met deze snelheid werd voor de proef gedurende 30 tot 60 min. gestroomd totdat er geen verloop meer in het concentratiesignaal was,
- daarna werd de nulstand van de optische concentratiemeter (OpCon) ingesteld,
- een cyclische stroomcomponent met een periode van 4 s werd ingesteld, die een verhang van ca. 0,2 veroorzaakte,
- met deze cyclische component werd circa 5 minuten gestroomd,
- het verhang werd verhoogd in stappen van ca. 0,2 tot 0,4 tot een maximum van 4; bij elke stap werd 5 min. gestroomd, bovendien werd de meetsectie visueel geïnspecteerd met als doel het moment vast te stellen wanneer uitspoeling van basismateriaal zichtbaar werd,
- na het uitvoeren van de laatste stap werd gestopt met de cyclische stroming; daarna werd nog enkele minuten doorgestroomd met de stationaire component om ervoor te zorgen dat het nog troebele water weggevoerd werd tot voorbij de OpCon; daarna kon worden gecontroleerd of de OpCon terug op het nulpunt kwam,
- het water werd afgevoerd uit de golftank en de meetsectie werd verwijderd uit de tunnel,
- de steenslag en het geotextiel werden verwijderd uit de bak en het oppervlak van het basismateriaal werd gefotografeerd.

### 3.2 Beschrijving proevenseries

*series I en II: invloed van de geotextielparameters ( $O_{90}$  en  $T_g$ ) op klei en fijn zand*

Er werden in totaal twaalf proeven uitgevoerd om de invloed van de geotextielparameters op de kritieke belasting te bepalen. Omdat het niet mogelijk is om verschillende geotextielen te vinden waarbij alleen de  $O_{90}$  of alleen de  $T_g$  varieert terwijl de andere parameters onveranderd blijven, zijn deze proevenseries aan elkaar gekoppeld. Intervallen van de  $O_{90}$  en de  $T_g$  zijn gedefinieerd waarbinnen de invloed van de parameters als gering wordt beschouwd. Hiermee kunnen proeven worden gedefinieerd zodat de invloed van een verandering van één parameter tegelijk bekeken kan worden. De opzet van deze proevenseries is in tabel 5 gegeven.

Ter bepaling van de invloed van de dikte van het geotextiel kunnen de volgende proefresultaten worden vergeleken:

$O_{90} < 100 \mu\text{m}$  - proeven 101; 104; 107 en 108 op klei  
109; 110; 111 en 112 op fijn zand

$100 < O_{90} < 200 \mu\text{m}$  proeven 102 en 105

$300 < O_{90} < 400 \mu\text{m}$  proeven 103d en 106

Ter bepaling van de invloed van de  $O_{90}$  kunnen de volgende proefresultaten worden vergeleken:

$T_g \approx 1 \text{ mm}$  proeven 101; 105 en 103d

$T_g \approx 3 \text{ mm}$  proeven 104; 105 en 106

#### *serie III: invloed van korrelgrootte filtermateriaal ( $D_f$ )*

Proevenserie III is bedoeld om de invloed van de korrelgrootte van het filtermateriaal te bepalen. Het basismateriaal bestaat weer uit klei. In totaal bevat serie III drie proeven. Bovendien worden de resultaten van één proef van proevenserie I erbij betrokken.

De korrelgroottes ( $D_{f50}$ ) van het te beproeven filtermateriaal waren gesteld op 8, 22, 75 en 145 mm respectievelijk bij de proeven 301; 302; 105 en 303.

#### *serie IV: invloed van een geul onder stortsteen*

Proevenserie IV maakte gebruik van dezelfde proefopstelling als proevenseries I tot en met III. In het basismateriaal (klei) werd een initiële geul in de langsrichting aangebracht met een doorsnede van ca. 2 cm diep bij 10 cm breed (zie foto nr. 3). Er werden twee geotextielsoorten beproefd, te weten non-woven (S201) en een woven (NF180). De filterkorrelgrootte was 75 mm.

In totaal bevatte deze serie 4 proevennummers (401 tot en met 404) waaronder twee met een lange duur. Bij de "standaard" proef werd de belasting bepaald waarbij het begin van transport plaatsvindt. Bij de lange-duur proef werd deze belasting weer ingesteld en constant gehouden voor een bepaalde tijdsduur (denk aan één uur). Het verloop van het transport in de tijd werd dan gevolgd. De testsectie werd niet uitgebouwd tussen de standaard en lange-duur proeven.

#### *serie V: invloed van een steenzetting*

Deze proevenserie richtte zich op het meten van de erosie door een geotextiel dat zich onder een steenzetting bevond. In tegenstelling tot de andere proevenseries werd geen gebruik gemaakt van een filterlaag boven de steenzetting. In plaats daarvan werd de tunnel geblokkeerd zodat het water door de spleten in en onder de steenzetting moest stromen. Op deze manier kon de snelheid in de spleten worden ingesteld door een juiste keuze van de golfperiode en zuigerbeweging. Ook het drukverschil onder de zetting werd gemeten. In de analyse kunnen dus de gemeten waarden van snelheid en verhang onder de zetting worden vergeleken met de te verwachten waarden, op basis van de geultjestheorie.

Vier proeven werden uitgevoerd met twee geotextielen (proevennummers 501 tot en met 504), een woven (NF180) en een non-woven (S201). Net als bij proevenserie IV werd voor beide geotextielen een standaardproef en een lange-duur proef uitgevoerd.

## 4 Meetresultaten

Alle meetgegevens werden door middel van een 4 of 8-kanaalschrijver op meetpapier geregistreerd. De gewenste gegevens per proefstap waren de maximale amplitude van de cyclische filtersnelheid ( $v_f$ ), de maximale verhangamplitude over de meetsectie ( $i$ ) en de concentratie ( $C$ ) van het gesuspendeerde basismateriaal. Tijdens de proeven met steenzetting werd de druk aan weerszijden van het middelste blok bepaald. De afstand tussen de drukopnemers bedroeg 0.15 m. Het verhang werd berekend als het drukverschil over de meetsectie gedeeld door de lengte van de meetsectie. Het netto-transport van basismateriaal ( $S$ ) is uitgewerkt door de concentratie te vermenigvuldigen met de stationaire component van het debiet ( $Q$ ).

Een voorbeeld van een meetregistratie wordt in Figuur 4 gegeven. De eenheden op de registraties zijn uitgedrukt in voltages waarop de relevante ijkfactoren (zie Tabel 4) nog moeten worden verwerkt. De schaal van de registraties werd zodanig ingesteld dat elk signaal zo duidelijk mogelijk af te lezen was. Daarom werd de schaal van een signaal tijdens een proef wel eens veranderd. De schaal wordt aangegeven op de registraties als het aantal volts dat overeenkomt met een bepaalde papierbreedte.

De snelheid van het papiertransport in de schrijver was 5 mm/min gedurende de eerste paar minuten van elke proefstap en 200 mm/min gedurende de laatste paar minuten van elke stap.

### (Verschil)druk metingen

De registratie van DRO 1 - DRO 2 geeft de verschildruk aan over de meetsectie. De registratie van DRO 3 - DRO 4 toont de verschildruk over het blok in de steenzetting. Een positieve verschildruk komt overeen met een positieve snelheid; positief is hier een druk die op de bovenstroomse kant van de meetsectie hoger is dan de druk op de benedenstroomse kant.

### Filtersnelheidsmetingen

De filtersnelheid werd gemeten aan de bovenstroomse kant van de meetsectie in de tunnel tijdens de proeven met steenslagfilters. Bij sommige proeven werd opgemerkt dat de snelheidsmetingen niet symmetrisch waren: de negatieve snelheid was groter dan de positieve snelheid bij één ingesteld (symmetrisch) verhang. Dit werd geconstateerd over de gehele verticaal in de verkleinde tunnel op een afstand van 0.7 m tot de modelsectie. Omdat het vermoeden bestond dat de modelsectie de stroming beïnvloedde werd de afstand van de Laser Doppler snelheidsmeter tot de modelsectie vergroot tot 1.45 m. Aan de hand van debietberekeningen (gemiddelde gemeten watersnelheid maal het betreffende oppervlak) boven, in en onder de verkleinde tunnel en het bekende totale stationaire debiet dat ingesteld was werd geconstateerd dat beide debieten, namelijk: de totale berekende en het ingestelde min of meer met elkaar in overeenstemming waren.

Na afloop van iedere proef kwam de EMS steeds op nul terug, zodat er geen sprake was van een nulpuntsverschuiving tijdens de proef. Ter bevestiging van de berekeningen werd tijdens de proeven met het oog geconstateerd dat de kleideeltjes getransporteerd werden in de positieve richting.



Tijdens de proeven met steenzetting werd de stoomsnelheid, ter bepaling van het debiet onder de steenzetting op een afwijkende wijze bepaald. Hiertoe werd de benedenstroomse zijde van de modelsectie afgedicht. In deze afdichting werd een cirkelvormig gat gemaakt met een diameter van 0.0765 m.

Direct achter dit gat werd de stroomsnelheid bepaald.

Bij het uitwerken van de snelheidsmetingen is zowel de maximale positieve snelheid als de maximale negatieve snelheid beschouwd.

### Concentratie metingen

De OpCon-registratie was, in tegenstelling tot het snelheid- en verschildruksignaal, minder duidelijk af te lezen. Bij het begin van elke proefstap waarbij het verhang verhoogd werd, was er gedurende de eerste 1 à 2 minuten een sterke toename in het concentratiesignaal waar te nemen. Daarna nam dit signaal weer enigszins af, waarna het tamelijk constant bleef tot de volgende verhoging van het verhang. Tijdens de lange-duur proeven bleef het signaal eveneens nagenoeg constant. De reden van deze initiële stijging en daling van het OpCon-signaal was wellicht de uitspoeling van gemakkelijk erodeerbare deeltjes in de basis. Aangenomen werd dat het constante deel van het signaal het evenwicht-transport representeert van het basismateriaal onder de bijbehorende belasting.

Tijdens de proeven met steenzetting (501 - 504) werd visueel waargenomen dat het uitgespoelde basismateriaal zich gelijkmatig over de verticaal had verspreid voordat de concentratie werd gemeten.

### Berekening van het netto-transport

Tijdens de proeven werd de concentratie,  $C$ , gemeten in eenheden van g/l. Dit getal werd als volgt vertaald naar een transport per meter geotextiel breedte,  $S$ , in eenheden van g/s/m:

Tijdens elke proef werd een stationaire snelheid ingesteld (0.02 m/s of 0.006 m/s), die het netto transport langs de OpCon veroorzaakte. De doorstroomoppervlakte van de tunnel,  $A_T$ , was 0.15 m<sup>2</sup>. Verder was de effectieve breedte van het geotextiel  $B_g = 0,2$  m (de afgeplakte randen werden niet meegerekend). Met deze parameters konden de concentratiemetingen worden vertaald naar een transporthoeveelheid.

### Kritieke verhang bij het begin van transport

Voor elke proef werd het verhang bij elke stap getekend tegen het opgetreden transport op dubbel-logaritmisch papier (Figuren 5 t/m 23). Het kritieke verhang (dat bij een transport van 0,2 g/s/m hoort) werd voor elke proef van de grafiek afgelezen. Door het soms niet-symmetrische gedrag van de metingen vonden we vaak twee al dan niet parallel lopende lijnen op deze grafieken. In zo'n geval werd het minimale verhang bij een transport van 0,2 g/s/m genomen als het kritieke verhang. Deze waarden worden in Tabel 3 vermeld.

In het onderstaande zijn enige bijzonderheden opgenomen over proeven:

#### *proef 103*

Tijdens deze proef werden de snelheidsprofielen op twee afstanden tot de modelsectie nauwkeurig bepaald om de oorzaak van negatieve stroomsnelheden groter dan de positieve stroomsnelheden te achterhalen. Dit had te maken met secundaire circulatiepatronen, die tot stand kwamen door de by-pass. De by-pass creëert een pad dat een lagere weerstand dan het pad door de meetsectie. De grotere afstand tot de modelsectie leverde het verwachte resultaat op, namelijk een positief debiet dat overeenkwam met het door de zuiger geïnitieerde debiet. De uiteindelijke proef kreeg het nummer 103d.

#### *proef 301*

Tijdens de uitvoering van proef 302 bleek dat het niet mogelijk was om het kritieke verhang te bereiken. Om deze reden was het zinloos om de proef met een fijner filter uit te voeren met hetzelfde geotextiel (NF180). Er werd voor gekozen om proef 301 met het geotextiel S201-3 uit te voeren omdat het een non-woven geotextiel betrof dat reeds met twee filters onderzocht was (waarvan één in 1993).

#### *proef 501 - 502*

Tijdens de eerste poging het uittredende debiet te bepalen bleek er te veel verstoring te zijn. Dit werd verholpen door aan de benedenstroomse kant een waterdicht schot te plaatsen met een cirkelvormig gat erin. Het meten van de watersnelheid met de laser doppler snelheidsmeter direct achter dit gat bleek goed mogelijk.

De proef (501b) werd nu uitgevoerd en direct daarna de lange duurproef (502). De opgetreden erosie wordt getoond op fotopagina 10. Deze foto toont duidelijk dat er erosie heeft plaatsgevonden langs de randen en over het gehele oppervlak. Opmerkelijk waren de gevormde geultjes in het klei oppervlak.

Omdat proef 501b weinig transport te zien gaf werd besloten een voorgevormd geultje van 8.5 mm aan te brengen in de klei (zie fotopagina 11). Bovendien werd er extra afdichting tussen de zijden van de steenzetting en de wand van de modelsectie aangebracht zodat lekstromen tot een minimum gereduceerd waren. Zowel de korte als de lange duurproeven werden herhaald (proeven 501c en 501d)

#### *proef 503 - 504*

Deze proeven werden eveneens met een voorgevormd geultje uitgevoerd. Het is niet duidelijk of de erosie die werd geconstateerd was veroorzaakt door de rand of versneld door de rand. Mogelijk was het antwoord op deze vraag te geven indien de oppervlakte van de proefopstelling groter was geweest.

## Referenties

- 1 G.M. Smith (1994). Performancetesten op geotextielen onder cyclische belasting. WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM rapport H1834.

Geotextiel	Openingsgrootte	Doorlatendheid	Dikte
	$O_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )	$K_g$ ( $1/\text{m}^2/\text{s}$ )	$T_g$ (mm)
<b>WEEFSELS:</b>			
NF180	183	49	0.68
F300	334	120	0.55
R400/50	282	14	3.6
<b>NIET-GEWEVEN:</b>			
F3S	105	107	1.6
S201-3	130	172	2.7
S351	<64	98	3.6
T600	<64	55	5.4
S1004	<64	57	7.2

Tabel 1 Index-test resultaten van de beproefde geotextielen

Geotextiel		Filter D <sub>f50</sub>		Normale duur			Lange duur	
				Klei		Zand	Klei	
				Vlak	Geul	Steenz.	Vlak	Geul
F3S	75 mm	101			109			
S201-3	75 mm	102	403	503		404	504	
F300	75 mm	103d						
S351	75 mm	104			110			
NF180	75 mm	105	401	501		402	502	
R400/50	75 mm	106						
T600	75 mm	107			111			
S1004	75 mm	108			112			
S201-3	8 mm	301						
NF180	22 mm	302						
NF180	145 mm	303						

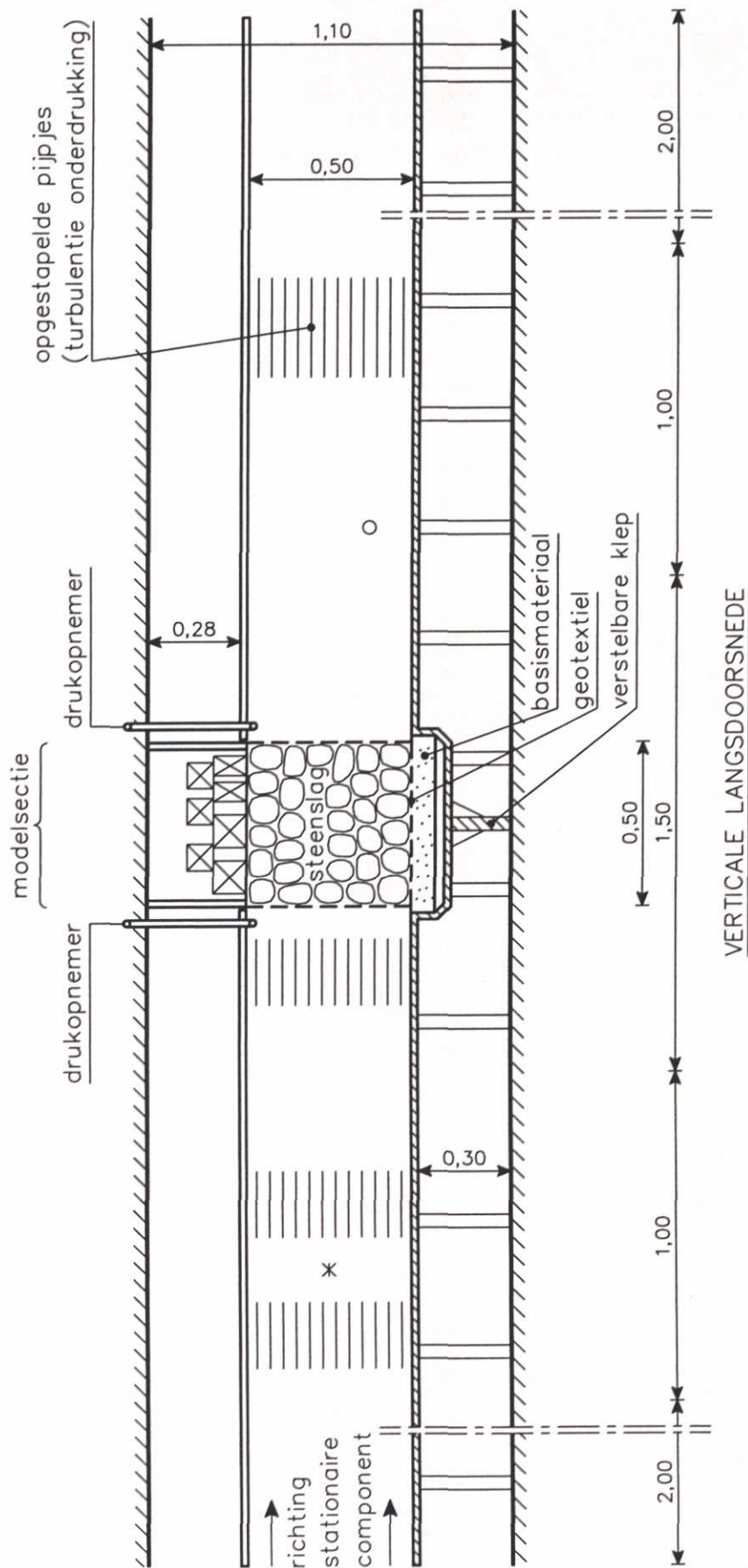
Tabel 2 Overzicht van de uitgevoerde proeven

proefnummer	geotextiel	basismateriaal	$i_{cr}$
101	F3S non-woven (nw)	klei	1.8
102	S201-3 (nw)	klei	2.2
103d	NF300 woven (w)	klei	1.5
104	S351 (nw)	klei	2.2
105	NF180 (w)	klei	2.6
106	R400/50 (w)	klei	1.0
107	T600 (nw)	klei	2.0
108	S1004 (nw)	klei	1.8
109	F3S (nw)	zand	0.7
110	S201-3 (nw)	zand	2.0
111	T600 (nw)	zand	2.5
112	S1004 (nw)	zand	2.0
301	S201-3 (nw) Filter 8 mm	klei	circa 6.5
302	NF180 (w) Filter 22 mm	klei	circa 6
303	NF180 (w) Filter 145 mm	klei	1.5
401/402	NF180 (w) vooraf geul in basis aangebracht	klei	0.8
403/404	S201-3 (nw) vooraf geul in basis aangebracht	klei	1.0
501d/502	NF 180 (w) steenzetting met 8.5 mm geul	klei	1.7
503/504	S201-3 (nw) steenzetting met 8.5 mm geul	klei	1.0

Tabel 3 Overzicht van de bepaalde kritieke verhangen

Instrument	IJKcoëfficiënt	
	Klei	Zand
Opcon	0.54 g/dm <sup>3</sup> /V	2.30 g/dm <sup>3</sup> /V
drukopnemer	5 kN/m <sup>2</sup> /V	
laser-doppler-snelheidsmeter	0.179 m/s/V	
zuigersnelheidsmeter	0.150 m/s/V	

Tabel 4 Overzicht van de ijkcoëfficiënten



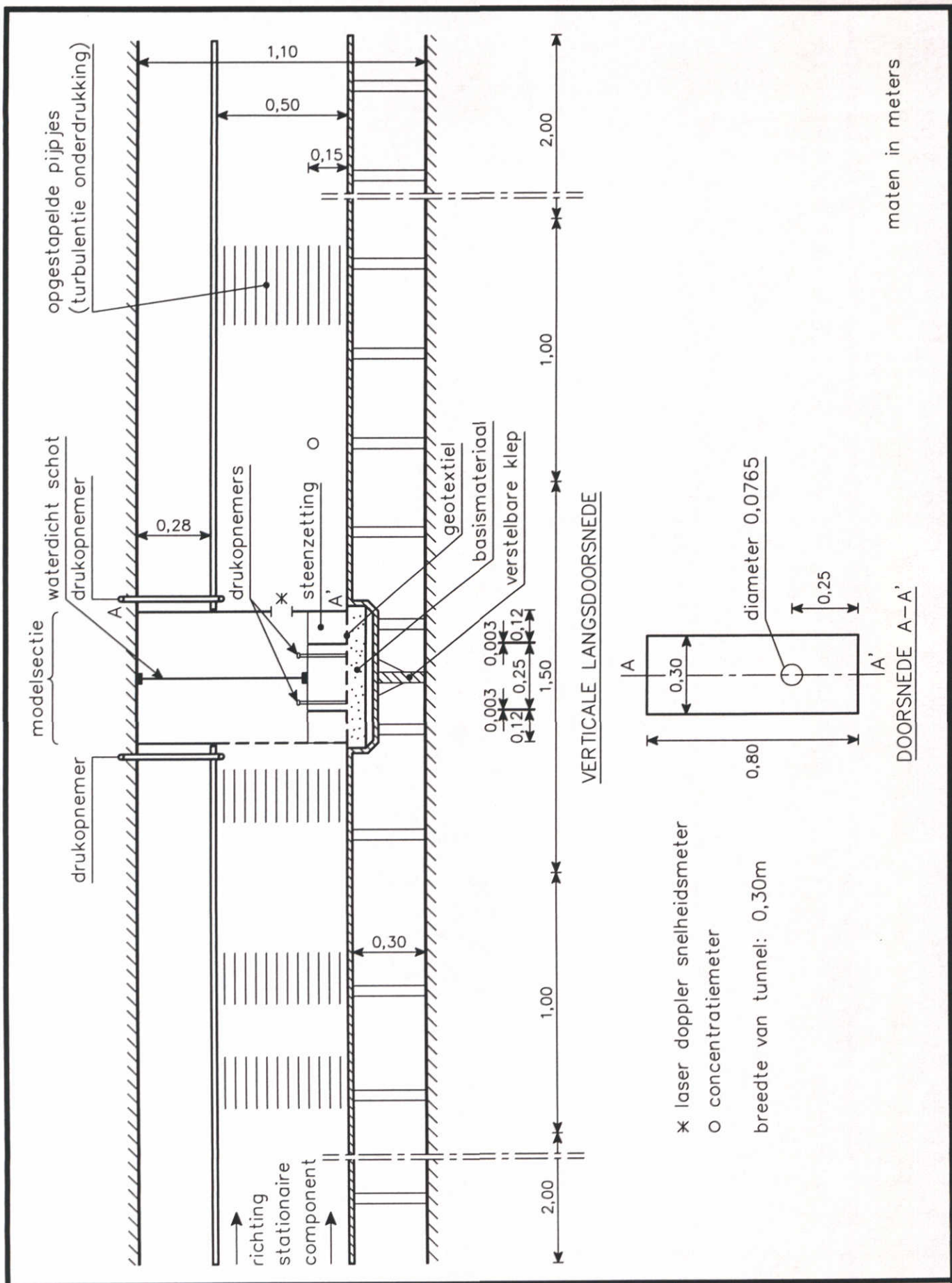
\* laser doppler snelheidsmeter  
 O concentratiemeter  
 breedte van tunnel: 0,30m

maten in meters

OVERZICHT OPSTELLING MET STEENSLAG  
IN GOLFTUNNEL

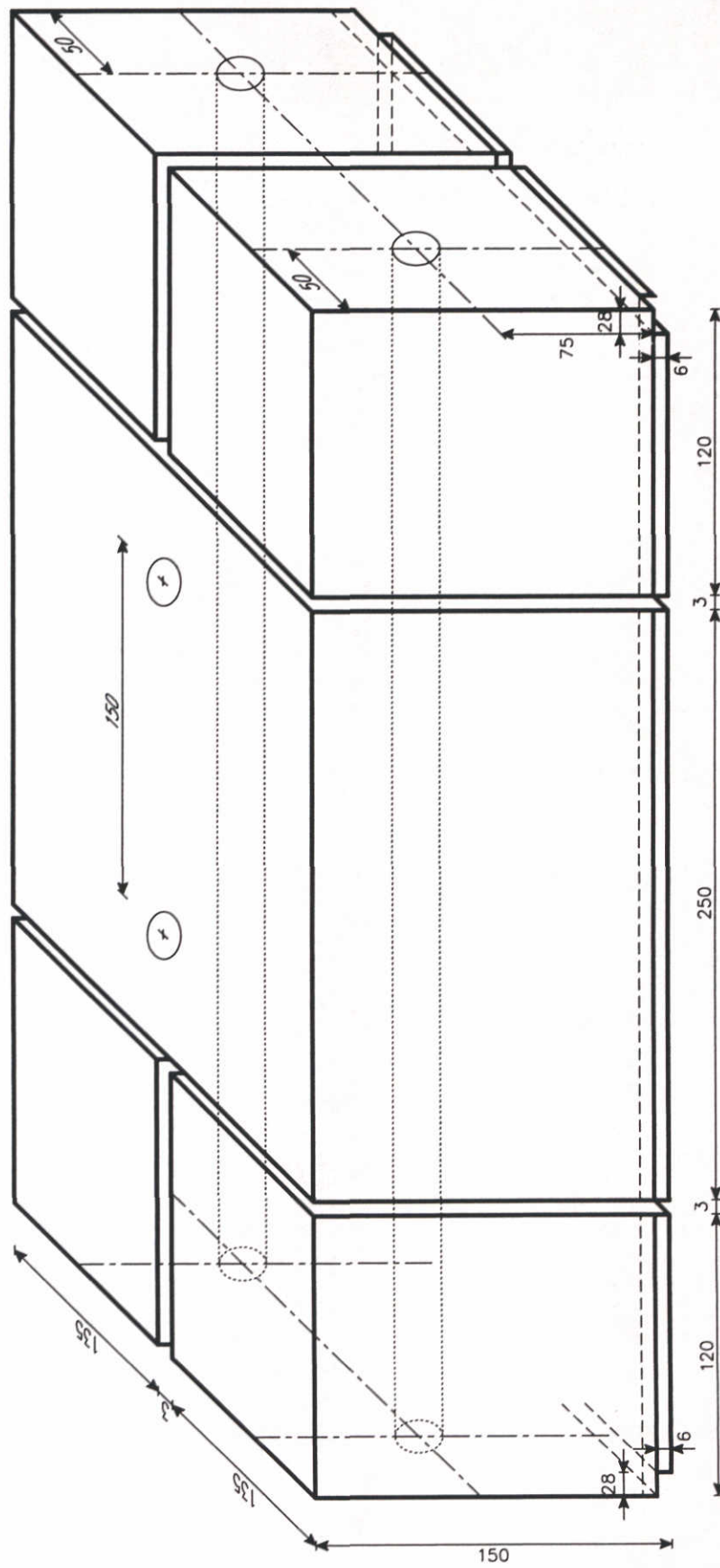
SCHAAL 1:20





OVERZICHT OPSTELLING MET STEENZETTING  
IN GOLFTUNNEL

SCHAAL 1:20



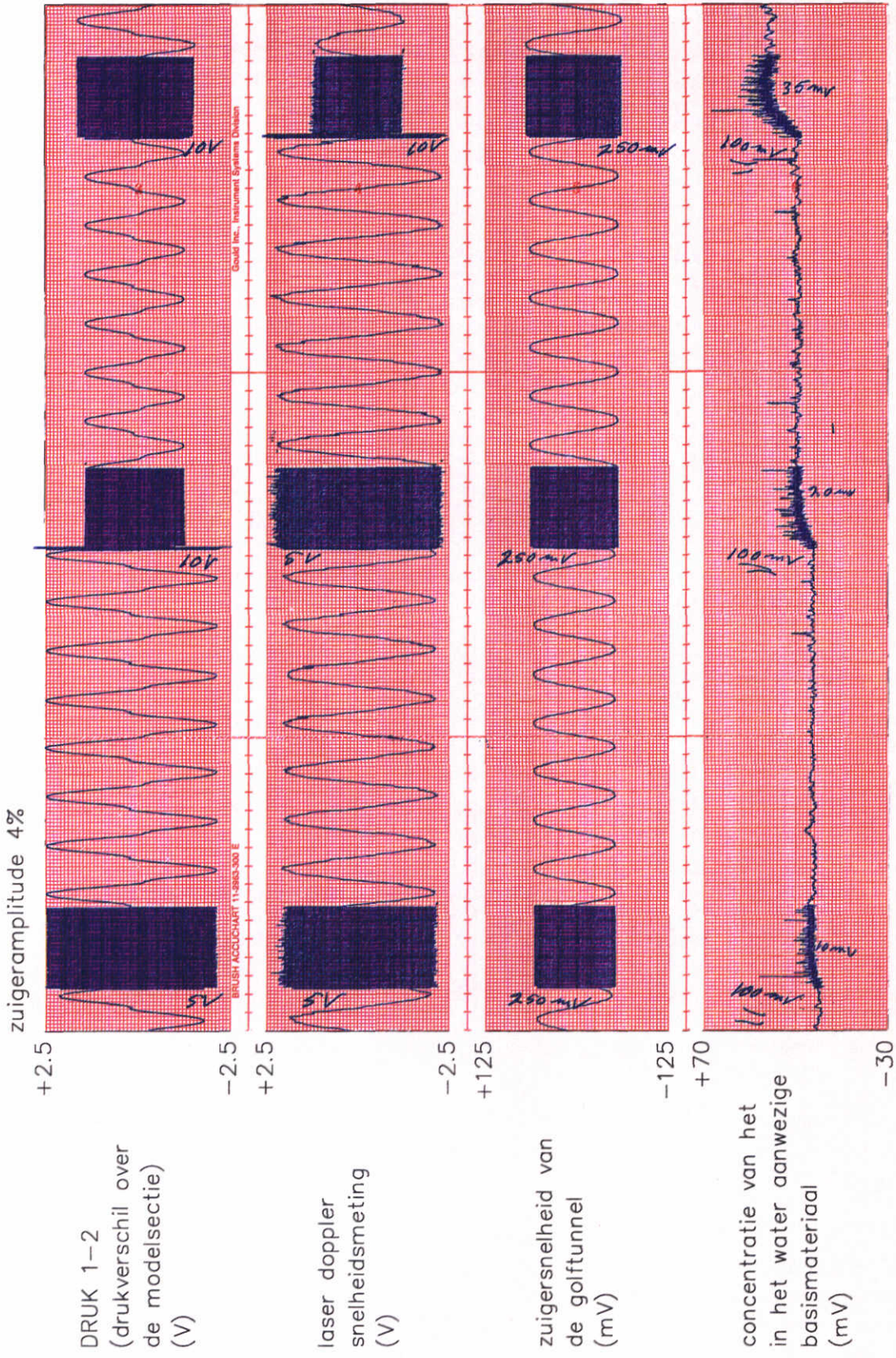
maten in mm

DETAIL VAN DE OPSTELLING MET STEENZETTING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 2080

FIG. 3



zuigeramplitude 4%

DRUK 1-2  
(drukverschil over  
de modelsectie)  
(V)

laser doppler  
snelheidsmeting  
(V)

zuigersnelheid van  
de golftunnel  
(mV)

concentratie van het  
in het water aanwezige  
basismateriaal  
(mV)

→ tijd

papiersnelheid :  
200mm/min : 10mm/min

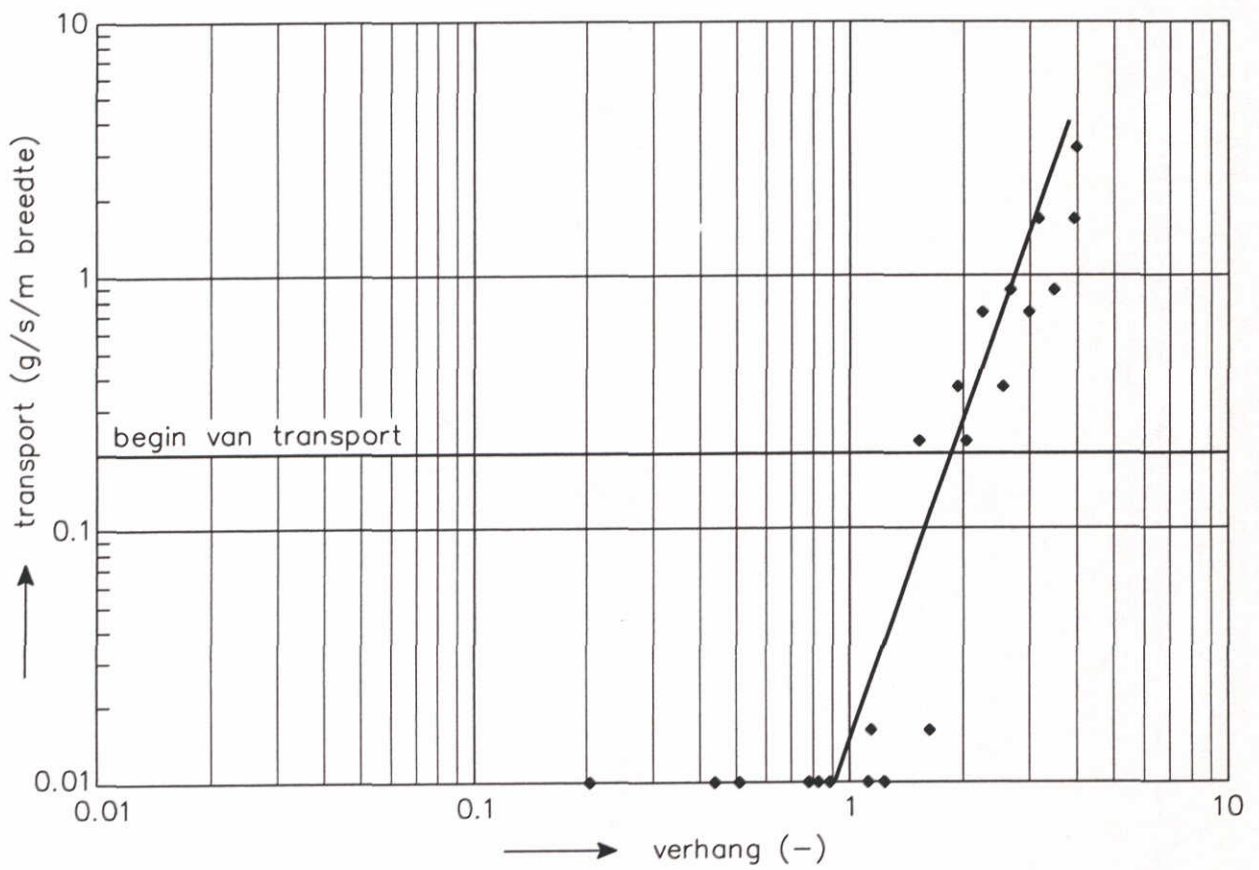
- ijking: druk 1 volt  $\cong$  5 kN/m<sup>2</sup>  
 i.d.s. 1 volt  $\cong$  0.179 m/s  
 zuigersnelheid 1 volt  $\cong$  0.150 m/s  
 concentratie (klei) 1 volt  $\cong$  0.54 g/L  
 concentratie (zand) 1 volt  $\cong$  2.30 g/L

MEETREGISTRATIE PROEVEN 101-404 (VOORBEELD)

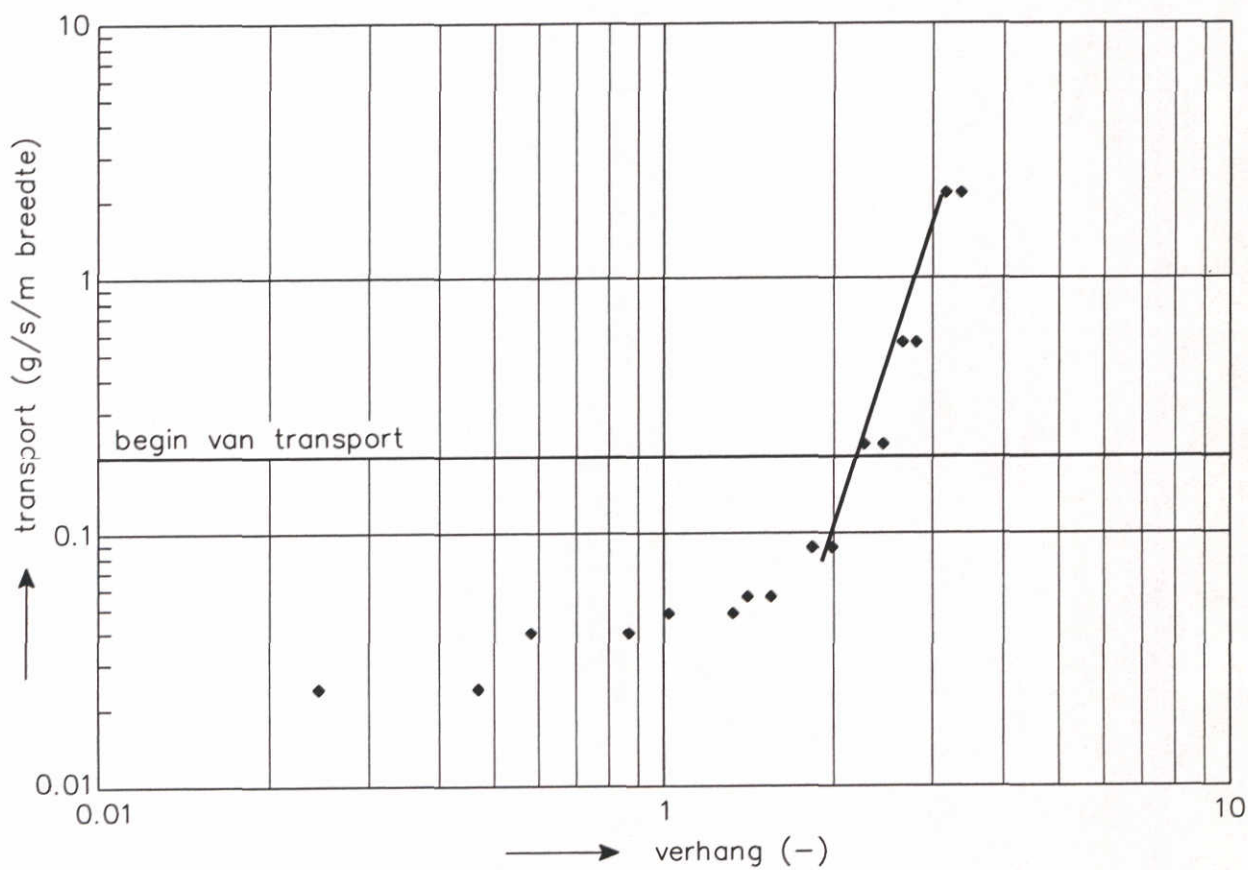
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 2080

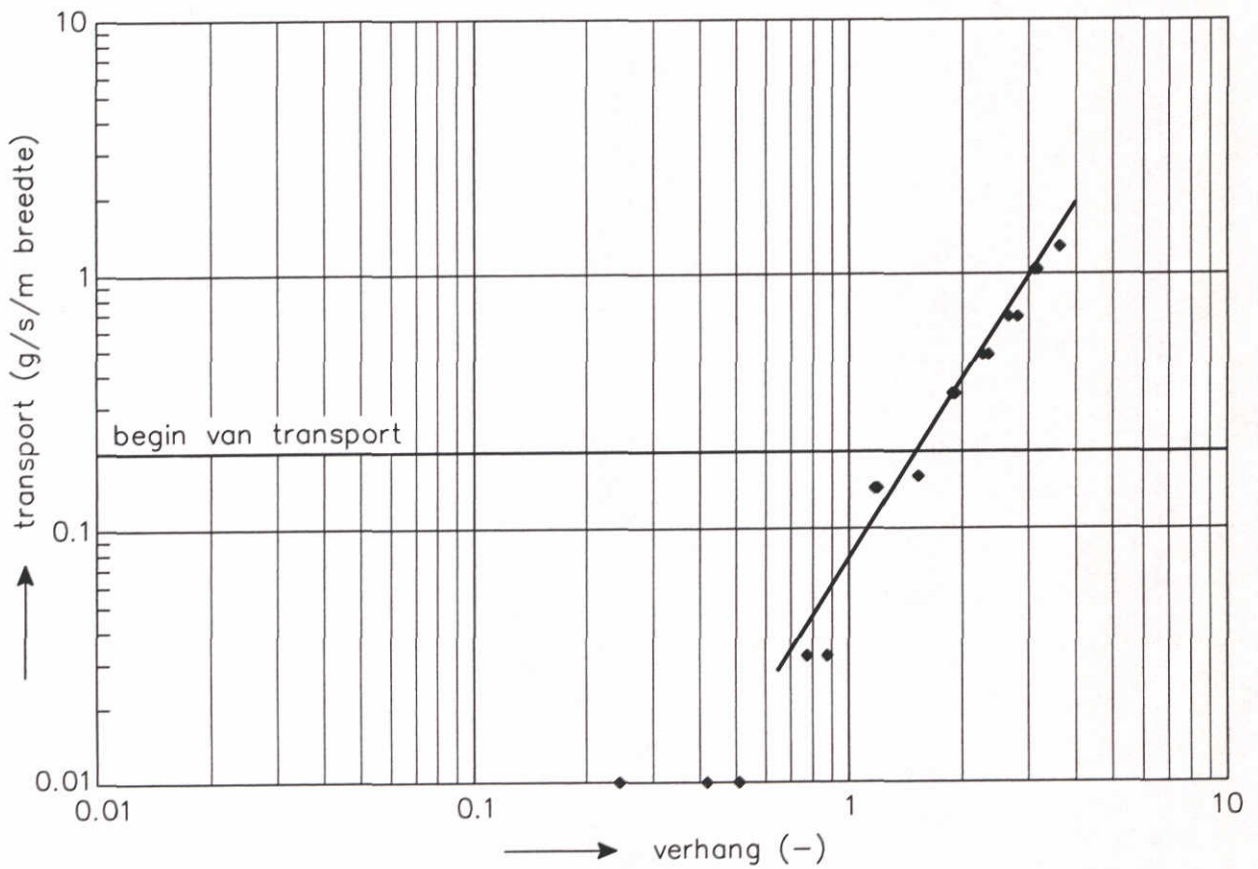
FIG. 4



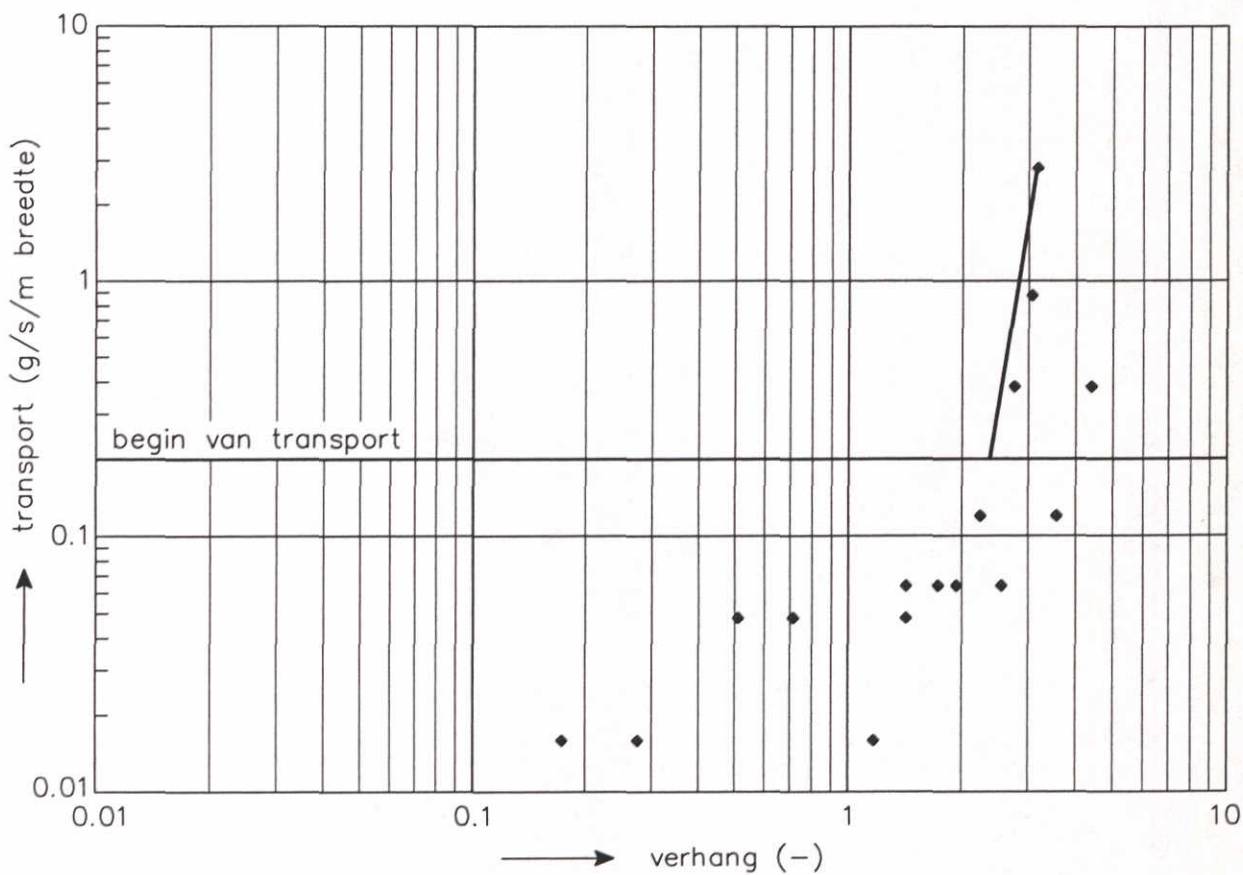
PROEF: 101, BASIS: KLEI  
DOEK: F3S



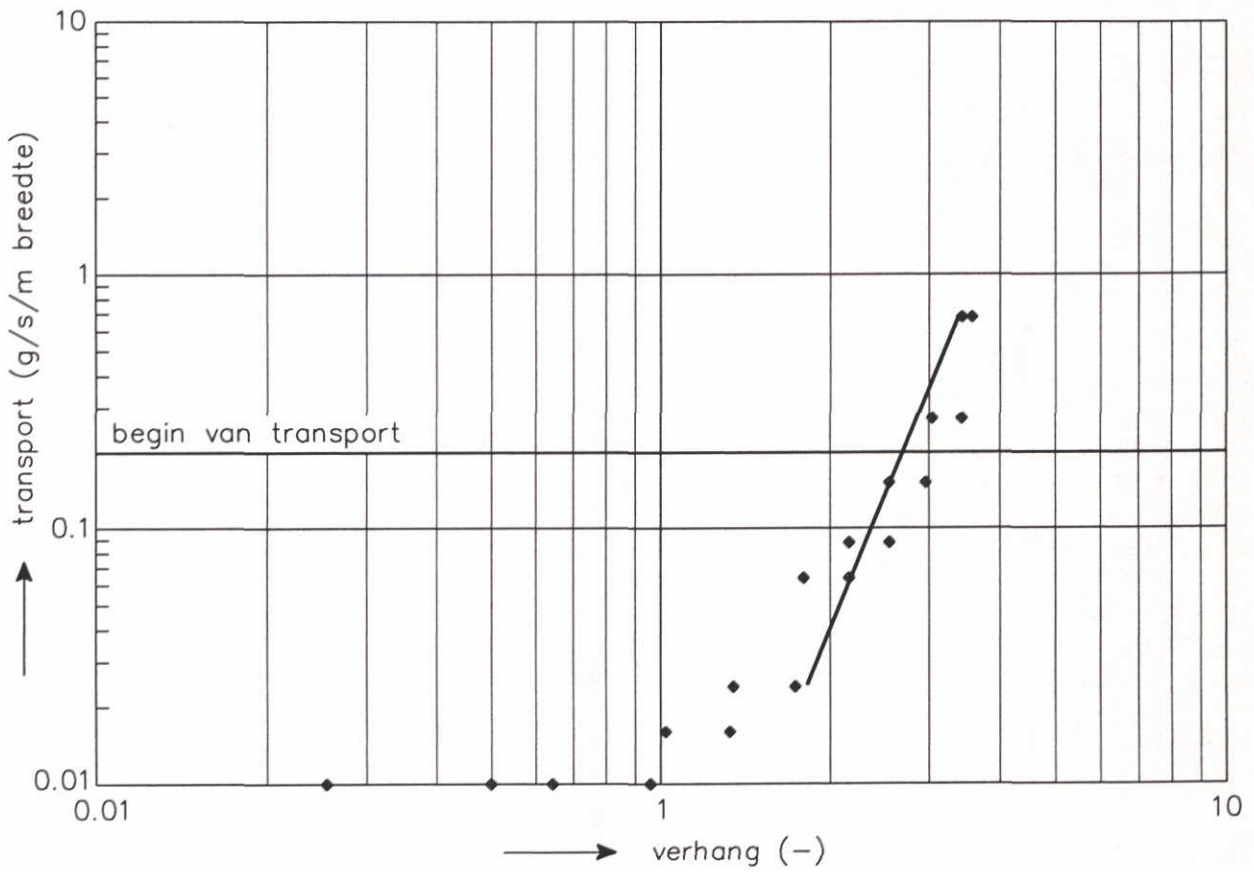
PROEF: 102, BASIS: KLEI  
DOEK: S201-3



PROEF: 103d, BASIS: KLEI  
DOEK: F300

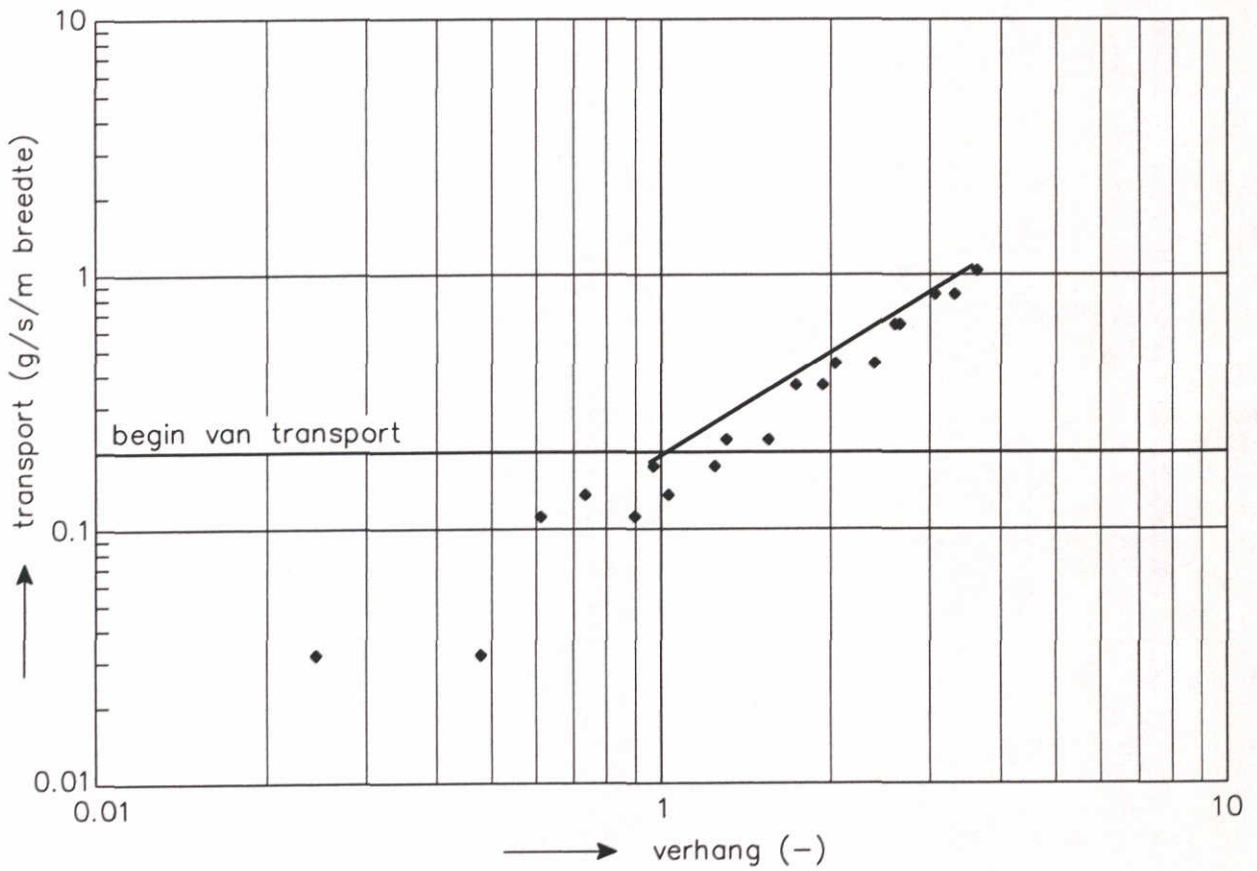


PROEF: 104, BASIS: KLEI  
DOEK: S351

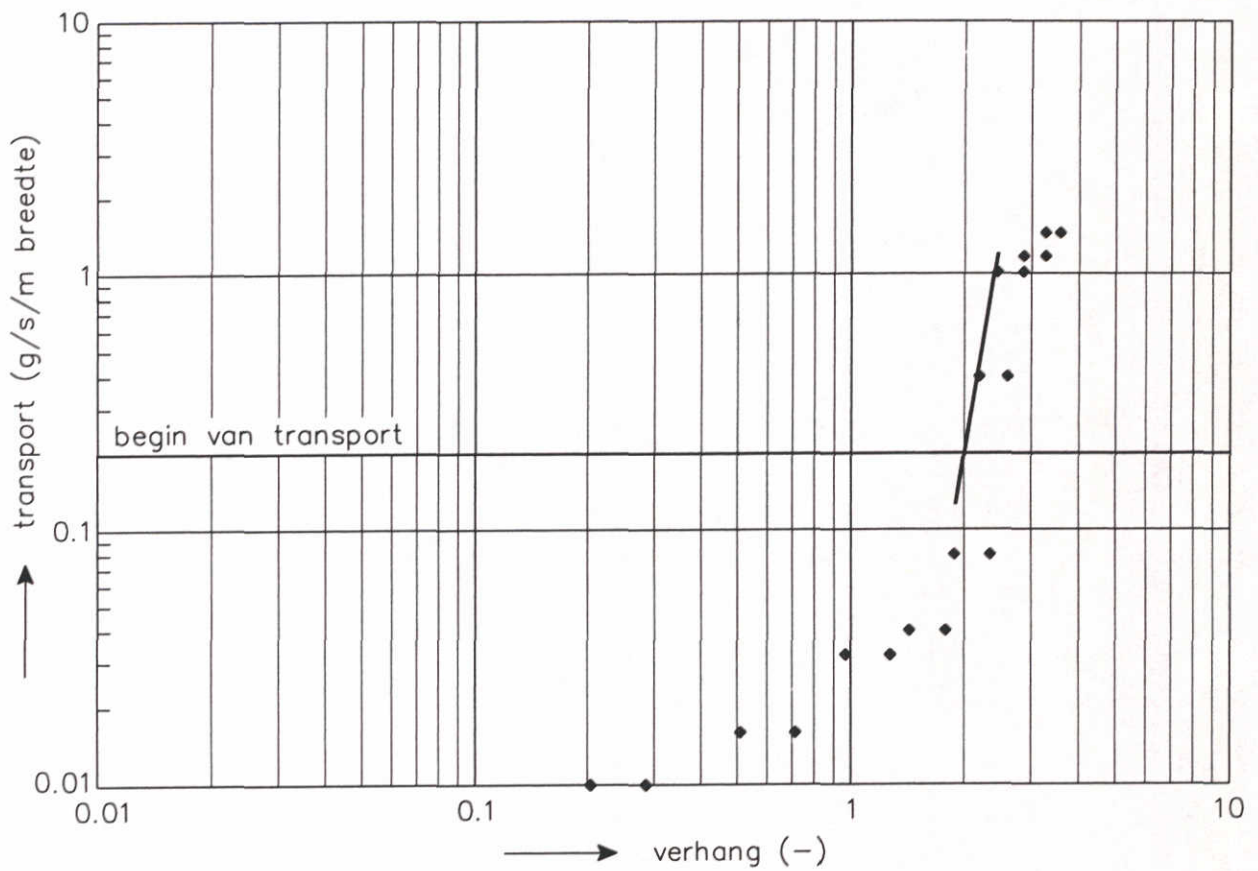


PROEF: 105, BASIS: KLEI  
DOEK: NF180

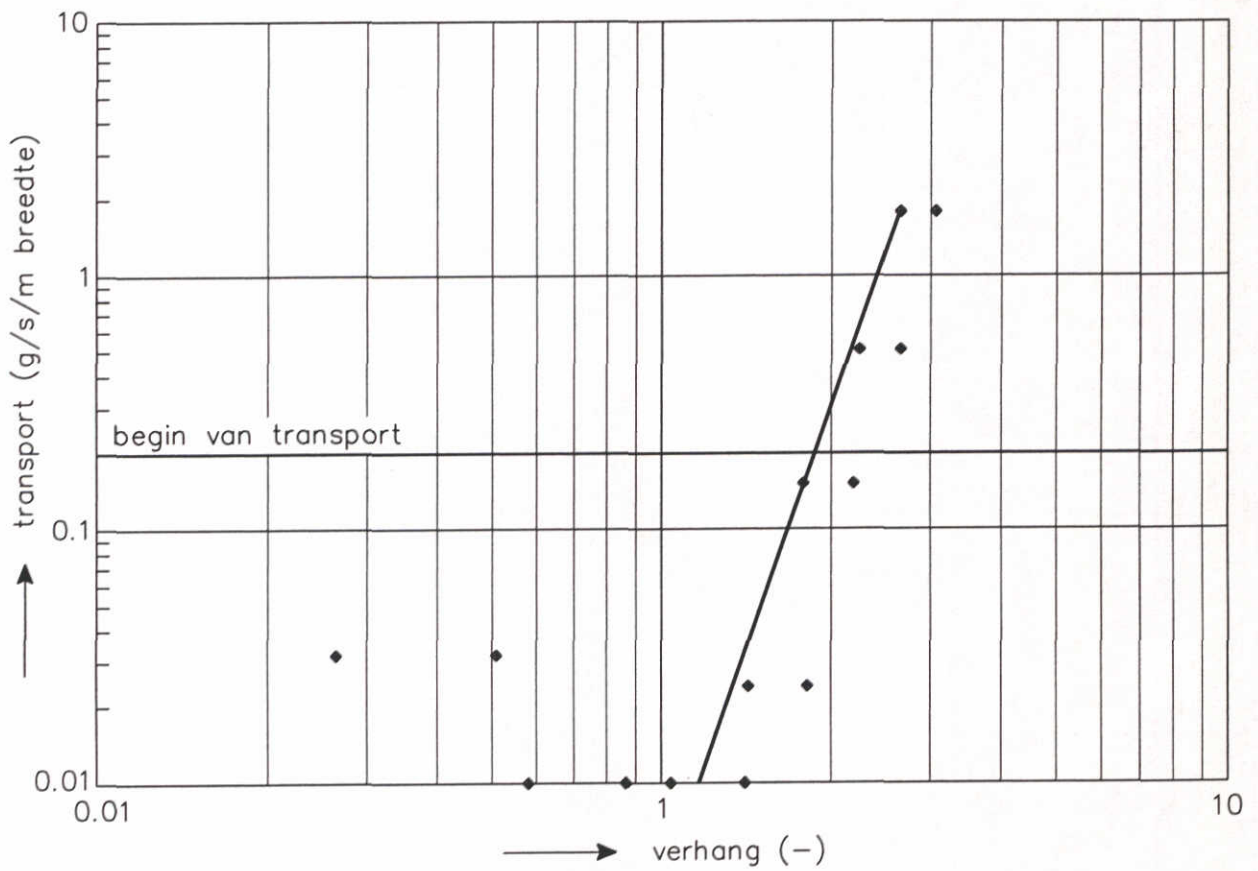




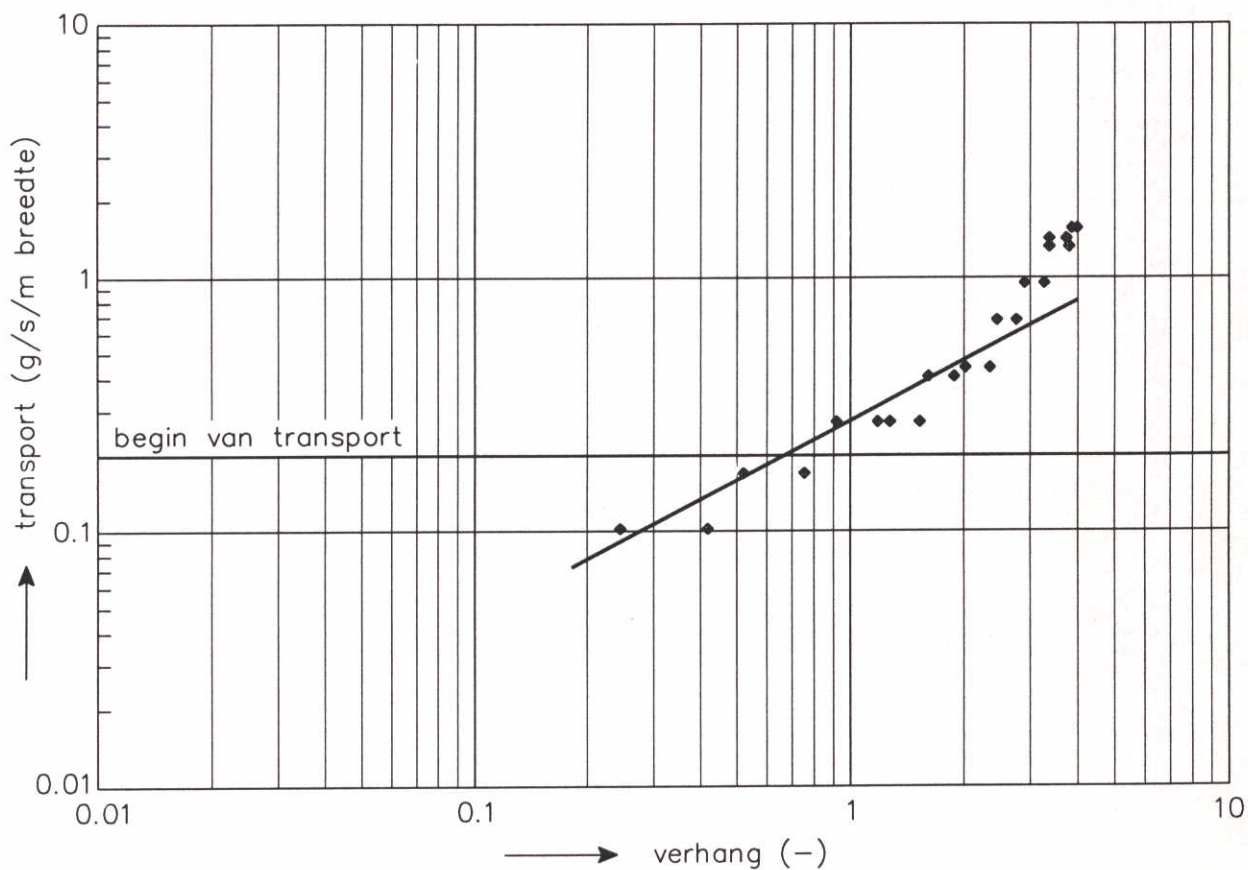
PROEF: 106, BASIS: KLEI  
DOEK: R400/50



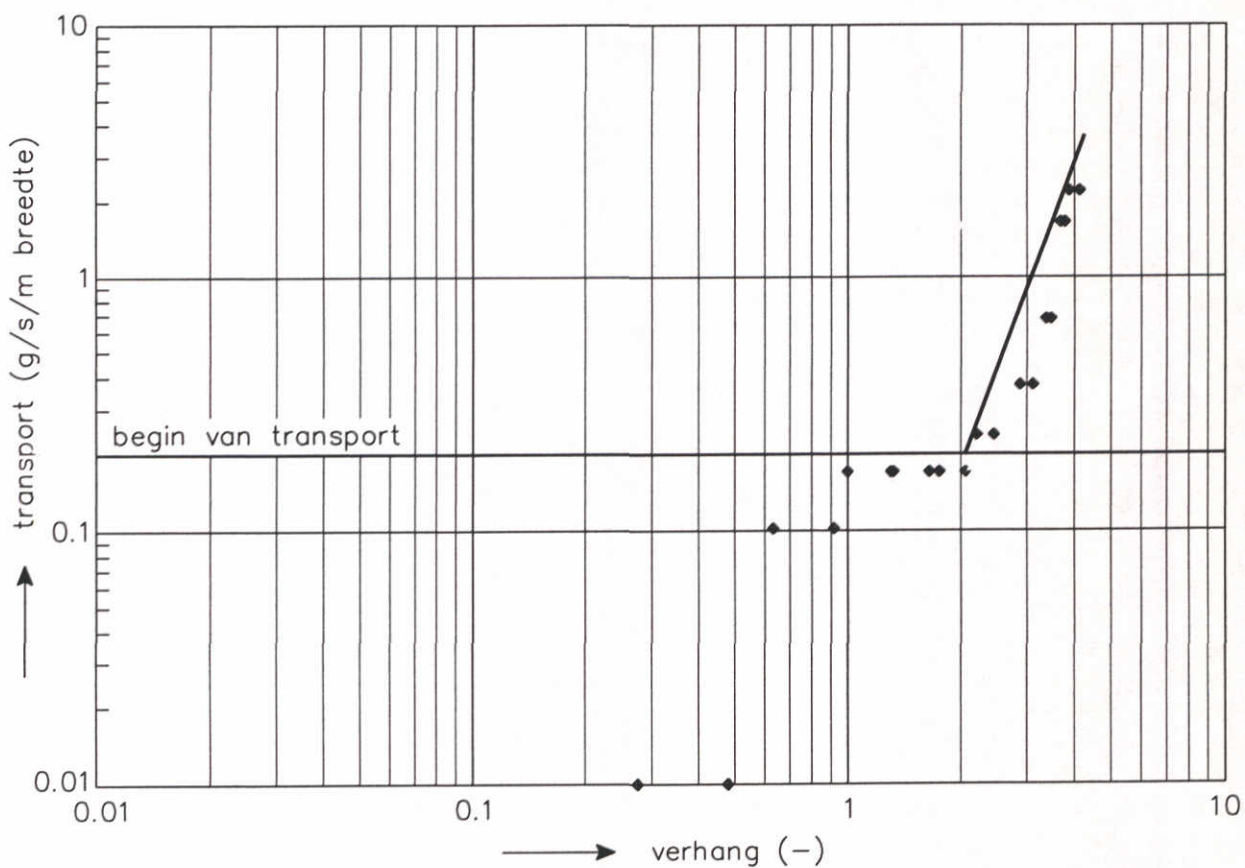
PROEF: 107, BASIS: KLEI  
DOEK: T600



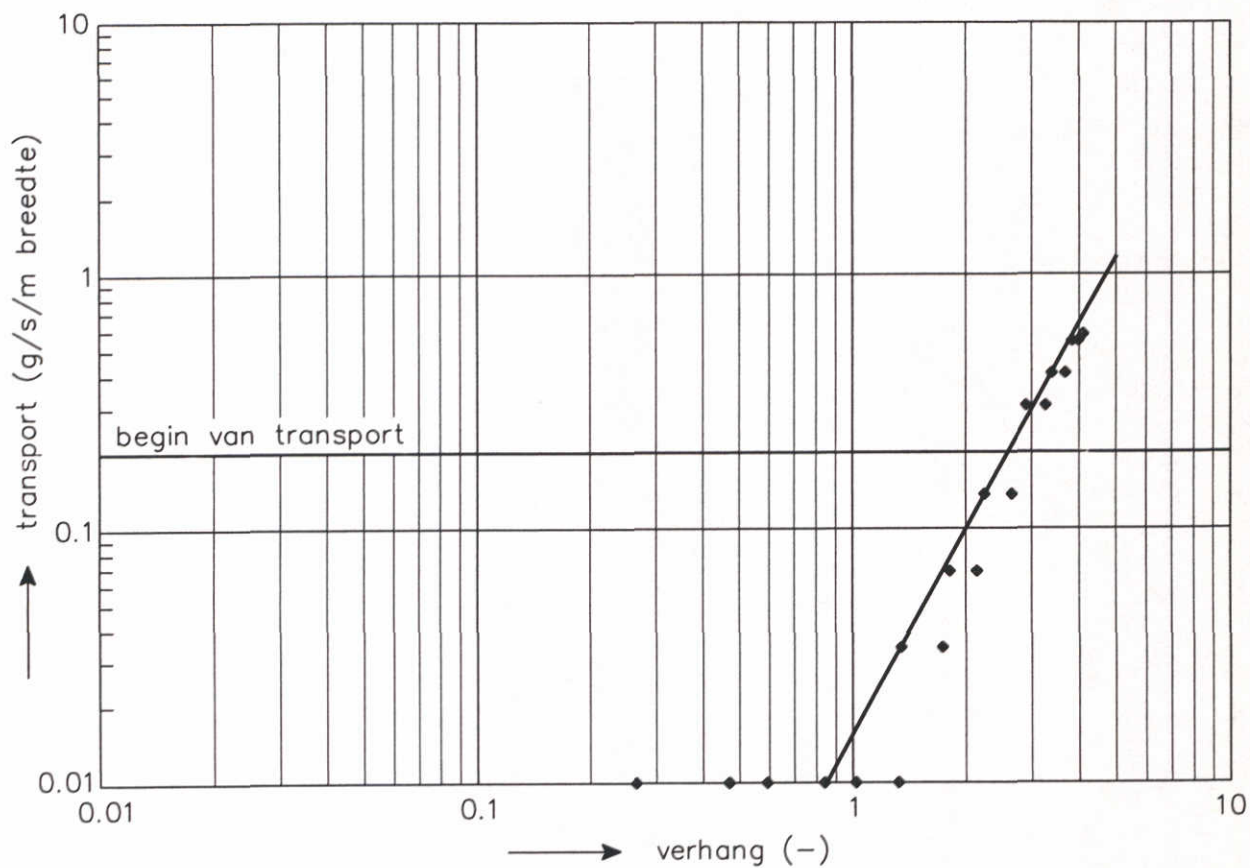
PROEF: 108, BASIS: KLEI  
DOEK: S1004



PROEF: 109, BASIS: ZAND  
DOEK: F3S

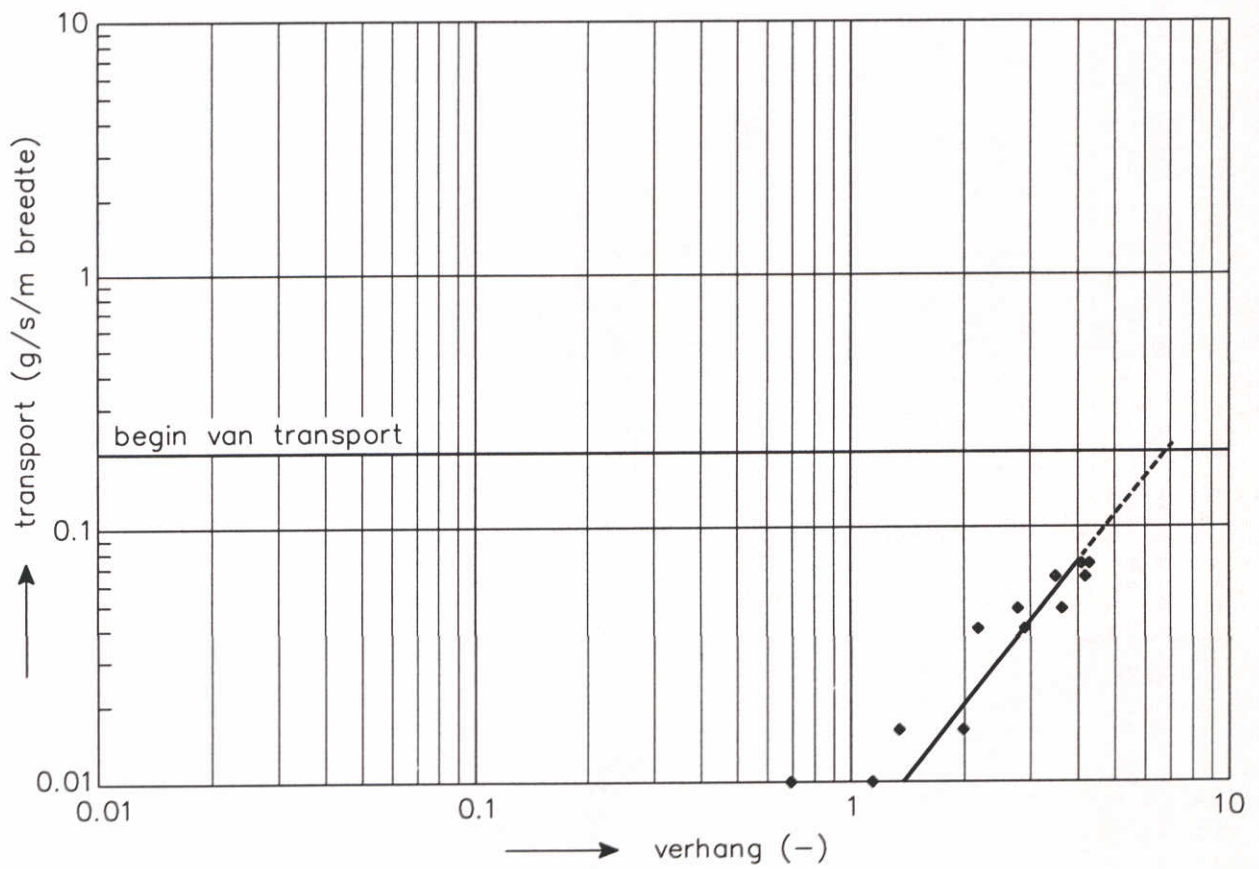


PROEF: 110, BASIS: ZAND  
DOEK: S351



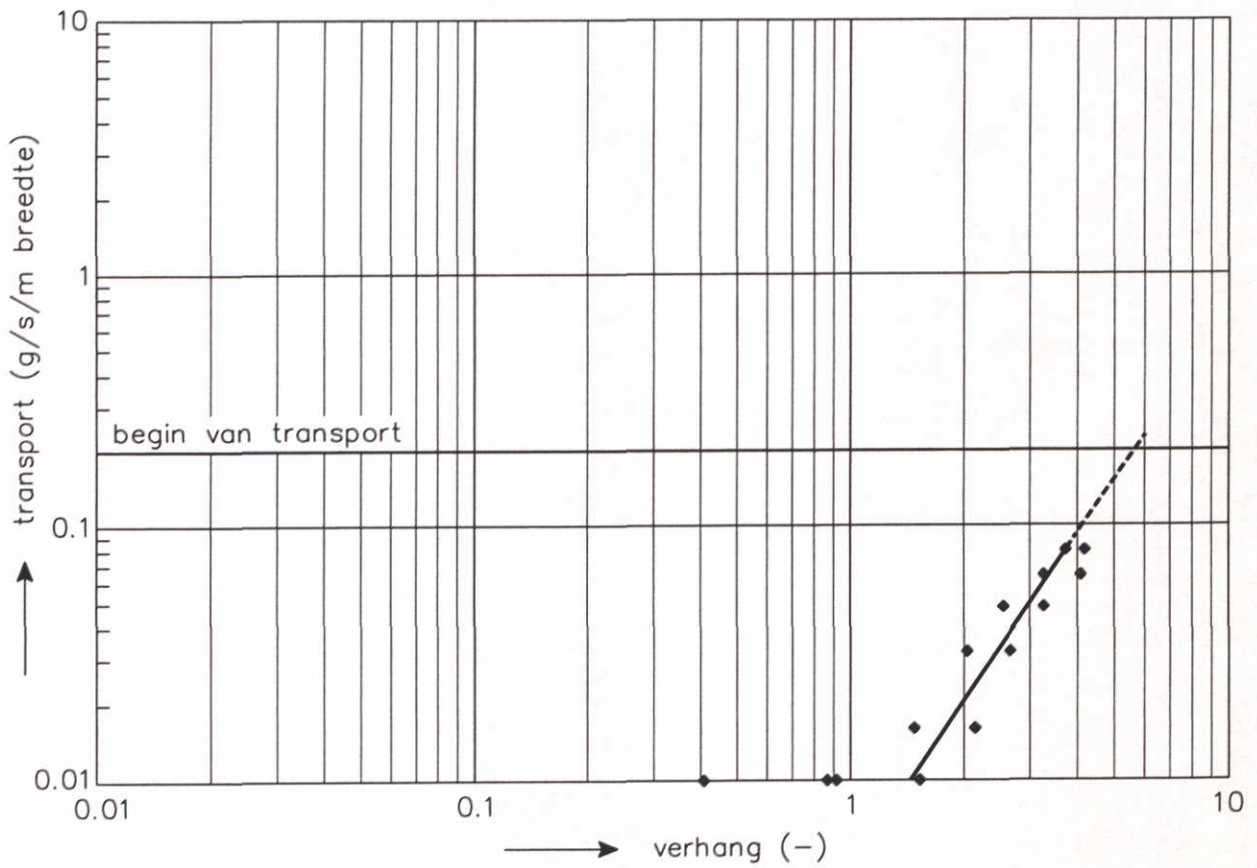
PROEF: 111, BASIS: ZAND  
DOEK: T600



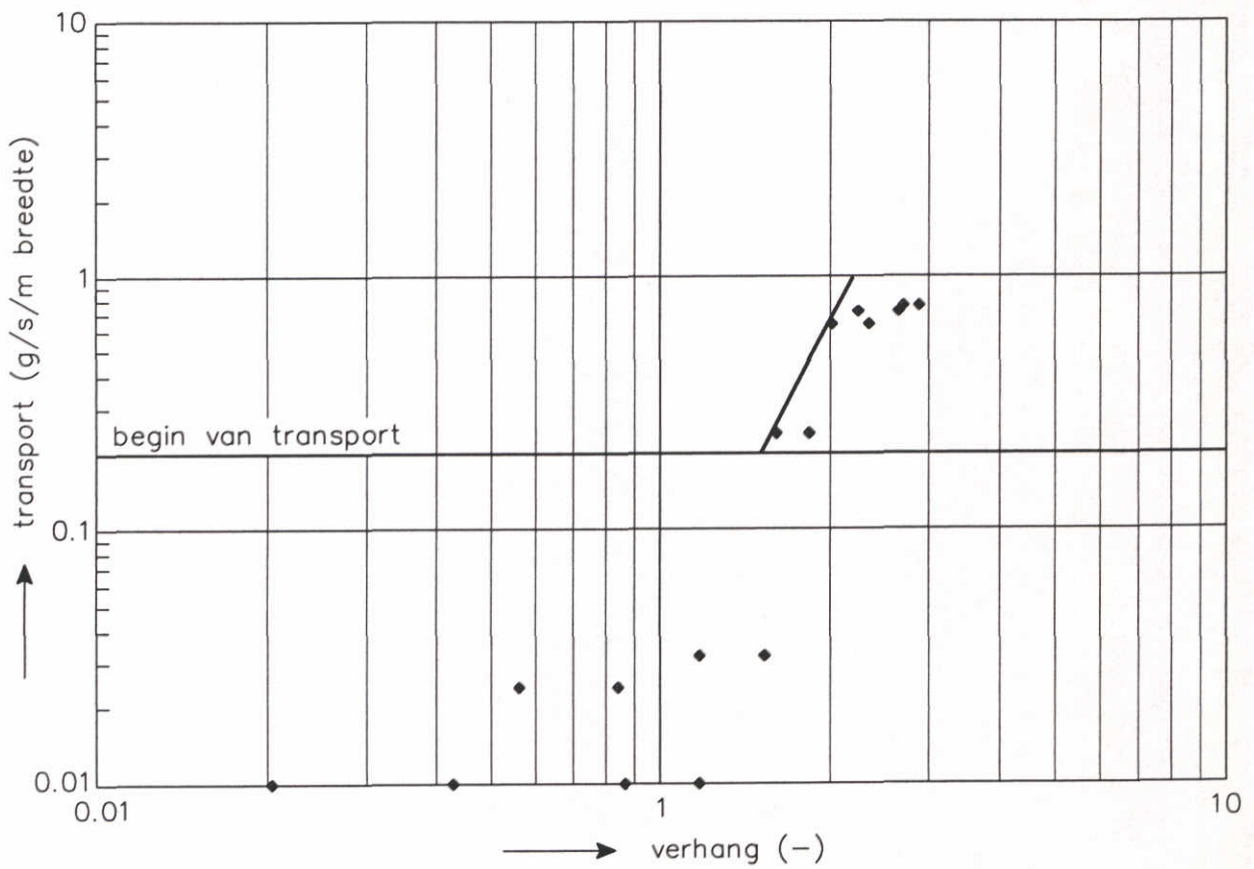


PROEF: 301, BASIS: KLEI  
DOEK: S201, FILTER

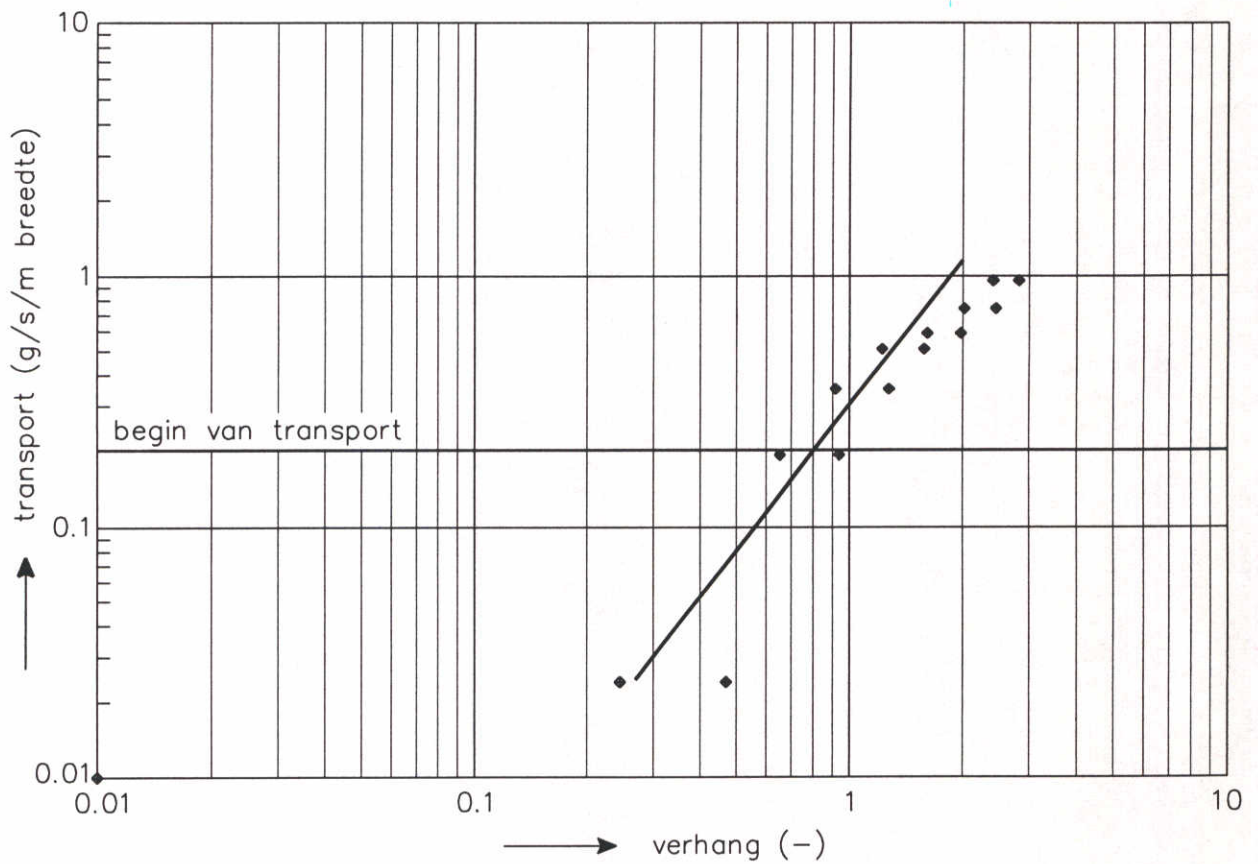




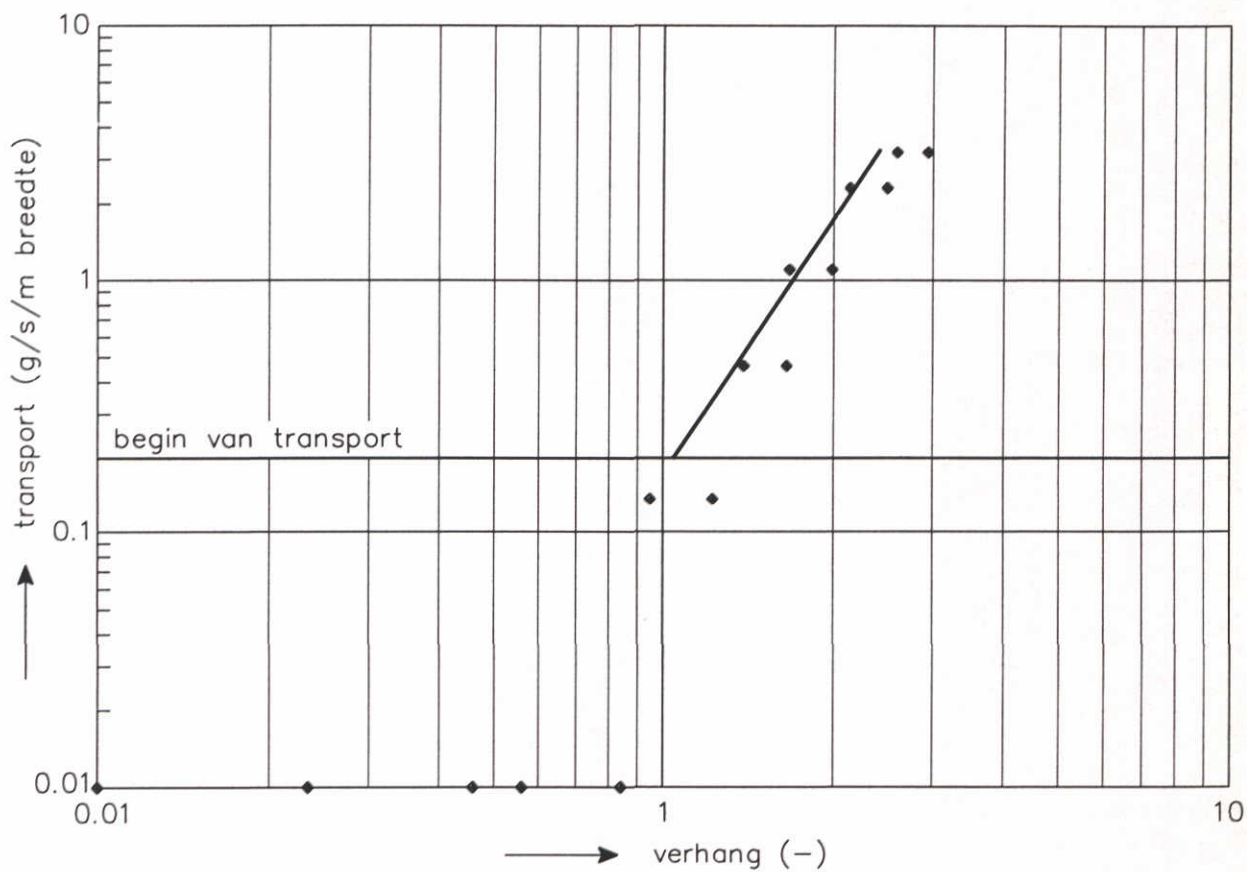
PROEF: 302, BASIS: KLEI  
DOEK: NF180, FILTER



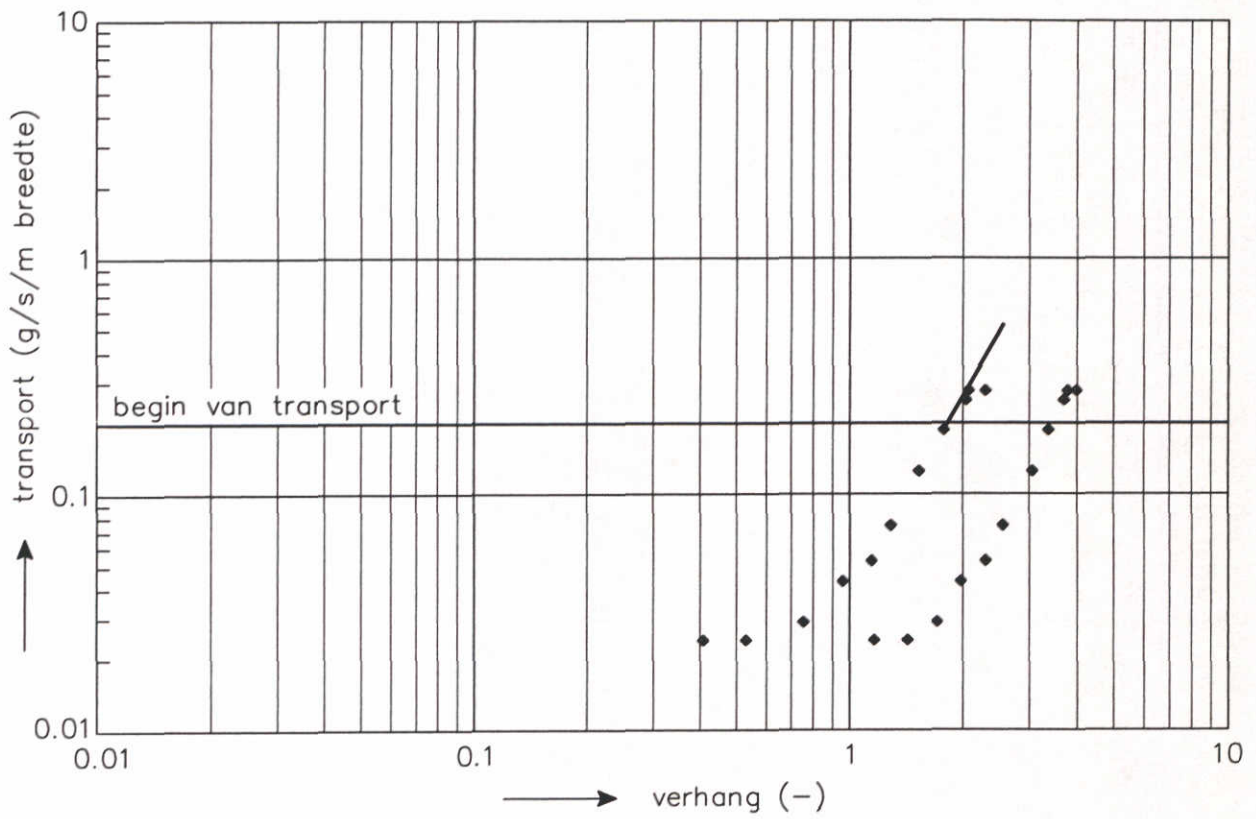
PROEF: 303, BASIS: KLEI  
DOEK: NF180



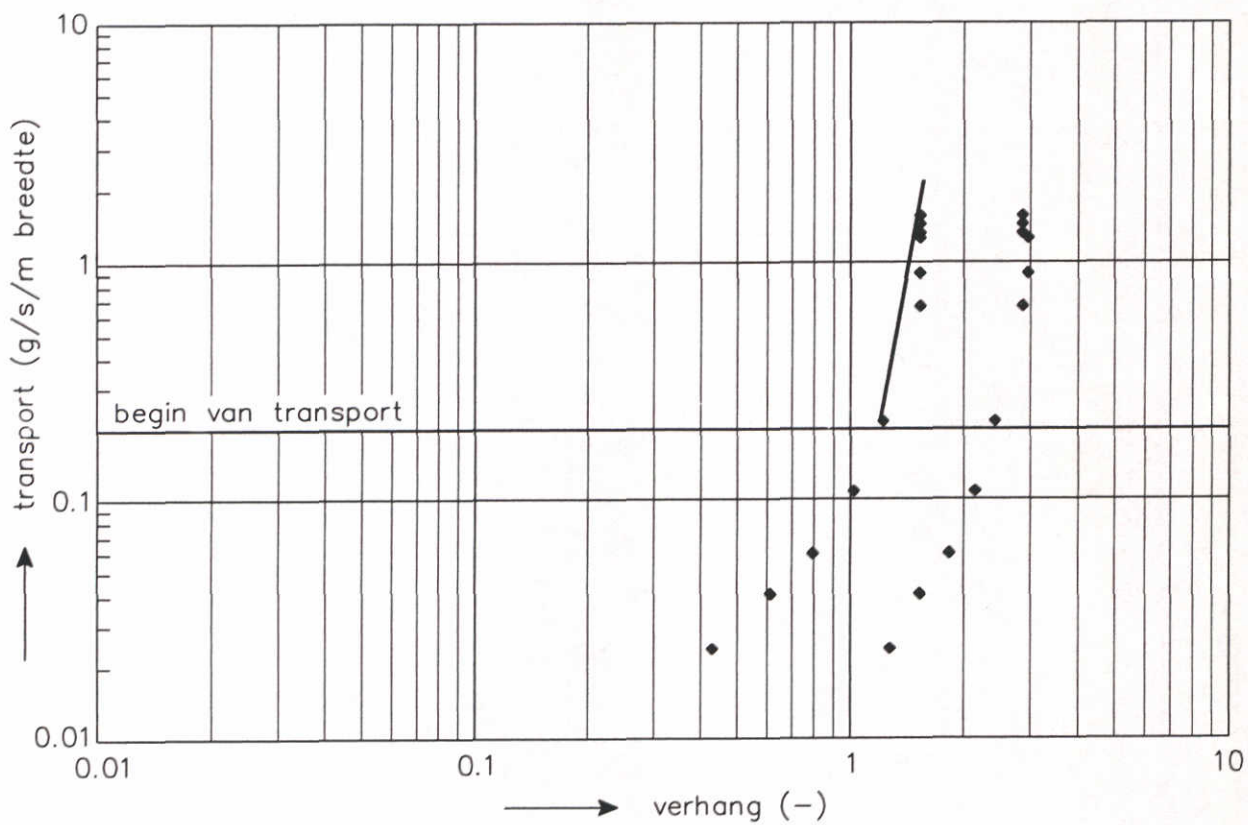
PROEF: 401, BASIS: KLEI  
DOEK: NF180 MET GEUL



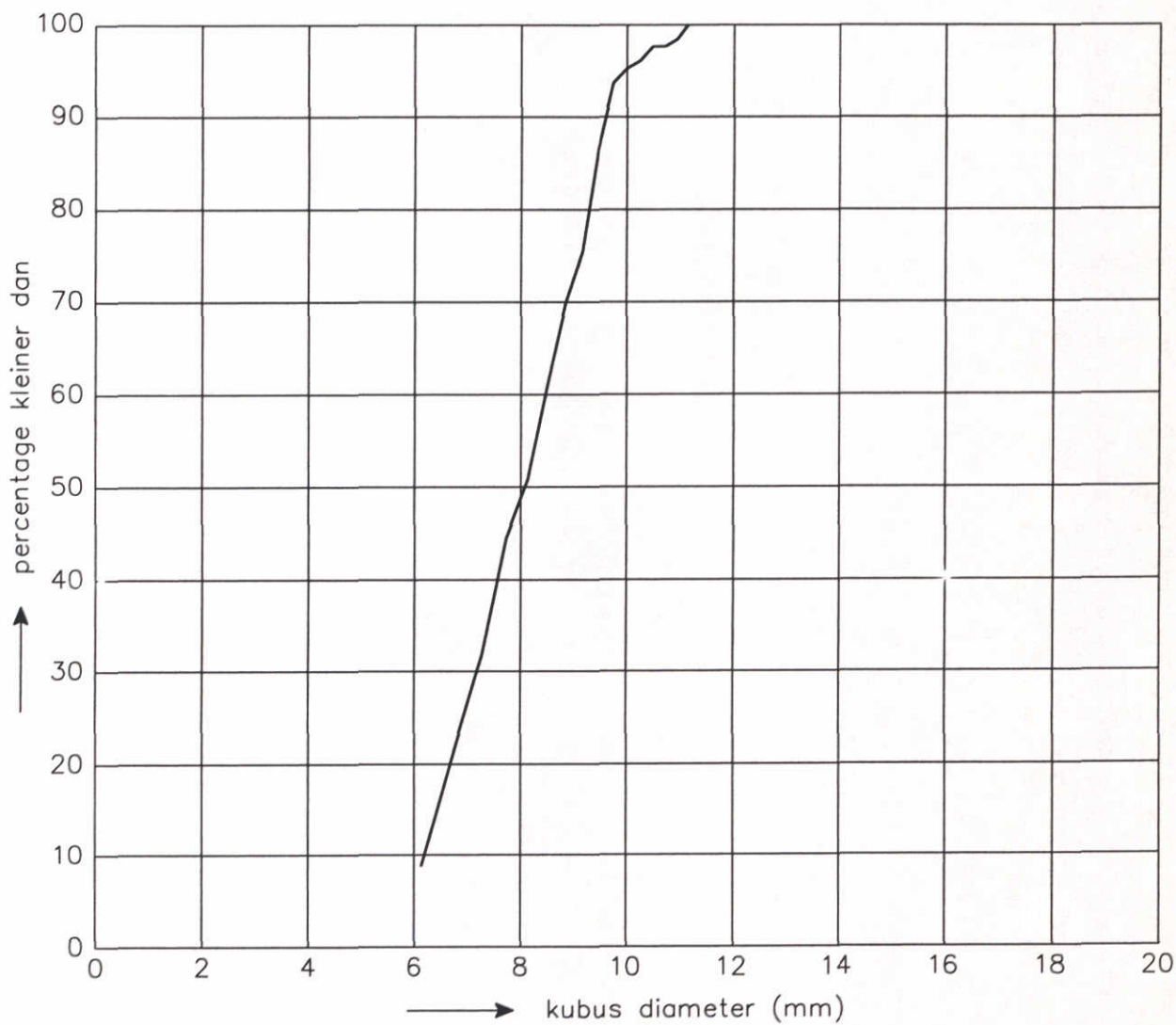
PROEF: 403, BASIS: KLEI  
DOEK: S201 MET GEUL



PROEF: 501d, BASIS: KLEI  
DOEK: NF180 MET 8.5mm GEUL



PROEF: 503-504, BASIS: KLEI  
DOEK: NF180 MET 8.5mm GEUL



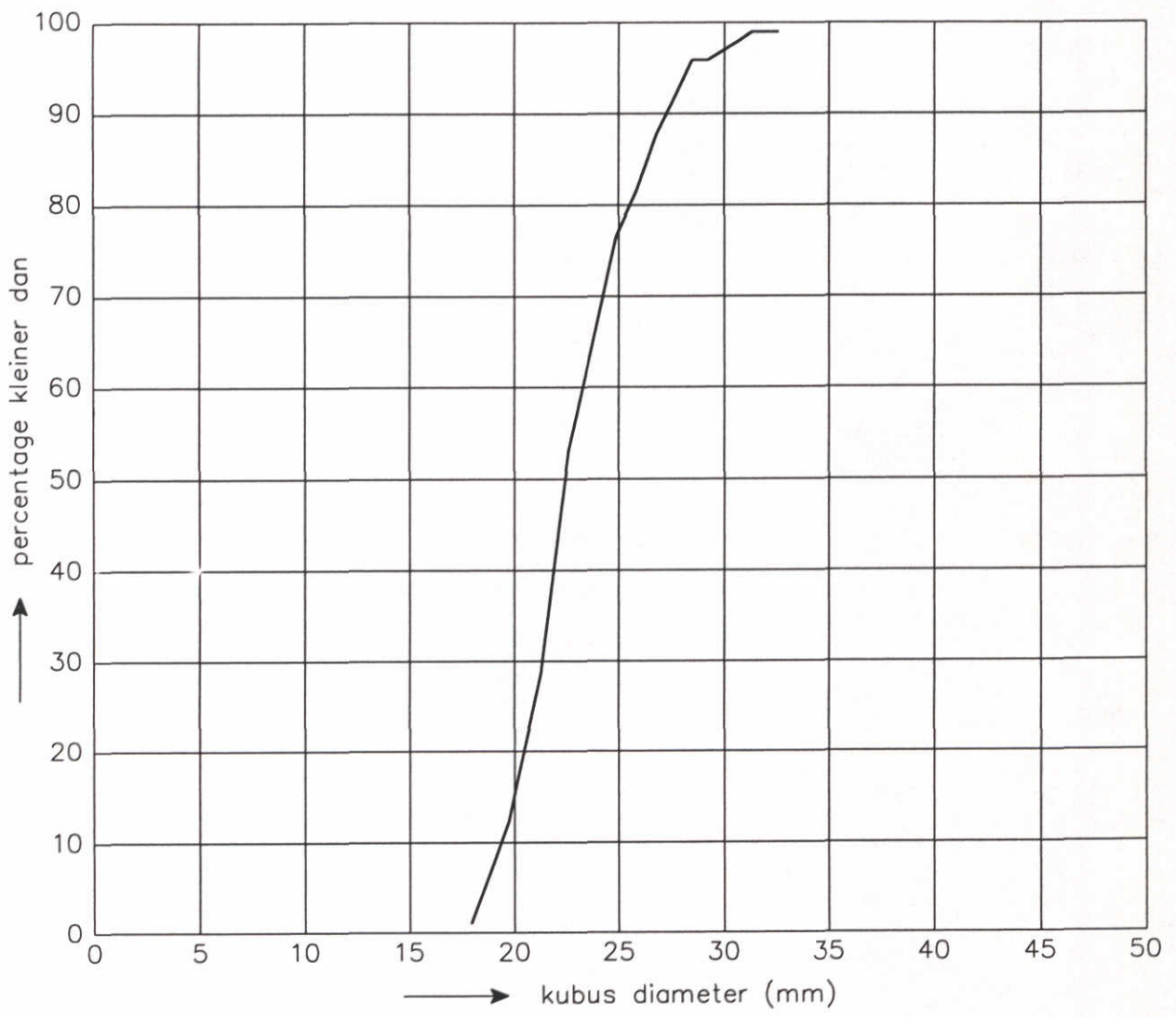
$$D_n = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_s}}$$

———— bak 1

M = massa (kg)

$\rho_s$  = steendichtheid (kg/m<sup>3</sup>)

STEENSLAG KORRELGROOTTE – VERDELINGSKROMMEN



$$D_n = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_s}}$$

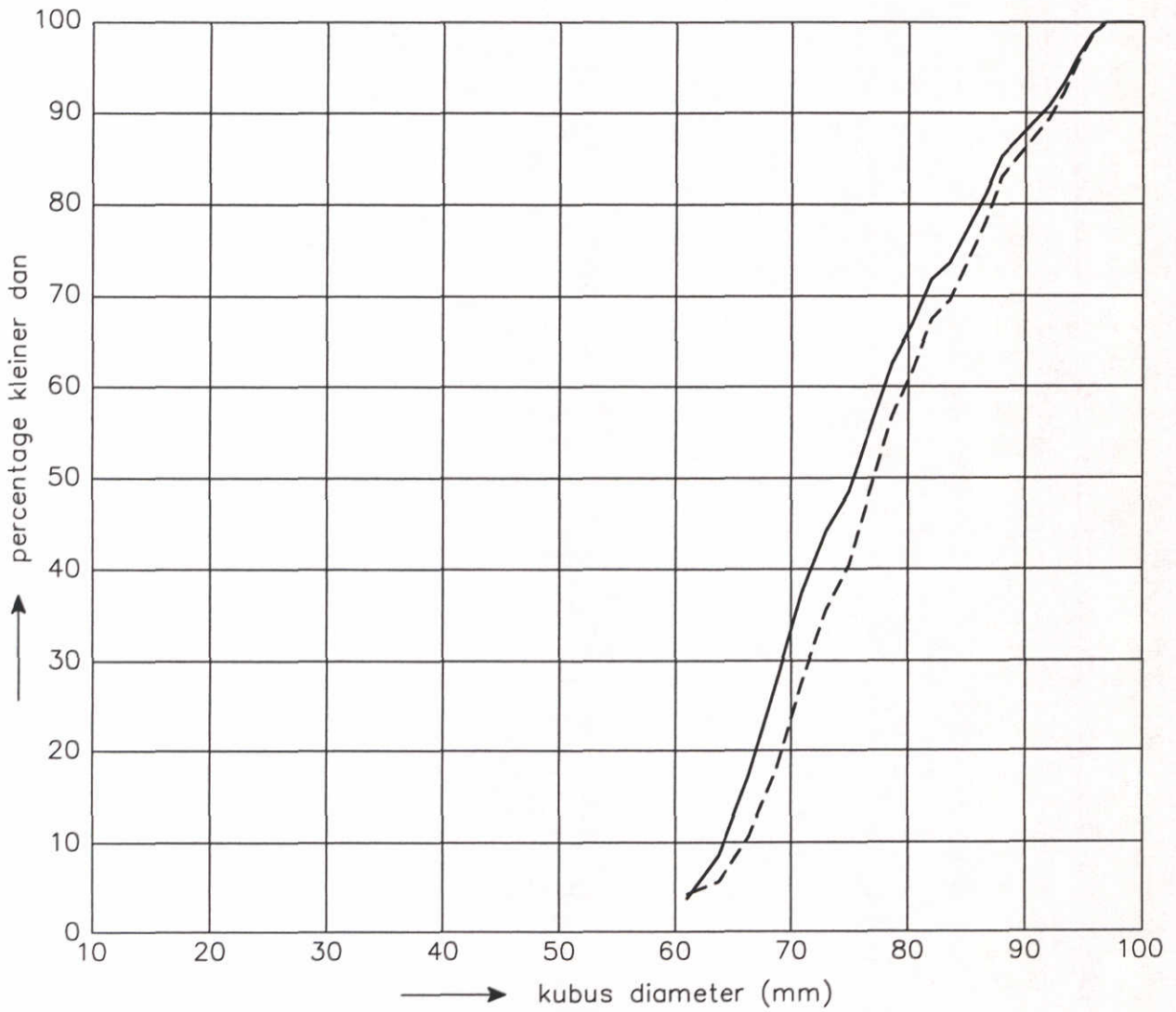
———— bak 1

M = massa (kg)

$\rho_s$  = steendichtheid ( $\text{kg/m}^3$ )

STEENSLAG KORRELGROOTTE – VERDELINGSKROMMEN





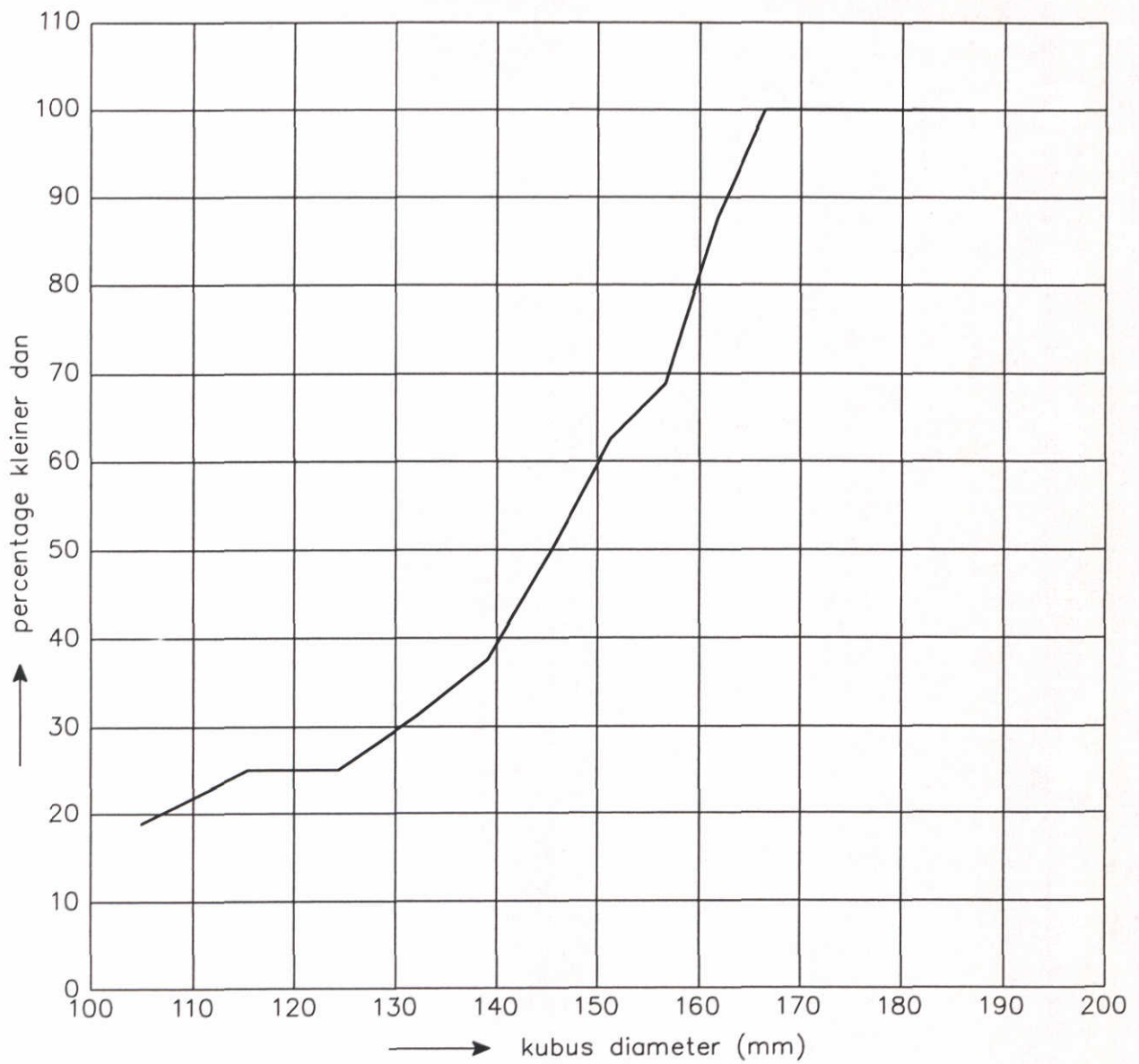
$$D_n = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_s}}$$

M = massa (kg)

$\rho_s$  = steendichtheid ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

— bak 1  
 - - - bak 2

STEENSLAG KORRELGROOTTE – VERDELINGSKROMMEN



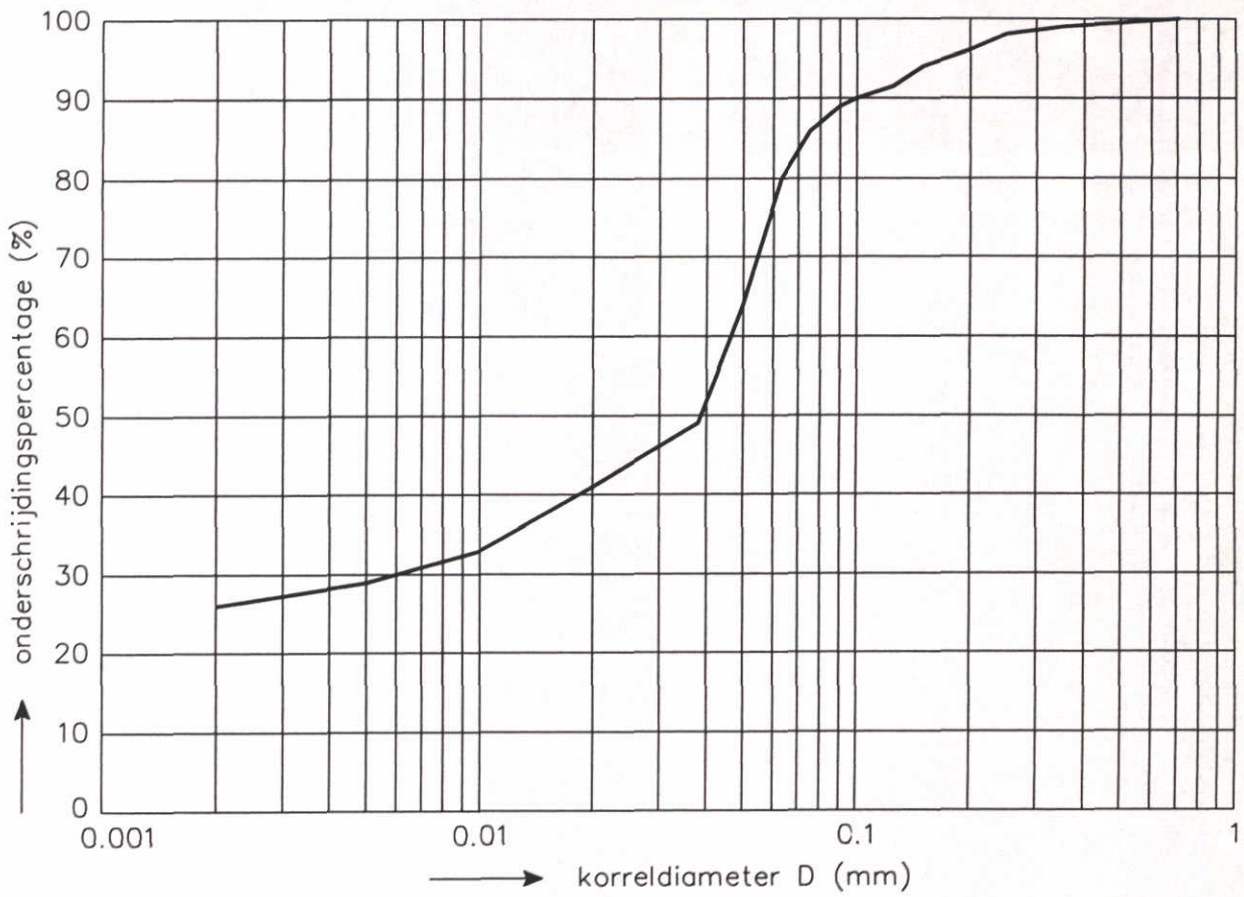
$$D_n = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_s}}$$

— bak 1

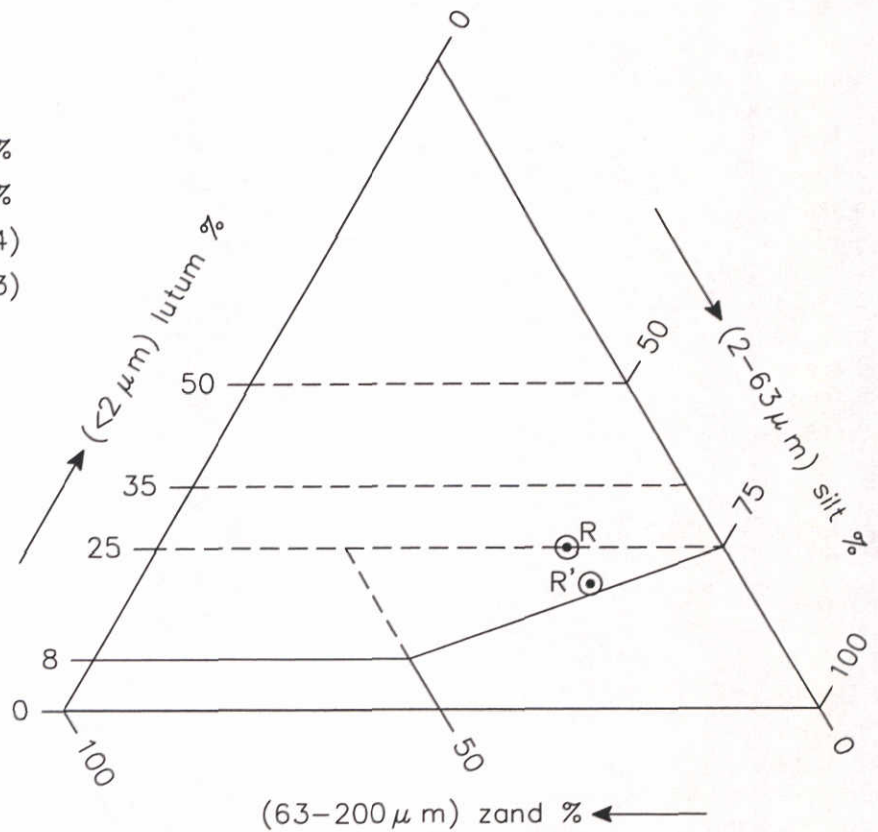
M = massa (kg)

$\rho_s$  = steendichtheid (kg/m<sup>3</sup>)

STEENSLAG KORRELGROOTTE – VERDELINGSKROMMEN



$\%D < 2 \mu\text{m} = 26\%$   
 $2 \leq D \leq 63 \mu\text{m} = 54\%$   
 $63 \leq D \leq 200 \mu\text{m} = 20\%$   
 R = matige klei (1994)  
 R' = matige klei (1993)



KORRELGROOTTE-VERDELING, KLEI  
EN CLASSIFICATIE DRIEHOEK

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 2080

FIG. 34



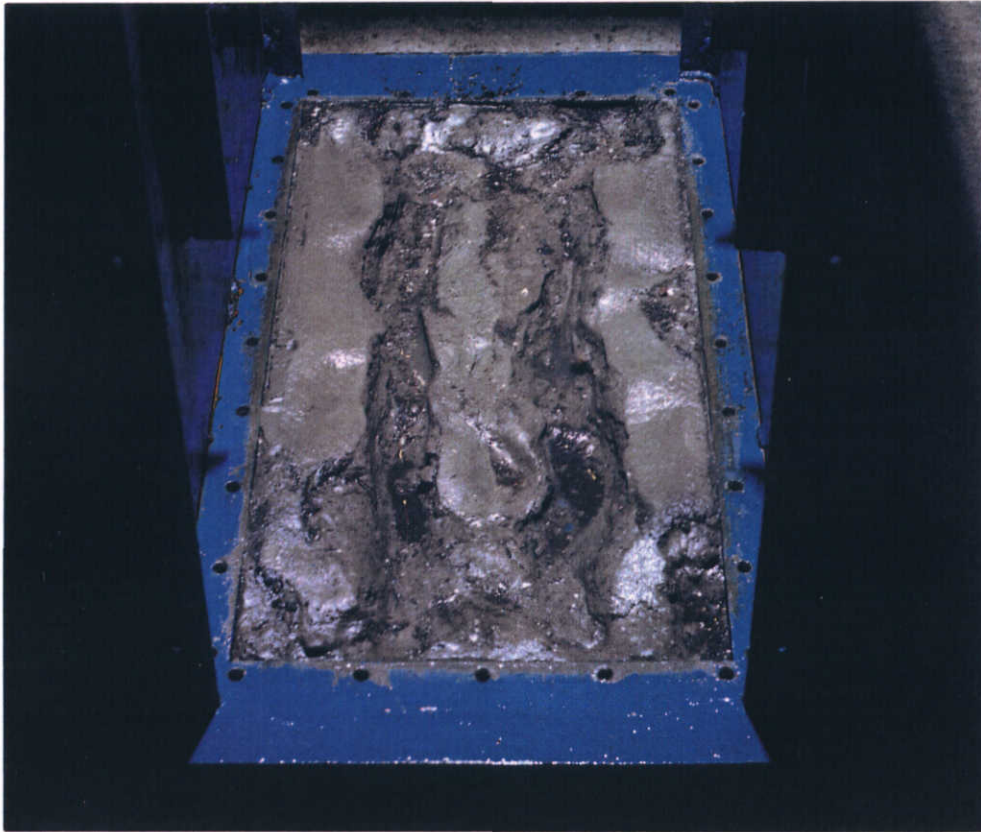
1. modelsectie gebruikt tijdens proef 303



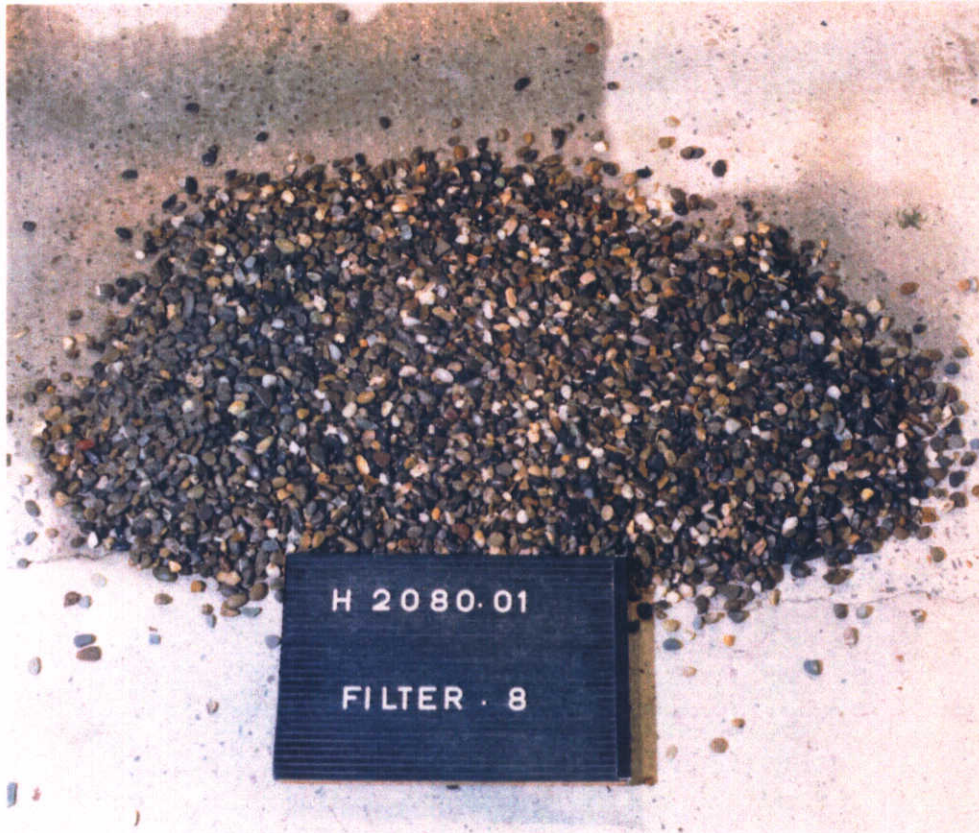
2. opgetreden erosie tijdens proef 303



3. detail van de proefopstelling met een voorgevormde geul in de klei



4. opgetreden erosie tijdens proef 404



5. filterstenen met een diameter van ongeveer 8 mm





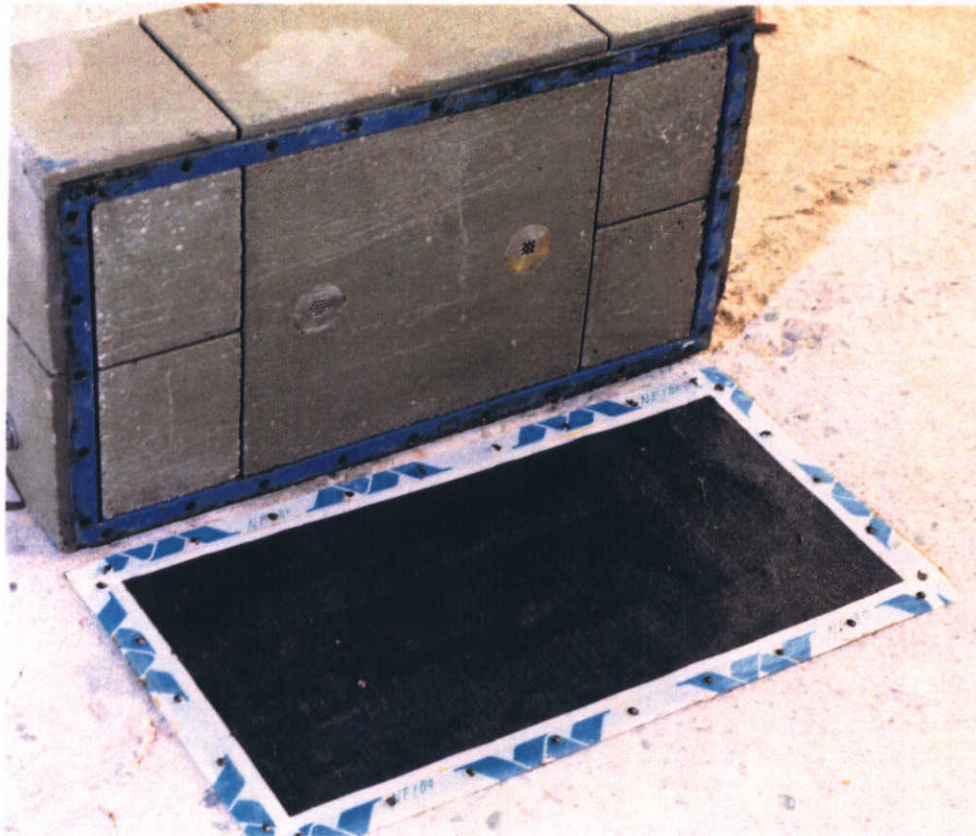
6. filterstenen met een diameter van ongeveer 25 mm



7. filterstenen met een diameter van ongeveer 65 mm



8. filterstenen met een diameter van ongeveer 150 mm



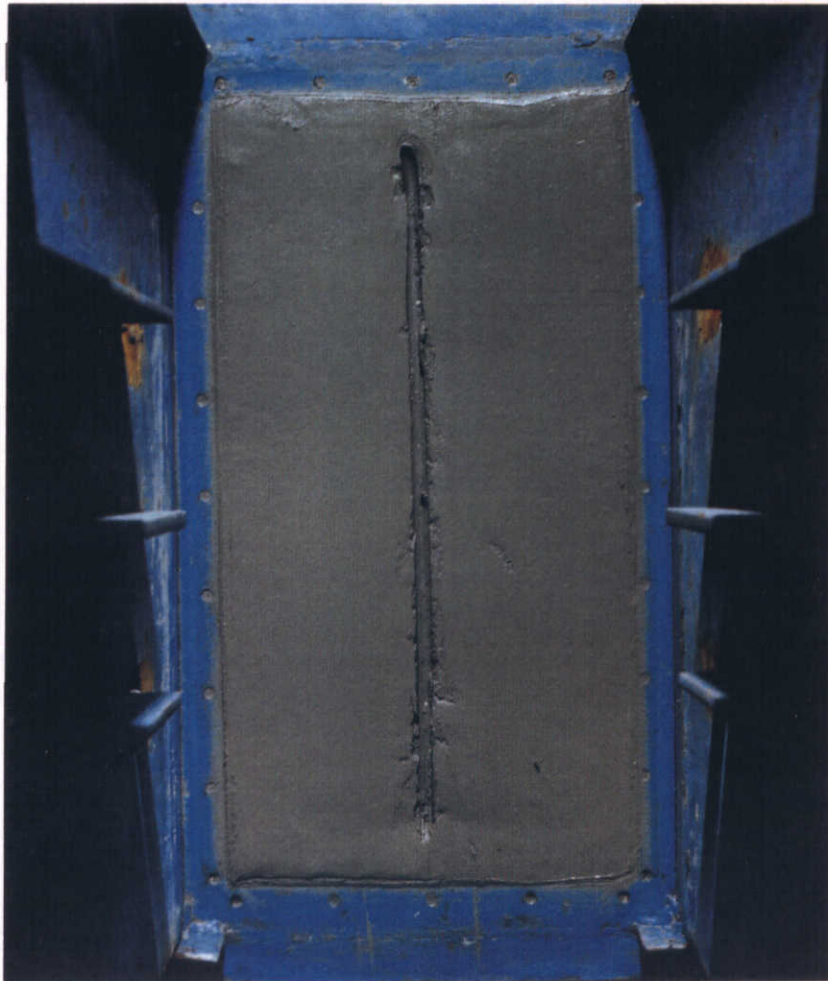
9. onderzijde van de steenzetting in de modelsectie



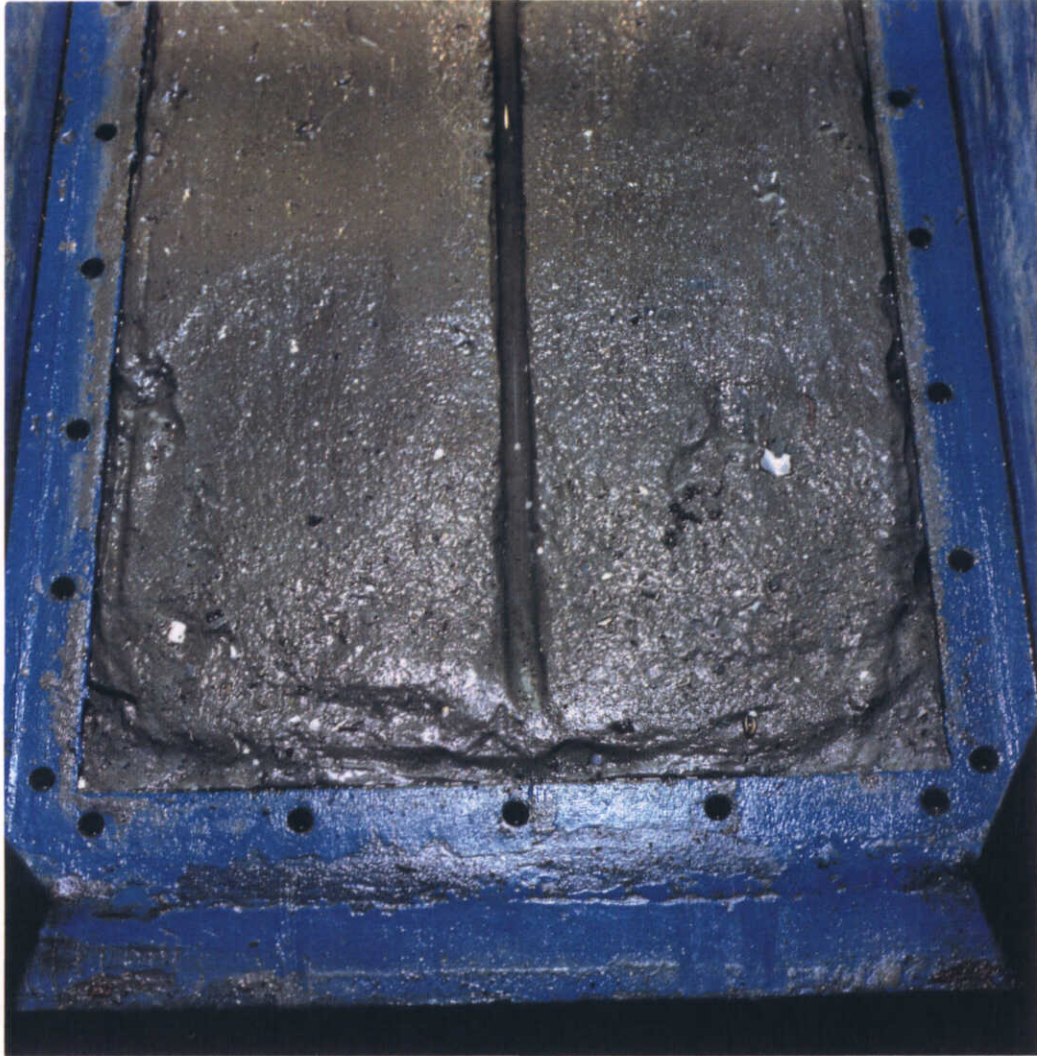
10. opgetreden erosie tijdens proef 501 zonder voor



10. opgetreden erosie tijdens proef 501 zonder vooraf gemaakte geul



11. voorbeeld van een voorgevormde geul ten behoeve van de proeven 501-504



12. opgetreden erosie tijdens proef 501D





**hoofdkantoor**  
**Rotterdamseweg 185**  
**postbus 177**  
**2600 MH Delft**  
**telefoon (015) 56 93 53**  
**telefax (015) 61 96 74**  
**telex 38176 hydel-nl**

**locatie ' De Voorst'**  
**Voorsterweg 28, Marknesse**  
**postbus 152**  
**8300 AD Emmeloord**  
**telefoon (05274) 29 22**  
**telefax (05274) 35 73**  
**telex 42290 hylvo-nl**

