



Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat

Dienst Weg- en Waterbouwkunde, TAW-A2

Taludbekledingen van gezette steen

Ontwerpregels voor het filter

VERVOLGDEEL

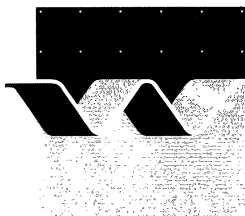
M 1795/H 195, CO 287270/30

deel XXI

Juni 1992





GRONDMECHANICA
DELFT



Talusbekledingen van gezette steen

Ontwerpregels voor het filter

M. Klein Breteler (WL), H. den Adel (GD) en
M.A. Koenders (Estuary Physics)

	bibliotheek postbus 177 - 2600 MH Delft waterloopkundig laboratorium/WL
BB	DDZ1 / 1707 150210 / 1707
WL	M 1995
EXPL	

R0001084

1. Rapport nr. Deel 21	2. Serie nr. TAW-A2	3. Ontvanger catalogus nummer	
4. Titel en sub-titel Taludbekledingen van gezette steen. Ontwerpregels voor het filter		5. Datum rapport Juni 1992	
		6. Kode uitvoerende organisatie H195	
7. Schrijvers M. Klein Breteler, H. den Adel en M.A. Koenders		8. Nr. rapport uitvoerende organisatie	
9. Naam en adres opdrachtnemer Waterloopkundig Laboratorium Voorsterweg 28, Marknesse Postbus 152 8300 AD Emmeloord		10. Projektnaam TAWA *STEENZ	
		11. Kontaktnummer 31.0.036	
12. Naam en adres opdrachtgever Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044 2600 GA Delft		13. Type rapport Deelrapport uit serie	
		14. Kode andere opdrachtgever	
15. Opmerkingen			
16. Referaat In dit verslag zijn zes deelverslagen gebundeld op het gebied van granulaire filters en geotextielen onder steenzettingen. De twee belangrijkste bezwijkmechanismen worden behandeld: 1) Zandtransport vanuit de basis door het granulaire filter of door het geotextiel; 2) Migratie van de fijne fractie van een filter (interne instabiliteit of suffosie genaamd). Het onderzoek heeft geleid tot formules en diagrammen waarmee de kritieke belasting bij beginnend zandtransport kan worden bepaald. Door rekening te houden met de doorgaans kleine hydraulische belastingen kunnen hiermee filters ontworpen worden die niet geometrisch zanddicht zijn (met poriën in het granulaire filter of openingen in het geotextiel die groter zijn dan de zandkorrels). This volume contains six reports on granular filters and geotextiles in block revetment structures. The two most important damage mechanisms are dealt with: 1) Sand transport through the granular filter or through the geotextile; 2) Migration of the fine fraction of a filter (named "internal instability" or "suffosion"). The research led to formulas and diagrams with which the critical hydraulic load at threshold of sand transport can be calculated. When taking into account the usually small hydraulic load, it is possible to design filters that are not geometrically sandtight (with pores in the granular filter or apertures in the geotextile larger than the sand grains to be protected).			
17. Trefwoorden Granulair filter, Geotextiel, Inzanding, Dijkbekledingen, Steenzettingen, Suffosie		18. Distributie systeem	
19. Classificatie Vrij toegankelijk	20. Classificatie deze pagina	21. Aantal blz.	22. Prijs

INHOUD

- Sectie 1 Overzicht van de onderzoeksresultaten
- Sectie 2 Ontwerpregels voor het grensvlak tussen granulair filter en zand
- Sectie 3 Hydraulic criteria for filters
- Sectie 4 Alternatief filtermateriaal
- Sectie 5 Inventarisatie van erosiedetectiemethoden
- Sectie 6 Interne stabiliteit van granulaire filters bij stationaire stroming
- Sectie 7 Zanddichtheid van geotextielen als functie van de hydraulische
belasting

SECTIE 1

Overzicht van de onderzoeksresultaten

M. Klein Breteler (WL)

INHOUD

SYMBOLENLIJST

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
2. <u>Inzanding van een granulair filter met zand uit de basis</u>	3
3. <u>Interne instabiliteit van het granulaire filter</u>	6
4. <u>Zandtransport door geotextielen</u>	7

REFERENTIES

SYMBOLENLIJST

a_f	=	lineaire weerstandscoefficiënt van het filter	(s/m)
b_f	=	kwadratische weerstandscoefficiënt van het filter	(s ² /m ²)
c	=	Coëfficiënt die in tabel 1 kan worden afgelezen	(-)
D_{f15}	=	Korrelgrootte van het filter die door 15 gewichtsprocenten wordt onderschreden	(m)
D_{b50}	=	Korrelgrootte van de basis (zand) die door 50 gewichtsprocenten wordt onderschreden	(m)
D_{b90}	=	Korrelgrootte van het zand die door 90 gewichtsprocenten wordt onderschreden	(m)
e	=	Empirische coëfficiënt	(-)
F	=	Onderschrijdspercentage op basis van gewicht van een zekere korrelgrootte D_f (bij D_{f15} geldt: $F = 15\%$)	(%)
g	=	Zwaartekrachtsversnelling	(m/s ²)
H	=	$F_2 - F_1 =$ verschil tussen onderschrijdingspercentage bij D_f en $4D_f$	(%)
i_{cr}	=	kritieke verhang langs het grensvlak in het filter bij begin van zandtransport	(-)
i_l	=	verhang in de basis, loodrecht op het grensvlak	(-)
i_g	=	verhang in het geotextiel tijdens de doorlatendheidsmeting	(-)
k_g	=	doorlatendheidscoëfficiënt van het geotextiel bij stroming loodrecht erdoor ($k_g = q/i_g^m$)	(m/s)
m	=	Macht die in tabel 1 kan worden afgelezen	(-)
m	=	macht in doorlatendheidsrelatie van het geotextiel ($q = k_g i_g^m$)	(-)
n	=	Porositeit van het filter	(-)
n_b	=	Porositeit van de basis	(-)
O_{90}	=	Karakteristieke openingengrootte van het geotextiel (bepaald door droge zeving met gestandaardiseerde zandfracties)	(m)
q	=	specifiek debiet door het geotextiel tijdens een doorlatendheidsmeting	(m/s)
Re	=	Reynoldsgetal = $v_{fcr} D_{f15} / \nu$	(-)
T_g	=	dikte van het geotextiel	(m)
v_{fcr}	=	Kritieke filtersnelheid (bij begin van inzanding)	(m/s)
v_{fcr}	=	Filtersnelheid langs het geotextiel in het filter waarbij er nog net geen zandtransport door het geotextiel plaatsvindt	(m/s)
w	=	valsnelheid van de korrels in stilstaand water	(m/s)

SYMBOLENLIJST (vervolg)

α	= Taludhelling (positief bij stroming het talud af, negatief bij stroming het talud op)	
Δ	= Relatieve soortelijke massa van zandkorrels (= $(\rho_z - \rho)/\rho$)	(-)
ν	= Viscositeit van water	(m ² /s)
ρ	= volumieke massa van water	(kg/m ³)
ρ_z	= volumieke massa van zandkorrels	(kg/m ³)
ϕ	= Rusthoek basismateriaal (zie tabel 1)	(°)
ϕ_g	= Verval over geotextiel tijdens doorlatendheidsmeting	(m)
Ψ_s	= Shields parameter (zie tabel 1)	(-)

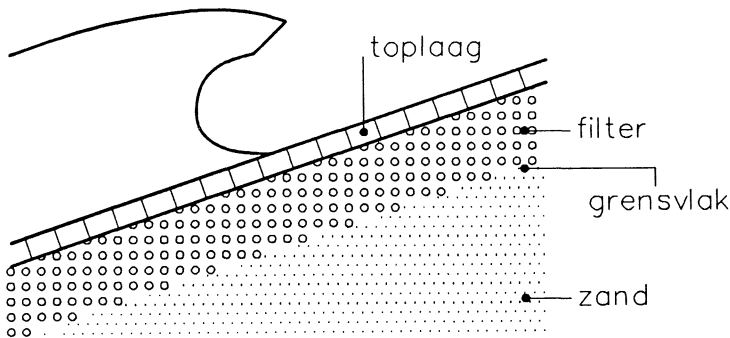
OVERZICHT VAN DE ONDERZOEKSRESULTATEN

1. Inleiding

In het kader van het fundamenteel onderzoek naar de stabiliteit van taludbekledingen van gezette steen zijn er ontwerpmethoden ontwikkeld met betrekking tot de volgende drie hoofdaspecten van de constructie:

- 1) Stabiliteit van de toplaag, behandeld in deel XX van deze reeks [1].
- 2) Ontwerpregels voor granulaire filters en geotextielen (deel XXI).
- 3) Grondmechanische stabiliteit, behandeld in deel XXII [2].

Het onderhavige verslag beschrijft het onderzoek en de resultaten met betrekking tot het tweede hoofdaspect. Dit onderzoek is uitgevoerd door WL (Waterloopkundig Laboratorium), Grondmechanica Delft en Estuary Physics in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (TAW-A2).



Figuur, Steenzetting op granulair filter

In dit rapport zijn de verslagen van zes deelstudies gebundeld, voorafgegaan door een kort overzicht van de onderzoeksresultaten in deze sectie. De volgende onderwerpen komen in de secties aan bod:

- Sectie 2 Ontwerpregels voor het grensvlak tussen granulair filter en zand.
- Sectie 3 Hydraulische criteria voor filters
- Sectie 4 Alternatief filtermateriaal
- Sectie 5 Inventarisatie van erosiedetectiemethoden
- Sectie 6 Interne stabiliteit van granulaire filters bij stationaire stroming
- Sectie 7 Zanddichtheid van geotextielen als functie van de hydraulische belasting

Onderstaand worden de resultaten van het onderzoek beschreven, waarbij deze gegroepeerd zijn naar bezwijkmechanisme.

Steenzettingen kunnen ook zonder granulair filter worden geconstrueerd, bijvoorbeeld:

- blokken direct op klei
- blokken op een geotextiel op zand
- zetting op zandasfalt of zandcementstabilisatie

Deze constructies vallen buiten het kader van dit verslag. Voor constructies bestaande uit blokken op klei kan verwezen worden naar deel XIII [9] en naar [7] en [8].

2. Inzanding van een granulair filter met zand uit de basis

In Sectie 2 wordt een uitgebreid modelonderzoek beschreven met betrekking tot de stabiliteit van het grensvlak tussen een granulair filter en de basis van zand. Hoewel het gehele onderzoek gericht was op filters onder steenzettingen, zijn de resultaten ook bruikbaar voor andere typen constructies.

Traditioneel worden filters zo ontworpen dat de poriën tussen de filterkorrels kleiner zijn dan de zandkorrels eronder. Hiermee wordt bereikt dat het zand onmogelijk in het filter kan dringen. Zo'n filter wordt "geometrisch zanddicht" genoemd.

Voor geometrisch dichte filters zijn vele ontwerpcriteria opgesteld, zoals (Stephenson and Rankilor, [3]):

$$D_{f15} < 5 D_{b50} \quad (\text{wijd gegradeerde filters, zie sectie 2}) \quad (1)$$

met:

$$D_{f15} = \text{Korrelgrootte van het filter die door 15 gewichtsprocenten wordt onderschreden} \quad (m)$$

$$D_{b50} = \text{Korrelgrootte van de basis (zand) die door 50 gewichtsprocenten wordt onderschreden} \quad (m)$$

In veel gevallen is het niet noodzakelijk geometrisch dichte filters te eisen. Als de hydraulische belasting op het grensvlak (verhang of filtersnelheid) gering is, dan zal er geen zandtransport kunnen optreden, ook al zijn de poriën in het filter groter dan de zandkorrels.

In Sectie 2 is de grootte van de toelaatbare belasting bepaald, waarbij er nog net geen inzanding van het filter optreedt. De theoretische basis voor de ontwikkelde rekenmethode is gegeven in [4] (open waterloop analogie).

In het onderzoek is geconcludeerd dat de grootte van de filtersnelheid (specifiek debiet) bepalend is voor de inzanding van het filter. Het verhang kan hieruit afgeleid worden door middel van een doorlatendheidsrelatie.

De volgende formule kan gebruikt worden voor het berekenen van de kritieke filtersnelheid, waarbij het zandtransport nog net niet op gang komt:

$$v_{\text{fcr}} = \frac{n}{e} \sqrt{\Psi_s \Delta g D_{b50} \left(\frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin(\phi)} - \frac{i_x}{\Delta (1 - n_b)} \right)} \quad (2)$$

met:

v_{fcr}	= Kritieke filtersnelheid (bij begin van inzanding)	(m/s)
n	= Porositeit van het filter	(-)
n_b	= Porositeit van de basis	(-)
e	= Empirische coëfficiënt	(-)
Ψ_s	= Shields parameter (zie tabel 1)	(-)
Δ	= Relatieve soortelijke massa van basiskorrels	(-)
g	= Zwaartekrachtsversnelling	(m/s ²)
ϕ	= Rusthoek basismateriaal (zie tabel 1)	(°)
i_l	= Verhang in de basis, loodrecht op het grensvlak	(-)
α	= Taludhelling (positief bij stroming het talud af, negatief bij stroming het talud op)	

Deze formule is ook toepasbaar bij cyclische belasting.

Op basis van modelonderzoek (Sectie 2) en theoretische overwegingen (Sectie 2 en 3) is het volgende voor de empirische coëfficiënt e opgesteld:

$$e = c \cdot Re^{-m} \quad (3)$$

met:

c	= Coëfficiënt die in tabel 1 kan worden afgelezen	(-)
m	= Macht die in tabel 1 kan worden afgelezen	(-)
Re	= Reynoldsgetal = $v_{fcr} D_{f15} / \nu$	(-)
ν	= Viscositeit van water	(m ² /s)

De formules zijn geldig als:

- Korrelgrootte van basis: $0,10 < D_{b50} < 1,0$ mm.
- Porositeit van de basis: $0,35 < n_b < 0,45$
- Verhang in zand loodrecht op talud: $i_l < 0,5$
- Taludhelling: $0,2 < \tan\alpha < 0,4$

Voor het berekenen van het kritieke verhang kan gebruik gemaakt worden van de volgende formules [10]:

$$i_{cr} = a_f v_{fcr} + b_f v_{fcr}^2 \quad (4)$$

$$a_f = \frac{160v(1-n)^2}{gn^3D_{f15}^2} \quad (5)$$

$$b_f = \frac{2,2}{gn^2D_{f15}} \quad (6)$$

met:

i_{cr} = kritieke verhang langs het grensvlak in het filter bij
begin van zandtransport (-)

a_f = lineaire weerstandscoëfficiënt van het filter (s/m)

b_f = kwadratische weerstandscoëfficiënt van het filter (s^2/m^2)

Deze formules wijken wat af van de formules die gebruikt zijn in Sectie 2. Ze zijn echter op dezelfde serie metingen gebaseerd en geven alleen bij extreme gevallen duidelijke verschillen te zien. Bovenstaande formules zijn een latere herziening ten opzichte van de formules uit Sectie 2.

Voor praktische toepassingen kan gebruik worden gemaakt van het ontwerpdiagram uit Figuur 1. In dit diagram begint men op de bovenste horizontale as waar de korrelgrootte van het filter is uitgezet (in het voorbeeld: $D_{f15} = 3,5$ mm). Vervolgens gaat men verticaal tot de lijn voor het betreffende basismateriaal wordt gekruist (in het voorbeeld: $D_{b50} = 0,15$ mm). Daarna gaat men horizontaal naar de lijn voor de porositeit van het filter, dan naar beneden naar de taludhelling en naar rechts naar de grootte van de verhangcomponent loodrecht op het grensvlak in het zand (voorbeeld: $n = 0,35$; talud 1:4; $i_1 = 0,1$). Uiteindelijk kan op de onderste horizontale as het kritieke verhang worden afgelezen. In het voorbeeld is dit $i_{cr} = 0,25$.

In de appendix van Sectie 2 is een toetsingsprocedure afgeleid waarmee met enkele eenvoudig vast te stellen kenmerken van filter en basis en een minimale inspanning een globale beoordeling van het grensvlak kan worden gemaakt. Het resultaat is samengevat in Figuur 2. Deze procedure mag uitsluitend toegepast worden op granulaire filters onder normale Nederlandse steenzettingen, omdat hierin een schatting van de optredende belasting op het grensvlak is verwerkt.

Voor een omschrijving van vele filtermaterialen kan verwezen worden naar Sectie 4.

3. Interne stabiliteit van het granulaire filter

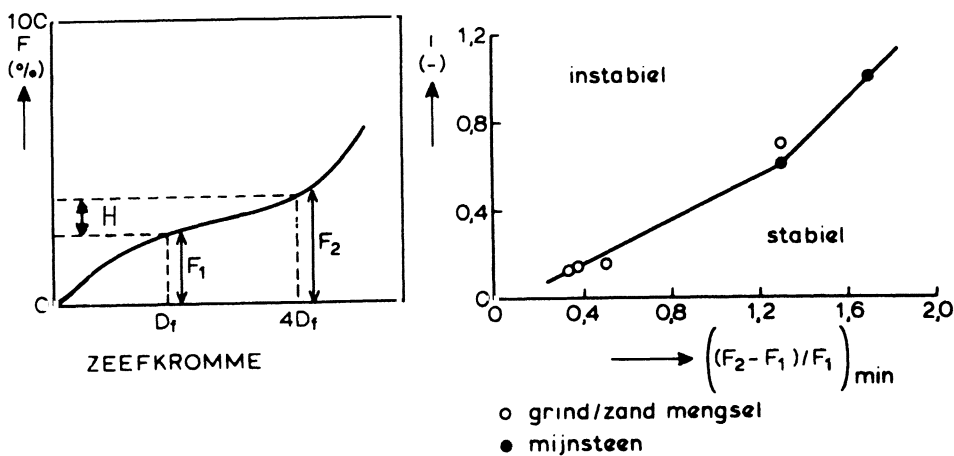
Een granulair filter met een zeer flauwe zeefkromme (breed gegradeerd) kan bij een zekere hydraulische belasting (verhang) intern instabiel worden. Dit betekent dat de fijne fractie uit het materiaal wegspoelt. Het korrelskelet, dat door de grove fractie wordt gevormd, moet hiervoor voldoende grote poriëkanalen hebben. De migratie van de fijne fractie wordt ook wel suffosie genoemd.

Bepalend voor het al dan niet optreden van interne instabiliteit bij een bepaald verhang is de vorm van de zeefkromme bij de fijne fractie (met een onderschrijdingspercentage van maximaal 20). De vorm van de zeefkromme wordt gekarakteriseerd door twee parameters:

F = Onderschrijdingspercentage op basis van gewicht van een zekere korrelgrootte D_f (bij D_{f10} geldt: $F = 10\%$) (%)

$H = F_2 - F_1$ = verschil tussen het onderschrijdingspercentage bij D_f en $4D_f$ (%)

Dit is weergegeven in onderstaande figuur.



Voor het beoordelen van de interne stabiliteit moet de grootte van D_f , waar de waarde van F wordt afgelezen, zo gekozen worden dat de verhouding H/F het kleinst is. De waarde van F moet echter kleiner dan 20% zijn. Het verhang waarbij interne instabiliteit gaat optreden (i_{cr}) blijkt volgens het modelonderzoek uit Sectie 3 afhankelijk te zijn van $(H/F)_{\min}$. De grootte van i_{cr} kan afgelezen worden in bovenstaande figuur.

Deze figuur laat ook de meetresultaten zien. De metingen zijn uitgevoerd met stationaire horizontale stroming door diverse zand-grind mengsels en door mijnsteen.

4. Zandtransport door geotextielen

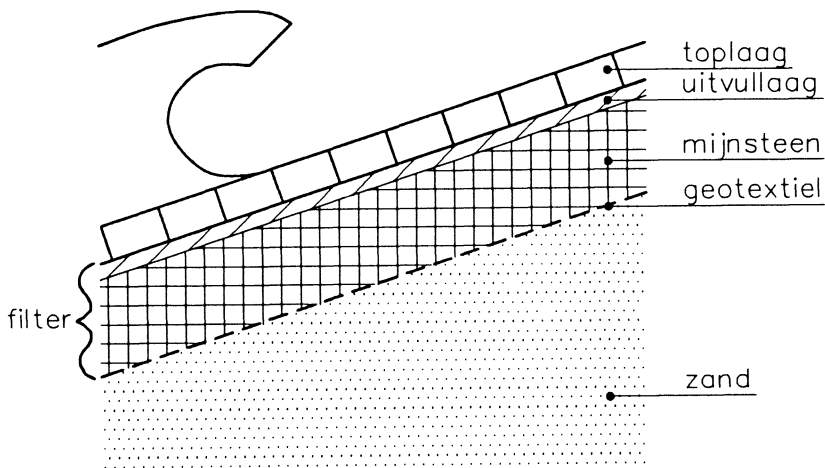
Een goede methode om een grensvlak tussen een granulair filter en een basis van zand stabiel te maken is de toepassing van een geotextiel. Als de hydraulische belasting slechts klein is, zoals meestal onder steenzettingen, is het niet nodig om een geometrisch dicht geotextiel toe te passen. Op analoge wijze als voor granulaire filters zijn in Sectie 7 formules afgeleid waarmee de kritieke filtersnelheid door het filter boven het geotextiel kan worden berekend:

$$v_{fcr} = \left(10 \left(\frac{D_{b90}}{O_{90}} \right)^4 \frac{T_g}{D_{b90}} \left(\frac{w}{k_g} \right)^{\frac{1}{2m}} + \frac{n}{e} \right) \sqrt{\Psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (7)$$

$$w = \frac{\Delta g D_{b15}^2}{18\nu} \quad (8)$$

met:

- v_{fcr} = Filtersnelheid langs het geotextiel in het filter waarbij er nog net geen zandtransport door het geotextiel plaatsvindt (m/s)
- D_{b90} = Korrelgrootte van het zand die door 90 gewichtsprocenten wordt onderschreden (m)
- O_{90} = Karakteristieke openingengrootte van het geotextiel (bepaald door droge zeving met gestandaardiseerde zandfracties) (m)
- w = valsnelheid van de korrels in stilstaand water (m/s)
- T_g = dikte van het geotextiel (m)
- k_g = doorlatendheidscoëfficiënt van het geotextiel bij stroming loodrecht erdoor ($k_g = q/i_g^m$) (m/s)
- q = specifiek debiet door het geotextiel tijdens een doorlatendheidsmeting (m/s)
- i_g = verhang in het geotextiel tijdens de doorlatendheidsmeting (-)
- m = macht in doorlatendheidsrelatie van het geotextiel ($q = k_g i_g^m$) (-)
- n = Porositeit van het filter (-)
- e = Empirische coëfficiënt (zie formule (3)) (-)
- Ψ_s = Shields parameter (zie tabel 1) (-)
- Δ = Relatieve soortelijke massa van basiskorrels (-)



Figuur, Steenzetting met geotextiel op grensvlak tussen filter en basis

Deze formules zijn geldig voor horizontale geotextielen met geweven structuur op een horizontaal zandbed met korrelgrootte $0,10 < D_{b50} < 0,20$ mm. De ervaring bij granulaire filters leert dat de kritieke filtersnelheid voor een filter op een talud 10 tot 40% lager kan zijn. Daarom wordt voor taludverdedigingsconstructies die belast worden door golven, wegens gebrek aan resultaten van modelonderzoek, voorlopig aanbevolen de met de bovenstaande formule berekende waarde te halveren.

Het kritieke verhang in het filter bij beginnend zandtransport kan berekend worden met formule (4) tot en met (6). Het kan echter ook bepaald worden met behulp van het ontwerpdiagram van Figuur 3. In dit diagram begint men op de bovenste horizontale as met de doorlatendheid van het geotextiel die is uitgezet als verhouding tussen de filtersnelheid (q) door het geotextiel en het verval (ϕ_g) erover tijdens de doorlatendheidsmeting (in het voorbeeld: $q/\phi_g = 0,7$ /s). Vervolgens gaat men verticaal tot de lijn met de betreffende verhouding van O_{90}/D_{b90} wordt gekruist (in het voorbeeld: $O_{90}/D_{b90} = 2$). Daarna gaat men horizontaal naar de lijn met de dikte van het geotextiel, dan naar beneden naar de korrelgrootte van het filter en naar rechts naar de porositeit van het filter (voorbeeld: $T_g = 1,2$ mm; $D_{f15} = 30$ mm; $n = 0,4$). Uiteindelijk kan op de onderste horizontale as het kritieke verhang worden afgelezen. In het voorbeeld is dit $i_{cr} = 0,52$.

Na afloop van het onderzoek, dat is beschreven in Sectie 7, is aanvullend modelonderzoek gedaan voor de constructie van een bodemverdediging voor een

sluis bij Helmond [6]. De bodemverdediging daar bestaat uit 50 cm stortsteen (10 - 60 kg) op een geweven geotextiel op silt:

Basis : $D_{b90} = 0,052$ mm

$D_{b50} = 0,030$ mm

$D_{b15} = 0,008$ mm

Stortsteen: $D_{f15} \approx 200$ mm

Geotextiel: $T_g = 1,37$ mm (mat/bandjesweefsel van 322 gr/m²)

$O_{90} = 0,250$ mm

$O_{98} = 0,300$ mm

$k_g = 1,2$ mm/s

$m = 0,75$

Tijdens de uitvoering van de proef bleek de onderzoeksfaciliteit een onvoldoende hoge filtersnelheid te kunnen produceren. Het begin van beweging, zoals dat gedefinieerd is op een materiaaltransport van 2 gr/s/m (zie Sectie 2) kon daardoor niet worden gehaald. Bij de maximale filtersnelheid van $v_f = 400$ mm/s en verhang van $i = 0,23$ trad een zeer klein transport op ter grootte van $s = 0,03$ gr/s/m.

Deze basis van silt is te fijn om er de ontwerpformules op te mogen toepassen. Wordt dit toch gedaan, dan wordt een veel lagere kritieke filtersnelheid gevonden, onder meer vanwege de cohesie tussen de korrels die niet in de formules is verdisconteerd.

REFERENTIES

1. M. Klein Breteler e.a.
Taludbekledingen van gezette steen
Stabiliteit van de toplaag
Waterloopkundig Laboratorium en Grondmechanica Delft
Verslag M1795/H195 deel XX; CO 285453/7; april 1992
2. P. Meijers e.a.
Taludbekledingen van gezette steen
Grondmechanische stabiliteit in de golfzone
Waterloopkundig Laboratorium en Grondmechanica Delft
Verslag M1795/H195 deel XXII, band A; CO 272511; maart 1991
3. J.C. Huis in het Veld e.a.
The closure of tidal basins
Delft University Press, 1984
4. M. Klein Breteler
Erosie in granulaire filters
Open waterloop analogie
Appendix 3 uit [5]
5. F.C.M. van der Knaap, M. Klein Breteler en M.T. de Groot
Taludbekledingen van gezette steen
Belasting en sterkte van zetsteenverdedigingsconstructies op oevers en dijken
Waterloopkundig Laboratorium en Grondmechanica Delft
Verslag M1795/M1881 deel XVI; CO 416409/4; aug. 1985
6. M. Klein Breteler and H.J. Verhey
Erosion control by hydrodynamically sandtight geotextiles
Delft Hydraulics, publication no 446, dec. 1990
7. J.A. Muijs
Klei, bestekseisen tbv constructie en uitvoering
Overzicht huidige kennis en onderzoeksvoorstel
Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, rapport S-81.023, okt. 1984.

REFERENTIES (vervolg)

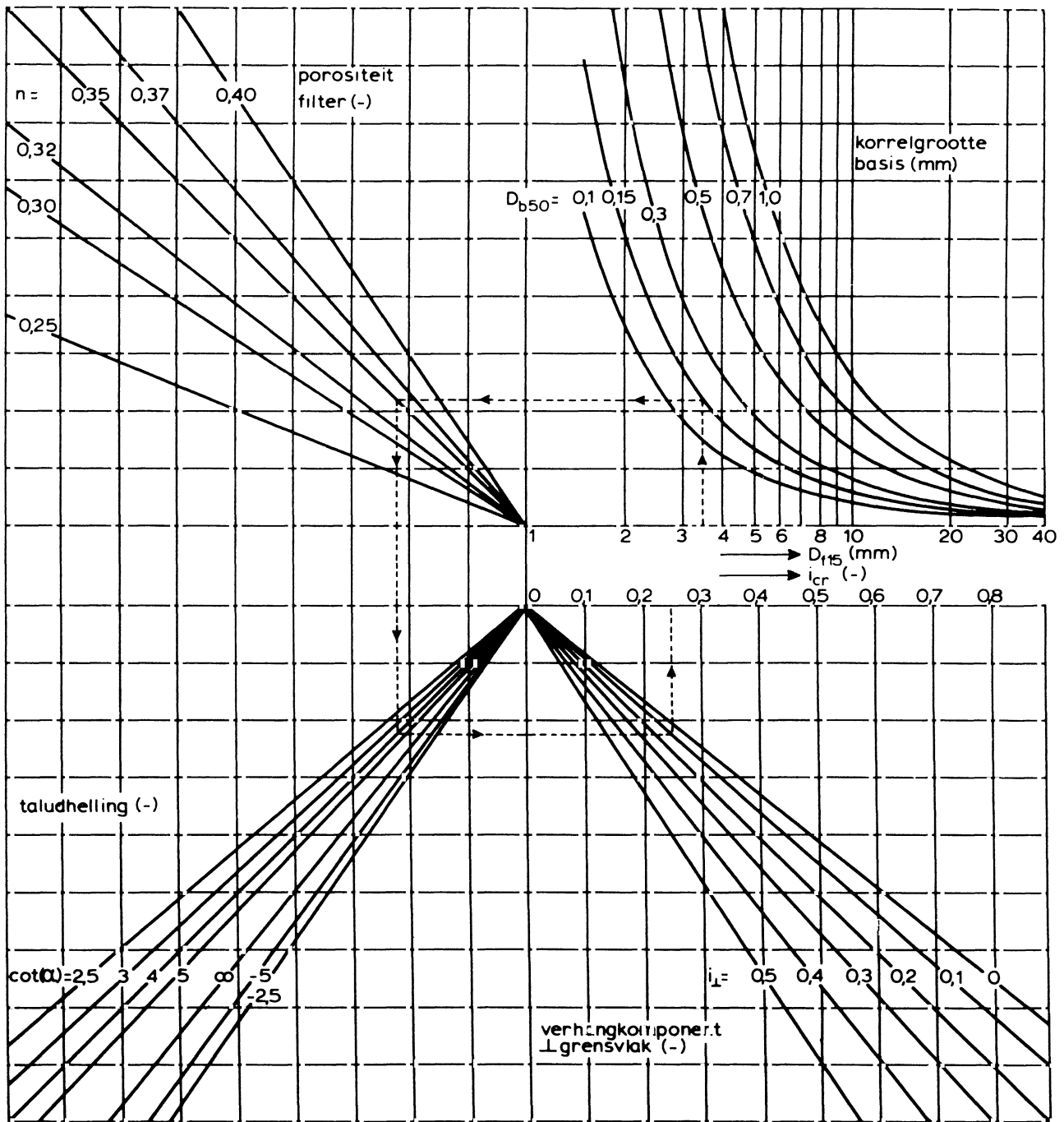
8. Rijkswaterstaat Directie Zeeland
Klei onder steenzettingen voor Oesterdam en Philipsdam
Werkgroep klei, Eindrapport, December 1985

9. Waterloopkundig Laboratorium en Grondmechanica Delft
Taludbekledingen van gezette steen
Klei onder steenzettingen
Verslag M1795/M1881 deel XIII; CO 258901/176; febr. 1985

10. M. Klein Breteler e.a.
Taludbekledingen van gezette steen
Doorlatendheid van toplaag en filter en berekening van lek lengte
Waterloopkundig Laboratorium en Grondmechanica Delft
Verslag M1795/H195 deel XVIII, jan. 1990

D_{b50} (mm)	c (-)	m (-)	Ψ_s (-)
0,1	1,18	0,25	0,11
0,15	0,78	0,20	0,073
0,2	0,71	0,18	0,055
0,3	0,56	0,15	0,044
0,4	0,45	0,11	0,038
0,5	0,35	0,07	0,036
0,6	0,29	0,04	0,034
0,7	0,22	0	0,034
0,8	0,22	0	0,034
1,0	0,22	0	0,035

Tabel 1 Parameters in formule voor de kritieke filtersnelheid
(mits $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6}$; $\Delta = 1,65$; $g = 9,8 \text{ m/s}^2$)

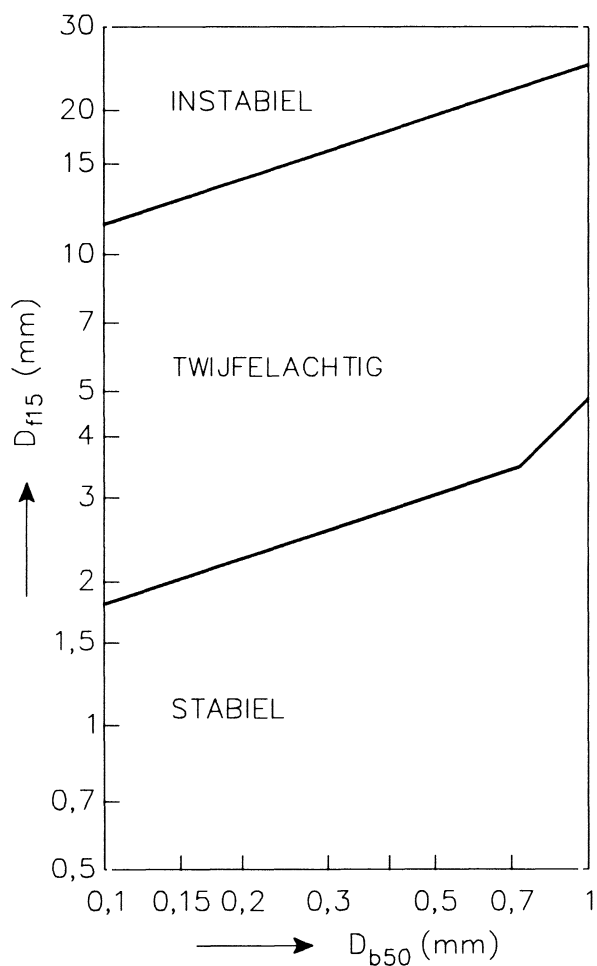


$\cot(\alpha) < 0 \Rightarrow$ stroming het talud op

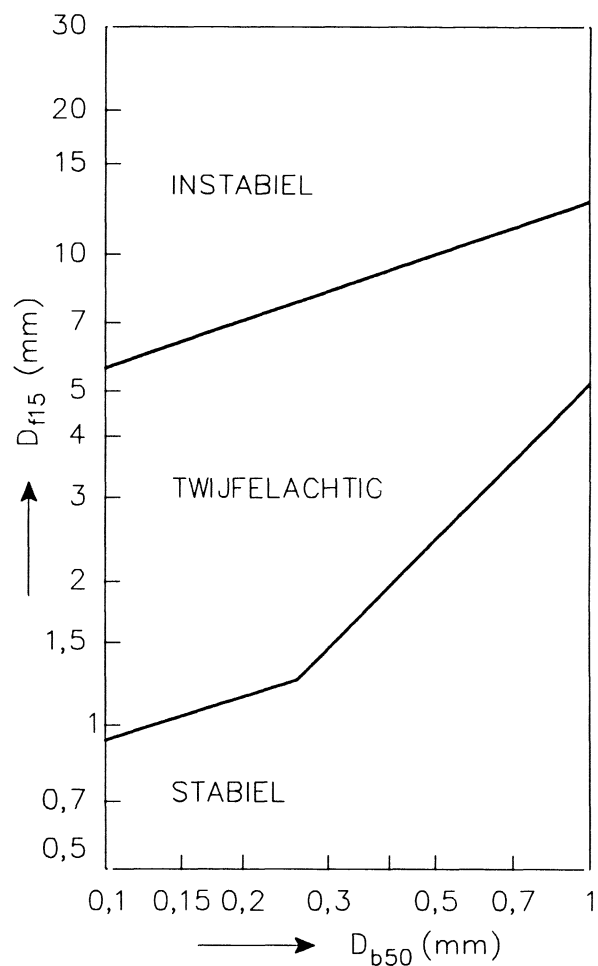
voorbeeld: $D_{15} = 3,5 \text{ mm}$
 $D_{b50} = 0,15 \text{ mm}$
 $n = 0,35$
 $\cot(\alpha) = 4$
 $i_L = 0,1$ } $\Rightarrow i_{cr} = 0,25$

ONTWERPDIAGRAM VOOR GRANULAIRE FILTERS
 $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; \Delta = 1,65; g = 9,8 \text{ m/s}^2; \Delta(1 - n_b) = 1$



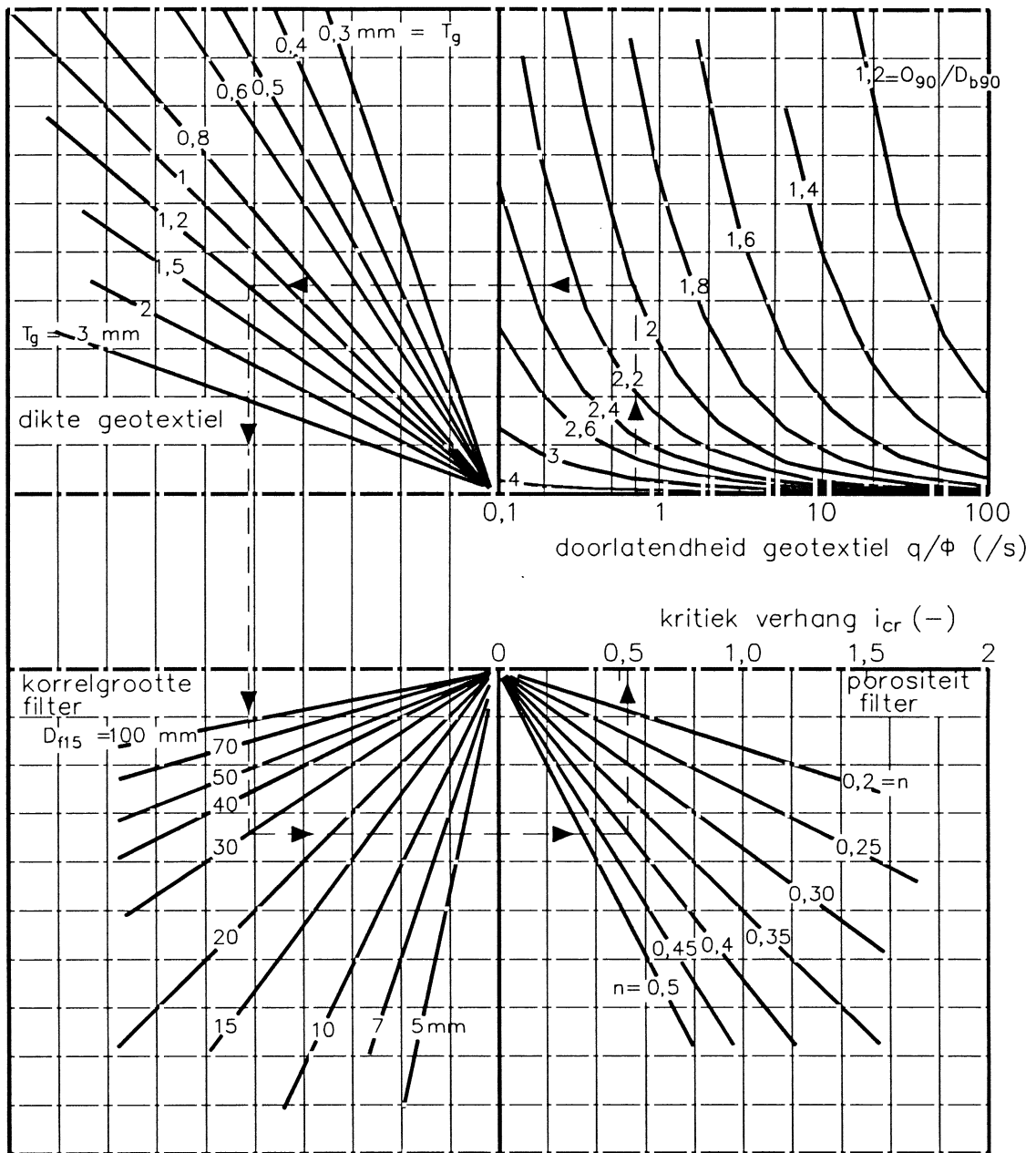


a. breed gegradeerd filtermateriaal (zoals mijnsteen)



b. filtermateriaal met steile zeefkromme (zoals steenslag)

NB: Alleen toepasbaar op filters onder steenzetting onder normale nederlandse omstandigheden



Voorbeeld: $q/\phi = 0,7$ /s
 $0_{90}/D_{b90} = 2$
 dikte $T_g = 1,2$ mm
 filter op geotextiel: $D_{f15} = 30$ mm
 $n = 0,4$

} $i_{cr} = 0,52$

KRITIEK VERHANG VOOR GRENSVLAK MET GEOTEXTIEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 3

SECTIE 2

Ontwerpregels voor het grensvlak tussen granulair filter en basis

Inhoud

Symbolenlijst

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
2. <u>Samenvatting en konklusies</u>	4
3. <u>Inventarisatie filterkonstrukties en belastingen</u>	7
3.1 Algemene opbouw van onderlagen	7
3.2 Toegepaste konstrukties	8
3.3 Belasting	9
4. <u>Theoretische achtergrond</u>	13
5. <u>Stationaire stroming langs horizontaal grensvlak</u>	19
5.1 Weinig gegradeerde filters	19
5.1.1 Modelonderzoek	19
5.1.2 Analyse van de resultaten	20
5.2 Wijd gegradeerde filters	25
6. <u>Stationaire stroming langs een hellend grensvlak</u>	28
6.1 Modelonderzoek	28
6.2 Analyse van de resultaten	29
7. <u>Stationaire stroming langs en loodrecht op een horizontaal grensvlak</u>	32
7.1 Modelonderzoek	32
7.2 Analyse van de resultaten	34
8. <u>Cyclische stroming langs horizontaal grensvlak</u>	37
9. <u>Doorlatendheid bij cyclische stroming</u>	39
10. <u>Cyclische stroming door hellend grensvlak</u>	40
10.1 Modelopstelling	40
10.2 Resultaten	41
10.3 Analyse van de resultaten	44

Inhoud (vervolg)

11.	<u>Vergelijking met andere onderzoeken</u>	47
11.1	M.A. Koenders: Hydraulic criteria for filters [19]	47
11.2	T.v.d. Meulen: Granulaire filters, stroming evenwijdig aan grensvlak [1]	50
11.3	J. Brauns: Erosionverhalten geschichteten Bodens bei hor. Durchströmung [2]	51
11.4	D.B. Simons: Hydraulic test to develop design criteria for the use of Reno mattresses [20]	52
11.5	D. Stephenson: Rockfill in hydraulic engineering [21]	53
12.	<u>Ontwerprichtlijn</u>	55

Referenties

Tabel 1 tot en met 11

Figuur 1 tot en met 53

APPENDIX 1: Globale toetsing van grensvlak tussen granulair filter en basis

Symbolenlijst

a_f	coëfficiënt uit doorlatendheidsformule van Forchheimer (s/m)
b_f	coëfficiënt uit doorlatendheidsformule van Forchheimer (s^2/m^2)
b	dikte filterlaag (m)
c	constante (-)
C_d	weerstandskoefficiënt (-)
D	dikte toplaag (m)
D_{f15}	korrelgrootte van filtermateriaal die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden (m)
D_{b50}	korrelgrootte van basismateriaal die door 50% op basis van gewicht wordt onderschreden (m)
C	coëfficiënt van Chezy ($m^{1/2}/s$)
e	quotient van schuifspanningssnelheid en porie-snelheid bij het grensvlak (-)
Fr_{cr}	Froude-getal bij begin van beweging (-)
$F_{//}$	stromingskracht op korrel evenwijdig aan grensvlak (N)
F_{\perp}	stromingskracht op korrel loodrecht op grensvlak (N)
F_g	zwaartekracht op korrel (N)
g	zwaartekrachtversnelling (m/s^2)
i	verhang (-)
i_{cr}	verhang bij begin van beweging van zand (-)
i_{\perp}	verhang in basis loodrecht op grensvlak (-)
\bar{i}	in de tijd gemiddeld verhang (-)
f	verhangamplitude (-)
i_{cra}	i_{cr} als $\alpha \neq 0$ (-)
i_{cro}	i_{cr} als $\alpha = 0$
$i_{cr//\perp}$	i_{cr} als $i_{\perp} \neq 0$ (-)
$i_{cr//}$	i_{cr} als $i_{\perp} = 0$
k	doorlatendheidscoëfficiënt van filter (m/s)
k'	toplaagdoorlatendheid (m/s)
m	macht (-)
n	porositeit van filter (-)
n_b	porositeit van basis (-)
r	ruwheidsparameter van Manning ($m^{1/6}$)
R	hydraulische straal (m)
Re	Reynoldsgetal ($= D_{f15} \cdot v_f / \nu$) (-)

Symbolenlijst (vervolg)

s	zandtransport (kg/ms)
T	golfperiode (s)
U	snelheid bij grensvlak, buiten de grenslaag (m/s)
u	snelheid (m/s)
v_f	filtersnelheid (m/s)
v_{fcr}	filtersnelheid bij begin van beweging van zand (m/s)
v_*	schuifspanningssnelheid
v_{*cr}	v_* bij begin van beweging van zand (m/s)
\bar{v}	over het doorstroomprofiel gemiddelde snelheid in een open waterloop (m/s)
\bar{v}_f	in de tijd gemiddelde filtersnelheid (m/s)
\hat{v}	filtersnelheidsamplitude (m/s)
v_p	porie-snelheid in filter (m/s)
$v_{fcr \alpha}$	v_{fcr} als $\alpha \neq 0$ (m/s)
v_{fcro}	v_{fcr} als $\alpha = 0$ (m/s)
$v_{fcr//\perp}$	v_{fcr} als $i_{\perp} \neq 0$ (m/s)
$v_{fcr//}$	v_{fcr} als $i_{\perp} = 0$ (m/s)
v_e	porie-snelheid bij begin van beweging (m/s)
y	koördinaat langs het talud omhoog (m)
z_1	hoogte freatische lijn in filter (m)
α	taludhelling ($^{\circ}$)
β	hoek van golffront ($^{\circ}$)
Δ	relatieve soortelijke massa zandkorrels ($= (\rho_s - \rho)/\rho$) (-)
λ	lekhoogte (m)
ν	viscositeit van water (m^2/s)
ρ	soortelijke massa van water (kg/m^3)
ρ_s	soortelijke massa van zandkorrels (kg/m^3)
τ	schuifspanning (N/m^2)
τ_{cr}	schuifspanning bij begin van beweging (N/m^2)
ϕ	rusthoek basismateriaal ($^{\circ}$)
ϕ	stijghoogte in filter (m)
ϕ_b	stijghoogte op het talud als $y \ll 0$ (m)
ψ_s	Shields parameter (-)

ONTWERPREGELS VOOR HET GRENSVLAK TUSSEN GRANULAIR FILTER EN BASIS

1. Inleiding

Het merendeel van de dijkbekledingen van gezette steen worden gefundeerd op één of meer lagen granulair materiaal. Deze lagen, die hier aangeduid worden als filter, vervullen in de konstruktie enkele belangrijke funkties, zoals:

- vermindering van erosie van het dijklichaam
- fundatie voor de top laag
- demping en spreiding van de golfbelasting.

In deze studie is de aandacht gericht op het grensvlak tussen het dijklichaam van zand (= basis) en het filter. Er dreigt hier transport (uitspoeling) van basismateriaal dat op den duur kan leiden tot onakseptabele erosie van de basis.

Het erosie probleem is eenvoudig op te lossen door toepassing van een geometrisch dicht filter. Dit is een filter met poriën die kleiner zijn dan de korrels van het basismateriaal, zodat de basis alleen al vanwege geometrische beperkingen niet in het filter kan binnendringen. In [22] is een overzicht gegeven van de in het verleden ontwikkelde criteria voor dergelijke filters:

Stephenson en Rankilor (wijd gegradeerd filter):

$$D_{f15} < 5 \cdot D_{b85} \quad (1.1)$$

de Graauw e.a. (bijna uniform filter en basis):

$$D_{f50}/D_{b50} < 3 \text{ à } 5 \quad \text{of:} \quad n \cdot D_{f15}/D_{b50} < 1 \text{ à } 1,6 \quad (1.2)$$

(waarbij $D_{f50}/D_{b50} < 5$ en $n \cdot D_{f15}/D_{b50} < 1,6$ alleen toepasbaar is op stationaire stroming)

Kawakami & Esashi:

$$\log(D_{f10}/D_{b10} - 2) < 1,9/\log(10^6 \cdot D_{b10} - 1) \quad (1.3)$$

met: $D_{f x}$ = korrelgrootte van filtermateriaal die door $x\%$ op basis van gewicht wordt onderschreden (m)

$D_{b x}$ = korrelgrootte van basismateriaal die door $x\%$ op basis van gewicht wordt onderschreden (m)

n = porositeit van filter (-)

Worden bovenstaande criteria toegepast voor de dimensionering van een filter op een basis met $D_{b10} = 0,10$ mm, $D_{b50} = 0,15$ mm en $D_{b85} = 0,18$ mm, dan leidt dit tot de volgende eisen:

Stephenson en Rankilor: $D_{f15} < 0,9$ mm

de Graauw e.a.: $D_{f50} < 0,5$ mm of $D_{f15} < 0,4$ mm

Kawakami & Esashi: $D_{f10} < 1,1$ mm

In Nederland komt het in dit voorbeeld gebruikte basismateriaal veelvuldig in de kern van dijken voor. Met bovenstaande criteria zou een filtermateriaal als mijnsteen, dat door z'n lage prijs veel onder steenzettingen wordt toegepast, niet geschikt zijn. Mijnsteen heeft namelijk een D_{f15} die meestal groter is dan 2 mm. Dat mijnsteen onder een steenzetting toch zeer geschikt is, is een gevolg van het feit dat de hydraulische belasting (verhang, filtersnelheid) bij het grensvlak tussen filter en basis zó gering is, dat de basis niet erodeert, ondanks dat de poriën in de mijnsteen groter zijn dan de basiskorrels. De lage belasting maakt het mogelijk niet-geometrisch dichte filters toe te passen, die erosie verhinderen tot een zekere kritieke belasting.

Het doel van het onderzoek is om antwoord te geven op de vraag bij welke belasting nabij het grensvlak er begin van beweging van zand optreedt. Het is een voortzetting van het onderzoek van de Graauw, v.d. Meulen en anderen ([13], [1] etc.) dat onder andere is uitgevoerd in het kader van de Oosterschelde-werken.

Door alleen naar de belasting nabij het grensvlak te kijken en door niet naar de gevolgen van het beginnende zandtransport op de eigenschappen van het filter te letten, valt de invloed van de dikte van het filter buiten het kader van dit onderzoek. Met de resultaten van dit onderzoek kan deze invloed wel voor een belangrijk deel verdisconteerd worden als de belasting nabij het grensvlak bepaald wordt met een (reken-) methode die rekening houdt met de filterlaagdikte (zoals Steenzet II).

De belasting is op te splitsen in een aantal aspecten, die in dit verslag afzonderlijk aan de orde komen:

- stationaire stroming langs een horizontaal grensvlak
- stationaire stroming langs een hellend grensvlak
- stationaire stromingskomponent loodrecht op het grensvlak in combinatie met stroming langs grensvlak
- cyclische stroming

Voor een argumentatie bij deze splitsing wordt verwezen naar [6], waar de problematiek meer vanuit theoretisch oogpunt is bekeken.

De studie is beperkt gebleven tot basismateriaal met korrelgrootte (D_{b50}) tussen 0,1 mm en 1 mm.

Dit onderzoek is uitgevoerd onder leiding van ir. M. Klein Breteler, die met ir. J. Kollen (hoofdstuk 10) ook dit verslag samengesteld heeft. Het is uitgevoerd in opdracht van de Dients Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat in het kader van het onderzoek naar de stabiliteit van taludbekledingen van gezette steen.

2. Samenvatting en konklusies

Aansluitend op de theoretische beschouwing over erosie van basismateriaal (zand) onder een granulair filter in [6] is met behulp van modelonderzoek een toetsing uitgevoerd van een formule voor de kritieke filtersnelheid langs het grensvlak. De formule bevat de volgende invloeden:

- taludhelling van het grensvlak
- stromingskomponent loodrecht op het grensvlak
- cyclische stroming

Hierdoor is toepassing op een filter onder een dijkbekleding van gezette steen mogelijk.

De volgende formule voor de kritieke filtersnelheid bij begin van beweging van basismateriaal is afgeleid voor het geval dat $0,1 < D_{b50} < 1$ mm:

$$v_{fcr} = \frac{n}{e} \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50} \left(\frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin \phi} - \frac{i_{\perp}}{\Delta \cdot (1 - n_b)} \right)} \quad (2.1)$$

- met: n = porositeit van het filter (-)
 e = empirische koëfficiënt (-)
 ψ_s = parameter van Shields (zie figuur 5)
 Δ = relatieve soortelijke massa van basis materiaal
 (= $(\rho_s - \rho)/\rho$) (-)
 ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)
 ρ_s = soortelijke massa van basismateriaal (kg/m^3)
 v_{fcr} = filtersnelheid bij begin van beweging (m/s)
 g = zwaartekrachtversnelling (m/s^2)
 D_{b50} = korrelgrootte van basismateriaal dat door 50% van de korrels op basis van gewicht wordt onderschreden (m)
 ϕ = rusthoek basismateriaal ($^{\circ}$)
 α = taludhelling ($^{\circ}$)
 i_{\perp} = verhang in basis, loodrecht op het grensvlak (-)
 n_b = porositeit van basis (-)

De koëfficiënt e en de rusthoek ϕ zijn empirisch bepaald:

$$e = c \cdot Re^{-m} \quad (2.2)$$

$$Re = \frac{D_{f15} v_{fcr}}{\nu} \quad (2.3)$$

D_{f15} = korrelgrootte van het filtermateriaal die door 15% van de korrels op basis van gewicht wordt onderschreden (m)

ν = kinematische viscositeit van water (m²/s)

Re = Reynoldsgetal

D_{b50} mm	c	m	ψ_s
	-	-	-
0,1	1,18	0,25	0,11
0,15	0,78	0,20	0,073
0,2	0,71	0,18	0,055
0,3	0,56	0,15	0,044
0,4	0,45	0,11	0,038
0,5	0,35	0,07	0,036
0,6	0,29	0,04	0,035
0,7	0,22	0	0,034
0,8	0,22	0	0,034
1,0	0,22	0	0,035

(als $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6}$ m²/s, $\Delta = 1,65$, $g = 9,8$ m/s²)

Met behulp van een doorlatendheidsformule van granulair materiaal (Forchheimer [14]) is formule (2.1) omgewerkt tot een formule voor het kritieke verhang. Het resultaat is samengevat in een ontwerp-diagram (zie figuur 53).

Formule (2.1) is uitvoerig door middel van modelonderzoek in de faciliteiten van het Waterloopkundig Laboratorium geverifieerd. Hierbij zijn de volgende belastingsomstandigheden bekeken:

- stationaire stroming langs een horizontaal grensvlak
- stationaire stroming langs een hellend grensvlak
- stationaire stroming langs een horizontaal grensvlak gekombineerd met een verticale stromingskomponent
- cyclische stroming langs horizontaal grensvlak
- praktijksituatie: cyclische stroming langs hellend grensvlak met verticale stromingskomponent.

De verifikatie is grotendeels uitgevoerd met zand en grind met een steile zeefkromme. Voor dit materiaal is gekonkludeerd dat de formule betrouwbaar is en veilige resultaten oplevert, vooral met betrekking tot de verticale stromingskomponent.

De formule is tevens getoetst voor wijd gegradeerd filtermateriaal. Gekonkludeerd kan worden dat de afgeleide formules ook voor die filtermaterialen gebruikt kunnen worden. De gekonstateerde verschillen tussen metingen en berekeningen zijn voor een belangrijk deel te verklaren uit de spreiding in de meetresultaten zelf.

Om het beeld van de filterkonstrukties onder steenzetting volledig te maken is in hoofdstuk 3 een inventarisatie gegeven van de opbouw van de onderlagen. Tevens is een afschatting gegeven van de belasting in de onderlagen op basis van de analytische benadering van de stroming in een filter onder een steenzetting, belast door golven [10].

Het onderzoek heeft geresulteerd en een praktische ontwerprichtlijn met een breed toepassingsgebied. Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 12.

3. Inventarisatie filterkonstrukties en belastingen

3.1. Algemene opbouw van onderlagen

Onder een toplaag van gezette steen worden meestal één of meerdere lagen granulair materiaal, al of niet in combinatie met kunstofweefsel, toegepast. Deze lagen tussen toplaag en ondergrond (basis) worden onderlagen genoemd.

In figuur 1 en 2 zijn vijf veel voorkomende konstrukties getekend [8]. De eerste wordt zo nog veel aangetroffen, maar niet meer zo gebouwd. De stortlaag van baksteenpuin is mede nodig om de ongelijke hoogte van basalt op te vangen. Bij het herzetten van deze konstruktie met Basalton is men gebonden aan het gebruik van puin of ander grof materiaal, omdat fijner materiaal (grind of steenslag) verdwijnt in de holle ruimten tussen het nog aanwezige puin. Dit veroorzaakt nazakkingen.

Konstruktie 2 is de moderne variant van konstruktie 1. Bij toepassing van basalt moet de uitvullaag (grind of steenslag) minimaal 10 cm dik zijn om de ongelijke hoogte van de basaltzuilen op te vangen. Bij betonzuilen (zoals Basalton) of rechthoekige blokken hoeft dit niet en volstaat men met 5 à 8 cm grind zodat door het belopen tijdens het zetten het klei-oppervlak niet hobbelig wordt.

Een konstruktie die zeer veel voorkomt is konstruktie 3. Als geen geotextiel is toegepast, is de laag mijnsteen meestal ongeveer 80 à 100 cm dik. Met een geotextiel past men een laag van 50 à 60 cm toe. Is het talud steiler dan 1:3 dan is grind op de mijnsteen minder gewenst, omdat dit dan de neiging heeft te gaan rollen. Men gebruikt dan veelal steenslag.

Konstruktie 4 is gelijk aan konstruktie 3, behalve dat de laag mijnsteen vervangen is door gebitumineerd zand. Meestal blijkt het in de praktijk zeer moeilijk te zijn de bovenkant van het gebitumineerde zand glad af te werken. Het is dan noodzakelijk om een tussenlaag van grind of steenslag toe te passen.

Konstruktie 5 is een zeer eenvoudige en daardoor goedkope konstruktie die met succes langs de Nieuwe Waterweg is toegepast.

Ten aanzien van een kostenvergelijking van bovenstaande konstrukties kan het volgende opgemerkt worden. Steenslag is inclusief vervoer en verwerking orde 30% à 35% duurder dan mijnsteen. Grind is weer iets goedkoper dan steenslag.

Afhankelijk van het type en de kwaliteit is een geotextiel ongeveer even duur als een laag steenslag (inclusief vervoer en verwerking) van ongeveer 10 cm dikte. De kosten van de verwerking van reeds in het werk aanwezige klei zijn verwaarloosbaar. Is in het te maken werk geen klei beschikbaar, dan kan het leveren en verwerken ervan bijna even duur worden als mijnsteen. Gekonkludeerd kan worden dat konstruktie 2 duidelijk goedkoper is dan de anderen, mits er klei aanwezig is.

3.2 Toegepaste konstrukties

Met behulp van de gegevens die door het COW [9] zijn verzameld ten behoeve van een inventarisatie van bestaande overgangskonstrukties is voor dit onderzoek een tabel opgesteld die voor een aantal nederlandse zeedijken de opbouw van toplaag en onderlagen weergeeft (zie tabel 1). In de tabel zijn totaal 41 dijkvakken opgenomen met een gezamenlijke lengte van 100 à 150 km, die gezien kunnen worden als een onbepaalde steekproef uit de nederlandse zeedijken. De benodigde informatie bleek vaak moeilijk te achterhalen. Daarom is het niet alleen in de tabel opgenomen als de informatie zeker juist is, maar ook als er een sterk vermoeden bestond.

Het eerste deel van tabel 1 bevat informatie over de toplaag. Hier is de dikte (in cm) en het soort weergegeven. Als de dikte onbekend is, dan is een kruisje in de kolom van de betreffende soort toplaag gezet.

Met een tussenlaag (tussen toplaag en filterlaag) wordt een dunne (5 tot 20 cm dik) uitvullaag bedoeld die dient om oneffenheden in de filterlaag of dikte verschillen in de toplaag op te vangen. In de tabel is de laagdikte in m gegeven en de maat (korrel grootte grootste en kleinste korrelfractie) in mm. Met de tussenlaag tussen filter en ondergrond is de laag bedoeld die moet voorkomen dat de ondergrond uitspoelt.

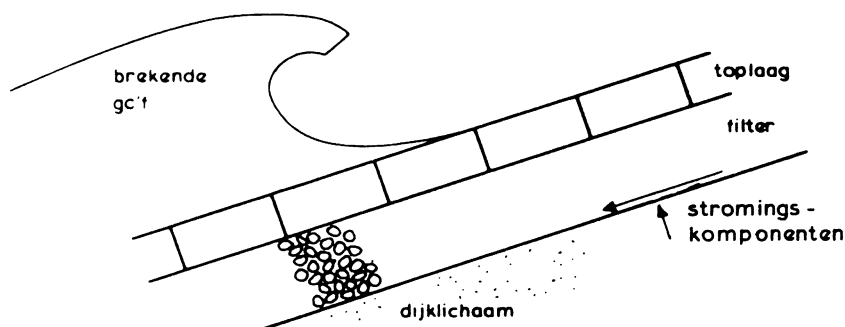
De tabel besluit met wat algemene informatie: de hoogte van de betreffende dijkbekleding ten opzichte van het stormvloedpeil, de taludhelling, de hoogte van gemiddeld hoog water ten opzichte van het stormvloedpeil, de lengte van het dijkvak en de provincie waarin de dijk ligt.

De dijkvakken of delen daarvan die een andere toplaag dan gezette steen hebben zijn niet in de tabel opgenomen.

Voor het onderzoek met betrekking tot onderlagen is het scheidingsvlak op de ondergrond van zand van belang. Met tabel 1 kan gekonkludeerd worden dat er meestal een afvalprodukt (zoals mijnsteen, grof puin, etc.) of klei op ligt. Minder vaak is een vlijlaag van baksteen of een geotextiel toegepast. Nog maar zelden is een dunne laag steenslag of zandasfalt gebruikt. Op klei is in Zeeland vaak gelijk de toplaag aangebracht (boven GHW). Daarnaast wordt er ook nog wel een tussenlaag van steenslag toegepast, hetgeen in andere provincies meer gebruikelijk is.

3.3 Belasting

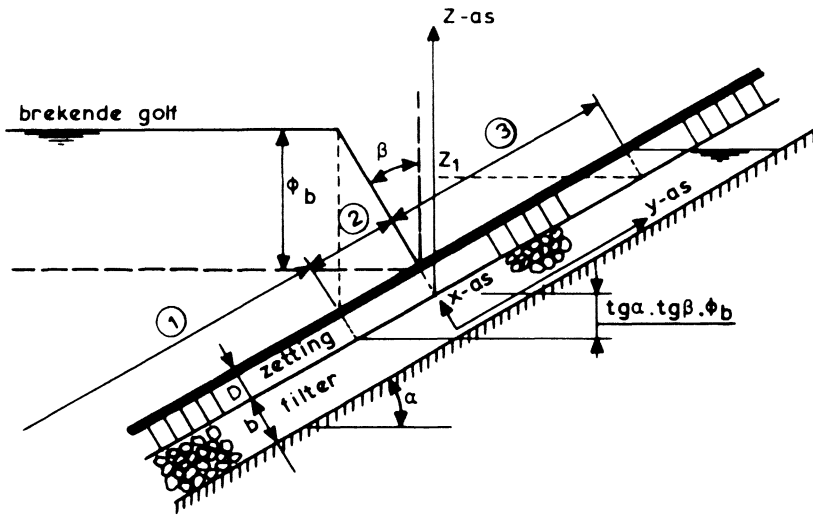
De belasting van het grensvlak filter/basis bestaat uit een stromingskomponent in het filter evenwijdig aan het talud en een in de basis loodrecht op het talud:



Beide componenten worden verondersteld niet stationair te zijn.

De belasting op het grensvlak is numeriek te bepalen met behulp van het programma Steenzet II. Dit programma berekent zowel het verhang evenwijdig aan het grensvlak als er loodrecht op.

Een redelijke schatting van het verhang evenwijdig aan het grensvlak is te geven met de (analytische) formule van Wolsink. In [10] is afgeleid dat de stijghoogte onder een homogeen doorlatend veronderstelde toplaag, aannemende dat in het filter een één dimensionale stroming heerst, berekend kan worden uit de volgende formules:



Doorsnede over de steenzetting met brekende golf

$$\text{gebied 1: } \phi = A e^{y \sin \alpha / \lambda} + \phi_b \quad (3.1)$$

$$\text{gebied 2: } \phi = C e^{y \sin \alpha / \lambda} + E e^{-y \sin \alpha / \lambda} - y \cos \alpha / \text{tg} \beta \quad (3.2)$$

$$\text{gebied 3: } \phi = F \left(-e^{(-2z_1 + y \cdot \sin \alpha) / \lambda} + e^{-y \sin \alpha / \lambda} \right) + y \cdot \sin \alpha \quad (3.3)$$

$$\text{met: } E = \frac{-\lambda}{2 \text{tg} \alpha \text{tg} \beta} e^{-\text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta \cdot \phi_b / \lambda} \quad (3.4)$$

$$F = \frac{\lambda}{2 \text{tg} \alpha \text{tg} \beta} \left(-e^{-\text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta \cdot \phi_b / \lambda} + 1 \right) + \frac{1}{2} \lambda \quad (3.5)$$

$$C = -E + F \left(-e^{-2z_1 / \lambda} + 1 \right) \quad (3.6)$$

$$A = C + E e^{2 \text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta \cdot \phi_b / \lambda} \quad (3.7)$$

k = doorlatendheid filter

y = coördinaat langs talud (m)

α = taludhelling (°)

β = hoek van golf front (°)

ϕ_b = stijghoogte op talud als $y \ll 0$ (m)

ϕ = stijghoogte in filter (m)

λ = lekhoogte (m) = $\sin \alpha \sqrt{kbD/k'}$

D = dikte toplaag (m)

z_1 = hoogte freatische lijn (m)

k' = doorlatendheid toplaag (m/s)

Met bovenstaande formules is het verhang in het filter te berekenen:

$$\text{gebied 1: } \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{A \sin \alpha}{\lambda} e^{y \cdot \sin \alpha / \lambda} \quad (3.8)$$

$$\text{gebied 2: } \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{C \sin \alpha}{\lambda} e^{y \cdot \sin \alpha / \lambda} - \frac{E \sin \alpha}{\lambda} e^{-y \cdot \sin \alpha / \lambda} - \frac{\cos \alpha}{\text{tg} \beta} \quad (3.9)$$

$$\text{gebied 3: } \frac{\partial \phi}{\partial y} = - \frac{F \sin \alpha}{\lambda} \left(e^{(-2z_1 + y \cdot \sin \alpha) / \lambda} + e^{-y \cdot \sin \alpha / \lambda} \right) + \sin \alpha \quad (3.10)$$

De begrensing van elk gebied is als volgt:

$$\text{gebied 1: } y < -\text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta \cdot \phi_b / \sin \alpha \quad (3.11)$$

$$\text{gebied 2: } -\text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta \cdot \phi_b / \sin \alpha < y < 0 \quad (3.12)$$

$$\text{gebied 3: } 0 < y < z_1 / \sin \alpha \quad (3.13)$$

Met formule (3.4) t/m (3.10) is voor twee konkrete gevallen het verhang in het filter berekend. Het resultaat van de berekeningen is grafisch weergegeven in figuur 3.

Uit deze figuur blijkt dat het grootste neerwaarts gerichte verhang vlak onder de freatische lijn in het filter te vinden is. Met formule (3.10) is in te zien dat dit verhang niet groter dan $\sin \alpha$ kan worden.

Het grootste opwaarts gerichte verhang ontstaat onder het golfvront. Gezien het feit dat de eerste twee termen uit formule (3.9) altijd positief zijn (want $C > 0$ en $E < 0$), kan het grootste opwaarts gerichte verhang nooit groter dan $\cos \alpha / \text{tg} \beta$ worden. Meestal is dit aanzienlijk groter dan $\sin \alpha$, echter meestal kleiner dan 1.

Bij de afleiding van de formules is aangenomen dat de stroming in het filter één dimensionaal is. Hierdoor wordt voorbij gegaan aan het feit dat de verhangen wat dieper in het talud kleiner zullen zijn dan vlak onder de toplaag. Op het grensvlak filter/basis is daarom het verhang kleiner dan

berekend wordt met deze formules. Dit geldt vooral voor het opwaarts gerichte verhang, omdat dit vrij plaatselijk optreedt.

4. Theoretische achtergrond

De sterkte van het grensvlak wordt hier gedefinieerd als de grootte van de belasting nabij het grensvlak waarbij het zand in beweging komt. De belasting kan gezien worden als een verhang of als een filtersnelheid, die onderling afhankelijk zijn. Enerzijds kan het verhang berekend worden met het programma Steenzet II (zie vorige paragraaf), maar anderzijds is het juist de filtersnelheid die het grensvlak bedreigt. Dit laatste is in [6] aannemelijk gemaakt. Het probleem is hierdoor op te splitsen in twee delen:

- a) het verband tussen verhang en filtersnelheid (bij cyclische stromingen)
- b) de filtersnelheid bij het grensvlak waarbij het zand net in beweging komt

Het tweede deel komt in dit verslag aan de orde, terwijl voor het eerste deel verwezen wordt naar hoofdstuk 9 en [16].

De sterkte van het grensvlak is langs theoretische weg te kwantificeren door uit te gaan van de hypothese dat er een analogie bestaat tussen het begin van beweging van bodemmateriaal in een open waterloop en het begin van beweging van zand onder een granulair filter. De hypothese houdt in dat de schuifspanning langs de bodem of basis in beide situaties gelijk is bij het begin van beweging. Voor een meer uitvoerige beschrijving wordt verwezen naar [6]. Hier wordt volstaan met een korte afleiding van de formules die op basis van deze hypothese zijn opgesteld.

Voor open waterlopen is bekend dat begin van beweging optreedt als de schuifspanningssnelheid een zekere waarde, v_{*cr} , overschrijdt. De grootte van v_{*cr} is bepaald door Shields [4]:

$$\frac{v_{*cr}^2}{\Delta g D_{b50}} = \psi_s \quad \Rightarrow \quad v_{*cr} = \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (4.1)$$

De empirisch bepaalde parameter ψ_s is gegeven in figuur 4. Na enig herleiden (zie [6]) is de relatie tussen D_{b50} en ψ_s te bepalen, aannemende dat $\Delta = 1,65$ en $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (zandbodem onder water). Deze relatie is te zien in figuur 5.

De over het doorstroomprofiel gemiddelde snelheid in het kanaal is recht evenredig met v_* :

$$\bar{v} = \frac{C}{\sqrt{g}} \cdot v_* \quad (4.2)$$

C = coëfficiënt van Chezy ($m^{1/2}/s$)

Uit formule (4.1) en (4.2) volgt een formule voor de kritieke snelheid in een open waterloop:

$$\bar{v}_{cr} = C \sqrt{\psi_s \Delta D_{b50}} \quad (4.3)$$

Aangenomen wordt dat de situatie bij het scheidingsvlak tussen een filter en het daaronder liggende basismateriaal niet wezenlijk anders is. Bij begin van beweging geldt derhalve voor de stroming in het filter:

$$v_{*cr} = \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (4.4)$$

Net als bij de open waterlopen wordt verondersteld dat de schuifspannings-snelheid recht evenredig is met de gemiddelde snelheid, in dit geval in de poriën:

$$v_* = e \cdot v_p = e \cdot \frac{v_f}{n} \quad (4.5)$$

v_* = schuifspanningsnelheid bij het grensvlak (m/s)

v_p = porie-snelheid in het filter (m/s)

v_f = filtersnelheid (m/s)

n = porositeit van filter (-)

e = evenredigheidsparameter (-)

De parameter e is wellicht enigszins afhankelijk van de geometrie (D_{b50} en D_{b15}) en het Reynoldsgetal, net als bij een open waterlopen.

Formule (4.4) en (4.5) leveren een formule op voor de kritieke filtersnelheid langs het horizontale grensvlak:

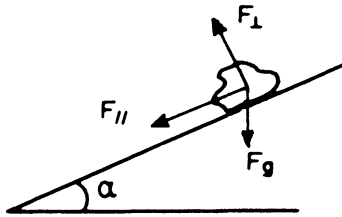
$$v_{fcr} = \frac{n}{e} \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (4.6)$$

Met behulp van resultaten van modelonderzoek is de grootte van e te bepalen. In [19] is aangegeven hoe de stromingskracht op een zandkorreltje berekend kan worden. Uitgaande van het krachterevenwicht bij begin van beweging is de kritieke filtersnelheid bepaald voor het geval de basis bestaat uit kleine korrels. In paragraaf 11.1 is deze formule omgezet in een vorm zoals formule (4.6). Het blijkt dat de parameter e voor kleine korrels omgekeerd evenredig is met $Re^{0.25}$.

In het volgende hoofdstuk wordt formule (4.6) vergeleken met meetresultaten en wordt de grootte van e uit empirische gegevens bepaald.

Invloed van taludhelling en vertikale stromingskomponent

De invloed van de helling van het grensvlak en die van een stromingskomponent loodrecht op het grensvlak zijn te kwantificeren door het evenwicht van een zandkorreltje op een helling te beschouwen:



F_{\perp} = stromingskracht loodrecht op grensvlak

$F_{//}$ = stromingskracht evenwijdig aan grensvlak

F_g = zwaartekracht

Er wordt verondersteld dat F_{\perp} volledig bepaald wordt door de stroming loodrecht op het grensvlak.

Evenwicht van krachten leidt tot:

$$\frac{F_{//} + F_g \sin \alpha}{F_g \cos \alpha - F_{\perp}} = \operatorname{tg} \phi \quad (4.7)$$

ϕ = rusthoek van korrels van de basis (°)

Herschrijven van deze formule geeft een relatie voor de relatieve langskracht:

$$\frac{F_{//}}{F_g} = \left(\cos \alpha - \frac{F_{\perp}}{F_g} \right) \cdot \operatorname{tg} \phi - \sin \alpha \quad (4.8)$$

Bij afwezigheid van een taludhelling ($\alpha = 0^\circ$) en van een stromingskomponent loodrecht op het grensvlak ($F_{\perp} = 0$) volgt uit formule (4.8):

$$\left[\frac{F_{//}}{F_g} \right]_0 = \operatorname{tg} \phi \quad (4.9)$$

De index "0" geeft steeds aan dat $\alpha = 0$ en $F_{\perp} = 0$.

De langskracht $F_{//}$ is tot begin van beweging evenredig met de schuifspanning veroorzaakt door de stroming langs het grensvlak. Door deze evenredigheid is de invloed van de taludhelling en de stromingskomponent loodrecht op het grensvlak op de kritieke schuifspanning te kwantificeren met de verhouding van de relatieve langskracht met en zonder deze invloeden:

$$\frac{\tau_{cr}}{[\tau_{cr}]_0} = \frac{F_{//} / F_g}{[F_{//} / F_g]_0} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(\cos \alpha - F_{\perp} / F_g) \cdot \operatorname{tg} \phi - \sin \alpha}{\operatorname{tg} \phi} \\ &= \frac{\sin (\phi - \alpha)}{\sin \phi} - \frac{F_{\perp}}{F_g} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Met $\tau = \rho v_*^2$ volgt uit bovenstaande formule de verhouding tussen de kritieke schuifspanningssnelheid met en zonder de invloed van de taludhelling en de stromingskomponent loodrecht op het grensvlak:

$$\frac{v_{*cr}}{v_{*cr0}} = \sqrt{\frac{\sin (\phi - \alpha)}{\sin \phi} - \frac{F_{\perp}}{F_g}} \quad (4.12)$$

v_{*cr0} = kritieke schuifspanningssnelheid als $\alpha = 0$ en $F_{\perp} = 0$ (m/s)

Formule (4.4) geeft de grootte van v_{*cr0} weer. Ingevuld in formule (4.5) en (4.12) wordt er een formule verkregen die beide invloeden bevat:

$$v_{fcr} = \frac{n}{e} \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50} \left(\frac{\sin (\phi - \alpha)}{\sin \phi} - \frac{F_{\perp}}{F_g} \right)} \quad (4.13)$$

Het quotiënt F_{\perp} / F_g wordt verondersteld recht evenredig te zijn met het verhang in de basis loodrecht op het grensvlak. Bij een horizontaal grensvlak ($\alpha = 0$) treedt fluïdisatie van de basis op als [11]:

$$i_{\perp} = \Delta (1 - n_b) \quad (4.14)$$

Formule (4.13) moet in dat geval een kritieke filtersnelheid opleveren gelijk nul. Een manier om dit gegeven in de formule onder te brengen is door F_{\perp}/F_g als volgt te kiezen:

$$\frac{F_{\perp}}{F_g} = \frac{i_{\perp}}{\Delta (1 - n_b)} \quad (4.15)$$

Ingevuld in formule (4.13) volgt:

$$v_{fcr} = \frac{n}{e} \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50} \left(\frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin \phi} - \frac{i_{\perp}}{\Delta (1 - n_b)} \right)} \quad (4.16)$$

Cyclische stroming

Een cyclische stroming is quasi-stationair te noemen als de kritieke (filter-) snelheid ten aanzien van begin van beweging niet afwijkt van stationaire stroming. In een open waterloop is stroming pas bij zéér grote golfperiode quasi-stationair, onder andere omdat de stroming veel tijd nodig heeft om een snelheidsprofiel te ontwikkelen dat lijkt op dat bij stationaire stroming. Door de grillige vorm van het doorstroomprofiel in een filter treedt zelfs bij stationaire stroming in een filter nog geen snelheidsprofiel op zoals bij stationaire stroming in een kanaal. Het snelheidsprofiel wordt meer gekenmerkt door de lokale geometrie dan door de tijdsduur dat het water in één richting stroomt. Hiermee is te verklaren waarom de stroming in het filter reeds bij veel kleinere golfperiode quasi-stationair is.

Verondersteld wordt dat de stroming quasi-stationair is als de orbitaal beweging van het water in de poriën veel groter is dan de kleine filterkorrels (D_{f15}). In [6] is met deze veronderstelling afgeleid dat de stroming voor de voor steenzettingen belangrijke gevallen quasi-stationair is. Dit betekent dat formule (4.16) ook toepasbaar is bij cyclische stroming.

Kritiek verhang

Formule (4.16) is om te werken naar een formule voor het kritieke verhang door middel van een doorlatendheidsrelatie voor granulair materiaal. Als voorbeeld wordt die van Forchheimer gebruikt [14]:

$$i = a_f v_f + b_f v_f^2 \quad (4.17)$$

$$a_f = 190 \frac{(1-n)^2 v}{gn^3 D_{f15}^2} \quad (4.18)$$

$$b_f = \frac{0,13}{n^5 D_{f15} \cdot g} \quad (4.19)$$

a_f = lineaire weerstandskoefficient van filter (s/m)

b_f = kwadratische weerstandskoefficient van filter (s²/m²)

Met bovenstaande formules en formule (4.16) is een formule af te leiden voor het kritieke verhang:

$$i_{cr} = \frac{190 (1-n)^2 v}{\sqrt{g} n^2 D_{f15}^2 e} \cdot \sqrt{\psi_s \Delta D_{b50} \left(\frac{\sin(\phi-\alpha)}{\sin \phi} - \frac{i_{\perp}}{\Delta (1-n_b)} \right)} + \frac{0,13}{n^3 D_{f15} e^2} \left(\psi_s \Delta D_{b50} \left(\frac{\sin(\phi-\alpha)}{\sin \phi} - \frac{i_{\perp}}{\Delta (1-n_b)} \right) \right) \quad (4.20)$$

5. Stationaire stroming langs horizontaal grensvlak

5.1 Weinig gegradeerde filters

5.1.1 Modelonderzoek

In het verleden is veel onderzoek verricht naar het begin van beweging van zand onder een weinig gegradeerd granulair filter (filter met steile zeefkromme). Vele onderzoeksresultaten zijn echter voor een toetsing van de in het vorige hoofdstuk afgeleide formules niet te gebruiken omdat òf het criterium voor begin van beweging te vaag gedefinieerd is, òf omdat alleen het verhang en niet de filtersnelheid is gemeten, òf omdat de porositeit van het filter niet gemeten is. De onderzoeksresultaten van v.d. Meulen en v.d. Graaf [1] en Brauns [2] blijken redelijk tot goed bruikbaar te zijn, ofschoon alleen de eerste voldoet aan alle wensen.

De modelopstellingen van beide onderzoekers zijn getekend in figuur 6 en 7. De proevenprogramma's en meetgegevens zijn gegeven in tabel 2 en 3. De gemeten kritieke verhangen zijn weergegeven in figuur 12 en 13.

Brauns is bij de proeven alleen uitgegaan van het visueel gekonstateerde begin van beweging, terwijl v.d. Meulen en v.d. Graaf ook op basis van een extrapolatie van het gemeten zandtransport het begin van beweging vastgesteld hebben.

Bij de visuele waarnemingen is door het inspectie-raam gekeken of zandkorrels in beweging komen of niet. Doordat de porositeit bij de rand van het model meestal iets groter is dan wat verder van de randen is het verklaarbaar dat het visueel vastgestelde kritieke verhang en filtersnelheid meestal wat kleiner zijn dan op basis van een extrapolatie van de gemeten zandtransporten. Tevens is de reproduceerbaarheid minder zoals blijkt uit de gemeten kritieke filtersnelheid in proef 11A en 11B van tabel 2.

Bij de metingen op basis van een extrapolatie van zandtransporten is het gemeten zandtransport tegen de porie-snelheid in een figuur uitgezet. De kritieke porie-snelheid is gedefinieerd als het snijpunt van de horizontale as en een rechte lijn door het punt op de curve met 5 l/uur zandtransport en het punt met 1 l/uur zandtransport.

Deze methode komt enigszins overeen met die van Shields. Shields tekende in een figuur het verband tussen de bodemschuifspanning en het zandtransport en extrapoleerde deze kromme naar het punt waarbij er geen transport meer zou zijn.

Voor de toetsing van de afgeleide formules wordt de voorkeur gegeven aan het criterium voor begin van beweging dat gebaseerd is op de extrapolatie van zandtransporten. Deze methode is objectief en wordt niet verstoord door wandeffekten.

5.1.2 Analyse van de resultaten

In tabel 2 en 3 zijn tevens de waarden van e gegeven die berekend zijn met de volgende formule:

$$e = \frac{n}{v_{fcr}} \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (5.1)$$

Uit de tabel blijkt dat e de minste fluktuaties te zien geeft als uitgegaan wordt van de kritieke filtersnelheid op basis van de extrapolatie van zandtransporten.

Het verband tussen e en Re is gegeven in figuur 9. Hieruit kan gekonkludeerd worden dat:

$$e = 0,22 \text{ als } D_{b50} = 0,82 \text{ mm} \quad (5.2)$$

$$e = 0,78 Re^{-0,2} \text{ als } D_{b50} = 0,16 \text{ mm}$$

De waarden van e , berekend op basis van de visuele waarnemingen, zijn weergegeven in figuur 10. Vergeleken met figuur 9 blijkt de waarde van e , bepaald op basis van visuele waarnemingen, 10% à 20% hoger te zijn dan op basis van de extrapolatie.

In figuur 10 zijn twee lijnen getekend die zo goed mogelijk aansluiten bij de metingen met $D_{b50} = 0,16 \text{ mm}$ en $D_{b50} = 0,82 \text{ mm}$:

$$e = 0,92 \cdot Re^{-0,2} \text{ als } D_{b50} = 0,16 \text{ mm}$$

$$e = 0,24 \text{ als } D_{b50} = 0,82 \text{ mm} \quad (5.3)$$

De punten behorende bij de metingen met $D_{b50} = 0,24 \text{ mm}$, $0,39 \text{ mm}$ en $0,64 \text{ mm}$ liggen gemiddeld tussen deze lijnen in, waaruit gekonkludeerd kan worden dat met het kleiner worden van D_{b50} de grootte van e geleidelijk wat sterker afhankelijk van het Reynoldsgetal wordt. Tussen wat in [19] gezien wordt als grof basismateriaal en fijn basismateriaal is dus geen scherpe grens zichtbaar. Het overgangsgebied strekt zich minimaal uit van $D_{b50} = 0,15 \text{ mm}$ tot $D_{b50} = 0,7 \text{ mm}$. Gezien de ligging van de meetpunten in figuur 10 lijkt een lineaire interpolatie tussen een Reynolds afhankelijke e (getrokken lijn) en een konstante e (gestreepte lijn) zinvol als $0,15 < D_{b50} < 0,7 \text{ mm}$. Vanwege de grote spreiding van de meetpunten is een meer gedetailleerde kwantificering van e niet mogelijk.

In een later stadium is een meting met zeer fijn basismateriaal in de analyse betrokken. Deze meting is uitgevoerd in het kader van het onderzoek naar de zanddichtheid van geotextielen. Voor details wordt verwezen naar [15]. De gekozen korrelgroottes en gevonden resultaten zijn:

$$\left. \begin{array}{l} D_{b50} = 0,096 \text{ mm} \Rightarrow \phi_s = 0,11 \\ D_{f15} = 20 \text{ mm} \\ n = 0,42 \\ v_{fcr} = 18 \text{ mm/s} \\ v = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \end{array} \right\} Re_{cr} = 228$$

De grootte van e volgt uit formule (5.1): $e = 0,30$.

Ook dit punt is getekend in figuur 9.

Uit de metingen blijkt dat voor kleine D_{b50} de grootte van e recht evenredig is met $Re^{-0,2}$, terwijl in het vorige hoofdstuk naar voren is gekomen dat volgens de theorie van Koenders [19] e evenredig met $Re^{-0,25}$ zou moeten zijn. Hieruit wordt gekonkludeerd dat de theorie de belangrijkste fysische verschijnselen goed beschrijft en dat basismateriaal met $D_{b50} = 0,16 \text{ mm}$ nog niet helemaal voldoet aan wat onder fijn basismateriaal verstaan moet worden. Aangenomen wordt dat basismateriaal met $D_{b50} = 0,1 \text{ mm}$ hieraan wel voldoet.

Gekonkludeerd wordt dat op basis van de gepresenteerde theorie en de metingen de volgende formule voor de kritieke filtersnelheid bij stationaire stroming langs een horizontaal grensvlak geldig is:

$$v_{fcr} = \frac{n}{e} \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (5.4)$$

$$e = 1,18 Re^{-0,25} \text{ als } D_{b50} = 0,1 \text{ mm} \quad (5.5)$$

$$e = 0,78 Re^{-0,2} \text{ als } D_{b50} = 0,16 \text{ mm} \quad (5.6)$$

$$e = 0,22 \quad \text{als } 0,7 \text{ mm} < D_{b50} < 1 \text{ mm} \quad (5.7)$$

Voor het geval dat $0,16 < D_{b50} < 0,7 \text{ mm}$ kan de waarde van e gevonden worden door middel van lineaire interpolatie.

Er is hierbij uitgegaan van een criterium voor begin van beweging dat gebaseerd is op een extrapolatie van gemeten zandtransporten.

Door invulling van de gemeten relatie voor e in formule (5.4) kunnen eenduidige formules voor v_{fcr} bij $D_{b50} = 0,16 \text{ mm}$ en $D_{b50} = 0,82 \text{ mm}$ gevonden worden:

$$D_{b50} = 0,16 \text{ mm:}$$

$$v_{fcr} = \frac{n^{1,25} D_{f15}^{0,25}}{0,73 \cdot v^{0,25}} (\psi_s \Delta g D_{b50})^{0,63} \quad (5.8)$$

$$D_{b50} = 0,82 \text{ mm:}$$

$$v_{fcr} = \frac{n}{0,22} \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (5.9)$$

De formules zijn grafisch weergegeven in figuur 11, tezamen met de meetpunten.

Met $e = c \cdot Re^{-m}$ kan met formule (5.4) een expliciete relatie voor v_{fcr} afgeleid worden:

$$v_{fcr} = \left(\frac{n}{c} \cdot \left(\frac{D_{f15}}{v} \right)^m \cdot \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \right)^{\frac{1}{1-m}} \quad (5.10)$$

De grootte van ψ_s , m en c zijn afhankelijk van D_{b50} :

D_{b50} mm	c	m	ψ_s
	-	-	-
0,1	1,18	0,25	0,11
0,15	0,78	0,20	0,073
0,2	0,71	0,18	0,055
0,3	0,56	0,15	0,044
0,4	0,45	0,11	0,038
0,5	0,35	0,07	0,036
0,6	0,29	0,04	0,034
0,7	0,22	0	0,034
0,8	0,22	0	0,034
1,0	0,22	0	0,035

(als $v = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\Delta = 1,65$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$)

Op dezelfde wijze als in hoofdstuk 4 zijn bovenstaande formules om te werken tot formules voor het kritieke verhang. Teneinde het op deze manier verkregen berekende kritieke verhang optimaal te kunnen vergelijken met het gemeten kritieke verhang, is er gekozen voor een doorlatendheidsformule van Forchheimer met aangepaste koëfficiënten. De koëfficiënten zijn zodanig aangepast dat de gemeten en berekende doorlatendheden zo goed mogelijk op elkaar aansluiten. Hiertoe is eerst de koëfficiënt uit parameter b_f aangepast met behulp van proef 13 t/m 15 uit [1] (turbulent aandeel dominant) en vervolgens is met de aangepaste b_f de koëfficiënt uit a_f aangepast met behulp van proef 1 t/m 3 uit [1] (belangrijk laminair aandeel). Het resultaat is als volgt:

$$i = a_f v_f + b_f v_f^2 \quad (5.11)$$

$$a_f = \frac{284 (1-n)^2 v}{gn^3 D_{f15}^2} \quad (5.12)$$

$$b_f = \frac{0,31}{n^4 D_{f15} \cdot g} \quad (5.13)$$

De met deze formules berekende verhangen zijn in tabel 4 naast de gemeten waarden gezet. Gemeten en berekende verhangen blijken redelijk overeen te komen.

Substitutie van formule (5,8) in (5.11) en (5.9) in (5.11) levert formules op voor het kritieke verhang, die uitsluitend bruikbaar zijn om metingen en berekeningen optimaal te kunnen vergelijken:

$$D_{b50} = 0,16 \text{ mm:}$$

$$i_{cr} = \frac{406 (1-n)^2 v^{0,75}}{g n^{1,75} (D_{f15})^{1,75}} (\psi_s \Delta g D_{b50})^{0,63} + \frac{0,63}{n^{1,5} D_{f15}^{0,5} g v^{0,5}} (\psi_s \Delta g D_{b50})^{1,25} \quad (5.14)$$

$$D_{b50} = 0,82 \text{ mm:}$$

$$i_{cr} = \frac{1291 (1-n)^2 v}{n^2 g D_{f15}^2} \cdot \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} + \frac{6,4 \cdot \psi_s \Delta D_{b50}}{n^2 D_{f15}} \quad (5.15)$$

Bovenstaande formules zijn samen met de meetpunten grafisch weergegeven in figuur 12 en 13. De goede overeenstemming tussen de berekende curves en de meetpunten is mede het gevolg van het feit dat de grootte van e is vastgesteld aan de hand van deze metingen. De helling van de berekende lijnen volgt echter uit de veronderstelde overeenkomst met open waterlopen en die stemt ook goed met de metingen overeen.

Met de algemene formule voor v_{fcr} en de doorlatendheidsrelatie van Forchheimer uit [14] is ook een algemene formule voor i_{cr} af te leiden:

$$i_{cr} = \frac{190 (1-n)^2 v}{g n^3 D_{f15}^2} \cdot \left(\frac{n}{c} \left(\frac{D_{f15}}{v} \right)^m \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \right)^{\frac{1}{1-m}} + \frac{0,13}{n^5 D_{f15} \cdot g} \left(\frac{n}{c} \left(\frac{D_{f15}}{v} \right)^m \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \right)^{\frac{2}{1-m}} \quad (5.16)$$

De coëfficiënten c , m en ψ_s zijn afhankelijk van D_{b50} en zijn gegeven op de vorige bladzijde.

5.2 Wijd gegradeerde filters

Ondanks het feit dat een granulair filter vaak is opgebouwd uit materiaal met een flauwe zeefkromme, zoals mijnsteen, fosforslakken etc., is toch het meeste modelonderzoek uitgevoerd met bijna uniform materiaal. De reden hiervoor is dat wijd gegradeerd filtermateriaal doorgaans gemakkelijk ontmengt of zelfs intern instabiel is. Onder het laatste wordt het uitspoelen van de fijne fraktie tussen de grotere korrels verstaan. De consequentie is dat zelfs onder laboratorium omstandigheden het erg moeilijk is om een van te voren geplande korrelsamenstelling zowel bij het grensvlak filter/zand als in de rest van het filter te krijgen. Tevens zijn afvalproducten zoals mijnsteen en slakken kwetsbaar. De grotere korrels kunnen tijdens transport, storten of bij uitdroging breken. Ook dat verkleint de kennis omtrent de samenstelling van het materiaal wat uiteindelijk in de modelopstelling is aangebracht.

Desondanks zijn er een aantal proeven gedaan, beschreven in [11] (zeegrind) en in [17] (fosforslakken). De resultaten van de proeven zijn samengevat in tabel 5. De berekende waarden van i_{cr} zijn bepaald met formule (5.16). De grootte van v_{pcr} is als volgt bepaald:

$$v_{pcr} = \frac{\sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}}}{e} \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} \text{met: } e &= 0,8 \cdot Re^{-0,2} \quad \text{als } D_{b50} = 0,15 \text{ mm} \\ e &= 0,8 \cdot Re^{-0,2} \quad \text{als } D_{b50} = 0,165 \text{ mm} \\ e &= 0,7 \cdot Re^{-0,18} \quad \text{als } D_{b50} = 0,21 \text{ mm} \\ Re &= v_{fcr} \cdot D_{f15} / \nu \end{aligned}$$

Het belangrijkste doel van het analyseren van de proeven met gegradeerd filtermateriaal is om vast te stellen of in bovenstaande formules de D_{f15} een goede keus is voor de karakteristieke korrelgrootte. Tevens is het zinvol de formule als geheel te toetsen.

De proeven met zeegrind zijn uitgevoerd zonder dat de filtersnelheid en de porositeit zijn gemeten. De vergelijking tussen gemeten en berekende waarden is daardoor slechts globaal mogelijk. Het blijkt dat de berekende waarden soms wat te hoog en soms wat te laag zijn. Alleen bij T2 (filter met meest flauwe zeefkromme) is er sprake van overeenstemming.

Vanwege het feit dat slechts i_{cr} gemeten is, kunnen er geen conclusies op de vergelijking gebaseerd worden.

Over de proeven met fosforslakken is wel alles bekend. De proeven zijn echter niet vlekkeloos verlopen. Bij proef 3 was er sprake van een tijdelijke vervuiling van het water en trad op den duur een ontmenging van het filter op. Bij het grensvlak filter/zand was het filter minder doorlatend, waardoor de porie-snelheid bij het grensvlak lager was dan de gemiddelde porie-snelheid die in de tabel vermeld staat. Tijdens proef 2 veranderde de structuur van het filterpakket, hetgeen invloed had op de doorlatendheid. De proeven 4 en 5 zijn niet in de tabel vermeld omdat het filter intern instabiel bleek te zijn.

Uit de resultaten van de proeven 16 tot en met 18 uit [1] blijkt de berekende kritieke filtersnelheid dicht bij de gemeten waarden te liggen. De gemeten waarden zijn ca. 10% hoger dan de berekende waarden.

Voor het gemeten kritieke verhang is het verschil echter veel groter. De berekende i_{cr} is 1,1 à 1,7 maal groter dan de gemeten waarde. Voor een belangrijk deel is dit te wijten aan de spreiding in de metingen zelf, zoals te zien is aan T17 en T18.

referentie + proef nummer	maatgevende korrelgrootte D _{f15} mm	berekend gemeten		maatgevende korrelgrootte D _{f2} mm	berekend gemeten	
		$\frac{i_{crb}}{i_{crg}}$ -	$\frac{V_{fcrb}}{V_{fcrg}}$ -		$\frac{i_{crb}}{i_{crg}}$ -	$\frac{V_{fcrb}}{V_{fcrg}}$ -
[11] T1	0,70	?	?	0,2 à 0,4	?	?
T2	2,0	1,05	?	1,0 à 1,5	2,26	?
T4	1,5	1,49	?	1,0 à 1,3	2,29	?
[17] T1	30	1,13	?	17	1,82	?
T1*	30	1,00	1,20	17	1,59	1,07
T2	30	0,87	1,22	17	1,38	1,09
T2*	30	1,11	1,15	17	1,82	1,05
T3	30	0,61	0,76	8	1,70	0,59
[1] T16	7,4	1,57	0,91	4,5 à 6	2,38	0,84
T17	12,5	1,11	0,87	7 à 10	1,65	0,79
T18	12,5	1,67	0,90	7 à 10	2,79	0,90

N.B. Als de exakte waarde van een variabele niet bekend is, is het gemiddelde aangehouden van de geschatte range.

met:

v_{fcrb} = berekende waarde van v_{fcr}

v_{fcrg} = gemeten waarde van v_{fcr}

i_{crb} = berekende waarde van i_{cr}

i_{crm} = gemeten waarde van i_{cr}

In voorgaande tabel is de verhouding van de berekende en gemeten waarden van i_{cr} en v_{fcr} weergegeven. Tevens zijn i_{cr} en v_{fcr} berekend met D_{f2} als karakteristieke waarde van de korrelgrootte van het filtermateriaal, in plaats van de gebruikelijke D_{f15} .

De resultaten in de tabel laten zien dat het gebruik van D_{f2} , in plaats van D_{f15} , de berekende resultaten niet beter op de metingen doet aansluiten.

Gekonkludeerd kan worden dat de voor weinig gegradeerd materiaal afgeleide formules ook gebruikt kunnen worden voor breed gegradeerd filtermateriaal.

6. Stationaire stroming langs een hellend grensvlak

6.1 Modelonderzoek

Het doel van het in deze paragraaf beschreven modelonderzoek is te verifiëren of de invloed van een taludhelling op de kritieke filtersnelheid (en verhang) gekwantificeerd kan worden met formule (4.16).

Tevens is het gericht geweest op het vinden van de grootte van ϕ .

In het verleden is al eens onderzoek gedaan naar de invloed van een talud van 1:4½ op het kritieke verhang, zonder dat ook de filtersnelheid gemeten is [3]. De resultaten van dit onderzoek zijn gegeven in tabel 6.

Voor het recent uitgevoerde onderzoek is gebruik gemaakt van een modelopstelling in de Filterbak die getekend is in figuur 15 t/m 17.

De verhangen in het grind zijn gemeten door middel van een groot aantal stijgbuisjes die in de achterwand waren aangesloten: 16 stuks tijdens T1; 23 tijdens T2; 26 tijdens T3. Hiermee is gekonstateerd dat lokale verhangen doorgaans 0,03 tot 0,04 afwijken van het gemiddelde verhang, hetgeen neerkomt op 10% tot 20% afwijking.

De afwijkingen waren groter bij de proeven met stroming langs een talud dan die bij horizontale stroming. De stroming was echter in bijna alle gevallen perfect evenwijdig aan het grensvlak. Incidenteel is het voorgekomen dat er lokaal een verhangkomponent van orde 5% loodrecht op de hoofdrichting aanwezig was.

De filtersnelheid is gemeten met een benedenstrooms opgestelde meetstuw.

Het zandpakket is behalve bij het raakvlak met het filter ingesloten in een zanddicht geotextiel zodat ook in het zand de stroomlijnen evenwijdig aan het grensvlak zijn geweest.

Het filter is aan de bovenzijde begrensd door waterdicht plastic dat door de alzijdige gronddruk van het erop liggende zand waterdicht tegen de wanden van het model drukte. Tevens is het plastic vastgekit. Op het zand is totaal ± 500 kg ballast aangebracht.

De zeefkrommen van het gebruikte zand en grind zijn gegeven in figuur 18.

Bij elk van de drie proeven is stap voor stap het verval over het grindpakket verhoogd en is bij elke stap de filtersnelheid, het verhang en het

zandtransport gemeten. Dit laatste is gemeten door na elke 15 à 30 minuten stromen het uit het model getransporteerde en benedenstrooms bezonken zand op te zuigen, te drogen en te wegen. Elke stap heeft, afhankelijk van het transport 15 of 30 minuten geduurd. Bij de verhangen die een redelijk groot zandtransport gaven, zijn steeds enkele stappen na elkaar met gelijk verhang uitgevoerd. Het zandtransport blijkt dan meestal wat af te nemen, hoewel het tijdens T3 ($i = 34\%$) duidelijk in de tijd toenam. Dit verschijnsel zou verband kunnen houden met de vorming van erosiekuiltjes.

Alle stappen zijn zonder tussenpozen na elkaar uitgevoerd.

Na elke proef is de porositeit van het grind bepaald door te meten hoeveel water er in de Filterbak moet worden toegevoegd om een zekere nivo-stijging te bewerkstelligen. Door dit ook te meten zonder grind en tevens het watergehalte van het uitgelekte grind te meten, is het grindvolume en dus de porositeit te berekenen.

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in tabel 7 en figuur 19 en 20. Steeds is alleen het gemeten zandtransport tijdens de eerste stap bij een zeker verval uitgezet.

De relatie tussen filtersnelheid en verhang is weergegeven in figuur 21. Ondanks de lage Reynoldsgetallen blijkt de stroming turbulente eigenschappen te vertonen:

$$v_f = 0,033 \sqrt{i} \quad (6.1)$$

In de volgende paragraaf worden de resultaten in relatie tot formule (4.16) nader geanalyseerd.

6.2 Analyse van de resultaten

De resultaten uit [3] (zie tabel 6) zijn bruikbaar om de juistheid van formule (4.16) te toetsen en de grootte van ϕ te bepalen mits de gemeten invloed van het talud op het kritieke verhang omgerekend wordt tot een invloed op de kritieke filtersnelheid.

Hiervoor wordt de doorlatendheidsrelatie van Forchheimer gebruikt. Met formule (5.11) tot en met (5.13) is de verhouding tussen de gemeten verhangen om te werken naar een verhouding tussen filtersnelheden:

$$\frac{v_{fcra}}{v_{fcro}} = \frac{\sqrt{a_f^2 + 4 b_f i_{cra}} - a_f}{\sqrt{a_f^2 + 4 b_f i_{cro}} - a_f} \quad (6.2)$$

i_{cra} = kritiek verhang bij hellend grensvlak (-)

i_{cro} = kritiek verhang bij horizontaal grensvlak (-)

v_{fcra} = kritieke filtersnelheid bij hellend grensvlak (m/s)

v_{fcro} = kritieke filtersnelheid bij horizontaal grensvlak (m/s)

De grootte van a_f en b_f zijn te berekenen met formule (5.12) en (5.13).

Aangenomen wordt dat $v = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ en $n = 0,4$:

$$a_f = 0,67 \text{ s/m}$$

$$b_f = 93 \text{ s}^2/\text{m}^2$$

De verhouding tussen de kritieke filtersnelheden worden derhalve:

$$D_{b50} = 0,13 \text{ mm: } \frac{v_{fcr \alpha}}{v_{fcr 0}} = 0,96 \quad (\cot \alpha = 4,5)$$

$$D_{b50} = 0,22 \text{ mm: } \frac{v_{fcr \alpha}}{v_{fcr 0}} = 0,81$$

Volgens formule (4.16) zou het volgende moeten gelden ($i_{\perp} = 0$):

$$\frac{v_{fcr \alpha}}{v_{fcr 0}} = \sqrt{\frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin \phi}} \quad (6.3)$$

Aannemende dat de formule juist is, resulteren de metingen in de volgende waarden van ϕ :

$$D_{b50} = 0,13 \text{ mm: } \phi = 70^\circ \text{ à } 80^\circ$$

$$D_{b50} = 0,22 \text{ mm: } \phi = 30^\circ \text{ à } 40^\circ$$

De betrouwbaarheid van deze resultaten is echter klein, omdat enerzijds de v_{fcr} en n niet zijn gemeten en anderzijds omdat de hellingshoek klein was.

Formule (4.16) is tevens gebruikt om rusthoek ϕ te berekenen behorende bij de recent uitgevoerde proeven (tabel 7):

$$D_{b50} = 0,15 \text{ mm: } \phi = 61^\circ \text{ bij } \alpha = 19^\circ$$

$$\phi = 61^\circ \text{ bij } \alpha = -19^\circ$$

De berekende waarde van ϕ zijn op hun waarde beoordeeld door ze te vergelijken met de resultaten die Fernandez Luque & van Beek [5] hebben gemeten in een rechthoekige gesloten koker met doorstroomprofiel van $0,12 \times 0,10 \text{ m}^2$. De aan de hand van hun metingen berekende rusthoeken zijn opgenomen in figuur 22, tesamen met de andere hier berekende rusthoeken. Het blijkt dat de berekende ϕ uit [3] wat uit de toon valt bij de andere metingen. De getrokken lijn wordt gezien als het meest waarschijnlijke verband tussen ϕ en D_{b50} :

$$\phi = 60^\circ \text{ als } 0,1 < D_{b50} < 0,2 \text{ mm}$$

$$\phi = 55^\circ \text{ als } 0,2 < D_{b50} < 0,6 \text{ mm}$$

$$\phi = 50^\circ \text{ als } 0,6 < D_{b50} < 2 \text{ mm}$$

Samen met de resultaten uit [5] geeft het feit, dat de proeven met $\alpha = 19^\circ$ en -19° dezelfde waarde van ϕ opleveren, de betrouwbaarheid van formule (4.16) aan.

De invloed van de korrelvorm op de grootte van ϕ zou groter kunnen zijn dan de invloed van D_{b50} . Hier is echter geen onderzoek naar uitgevoerd.

7. Stationaire stroming langs en loodrecht op een horizontaal grensvlak

7.1 Modelonderzoek

In [11] is modelonderzoek beschreven naar de invloed van een verticale verhangkomponent op het kritieke verhang. De resultaten van die proeven zijn weergegeven in figuur 23. Opgemerkt moet worden dat de proeven niet geheel onafhankelijk van elkaar waren, omdat alle proeven bij één filtermateriaal na elkaar zijn uitgevoerd zonder het door erosie aangetaste grensvlak weer vlak te maken.

Recent is als aanvulling op dit onderzoek modelonderzoek in de Filterbak uitgevoerd met grof basismateriaal met $D_{b50} = 0,82 \text{ mm}$ (zie figuur 25). De zeefkrommen van het gebruikte zand en grind zijn gegeven in figuur 24.

Onder het zand, aan het benedenstroomse deel van het model, zijn grindkistjes te zien, die het mogelijk maakten een verticale stromingskomponent in te stellen. Elk grindkistje was afzonderlijk met een slang met kraan aangesloten op een hoog reservoir. De kraan in elke slang maakte het mogelijk om het debiet naar een grindkistje te regelen. Vanuit het grindkistje stroomde het water door het zandpakket naar het grind.

Bij elke proef is er voor gezorgd dat de verticale verhangkomponent in elke verticale dwarsdoorsnede gelijk is. Dit is gecontroleerd met de in het model uitmondende stijgbuisjes. Hiermee was steeds de stijghoogte in elk grindkistje, op 6 plaatsen in het zand en op 6 plaatsen in het grind bekend. Uit de metingen is naar voren gekomen dat ter plaatse van het uiteinde van het geotextiel (boven het eerste grindkistje) soms het verticale verhang duidelijk hoger en het horizontale verhang in het zand duidelijk lager was. In het grind was dit niet het geval. Overigens is gebleken dat lokale verhangen nooit meer dan 5% (absoluut) van het gemiddelde verhang (horizontaal of vertikaal) af hebben geweken.

In het bovenstroomse deel van de meetsectie, waar geen vertikaal verhang ingesteld kon worden, is het zand vastgelegd met een geotextiel. Hierdoor is men verzekerd dat al het getransporteerde zand afkomstig is uit de sectie met vertikaal verhang.

De bovenzijde van de meetsektie was afgesloten met een trovidur plaat die aan alle randen waterdicht was vastgekit. Onder de trovidur plaat was schuimplastic aangebracht dat het oneffen grindoppervlak goed volgde. Tussen het grind en het schuimplastic was waterdicht plastic aangebracht om te voorkomen dat het schuimplastic als een watervoerende laag zou gaan fungeren. Op het trovidur was ballast aangebracht.

Bij elk van de drie proeven is stap voor stap het verval over het grindpakket verhoogd en is bij elke stap de filtersnelheid, het verhang en het zandtransport gemeten. Dit laatste is gemeten door na 30 minuten stromen het uit het model getransporteerde en benedenstrooms bezonken zand op te zuigen, te drogen en te wegen. Alle stappen zijn zonder tussenpozen kontinu na elkaar uitgevoerd.

Elke stap heeft ongeveer 30 minuten geduurd waarna het verhang is verhoogd. Alleen bij het hoogst ingestelde verhang zijn enkele stappen met gelijk verhang uitgevoerd. Het zandtransport blijkt dan konsekwent in de tijd af te nemen, hoewel het verhang konstant blijft.

De gemeten transporten zijn in figuur 26 en 27 respektievelijk tegen de filtersnelheid en het verhang uitgezet. Bij het grootste ingestelde verhang (filtersnelheid) is alleen de eerste stap weergegeven.

Na afloop van proef T3 is de porositeit van het grind bepaald. Dit is gedaan door het volume water te meten dat nodig is om een zekere nivo-stijging in het model te verkrijgen. Door dit ook zonder grind in het model te doen is het grindvolume en dus de porositeit te berekenen.

De porositeit van het grind tijdens T1 en T2 is hieruit afgeleid door het verschil in de gemeten doorlatendheid van het grind toe te schrijven aan het verschil in porositeit. In figuur 28 is het gemeten verband tussen de filtersnelheid en het verhang getekend. Aannemende dat de doorlatendheid ongeveer evenredig is met n^3 (zie [7]; formule van Cohen de Lara met c_f van Venis voor overgangstype stroming), dan wordt een relatief verschil in de doorlatendheid veroorzaakt door 1/3 van dat relatieve verschil in de porositeit:

T1: $k_0 = 0,09$ m/s en $n = 0,40$

T2: $k_0 = 0,10$ m/s en $n = 0,41$

T3: $k_0 = 0,11$ m/s en $n = 0,42$

Als criterium voor begin van beweging is gekozen voor een zandtransport van 0,2 gr/s, hetgeen in grote lijnen overeenkomt met het criterium van Shields. Het eindresultaat van de proeven is gegeven in figuur 29 en tabel 8. Uit deze figuren blijkt dat een vertikaal verhang tot $i_{\perp} = 56\%$ weinig invloed heeft op het kritieke verhang of filtersnelheid.

Tijdens de metingen is geconstateerd dat individuele zandkorrels die niet getransporteerd werden ($i < i_{cr}$) niet stil lagen, maar door het vertikale verhang steeds weer gingen verliggen. Dit kan verklaard worden als aangenomen wordt dat een korrel in rust een porie min of meer afsluit en daardoor een relatief hoog vertikaal stijghoogte-verschil voelt. De hierdoor resulterende vertikale kracht is voldoende om, samen met de horizontale kracht als gevolg van de stroming langs het grensvlak, de korrel in beweging te brengen. Heeft de korrel echter een minimale verplaatsing gemaakt, dan valt de vertikale kracht weg en is er onvoldoende stromingskracht aanwezig om de korrel in beweging te houden. Het gevolg is dat de korrel weer terugzakt op z'n oorspronkelijke plaats.

7.2 Analyse van de resultaten

Een nadere vergelijking tussen de in figuur 23 gegeven meetpunten (uit [11]) en formule (4.16) is slechts mogelijk als de afgeleide invloed van het vertikale verhang op de kritieke filtersnelheid wordt omgerekend naar een invloed op het kritieke verhang. Daartoe is bijvoorbeeld de doorlatendheidsformule van Forchheimer te gebruiken.

Met formule (4.17) kan een formule zoals (6.2) worden afgeleid:

$$\frac{v_{fcr // \perp}}{v_{fcr //}} = \frac{\sqrt{a_f^2 + 4 b_f i_{cr // \perp}} - a_f}{\sqrt{a_f^2 + 4 b_f i_{cr //}} - a_f} \quad (7.1)$$

$v_{fcr // \perp}$ = kritieke filtersnelheid met vertikaal verhang (m/s)

$v_{fcr //}$ = kritieke filtersnelheid zonder vertikaalverhang (m/s)

$i_{cr // \perp}$ = kritiek verhang langs grensvlak met vertikaal verhang (-)

$i_{cr //}$ = kritiek verhang langs grensvlak zonder vertikaal verhang (-)

Volgens de theorie uit het vorige hoofdstuk (formule (4.16)) geldt voor $\alpha = 0$:

$$\frac{v_{fcr // \perp}}{v_{fcr //}} = \sqrt{1 - \frac{i_{\perp}}{\Delta (1 - n_b)}} \quad (7.2)$$

Aannemende dat $\Delta = 1,65$ en $n_b = 0,39$ volgt uit formule (7.1) en (7.2):

$$\frac{\sqrt{a_f^2 + 4 b_f i_{cr // \perp}} - a_f}{\sqrt{a_f^2 + 4 b_f i_{cr //}} - a_f} = \sqrt{1 - i_{\perp}} \quad (7.3)$$

Dit is voor het gebruikte filtermateriaal te benaderen met een machtsfunctie:

$$\frac{i_{cr // \perp}}{i_{cr //}} = (1 - i_{\perp})^{0,63} \quad (7.4)$$

Deze relatie is ook in figuur 23 getekend. Gekonkludeerd moet worden dat de lijn aansluit bij de meetpunten, maar dat de spreiding in de meetpunten dermate groot is dat er geen harde konklusies aan verbonden mogen worden.

De resultaten van de in de vorige paragraaf beschreven metingen zijn in figuur 29 weergegeven. In deze figuur is tevens het verband volgens formule (7.2) en de volgende formule gegeven:

$$\frac{i_{cr // \perp}}{i_{cr //}} = (1 - i_{\perp})^{0,75} \quad (7.5)$$

Dit laatste kan afgeleid door uit te gaan van $v_f = k_o \cdot i^{0,67}$ ($Re \approx 370$; zie tabel 8 en figuur 28).

Helaas blijkt dat de overeenstemming tussen theorie en metingen niet erg groot is. Worden de meetpunten in figuur 23 getekend, dan blijkt dat ze wel in de puntenwolk passen.

Opvallend is dat de kritieke filtersnelheid zonder vertikaal verhang slechts $v_{fcr //} = 31$ mm/s, terwijl volgens [1] verwacht mag worden dat het ongeveer 36 à 37 mm/s is, mede gezien de vrij hoge porositeit (zie formule (4.16)). Als aangenomen wordt dat de gemeten kritieke filtersnelheid door bijzondere (en onbegrepen) omstandigheden tijdens T1 wat te laag is uitgevallen, dan zouden

de meetpunten in figuur 29 véél dichter bij de berekende lijnen terecht komen als die bijzondere omstandigheden niet waren opgetreden. Immers, als $v_{fcr //}$ groter had moeten zijn, dan zou $(v_{fcr // \perp}) / (v_{fcr //})$ kleiner moeten zijn. Aan de andere kant moet toegegeven worden dat de theorie achter de gegeven formules wel erg simpel is ten opzichte van het uiterste gekompliceerde krachten spel op de korrels. Het feit dat de korrels die niet bewegen steeds weer gaan verliggen wijst reeds in die richting. Enkele ongetwijfeld belangrijke invloeden zijn:

- porositeit van het zand in de bovenste laag met dikte van één korrel is hoger dan dieper in het zand
- er treedt een verhangkoncentratie op ter plaatse van het deel van het grensvlak dat niet door grindkorrels bedekt wordt
- het stroombeeld rond een korrel wijzigt door de aanwezigheid van een verticale stromingskomponent, waardoor ook de stromingskrachten als gevolg van de stoming langs het grensvlak wijzigen.

Gezien het feit dat bovenstaande invloeden in het kader van dit onderzoek niet in de theorie ingepast kunnen worden, wordt de gegeven formule geaksepteerd als een redelijke benadering die meestal aan de veilige kant zit.

8. Cyclische stroming langs horizontaal grensvlak

Het in het verleden uitgevoerde modelonderzoek [12] is onbruikbaar gebleken vanwege het feit dat er aanzienlijke verticale verhangen op het grensvlak optraden en er in de loop van de proeven door de zeer hoge horizontale verhangamplitude een duidelijke verdichting van het grindpakket is opgetreden. Om deze problemen te voorkomen is gekozen voor een modelopstelling zoals getekend in figuur 30.

De korrelgrootte verhouding D_{f15} / D_{b50} is zodanig gekozen dat het kritieke verhang klein is, zodat er niet voor verdichting gevreesd hoeft te worden. De zeefkrommen van de gebruikte materialen, behalve het grove grind, zijn gegeven in figuur 31. De korrelgrootte van het grove grind lag tussen 17 en 35 mm met $D_{f15} = 20$ mm.

Het proevenprogramma is beschreven in tabel 9.

Het tijdsafhankelijke verhang in het grind en het zand is continu met verschildrukopnemers gemeten en vastgelegd met een meerkanaals schrijver. Simultaan is met een laser doppler snelheidsmeter de filtersnelheid gemeten. Deze snelheidsmeter was opgesteld ter plaatse van een glazen koker die aansloot op het filter. Vanwege de continuïteit mag verwacht worden dat het debiet in de koker gelijk is aan dat in het grindpakket. De snelheid in de koker was niet plaatsafhankelijk.

Het verticale verhang is gemeten met behulp van een verschildrukopnemer op punt 5 en 6 (zie figuur 30). Helaas bleek de opnemer tijdens proef 1 tot en met 4 niet te functioneren. Tijdens proef 5 tot en met 7 was het verticale verhang ongeveer 10%, hetgeen nog net meetbaar was. Een vertikaal verhang van deze omvang heeft een verwaarloosbare invloed op het kritieke verhang of filtersnelheid (zie vorige hoofdstuk).

Het horizontale verhang is gemeten tussen de punten 2 en 4, 1 en 3 (alle metingen) en 8 en 10 (proef 1 tot en met 5). Het lokale verhang verschilde nooit meer dan 1% (absoluut) met het over de drie plaatsen gemiddelde verhang.

Het gemeten verband tussen het verhang en de filtersnelheid is weergegeven in figuur 32.

Het moment van begin van beweging is visueel vastgesteld. Om dit niet te veel te laten afhangen van de randeffekten bij de glaswand, is een randje plexi-glas dat even dik is als de zandlaag ter hoogte van die zandlaag aangebracht. Hierdoor was er zicht op een strook van het grensvlak dat zich duidelijk onder het grind bevond.

Er is onderscheid gemaakt in de volgende transportklassen:

A = hier en daar een bewegende korrel of minder

B = op minder dan de helft van het oppervlak één korrel dikke laag transport

C = op meer dan de helft van het oppervlak één korrel dikke laag transport

D = overal één korrel dikke laag transport

E = transport in een laag van meer dan één korrel dik

F = veel transport, ook korrels over grindkorrels heen

Transportklasse D/E is gedefinieerd als begin van beweging. Door deze definitie sluiten de resultaten van deze visuele metingen goed aan bij de metingen op basis van de zandtransportmetingen die in de Filterbak zijn uitgevoerd. Tijdens proef 6 en 7 zijn tevens video-opnamen gemaakt.

De resultaten van de metingen zijn gegeven in de figuren 33 tot en met 36. In deze figuren is de filtersnelheid- of verhangamplitude (\bar{v}_f of \bar{i}) uitgezet tegen het stationaire deel van de filtersnelheid of verhang (\bar{v} of \bar{i}). De letters in de figuren corresponderen met de transportklasse die bij die combinatie van \bar{v} en \bar{v} (of \bar{i} en \bar{i}) is konstateerd. De getrokken lijnen verbinden de punten met gelijke transportklasse.

Gekonkludeerd kan worden dat begin van beweging bij zuiver cyclische stroming optreedt als de verhang- of filtersnelheidsamplitude ongeveer gelijk is aan die bij stationaire stroming bij begin van beweging. Bij gekombineerde stationaire en cyclische stroming is de som van de amplitude (van het zuiver cyclische deel) en het stationaire deel bij begin van beweging iets hoger dan bij zuiver stationaire stroming. Er kan daarom veilig gekonkludeerd worden dat de stroming ten aanzien van begin van beweging kwasi-stationair kan worden opgevat, waarbij de maatgevende filtersnelheid (of verhang) gelijk is aan de maximaal optredende filtersnelheid (of verhang) in een golfperiode, mits $T > 2s$.

9. Doorlatendheid bij cyclische stroming

Met de modelopstelling zoals omschreven in het vorige hoofdstuk zijn tevens metingen met het grove grind ($D_{f15} = 20$ mm) uitgevoerd, gericht op het verband tussen de filtersnelheid en het verhang bij verschillende golfperiodes.

Tijdens deze metingen is ook het verhang over het hele model gemeten met een verschildrukopnemer die uitmondde in het vrije water voor en achter het grind. Dit verhang is "uitwendig verhang" genoemd terwijl het verhang dat in het grind is gemeten "inwendig verhang" is genoemd.

De resultaten van de metingen zijn weergegeven in figuur 37 tot en met 42. De gemeten doorlatendheid als functie van de golfperiode is gegeven in figuur 43. Het blijkt dat de doorlatendheid sterk afhangt van de golfperiode (T) zolang de stroming een laminair gedrag vertoont (v_f lineair afhankelijk van i). Het is echter bijna onafhankelijk van T als er overgangstype stroming heerst.

Bij fijner materiaal is een kleinere invloed van de golfperiode te verwachten omdat de traagheid-weerstand verhouding van de stroming in de poriën dan kleiner is.

Gezien het feit dat, in het geval van een steenzetting, begin van beweging bijna altijd bij overgangstype of turbulente stroming optreedt, hoeft men wat de erosie-problematiek betreft geen rekening te houden met de grootte van de golfperiode en kan de stroming quasi-stationair opgevat worden.

Een meer gedetailleerde en uitvoerige analyse van metingen wordt gegeven in [16].

10. Cyclische stroming door hellend grensvlak

10.1 Modelopstelling

In November 1986 zijn er proeven uitgevoerd in de Scheldegoot ten behoeve van een toetsing van de filterregels, genoemd in hoofdstuk 6 en 7, onder omstandigheden die in werkelijkheid in dijktaluds voorkomen. Een paar granulaire filters, die ontworpen zijn met de filterregels, zijn beproefd m.b.t. het optreden van erosie van het grensvlak van het niet cohesieve basismateriaal. Deze proeven zijn gekombineerd met het in detail registreren van de druk op het talud ten behoeve van het drukkenbestand [23].

In de Scheldegoot is een talud van 1:2½ aangebracht (Figuur 44). De toplaag van dit talud bestaat uit betonblokken van 0,33 x 0,33 x 0,1 m³. In elk betonblok zijn 5 gaten aanwezig met een diameter van 0,07 m (Figuur 45). Onder deze toplaag ligt het geotextiel Nicolon 66336. De specificatie van dit geotextiel staan in Tabel 10. Het geotextiel is goed waterdoorlatend. Het filter kan niet door het geotextiel uitspoelen. Het granulaire filter ligt tussen het basismateriaal en het geotextiel. Het granulaire filter is verdicht met een troffel, zodat de verdichting gering is. Een betere verdichting is niet mogelijk, daar anders de meetapparatuur beschadigt. De zeefkrommen van de granulaire filters staan in Figuur 46. In het granulaire filter is tegen de glaswand van de goot een in de lengte doorgesneden geperforeerde plastic buis aangebracht. De freatische lijn in het granulaire filter kan op deze wijze goed geregistreerd worden. Het fijne zand, dat in de proef opstelling als basismateriaal dienst doet, is verdicht m.b.v. golfaanval. Dit resulteerde in een goed verdicht zandpakket. De zeefkromme van het basismateriaal is gegeven in Figuur 46. In de kern van het talud, in de hoek van de proef opstelling, is grover zand aangebracht (Figuur 44). De zeefkromme van dit grove zand is gegeven in Figuur 46. In dit zand is een stijgbuis aangebracht. De waterstand in deze stijgbuis is tijdens de proeven gemeten.

Voor de verificatie van de filterregels zijn de langsverhangen en loodrechte verhangen bij het grensvlak van het granulaire filter naar het zand van belang. Deze verhangen zijn gemeten door registratie van drukken in het zand en in het granulaire filter. De plaats van de diverse drukopnemers in het talud is gegeven in Figuur 47. Tijdens de proeven zijn ook de drukken op het talud geregistreerd. De registratie van de drukken op het talud is beschreven in [23]. Tijdens de proeven zijn verder de volgende waarden gemeten; golfoploop, golfterugloop, punt van breken van de golf, hoogte freatische lijn in het granulaire filter en de hoogte van de waterstand in de stijgbuis.

Het belangrijkste fenomeen, wel of geen erosie van het grensvlak, is door de glaswand van de goot bekenen en is geregistreerd m.b.v. ferriet detectoren.

Voor de verificatie van de filterregels zijn er drie proeven uitgevoerd. Proef Ia en Ib met granulair filter I en proef II met granulair filter II. De golfaanval op het talud bestond uit regelmatige golven met een periode van 2,5 s en een golfhoogte van 0,4 m. Deze combinatie geeft de maximaal mogelijke golfoploop in de proefopstelling. Een maximale golfoploop is gewenst voor een zo hoog mogelijke freatische lijn in het granulaire filter, waardoor een zo groot mogelijk interesse-gebied met vrijwel plaatsonafhankelijk langsverhang wordt verkregen. Proef I is met twee waterstanden uitgevoerd. Dit is te vertalen in een kleine verschuiving van de meetapparatuur in het talud. In Tabel 11 staan de gegevens van de proeven met enkele gemeten en berekende grootheden.

10.2 Resultaten

Doorlatendheid filter

De doorlatendheid van het granulaire filter is in de proefopstelling zelf bepaald. In Figuur 48 is de meetopstelling voor de doorlatendheidsbepaling getekend. Met een pomp zijn er verschillende debieten door de filterlaag gevoerd. Bij deze debieten worden de verhangen in het granulaire filter gemeten. Aldus kan een relatie opgesteld worden tussen de filtersnelheid en het verhang. In Figuur 49 zijn de gemeten waarden en enkele doorlatendheidsrelaties getekend, die aansluiten op de doorlatendheidsformulering van Forchheimer (zie formule (4.17)):

$$i = a_f v_f + b_f v_f^2 \quad (10.1)$$

Uit de metingen wordt de volgende doorlatendheidsrelatie gekonkludeerd:

$$\begin{array}{ll} \text{Filter I} & \text{Filter II} \\ i = 20 v_f + 1000 v_f^2 & i = 24 v_f + 1100 v_f^2 \end{array} \quad (10.2)$$

Ter vergelijking worde de doorlatendheidsrelaties volgens [14] gegeven:

$$\begin{array}{ll} \text{Filter I} & \text{Filter II} \\ i = 34 v_f + 832 v_f^2 & i = 63 v_f + 1219 v_f^2 \end{array} \quad (10.3)$$

De metingen zijn uitgevoerd bij vrij kleine Reynoldsgetallen (nl. 6 à 16), hetgeen betekent dat met name de laminaire weerstandscoefficient a betrouwbaar te bepalen is. De waarde van a is daarom uit de metingen bepaald, terwijl bij de keuze van de waarde van b de berekende waarden duidelijk hebben meegewogen. De gemeten doorlatendheidsrelaties liggen dicht bij elkaar dan volgens [14]. De gemeten waarden liggen echter binnen het 95% betrouwbaarheids-interval.

Gemeten verhang

Tijdens proef Ia en Ib en II zijn de drukken en verschildrukken bij het grensvlak basismateriaal-granulair filter gemeten. De drukken zijn tijdens proef I op een andere plaats gemeten dan tijdens proef II. Bij de interpretatie van de resultaten is aangenomen dat de optredende verhangen in filter en basis tijdens alle proeven gelijk zijn. Deze aanname is gebaseerd op de formules uit [24]. Het bleek dat er verschillen waren tussen de registraties van de absolute drukopnemers en de verschildrukopnemers. Deze verschillen waren niet aanwezig bij de doorlatendheidsproeven. Aangenomen wordt dat de verschildrukopnemers beïnvloed zijn door de golfbeweging. De interpretatie van deze metingen is dan ook zeer lastig. Verschildrukopnemer 23 is geheel buiten beschouwing gelaten, omdat deze tijdens de proeven niet funktioneerde. Alle andere drukopnemers gaven een sinusvormig signaal met als periode uiteraard de golfperiode. Het optredende langsverhang is maximaal juist voor de golfklap. In figuur 50 en 51 zijn deze maximale langsverhangen met de bijbehorende loodrechte verhangen getekend. Uit de metingen blijkt dat het maximale langsverhang redelijk overeen komt met het maximale langsverhang dat volgens de analytische benadering van Sellmeijer [24] kan optreden. Volgens de analytische benadering is het maximale langsverhang gelijk aan $\sin \alpha$, waarin α de hellingshoek van het talud is. Het maximale langsverhang is dus 0,37 bij een talud van 1:2½. Het gemeten maximale langsverhang is $0,42 \pm 0,07$.

De in figuur 50 getekende verticale verhangen zijn op één na allemaal ca. nul of negatief. Negatief betekent dat de stroming van het filter naar het zand gericht is. Dit leidt tot een hogere kritieke filtersnelheid. In het gebied waar het maximale langsverhang optreedt hebben de verschildrukopnemers een verticaal verhang geregistreerd van ca. nul. De absolute drukopnemers registreerden hier echter een positief verhang van $0,3 \pm 0,15$. Dit zou leiden tot een iets lagere kritieke filtersnelheid.

Gekonkludeerd kan worden dat tijdens alle proeven verhangen optraden zoals weergegeven in figuur 51.

Waargenomen erosie

Tijdens de proeven is het grensvlak nauwkeurig waargenomen. Tijdens proef Ia en Ib was er duidelijk sprake van zandtransport over het grensvlak en tijdens proef II was er nauwelijks transport.

Het transport is in hoofdstuk 8 ingedeeld in diverse transportklassen. Hieronder worden deze klassen gegeven:

- A = hier en daar een bewegende korrel of minder
- B = op minder dan de helft van het oppervlak één korrel dikke laag transport
- C = op meer dan de helft van het oppervlak één korrel dikke laag transport
- D = overal één korrel dikke laag transport
- E = transport in een laag van meer dan één korrel dik
- F = veel transport, ook korrels over grindkorrels heen

Transportklasse D/E is gedefinieerd als begin van beweging, dit komt overeen met de door Shields gehanteerde definitie.

Er is duidelijk gekonstateerd dat er korreltransport optreedt en dat het transport niet een gevolg is van optredende lokale schuifvlakjes.

Proef Ia en Ib:

Vanaf 0,05 m beneden de stilwaterlijn tot 0,40 m beneden de stilwaterlijn was er korreltransport in één laagdikte. Dit transport ontwikkelde zich later tot een duidelijk alternerend transport. Het transport ligt dus ongeveer in transportklasse D/E. Bovenin het transportgebied was het transport continue naar beneden gericht. Onderin het transportgebied was er ook korreltransport in één laagdikte, doch dit stagneerde steeds bij het optreden van een golfklap. Het transport verloop onderin het transportgebied kan het best omschreven worden als een zaagtand (als functie van de tijd).

Beneden 0,45 m onder de stilwaterlijn was er geen transport. Alleen nabij 0,75 m onder s.w.l. was er een oscillerende beweging van de korrels. Dit leek netto naar boven gericht. In figuur 51 is de situatie getekend met de optredende verhangen.

Proef II:

Tijdens deze proef was er bijna geen transport. Vanaf 0,05 m boven de stilwaterlijn tot 0,65 m erboven was er af en toe een bewegende korrel. Het transport blijft dus ongeveer in transportklasse A. Bovenin dit transportgebied bewogen enkele korrels naar beneden en onderin dit transportgebied was de beweging oscillerend. Direct na de golfklap even snel naar boven en vervolgens langzamer naar beneden. In figuur 51 is de situatie getekend met de optredende verhangen.

Behalve visuele waarnemingen is tevens getracht begin van beweging aan te tonen met ferrietdetectoren (zie fig. 47).

Tijdens proef Ia waren ze 0,12 m boven het stilwaternivo geplaatst, tijdens proef Ib 0,05 m boven het stilwaternivo en tijdens proef II 0,10 m beneden het stilwaternivo. De ferrietdetectoren kunnen niet de hoeveelheid transport detecteren, ze kunnen alleen aangeven of er wel of geen ferriet aanwezig is. Bij de kop van de ferrietdetector is op het grensvlak een beetje ferriet aangebracht met een korreldiameter tussen de 80 en 150 μm . Bij transport van de grenslaag wordt verwacht dat dit ferriet wordt meegevoerd. Bij het afnemen van de hoeveelheid ferriet moet de voltmeter volledig uitslaan. Dit is bij geen van de proeven gebeurd. Bij proef Ia en Ib was dit duidelijk een gevolg van het feit dat de ferrietdetectoren boven het transportgebied waren geplaatst en bij proef II was het transport te gering.

10.3 Analyse van de resultaten

Het langsverhang kan volgens de berekeningen van Sellmeijer maximaal 0,37 zijn. Deze waarde is ook ongeveer gemeten. Dit leidt met de gemeten doorlatendheidsrelaties tot de volgende filtersnelheden voor filter I en II:

Verhang evenwijdig aan toplaag: $i_{//} = 0,4$

Verhang in basis loodrecht op grensvlak: $i_{\perp} = 0,2 \text{ á } 0,4$

Filtersnelheid evenwijdig aan toplaag: $v_f = 12$ mm/s (filter I)

$v_f = 11$ mm/s (filter II)

Met behulp van formule (4.16) kan de verwachte kritieke filtersnelheid voor beide filters berekend worden:

	filter I	filter II
$i_{\perp} = 0$	9,2	8,3
$i_{\perp} = 0,2$	7,5	6,8
$i_{\perp} = 0,4$	5,5	5,0

berekende kritieke filtersnelheid (mm/s)

Tijdens de beproeving van filter I is ongeveer begin van beweging geconstateerd, die volgens de metingen blijkbaar overeenkomt met een kritieke filtersnelheid van 12 mm/s.

De resultaten van de berekeningen geven echter aan dat $v_{fcr} = 6$ à 7 mm/s.

Rekening houdend met de in paragraaf 7.2 geconstateerde spreiding in de resultaten met betrekking tot de invloed van het verhang loodrecht op het talud, is het toch verrassend dat de gemeten v_{fcr} zelfs nog groter is dan de berekende v_{fcr} bij $i_{\perp} = 0$.

Dezelfde tendens is aanwezig bij de proef met filter I.

Gekonkludeerd moet worden dat het gezamenlijk optreden van de verschillende belastingcomponenten (namelijk stroming langs grensvlak, verhang component loodrecht op grensvlak, verhangcomponent loodrecht op grensvlak, zwaartekrachtcomponent langs het grensvlak en niet-stationaire stroming) samen minder snel erosie veroorzaken dan wanneer ze samengesteld worden volgens formule (4.16). Voor de praktijk betekent dit dat ontwerpen met formule (4.16) een veilige constructie oplevert. Tevens betekent dit dat verder onderzoek op dit gebied kan leiden tot nog ruimere criteria voor het ontwerpen van een filter. De winst die nu behaald is ten opzichte van een geometrisch dicht filter en de ruimte die er nog is ten opzicht van het modelonderzoeksresultaat, blijkt uit het volgende:

$D_{f15} < 0,5$ mm (formule (1.2), geometrisch dicht)

$D_{f15} < 1,3$ mm (formule (4.16), niet-geometrisch dicht)

$D_{f15} < 2,3$ mm (resultaat modelonderzoek)

Opgemerkt moet worden dat de maximaal toelaatbare D_{f15} met formule (4.16) berekend is met een aangepaste doorlatendheidsrelatie, die aansluit bij formule (10.2). Met de doorlatendheidsrelatie uit [14] (formule (4.20)) zou $D_{f15} < 1,7$ mm.

11. Vergelijking met andere onderzoeken

11.1 M.A. Koenders: Hydraulic criteria for filters [19]

Koenders maakt onderscheid tussen fijn en grof basismateriaal. De stromingskrachten op de korrels in een fijne basis worden gedomineerd door de schuifspanning, terwijl op grove korrels de kracht als gevolg van het drukverval over de korrel overheerst. Dit verschil wordt veroorzaakt door het feit dat bij grote korrels de stroming in het zog gaat loslaten van het korreloppervlak.

Voor de fijne korrels in een horizontaal grensvlak wordt een formule afgeleid, uitgaande van de Navier Stokes vergelijking, die vereenvoudigd wordt tot het volgende:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (11.1)$$

met: u = snelheidscomponent in x-richting (functie van x en z) (m/s)

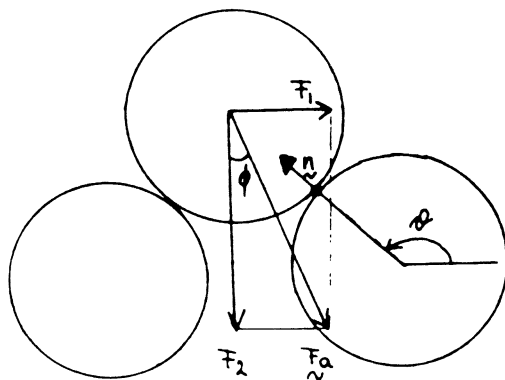
v = snelheidscomponent in z-richting (functie van x en z) (m/s)

x = horizontale koördinaat (m)

z = verticale koördinaat (m)

ν = viscositeit (m²/s)

Deze formule leidt tot een uitdrukking voor de stromingskracht op een korrel, die samen met de zwaartekracht, een kracht oplevert die in het bezwijkstadium een hoek ten opzichte van de verticale as maakt gelijk aan de interne wrijvingshoek van de individuele korrels:



Dit leidt tot de volgende formule voor het bezwijkstadium:

$$\tan(\phi) = \frac{\text{stromingskracht}}{\text{zwaartekracht}} = \frac{\rho D_b^2 \sqrt{(U^3 v/D_f)}}{\pi/6 (\rho_a - \rho) g D_b^3} \quad (11.2)$$

met: D_b = korrelgrootte basis (m)
 D_f = korrelgrootte filter (m)
 ρ = soortelijke massa water (kg/m³)
 ρ_a = soortelijke massa korrel (kg/m³)
 U = poriesnelheid in overgangslaag (m/s)
 g = zwaartekrachtsversnelling (m/s²)
 ϕ = hoek van inwendige wrijving van basiskorrels (°)

Zand met $D_{b50} = 0,15$ mm wordt opgevat als fijn basismateriaal en heeft een ϕ van 50°. De grootte van ϕ is afhankelijk van de transportintensiteit die overeenkomt met het begin van beweging.

Ten einde een vergelijking met formule (5.4) mogelijk te maken, wordt het resultaat herleid tot het volgende:

$$v_{fcr} = c \sqrt{(\pi/6 \tan(\phi))} Re^{1/4} n \sqrt{(\Delta g D_b)} \quad (11.3)$$

met: c = coefficient die de invloed van het lokale stromingsbeeld in de overgangslaag bevat (-)

Formule (5.4) is voor een basis met $D_{b50} = 0,15$ mm als volgt te schrijven:

$$v_{fcr} = \frac{\sqrt{\psi_s}}{0.78 Re^{-0.2}} n \sqrt{(\Delta g D_{b50})} \quad (11.4)$$

met $\psi_s = .07$

Gekonkludeerd kan worden dat beide formules dezelfde vorm hebben. Er is slechts een marginaal verschil in de macht van het Reynoldsgetal (0.25 volgens Koenders; 0.20 volgens Klein Breteler). Wellicht moet hieruit gekonkludeerd worden dat zand van 0.15 mm nog niet fijn genoeg is om te voldoen aan de genoemde aanname. Gezien het feit dat de resultaten van beide formules gefit zijn op de metingen uit [1], is het niet verwonderlijk dat ook de berekende waarden van v_{fcr} met beide formules gelijk zijn.

De stromingskracht op een grote korrel (bijvoorbeeld $D_b = 0,8$ mm) wordt gedomineerd door de wrijvingskracht. Samen met de zwaartekracht wordt het stabiliteitskriterium als volgt:

$$\tan(\phi) = \frac{\text{stromingskracht}}{\text{zwaartekracht}} = \frac{\rho C_d U^2 D_b^2}{\pi/6 (\rho_a - \rho) g D_b^3} \quad (11.5)$$

met: C_d = weerstandskoefficient (-)

Dit resultaat is te herschrijven in een vorm zoals formule (11.3):

$$v_{fcr} = \sqrt{(\pi/6 \tan(\phi)/C_d)} \cdot \sqrt{(\Delta g D_{b50})} \quad (11.6)$$

Gegeven een zekere korrelgrootte van de basis is de invloed van het Reynoldsgetal nu verdwenen, hetgeen ook te zien is in formule (5.4) en (5.7). De gelijkenis is derhalve zeer groot.

De invloed van een taludhelling wordt in [19] in de formules verwerkt door de hoek van inwendige wrijving ϕ te verminderen met de taludhelling α . Het resultaat is identiek aan formule (6.3).

De invloed van een verticale verhangkomponent wordt door Koenders in de formule verdiskonteerd door de zwaartekracht te verminderen met de volgende kracht:

$$F_{\text{extra}} = 0.5 \pi D_b^3 / 4 g \rho i_{\perp} \quad (11.7)$$

Dit is evenredig met de drukgradient als gevolg van het verticale verhang over de bovenste korrels, waarbij aangenomen is dat dit verhang over deze korrels nog maar de helft is van het verhang dieper in de basis. Voor grote verticale verhangen (orde 0.7 bij een horizontaal grensvlak en lager bij een hellend grensvlak) treedt volgens Koenders een bezwijkmechanisme op waarbij grote groepen korrels tegelijk in beweging komen wegens de vorming van afschuifvlakjes.

Formule (11.7) is afwijkend van formule (4.15). De reductiefaktor ter grootte van 0.5 is namelijk in formule (4.15) niet toegepast. In figuur 52 zijn beide theorieën grafisch weergegeven, tesamen met de meetpunten. De kritieke

filtersnelheid is met de doorlatendheidsrelatie van Forchheimer omgerekend naar het kritieke verhang. Het blijkt dat formule (11.7) beter bij het hart van de puntenwolk aansluit, maar daarom veel vaker het kritieke verhang zal overschatten.

11.2 T.v.d.Meulen: Granulaire filters, stroming evenwijdig aan grensvlak [1]

v.d. Meulen gaat uit van een veronderstelde overeenkomst tussen begin van beweging in granulaire filters en in open waterlopen of buizen. Dit laatste wordt uitgewerkt voor een zeer grote D_{f15}/D_{b50} verhouding. Voor dat geval blijkt het met het diagram van Moody mogelijk te zijn om de kritieke poriesnelheid v_{pcr} te berekenen, uitgaande van de kritieke schuifspanningssnelheid voor open waterlopen. De zo berekende v_{pcr} blijkt echter twee maal groter te zijn dan de gemeten waarde, hetgeen geweten wordt aan het feit dat de stroming niet uniform is. De steeds versnellende en vertragende stroming veroorzaakt eerder erosie dan een uniforme stroming.

De tendens dat de v_{pcr} toeneemt bij toenemende D_{f15}/D_{b50} verhouding blijkt echter zowel uit de berekeningen als uit de metingen. Hierop wordt gebaseerd dat er inderdaad een grote overeenkomst is tussen erosie in granulaire filter en open waterlopen.

Volgens v.d. Meulen is de overeenkomst tussen filters en open waterlopen met name aanwezig als de poriën in het filter groot genoeg zijn om de korrels ongehinderd door te laten. Dit is het geval als D_{f15}/D_{b50} groter is dan ongeveer 25. Voor dit gebied is de volgende semi-empirische formule opgesteld:

$$\frac{v_{pcr}^2}{\Delta g D_{b50}} = 0,1 (D_{f15}/D_{b50})^{0,5} \quad (11.8)$$

In het gebied waarin $D_{f15}/D_{b50} < ca. 20$ zijn ook klemkrachten en botsingskrachten op de basiskorrels van belang. Een benadering zoals bovenstaand wordt niet gegeven, omdat er te weinig meetgegevens beschikbaar zijn voor $D_{f15}/D_{b50} < 10$. Er wordt verwacht dat v_{pcr} asymptotisch naar oneindig zal gaan in de buurt van $D_{f15}/D_{b50} = 6$ vanwege de geometrische limiet.

In vergelijking tot formule (4.6) valt direkt op dat hier geen gebruik is gemaakt van de kritieke schuifspanningssnelheid van Shields. In feite is in formule (11.8) een nieuwe empirische koëfficiënt (nl. $0,1 (D_{f15}/D_{b50})^{0,5}$)

opgesteld, die op de plaats staat van ψ_s en e . De koëfficiënt van v.d. Meulen is als volgt in ψ_s en e uit te drukken:

$$0,1 (D_{f15}/D_{b50})^{0.5} = \psi_s / e^2 \quad (11.9)$$

Gezien het feit dat zowel formule (11.8) als (4.6) gefit zijn op de meetpunten uit [1], geven beide formules dezelfde waarde voor de kritieke snelheid.

11.3 J.Brauns: Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei hor. Durchströmung [2]

Brauns analyseert z'n metingen op vergelijkbare wijze als v.d. Meulen. Hij introduceert een karakteristiek Froude-getal bij begin van beweging Fr_{cr} , dat als volgt gedefinieerd is:

$$Fr_{cr} = \frac{v_{fcr}/n}{\sqrt{(\Delta g D_{b50})}} \quad (11.10)$$

Er wordt uit metingen gekonkludeerd dat Fr_{cr} ongeveer 0,65 à 0,70 is, als $D_{f15}/D_{b50} > 25$. In het gebied $8 < D_{f15}/D_{b50} < 25$ is er een niet te voorspellen konkurrentie tussen hydraulische en geometrische invloeden te bespeuren, die een aanzienlijke spreiding in de meetresultaten veroorzaakt.

In vergelijking tot formule (4.6) valt direkt op dat hier geen gebruik is gemaakt van de kritieke schuifspanningssnelheid van Shields. Het karakteristieke Froude-getal bij begin van beweging Fr_{cr} is als volgt in ψ_s en e uit te drukken:

$$Fr_{cr} = \frac{\sqrt{\psi_s}}{e} \quad (11.11)$$

Opmerkelijk is echter dat volgens Brauns de grootte van Fr_{cr} onafhankelijk is van D_{f15}/D_{b50} , terwijl dit zeker niet in de metingen uit [1] naar voren komt. De meetpunten van Brauns zijn in figuur 10 verwerkt. Ze blijken in het geheel te passen, waaruit gekonkludeerd wordt dat er wèl een afhankelijkheid van Re (of van D_{f15}/D_{b50}) aanwezig is.

11.4 D.B.Simons: Hydraulic test to develop design criteria for the use of Reno mattresses [20]

Het onderzoek beschreven in [20] is primair gericht geweest op de stabiliteit van de Reno mattresses, maar heeft daarnaast ook een ontwerpformule voor de snelheid in zo'n bodem- en oeverbekleding opgeleverd. Het is gebleken dat de snelheid in de matras (gaascontainers gevuld met stortsteen) onafhankelijk is van de hydraulische omstandigheden in de goot en dikte van de matras. De volgende ontwerpformule wordt gegeven (op basis van formule van Manning voor open waterlopen):

$$v_b = \frac{1}{r} (D_f/2)^{0.67} / (\tan(\alpha)) \quad (11.12)$$

met: v_b = snelheid bij grensvlak (porie- of filtersnelheid?) (m/s)
 r = ruwheid van basis (= 0,02) (-)
 D_f = gemiddelde korrelgrootte van basis (D_{f15}) (m)
 α = taludhelling (stroming het talud af) (°)

Gezien de oorsprong van bovenstaande formule wordt aangenomen dat v_b de porie-snelheid is. Voor de formule is aangenomen dat het verhang in de stortsteen gelijk is aan de bodemhelling en dat de stortsteen bestaat uit evenwijdige buizen met een diameter van $2D_f$.

De metingen zijn verricht bij een weinig hellende bodem ($\tan(\alpha) < 0.13$) en met een stortsteen vulling met korrelgrootte van 25 - 50 mm (fijnste) tot 38 - 63 mm (grofste).

Om geen erosie te krijgen moet de v_b kleiner zijn dan de kritieke snelheid bij het grensvlak v_e :

$$v_e = 16,1 \sqrt{D_b} \quad (11.13)$$

Deze formule is volgens een later versie van [20] opgesteld voor een Shields waarde 0,05.

Formule (11.13) kan vergeleken worden met (4.6) als daarin $\Delta = 1,65$ en $g = 9,8$ m/s² en $\psi_s = 0,05$ wordt ingevuld:

$$v_{pcr} = v_{fcr}/n = 0,9/e \sqrt{D_{b50}} \quad (11.14)$$

De grootte van $0,9/e$ varieert afhankelijk van D_{b50} tussen 2,5 en 4, terwijl in de formule van Simons deze waarde 16,1 zou moeten zijn. Dit betekent dat formule (11.13) een orde 4 tot 5 maal grotere kritieke snelheid oplevert dan formule (11.14). Dit grote verschil is niet te verklaren.

11.5 D. Stephenson: Rockfill in hydraulic engineering [21]

Stephenson gaat ervan uit dat erosie van basismateriaal bij een gelijke bodemschuifspanning optreedt als in een open waterloop. Er kan daarom gebruik gemaakt worden van het criterium van Shields:

$$\tau_{cr} = \rho \psi_s \Delta g D_b \quad (11.15)$$

met: τ_{cr} = schuifspanning bij begin van beweging (N/m^2)

De optredende schuifspanning τ wordt bepaald door aan te nemen dat het verhang in de filterlaag gelijk is aan het verhang in de open waterloop waar het filter de bodem of oeverbescherming voor is. De schuifspanning wordt dan verondersteld gelijk te zijn aan het volgende:

$$\tau = \rho g R i \quad (11.16)$$

met: R = hydraulische straal van poriën in het filter (m)

i = verhang in filter (-)

De grootte van R wordt benaderd met:

$$R = D_f / 8 \quad (11.17)$$

Voor het verband tussen het verhang i en de poriënsnelheid v_p wordt gegeven door de volgende formule, geldig voor turbulente stroming:

$$i = \frac{2 v_p^2}{g D_f} \quad (11.18)$$

Met bovenstaande formules leidt Stephenson geen formule voor v_{pcr} af, hetgeen wel mogelijk is:

$$v_{\text{pcr}} = 2 \sqrt{(\psi_s \Delta g D_b)} \quad (11.19)$$

Deze formule kan vergeleken worden met het resultaat uit hoofdstuk 4:

$$v_{\text{pcr}} = v_{\text{fcr}}/n = 1/e \sqrt{(\psi_s \Delta g D_b)} \quad (11.20)$$

De grootte van $1/e$ varieert, afhankelijk van D_{b50} , tussen 3 en 4,5. Ten opzichte van de faktor 2 in formule (11.19) kan gekonkludeerd worden dat formule (11.20) een orde twee maal grotere v_{pcr} oplevert. Dit verschil is gemakkelijk te verklaren, omdat in de afleiding van formule (11.19) een doorlatendheidsformule en de aanname $R = D_f/8$ is gebruikt. Dit veroorzaakt een lagere nauwkeurigheid dan formule (11.20), die gefit is aan metingen.

12. Ontwerprichtlijn

Granulaire filters met flauwe of steile zeefkromme op een basis bestaande uit zand met een D_{b50} tussen 0,1 mm en 1 mm kunnen met betrekking tot erosie van zand op het grensvlak zand-filter gedimensioneerd worden met behulp van de volgende ontwerpformule:

$$v_{fcr} = \left(\frac{n}{c} \left(\frac{D_{f15}}{v} \right)^m \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50} \left(\frac{\sin(\phi-\alpha)}{\sin\phi} - \frac{i_{\perp}}{\Delta(1-n_b)} \right)} \right)^{\frac{1}{1-m}} \quad (12.1)$$

De grootte van ψ_s , m , ϕ en c zijn afhankelijk van D_{b50} :

D_{b50} mm	c -	m -	ψ_s -	ϕ (°)
0,1	1,18	0,25	0,11	60
0,15	0,78	0,20	0,073	60
0,2	0,71	0,18	0,055	60
0,3	0,56	0,15	0,044	55
0,4	0,45	0,11	0,038	55
0,5	0,35	0,07	0,036	55
0,6	0,29	0,04	0,035	55
0,7	0,22	0	0,034	50
0,8	0,22	0	0,034	50
1,0	0,22	0	0,035	50

$$i_{cr} = \frac{190 (1-n)^2 v}{gn^3 D_{f15}^2} \cdot v_{fcr} + \frac{0,13}{n^5 D_{f15} \cdot g} v_{fcr}^2 \quad (12.2)$$

v_{fcr} = filtersnelheid langs grensvlak bij begin van beweging (m/s)

i_{cr} = verhang langs grensvlak bij begin van beweging (m/s)

n = porositeit filter (-)

ψ_s = parameter van Shields (zie figuur 5)

Δ = relatieve soortelijke massa van basismateriaal $(\rho_s - \rho)/\rho$ (-)

ρ_s = soortelijke massa van basismateriaal (kg/m³)

ρ = soortelijke massa van water (kg/m³)

- g = zwaartekrachtversnelling (m/s^2)
- D_{b50} = korrelgrootte van basismateriaal dat door 50% van de korrels op basis gewicht wordt onderschreden (m)
- D_{f15} = korrelgrootte van filter dat door 15% van de korrels op basis van gewicht wordt onderschreden (m)
- ϕ = rusthoek basismateriaal ($^\circ$)
- i_{\perp} = verhang in basis, loodrecht op grensvlak (-)
- n_b = porositeit van basis
- ν = kinematische viscositeit (m^2/s)
- c, m = constante

Bovenstaande formules zijn ook geldig voor cyclische stroming, zeker zolang de golfperiode minimaal 2 sec is. Om een stabiel grensvlak te hebben moet de periodiek terugkerende grootste waarde van v_f of i kleiner zijn dan respectievelijk v_{fcr} en i_{cr} .

De ontwerpformules voor zowel wijd gegradeerde als ongegradeerde filters zijn voor praktisch gebruik in een ontwerpdiagram samengevat (zie figuur 53). Deze figuur is geldig mits $\Delta = 1,65$ (basis van gewoon zand) en $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} m^2/s$ (water van 13°). In deze figuur kan i_{cr} afgelezen worden door te beginnen bij de betreffende D_{f15} van het filter op de bovenste horizontale as. Men trekt dan een verticale lijn naar boven totdat de kromme van het betreffende basismateriaal gesneden wordt (eventueel interpoleren). Vanaf dit snijpunt trekt men een horizontale lijn naar de kromme met de betreffende porositeit en vervolgens vertikaal omlaag naar de taludhelling. Dan horizontaal naar de kromme met het juiste verhang (loodrecht op het grensvlak) en vervolgens vertikaal naar de onderste horizontale as, waar het kritieke verhang langs het grensvlak afgelezen kan worden. De stippellijn in de figuur is een voorbeeld van deze procedure ($D_{f15} = 3,5 \text{ mm}$; $n = 0,35$; $\cot(\alpha) = 4$; $i_{\perp} = 10\%$; dus $i_{cr} = 25\%$).

Referenties

1. T. v.d. Meulen en J. v.d. Graaff
Granulair filters; Stroming evenwijdig aan scheidingsvlak.
Waterloopkundig Laboratorium; verslag M898 deel IV; sept '84.
2. J. Brauns
Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei horizontaler Durchströmung
Wasserwirtschaft 10/85; okt '85.
3. J.D. van den Bunt
Filteropbouw havendammen
deel III: Kritieke verhangen
Waterloopkundig Laboratorium; verslag M905 deel III; jan '69.
4. A.S. Paintal
Concept of critical shear stress in loose boundary open channels.
Journal of hydraulic research 9 (1971) nr. 1.
5. R. Fernandez Luque and R. van Beek
Erosion and transport of bed-load sediment
Journal of hydraulic research 14 (1976) nr. 2.
6. M. Klein Breteler
Erosie in granulaire filters; Open waterloop analogie
Waterloopkundig Laboratorium, appendix 3 uit [7], nov. 1984.
7. F.C.M. v.d. Knaap e.a.
Belasting en sterkte van zetsteenverdedigingskonstrukties op oevers en
dijken
WL/LGM; verslag oriënterende buro-studie;
M1115 deel XIV; M1795/M1881 deel XVI; Co416409/4; aug '85.
8. L.A. Philipse
Interne notitie, maart 1985
Waterschap "Fryslan", Harlingen.

Referenties (vervolg)

9. J.C.P. Johanson
Interne nota februari 1985
Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, Den Haag.
10. J.W. van der Meer e.a.
Bezwijken van zettingen; overzicht en bundeling van bestaande kennis
WL/LGM;M1795/M1881 deel XI; Co258902; juni '85.
11. A. de Graauw
Stormvloedkering Oosterschelde; Stabiliteit van granulaire filters bij
stationaire verhangen
Waterloopkundig Laboratorium; verslag M1488 deel I; febr. '82.
12. A de Graauw
Stormvloedkering Oosterschelde; Stabiliteit van granulaire filters bij
cyclische verhangen evenwijdig aan het grensvlak.
Waterloopkundig Laboratorium, verslag M1544, juli '81.
13. de Grauw, v.d. Meulen en v.d. Does de Bye
Design criteria for granular filters
Delft Hydraulics Laboratory, publication no. 287, jan. '83.
14. H. den Adel
Heranalyse doorlatendheidsmetingen d.m.v. de Forchheimer relatie.
Grondmechanica Delft, concept verslag CO-272550/56, mei '86.
15. M. Klein Breteler
Zanddichtheid van geotextielen als functie van de hydraulische belasting.
Waterloopkundig Laboratorium, conceptverslag modelonderzoek H195.13/Q440;
maart 1987.
16. H. den Adel
Cyclische doorlatendheid van granulair materiaal.
Grondmechanica Delft, notitie CO272550/35, maart '87.

Referenties (vervolg)

17. J. v.d. Graaff
Granulaire filters
Fosforslakken als filtermateriaal
Waterloopkundig Laboratorium, Verslag modelonderzoek M898 deel II,
nov. '83.

18. K. den Boer en A. Bezuijen
Taludbekleding van gezette steen
Overzicht onderzoek 1980-1984
Samenvattend verslag
WL/LGM; M1795/M1881 deel XV; C0272500/7 okt. '84.

19. M.A. Koenders
Hydraulic criteria for filters
Estuary Physics, internal report, july 1985.

20. D.B. Simons e.o.
Hydraulic test to develop design criteria for the use of Reno mattresses
Engineering Research Center, Colorado State University, March 1984.

21. D. Stephenson
Rockfill in hydraulic engineering
Developments in geotechnical engineering, Vol. 27
Elsevier Scientific Publ., Amsterdam, 1979.

22. J.C. Huis in het Veld e.a.
The closure of tidal basins
Delft University Press, 1984.

23. J. Kollen
Taludbekleding van gezette steen
Registratie van golfdrukken op een talud van 1:2½
Waterloopkundig Laboratorium, meetverslag H195.16, jan. '87.

Referenties (vervolg)

24. Sellmeijer e.a.

Taludbekleding van gezette steen

Oriënterende grondmechanische studies

WL/LGM; verslag M1795 deel IV, C0255780/45, juli '82.

dijknummer	opslag (dikte in cm)							cussenlaag			filter					cussenlaag		ondergrond		plaats c.o.v. SP (m)		lengte (km)	Provincie	Bijzonderheden		
	Basalt (cm)	Vilvoordee steen	Graniet, drenten of noren	Haringman	Basalton	Betonblokken	Grasbetontegels	Klinkers	Koperelakblokken	laagdikte (m)	soort en maat (cm)		laagdikte (m)	soort en maat (cm)			geotextiel	klei	zand	VAN	TOT				talud (cot n)	OHV c.o.v. SP (m)
											grind	grof puin		grind	grof puin/stortsteen	mijsteen										
1	x									0,15	20/40		0,6		x	x	x	x	x	-4,20	-3,20	3,5	-2,40	0,13	Z	
2										0,05	3/25		0,6		x	x	x	x	x	-2,20	-0,45	3,7	-1,37	0,95	C	
3										0,06			0,6		x	x	x	x	x	-2,60	-0,75	6,7		1,1	C	
4													0,6		x	x	x	x	x	-2,60	-0,75	6,7		1,1	C	
5													0,6		x	x	x	x	x	-3,57	-1,30	3	-3,91	31,5	C	
6													0,10	5/30						-3,20	-0,85	3		1,2	F	gemiddelde copslag
7	20/30														x					3,00	-1,40	3		3	F	gemiddelde copslag
8															x					-3,95	-1,45	3			F	schelling SP + 3,4m c.o.v. MAP
9	x												0,30		x	x	x	x	x	-3,95	-1,45	3			F	
10	x												0,30		x	x	x	x	x	-3,80	-1,47	3,3			M	
11	40/50												1,0		x	x	x	x	x	-3,45	-1,25	4	-2,71	0,55	M	
12	40/50									0,20			1,5		x	x	x	x	x	+3,95	-0,85	4	-2,81	0,87	M	geotextiel op mijsteen
13	40/50												1,5		x	x	x	x	x	-3,05	-0,85	4	-2,81	0,9	M	geotextiel op mijsteen
14	30/50												1,0		x	x	x	x	x	-3,25	-1,20	4	-2,81	0,8	M	filter op geotextiel op mijsteen
15	x									0,20			1,0		x	x	x	x	x	-3,25	-1,25	3,5	-3,25	0,17	M	geotextiel op staalessen
16	x												0,30		x	x	x	x	x	-3,95	-1,45	3	-3,25		M	filter op geotextiel op staalessen
17													0,30		x	x	x	x	x	-3,95	-1,45	3	-3,25		M	filter op geotextiel op staalessen
18													0,30		x	x	x	x	x	-3,80	-1,47	3,3			M	
19	30/40									0,15			0,30		x	x	x	x	x	-3,80	-1,47	3,3			M	
20	30/40									0,15			0,30		x	x	x	x	x	-3,80	-1,47	3,3			M	
21	21									0,05	5/25		0,80		x	x	x	x	x	-2,14	-2,14	4	0,34	Z	alleen bij overgangskonstructie	
22										0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-2,85	-0,30	4	0,34	Z		
23	23									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-2,85	-0,30	4	0,34	Z		
24	24									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-2,85	-0,30	4	0,34	Z		
25	25									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
26	26									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
27	27									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
28	28									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
29	29									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
30	30									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
31	31									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
32	32									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
33	33									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
34	34									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
35	35									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
36	36									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
37	37									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
38	38									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
39	39									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
40	40									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
41	41									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
42	42									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
43	43									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
44	44									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
45	45									0,05	3/25		1,0		x	x	x	x	x	-3,20	-0,85	4	-2,82	1,5	Z	
46/50	A	x								0,10					x	x	x	x	x	-3,05	-1,05	5	-3,03		Z	geopaneerd met Micromat
20/30	A														x	x	x	x	x	-3,05	-1,05	5	-3,03		Z	
20/30	A														x	x	x	x	x	-3,05	-1,05	5	-3,03		Z	
20/30	C														x	x	x	x	x	-3,05	-1,05	5	-3,03		Z	

Tabel 1, In de praktijk voorkomende filter- en bekledingskonstrukties

van -0,3 c/m +1,23 c.o.v. MAP
 tot MAP +5,00 m
 van -0,3 c/m +1,23 c.o.v. MAP
 tot MAP +4,20 m
 van -0,3 c/m +1,23 c.o.v. MAP
 tot MAP +4,20 m
 van -0,3 c/m +1,23 c.o.v. MAP
 tot MAP +5,00 m
 van -0,3 c/m +1,23 c.o.v. MAP
 tot MAP +4,20 m

proef	D _{50b} (mm)	D _{50f} (mm)	D _{15f} (mm)	n _f %	$\frac{n^2 D_{15f}}{D_{50b}}$ (-)	visueel				extrapolatie			
						v _{fcr} mm/s	i _{cr} (-)	e (-)	Re (-)	v _{fcr} mm/s	i _{cr} (-)	e (-)	Re (-)
1	0,16	4,0	2,8	41	2,94	15,2	0,450	0,35	35	15,6	0,450	0,36	36
2	0,16	6,0	4,2	43	4,85	13,8	0,140	0,41	48	16,8	0,190	0,35	59
3	0,16	12,0	8,4	39	7,99	14,0	0,080	0,36	98	18,3	0,110	0,29	128
4	0,16	18,0	12,6	42	13,9	16,8	0,043	0,33	176	21,4	0,058	0,27	225
5	0,16	24,0	16,8	39	16,0	14,0	0,034	0,36	196	20,7	0,062	0,25	290
6	0,16	30,0	21,0	39	20,0	17,6	0,035	0,29	308	20,7	0,045	0,25	362
7	0,16	50,0	34,7	38	31,3	20,5	0,024	0,24	593	24,3	0,032	0,21	703
8	0,16	120,0	83,3	44	101	27,3	0,012	0,21	1895	35,2	0,016	0,17	2443
9	0,82	6,0	4,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,82	12,0	8,4	38	1,48	41,0	0,480	0,20	287	41,8	0,480	0,19	293
11	0,82	18,0	12,6	38	2,22	37,2	0,190	0,22	391	-	-	-	-
11A	0,82	18,0	12,6	37	2,10	29,6	0,120	0,27	311	35,2	0,176	0,22	370
11B	0,82	18,0	12,6	37	2,10	34,0	0,165	0,23	357	35,2	0,200	0,22	370
12	0,82	24,0	16,8	37	2,80	35,5	0,135	0,22	497	35,5	0,135	0,22	497
13	0,82	50,0	34,7	37	5,79	31,1	0,043	0,25	899	35,2	0,058	0,22	1018
13A	0,82	50,0	34,7	39	6,44	29,6	0,033	0,28	856	37,1	0,063	0,22	1073
14	0,82	75,0	52,0	40	10,1	32,8	0,032	0,26	1421	35,6	0,042	0,24	1543
15	0,82	120,0	83,3	39	15,5	33,5	0,020	0,25	2325	42,1	0,030	0,20	2922

$$\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (13}^\circ\text{C)}$$

$$D_{b50} = 0,16 \text{ mm} \Rightarrow \psi_g = 0,070 \Rightarrow v_{*cr} = 13,5 \text{ mm/s}$$

$$D_{b50} = 0,82 \text{ mm} \Rightarrow \psi_g = 0,034 \Rightarrow v_{*cr} = 21,2 \text{ mm/s}$$

$$e = \frac{n v_{*cr}}{v_{fcr}} \quad Re = \frac{v_{fcr} D_{f15}}{\nu}$$

Tabel 2, resultaten van modelonderzoek [1] met stationaire stroming langs horizontaal grensvlak

	basis			filter				$\frac{n^2 D_{f15}}{D_{b50}}$	v_{fcr}	i_{cr}	Re	e
	D_{b50}	D_{b10}	U_b	D_{f15}	D_{f50}	U_f	n					
	mm	mm	-	mm	mm	-	-					
1	0,24	0,21	1,19	5,5	6,7	1,34	0,39	3,49	18,2	23	77	0,30
2				5,5	6,7	1,34	0,40	3,67	16,1	22	68	0,34
3				5,5	6,7	1,34	0,42	4,04	19,1	20	81	0,30
4				8,9	10,9	1,32	0,38	5,35	17,5	12	120	0,30
5				16,0	21,4	1,61	0,38	9,63	17,0	5½	209	0,31
6	0,39	0,32	1,28	5,5	6,7	1,34	0,39	2,15	24,9	40	105	0,25
7				8,9	10,9	1,32	0,38	3,30	18,3	14	125	0,33
8				16,0	21,4	1,61	0,38	5,92	20,0	7	246	0,30
9				21,7	25,8	1,27	0,40	8,90	21,9	5	366	0,29
10	0,64	0,51	1,29	5,5	6,7	1,34	0,39	1,31	34,0	66	144	0,22
11				5,5	6,7	1,34	0,40	1,38	33,2	65	140	0,23
12				8,9	10,9	1,32	0,38	2,01	22,9	19	157	0,32
13				8,9	10,9	1,32	0,38	2,01	23,6	19	162	0,31
14				16,0	21,4	1,61	0,38	3,61	24,7	9	304	0,29

Op basis van visuele waarnemingen.

$$Re = v_{fcr} D_{f15} / \nu$$

$$\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$e = \frac{n \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}}}{v_{fcr}}$$

$$U = D_{60}/D_{10}$$

$$\Delta = 1,65$$

$$\psi_s = 0,049 \text{ als } D_{b50} = 0,24 \text{ mm}$$

$$\psi_s = 0,039 \text{ als } D_{b50} = 0,39 \text{ mm}$$

$$\psi_s = 0,035 \text{ als } D_{b50} = 0,64 \text{ mm}$$

Tabel 3, resultaten van modelonderzoek [2] met stationaire stroming langs horizontaal grensvlak

	gegeven						berekend	gemeten
	D_{f15} (mm)	n_f (%)	a (s/m)	b (s ² /m ²)	v_f mm/s	Re (-)	i %	i %
1	2,8	41	22,4	399	15,2	35	43,3	45
					15,6	36	44,7	45
2	4,2	43	8,06	220	13,8	48	15,3	14
					16,8	59	19,8	19
3	8,4	39	3,09	163	14,0	98	7,5	8
					18,3	128	11,1	11
4	12,6	42	$995 \cdot 10^{-3}$	80,6	16,8	176	4,0	4,3
					21,4	225	5,8	5,8
5	16,8	39	$773 \cdot 10^{-3}$	81,3	14,0	196	2,7	3,4
					20,7	290	5,1	6,2
6	21,0	39	$495 \cdot 10^{-3}$	65,0	17,6	308	2,9	3,5
					20,7	362	3,8	4,5
7	34,7	38	$202 \cdot 10^{-3}$	43,7	20,5	593	2,3	2,4
					24,3	703	3,1	3,2
8	83,3	44	$18,5 \cdot 10^{-3}$	10,1	27,3	1895	0,8	1,2
					35,2	2443	1,3	1,6
10	8,4	38	3,46	180	41,0	287	44,5	48
					41,8	293	46,0	48
11	12,6	38	1,54	120	37,2	391	22,4	19
11A	12,6	37	1,72	134	29,6	311	16,8	12
					35,2	370	22,6	17,6
11B	12,6	37	1,72	134	34,0	357	21,3	16,5
					35,2	370	22,6	20
12	16,8	37	$966 \cdot 10^{-3}$	100	35,5	497	16,1	13,5
					35,5	497	16,1	13,5
13	34,7	37	$226 \cdot 10^{-3}$	48,6	31,1	899	5,4	4,3
					35,2	1018	6,8	5,8
13A	34,7	39	$181 \cdot 10^{-3}$	39,4	29,6	856	4,0	3,3
					37,1	1073	6,1	6,3
14	52,0	40	$72,4 \cdot 10^{-3}$	23,7	32,8	1421	2,8	3,2
					35,6	1543	3,3	4,2
15	93,3	39	$31,5 \cdot 10^{-3}$	16,4	33,5	2325	2,0	2,0
					42,1	2922	3,0	3,0

$$a = \frac{284 (1-n)^2 v}{g n^3 D_{f15}^2}$$

$$b = \frac{0,31}{n^4 D_{f15} g}$$

$$i = a v_f + b v_f^2 \quad Re = v_f D_{f15} / \nu$$

$$\nu = 1,2 \cdot 10^{-6}$$

Tabel 4 Berekend verhang in vergelijking tot het gemeten verhang uit [1]

Zeegrind [11]:

	gemeten				geschat	berekend
	D_{f15} mm	D_{f90}/D_{f10} -	D_{b50} mm	i_{cr} -	n -	i_{cr} -
T1	0,70	32	0,15	>1,1	0,28 à 0,32	7 à 5
T2	2,0	18	0,15	0,75	0,32 à 0,36	0,91 à 0,66
T4	1,5	8	0,15	0,60	0,36 à 0,40	1,03 à 0,76
T8	3,3	2,5	0,15	0,27	0,40 à 0,44	0,24 à 0,18
T5	2,1	2,5	0,15	0,47	0,40 à 0,44	0,45 à 0,34
T6	1,0	2,5	0,15	1,05	0,40 à 0,44	1,45 à 1,08
T7	0,7	2,5	0,15	>1,1	0,40 à 0,44	2,6 à 1,9

Fosforslakken [17]:

	gemeten						berekend	
	D_{f15} mm	D_{f90}/D_{f10} -	n -	D_{b50} mm	i_{cr} -	v_{pcr} mm/s	i_{cr} -	v_{pcr} mm/s
T1	30	5,4	?	0,165	0,034	-	0,036 à 0,041	
T1*	30	5,4	0,36	0,165	0,039	50	0,039	60
T2	30	5,4	0,38	0,210	0,039	50	0,034	61
T2*	30	5,4	0,36	0,210	0,035	52	0,039	60
T3	30	6,4	0,36	0,165	0,072	76	0,044	58

Sterk gegradeerd materiaal [1]:

	gemeten						berekend	
	D_{f15} mm	D_{f90}/D_{f10} -	n -	D_{b50} mm	i_{cr} -	v_{pcr} mm	i_{cr} -	v_{pcr} mm/s
T16	7,4	7,7	0,33	0,16	0,110	0,048	0,172	44
T17	12,5	7,7	0,34	0,16	0,086	0,057	0,095	50
T18	12,5	7,7	0,31	0,82	0,244	0,108	0,408	97

Tabel 5 Resultaten van modelonderzoek en berekeningen mbt filter met flauwe zeeffkromme

Proef nr.	talud	basis	filter		i_{cr} %
		D_{b50} mm	D_{f15} mm	D_{f50} mm	
9	1 : 4½	0,13	14	17	14
1	-	0,13	14	17	15
10	1 : 4½	0,22	14	17	17
4	-	0,22	14	17	25

Op basis van gemeten zandtransporten.

Tabel 6, Resultaten van modelonderzoek [3] met stationaire stroming langs een talud

Proef nr.	talud	basis	filter			i_{cr} %	v_{fcr} mm/s	Re -
		D_{b50} mm	D_{f15} mm	D_{f50} mm	n_f -			
1	-	0,15	3,8	5,4	0,34	23	16	51
2	1 : 3	0,15	3,8	5,4	0,35	18	14	44
3	1 : 3	0,15	3,8	5,4	0,33	25	17	54

Op basis van zandtransport (begin = 0,2 g/s transport)

$$Re = v_{fcr} D_{f15} / \nu \quad \nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Tabel 7, resultaten modelonderzoek (paragraaf 6.1) met stationaire stroming langs een talud

	basis	filter			i_{\perp}	v_{fcr}	i_{cr}	Re
	D_{b50}	D_{f15}	D_{f50}	n_f				
	mm	mm	mm	-	%	mm/s	%	-
1	0,82	10,5	14	0,40*	0	31	19	360
2	0,82	10,5	14	0,41*	36	32	20	370
3	0,82	10,5	14	0,42	56	33	15	385

Op basis van zandtransport ($s_{cr} = 0,2 \text{ gr/s}$)

* geschat op basis van gemeten doorlatendheid

Tabel 8, resultaten van modelonderzoek (paragraaf 7.1) met een stromingskomponent loodrecht op horizontaal grensvlak

proef	T s	basis	filter			\bar{v}_f mm/s	\bar{i} %	$(\bar{v}_f + \hat{v}_f)_{cr}$ mm/s	$(\bar{i} + \hat{i})_{cr}$ %
		D_{b50} mm	D_{f15} mm	D_{f50} mm	n_f -				
1	-	0,16	3,8	5,4	0,43	-	-	16	22
2	2	0,16	3,8	5,4	0,41	0	0	15	20
3	2	0,16	3,8	5,4	0,43	10	11	17	22
4	2	0,16	3,8	5,4	0,43	11	13	17	23
5	-	0,82	20	24	0,41	-	-	35	11
6	2	0,82	20	24	0,41	0	0	35	13
7	2	0,82	20	24	0,41	25	6	40	13

$$v = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

begin van beweging: transportklasse D/E

Tabel 9, resultaten van modelonderzoek (hoofdstuk 8) met cyclische stroming langs horizontaal grensvlak.

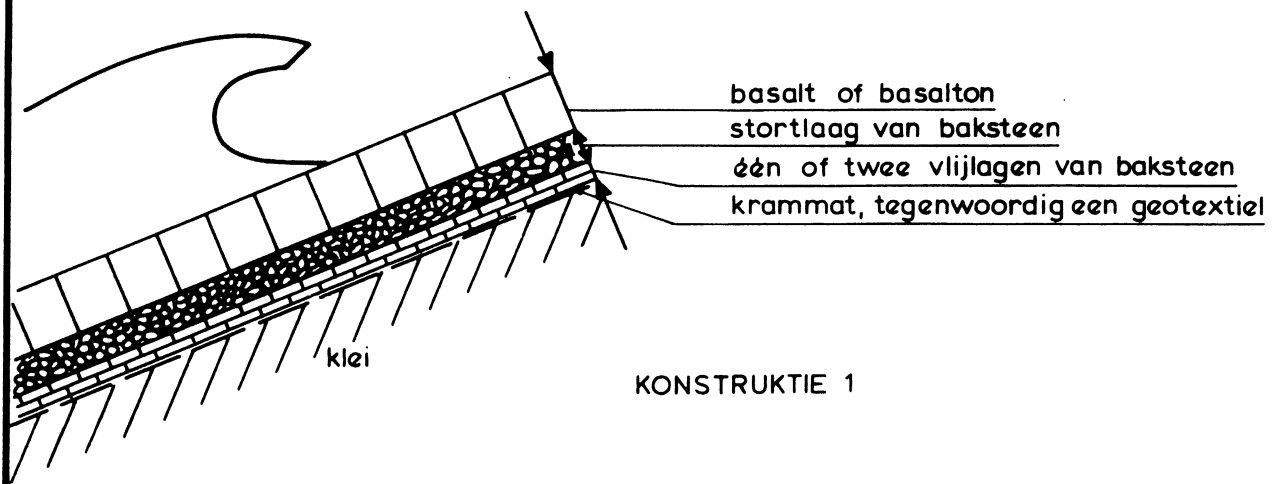
Grondstof ketting	: polyetheen
inslag	: polyetheen
Gewicht	: 117 gr/m ²
Treksterkte ketting	: 1300 N/5 cm
inslag	: 1310 N/5 cm
Rek bij breuk ketting	: 28%
inslag	: 24%
Zeefanalyse 090	: 383 (10 ⁻⁶ m)
098	: 407 (10 ⁻⁶ m)
Waterdoorlatendheid	
verval	: 0.03 (10 ⁻² m)
verhang	: 0.58
Maaswijdte	: 0.27 mm
Dikte	: 0.57 (10 ⁻³ m)
Barstdruk	: 101.9 kg

Tabel 10 Specificaties geotextiel Nicolon 66336

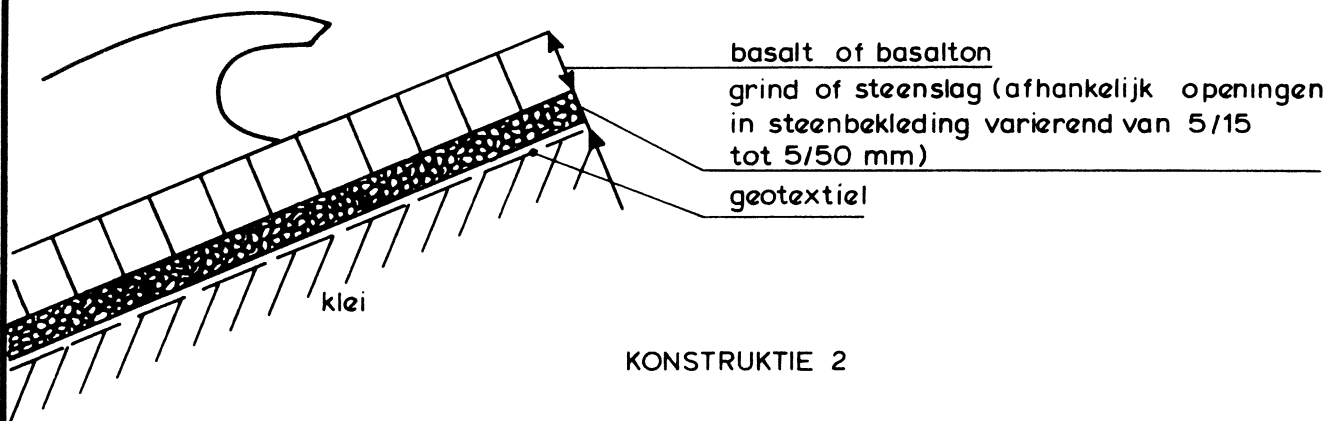
		proef		
		Ia	Ib	II
taludhelling - $\tan\alpha$	(-)	0,4	0,4	0,4
golfhoogte - H	(m)	0,4	0,4	0,4
golfperiode - T	(s)	2,5	2,5	2,5
waterdiepte - h	(m)	0,85	0,92	0,85
toplaagdikte - D	(m)	0,1	0,1	0,1
open oppervlak toplaag	(%)	18	18	18
doorlatendheid toplaag - k^1	(m/s)	0,019	0,019	0,017
dikte granulaair filter - b	(m)	0,23	0,23	0,23
korrelgrootte v/h filtermat. - D_{f15}	(m)	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
doorlatenheid granulaair filter - k_o	(m/s)	0,025	0,025	0,021
porositeit filter - n	(-)	0,37	0,37	0,36
lek lengte - λ	(m)	0,064	0,064	0,063
korrelgrootte v/h basismat. - D_{b50}	(m)	$150 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6}$
porositeit v/h basismat. - n_b	(-)	0,39	0,39	0,39
golfoploop - R_u^1)	(m)	0,6	0,6	0,6
golfterugloop - R_d^1)	(m)	-0,3	-0,3	-0,3
freatische lijn filter ¹⁾)	(m)	0,41- 0,45	0,38- 0,42	0,41- 0,4 5
stijghoogte in stijgbuis ¹⁾)	(m)	0,35	0,32	0,39
watertemp	(°C)	12	12	13
viscositeit ν	(m ² /s)	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$

Tabel 11 Gegevens van de proeven

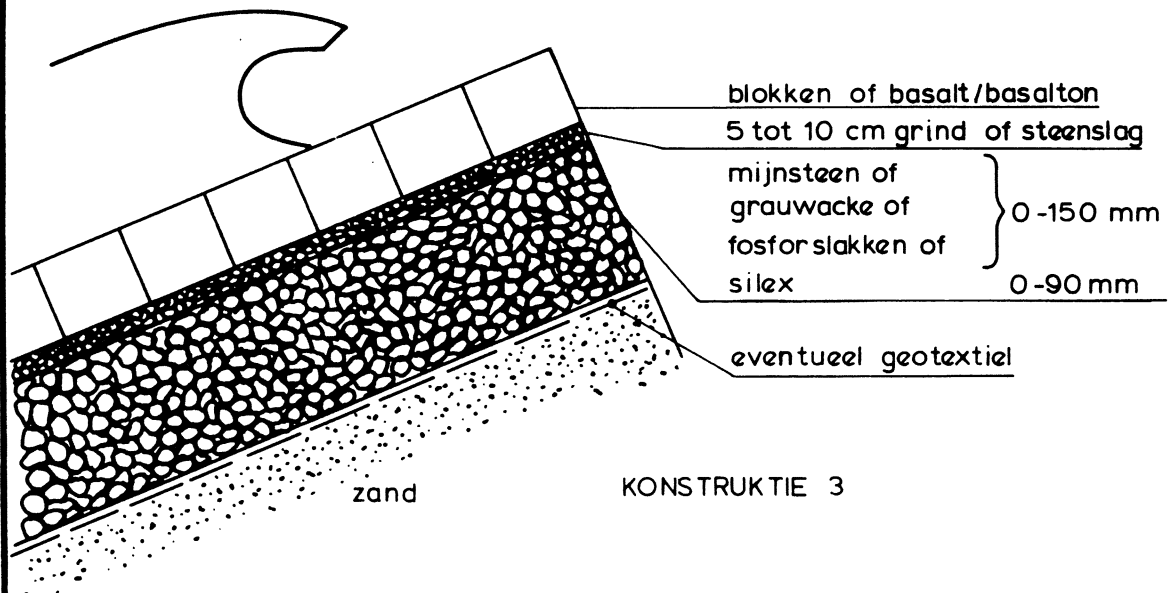
¹⁾ hoogte t.o.v. stilwaterlijn



KONSTRUKTIE 1

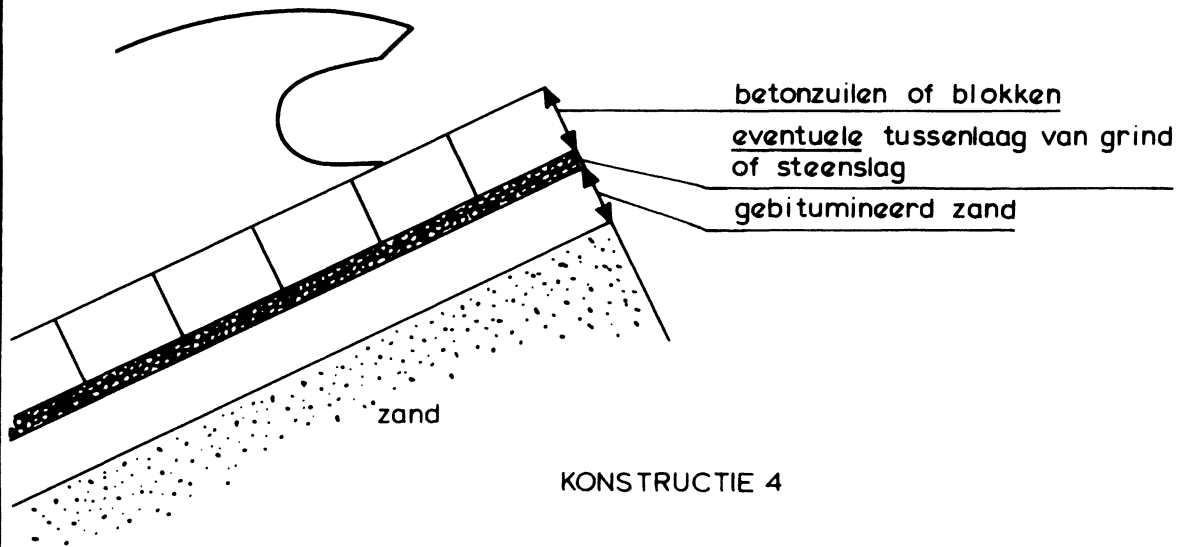


KONSTRUKTIE 2

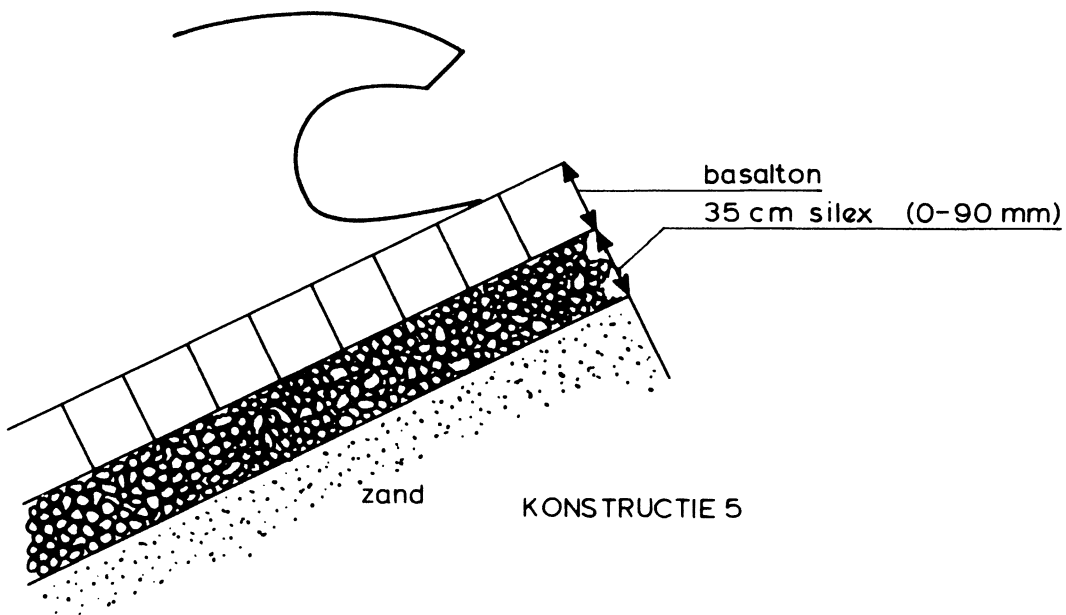


KONSTRUKTIE 3

MEEST VOORKOMENDE FILTERCONSTRUKTIES
ONDER STEENZETTINGEN

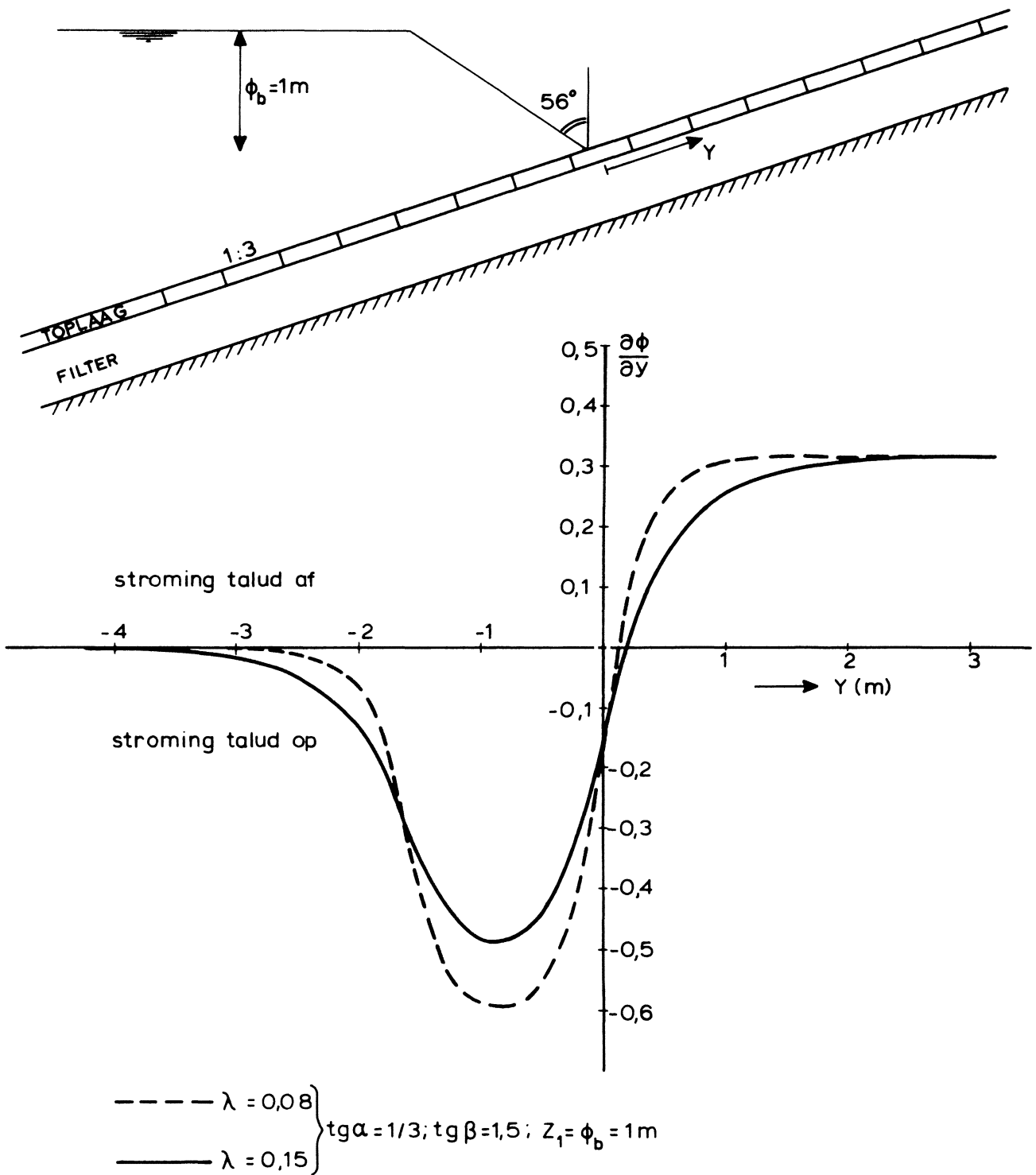


KONSTRUCTIE 4



KONSTRUCTIE 5

MEEST VOORKOMENDE FILTERKONSTRUCTIES
ONDER STEENZETTINGEN

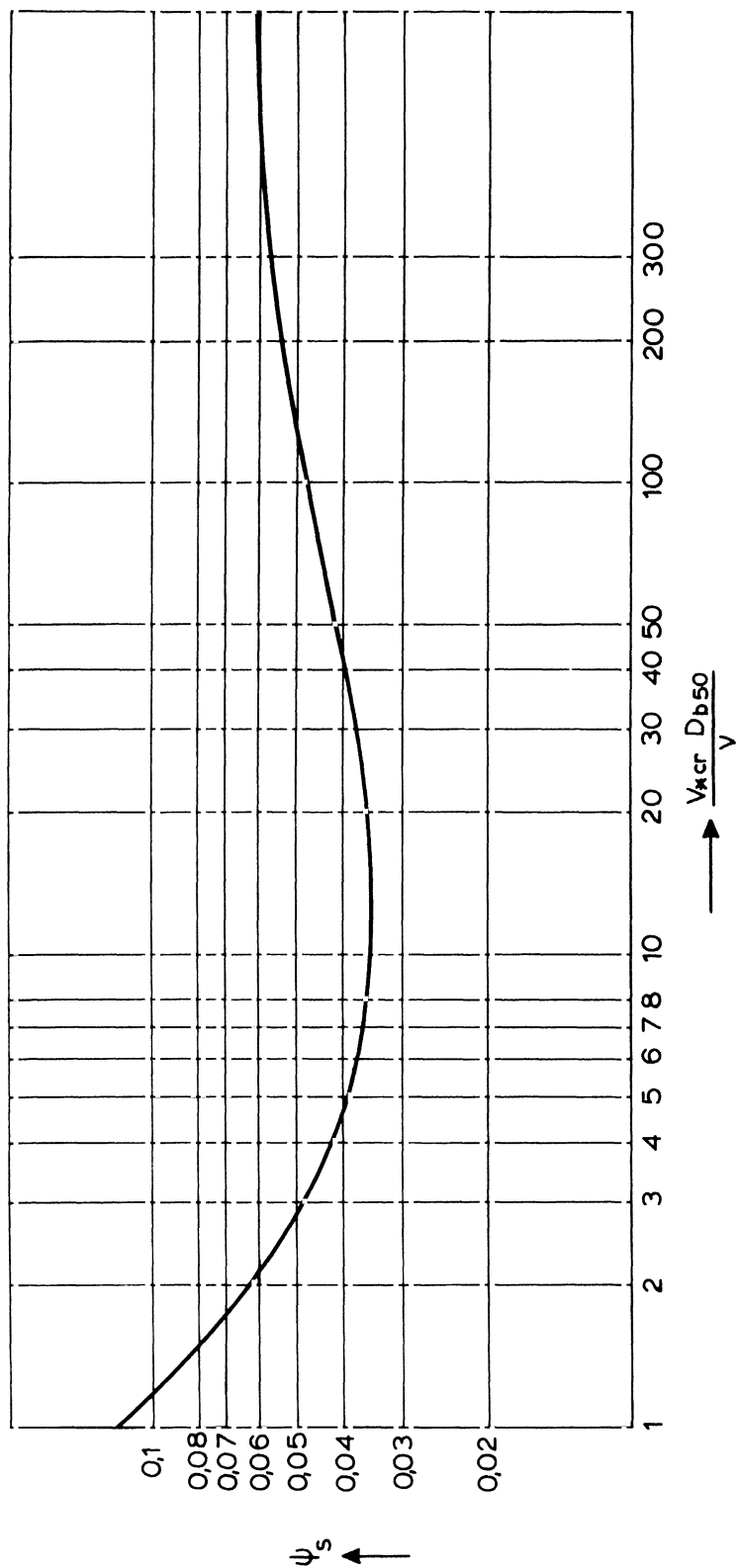


VERHANG EVENWIJDIG AAN TALUD

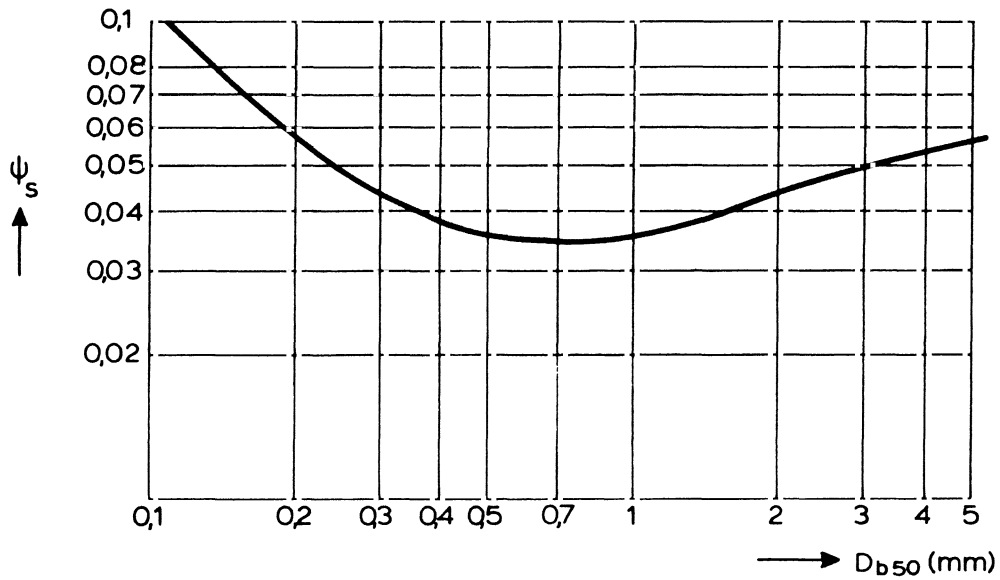
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 3



KROMME VAN SHIELDS [4]



Uitsluitend geldig als $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $\Delta = 1,65$; $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

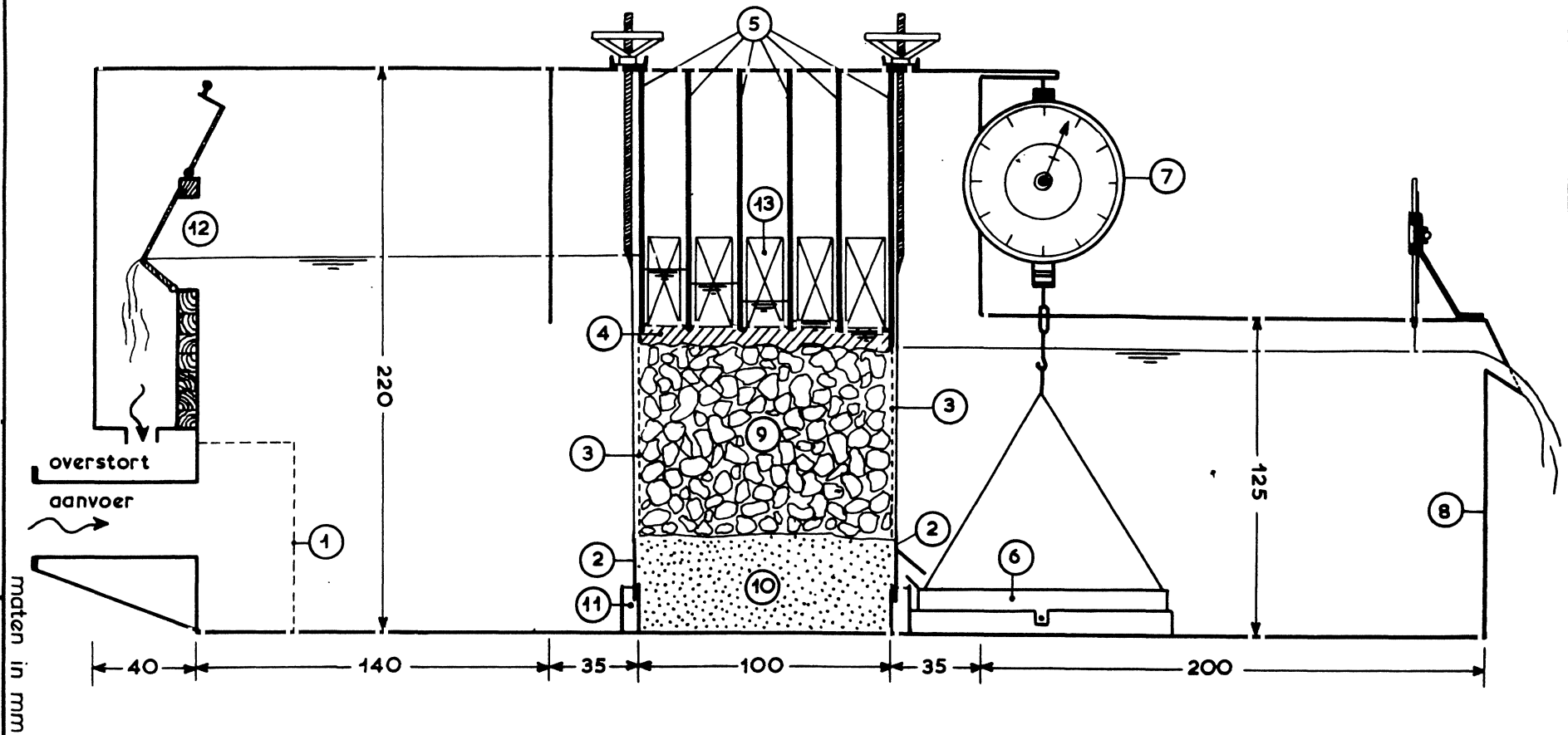
$$D_{b50} = \sqrt[3]{\frac{R_{\text{gr}}^2 \nu^2}{\Delta g \psi_s}}$$

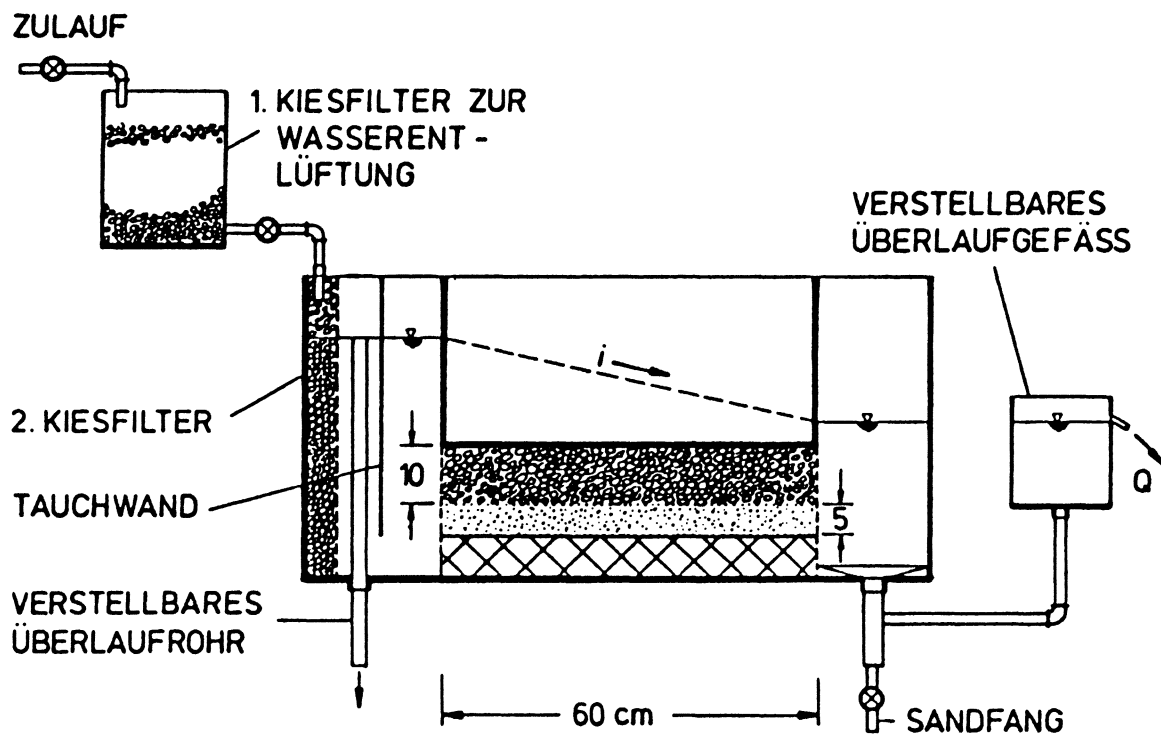
SHIELDS PARAMETER ALS FUNKTIE VAN D_{b50}

OVERZICHT PROEFOPSTELLING VAN V/D MEULEN [1]

- 1 - zeef
- 2 - schuif i.v.m. afnemende hoogte basis materiaal
- 3 - gaas
- 4 - afdichtende schuimplastic laag
- 5 - parallelle wanden
- 6 - opvangbak getransporteerd materiaal
- 7 - meting hoeveelheid getransporteerd materiaal

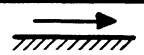
- 8 - meetstuw
- 9 - filter materiaal
- 10 - basis materiaal
- 11 - afdichtende kleilaag
- 12 - verval instelling
- 13 - verzwaring





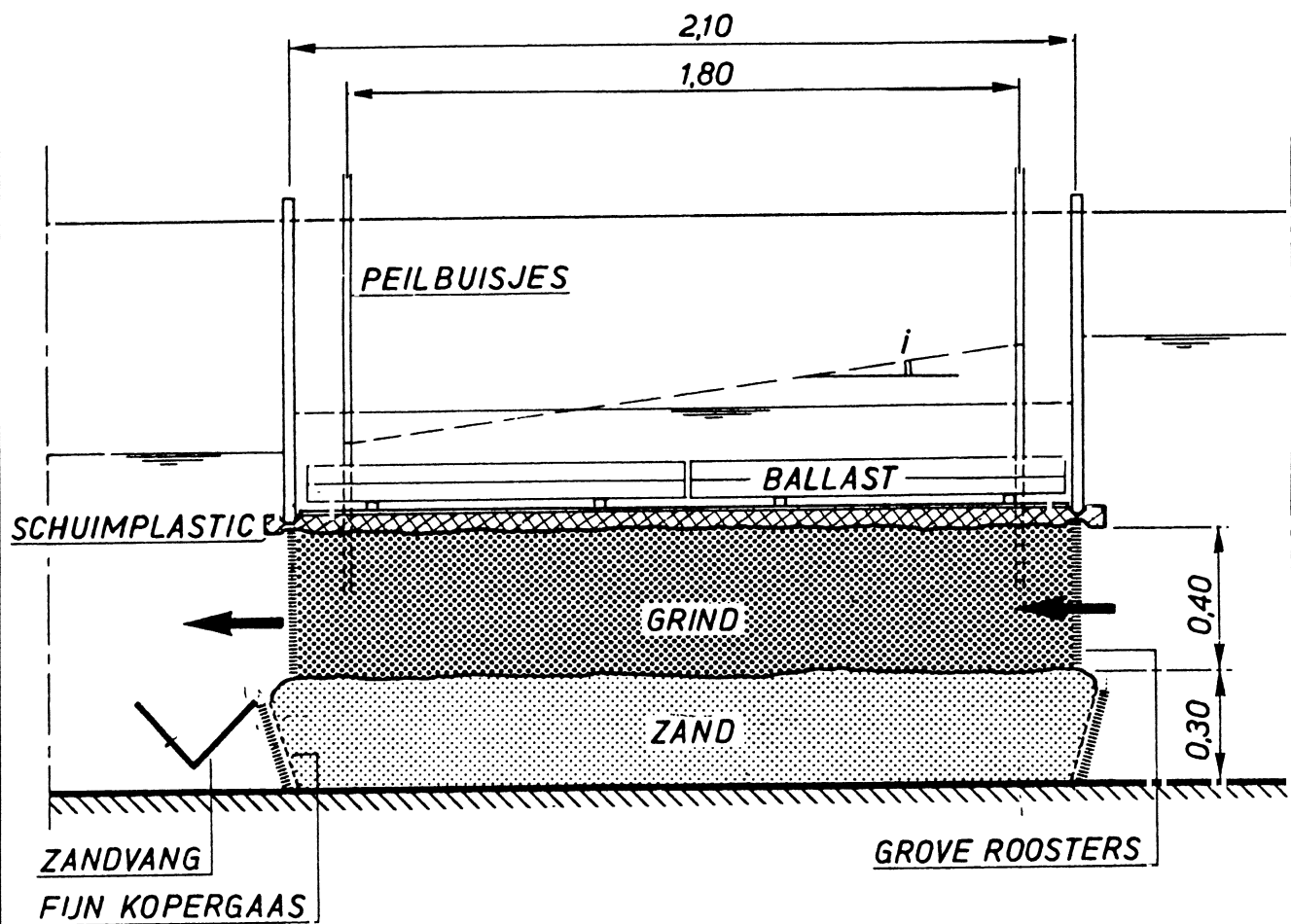
MODELOPSTELLING VAN BRAUNS [2]

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



H 195

FIG. 7



GOOTBREEDTE = 0,70 m.

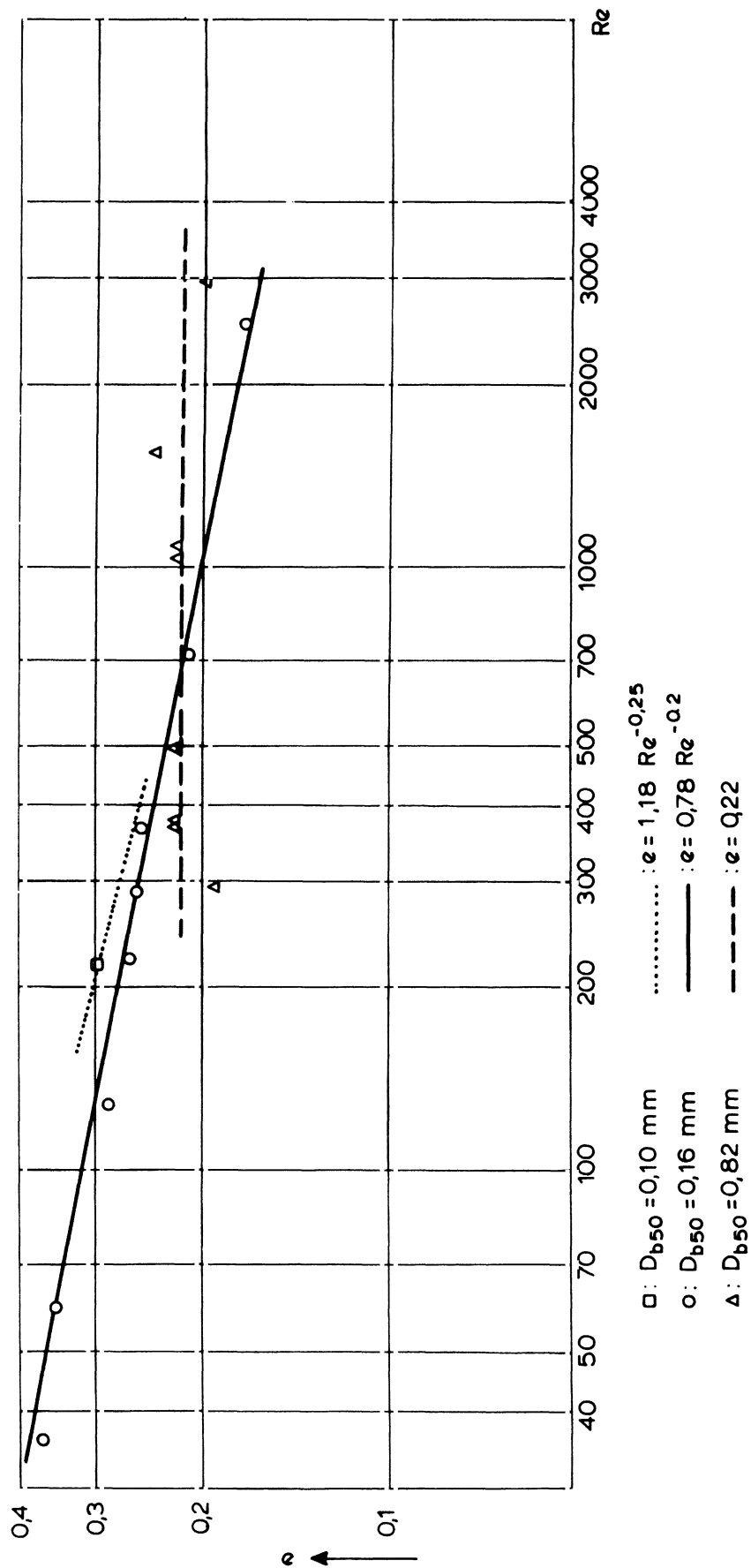
MEETOPSTELLING VAN VD BUNT [3]

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



H 195

FIG. 8

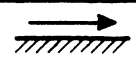


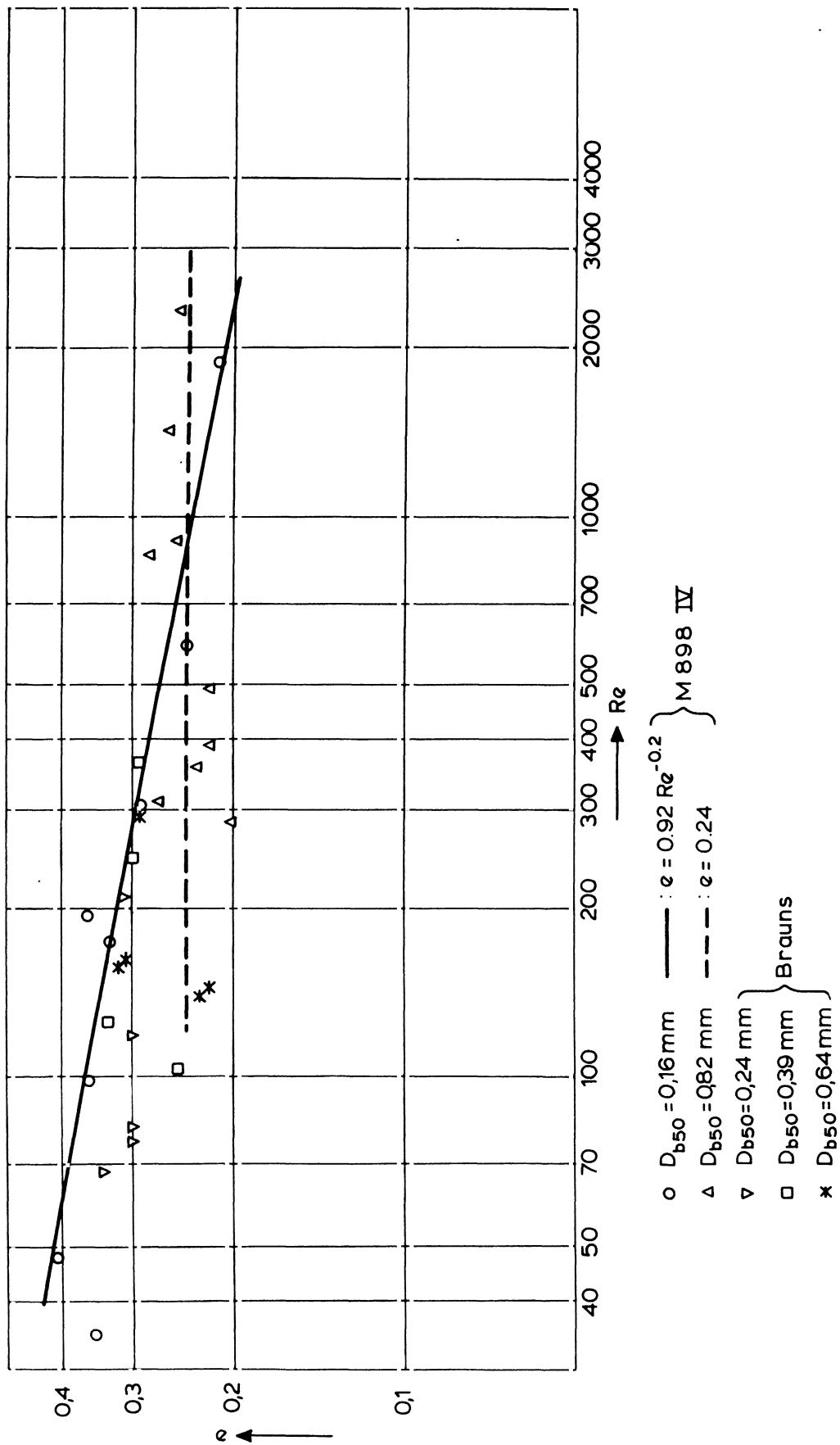
e ALS FUNKTIE VAN REYNOLDSGETAL OP BASIS
VAN ZANDTRANSPORTMETINGEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

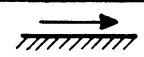
H 195

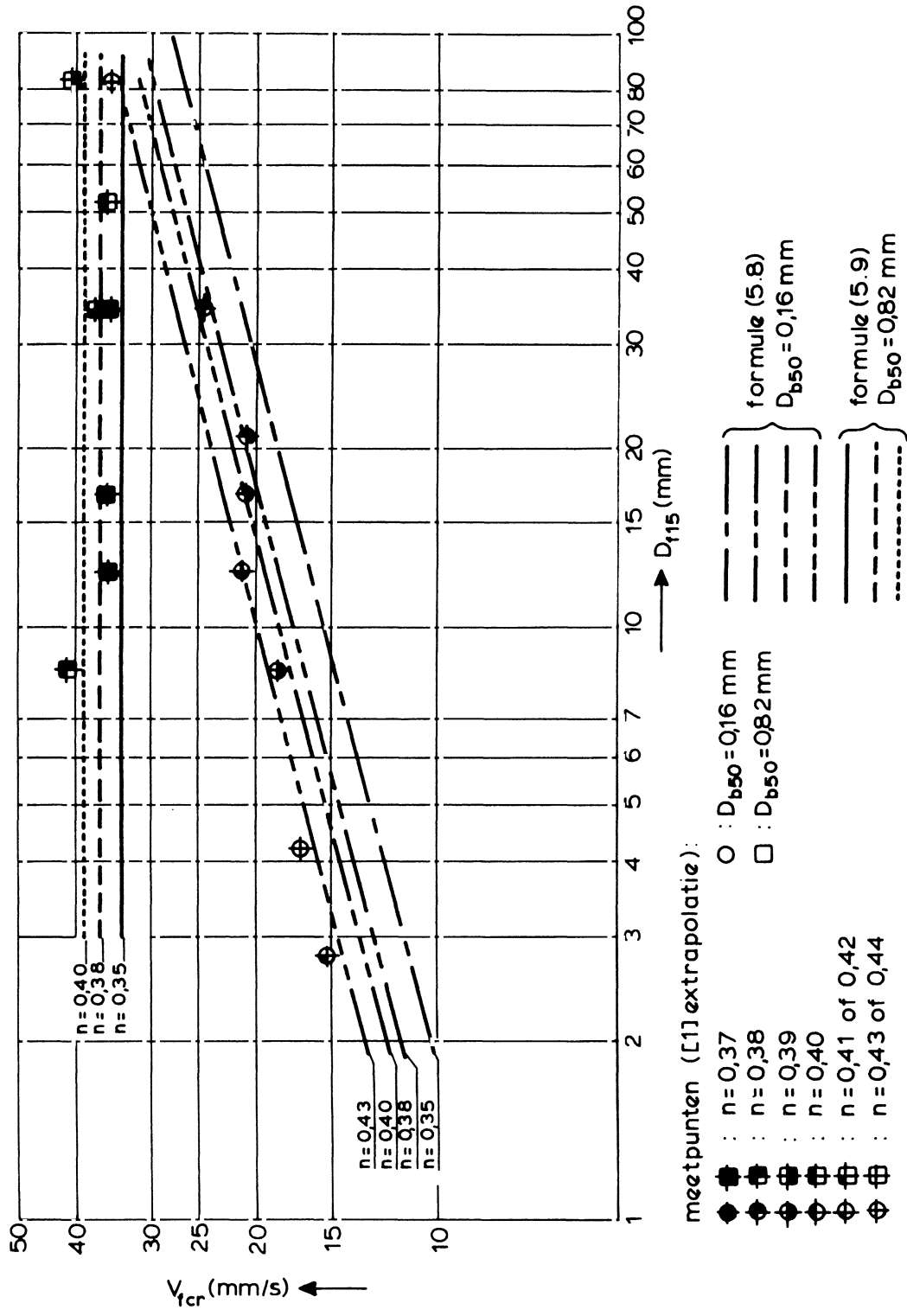
FIG. 9





ϵ ALS FUNKTIE VAN REYNOLDSGETAL OP BASIS VAN VISUELE WAARNEMINGEN





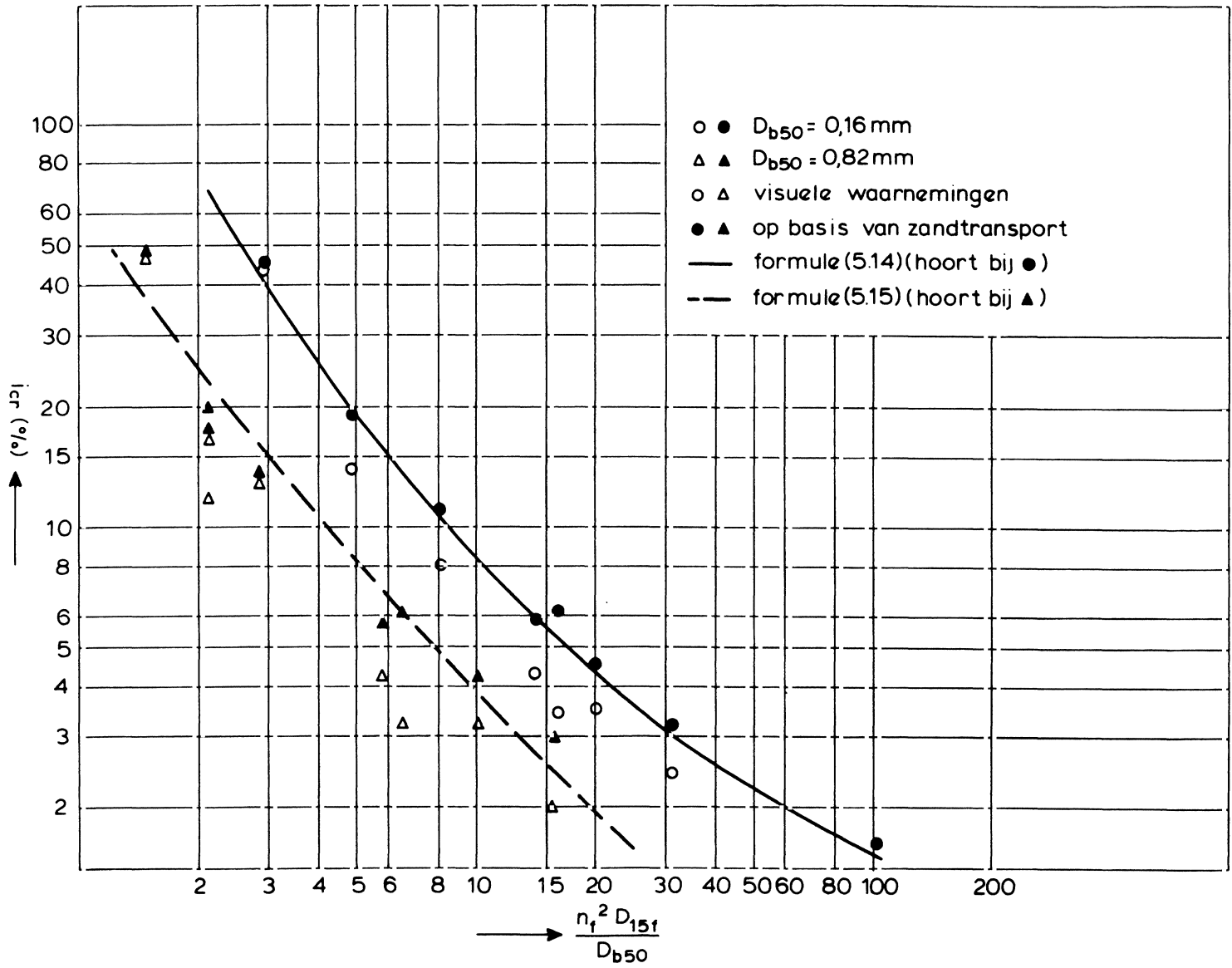
KRITIEKE FILTERSNELHEID (MEETPUNTEN UIT [1])

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

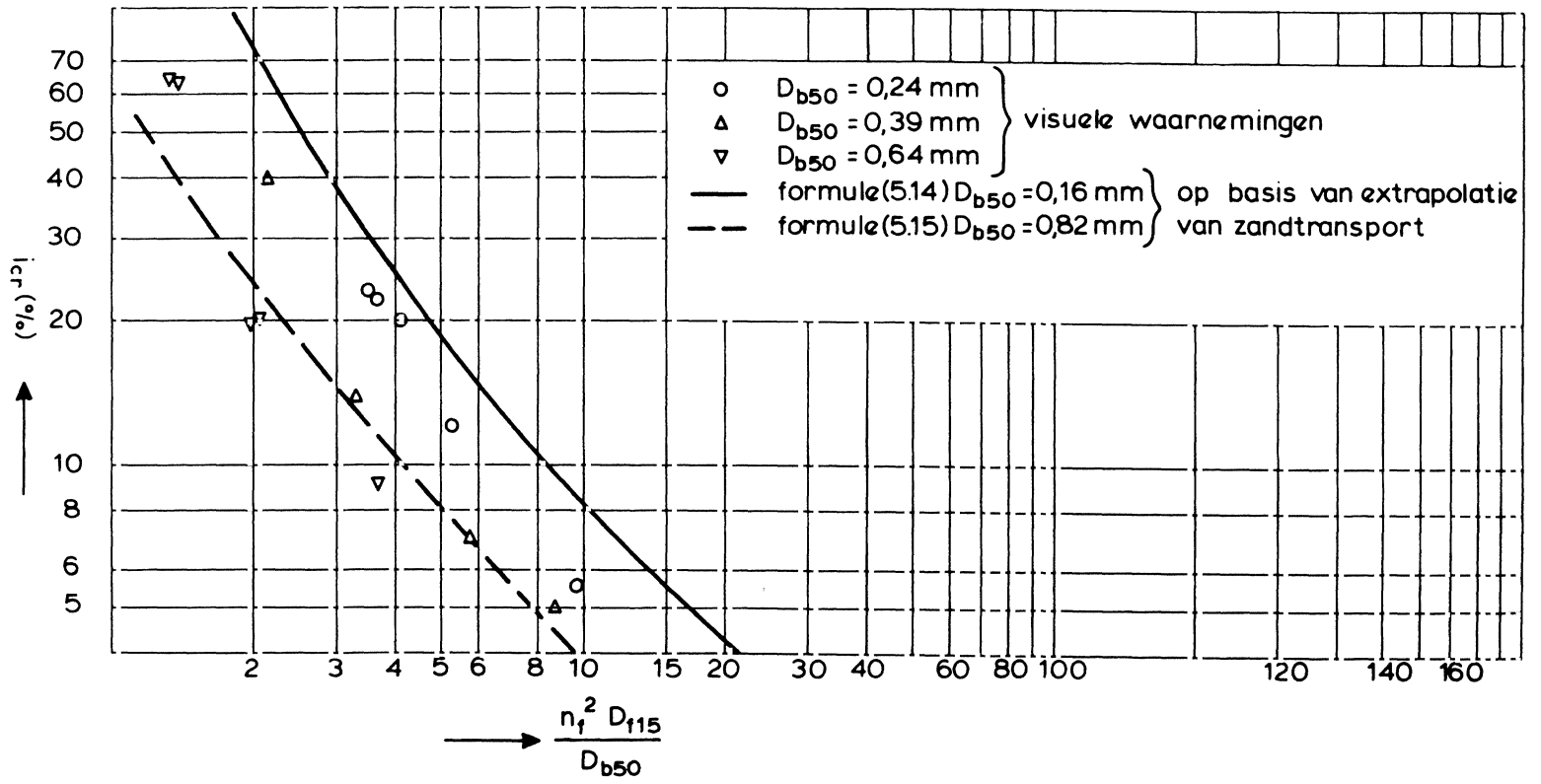
H 195

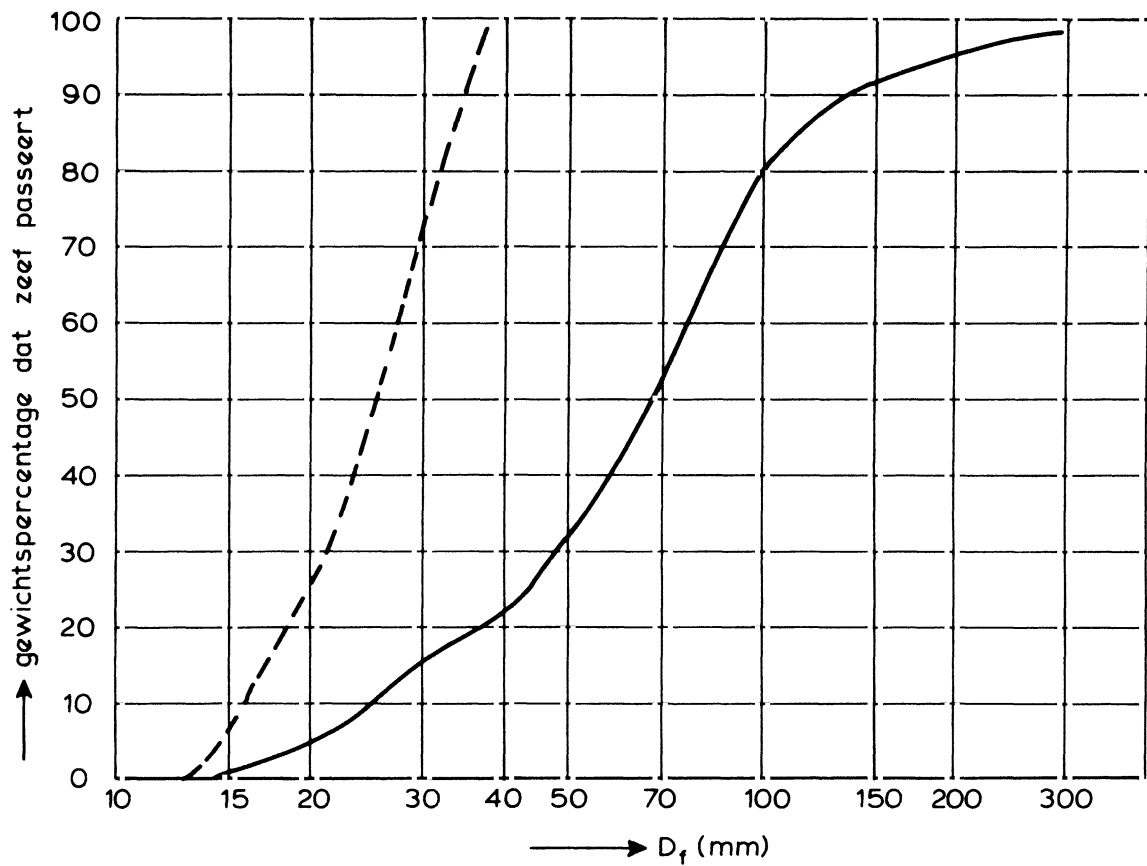
FIG. 11





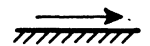
KRITIEK VERHANG (UIT [2])
(VISUELE WAARNEMING)





— alle fosforslakken
 - - - - - fijne fraktie

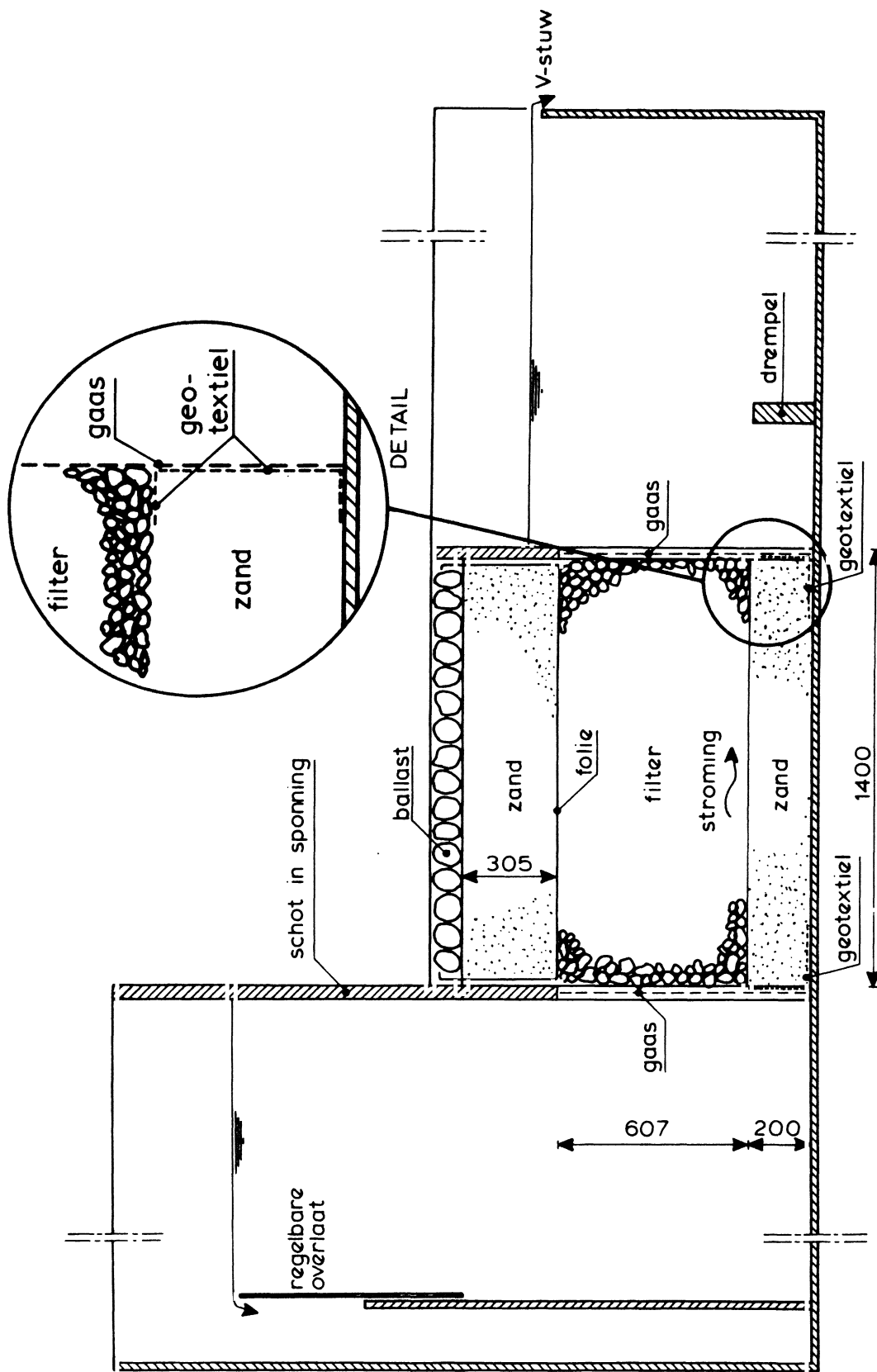
ZEEFKROMME VAN FOSFORSLAKKEN A



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 14



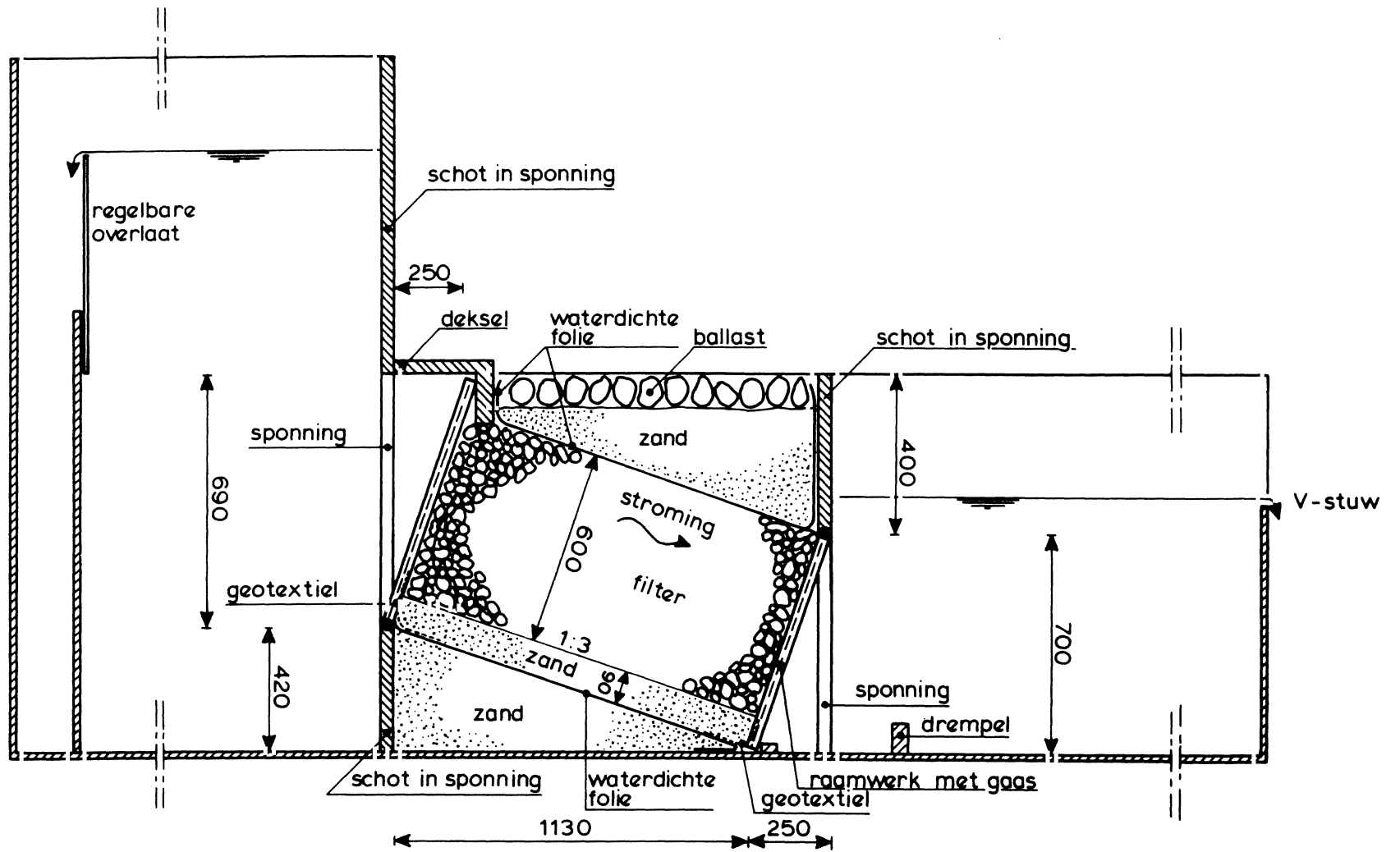
breedte ≈ 1 m

MEETOPSTELLING FILTERBAK HORIZONTAAL
 GRENSVLAK MATEN IN MM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

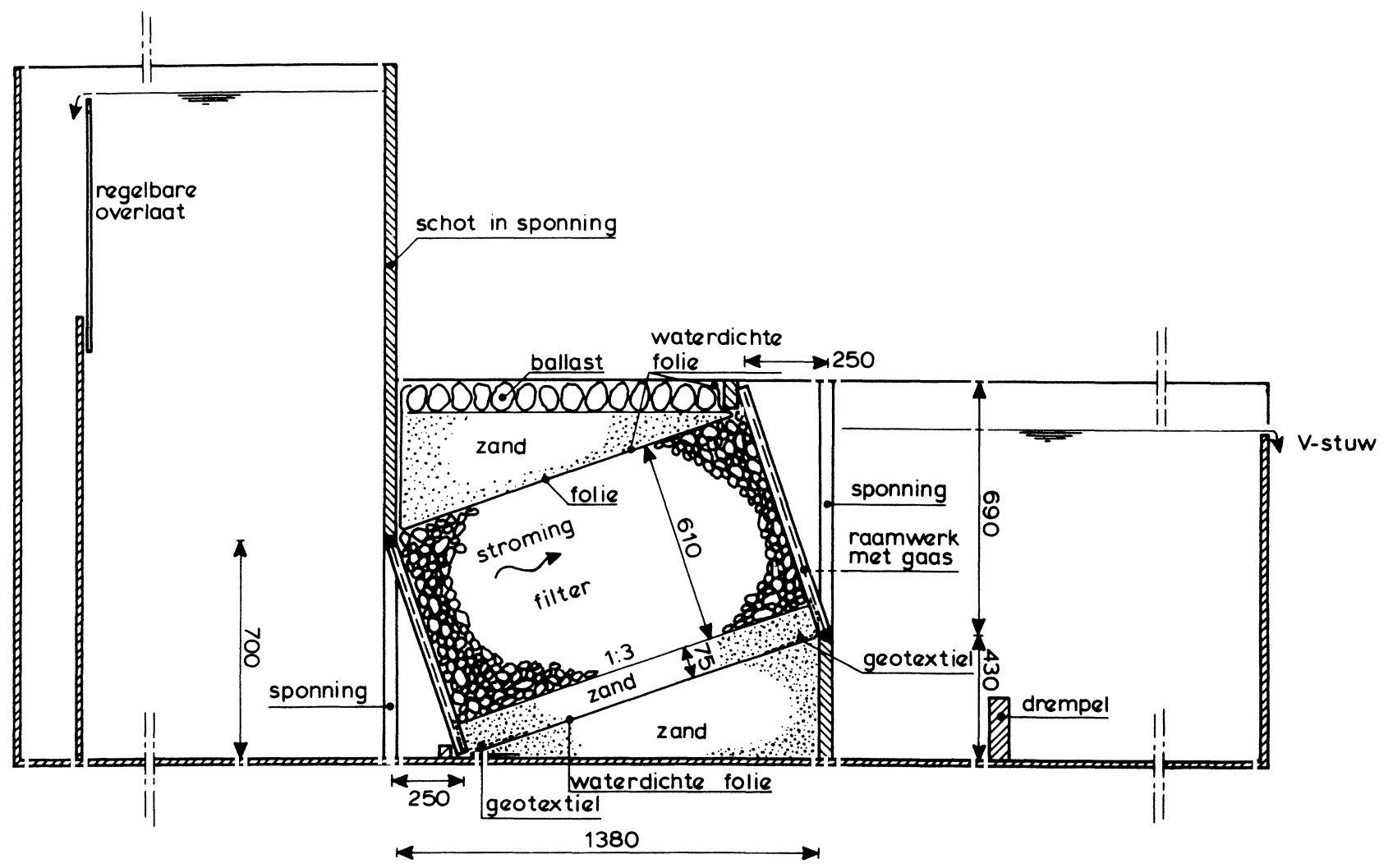
FIG. 15



taludhelling zandopp: 19,3°
breedte ≈ 1m

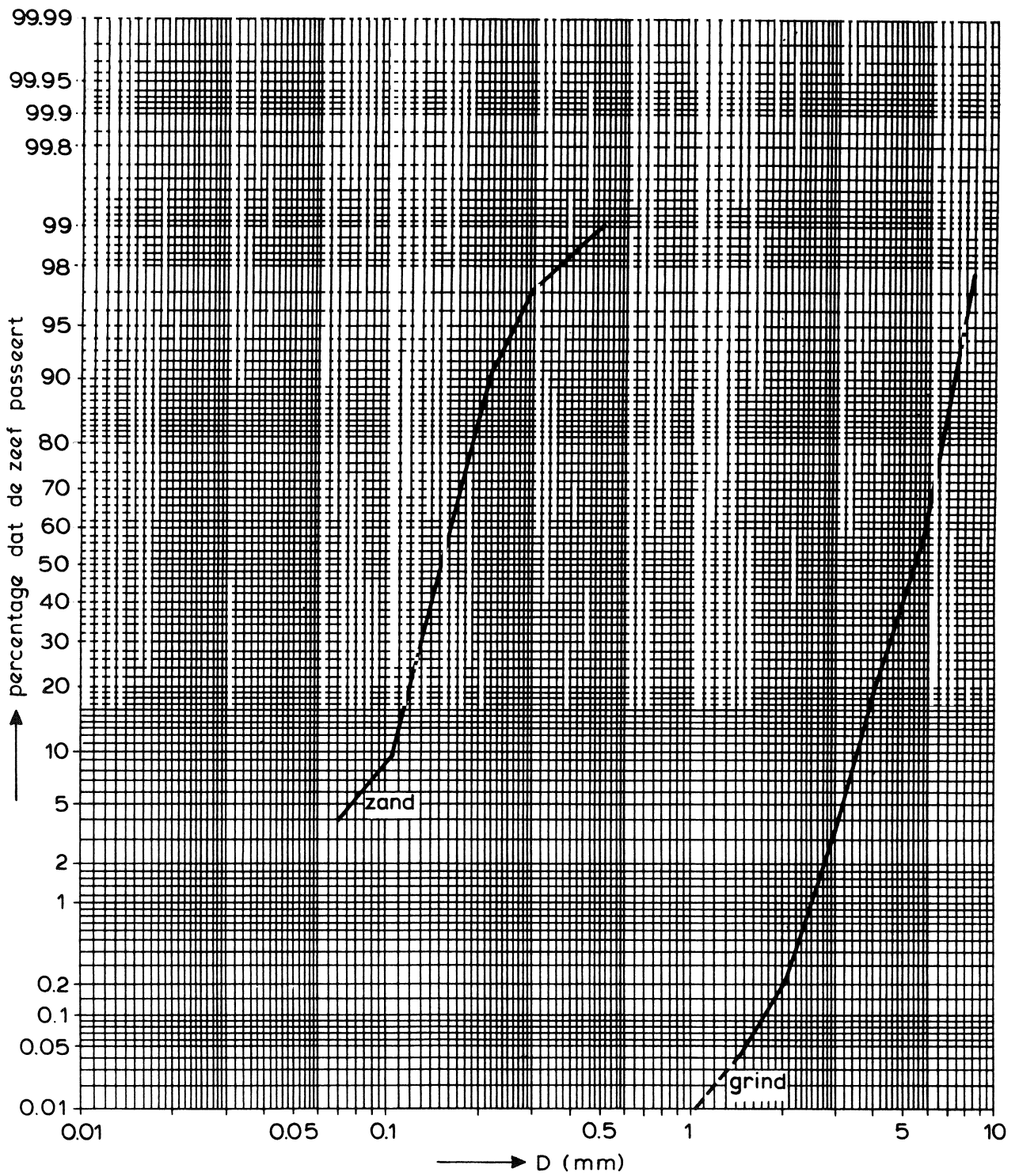


MEETOPSTELLING FILTERBAK
TALUD 1:3 MATEN IN MM



taludhelling zandopp: $-19,3^\circ$
breedte ≈ 1 m





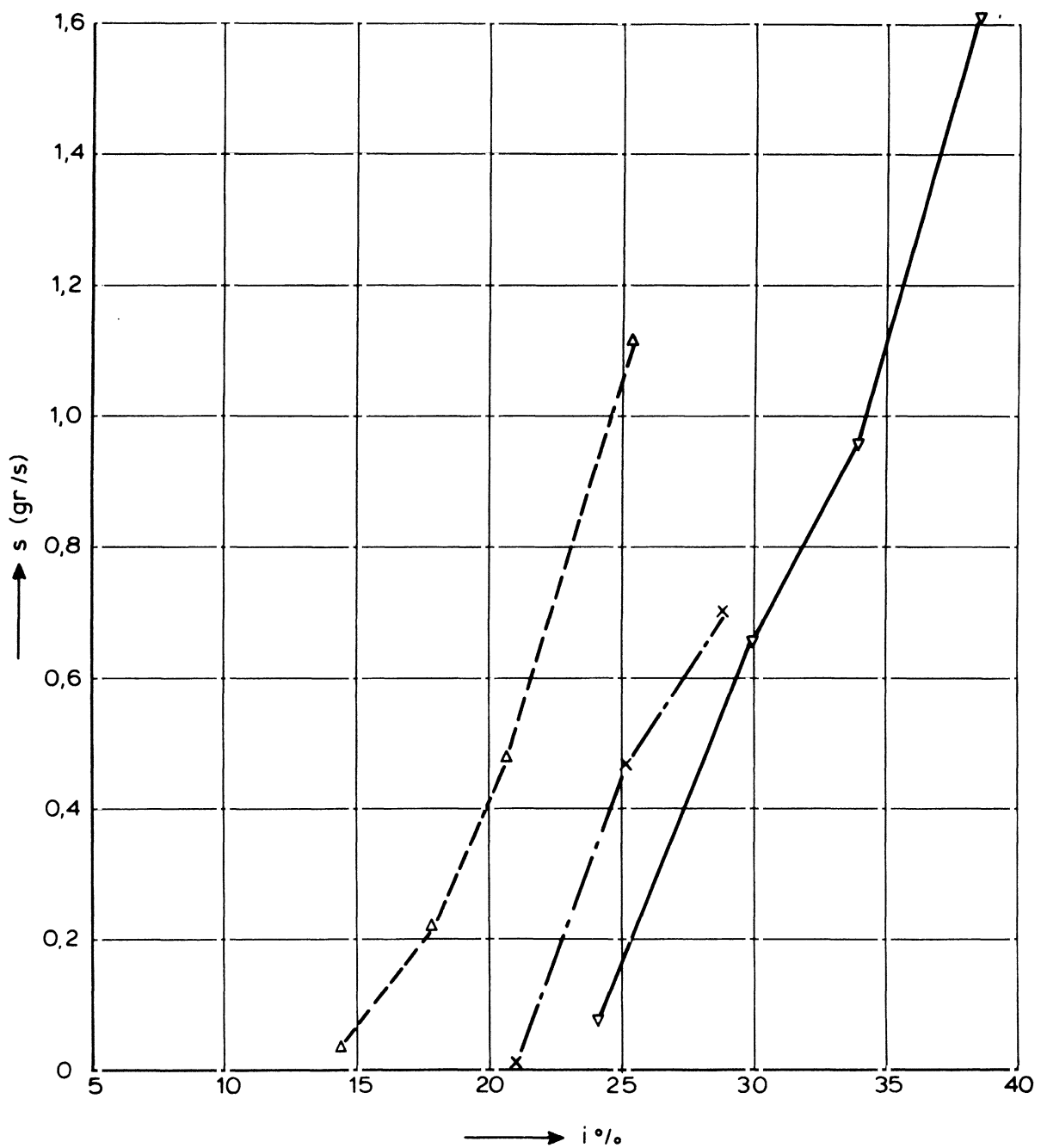
ZEEFKROMME VAN GEBRUIKT ZAND EN GRIND



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 18



- x horizontaal grensvlak
- ▲ talud van $19,3^\circ$ af
- ▼ talud van $19,3^\circ$ op

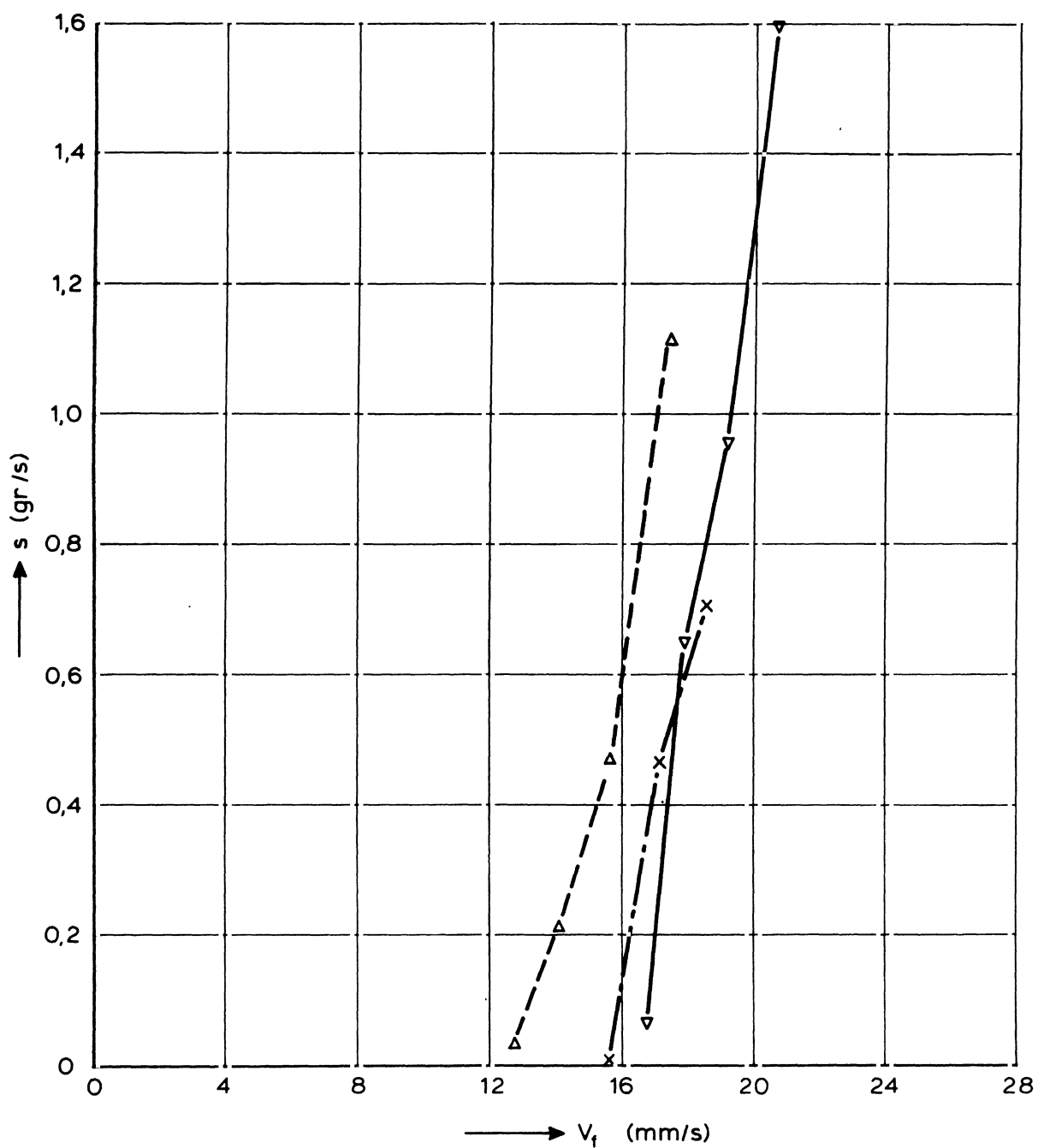
ZANDTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN VERHANG

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 19





- x horizontaal grensvlak
- Δ talud van 19,3° af
- ∇ talud van 19,3° op

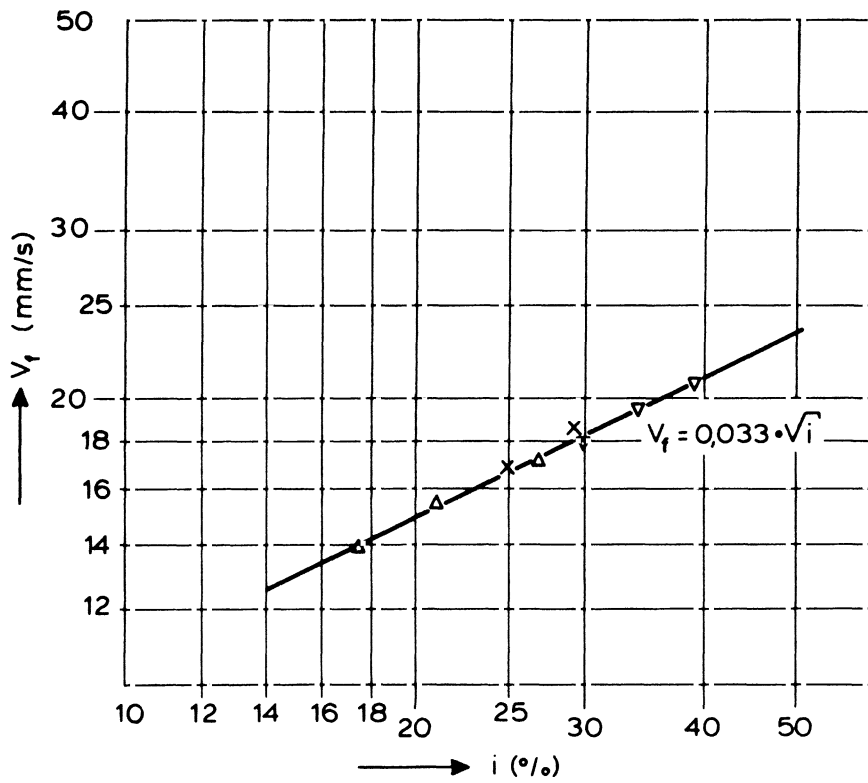
ZANDTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN
FILTERSNELHEID

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



H 195

FIG. 20

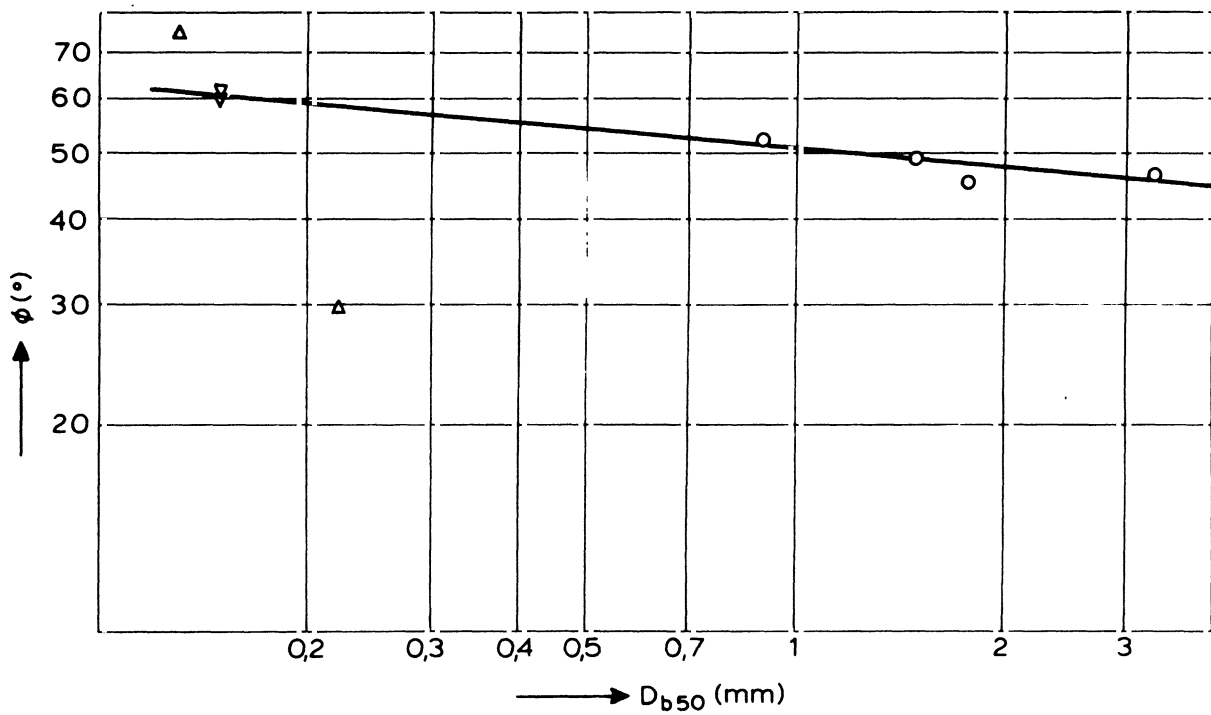


FILTERSNELHEID ALS FUNKTIE VAN VERHANG

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 21



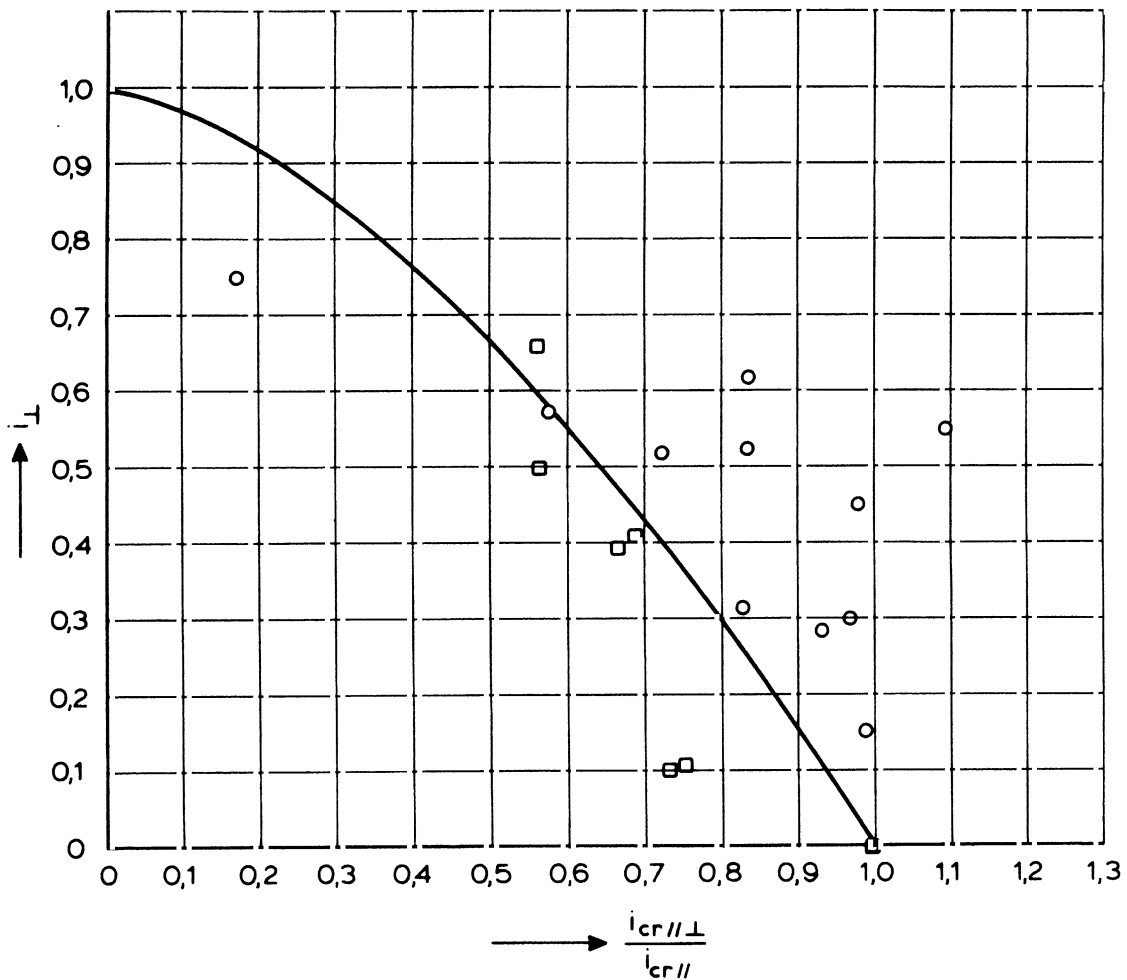
- o : Fernandez Lague & van Beek [5]
- Δ : M 905 [3]
- ∇ : recente metingen

RUSTHOEK ALS FUNKTIE VAN D_{b50}

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 22



i_{\perp} = vertikaal verhang in de basis

\circ = $D_{115} = 1,5$ mm
 \square = $D_{115} = 3,3$ mm

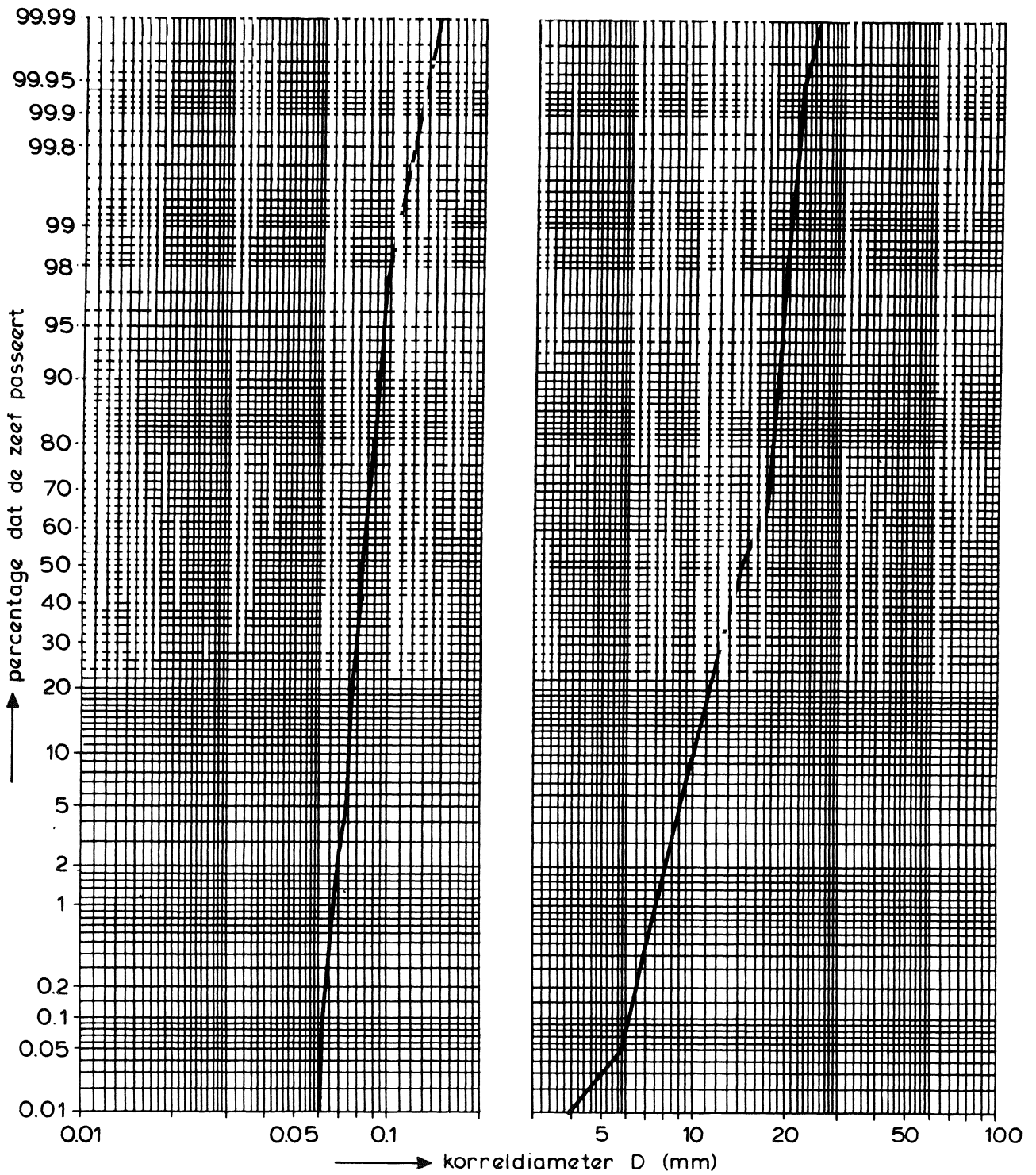
$D_{b50} = 0,15$ mm

op basis van visuele waarnemingen [//]

— : theorie

VERMINDERING HORIZONTAAL KRITIEK VERHANG
ALS GEVOLG VAN VERTIKAAL VERHANG





$D_{115} = 10,5 \text{ mm}$
 $D_{b50} = 0,82 \text{ mm}$

ZEEFKROMME VAN ZAND EN GRIND



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

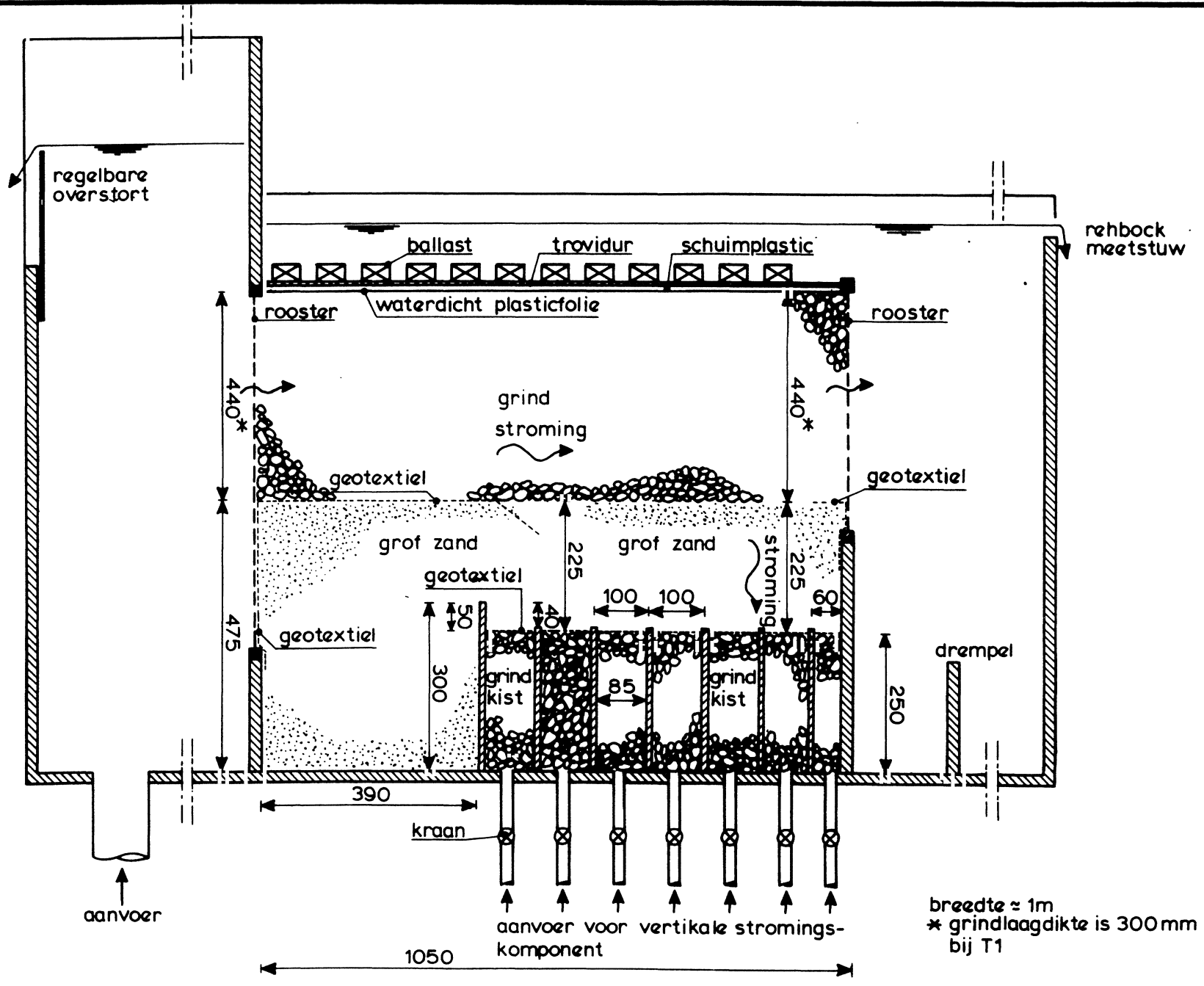
FIG. 24

VERTIKALE LANGSDOORSNEDE MODELOPSTELLING
 VOOR GÉKOMBINEERDE VERTIKALE EN HORIZON-
 TALE STROMING

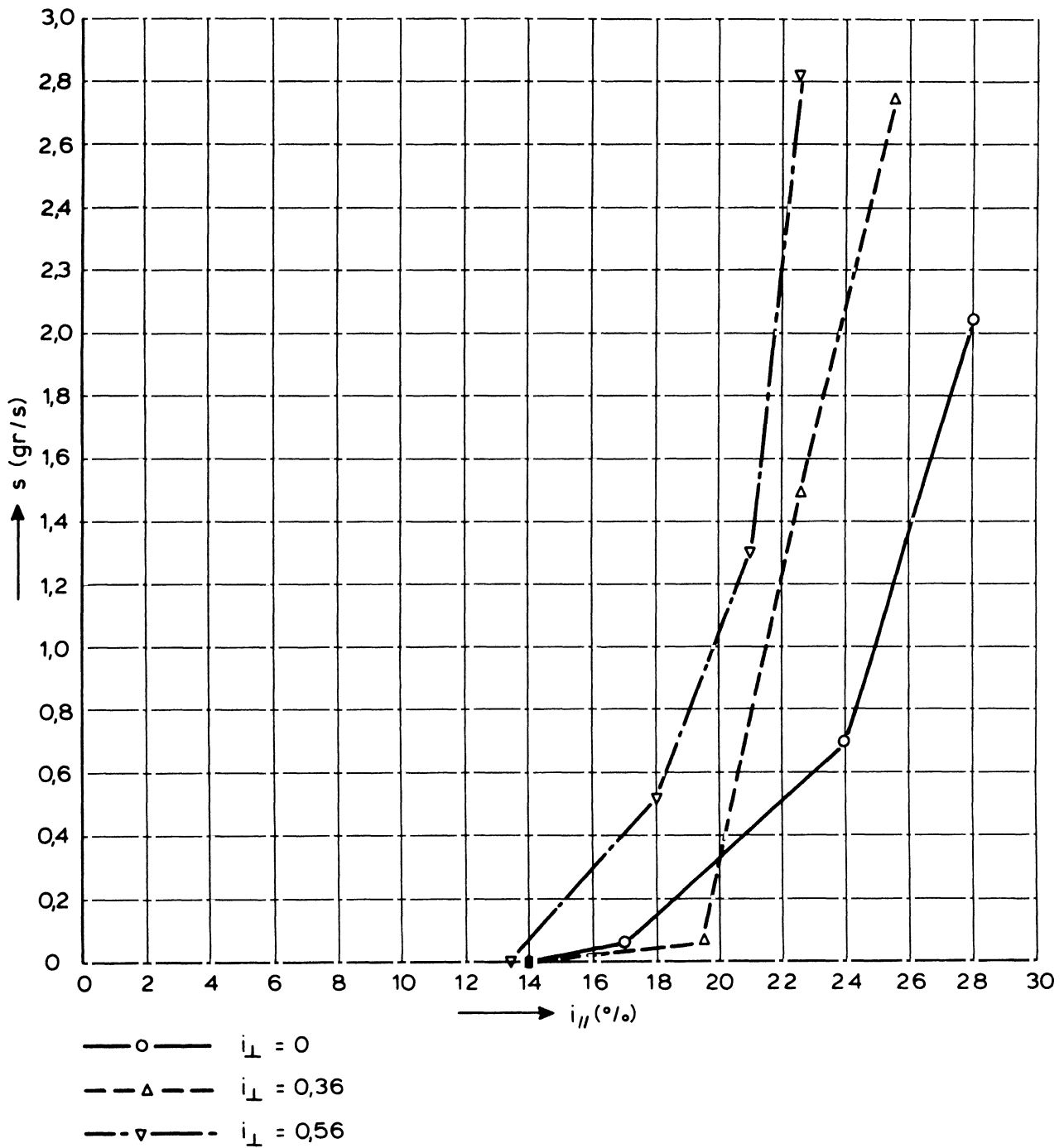
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 25

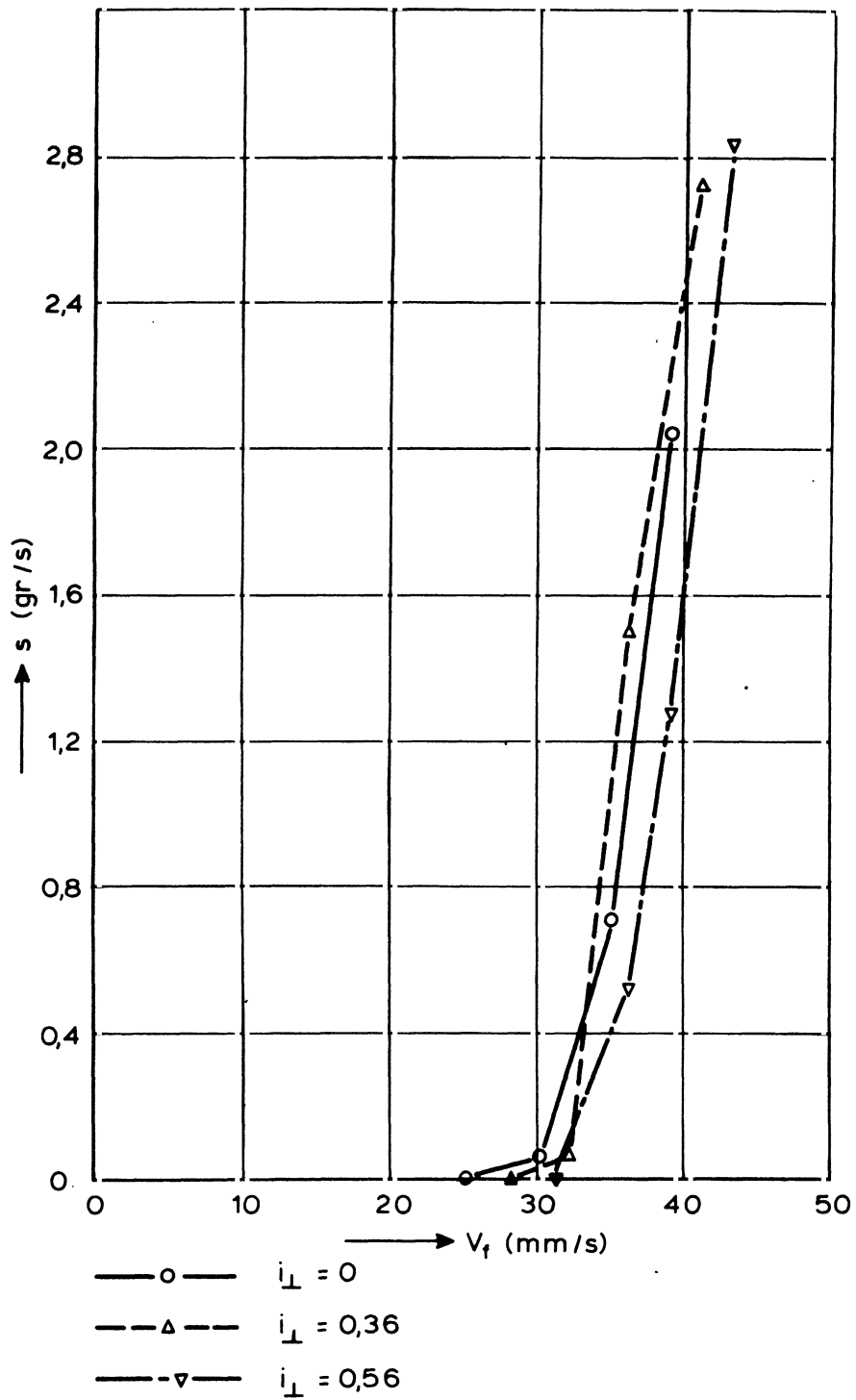


breedte ≈ 1m
 * grindlaagdikte is 300mm
 bij T1



ZANDTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN VERHANG
 LANGS GRENSVLAK





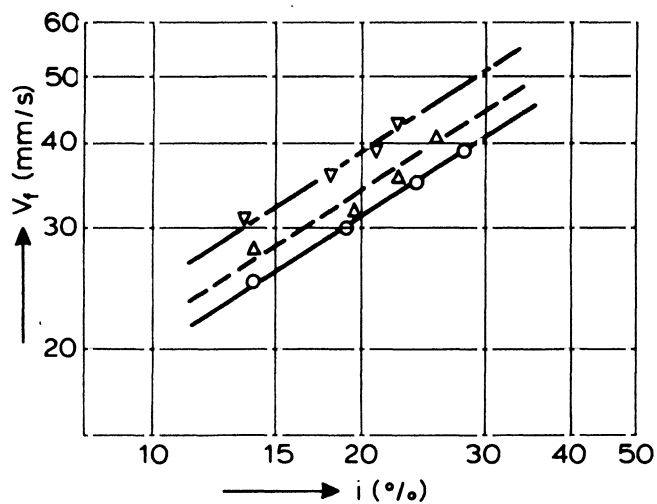
ZANDTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN
FILTERSNELHEID

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



H 195

FIG. 27



—○— $i_{\perp} = 0$ $V_f = 0,09 \cdot i^{0,67}$
 - - Δ - - $i_{\perp} = 0,36$ $V_f = 0,10 \cdot i^{0,67}$
 —▽— $i_{\perp} = 0,56$ $V_f = 0,11 \cdot i^{0,67}$

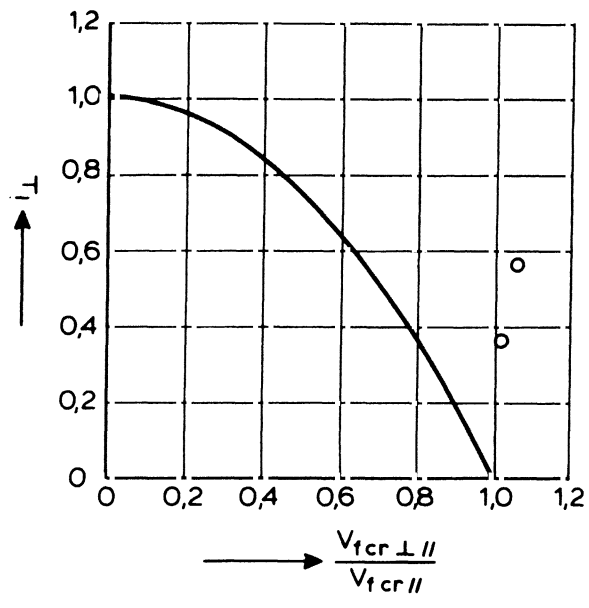
FILTERSNELHEID ALS FUNKTIE VAN VERHANG



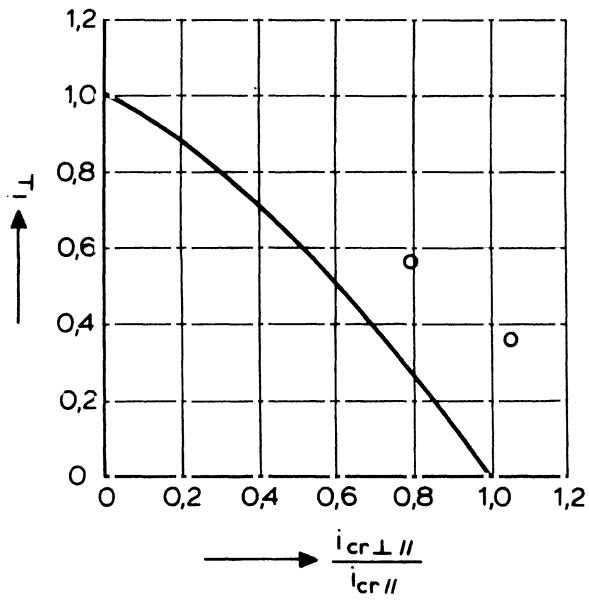
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 28



$$\frac{V_{tcr \perp //}}{V_{tcr //}} = \sqrt{1 - \frac{i_{\perp}}{\Delta(1-n_b)}}$$



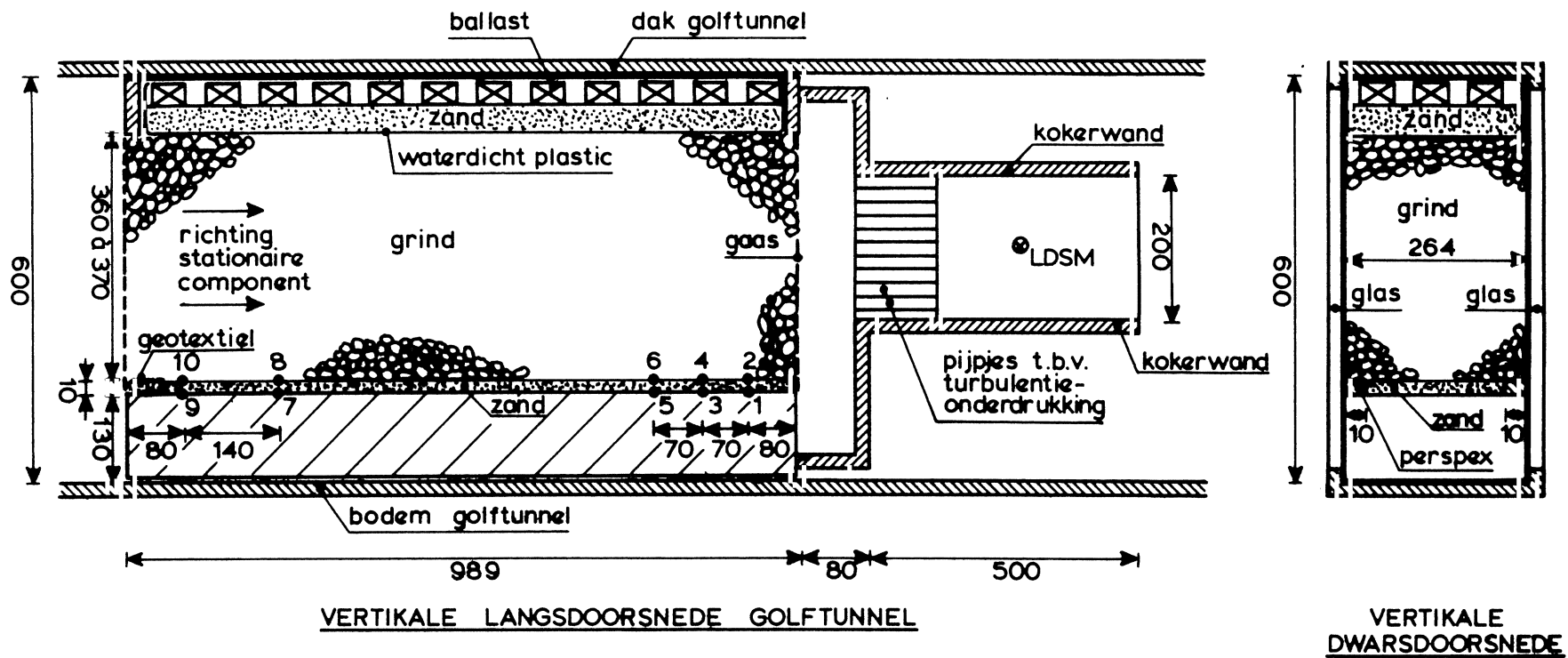
$$\frac{i_{cr \perp //}}{i_{cr //}} = \left(1 - \frac{i_{\perp}}{\Delta(1-n_b)}\right)^{0,75}$$

op basis van gemeten zandtransporten
 o : meetpunt $D_{b50} = 0,82$ mm; $D_{f15} = 10,5$ mm
 — : theorie

VERMINDERING HORIZONTALE KRITIEKE
 FILTERSNELHEID EN VERHANG A.G.V.
 VERTIKAAL VERHANG

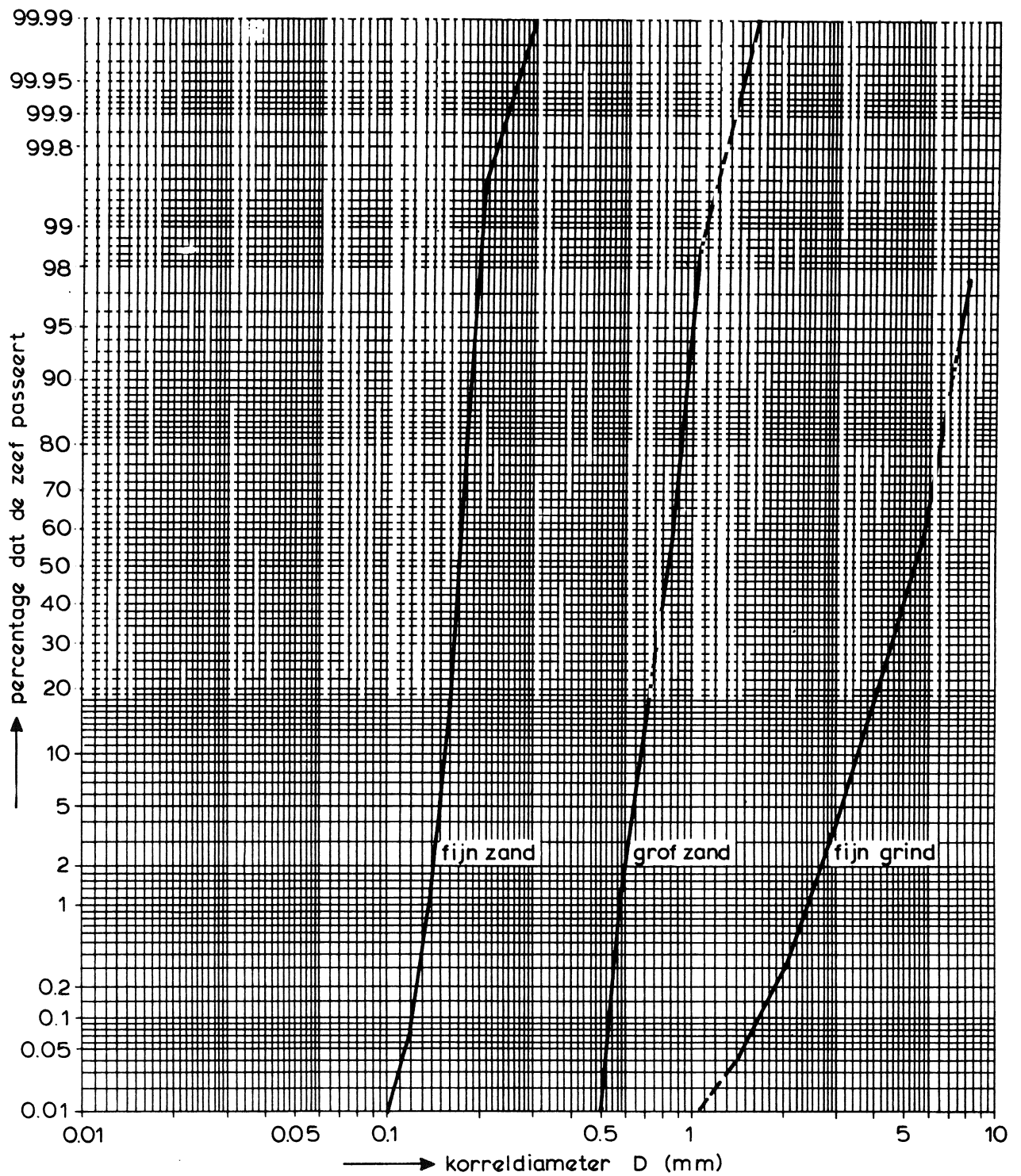


maten in mm.

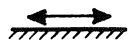


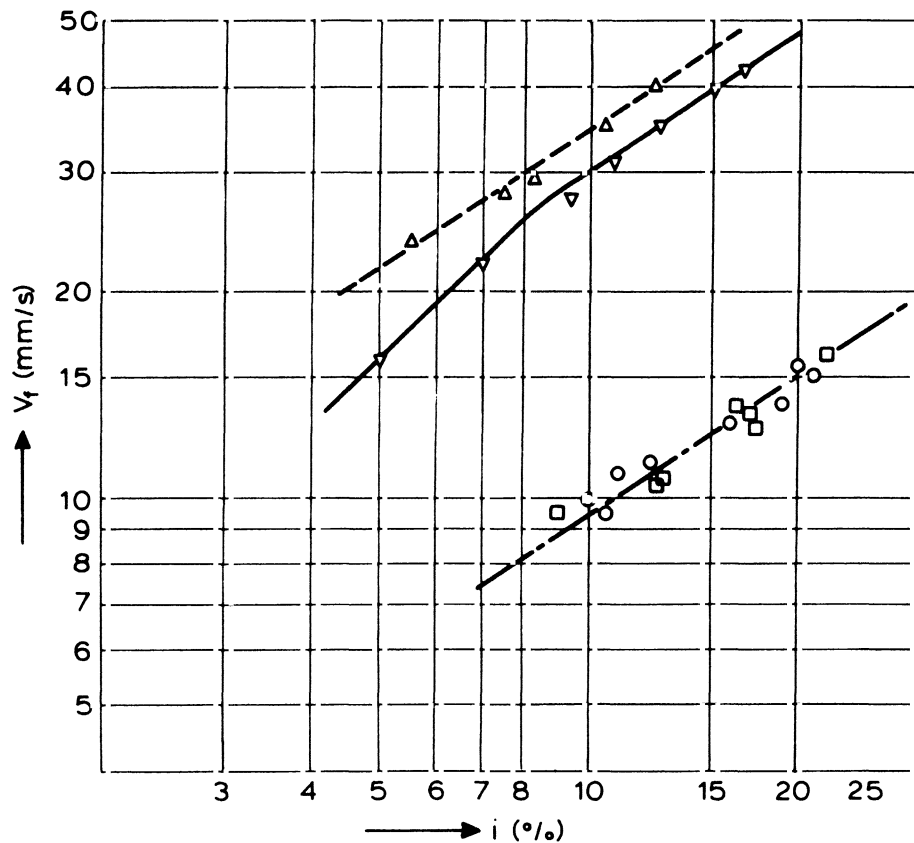
- LDSM = laser doppler snelheidsmeter
- x = aansluiting verschilddrukopnemer (hor.: 2-4, 1-3, en 8-10; vert.: 6-5)





ZEEFKROMME VAN MATERIAAL GEBRUIKT BIJ
CYCLISCHE VERHANGEN





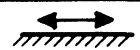
- $\circ \square$ $D_{f15} = 3,8$ mm
- $\triangle \nabla$ $D_{f15} = 20$ mm
- $\circ \nabla$ cyclische stroming ($T = 2$ s)
- $\square \triangle$ stationaire stroming

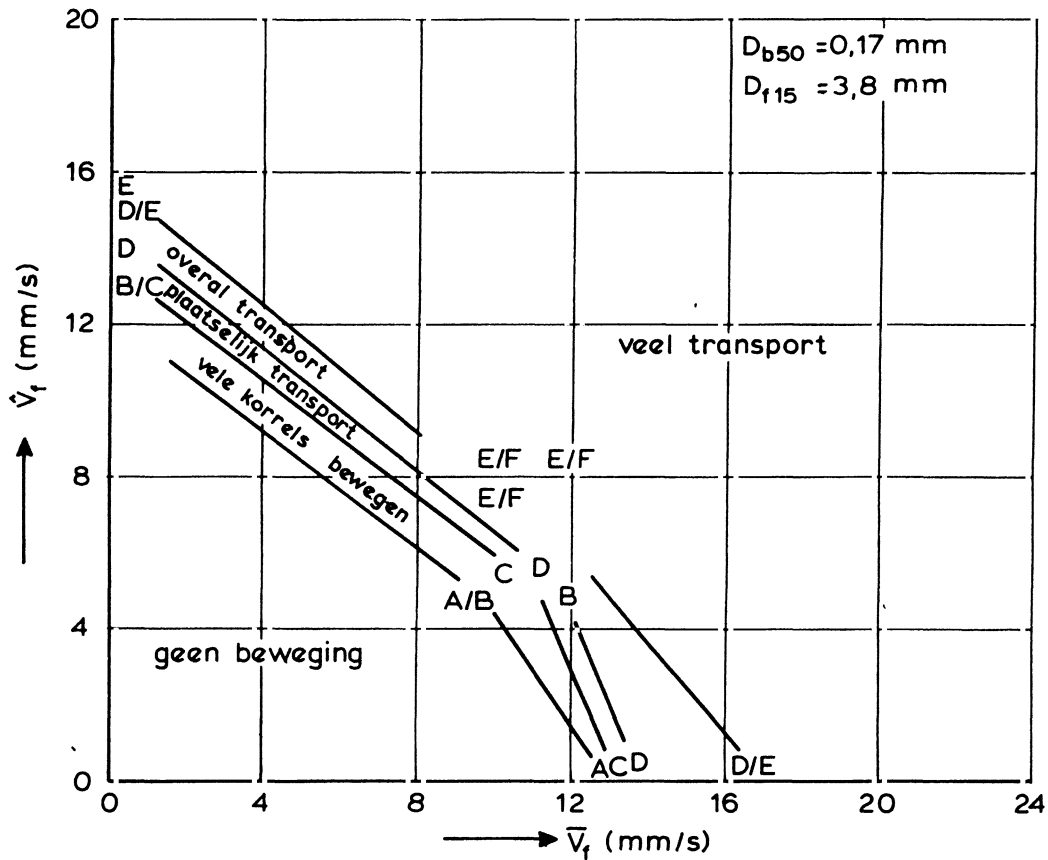
FILTERSNELHEID ALS FUNKTIE VAN VERHANG
TIJDENS EROSIE METINGEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 32



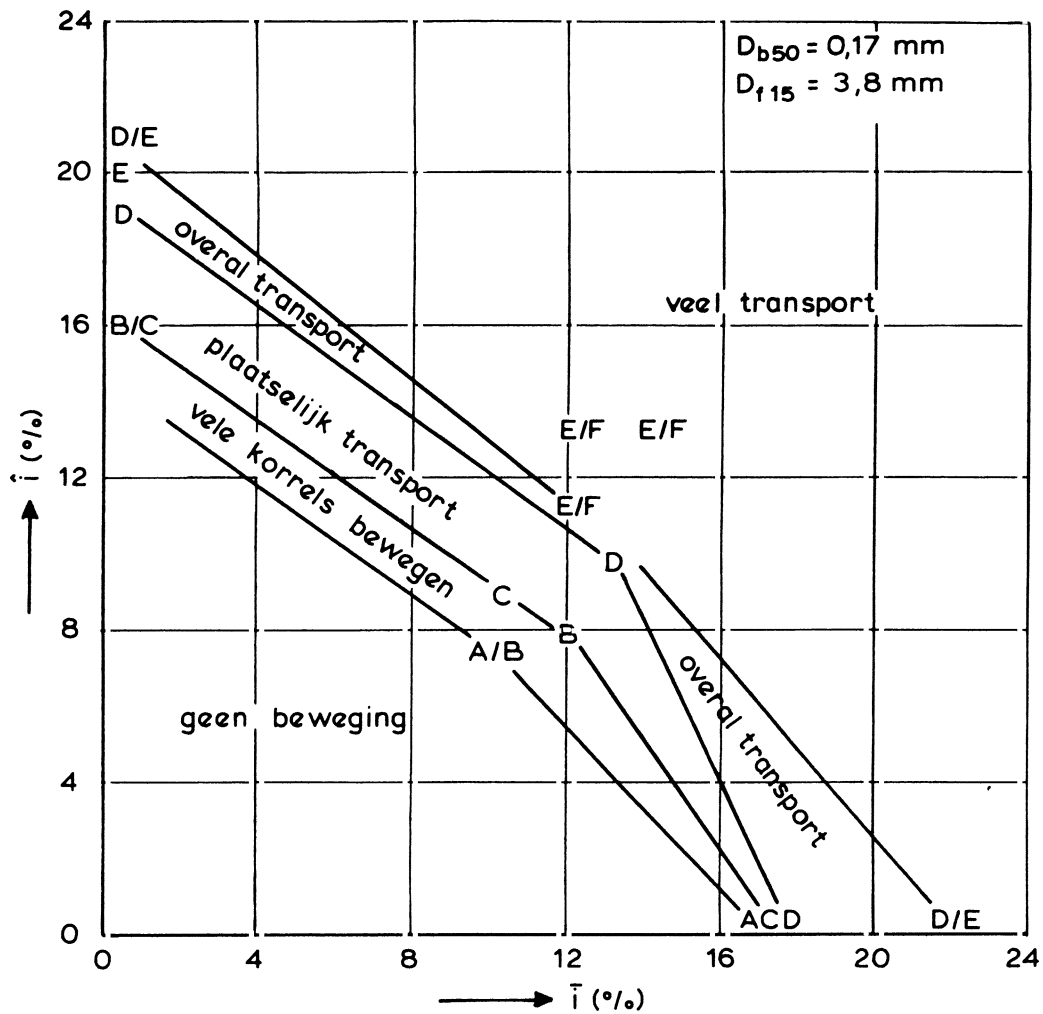


Transportklassen :

- A = hier en daar een bewegende korrel of minder
- B = op < 50% van oppervlak één korrel dikke laag transport
- C = op > 50% van oppervlak één korrel dikke laag transport
- D = overal 1 korrel dikke laag transport
- E = transport in laag van meer dan één korrel dik
- F = veel transport, ook korrels over grindkorrels heen

Begin van beweging = D / E





Transportklassen :

A = hier en daar een bewegende korrel of minder

B = op $< 50\%$ van oppervlak één korrel dikke laag transport

C = op $> 50\%$ van oppervlak één korrel dikke laag transport

D = overal 1 korrel dikke laag transport

E = transport in laag van meer dan één korrel dik

F = veel transport, ook korrels over grindkorrels heen

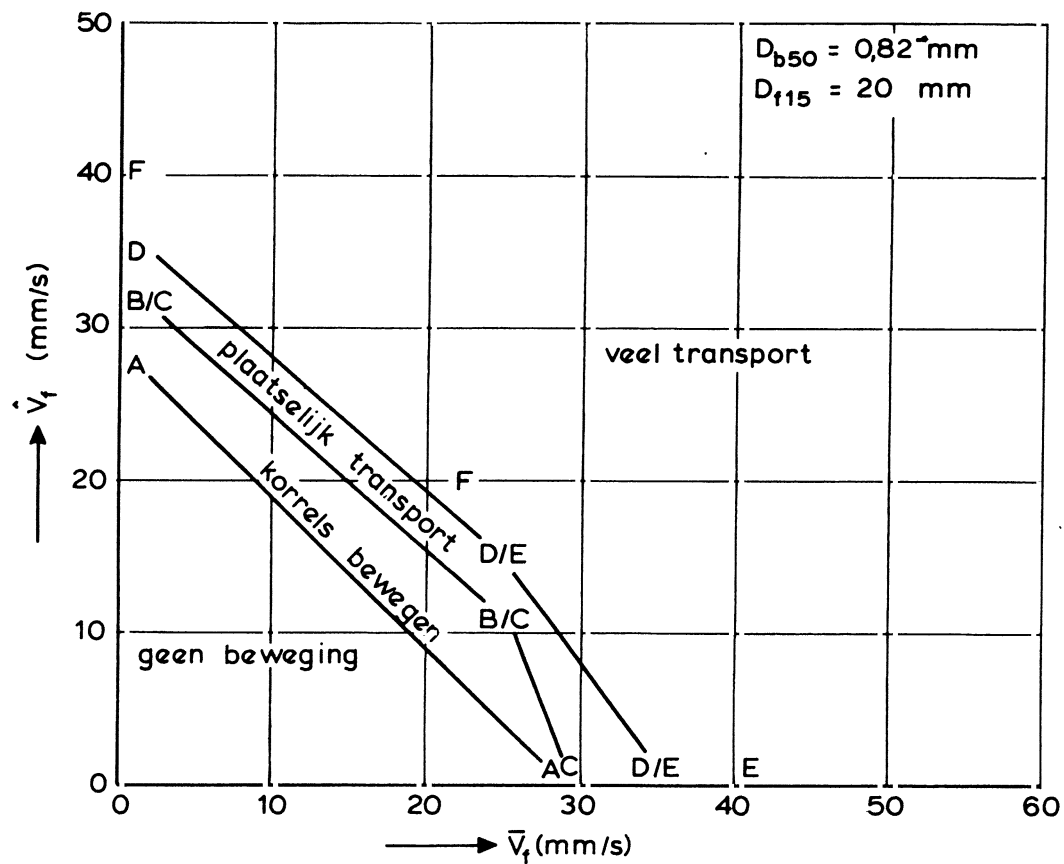
Begin van beweging = D / E

ZANDTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN VERHANG

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 34



Transportklassen :

A = hier en daar een bewegende korrel of minder

B = op < 50% van oppervlak één korrel dikke laag transport

C = op > 50% van oppervlak één korrel dikke laag transport

D = overall 1 korrel dikke laag transport

E = transport in laag van meer dan één korrel dik

F = veel transport, ook korrels over grindkorrels heen

Begin van beweging = D / E

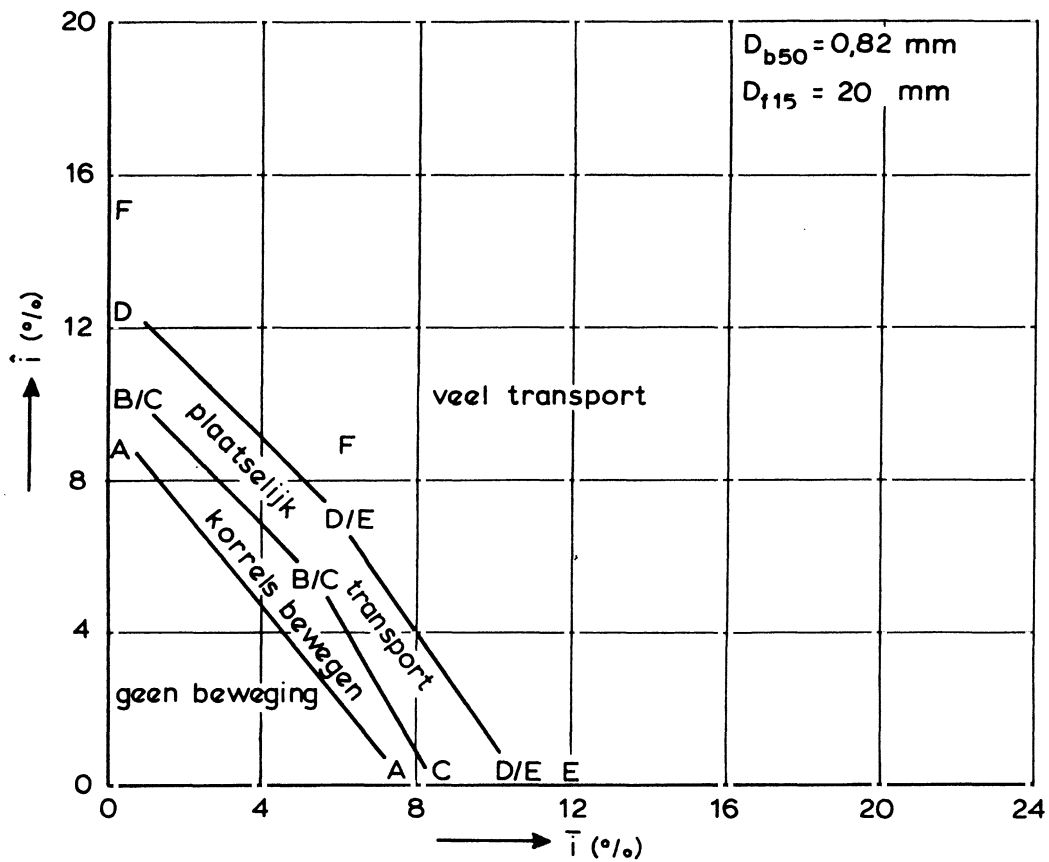
ZANDTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN
FILTERSNELHEID

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



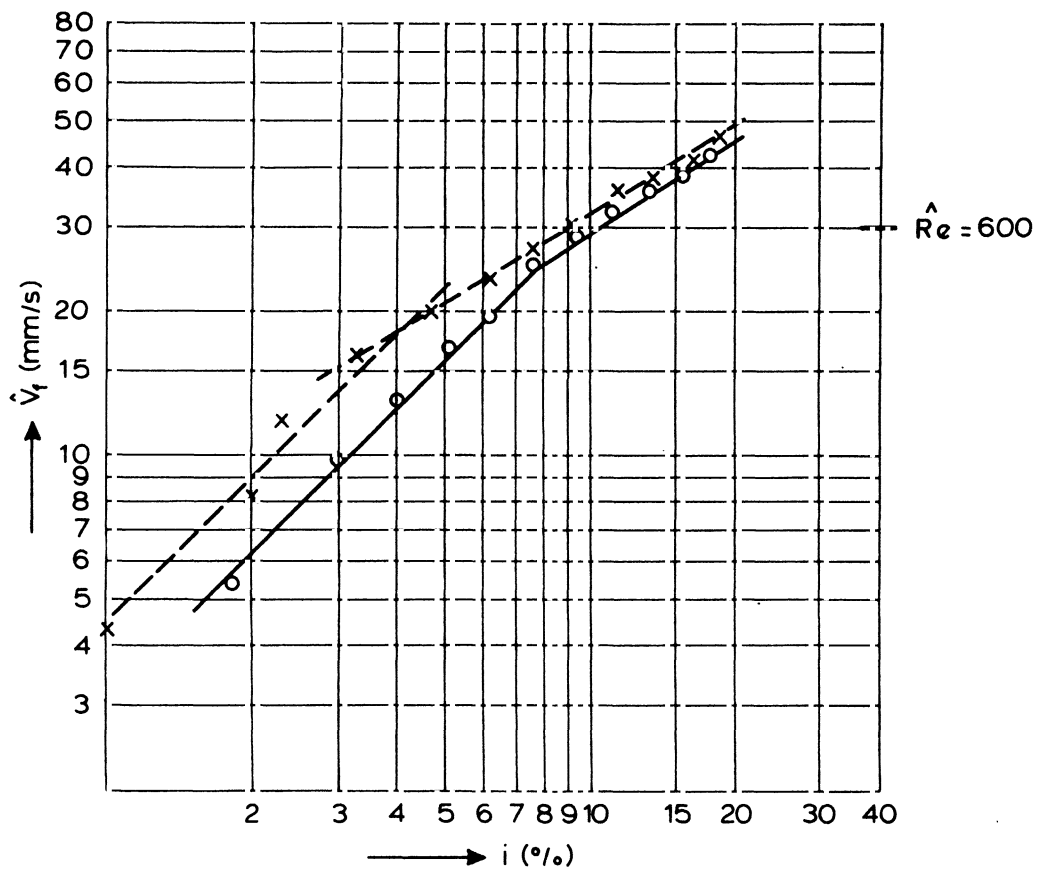
H 195

FIG. 35



Transportklassen :

- A = hier en daar een bewegende korrel of minder
 - B = op < 50% van oppervlak één korrel dikke laag transport
 - C = op > 50% van oppervlak één korrel dikke laag transport
 - D = overall 1 korrel dikke laag transport
 - E = transport in laag van meer dan één korrel dik
 - F = veel transport, ook korrels over grindkorrels heen
- Begin van beweging = D / E



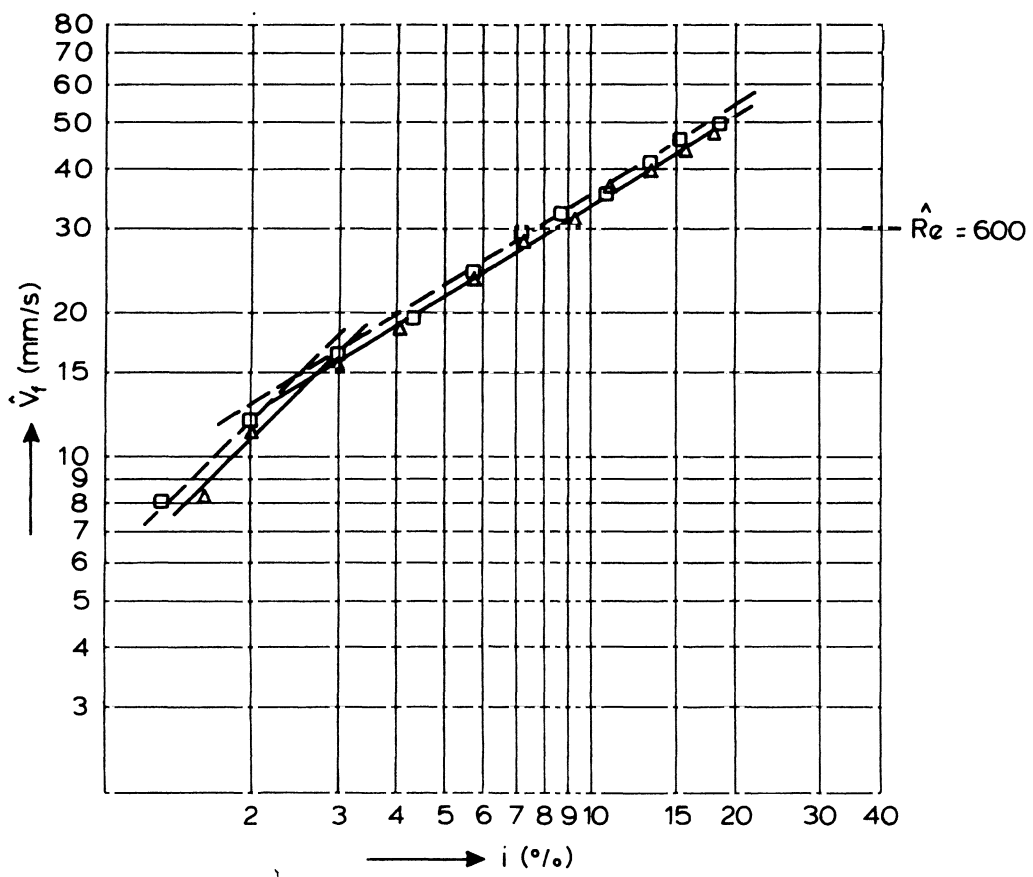
o : $T = 2$ s ———
 x : $T = 4$ s - - -
 $D_{15} = 20$ mm

VERBAND TUSSEN UITWENDIG VERHANG EN
 FILTERSNELHEID (CYCLISCHE STROMING)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 37



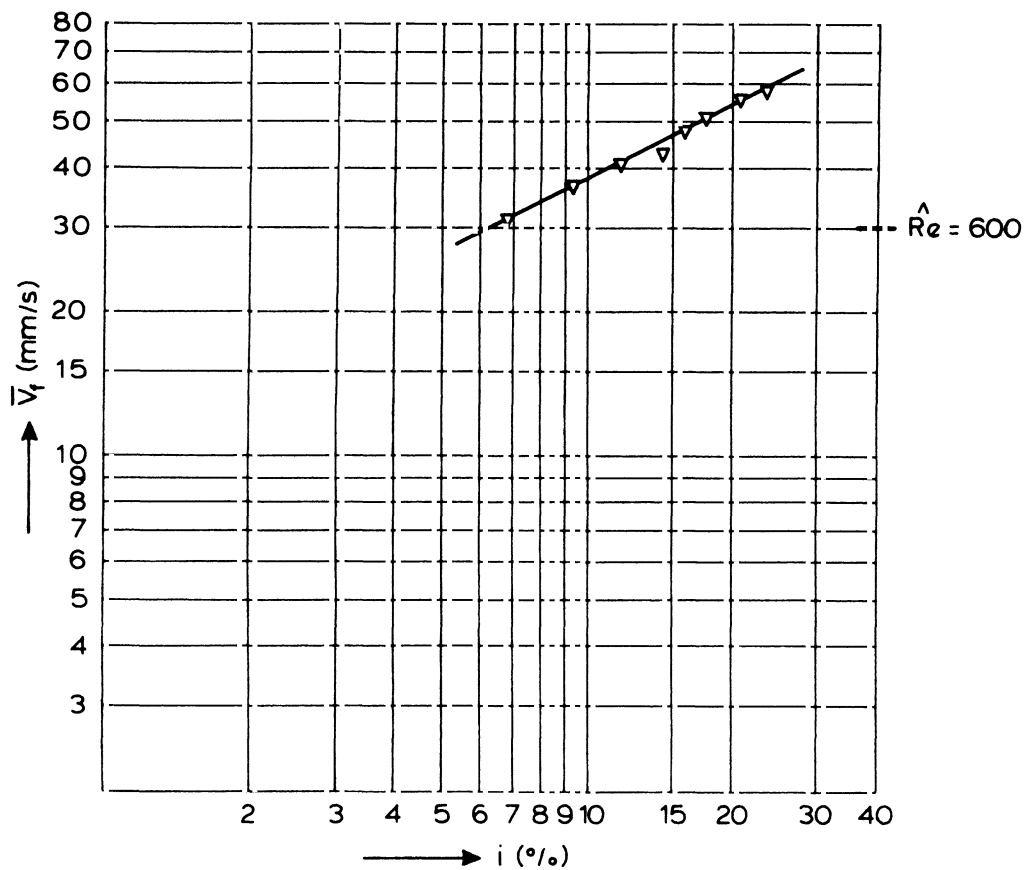
Δ ——— : $T = 6$ s
 \square - - - : $T = 8$ s
 $D_{15} = 20$ mm

VERBAND TUSSEN UITWENDIG VERHANG EN
 FILTERSNELHEID (CYCLISCHE STROMING)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 38



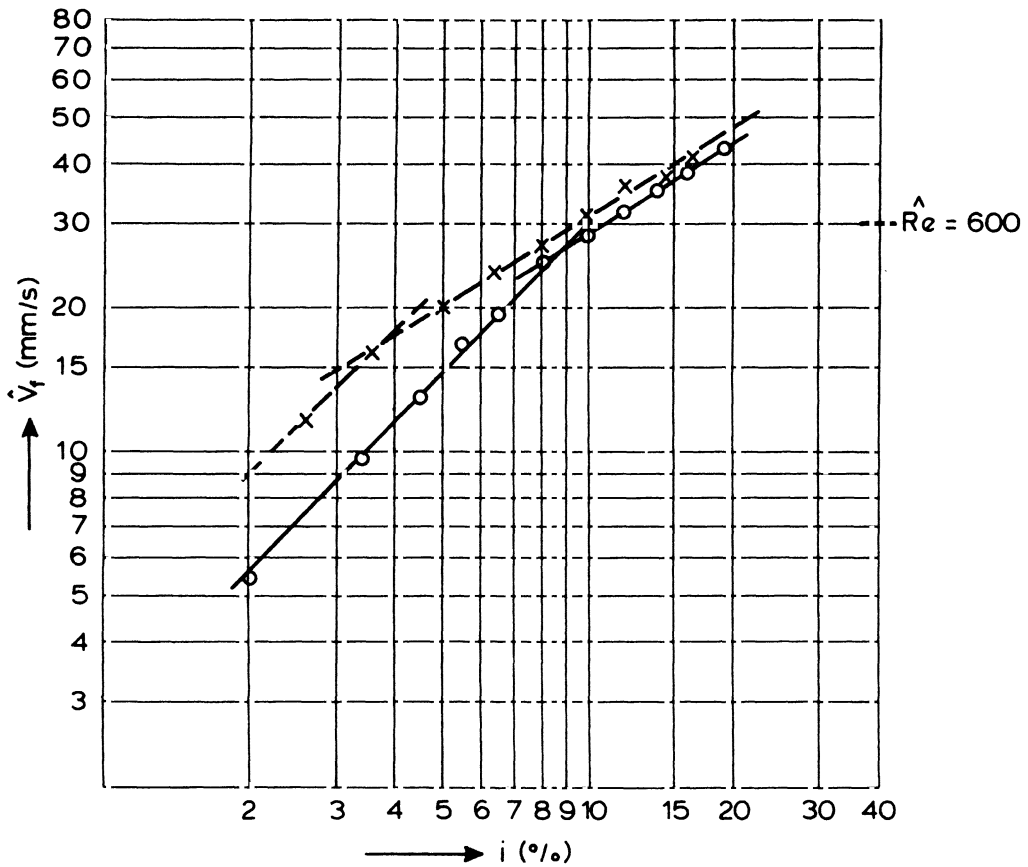
∇ — : stationair
 $D_{15} = 20$ mm

VERBAND TUSSEN UITWENDIG VERHANG EN
 FILTERSNELHEID (STATIONAIRE STROMING)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 39



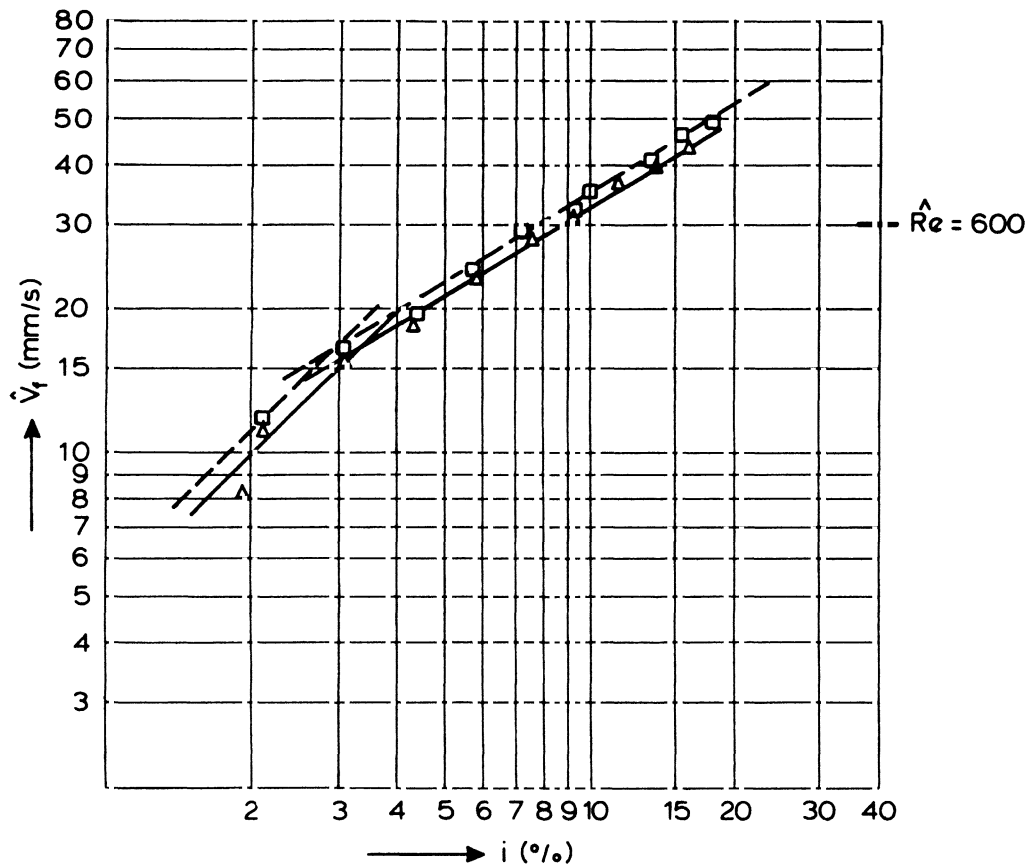
o ——— : $T = 2s$
 x - - - - : $T = 4s$
 $D_{15} = 20 \text{ mm}$

VERBAND TUSSEN INWENDIG VERHANG EN
 FILTERSNELHEID (CYCLISCHE STROMING)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 40



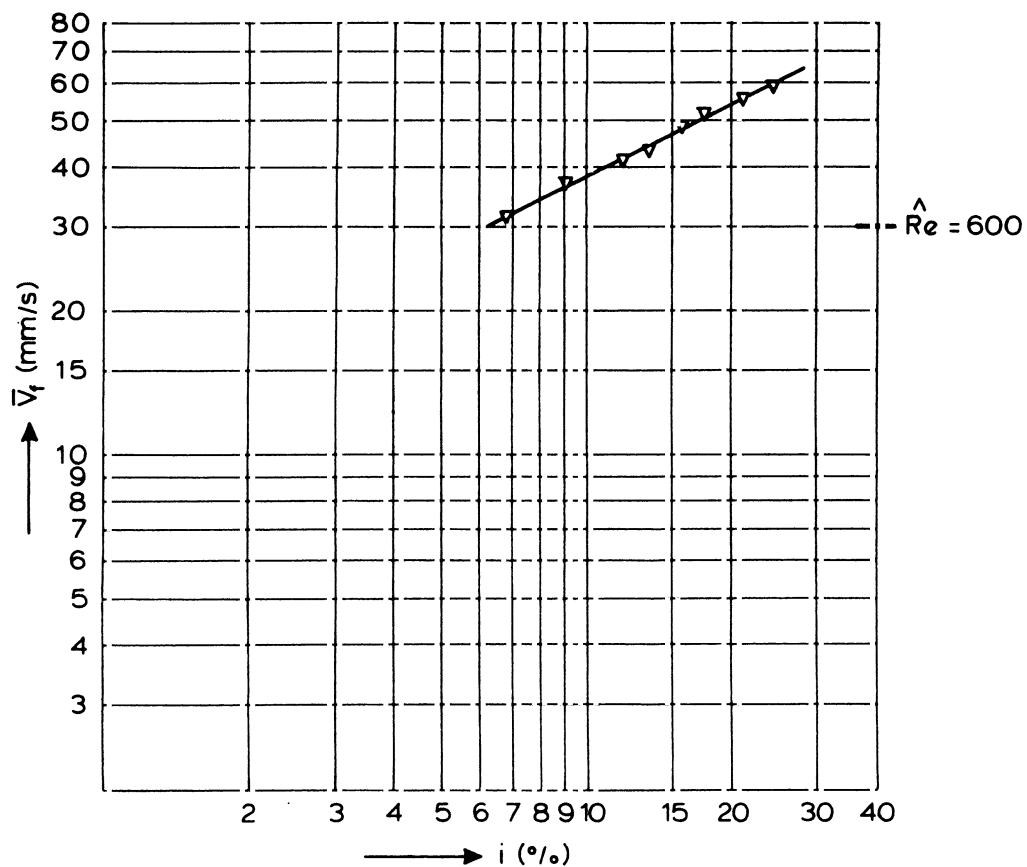
Δ ——— : $T = 6$ s
 \square - - - : $T = 8$ s
 $D_{15} = 20$ mm

VERBAND TUSSEN INWENDIG VERHANG EN
 FILTERSNELHEID (CYCLISCHE STROMING)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 41



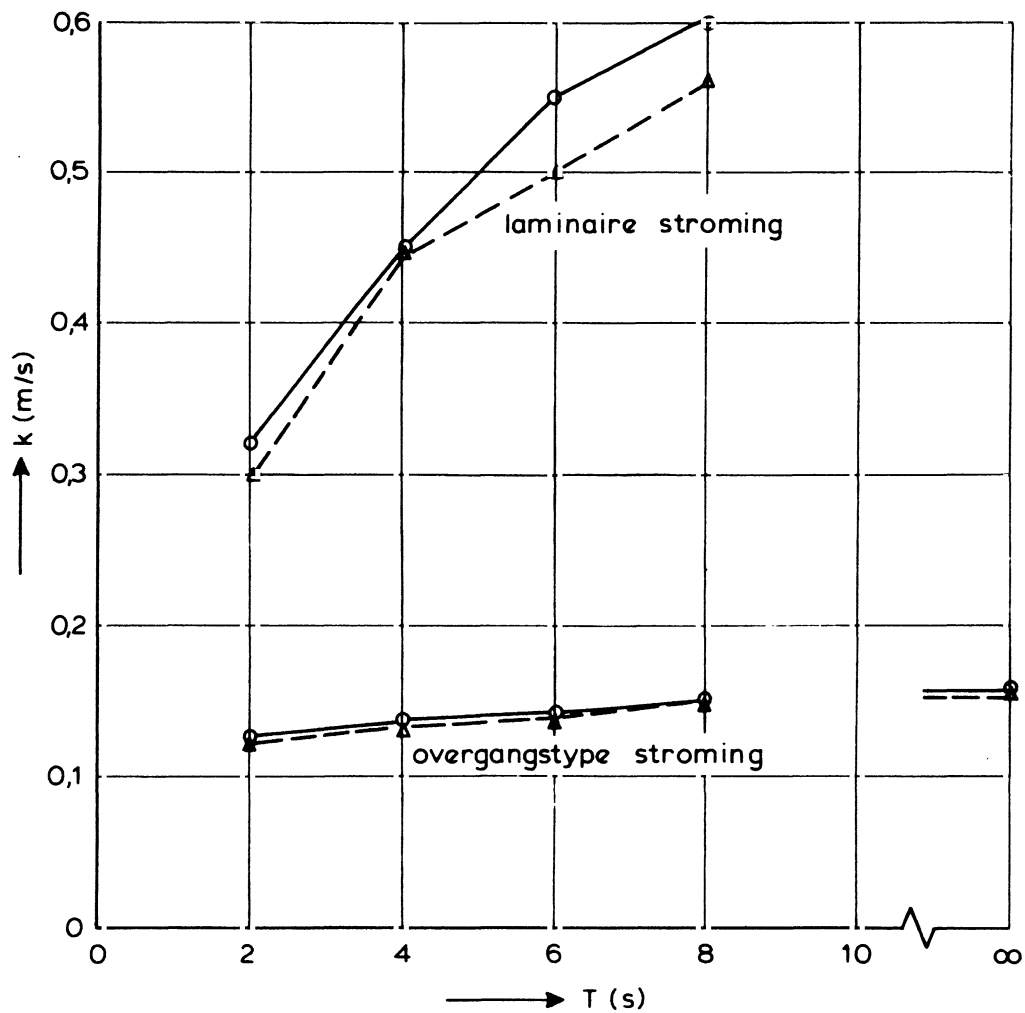
∇ — : stationair
 $D_{15} = 20$ mm

VERBAND TUSSEN INWENDIG VERHANG EN
 FILTERSNELHEID (STATIONAIRE STROMING)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 42



$D_{15} = 20 \text{ mm}$

laminaire stroming : $k = V_f / i$

overgangstype stroming : $k_o = V_f / i^{0,63}$

—○— uitwendig verhang

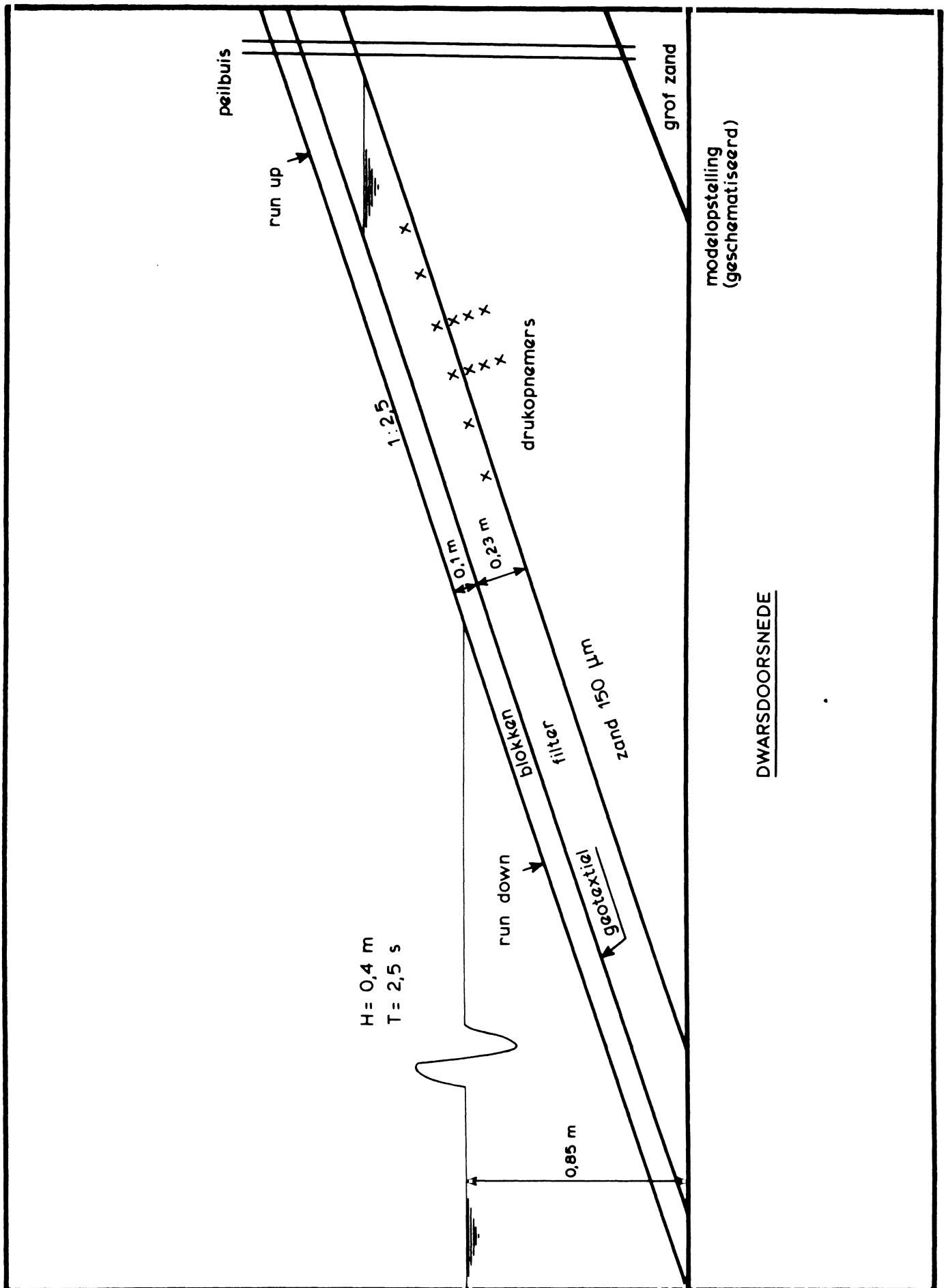
---△--- inwendig verhang

INVLOED GOLFPERIODE OP DOORLATENDHEID

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 43



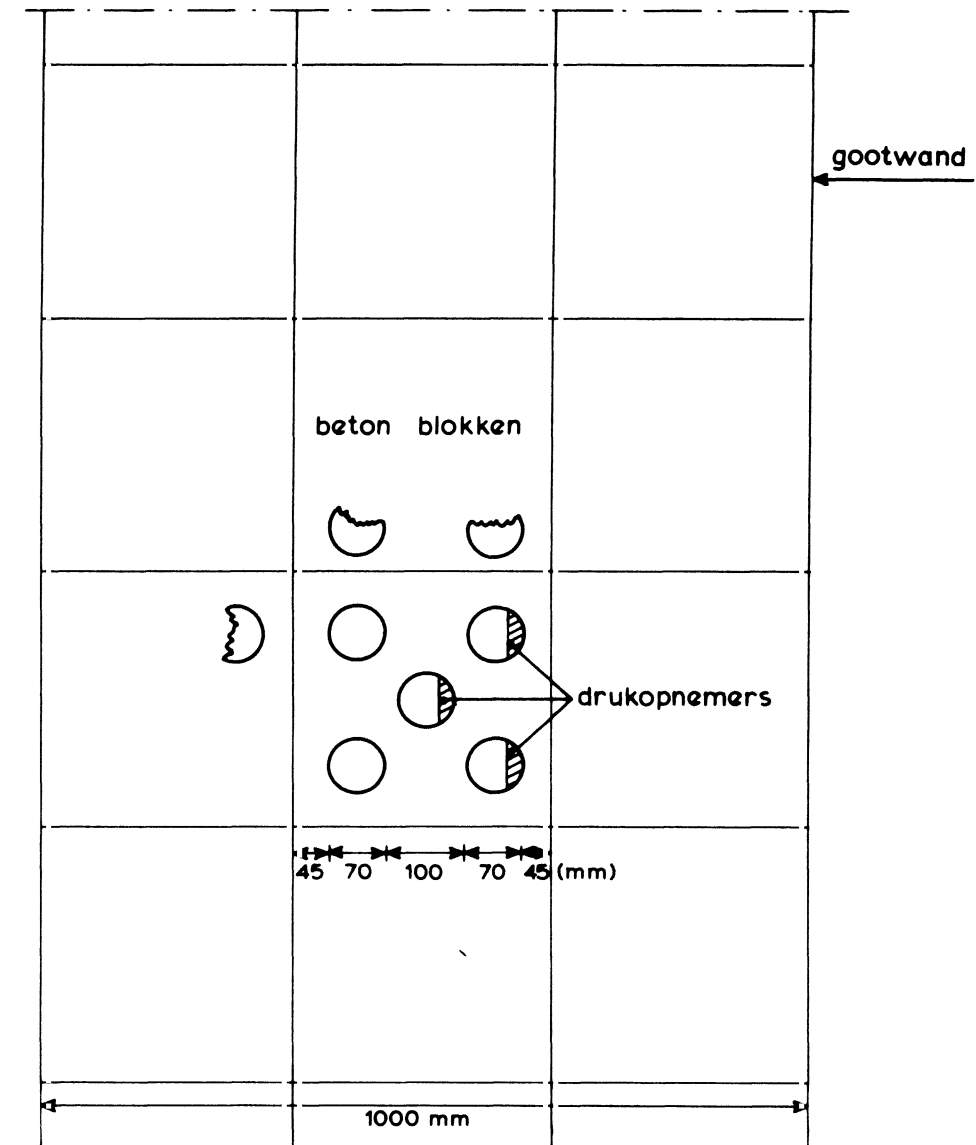
FILTERONDERZOEK VOOR DE KRITIEKE
FILTERSNELHEID IN DE SCHELDEGOOT

SCHAAL 1:20

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 44



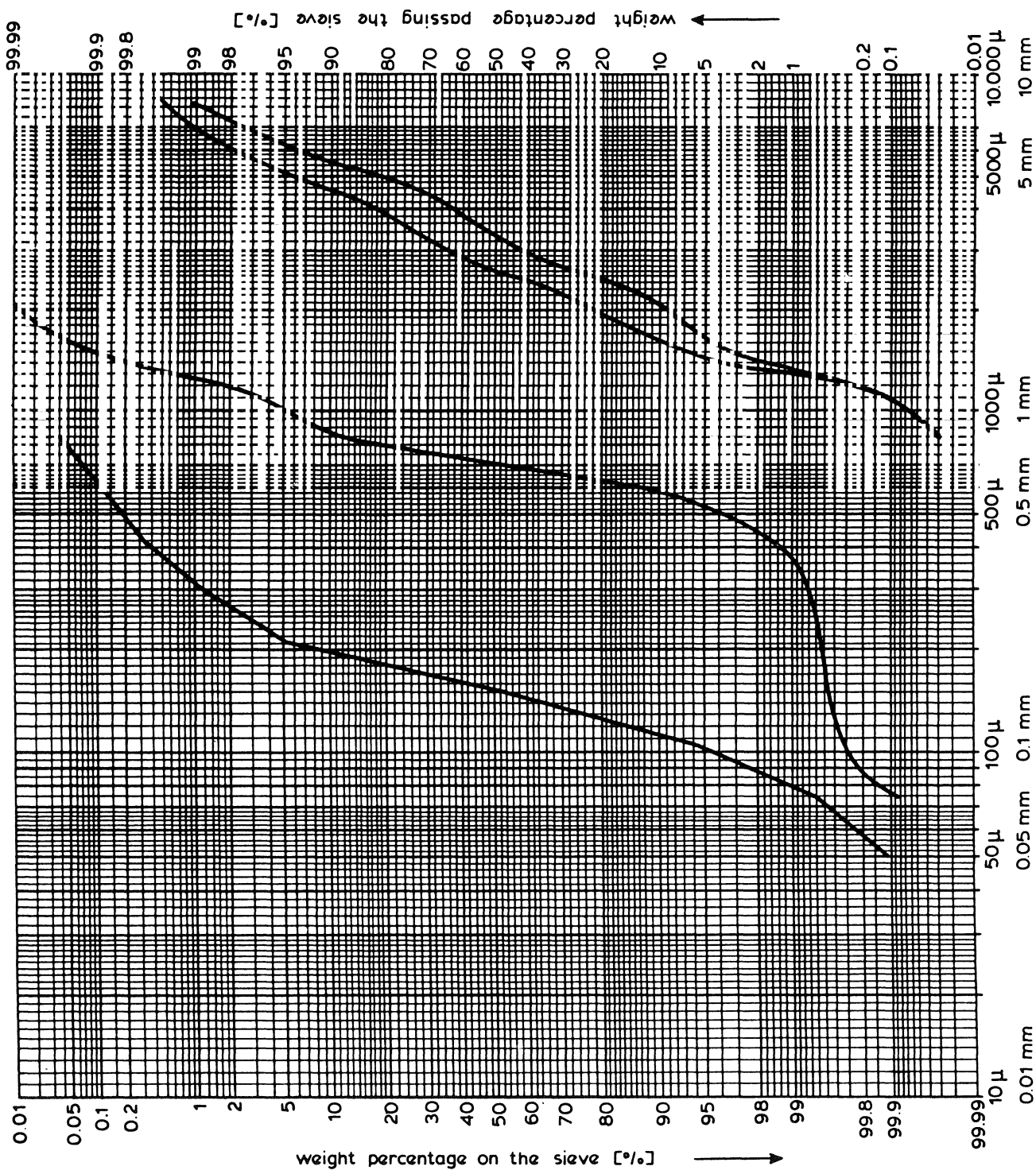
BOVENAANZICHT MODEL OPSTELLING

SCHAAL 1:10

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 45

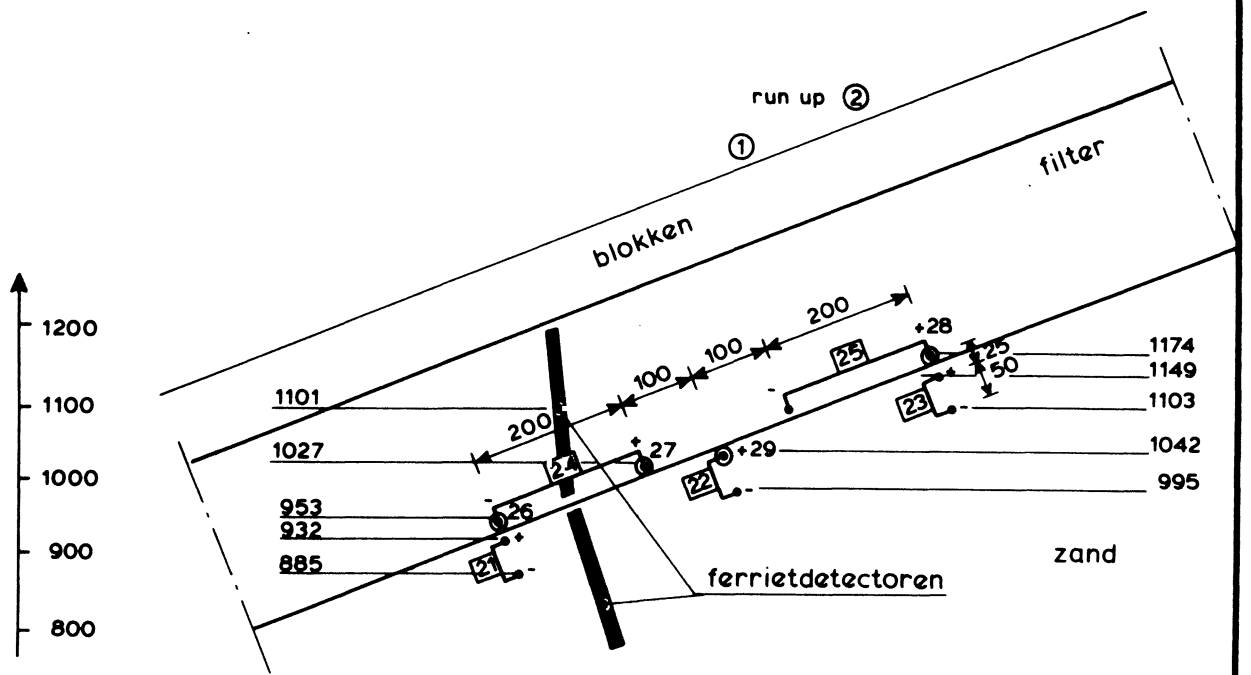


ZEEFKROMME VAN FILTER I, FILTER II,
BASISMATERIAAL EN GROVE ZAND

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

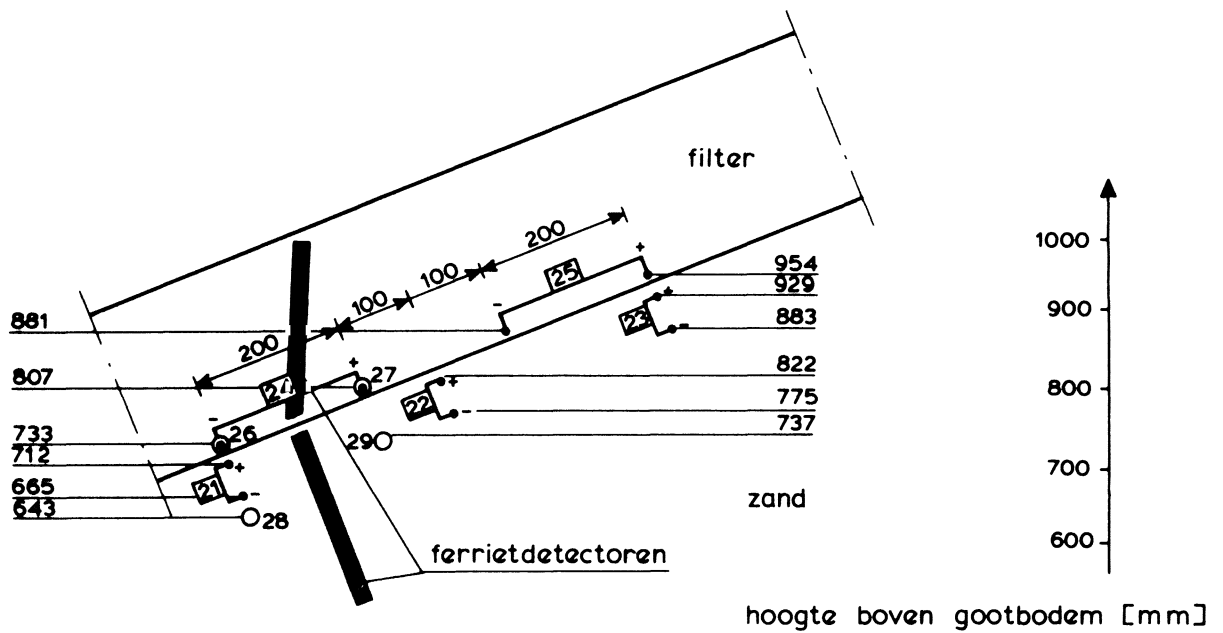
H 195.

FIG. 46



hoogte boven gootbodem [mm]

Meetopstelling bij proef I_a en I_b



hoogte boven gootbodem [mm]

Meetopstelling bij proef II

PLAATSING VAN DE DRUKOPNEMERS IN HET TALUD

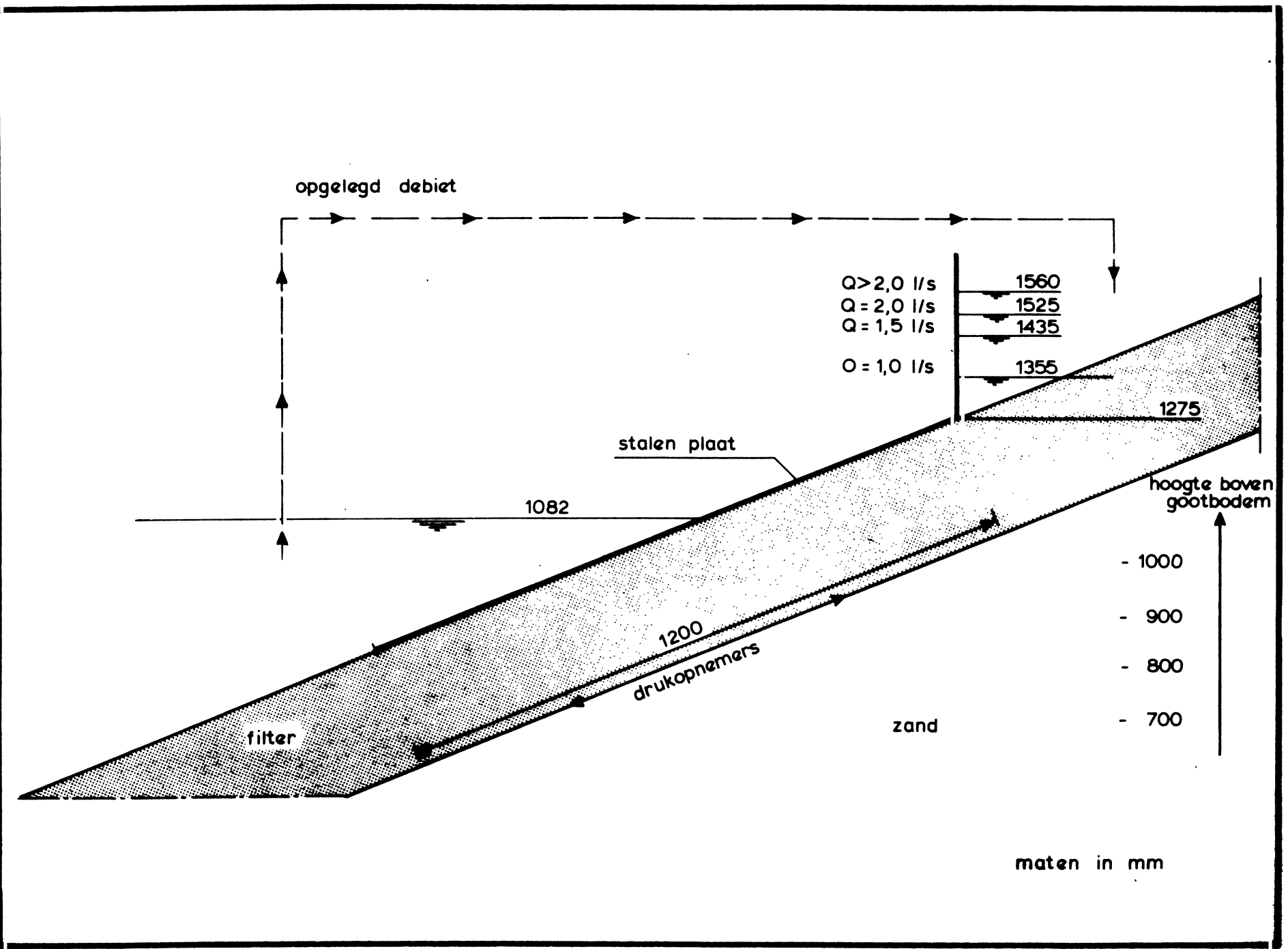
DOORSNEDE VAN DE MEETOPSTELLING VOOR
HET BEPALEN VAN DE DOORLATENDHEID

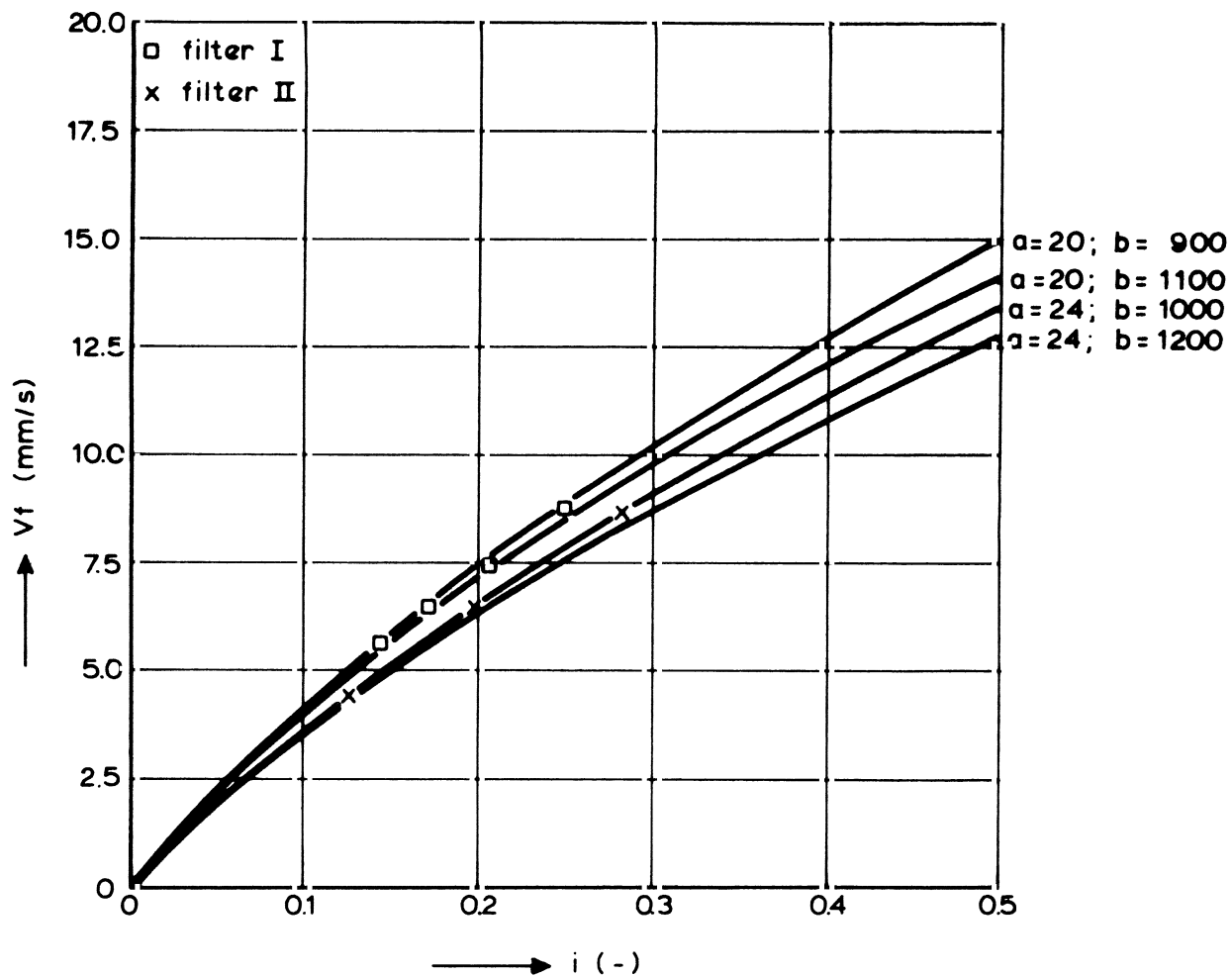
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

SCHAAL 1:10

FIG. 48

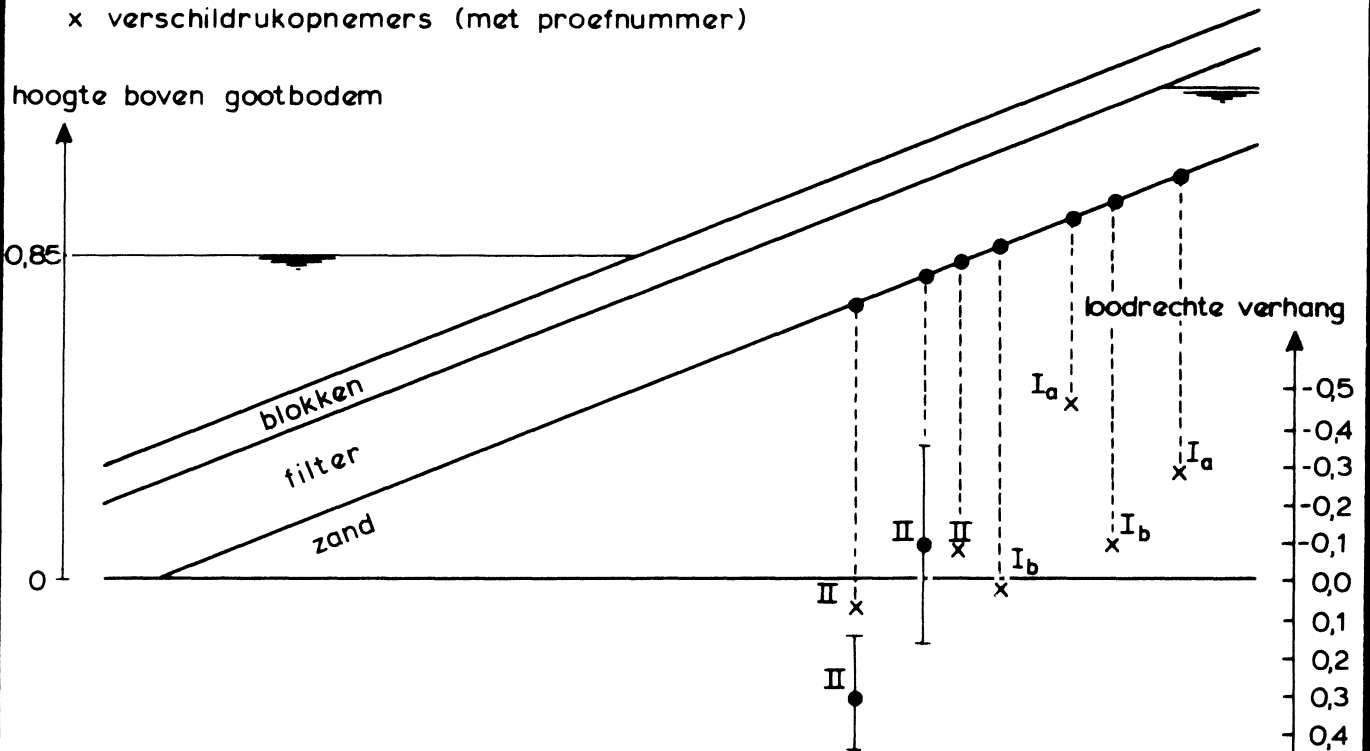




DOORLATENDHEIDSRELATIES VOOR DE
GRANULAIRE FILTERS

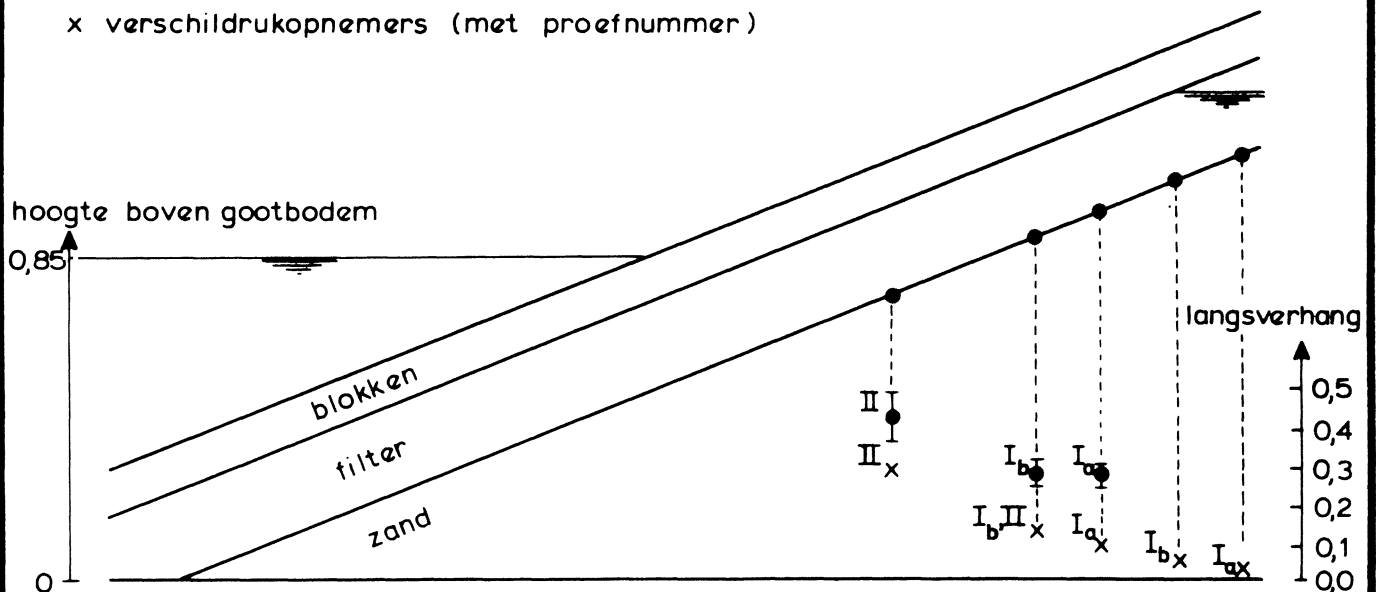
Verhang loodrecht op het grensvlak

- verschil van absolute drukopnemers (met proefnummer en betrouwbaarheidsinterval)
- x verschildrukopnemers (met proefnummer)



Langsverhang bij het grensvlak

- verschil van absolute drukopnemers (met proefnummer en betrouwbaarheidsinterval)
- x verschildrukopnemers (met proefnummer)



GEMETEN VERHANGEN BIJ HET GRENSVLAK OP
HET MOMENT DAT HET LANGSVERHANG
MAXIMAAL IS

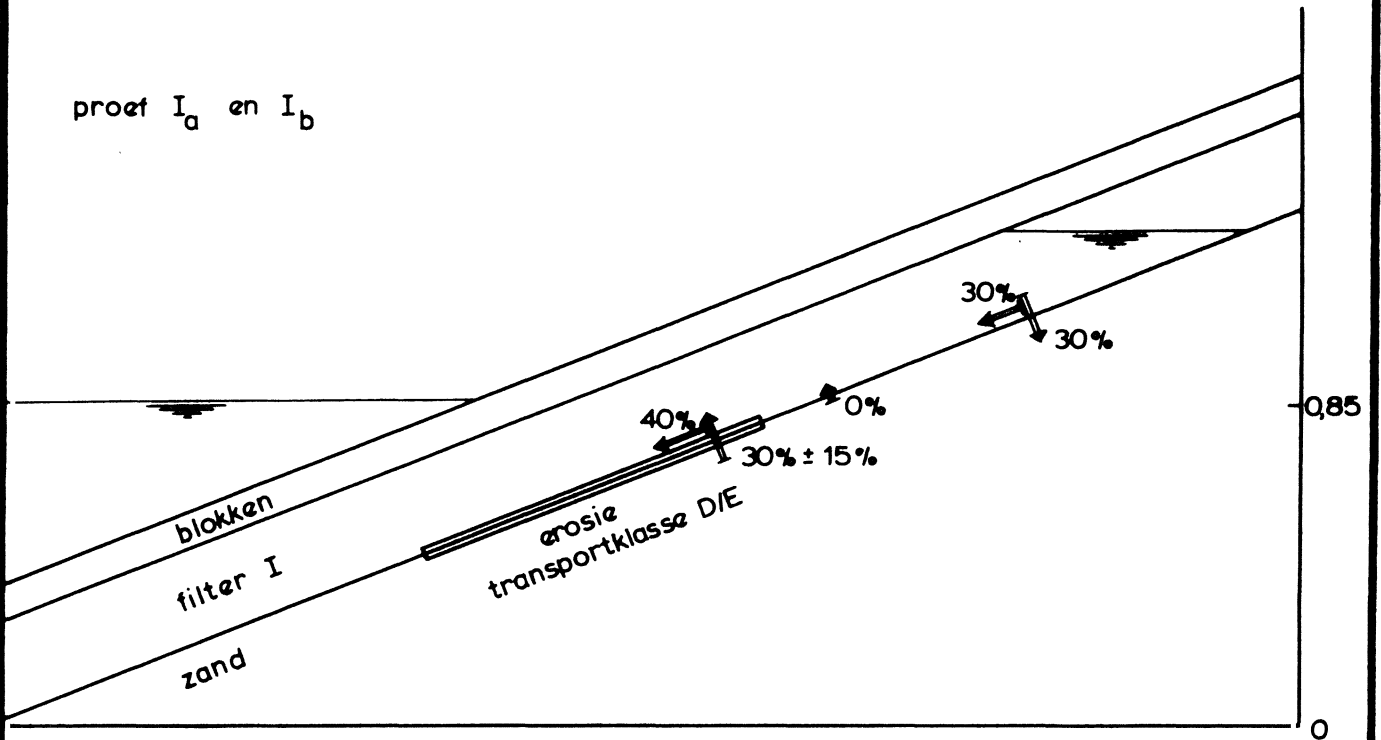
SCHAAL 1:20

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

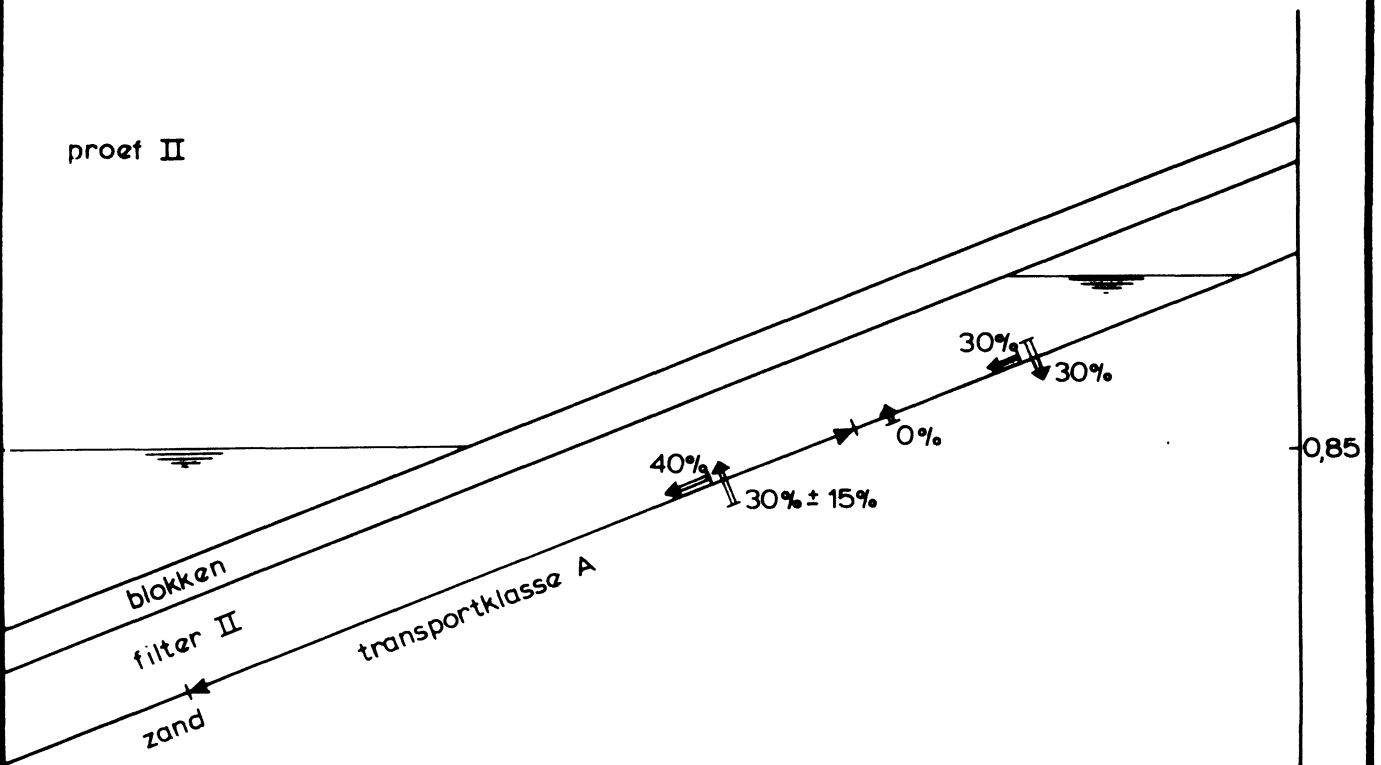
H 195

FIG. 50

proef I_a en I_b



proef II



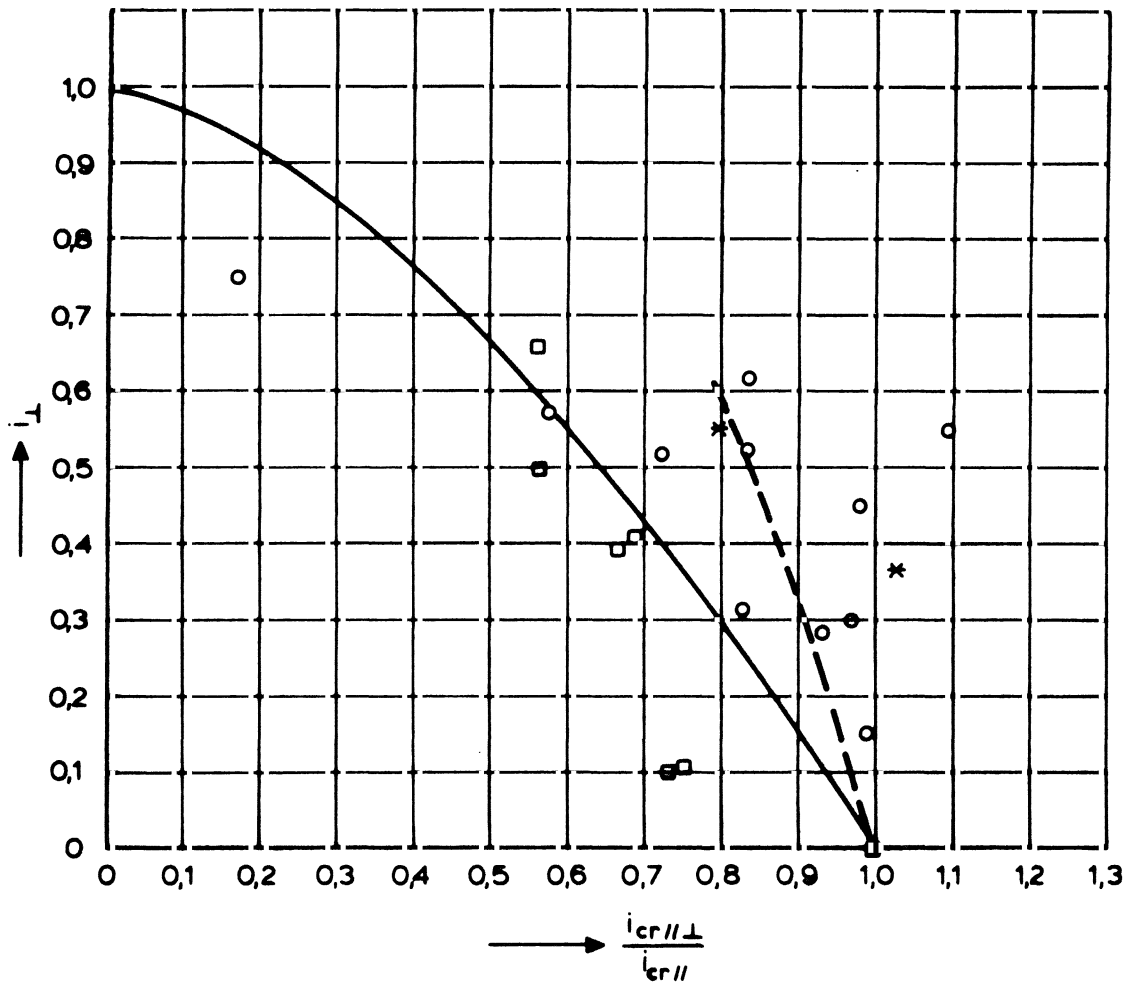
VERHANGEN EN TRANSPORTEN TIJDENS
PROEF I EN II

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

SCHAAL 1:20

H 195.16

FIG. 51



i_{\perp} = vertikaal verhang in de basis

○ = $D_{f15} = 1,5$ mm } $D_{b50} = 0,15$ mm [11]
 □ = $D_{f15} = 3,3$ mm }

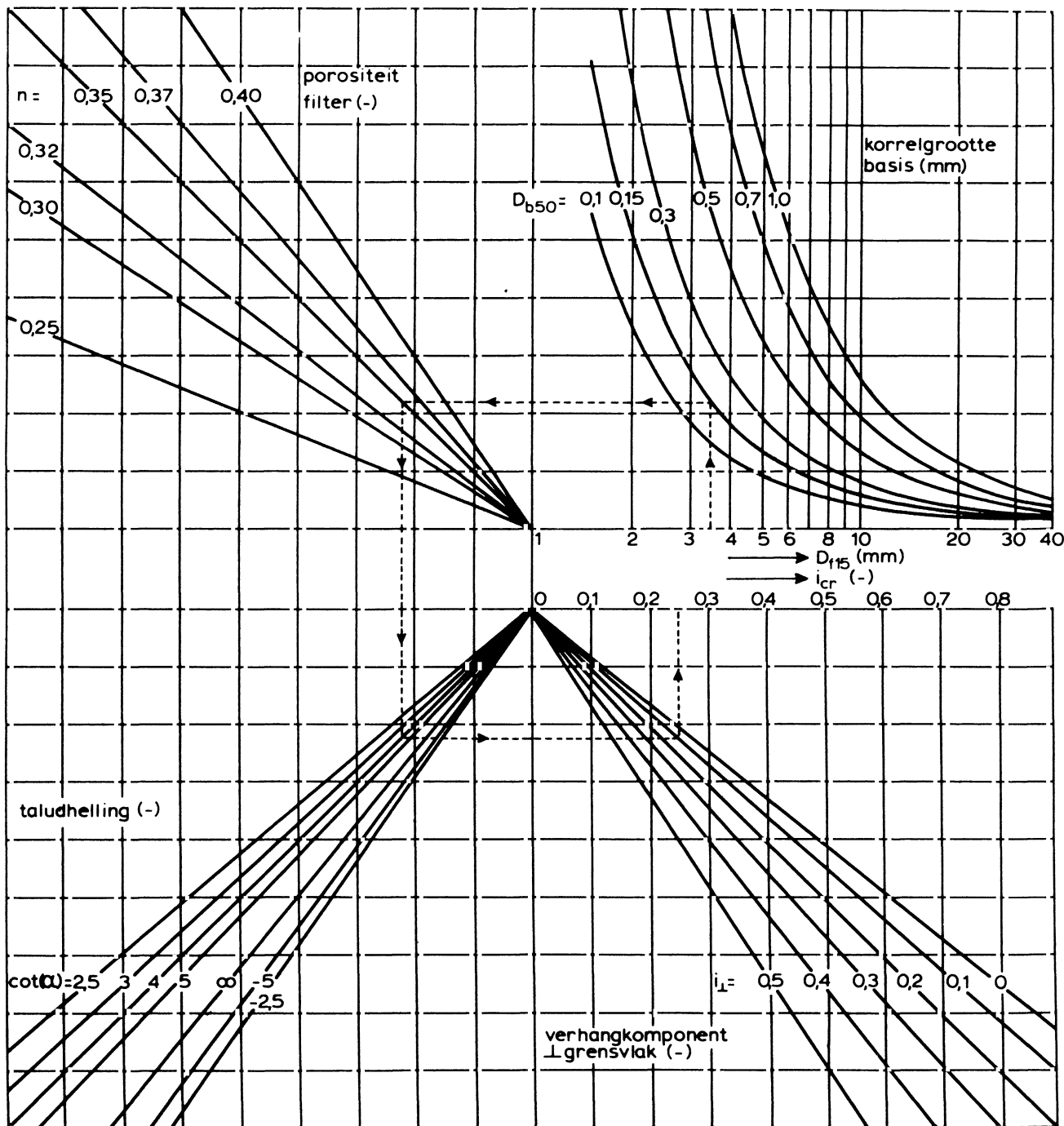
* = $D_{f15} = 10,5$ mm ; $D_{b50} = 0,82$ mm (hoofdstuk 7.1)

— : volgens formule (7.3)

- - - : volgens formule (11.7)

VERMINDERING HORIZONTALAAL KRITIEK VERHANG
 ALS GEVOLG VAN VERTIKAAL VERHANG





$\cot(\alpha) < 0 \Rightarrow$ stroming het talud op

voorbeeld: $D_{15} = 3,5$ mm
 $D_{50} = 0,15$ mm
 $n = 0,35$
 $\cot(\alpha) = 4$
 $i_L = 0,1$ } $\Rightarrow i_{cr} = 0,25$

ONTWERPDIAGRAM VOOR GRANULAIRE FILTERS
 $v = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $\Delta = 1,65$; $g = 9,8 \text{ m/s}^2$; $\Delta(1-n_b) = 1$

APPENDIX 1

Globale toetsing van grensvlak tussen granulair filter en basis

Globale toetsing van grensvlak tussen granulaair filter en basis1 Inleiding

Voor het ontwerp of de toetsing van de stabiliteit van een grensvlak tussen een granulaair filter en de basis (zand) zijn formules beschikbaar, die slechts bruikbaar zijn als er veel van de constructie bekend is. Bovendien moet de moeite genomen worden om vele berekeningen uit te voeren. Bij bestaande constructies kent men vaak niet alle van belang zijnde constructie-parameters en toch wil men een eerste indruk hebben van de stabiliteit van het grensvlak, zonder dat dit een omvangrijke rekenpartij vergt.

In deze appendix is een eenvoudige methode afgeleid, waarmee voor concrete gevallen een eerste indruk van de stabiliteit verkregen wordt. Afhankelijk van de constructie levert het één der volgende uitspraken op:

- a) Het grensvlak is zeker stabiel
- b) De stabiliteit van het grensvlak is twijfelachtig
- c) Het grensvlak is zeker instabiel

Bij twijfelachtige stabiliteit wordt geadviseerd een hoogwaardiger rekenmodel in te zetten teneinde tot een definitieve uitspraak te komen (zie bijvoorbeeld [1]).

In hoofdstuk 3 wordt de aandacht gericht op een criterium voor zeker stabiele grensvlakken (a). In hoofdstuk 4 wordt de grens tussen "twijfelachtig" en "zeker instabiel" gekwantificeerd.

2 Afbakening van toepassingsgebied

De af te leiden veilige ondergrens voor de stabiliteit van het grensvlak tussen het granulaire filter en de basis dient toepasbaar te zijn voor normale nederlandse steenzettingen op een granulaair filter op zand. Voor deze constructies geldt:

- a) Breed gegradeerd filter (zoals mijnsteen): $0,5 \leq D_{f15} \leq 15 \text{ mm}$
 $0,2 \leq n \leq 0,3$
- b) Weinig gegradeerde filter (zoals steenslag): $3 \leq D_{f15} \leq 15 \text{ mm}$
 $0,3 \leq n \leq 0,4$
- c) Basis: $0,15 \leq D_{b50} \leq 0,5 \text{ mm}$
 $0,3 \leq n_b \leq 0,4$
 $\Delta \approx 1,65$
- d) Leklengte: $0,4 \leq \Lambda \leq 3 \text{ m}$
- e) Golfsteilheid bij maatgevende belasting: $0,01 \leq H/L_0 \leq 0,05$
- f) Taludhelling: $0,35 \leq \tan \alpha \leq 0,2$ (talud van 1:3 t/m 1:5)
- g) Maatgevende golfhoogte: $H \leq 2,5 \text{ m}$.

Met: D_{f15} = korrelgrootte van het filter die door 15 gewichtsprocenten
onderschreden wordt (m)
 D_{b50} = korrelgrootte van de basis die door 50 gewichtsprocenten
onderschreden wordt (m)
 n = porositeit van het filter (-)
 n_b = porositeit van de basis (-)
 Λ = lek lengte = $\sqrt{(bkD/k')}$ (m)
 b = dikte van de filterlaag (m)
 D = toplaagdikte (m)
 k = doorlatendheid van het filter (m/s)
 k' = doorlatendheid van de toplaag (m/s)
 α = taludhelling ($^\circ$)
 H = golfhoogte (m)
 L_o = golflengte (op diep water) (m)

Buiten dit toepassingsgebied is het denkbaar dat de toetsingsformules onjuiste resultaten geven. Aanbevolen wordt om in die gevallen de analytische methode uit [1] toe te passen.

3 Veilige ondergrens

3.1 Sterkte van het grensvlak

Zoals is gerapporteerd in hoofdstuk 2 van sectie 2 kan de sterkte van het grensvlak, de kritieke filtersnelheid, met de volgende formule berekend worden:

$$v_{fcr} = \frac{n}{e} \sqrt{\Psi_s \Delta g D_{b50} \left(\frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin(\phi)} - \frac{i_c}{\Delta(1 - n_b)} \right)} \quad (1)$$

met: v_{fcr} = Kritieke filtersnelheid (bij begin van inzanding) (m/s)
 e = Empirische coëfficiënt (-)
 Ψ_s = Shields parameter (-)
 Δ = Relatieve soortelijke massa van basiskorrels (-)
 g = Zwaartekrachtsversnelling (m/s²)
 ϕ = Rusthoek basismateriaal ($^\circ$)
 i_c = Verhang in de basis, loodrecht op het grensvlak (-)

Voor de grootte van de coëfficiënten e en Ψ_s worden veilige waarden

gekozen, rekening houdend met het toepassingsgebied:

$$0,2 \leq e \leq 0,35 \quad \Rightarrow \quad \text{veilige waarde: } e = 0,35$$

$$0,04 \leq \Psi_s \leq 0,07 \quad \Rightarrow \quad \text{veilige waarde: } \Psi_s = 0,04$$

De invloed van de taludhelling en het verhang loodrecht op het grensvlak zijn in formule (1) in de laatste twee termen opgenomen:

$$\left(\frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin(\phi)} - \frac{i_{\perp}}{\Delta(1-n_b)} \right) \quad (2)$$

De meest ongunstige grootte van deze term, die leidt tot een veilige ondergrens van de sterkte, kan worden afgeschat. Daarbij moeten we ons bedenken dat in het toepassingsgebied het verhang in het filter (belasting, $i_{//}$) zowel langs het grensvlak naar boven ($i_{//\uparrow}$) als naar beneden ($i_{//\downarrow}$) kan werken, maar dat het verhang naar boven ($i_{//\uparrow}$) meestal veel groter is. Daardoor kan deze als maatgevend beschouwd worden. Dit leidt samen met enkele aannamen voor ϕ en i_{\perp} tot het volgende:

$$\alpha = -11^{\circ} \quad (\text{flauw talud is ongunstig bij } i_{//\uparrow})$$

$$\phi = 55^{\circ}$$

$$i_{\perp} = 0,2$$

$$n_b = 0,4$$

$$\left(\frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin(\phi)} - \frac{i_{\perp}}{\Delta(1-n_b)} \right) = \left(\frac{\sin(55^{\circ} + 11^{\circ})}{\sin(55^{\circ})} - \frac{0,2}{1,65(1-0,4)} \right) = 0,913 \quad (3)$$

Invullen in formule (1) levert, samen met de veilige waarden voor e en Ψ_s , de volgende eenvoudige formule op:

$$v_{fcr} = \frac{n}{0,35} \sqrt{0,04 \times 1,65 \times 9,8 \times D_{b50} \times 0,913} = 2,2n \sqrt{D_{b50}} \quad (4)$$

In combinatie met een doorlatendheidsrelatie levert deze formule het gewenste kritieke verhang op. In figuur 1 is aannemelijk gemaakt dat de volgende formule een bruikbare benadering van de doorlatendheid geeft:

$$k = 4,2 \times 10^3 n^3 D_{r15}^{1,5} \quad \text{met: } v_{fcr} = k i_{cr} \quad (5)$$

Substitutie van formule (5) in (4) geeft de gewenste formule voor het

kritieke verhang:

$$i_{cr} = \frac{0,53 \times 10^{-3}}{D_{f15}^2} \sqrt{\frac{D_{250}}{D_{f15}}} \quad (6)$$

Deze eenvoudige formule is afgeleid voor granulaire filters onder een normale nederlandse steenzetting. De formule mag derhalve nooit voor andere constructies gebruikt worden.

3.2 Belasting

Voor het berekenen van de belasting kan gebruik gemaakt worden van figuur 2 [2] en de volgende formule voor $\tan\beta$:

$$\tan\beta = \frac{0,17}{\sqrt{H/L_0}} \quad (7)$$

met: β = helling van stijghoogtefront op talud, ten opzichte van de verticaal ($^\circ$)

Een kleine waarde van $\tan\beta$ levert een groot verhang langs het grensvlak op. Dit treedt op bij een grote waarde van H/L_0 :

$$0,01 \leq H/L_0 \leq 0,05 \Rightarrow \text{maatgevende } \tan\beta = 0,17/\sqrt{0,05} = 0,8$$

De waarde van φ_b/Λ is in bijna alle gevallen kleiner dan 4,5:

$$\tan\alpha = 0,2 \text{ (maatgevend voor sterkte), } H/L_0 = 0,05 \Rightarrow \xi_0 = 0,9$$

$$\text{Met } \varphi_b = 0,36H\xi_0/\sqrt{\tan\alpha} \text{ (zie [3]) volgt: } \varphi_b \leq 1,8 \Rightarrow \varphi_b/\Lambda \leq 4,5$$

Uit figuur 3 blijkt met $\tan\beta \leq 0,8$ en $\varphi_b/\Lambda \leq 4,5$ dat $i_{//t} \leq 0,9$.

3.3 Resulterende ondergrensformule

Uit paragraaf 3.1 en 3.2 volgt:

Sterkte:

$$i_{cr} = \frac{0,53 \times 10^{-3}}{n^2 D_{f15}} \sqrt{\frac{D_{b50}}{D_{f15}}} \quad (8)$$

Belasting: $i_{//t} \leq 0,9$

Substitutie levert:

a) Breed gegradeerde filters, $n = 0,3$:

$$D_{f15} < 0,04 D_{b50}^{0,33} \quad (9)$$

b) Weinig gegradeerde filters, $n = 0,4$:

$$D_{f15} < 0,02 D_{b50}^{0,33} \quad (10)$$

Vooral bij grof basismateriaal en een hoge filterporositeit kan dit criterium strenger zijn dan het geometrische criterium:

$$D_{f15} < 5 D_{b50} \quad (11)$$

In dat geval geldt uiteraard dit geometrische criterium (formule (11)).

4 Grens tussen twijfelachtig en instabiel

De grens tussen "twijfelachtig" en "instabiel" is van belang voor het al dan niet afkeuren van een filter. Deze grens kan met dezelfde formules als in hoofdstuk 3 afgeleid worden, alleen de waarden van de parameters worden nu juist aan de onveilige kant gekozen, zodat het filter niet ten onrechte afgekeurd wordt. Uitgangspunt is echter dat er een belangrijke golfbelasting aanwezig kan zijn, met $H \approx 1$ m, omdat bij afwezigheid van een golfbelasting elk filter voldoet:

$$\begin{aligned} 0,2 \leq e \leq 0,35 & \quad \Rightarrow \text{onveilige waarde: } e = 0,2 \\ 0,04 \leq \Psi_s \leq 0,07 & \quad \Rightarrow \text{onveilige waarde: } \Psi_s = 0,07 \\ \alpha & = -11^\circ \\ \phi & = 55^\circ \\ i_1 & = 0 \end{aligned}$$

$$\left(\frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin(\phi)} - \frac{i_1}{\Delta(1 - n_b)} \right) = \left(\frac{\sin(55^\circ + 11^\circ)}{\sin(55^\circ)} - 0 \right) = 1,12 \quad (12)$$

Invullen in formule (1) levert samen met de onveilige waarden voor e en Ψ , de volgende eenvoudige formule op:

$$v_{fcr} = \frac{n}{0,2} \sqrt{0,07 \times 1,65 \times 9,8 \times D_{b50} \times 1,12} = 5,6n \sqrt{D_{b50}} \quad (13)$$

Met de doorlatendheidsrelatie (formule (5)) wordt dit:

$$i_{cr} = \frac{1,34 \times 10^{-3}}{n^2 D_{f15}} \sqrt{\frac{D_{b50}}{D_{f15}}} \quad (14)$$

Ten aanzien van de belasting geldt het optredende verhang minstens gelijk is aan $i_{//t} = 0,3$. Met formule (14) volgt:

a) Breed gegradeerde filters, $n = 0,2$:

$$D_{f15} > 0,2 D_{b50}^{0,33} \quad (15)$$

b) Weinig gegradeerde filters, $n = 0,3$:

$$D_{f15} > 0,1 D_{b50}^{0,33} \quad (16)$$

Als het filter onder een steenzetting niet aan dit criterium voldoet, dan zal er vrijwel zeker inzanding vanuit de basis plaatsvinden.

5 Conclusie

Door gebruik te maken van de ontwerpformules voor granulaire filters in combinatie met geschikte waarden voor de daarin voorkomende parameters blijkt het mogelijk te zijn een simpel beoordelingsmodel op te stellen. Het model bestaat uit 4 formules die in figuur 4 zijn samengevat.

Voor het beoordelen van een bestaande filterconstructie onder een steenzetting is kennis over de aard van het filter (breed of smal gegradeerd),

en de korrelgrootte van respectievelijk het filter en de basis voldoende.

Met figuur 4 volgt of:

- 1) er zeker geen inzanding te verwachten is (stabiele gebied),
- 2) er mogelijk inzanding optreedt (twijfelachtig), of
- 3) er zeker inzanding te verwachten is (instabiele gebied)

De beoordelingsmethode is uitsluitend toepasbaar op granulaire filters onder normale steenzettingen, zoals is afgebakend in hoofdstuk 2.

REFERENTIES

1 M. Klein Breteler

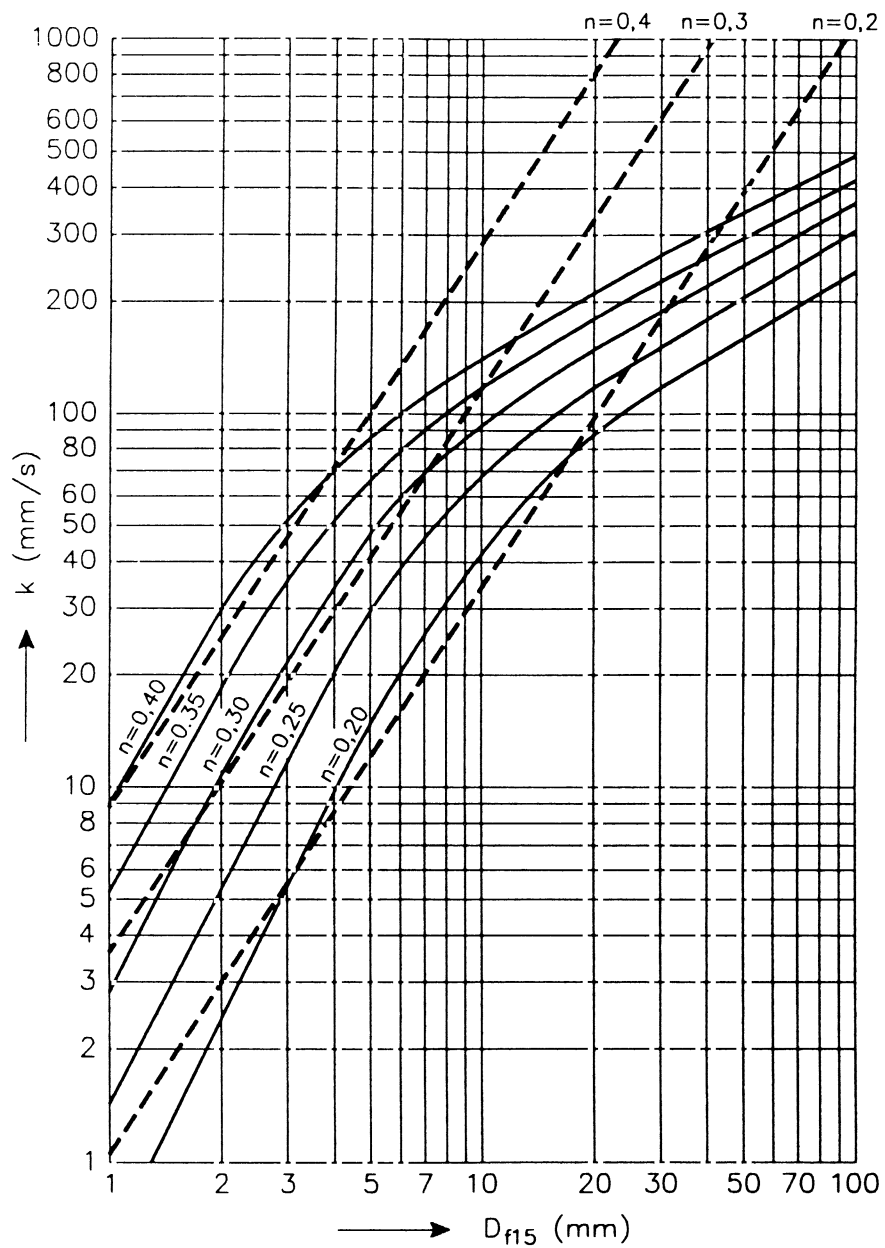
Handboek voor dimensionering van gezette dijkbekledingen
CUR/TAW/WL, concept rapport H865, mei 1991

2 M. Klein Breteler e.a.

Taludbekledingen van gezette steen
Analytische en numerieke berekening van de stijghoogte onder de toplaag
Waterloopkundig Laboratorium en Grondmechanica Delft
Verslag M1795/H195 deel XIX; CO 276920; aug. 1991

3 M. Klein Breteler e.a.

Taludbekledingen van gezette steen
Waterbeweging en golfbelasting op een glad talud
Waterloopkundig Laboratorium en Grondmechanica Delft
Verslag M1795/H195 deel XVII; maart 1990



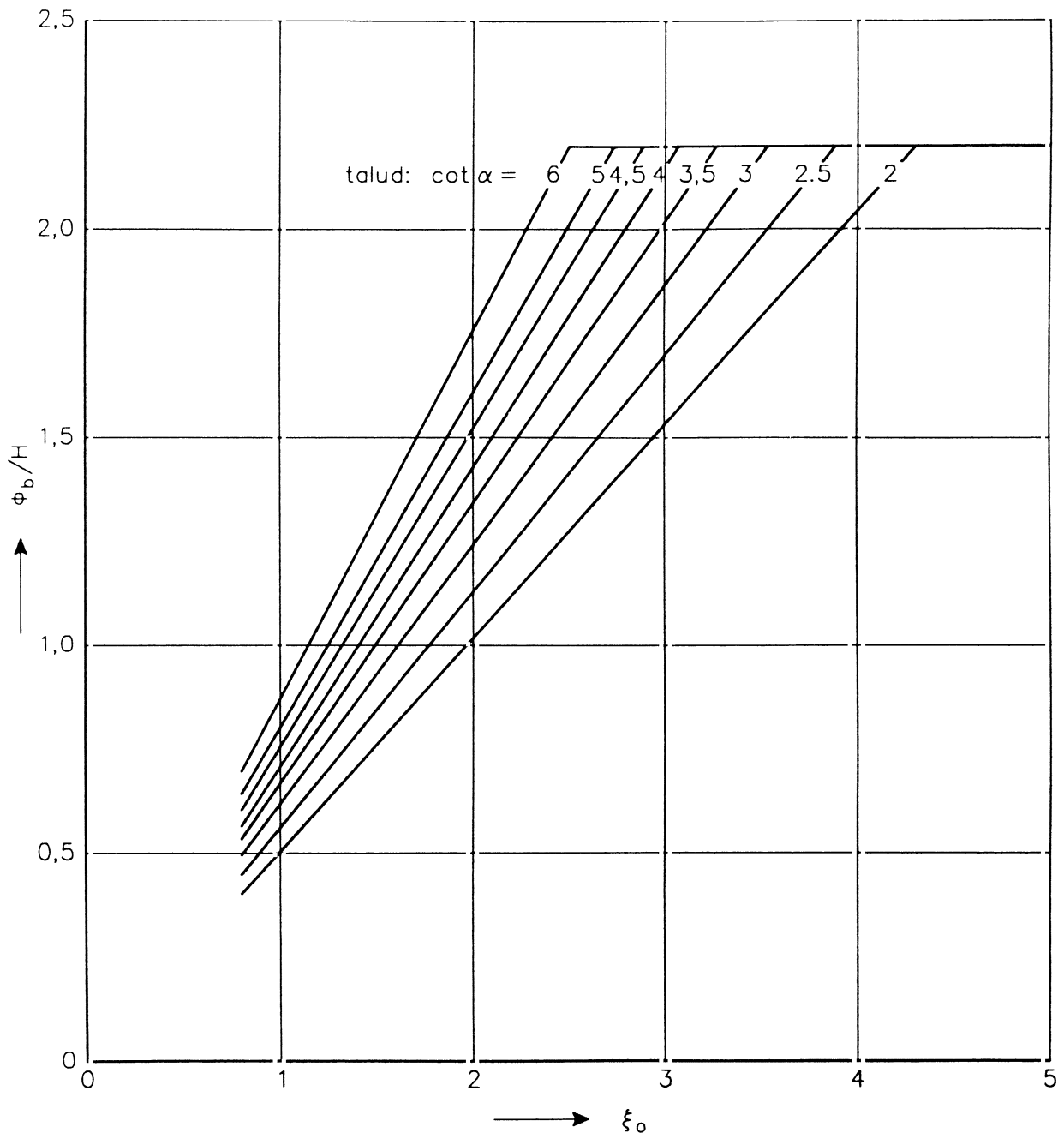
- - - - - benadering: $k = 4,2 \cdot 10^3 n^3 D_{f15}^{1,5}$
 ————— relatie volgens analytisch model

DOORLATENDHEID FILTER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 1

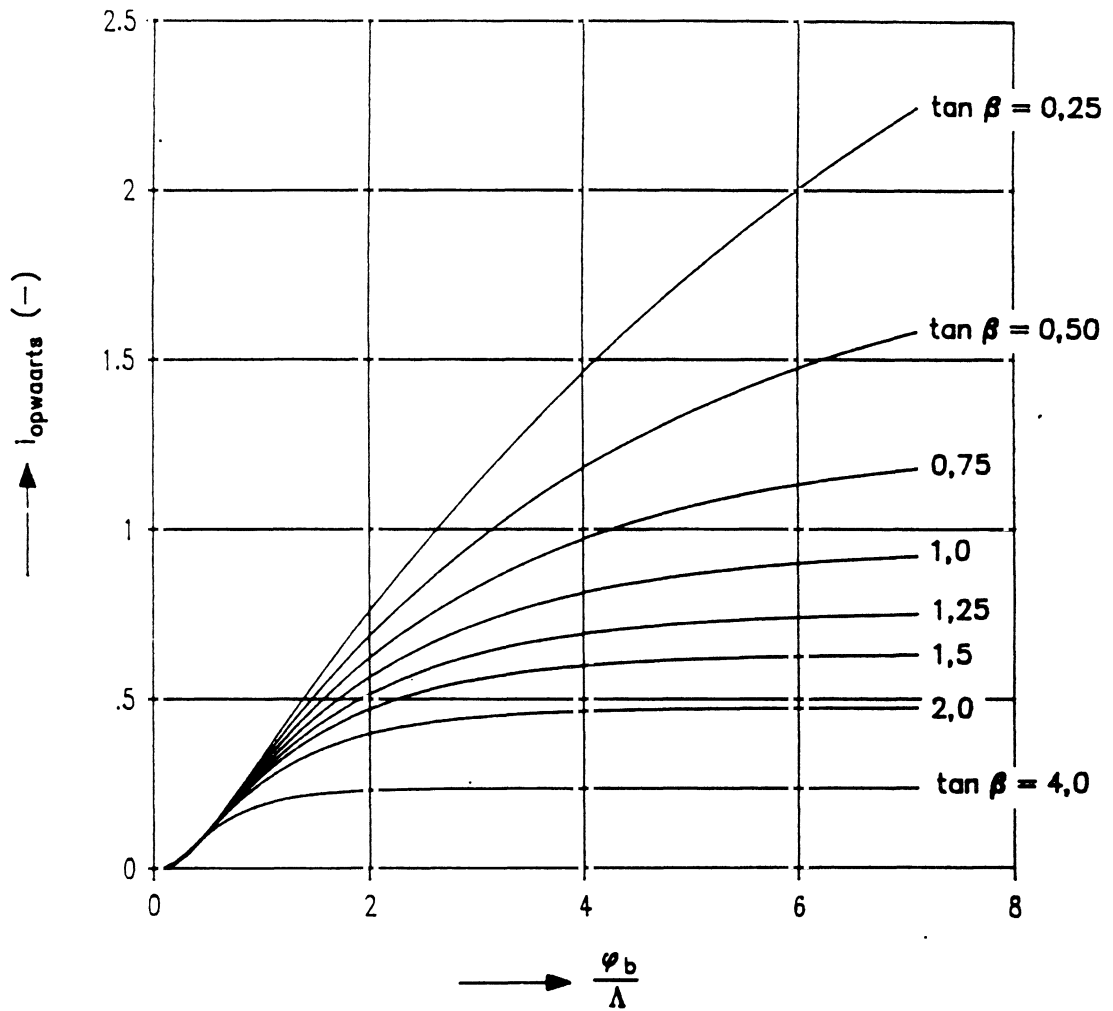


STIJGHOOGTE OP TALUD

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 2

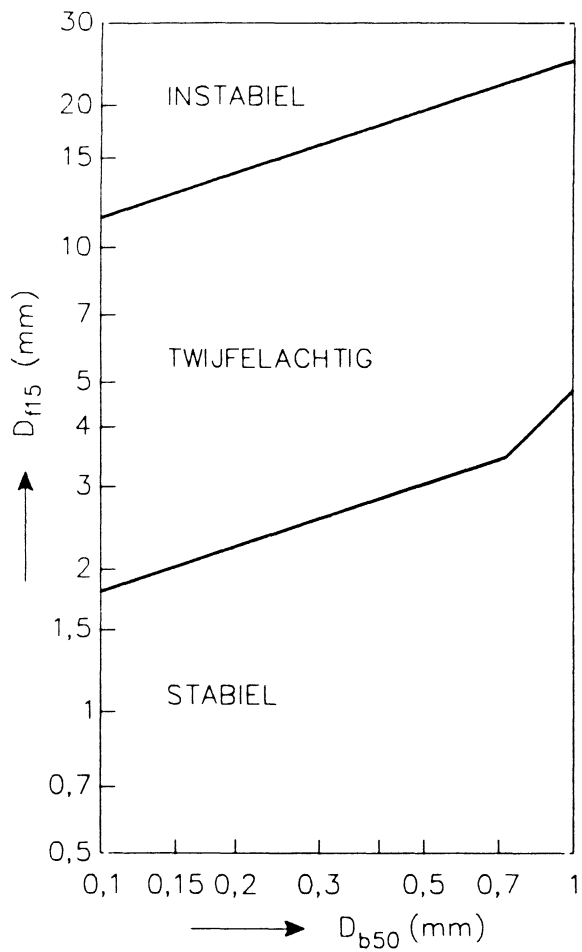


MAXIMAAL OPWAARTS VERHANG IN FILTER

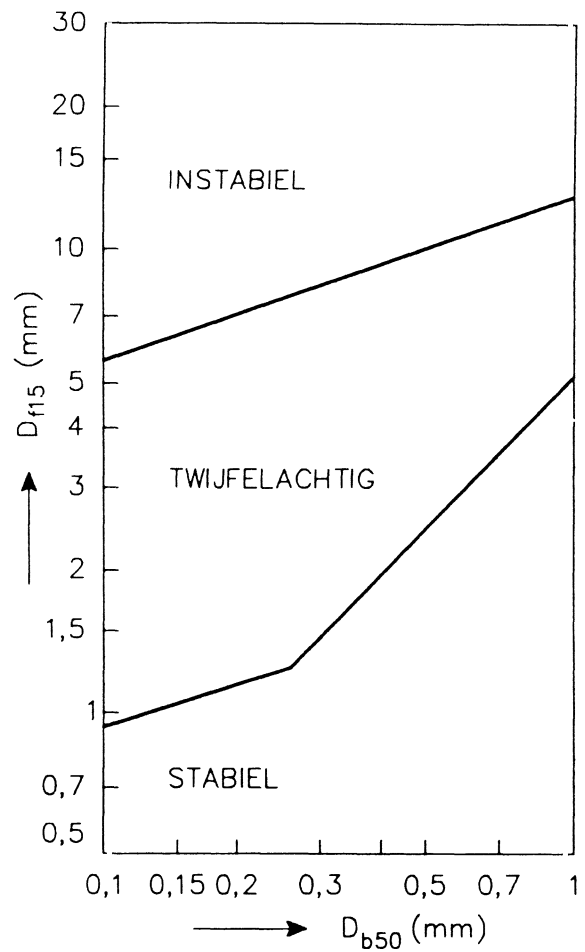
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 3



a. breed gegradeerd filtermateriaal (zoals mijnsteen)



b. filtermateriaal met steile zeefkromme (zoals steenslag)

SECTION 3

Hydraulic criteria for filters

Talubekledingen van gezette steen, M1881

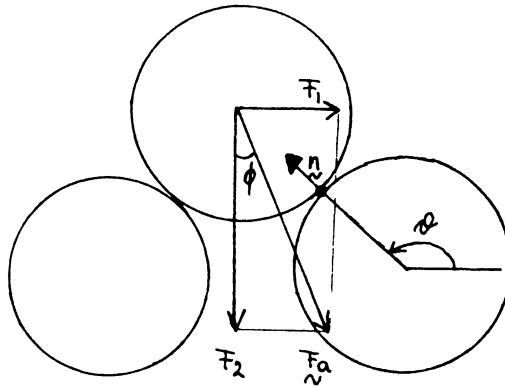
Samenvatting van het verslag "Hydraulic Criteria For Filters" by M.A. Koenders

ir. M Klein Breteler, aug. 85.

Voor het berekenen van het lokale stromingspatroon op het grensvlak tussen filter en basis maakt Koenders gebruik van een overgangslaag in het filter met dikte $\frac{1}{4}D_f$, die op de basis aansluit. Buiten deze overgangslaag wordt de doorlatendheid homogeen verondersteld, terwijl erbinnen de doorlatendheid (k) plaatsafhankelijk wordt aangenomen. Daar waar de filterkorrels het grensvlak raken, is $k=0$. Verder is het verloop sinusvormig in x en y richting verondersteld, hetgeen een eerste orde benadering is voor effecten die optreden bij een loodrechte stapeling van filterkorrels (=bollen van gelijke grootte). Koenders leidt met dit model algemene formules af, die het lokale stromingsbeeld in de overgangslaag beschrijven.

Voor twee konkrete gevallen met stroming langs het grensvlak (respektievelijk stroming evenwijdig aan korrelstapeling en 45° t.o.v. korrelstapeling; $D_b=0,85$ mm; $D_f=42$ mm) wordt de stroming volledig uitgewerkt en grafische weergegeven. Aan de hand van dit voorbeeld (en andere niet vermelde maar wel uitgewerkte voorbeelden) wordt gekonkludeerd dat de filtersnelheid en het verhang in de overgangslaag sterk plaatsafhankelijk zijn (v_f en i wijken tot maximaal respektievelijk 80% en 60% t.o.v. het gemiddelde af). De horizontale stroming blijkt geen grote verticale verhangen in de basis tot gevolg te hebben.

Koenders leidt af dat een korrel op het moment van begin van beweging een rollende beweging maakt. Of een korrel gaat rollen, hangt primair af van de ligging van de korrel. Afhankelijk van de ligging grijpt de stromingskracht op de korrel meer of minder boven het hart van de korrel aan. Zijn liggingshoek θ is op te vatten als de hoek van inwendige wrijving uit [1], vermeerderd met $\frac{1}{2} \pi$:



Een scheef grensvlak wordt opgevat als een horizontaal grensvlak, waarbij de liggingshoek verminderd is met de hoek α (α =taludhelling). Het resultaat van de berekeningen is identiek aan formule uit [2].

De verhouding tussen stromingskracht en zwaartekracht op een korrel bij begin van beweging kiest Koenders zodanig dat zijn formule dezelfde resultaten geeft als de metingen. Hij kiest: $\phi=50^\circ$ ($\tan\phi$ = stromings-kracht/zwaartekracht). Dit is onafhankelijk van de korrelgrootte.

Teneinde de stromingskracht op een korrel te kunnen berekenen wordt voor fijn basismateriaal ($D_f < 0,25$ mm) een semi-laminaire stroming langs de bovenste korrels van de basis aangenomen. De stromingskracht op de korrels wordt dan voornamelijk bepaald door de schuifspanning, terwijl de drukgradient over de korrel van ondergeschikte betekenis is. De verhouding tussen stromingskracht en zwaartekracht is dan;

$$\tan \phi = \frac{\rho D_b^2 \sqrt{U^3 \nu / D_f}}{\pi / 6 \cdot (\rho_a - \rho) g D_b^3}$$

- ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)
- D_b = korreldiameter basis (m)
- D_f = korreldiameter filter (m)
- ρ_a = soortelijke massa van korrel (kg/m^3)
- U = maximale porie-snelheid in overgangslaag (m/s)
- ν = viscositeit (m^2/s)
- g = zwaartekracht (m/s^2)

Voor een vergelijking van de resultaten met die uit voorgaande onderzoeken wordt verwezen naar de appendix.

Voor grote korrels ($D_f > 0.8$ mm) wordt de drukgradient bepalend. Hieruit volgt dat de sleepkracht op een korrel nu evenredig met de watersnelheid in de overgangslaag in het kwadraat wordt. Het bezwijkcriterium, de verhouding tussen sleepkracht op een korrel en de zwaartekracht op die korrel wordt dan:

$$\tan \phi = \frac{a U^2 D_b^2}{\pi/6 \cdot (\rho_a - \rho) g D_b^3}$$

a = weerstandscoefficiënt (vergelijkbaar met C_d uit de gebruikelijke weerstandsformules, hoewel a niet dimensieloos is).

Bij gecombineerde verhangen (\perp en $//$ grensvlak) zijn er twee bezwijkmechanismen. Als het loodrechte verhang klein is, treedt transport op door het rollen van korrels. Hierbij is de hoek van inwendige wrijving van belang. Als de loodrechte verhangen groot worden ($\lambda > 0.7$), treedt er een glijvlak op, waardoor er een collectief transport ontstaat, de continuum mode. Dit mechanisme wordt gekarakteriseerd door de bezwijkhoek.

De invloed van een verticale stroming wordt vertaald in een extra kracht op de korrel:

$$F_{\text{extra}} = \text{coefficient} * \text{aanstroomoppervlak} * \text{drukverval}$$
$$= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{4} \pi D_b^2\right) \cdot \left(i_z \frac{D_b}{z} \cdot \rho g\right)$$

i_z = vertikaal verhang in de basis.

Koenders laat zien dat al zijn berekeningsresultaten goed aansluiten bij de metingen.

Ten aanzien van cyclische stroming wordt de aandacht uitsluitend gericht op de te verwachten demping van het (uitwendig opgelegde) cyclische verhang. Doordat de demping bij kleine golfperiode (T) groter is dan bij grote T , wordt gesteld dat dus ook het kritieke verhang bij kleine T groter is.

REFERENTIES

1. Klein Breteler M.
Erosie in granulaire filters; Open waterloop analogie
Waterloopkundig laboratorium, nota M1881-16, nov. 84
(als appendix 3 toegevoegd aan [3])

2. Adel, H. den
Literatuurstudie filters
Deelopdracht ten behoeve van steenzettingenonderzoek
laboratorium voor Grondmechanica, CO 258901/88
(als appendix 4 toegevoegd aan [3])

3. Knaap FCM van der, Klein Breteler M., Groot MT de.
Belasting en sterkte van zetsteenverdedigingskonstrukties
op oevers en dijken.
WL/LGM verslag oriënterende bureaustudie
M1115 deel XIV, M1795/M1881 deel XVI, CO 416409/4 aug. 1985.

4. Klein Breteler M.
Taludbekledingen van gezette steen
Stabiliteit van onderlagen, onderzoeksvoorstel
Waterloopkundig Laboratorium, nota M1881-16A, jan. 1985.

5. Brink W.E. en Oldenziel D.M.
Invloed van grondwaterstroming op begin van beweging van zand
Waterloopkundig Laboratorium, verslag S111, febr. '72.

6. Meulen, T. van der en Graaf, J. van de
Granulaire filters; stroming evenwijdig scheidingsvlak
Waterloopkundig Laboratorium, M 898 deel IV, sept. '84.

APPENDIX

Vergelijking van resultaten van Koenders met andere onderzoeksresultaten

Voor fijn basismateriaal ($D_f < 0,25$ mm) leidt Koenders een formule af die de filtersnelheid bij begin van beweging bevat:

$$\tan \phi = \frac{\rho D_b^2 \sqrt{U^3 \nu / D_f}}{\pi / 6 \cdot (\rho_a - \rho) g D_b^3} \quad (1)$$

- ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)
- D_b = korreldiameter basis (m)
- D_f = korreldiameter filter (m)
- ρ_a = soortelijke massa van korrel (kg/m^3)
- U = maximale porie-snelheid in overgangslaag (m/s)
- ν = viscositeit (m^2/s)
- g = zwaartekracht (m/s^2)

Dit resultaat is als volgt te herschrijven:

$$v_{f_{cr}} = c \sqrt{\frac{1}{6} \pi \tan \phi \cdot \text{Re}^{\frac{1}{4}} \cdot n \sqrt{\Delta g D_b}} \quad (2)$$

- $v_{f_{cr}}$ = filtersnelheid bij begin van beweging (m/s)
- n = porositeit filter (-)
- Δ = $(\rho_a - \rho) / \rho$ (-)
- c = coefficient die de invloed van het lokale stromingsbeeld weergeeft. Koenders geeft methode om c te berekenen.

In [1] was gevonden:

$$v_{f_{cr}} = \frac{\sqrt{\psi_s}}{e(\text{Re})} \cdot n \sqrt{\Delta g D_b} \quad \text{met } e \hat{=} \text{Re}^{-\frac{1}{4}} \text{ à } \text{Re}^{-1/6} \quad (3)$$

De overeenkomst tussen beide resultaten is duidelijk. Opgemerkt moet worden dat in [1] slecht het vermoeden kon worden geuit dat e evenredig is met $\text{Re}^{-\frac{1}{4}} \text{ à } \text{Re}^{-1/6}$.

Uit de afleiding van Koenders blijkt dat $e \hat{=} \text{Re}^{-\frac{1}{4}}$.

Het resultaat uit [6] sluit minder duidelijk aan bij het resultaat van Koenders:

$$v_{f_{cr}} = 0,3 \cdot (D_{15f} / D_{50b})^{\frac{1}{4}} \cdot n \sqrt{\Delta g D_{50b}} \quad (4)$$

Voor de verhouding tussen de stromingskracht en de zwaartekracht op grof basismateriaal wordt gesteld:

$$\tan \phi = \frac{a U^2 D_b^2}{\pi/6 \cdot (\rho_a - \rho) g D_b^3} = \frac{\text{stromingskracht op korrel}}{\text{zwaartekracht op korrel}} \quad (5)$$

a = weerstandscoefficiënt (vergelijkbaar met C_d uit de gebruikelijke weerstandsformules, hoewel a niet dimensieloos is).

Dit is als volgt te herschrijven:

$$v_{fcr} = c \sqrt{\frac{\rho}{a}} \sqrt{\frac{1}{6} \pi \tan \phi} \cdot n \sqrt{\Delta g D_b} \quad (6)$$

In [1] was gevonden:

$$V_{fcr} = \frac{\sqrt{\psi_s}}{e} \cdot n \sqrt{\Delta g D_b} \quad \text{met } e = 0,35 \quad (7)$$

De overeenkomst tussen formule (6) en (7) is zeer groot.

De formule die afgeleid wordt voor de invloed van een hellend grensvlak is identiek aan de formule uit [2]:

$$i_{cr, \text{talud}} = \frac{\sin(\phi - \alpha)}{\sin \phi} \cdot i_{cr, \text{horizontaal}}$$

Bij de afleiding van een formule voor de invloed van een vertikaal verhang wordt dezelfde methode gebruikt als in [4]. Het enige verschil is dat Koenders een coefficient, die de waarde 0,5 heeft, toevoegt. Zo'n coëfficiënt is ook al eens door Martin toegepast. Hij vond langs experimentele weg dat de grootte afhankelijk was van de korrelgrootte en lag tussen 0,35 en 0,50. Later onderzoek [5] zet echter grote vraagtekens bij deze benadering.

Het resultaat van Koenders sluit echter beter bij metingen aan dan dat uit [4], dat met opzet een veilige ondergrens voor i_{cr} geeft.

Ten aanzien van cyclische stroming wordt de aandacht uitsluitend gericht op de te verwachten demping van het (uitwendig opgelegde) cyclische verhang. Doordat de demping bij kleine golfperiode (T) groter is dan bij grote T, wordt gesteld dat dus ook het kritieke verhang bij kleine T groter is.

In [1] wordt de aandacht uitsluitend gericht op het feit dat de grenslaagdikte afhankelijk is van T. Als T klein is, is ook de grenslaagdikte klein en is de

bodemschrijfspanning dus groot (t.o.v. als T groot is). Er wordt daarom in [1] gekonkludeerd dat, gegeven een zekere snelheidsamplitude, de basis bij kleine T juist eerder zal eroderen dan bij grote T.

Uit recent modelonderzoek (M1881-16, juni '85) blijkt dat de demping bij grof grind verwaarloosbaar is en de stroming ten aanzien van begin van beweging als quasi-stationair is op te vatten.

ESTUARY PHYSICS

PHYSICAL MODELLING CONSULTANTS

10 Fabyc House
Cumberland Road
Kew, Surrey TW9 3HH (UK)

Telephone: 01-948 3017

HYDRAULIC CRITERIA FOR FILTERS

by

M.A. Koenders

July 1985

Table of contents.

1. General outline of the problem	3
2. Turbulent permeability	9
3. Choice of the model	14
4. The mathematical problem and approximations	17
5. Analysis of the flow pattern	22
6. The force on a particle and discussion of failure modes	27
7. The force exerted by the flow	39
8. Comparison with experiments	47
9. Summary	59
List of literature	61
Appendix	A1
Program text	A7
List of symbols	B1

At the back of this report the reader will find a list of symbols (p B1-B2). These pages can be folded out for easy reading.

1. General outline of the problem.

Filter stability is usually expressed in terms of geometric criteria. These are simple to understand: no particle of the base layer of fine material should have a diameter smaller than a pore in the filter layer of coarse material. Moreover, the filter layer should be stable internally, which imposes requirements on the coefficient of uniformity of the filter grainsize distribution.

Extending the criteria to include hydraulic phenomena may prove possible on the basis of tests. Quite a wide range of hydraulic conditions for various filter designs must be considered before sufficient experience is gathered to derive design rules. In this report an attempt is made to ascertain hydraulic criteria from largely theoretical considerations. Theoretical understanding may enhance experimentally derived rules and boost confidence in them.

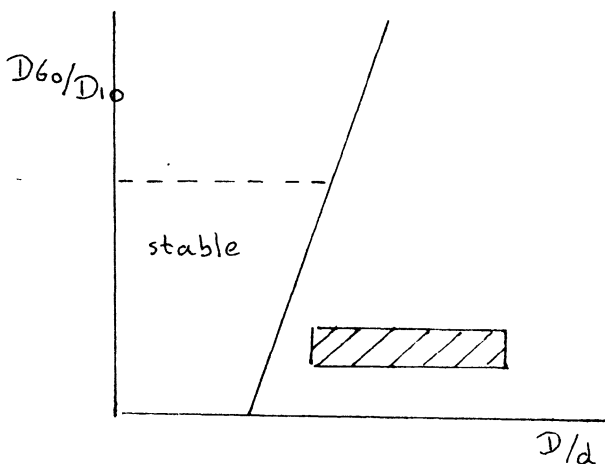


Fig. 1. range of geometric stability.

A range of geometric stability is depicted in fig. 1. Practical experience for static flows, directed tangentially to the interface is available in the shaded zone. Here the "open channel flow" correspondence seems to work well. A full account of geometric

criteria - of which the ones shown in fig. 1 are just a part - is given by Sakhivadivel and Thanikachalam (lit 1).

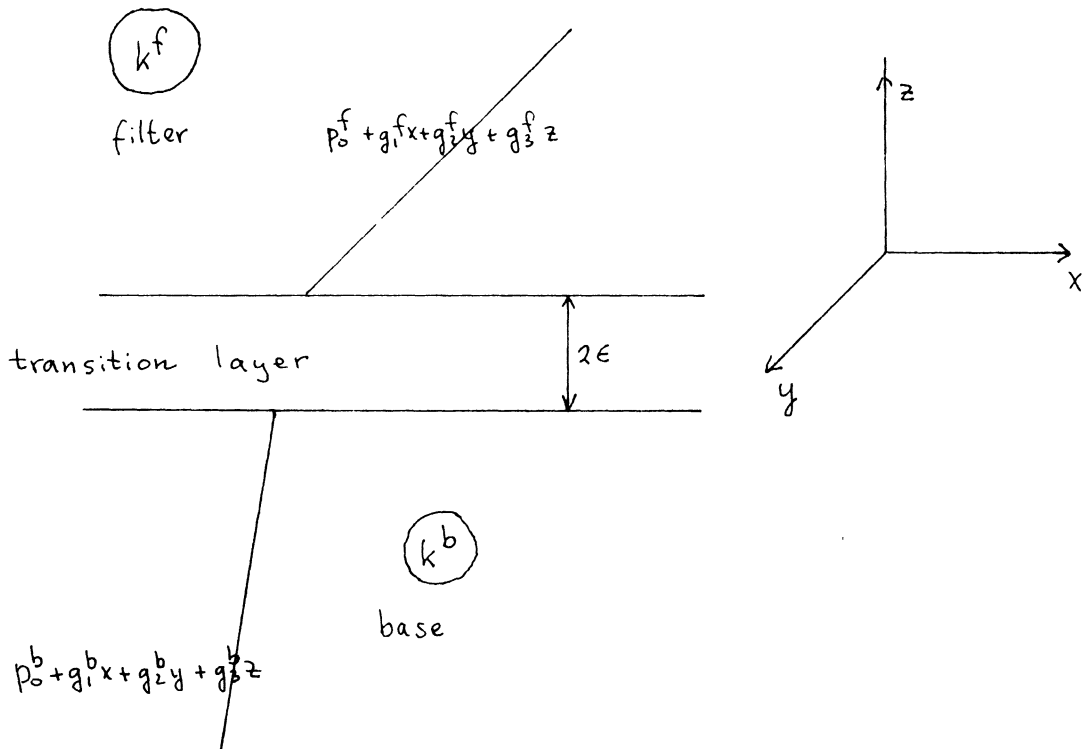


Fig. 2. Definition of the problem.

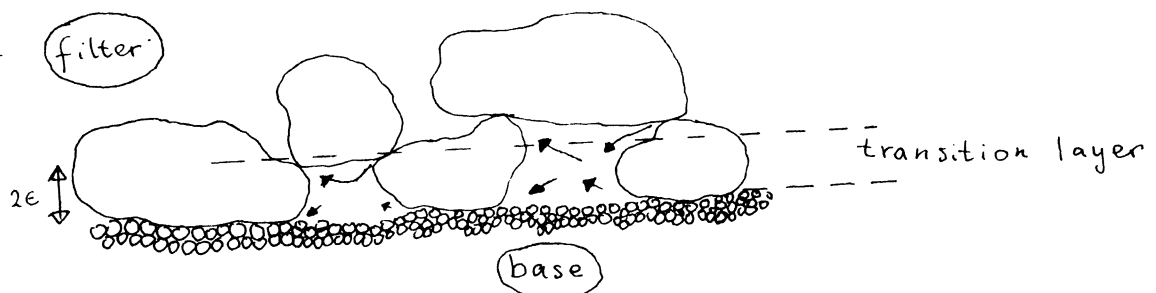


Fig. 3. Sketch of the transition layer.

In order to arrive at a hydraulic condition a more detailed knowledge of the flow field is needed than is usually provided for by conventional means. To make thinking about the problem easy, consider Darcyan flow, relating the macroscopic pressure gradient to the average discharge. The proportionality constant is called the permeability, also a macroscopic quantity. Naturally the flow at any given pore is not described by Darcy's law. There may be an enormous variety in velocities, but normally they are not interesting. It is the triumph of the continuum theory that makes it possible to talk about grand averages with total disregard for the details at a particle level. The length scale of the variations is obviously of the order of magnitude of the particle size.

The use of macroscopic theory breaks down when two entirely different particle sizes meet, such as is the case in the neighbourhood of a base/filter interface. Fig. 3 may be helpful. The fluctuations on a microscale in the filter layer are seemingly of macroscale in the base layer. This consideration gives a clue as to how to model the problem: introduce variations in permeability near the interface and compute the resulting flow field requiring "ordinary" flow far away. The area where the fluctuations are brought in will be called the transition layer.

More mathematically - and now fig 2 may be of use - the overall permeability in the base layer is called k^b and the permeability in the filter layer k^f . Well away from the transition layer (of thickness 2ϵ) the pressure fields in base and filter layers are given by:

$$p_0^b + g_1^b x + g_2^b y + g_3^b z \quad \text{and} \quad (1.1)$$

$$p_0^f + g_1^f x + g_2^f y + g_3^f z$$

The vectors g^b and g^f are the gradients well away from the transition layer ("well away" means a few grainsizes!). The constants p_0^b and p_0^f are added to accommodate the pressure continuity requirement. To see how this requirement becomes manifest a simple exercise is carried out. The pressure field is computed assuming that the permeability in the transition layer is a constant \bar{k} . This exercise is very useful since it will provide a check on more complicated problems - as a simple limiting case - later on.

Because the permeability in the transition layer is constant, the pressure field inside it is given by a gradient \bar{g} :

$$p = \bar{g}_1 x + \bar{g}_2 y + \bar{g}_3 z \quad (1.2)$$

No constant is added because the pressure is defined to within an arbitrary constant and it is convenient to choose it zero inside the transition layer.

Continuity of pressure demands:

$$\bar{g}_1 x + \bar{g}_2 y + \bar{g}_3 z = p_0^f + g_1^f x + g_2^f y + g_3^f z \quad (1.3)$$

and:

$$\bar{g}_1 x + \bar{g}_2 y - \bar{g}_3 \epsilon = p_0^b + g_1^b x + g_2^b y - g_3^b \epsilon \quad (1.4)$$

It is seen immediately that the classical continuity conditions hold regardless of the presence of the transition layer:

$$\begin{aligned} \bar{g}_1 &= g_1^f = g_1^b \\ \bar{g}_2 &= g_2^f = g_2^b \end{aligned} \quad (1.5)$$

And so:

$$\bar{g}_3 \epsilon = p_0^f + g_3^f \epsilon = -p_0^b + g_3^b \epsilon \quad (1.6)$$

Continuity of flow in the z-direction requires (assuming equal porosities everywhere):

$$\bar{k} g_3 = k^f g_3^f = k^b g_3^b \quad (1.7)$$

From (1.6) it follows that:

$$p_0^f + p_0^b = (g_3^b - g_3^f) \epsilon \quad (1.8)$$

And from (1.3) and (1.4) it is derived that:

$$p_0^f - p_0^b = 2\bar{g}_3 \epsilon - g_3^f \epsilon - g_3^b \epsilon \quad (1.9)$$

It is seen that the constants ρ_0^f and ρ_0^b are proportional to the thickness of the transition layer. It is also seen that their sum is directly expressed in the macroscopic gradients g_3^b and g_3^f . Their difference however involves knowledge of the constitutive quantity \bar{k} , for it is with the aid of \bar{k} that \bar{g}_3 is expressed in the macroscopic gradients (eq. 1.7).

Having thus defined the geometry of the problem and its basic continuity requirements, a programme is presented of the work carried out. It is very unlikely that simple Darcyan flow suffices. Therefore a turbulent permeability law is looked up in the literature. The details of the flow in between the large filter particles must be estimated. To this end variations in the (turbulent) permeability characteristics are put forward. It will be seen that in order to arrive at a solution a nonlinear differential equation must be solved. An appropriate approximation procedure is described.

The properties of the resulting flow field are discussed for the most important situation, that is, flow parallel to the interface. Having found the pressure and the velocity field there follows a short analysis of the forces on the particles of the base layer. The critical forces are expressed in a ϕ -value.

To complete the description of the problem a way is found to express the forces on the particles of the base material in the parameters which describe the flow. A comparison with experiments is presented.

2. Turbulent permeability.

In this report two definitions of pressure gradient are used. One is the engineering gradient g ; the other the physical gradient $\frac{\partial p}{\partial x}$. Their connection is:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_w g_r g \quad (2.1)$$

g is dimensionless and very convenient for the description of seepage problems. $\frac{\partial p}{\partial x}$ has dimension N/m^3 . It is normally used for the description of basic flow problems.

A relationship between the pressure gradient g and the discharge v for all flows is reported by Barends (lit 2):

$$v = \frac{k}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |g|}} g \quad (2.2)$$

Limiting cases are the laminar limit:

$$v = k g \quad (2.3)$$

and the turbulent limit:

$$v = k(\gamma |g|)^{-\frac{1}{2}} g \quad (2.4)$$

Strictly speaking k may be a tensor, but that is not followed up here.

The significance of k and γ can to a degree be read from the two limits (2.3) and (2.4). Another way is to try to derive (2.2) directly from the Navier Stokes equation. The steady state version is:

$$\rho_w u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i \quad (2.5)$$

The equation of continuity is helpful:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.6)$$

And so it follows that:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) \quad (2.7)$$

A permeability law says something about averages. (2.5) is integrated to give:

$$\frac{1}{V} \int_V \rho_w \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) d_3x = -\frac{1}{V} \int_V \frac{\partial p}{\partial x_i} d_3x + \frac{1}{V} \int_V \mu \nabla^2 u_i d_3x \quad (2.8)$$

Where V is the volume (pores plus particles).

The first term on the right hand side is recognised as the average pressure gradient. The second term on the right hand side is the Darcyan term:

$$\frac{\mu}{V} \int_V \nabla^2 u_i d_3x = \frac{c_2}{\langle d \rangle^2} \langle u_i \rangle \quad (2.9)$$

where c_2 is a constant and $\langle d \rangle$ the average grainsize. The term on the left hand side of (2.8) is the turbulent term:

$$\frac{\rho_w}{V} \int_V \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) d_3 x = \rho_w \frac{c_3}{\langle d \rangle} \langle u_i u_j \rangle \quad (2.10)$$

c_3 is another constant. The expression $\langle u_i u_j \rangle$ for large enough volumes becomes: $\langle u_i^2 \rangle \sim \langle u_i \rangle^2$. So (2.8) is rewritten:

$$\rho_w \frac{c_3}{\langle d \rangle} \langle u_i \rangle^2 = g_i + \frac{c_2}{\langle d \rangle^2} \langle u_i \rangle \quad (2.11)$$

The definition of c_2 and c_3 have been changed to incorporate the unit water weight. No anisotropy has been accounted for. This may be added as a possible refinement. Solving $\langle u_i \rangle$ from (2.11) gives:

$$\langle u_i \rangle = \frac{-\mu c_2 / \langle d \rangle^2 \pm \sqrt{(\mu c_2 / \langle d \rangle^2)^2 + 4 |g| \rho_w c_3 / \langle d \rangle}}{2 \rho_w c_3 |g| / \langle d \rangle} g_i \quad (2.12)$$

Introducing the filter velocity (discharge) $v_i = \langle u_i \rangle / n$ - n is the porosity - changes the meaning of c_2 and c_3 again. To see the correspondence with (2.2) rewrite the latter as:

$$v_i = \frac{k(\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |g|})}{-\gamma |g|} g_i \quad (2.13)$$

It is seen that (2.12) and (2.13) are the same if:

$$k = \frac{1}{\mu} \rho_w g_r \langle d \rangle^2 c_0 \quad \gamma = k^2 c_1 / (\langle d \rangle g_r) \quad (2.14)$$

The constants c_0 and c_1 may in principle still depend on the Reynolds number. Their virtue is their dimensionlessness. The hypothesis put forward here is that they depend on the porosity n only. For the laminar estimate inspiration is drawn from the Kozeny Karman equation, suggesting that:

$$c_0 = Kn \left(\frac{n}{1-n} \right)^2 \quad (2.15)$$

where K is a constant which says something about the angularity of the material. The turbulent estimate is derived from the equation of Cohen de Lara, giving:

$$c_1 = .14n^{-5} \quad (2.16)$$

The value .14 was measured (see M1881-16 lit 3). For the set of experiments discussed in lit 3 the value of K has been determined using a least squares method. The result is $K = .0035 \pm .0005$. The representative value for the average diameter was taken to be the D_{15} . This, of course, can be argued about. The result of the curve-fit is shown in fig. 4. Here the measured v and the computed v are plotted as a function of the parameter which controls the transition from laminar to turbulent flow. The way the density is incorporated is not entirely correct: it is seen that the outliers in fig. 4 are the ones with extreme porosities. For small density fluctuations though the result is very good. For large density fluctuations the

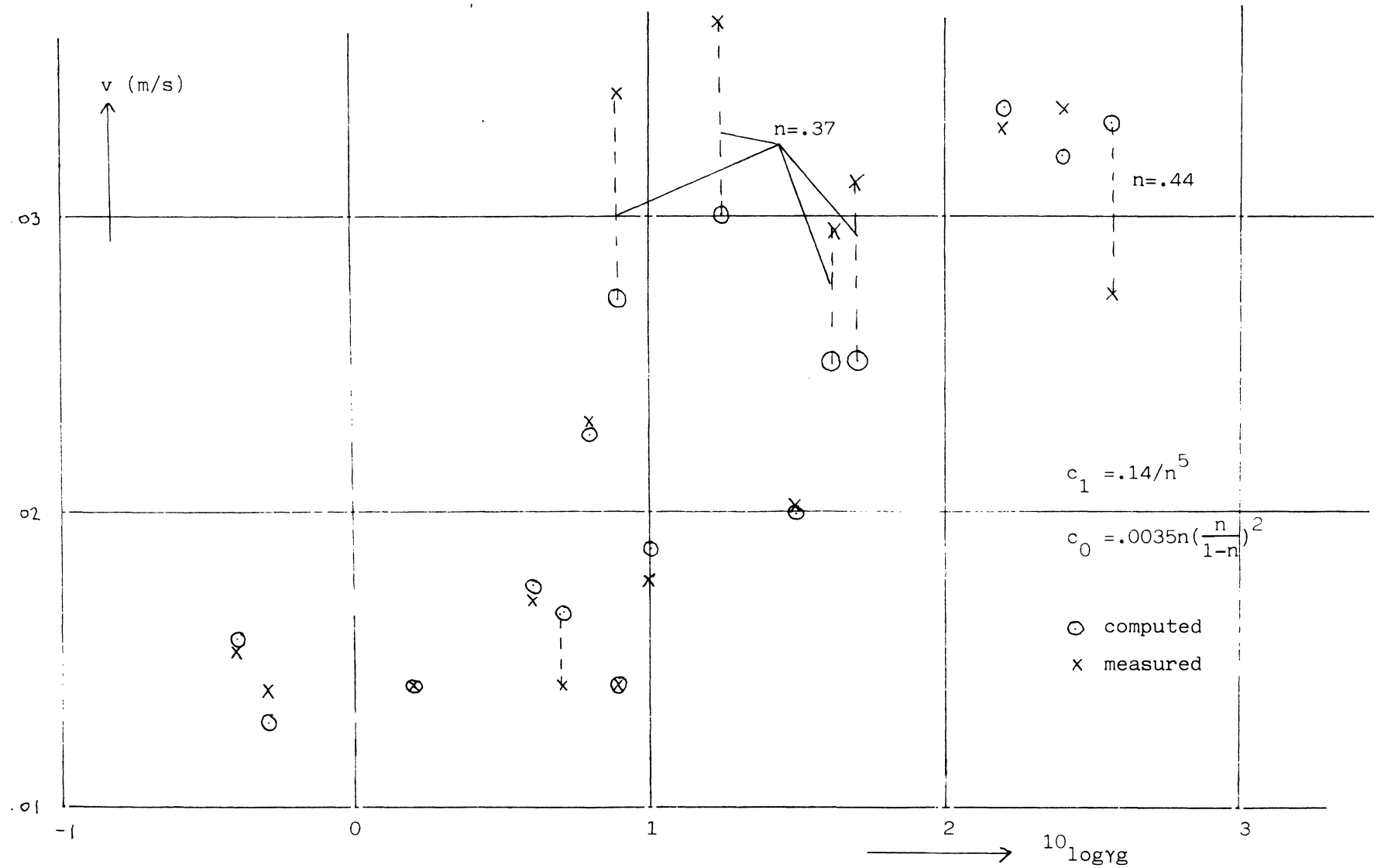


Fig. 4. Computed and measured permeability

result is correct to about 20% either way.

It would be a mistake to think that in the case of purely turbulent flow there is no internal dissipation as is suggested by the absence of μ in the permeability coefficient. Eq. (2.8), the integral form of the Navier Stokes equation, is known as the momentum theorem. When the problem is not obviously viscous there may still be a small amount of dissipation. This does not influence the flow field very much, but there is a pressure drop. For details see Batchelor (lit 4) p. 372-376.

3. Choice of the model.

The purpose of the exercise in this section is to establish a version of a micro model which enables the computation of velocities and gradients at the top of the base layer. The difficulty is that "permeability" is a macroscopic quantity, describing the average property over many grains. In the model a variation in permeability is introduced to imitate the presence of individual particles. As in most branches of physical modelling a balance has to be struck between how it really is and how it is described in the simplest possible manner.

Permeabilities far away from the transition layer are macroscopic, denoted by (k^f, γ^f) in the filter material and by (k^b, γ^b) in the base material. The following choice was made for the transition layer. The transition layer is assumed to be thin ($\sim \frac{1}{4}D$, D is the diameter

of the average filter grain). For such a thin layer it is conjectured that there is no noticeable variation in the z-direction - that is the direction perpendicular to the interface. The porosity is chosen to be constant, but the permeability varies to mimic the presence of individual particles. The variation is encased entirely in k ; γ is taken to be a constant (the value associated with the average value of k). It must be noted that the permeability assigned to the transition layer is fictitious. Only the average value - the average taken over a large number of grains - has a well defined meaning. The fictitious - varying - permeability intends to model the flow around the grains such that the choice of permeability together with the equation of continuity:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.1}$$

gives a reasonable answer, using simple mathematics.

As to the actual choice of $k(x)$ the following is noted. The $k(x)$ should contain some information about the spacing of the particles. Locally the particles are packed in a matrix with spacing D - the average filter grain size diameter. At positions where particles touch the base layer (possibly slightly embedded) the permeability is zero. The problem is mathematically simple if it is periodic, that is a square packing. A reasonable choice for the fictitious permeability is then:

$$k(x,y) = \lambda + f\left(\cos\frac{2\pi x}{D}, \cos\frac{2\pi y}{D}\right) \quad (3.2)$$

The function f must be symmetric in its arguments. A series expansion which includes terms that are periodic in the lowest order only looks like:

$$k(x,y) = \lambda + \bar{\mu}\left(\cos\frac{2\pi x}{D} + \cos\frac{2\pi y}{D}\right) + \bar{\nu}\cos\frac{2\pi x}{D}\cos\frac{2\pi y}{D} \quad (3.3)$$

Fig. 5 may be helpful at this stage. In the points $(D/2, D/2)$ etc the

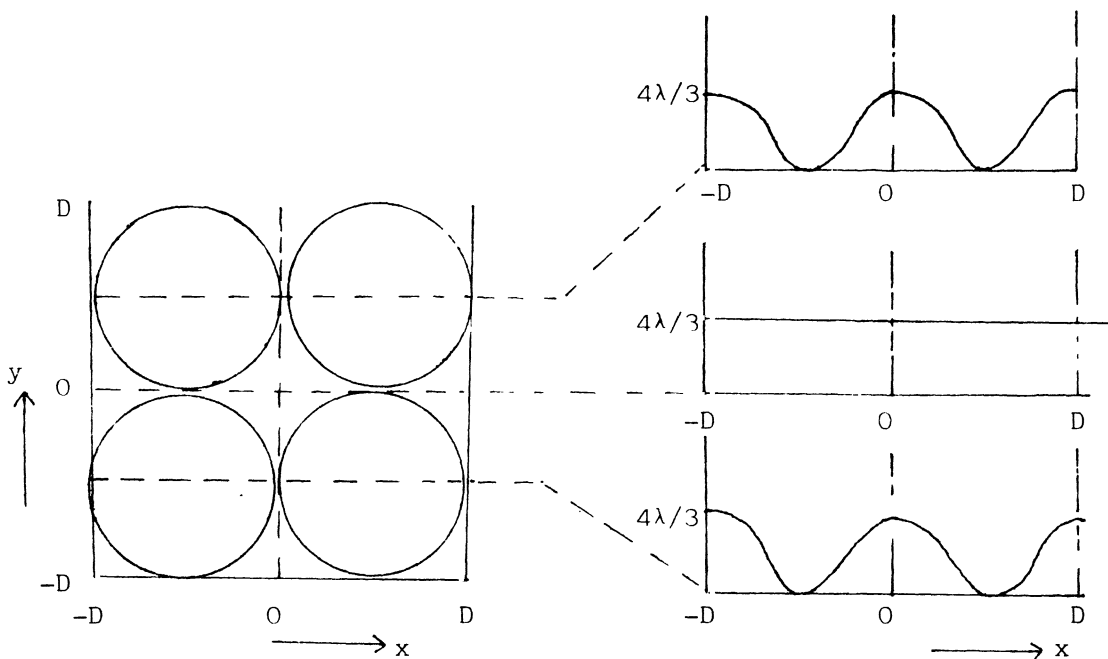


Fig. 5. Fictitious permeability in the transition layer.

permeability should vanish: particles touch the base layer. Furthermore

things are arranged such that in the points (0,0); (0,D); (D,0) etc another particle is positioned which is supported by the particles that touch the base layer. Thus the amount of free space under the lines $x = 0$; $y = 0$; $x = D$; $y = D$ etc is roughly constant. These requirements lead to the following values for $\bar{\mu}$ and $\bar{\nu}$:

$$\bar{\mu} = \lambda/3 \qquad \bar{\nu} = -\lambda/3 \qquad (3.4)$$

Fig 5 shows the particles in outline (as viewed from the top) and the fictitious permeability in the transition layer. More sophisticated choices are possible, but it is felt that this very simple model already gives a good impression of the irregularities as a result of the particulate character. The background of this optimism is de Saint Venant's theorem, which broadly speaking states that the result of fluctuations is only felt locally. With that in mind it does not matter how exactly the fluctuations are modelled as long as they have the right order of magnitude.

4. The mathematical problem and approximations.

The difficulty with the turbulent permeability is that it is gradient dependent. This leads to non-linearity. The problem is solved by expanding around the average gradient $\langle g \rangle$. Thus the permeability law:

$$v_{\sim}(x_{\sim}) = \frac{k(x_{\sim})}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |g|}} g \quad (4.1)$$

is expanded around $g = \langle g \rangle$. So on writing:

$$g_{\sim} = \langle g \rangle + \frac{\partial q}{\partial x_{\sim}} \quad (4.2)$$

it follows that:

$$v_{\sim}(x_{\sim}) \sim \frac{k(x_{\sim})}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle g \rangle|}} \left(\langle g \rangle + \frac{\partial q}{\partial x_{\sim}} \right) - \frac{1}{2} \frac{k(x_{\sim})}{\left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle g \rangle|} \right)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle g \rangle|}} \cdot \frac{\gamma}{|\langle g \rangle|} \langle g_i \rangle \frac{\partial q}{\partial x_i} \langle g \rangle + HO \quad (4.3)$$

In the base and filter layers $k(x_{\sim})$ is constant: k^b and k^f . In the transition layer $k(x_{\sim})$ depends on the position according to (3.3).

The average of $k(x_{\sim})$ is:

$$\langle k \rangle = \lambda \quad (4.4)$$

The variations $k^{\dagger}(x_{\sim})$ are:

$$k^{\dagger}(x_{\sim}) = \lambda/3 \left(\cos \frac{2\pi x}{D} + \cos \frac{2\pi y}{D} \right) - \lambda/3 \cos \frac{2\pi x}{D} \cos \frac{2\pi y}{D} \quad (4.5)$$

The factor $\frac{2\pi}{D}$ is so common that an abbreviation is introduced:

$$\omega = \frac{2\pi}{D} \quad (4.6)$$

From (4.3) it is seen that the problem becomes anisotropic. The degree of anisotropy depends on the magnitude of the components of $\langle \mathbf{g} \rangle_{\tilde{x}}$ and on how turbulent the problem is (that is the value of the quantity $\gamma |\langle \mathbf{g} \rangle|$.) In the filter and base layer where the problem does not depend on the position \tilde{x} it is convenient to abbreviate (4.3) to:

$$v_i(\tilde{x}) = \frac{k}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle \mathbf{g} \rangle|}} \langle g_i \rangle + k_{ij} \frac{\partial q}{\partial x_j} \quad (4.7)$$

with:

$$k_{ij} = \frac{k}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle \mathbf{g} \rangle|}} \delta_{ij} - \frac{1}{2} \frac{k}{\left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle \mathbf{g} \rangle|}\right)^2} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle \mathbf{g} \rangle|}} \cdot \frac{\gamma}{|\langle \mathbf{g} \rangle|} \langle g_i \rangle \langle g_j \rangle \quad (4.8)$$

The equation of continuity reduces to:

$$k_{ij} \frac{\partial^2 q}{\partial x_j \partial x_i} = 0 \quad (4.9)$$

$q(\tilde{x})$ is written as:

$$q(\tilde{x}) = \int d_2 \Omega e^{i(\Omega_x x + \Omega_y y)} \cdot A(z, \Omega) \quad (4.10)$$

Introducing (4.10) into (4.9) leaves the following equation for

$A(z, \Omega)$:

$$A \left[-\Omega_x^2 k_{11} - 2\Omega_x \Omega_y k_{12} - \Omega_y^2 k_{22} \right] + \frac{\partial A}{\partial z} \left[2i\Omega_x k_{13} + 2i\Omega_y k_{23} \right] + k_{33} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \quad (4.11)$$

here use was made of the symmetry of $k_{\tilde{\nu}}$, this follows directly from the definition (4.8).

The roots of the secular equation of (4.11) are called $\lambda_{1,2}$. λ_1 has positive real part and λ_2 has a negative real part. Because the solution for q must vanish far away from the transition layer it follows that:

$$q^f(\tilde{x}) = \int d_2 \Omega e^{i(\Omega_x x + \Omega_y y)} \cdot e^{-\lambda^f z} \cdot A^f(\Omega) \quad (4.12)$$

$$q^b(\tilde{x}) = \int d_2 \Omega e^{i(\Omega_x x + \Omega_y y)} \cdot e^{\lambda^b z} \cdot A^b(\Omega) \quad (4.13)$$

λ^f and λ^b are both positive and follow from:

$$\lambda = \frac{-2i(\Omega_x k_{13} + \Omega_y k_{23}) \pm \sqrt{\overline{D}}}{2k_{33}} \quad (4.14)$$

$$\overline{D} = -4(\Omega_x k_{13} + \Omega_y k_{23})^2 + 4k_{33}(\Omega_x^2 k_{11} + 2\Omega_x \Omega_y k_{12} + \Omega_y^2 k_{22}) \quad (4.15)$$

When the average gradient $\langle g \rangle_{\tilde{\nu}}$ has one outspokenly large component - $\langle g_1 \rangle$ say - λ becomes:

$$\lambda = \pm \sqrt{\frac{\Omega_x^2 k_{11} + \Omega_y^2 k_{22}}{k_{33}}} \quad (4.16)$$

A nice simple formula; useful for checking something later on.

In the transition zone $k(\underline{x})$ is position dependent. The equation of continuity takes the form:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}(\underline{x}) \frac{\partial q}{\partial x_j} + \frac{k(\underline{x})}{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \gamma | \langle g \rangle |}} \langle g_i \rangle \right] = 0 \quad (4.17)$$

The first term contains the double fluctuations $k_{ij}(\underline{x}) \frac{\partial q}{\partial x_j}$, which is assumed to be small compared to other terms; it is therefore ignored. This procedure is quite harmless and does not change the character of the solutions very much, even when both fluctuations are large. The trick is investigated by the author (Koenders lit 5). So (4.17) is approximately:

$$\langle k_{ij} \rangle \frac{\partial^2 q}{\partial x_j \partial x_i} + \frac{\partial k^{\dagger}(\underline{x})}{\partial x_i} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma | \langle g \rangle |}} \langle g_i \rangle = 0 \quad (4.18)$$

The homogeneous part has exactly the form of (4.9). A homogeneous solution is:

$$q^{\text{hom}}(\underline{x}) = \int d_2 \Omega e^{i(\Omega_x x + \Omega_y y)} \cdot \left[A(\Omega) e^{\lambda_1 z} + B(\Omega) e^{\lambda_2 z} \right] \quad (4.19)$$

One particular solution is:

$$q^{\text{part}}(\underline{x}) = C_1 \sin \omega x + C_2 \sin \omega y + C_3 \sin \omega x \cos \omega y + C_4 \cos \omega x \sin \omega y \quad (4.20)$$

Filling this in in (4.18) and keeping in mind (4.5) yields:

$$C_1 = -\frac{1}{3} \frac{\lambda}{\omega} \frac{1}{\langle k_{11} \rangle} \cdot \frac{\langle g_1 \rangle}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle g \rangle|}} \quad (4.21)$$

$$C_2 = -\frac{1}{3} \frac{\lambda}{\omega} \frac{1}{\langle k_{22} \rangle} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle g \rangle|}} \quad (4.22)$$

$$C_3 = -\frac{\lambda}{3\omega} \frac{-(k_{11} + k_{22}) \langle g_1 \rangle + 2k_{12} \langle g_2 \rangle}{(k_{11} + k_{22})^2 - 4k_{12}^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle g \rangle|}} \quad (4.23)$$

$$C_4 = -\frac{\lambda}{3\omega} \frac{-(k_{11} + k_{22}) \langle g_2 \rangle + 2k_{12} \langle g_1 \rangle}{(k_{11} + k_{22})^2 - 4k_{12}^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\langle g \rangle|}} \quad (4.24)$$

The total solution is found from fitting the boundary conditions at the two sides of the transition layer $z = \pm \varepsilon$, much like was shown in section 1. There are indeed four conditions for $A^f(\Omega)$, $A^b(\Omega)$, $A(\Omega)$ and $B(\Omega)$.

The very general case is not of interest in practice. The case where the flow in the base layer is laminar and the average flow is parallel (or nearly so) to the interface is worked out in detail in appendix A. If there is both a horizontal and a vertical gradient then the latter does not significantly influence the flow pattern as long as it is less than 100% and D/d , the average particle size ratio, is greater than 20.

5. Analysis of the flow pattern.

In this section the result of the analysis of a problem where the flow is parallel to the interface is presented. The pictures presented are all taken at the point $z = -\varepsilon$ (see fig 6). Special attention is given

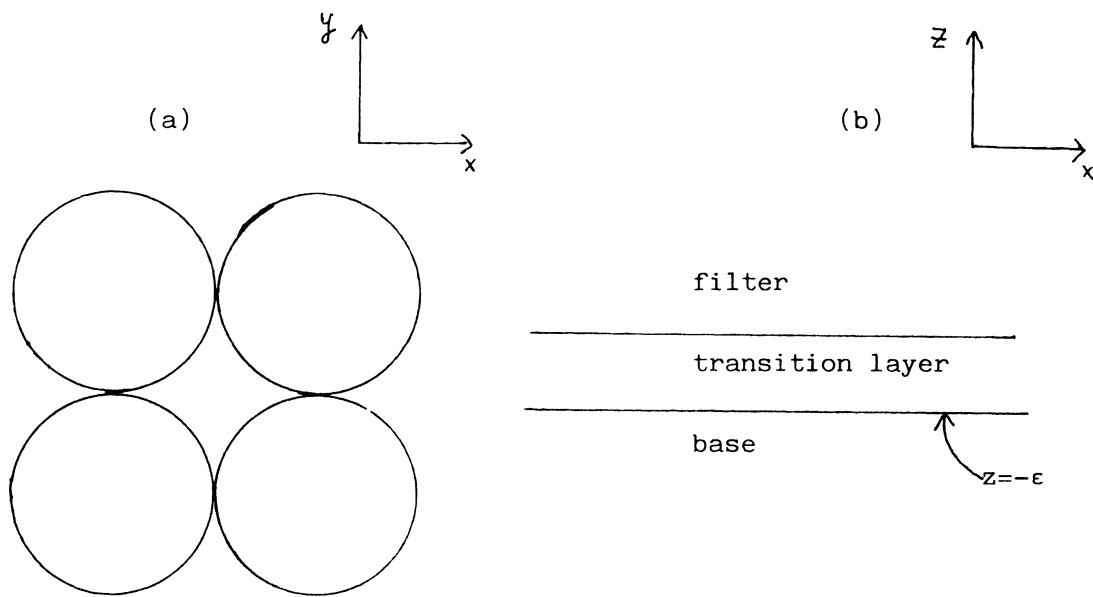


Fig. 6. Geometry. (a): view from the top; (b): view from aside

to two particular cases:

- gradient purely in the x-direction
- gradient at 45°

The following quantities are of interest:

- horizontal gradient in the x-direction
- horizontal gradient in the y-direction
- horizontal discharge in the x-direction (v_x)
- horizontal discharge in the y-direction (v_y)
- vertical gradient in the base layer

Some questions pertaining to the approximations made are dealt with in the appendix A.

The result of the test with an average gradient $\langle g_1 \rangle$ only is shown in fig. 7. The various quantities are plotted as a function of x along lines $y = \text{constant}$. The sketch at the top shows which lines.

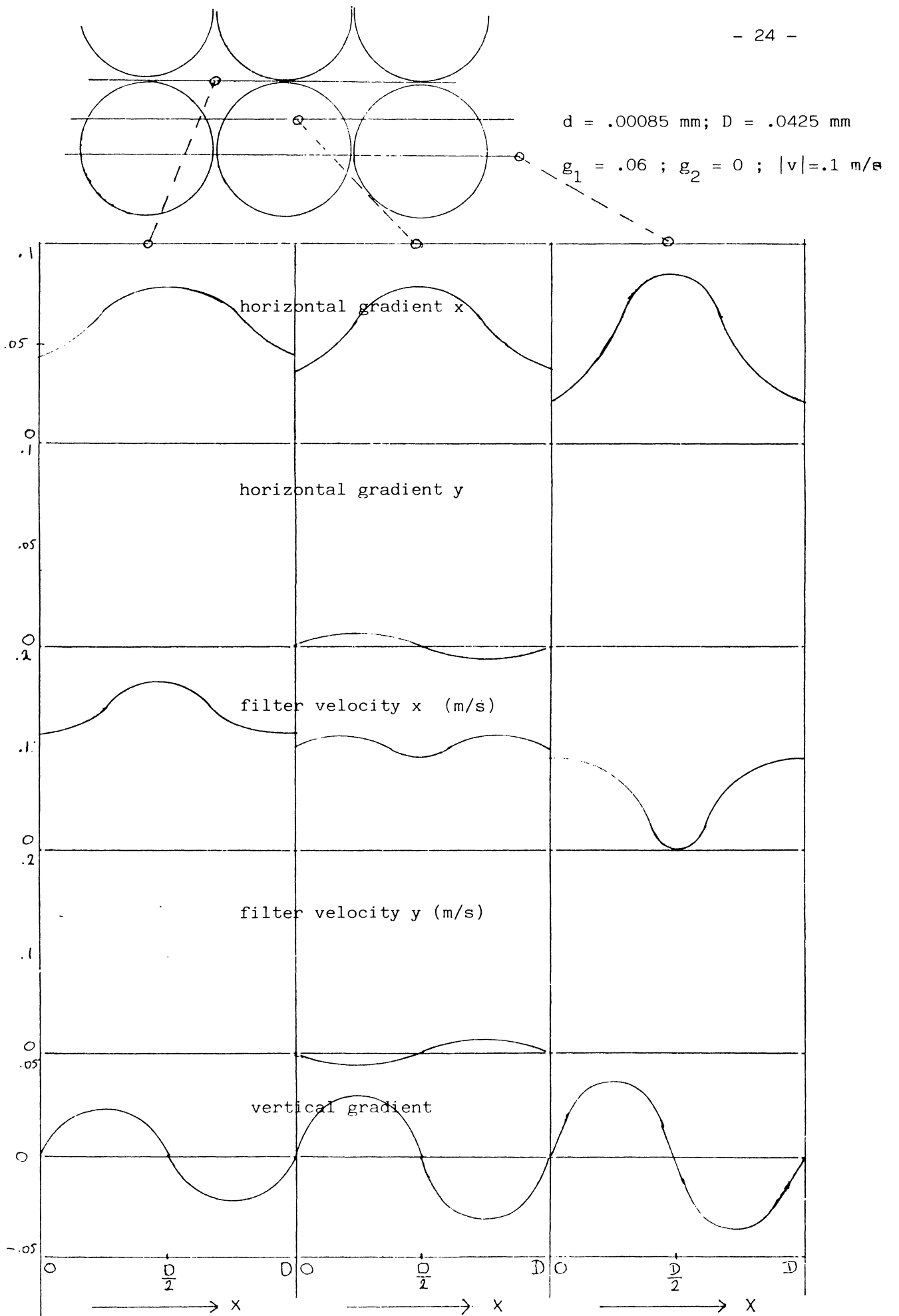
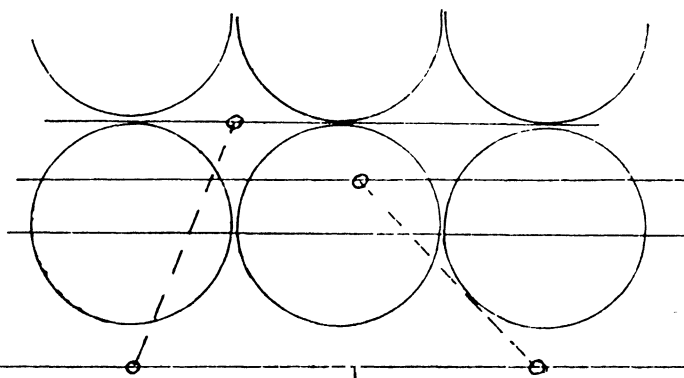


Fig. 7. Illustrations of horizontal gradient test



$d = .00085 \text{ mm}; D = .0425 \text{ mm}$

$g_1 = .042; g_2 = .042; |v| = .1 \text{ m/s}$

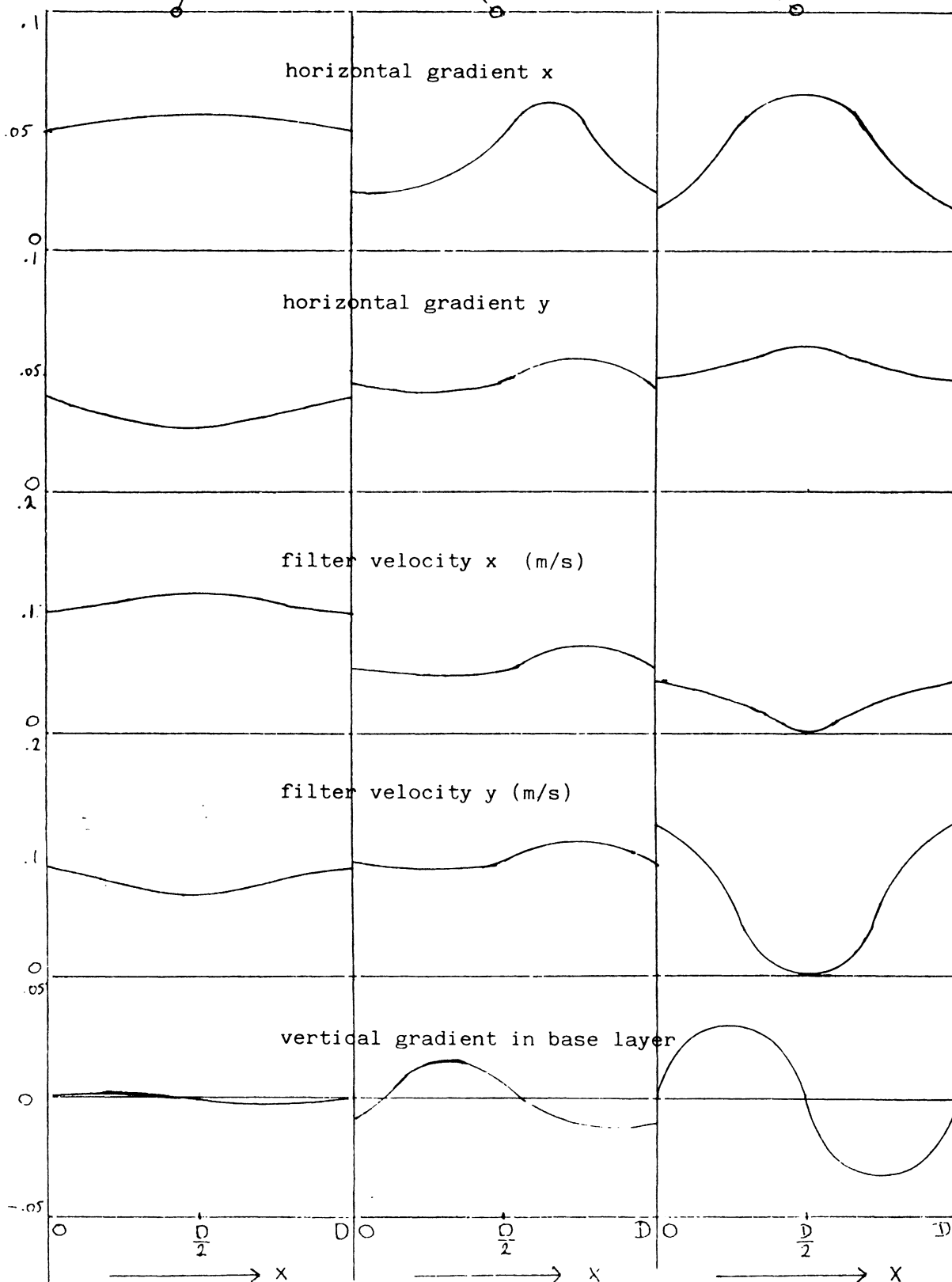


Fig. 8. Illustrations of a horizontal gradient test.

The components of the horizontal gradient - the two topmost graphs - have fluctuations largest in the path of the particle. But there are considerable fluctuations in the path where the permeability is a constant. This is the path $y=0$ in fig. 5. The order of magnitude of the variations is from 30-60% of the average gradient. Clearly because of the direction of the average flow there are small fluctuations in the y -component of the gradient (8%)

Also shown in the same figure are the components of the discharge v . Where the filter particles touch the base layer the velocity must be zero. Notice that at the position next to the particle in the path $y=0$ the x -component is nearly a factor of two larger than the average value. There is a small component of the filter velocity normal to the average flow direction to allow the flow to curve round the particle.

An interesting quantity is the vertical gradient in the base layer near the interface. It is seen that its average value is zero but the variations reach the order of 8% of the average horizontal gradient.

In the case of flow which has equal mean x - and y -components the fluctuations along the line $y=0$ are rather less pronounced than in the previous case (fig. 8). The maximum gradient and the maximum discharge are some 50% larger than the average. The fluctuations in the vertical gradient in the base layer are of the same order of magnitude as in the case of fig. 7.

Essentially similar tests done at different particle size ratios (>20) or at different gradient levels give the same results. The

reason for this is that when the particle size ratio is greater than 20 the base material is impermeable compared to the filter material. For ratios less than 20 the pressure gradient fluctuations become smaller because the base layer allows some fluid to leak away underneath the filter particles. Some other effects - such as the occurrence of granular stress and indeed plain blocking (geometric criteria) - play a part in these particle size ranges and therefore cases with $D/d > 20$ only are considered in this report.

Readers who would like to investigate the solutions for cases concerning their special interest can do so. A BASIC program is provided at the back of this report. The program is also available on disk and should run on most IBM PC computers. It contains a routine which enables the drawing of pictures. These are rather more accurate than the ones provided in figures 7 and 8, which are for illustration purposes only.

The major conclusions of this section are:

- variations in the components of the filter velocity (discharge) may occur up to 80% of the average value in the transition layer.
- variations in horizontal gradients up to 60% of the average value are possible
- no great vertical gradients are induced in the base layer

6. The force on a particle and discussion of failure modes.

In this section single particle and continuum failure modes are

discussed.

Consider a particle supported by two others (taking a two dimensional situation). Two types of forces work on the particle: reaction forces and other forces. Let the sum of non-reaction forces be given by F_1 in the x-direction and F_2 in the y-direction (fig 9 gives a sketch).

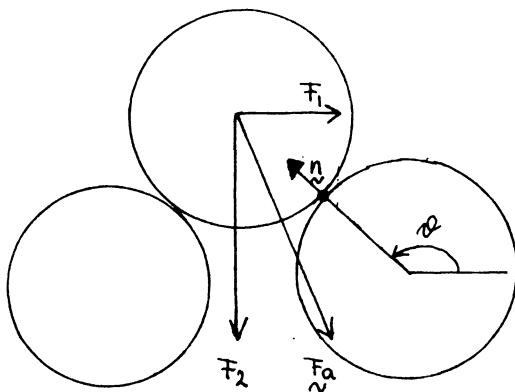


Fig. 9. A particle supported by two others.

The forces exerted on the forward supporting particle are decomposed in a direction normal and tangential to the contact direction \bar{n} .

Call the components F_{\perp} and $F_{//}$:

$$\begin{aligned} F_{\perp} &= F_{a,i} \bar{n}_i = F_1 \cos\theta - F_2 \sin\theta \\ F_{//} &= F_{a,i} \bar{t}_i = -F_1 \sin\theta - F_2 \cos\theta \end{aligned} \tag{6.1}$$

The vector \bar{n} is the unit vector normal to \bar{n} . The ratio of $F_{//}$ to F_{\perp} is the mobilised interparticle friction angle, the maximum value of which is denoted by ϕ_{μ} :

$$\left| \frac{F_{//}}{F_{\perp}} \right| = \tan\phi_{\mu} = \left| \frac{F_1 \sin\theta + F_2 \cos\theta}{F_1 \cos\theta - F_2 \sin\theta} \right| \quad (6.2)$$

The critical value of $|F_1/F_2|$ is called ϕ . From (6.2) it follows that:

$$\left| \frac{1}{\tan(\phi-\theta)} \right| = \tan\phi_{\mu} \quad (6.3)$$

A reasonable value for ϕ_{μ} follows from experiment (see Rowe lit 6) $\phi_{\mu} = 20^{\circ}$. For this and other values the connection between ϕ and θ is depicted in fig 10.

The mechanism assumed in the above derivation is sliding. An alternative possibility is rolling. To understand that the sum of moments is written down:

$$\frac{1}{2}dF_2 \cos(\pi-\theta) - F_1 (d/2 - Y + \frac{1}{2}d \sin(\pi-\theta)) = 0 \quad (6.4)$$

Y being the effective distance from the top of the particle where the force F_1 applies. F_2 is presumed to apply at the centre of the particle. The resulting critical value of the force ratio is:

$$\tan\phi = \frac{\cos(\pi-\theta)}{1 - 2Y/d + \sin(\pi-\theta)} \quad (6.5)$$

This relationship is also shown in fig 10 where $2Y/d$ is a parameter. $2Y/d = 0$ means that the force applies at the top. $2Y/d = 1$ implies that the horizontal force applies at the centre of the particle.

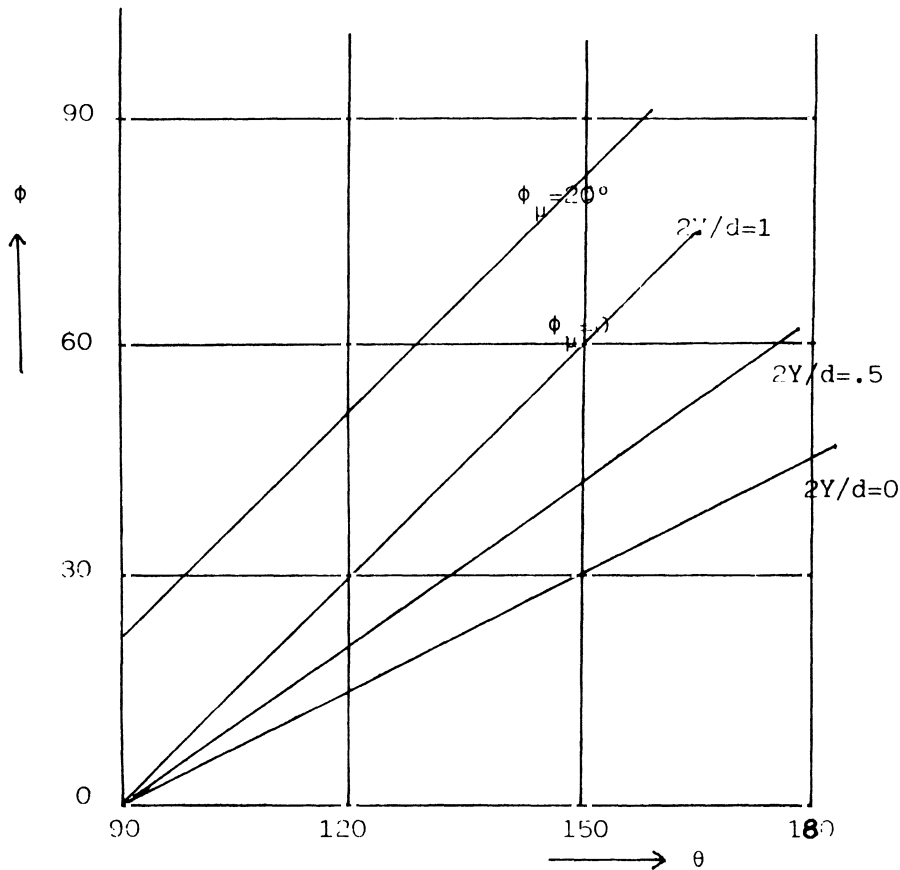


Fig. 10. Connection between friction angle ϕ and position angle θ .

In practice of course, the value of θ and the value of $2Y/d$ are related. It is observed that the rolling mechanism requires the lesser force ratio.

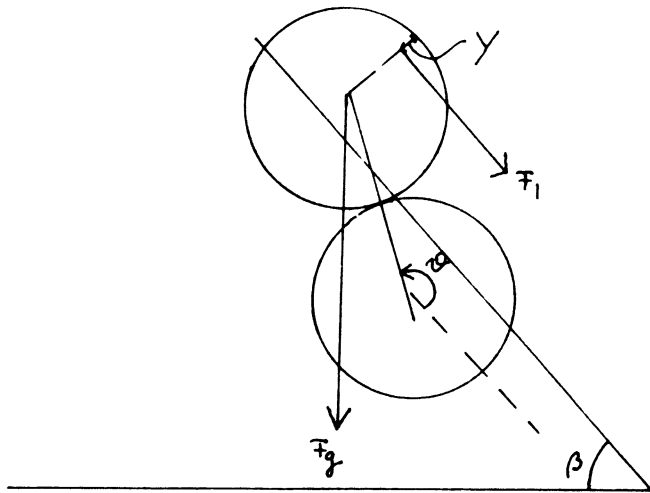


Fig. 11. Particle stability on a slope.

A further refinement can be brought in by considering particles on a slope. Fig. 11 shows the set-up. An "equivalent ϕ " is introduced defined as:

$$\tan\phi = \left| \frac{F_1}{F_g} \right| \tag{6.6}$$

The word "equivalent" is used because contrary to usual practice where a friction angle says something about the ratio of two forces at right angles, the forces compared here may make any angle for which a slope can exist.

The slope is at an angle β with the horizontal. The particle position angle θ is defined from the direction of the slope surface. Assuming a rolling mechanism equilibrium is lost when:

$$-F_1(d/2 - Y + d/2\sin(\pi - \theta)) + F_g d/2\sin(\theta - \beta - \frac{1}{2}\pi) = 0 \tag{6.7}$$

from which the condition for $\tan\phi$ follows:

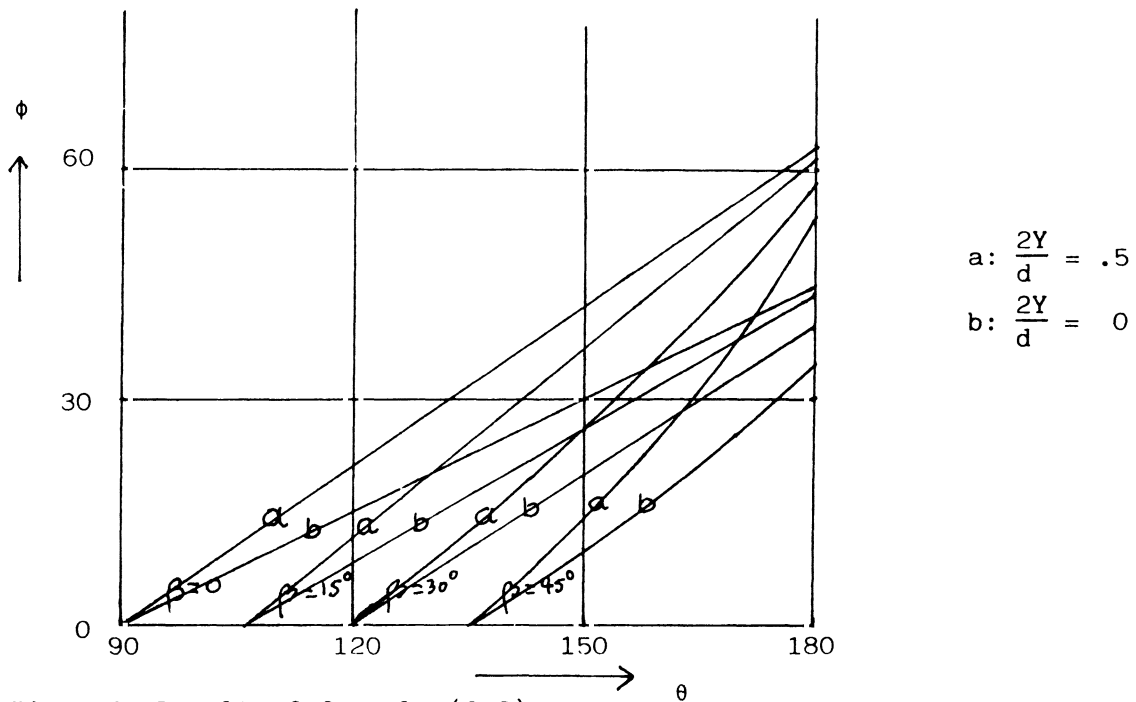


Fig. 12. Result of formula (6.8)

$$\tan\phi = \frac{\sin(\theta - \beta - \frac{1}{2}\pi)}{(1 - 2Y/d + \sin(\pi - \theta))} \tag{6.8}$$

The result is shown in fig. 12 for various slopes each for two values of $2Y/d$: $2Y/d = 0$ and $2Y/d = .5$. Not surprisingly the equivalent ϕ goes down as the slope increases and the force of gravity is able to assist F_1 .

The key question is "which ϕ will be the design value?". The answer must be "that depends on the criterion imposed". If the criterion imposed is "no grain should ever move" then that means that $\phi = 0$. A criterion where ongoing grain motion is demanded implies $\phi \sim 50^\circ$. In this case well embedded grains ($\theta = 180^\circ$; $2Y/d = 0 \dots \frac{1}{4}$) are rolled out of the packing. $\phi \sim 30^\circ$ corresponds to particles moving which stick out slightly ($\theta \sim 140^\circ$; $2Y/d \sim \frac{1}{2}$) and so would be equivalent

to "grains moving in isolated places". All the numbers in this paragraph pertain to a flat interface.

The difficulty in defining a sharp criterion is found in every branch of particle transport study. In this report a filter will be said to be unstable when $\phi \geq 50^\circ$ ($\beta=0$; equivalent values for slopes can be read from fig 12), that is, ongoing grain motion. It is believed that this criterion coincides with the experimental criterion imposed by the Delft Hydraulics Lab in report M898 IV (lit 7). Measurements at slopes may serve to link a specific meaning of a transport criterion to this theoretical ϕ -value.

Given the uneasy definition of ϕ and its connection to an experimental situation there seems to be little point in refining the theoretical investigations further to include three dimensional effects. Within 10° or so these are not expected to reveal very much different results. Similarly effects due to non-roundness of grains are not considered.

* * *

Under certain circumstances it may be advantageous for the base layer to fail in a continuum mode. This will happen when the material sees a chance to link a great number of slipping contacts into a slip plane (a small proviso has to be made here, see the end of this section). A numerical example is helpful at this stage. Consider the following - reasonable - assumptions:

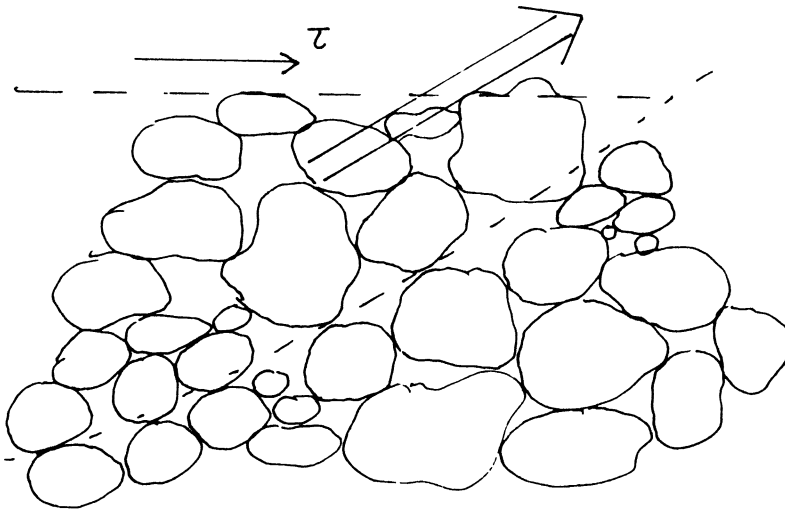


Fig. 13. Continuum mode.

$$n = .4; \Delta = \frac{\rho_b}{\rho_w} = 1.6; \phi' = 50^\circ \quad (6.9)$$

n = porosity and ϕ' is the continuum failure angle. Experienced soil mechanics may jump at the value of 50° , but it must be kept in mind that very low isotropic stress states are considered and for these 50° is very reasonable (see Artur and Dunstan lit 8). The stress state is essentially two dimensional and reads:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{33}/3 & \tau \\ \tau & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

when $\tau=0$ the soil is supposed to be under K_0 conditions with $K_0=3$.

The ϕ' -value can be computed from (6.10) at failure:

$$\phi' = \arcsin \frac{3 \sqrt{\sigma_{33}^2/9 + \tau^2}}{2\sigma_{33}} \quad (6.11)$$

with ϕ' as presumed by (6.9) (6.11) implies:

$$\tau \sim .37\sigma_{33} \quad (6.12)$$

(all the numerical calculations are "grosso modo"). And so it follows that when at any depth (6.12) is satisfied the material would jump into a failure plane - providing it could behave as a continuum. With the - utterly reasonable - assumptions made in (6.9) it is now possible to compute how (6.12) compares with the single particle mode. Let the single particle mode be defined by $\phi=45^\circ$, then:

$$\tau \sim \frac{F_1}{d^2} = \frac{F_g}{d^2} = \frac{\pi/6\rho_b g_r d^3}{d^2} \sim 8000d \quad (6.13)$$

The vertical stress at depth h is:

$$\sigma_{33} = (1-n)\Delta\rho_w g_r h \sim 9500h \quad (6.14)$$

And so the depth for which the stress has the right value to make the continuum mode happen is:

$$h \sim 3d \quad (6.15)$$

An element with a thickness of three particles is not really a continuum and the slip plane will probably not happen before the single particle mode.

Enter the vertical hydraulic gradient g_3^b . The vertical (skeleton) stress at depth h is now given as:

$$\sigma_{33} = \{(1-n)\Delta - g_3^b\} \rho_w g_r h \quad (6.16)$$

Again compare the single particle mode with the continuum mode. Now:

$$h \sim \frac{.8d}{(1-n)\Delta - g_3^b} \quad (6.17)$$

Suppose the material finds a continuum mode when $h=10d$, this would be equivalent to $g_3^b=.73$; for $h=20d$ the gradient is $g_3^b=.84$. It is believed that an element of thickness $20d$ behaves already more or less as a continuum. Call the value at which the material starts behaving as a continuum h_0 , the associated value for τ is denoted by τ_0 and the corresponding vertical gradient $g_{3,0}^b$. Plot the failure value of g_3^b as a function of τ . The fact that there is a vertical gradient does not influence the apparent weight of a grain at the top

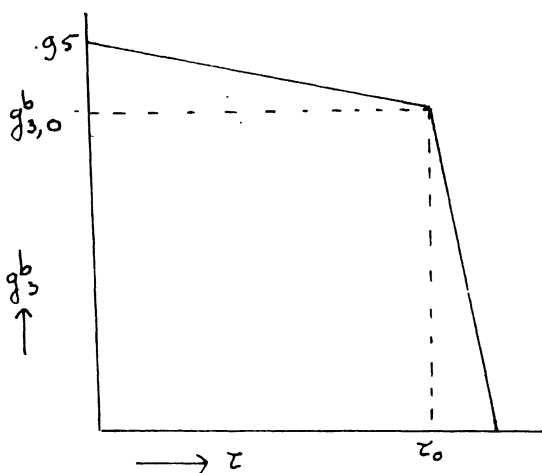


Fig. 14. τ - g_3^b diagram for failure

of the base layer, at least not very much (a calculation is made in the next section). The vertical gradient drops to nearly zero at this point. Therefore the τ - g_3^b diagram will look virtually like a $\tau = \text{constant}$ graph until the

moment at which the material is able to create a slip plane. From then on it behaves like a continuum with thickness h_0 .

The fact that the grains have to find a collective slip plane implies that there is an element of chance involved. Analysis of the direction the slip plane takes reinforces the idea of a continuum mode (as opposed to a single particle mode of failure). Fig 15 shows a qualitative picture inspired on the numbers mentioned above.

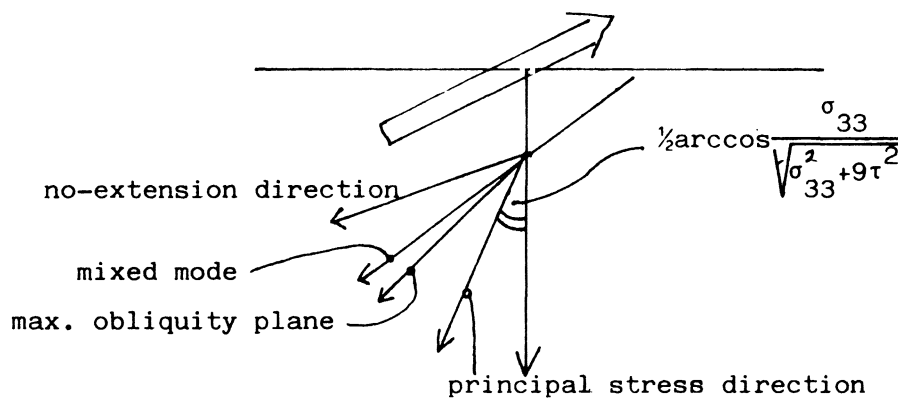


Fig. 15. Various failure modes.

The three possible modes (maximum stress obliquity, mixed mode and no-extension direction) are sketched. It is seen that as the major principal stress direction turns around a possible failure mode has a smaller angle to the direction of the top of the boundary, while the whole chunk of potentially moving material becomes larger. The assumption made while drawing fig 15 is that the material behaves coaxially, that is, while τ increases the increment of strain and the associated increment of stress are aligned. In practice deviations

occur depending on the inherent anisotropy of the medium. it is estimated that this may influence the no-extension direction $\pm 10^\circ$ and the mixed mode some 5° . In addition something about the b-value must be known. In the example used $b \sim 4$.

A fourth failure mode is the diffuse mode which is experimentally found under triaxial conditions only: $b=0$. This is not relevant here. (Thus the small proviso mentioned at the bottom of p. 33 has been dealt with). The maximum obliquity mode is more likely to happen under shock-loading. (see Koenders lit 9 ch 4). Potentially this is the most damaging one since (see fig. 15) it involves the largest chunk of material. An absolute particle size effect is found experimentally (see again Arthur and Dunstan lit.8). It works in favour of the maximum obliquity mode for small particles. This however does not mean that things get safer for smaller particles, because it has been found that nonhomogeneous stress states with open boundaries ususally fail in the no-extension direction.

* * *

Summarising the contents of this section, the following is found:

- there are two possible erosion mechanisms. One works on single particles, the other can only work on the base layer as a continuum
- the single particle mechanism becomes critical at $\phi \sim 40^\circ - 50^\circ$ in the absence or at low vertical hydraulic gradient
- the continuum mode becomes important when there is a substantial

vertical hydraulic gradient in the base material. It is investigated using an ordinary effective stress analysis.

7. The force exerted by the flow.

The last element in the analysis of a hydraulic criterion is the computation of the force on the particles of the top of the base layer. Obviously an approximation has to be made as to the geometry of the problem. A fairly regular geometry is assumed. Fig 16 shows the set-up. The flow field in the space left by the filter particles is characterised by the velocity U . It was seen in section 5 that U varies considerably on the scale of the size of the average filter particle. On the scale of a particle in the base layer however U is virtually constant. This consideration - which makes use of the assumption that D/d is large - leads to the idealisation of periodic flow. When the flow field is looked at a distance d further the same field is observed.

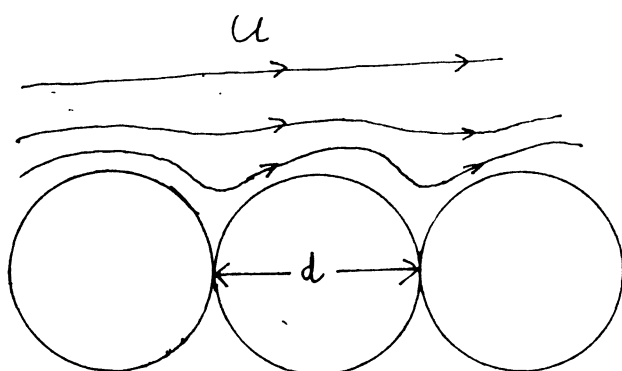


Fig. 16. Geometry

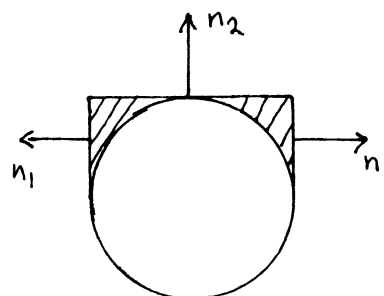


Fig. 17. Control volume.

Consider an element of fluid in a small control volume around a particle as demonstrated in fig.17. The force on a particle can be related to the fluid stress tensor $\underline{\sigma}$. The symbol $\underline{\sigma}$ was used before to denote the stress in the soil, so that strictly speaking another symbol ought to be introduced. $\underline{\sigma}$ is so common though that it has been decided to use it again. The force on the particle is just the integral of $\underline{\sigma}$ over its surface. Use is made of the momentum theorem: the time independent integral form of the Navier Stokes equation.

$$-\int_{\text{particle area}} \rho u_i u_j n_j dA + \int_{\text{particle area}} \sigma_{ij} n_j dA = 0 \quad (7.1)$$

On the surface of the particle no-slip conditions are assumed. The force on the particle is then:

$$F_i = - \int_{\text{particle area}} \sigma_{ij} n_j dA \quad (7.2)$$

So now (7.1) becomes:

$$F_i = - \int_{\text{rectangle}} \rho u_i u_j n_j dA + \int_{\text{rectangle}} \sigma_{ij} n_j dA \quad (7.3)$$

By the integral over the rectangle is meant everything but the particle area. In what follows the integral over the rectangle will itself be subdivided into an integral over the sides and one over the top.

First the term $\int \rho_w u_i u_j n_j dA$ will be evaluated. The two contributions of the sides cancel (assuming periodic flow), because the n_1 's have opposite signs on both sides. The only non-vanishing term including n_2 is:

$$\int_{\text{top}} \rho_w u_i u_2 dA \tag{7.4}$$

When $i=1$ - again using the argument of periodic flow - a very small contribution follows: the integral is entirely over periodic functions. For $i=2$ the result is just the root mean square value of the vertical velocity multiplied by a factor.

Now the term with g is investigated:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{7.5}$$

Most terms vanish due to periodicity and the total force on the particles is estimated to be:

$$\begin{aligned} F_1 &= - \int_{\text{sides}} p n_1 dA + \mu \int_{\text{top}} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} n_2 dA \\ F_2 &= - \int_{\text{top}} \rho_w u_2^2 n_2 dA - \int_{\text{top}} p n_2 dA \end{aligned} \tag{7.6}$$

Near the particles the flow will virtually stand still. Just above them it will have a considerable speed. There is little doubt

that the term $\int_{\text{top}} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} n_2 dA$ will be very important for semi-laminar problems. For very turbulent problems the terms with p start playing an important part. The major question is how much the flow notices the presence of the particles. To get a bit of a feel for it length scales are compared. A length of the flow itself is ν/U , the particle size is d and so a first order comparison is Ud/ν , which is just a Reynolds number. There is a difficulty here that the speed is ill-defined, because it changes so much in a short distance. Another way of creating a length scale is by taking $U/(\frac{\partial u}{\partial x})$. This one has the disadvantage that U is still in it but at least there is the recognition that there is a gradient. The gradient though is not easily found, unless something is known about the flow, which was the whole point of the exercise to begin with.

If the presence of the particles is not noticed very much by the flow there will be little diffusion in the direction parallel to the boundary, which means mathematically that:

$$\left| \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right| \ll \left| \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right| \quad \text{and} \quad \left| \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} \right| \ll \left| \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} \right| \quad (7.10)$$

It is clear right away that this is equivalent to the assumption that the dominant term for the computation of the force is $\frac{\partial u_1}{\partial x_2}$. The relations (7.10) are also just the conditions for the boundary layer approximation. This is great, because since its invention by Prandtl in 1905 a lot of people have done work on it, which can now be copied. Look in Batchelor p. 319-320. Take the boundary layer

equation (time independent)

$$u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} = - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \nu \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} \quad (7.11)$$

Integrate over the thickness of the boundary layer after subtracting the major pressure gradient term:

$$\nu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right)_{x_2=0} = \frac{\partial U}{\partial x_1} U \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u_1}{U} \right) dx_2 + \frac{\partial}{\partial x_1} (U^2 \theta) \quad (7.12)$$

Here θ is the momentum thickness:

$$\theta = U^{-2} \int_0^{\infty} u_1 (U - u_1) dx_2 \quad (7.13)$$

The velocity outside the boundary layer U varies with distance as the diameter of the filter particles D . The thickness $\int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u_1}{U} \right) dx_2$ and θ vary therefore in the same manner. On the scale of the base material - characterised by d - they may be regarded as constants. Following Batchelor p.320 a velocity profile for u_1 is assumed as:

$$u_1(x_2) = U \sin \alpha x_2 \quad (7.14)$$

Using this in (7.12) and (7.13) gives:

$$\nu \alpha U \sim \frac{1}{2} \frac{\partial U^2}{\partial x_1} \alpha^{-1} \quad (7.15)$$

For $\frac{\partial U^2}{\partial x_1}$ the approximation $\frac{2U^2}{D}$ is used and so:

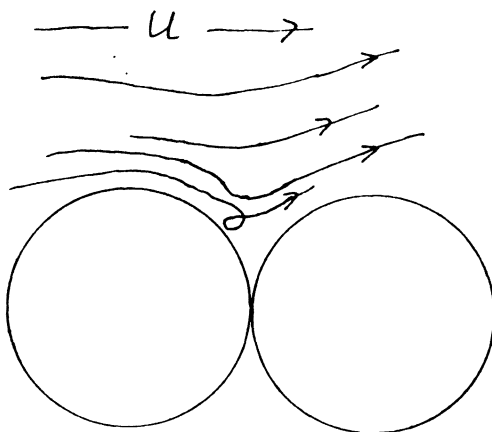
$$\alpha = \sqrt{\frac{U}{\nu D}} \tag{7.16}$$

And the major contribution to the force on the particles is:

$$F_1 = \mu \alpha U d^2 = \mu U^{3/2} \sqrt{\frac{1}{\nu D}} d^2 \tag{7.17}$$

As will be shown in the next section this formula agrees very well with experimental findings for first motion of small particles.

Returning now to the question what happens when the flow notices the presence of the base particles and is influenced by them to a substantial degree. How exactly does this become manifest?. Here the work done on diverging and converging channels by Jeffery and Hamel is of great help (see Batchelor p294-302). They have shown that in a converging channel the flow lines are neatly parallel. In other words, convergent flow is always possible no matter what



the Reynolds number is. Divergent flow is not always possible. There is a critical Reynolds number at which backflow becomes necessary.

Looking at fig. 18 where a sketch is made of these phenomena, it is seen that the implications

Fig. 18. Converging and diverging flow around a particle

are that in front of the particle the velocity has a well defined value, while at the back there is a point where the velocity is effectively zero. Thus - following Bernoulli's theorem - there is a pressure difference proportional to:

$$\Delta p \propto U^2 \tag{7.18}$$

The force exerted will therefore be:

$$\begin{aligned} F_1 &= ad^2U^2 \\ F_2 &= bd^2U^2 \end{aligned} \tag{7.19}$$

a and b represent all the fractions involved and are constants for Reynolds numbers R:

$$R_c < R < 10^5 \tag{7.20}$$

where R_c is the critical Reynolds number at which the backflow phenomenon is well established.

Clearly there is an intermediate range where a and b depend on the Reynolds number in some way. To find out how exactly presents great theoretical difficulties. The two limiting cases however, can be cast in a criterion for the hydraulic condition. The gravitational force is:

$$F_g = \pi/6 \rho_b g_r d^3 \quad (7.21)$$

So the friction angle for low Reynolds numbers is:

$$\tan\phi = \frac{\mu U^{3/2} \nu^{-1/2} D^{-1/2}}{\pi/6 \rho_b g_r d} \quad (7.22)$$

This is the limit d small and U "not too large". In the case of extremely big particles the term with b is not noticed and the friction angle becomes:

$$\tan\phi = \frac{aU^2}{\pi/6 \rho_b g_r d} \quad (7.23)$$

In this case the Reynolds number at the point of first motion is:

$$\frac{Ud}{\nu} = R = (\pi/6 \rho_b g_r a^{-1} \tan\phi)^{1/2} \cdot d^{3/2} / \nu \quad (7.24)$$

This version of the Reynolds number will be used to distinguish between the two extreme cases. The critical number is roughly at $R = 100$.

An extra vertical force must be introduced when a vertical hydraulic gradient g_3^b is turned on in addition to the horizontal gradient. The vertical gradient collapses across the top particle, so that an averagely packed grain there feels only half its effect:

$$F_{\text{extra}} = \frac{1}{2} \pi/4 d^3 g_3^b \rho_w g_r \quad (7.25)$$

The gist of this section is then that it is impossible to compute the force on a particle with simple means in general conditions, but two limits can be considered. These limits are the boundary layer limit and the turbulent flow limit. All this for horizontal flow. If a vertical gradient is added an extra force has to be taken into account.

8. Comparison with experiments.

In this section the following experiments with $D/d > 20$ are compared to theoretical predictions:

- horizontal flow over big particles (gradient parallel to interface)
- horizontal flow over small particles (gradient parallel to interface)
- combined horizontal and vertical flow over small particles
- cyclic flow (gradient parallel to interface)

No experiments are as yet available for situations with a slope.

The experimental results are drawn from M1881-16 (lit 3), M898IV (lit 7) and S469 (lit 10).

As was seen in the previous section the force on particles and therefore the whole physical process is controlled by the water velocity U . It was also seen that U varies considerably. In the case of small particles - where the boundary layer approach holds - U itself is not of interest but rather $\frac{\partial U^2}{\partial x}$. In the case of large particles the whole problem is defined to within a constant - a - which has to be determined anyway. So there it does not really matter that much

which value of U is taken. The important point is that a U is defined in a standard way in such a manner that it has relevance to the problem. This value must be the water velocity in the transition layer: \bar{v}/\bar{n} . The value of \bar{v} can be estimated from the permeability in the transition layer:

$$\bar{v} = \bar{k}g \quad (8.1)$$

This will in general not lead to the same quantity in the filter layer, because the packing in the transition layer is less dense than the packing in the filter layer. It is not possible to create a very dense packing on a flat surface: the spaces are not filled up from the bottom. Care must be taken with filter materials which are not internally stable. Here small particles will drop down through the matrix of large particles and fill up the pores of the transition layer. Initially this leads to a low U and a seemingly stable filter. It is a matter of waiting though before these fines are washed out. The waiting period may well be longer than the period of time over which the experiment is done. Understanding of this sort of explicitly time dependent effects is outside the scope of this report. It may be worth pursuing though.

Horizontal flow over big particles.

From (7.24) it follows that the critical Reynolds number - that is the Reynolds number at which the effects of backflow become dominant - depends on the base material size only. In section 6 it was shown

that the choice of ϕ involves an element of arbitrariness. To obtain major changes in the base layer a $\phi \sim 50^\circ$ is chosen. It is assumed that this coincides with the experimental criterion of the people at the Delft Hydraulics Lab. When there is always turbulent flow one has:

$$g \sim \frac{U^2}{D} \quad (8.2)$$

So from (7.23) the criterion in terms of the engineering gradient is:

$$g \sim \frac{D}{d} \quad (8.3)$$

No matter what the particle size of the base material is. Looking at the results gathered in M1881-16 (lit 3) it is seen that for a wide range of base materials (and allowing for some variation in the porosities) the relation (8.3) is well observed. The data have been copied in this report in fig. 19. Assuming that the porosity in the transition layer is .67 (worked out from a packing of spheres) the factor by which the filter porosity has to be multiplied is 1.68. Thus the estimate of U becomes:

$$U = \frac{\bar{v}}{\bar{n}} = \frac{\bar{n}^{-5/2} \cdot f}{(n^f)^{5/2} \cdot \bar{n}} \cdot v_{\text{pore,filter}} \quad (8.4)$$

All in all a sizeable factor of 2.37 in the pore velocity, if the ordinary n is .4. a can be determined:

$$a = 100 \pm 15 \text{ kg/m}^3 \quad (8.5)$$

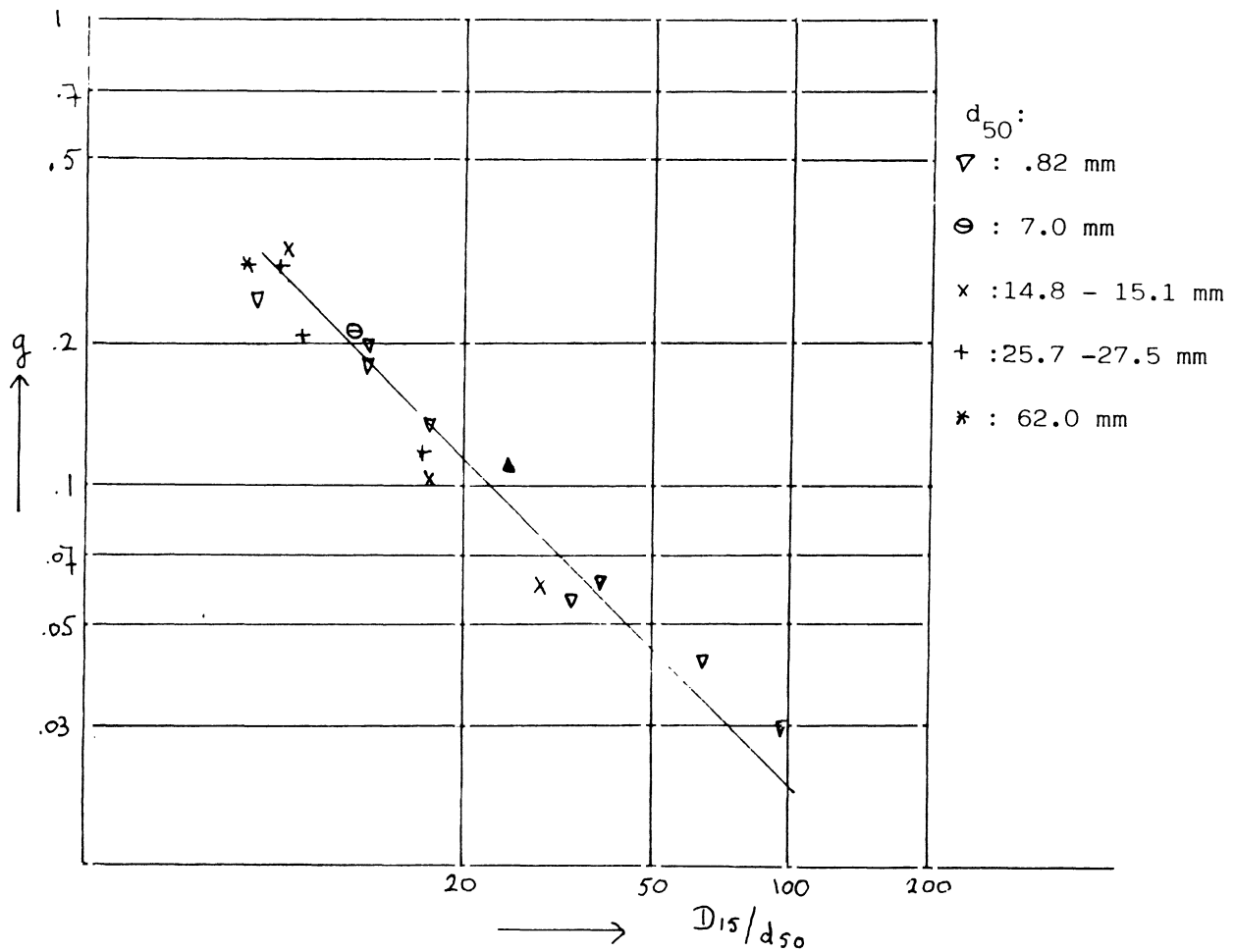


Fig. 19. Collection of experimental results for large particle sizes.

The Reynolds numbers vary from 200 to 38000. A sizeable range. It seems that the "open channel flow" correspondence works well in this area.

Horizontal flow over small particles.

The experimental data for small particles are much more chaotic than those for large particles. In part this is due to the fact that the permeability law changes from turbulent to laminar. Results plotted as a function of the gradient may therefore seem ambiguous.

Another reason might be that usually the d_{50} and not d is used. Apart from all this there is a genuine difference between the tests described in reports M905 (lit 11) and M898IV (lit 7). It seems best now to take the tests of M898IV. The Reynolds number for $d=.16$ mm is about 30. It is noticed that no experimental factors are needed (form (7.22)). The trend $U^{3/2}D^{-1/2}$ is found back in the experimental results of tests M898IV within 15% accuracy (see fig 38 in M898IV or figure 20 here). The accuracy is quoted in U . Clearly at $d=.16$ mm the laminar limit has not been reached for the full one hundred percent. In order to derive the lines drawn in fig 20 U has been multiplied by 1.6 to allow for the variation as computed in section 5. The value of the average diameter of base material d was obtained from d_{50} by dividing by 1.3. To get an impression of how sensitive it is for the particle size lines for $d_{50}=.05$ mm and for $d_{50}=.1$ mm have been computed. The sensitivity for the choice of ϕ is shown by computing the latter particle size at $\phi=35^\circ$.

The experimentalists have recorded the first motion in two ways: the lines shown in fig 20 pertain to the way that is associated with ongoing particle motion. The other way is to try to see when particles move - any particles. The discrepancies between the two ways of determining the point of first motion are in the order of 20% in U (or a related velocity). In the graph this is demonstrated and the order of magnitude seems to correspond to what might be expected due to variations in ϕ and variations in particle size.

Also shown in fig 20 is the turbulent limit. It is a pity that there

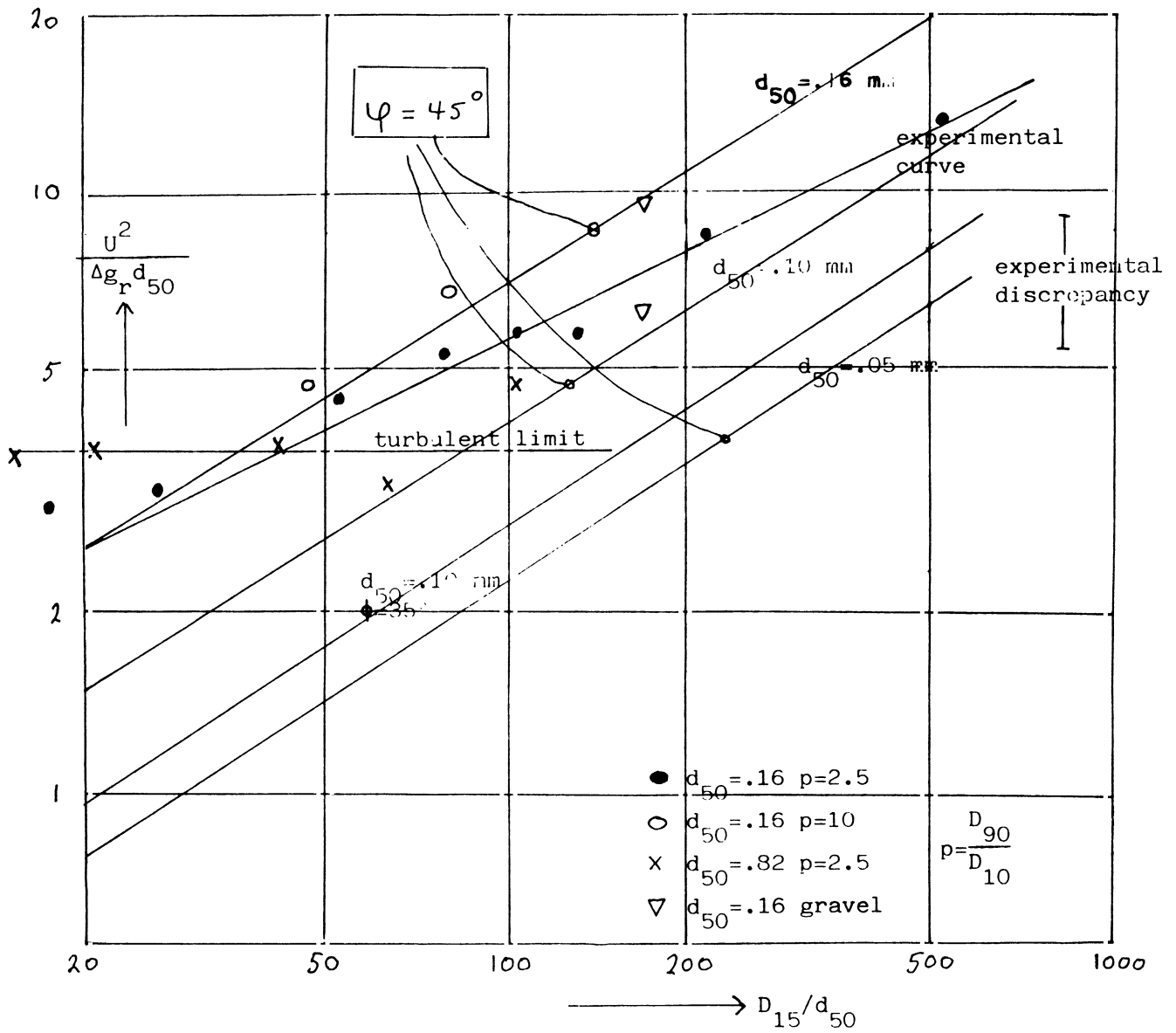


Fig. 20. Comparison theory to experiment.

are no reliable experiments reported for a wide range of smaller particle sizes. Such experiments might give a clue to the effects of intermediate Reynolds number. Taking the bold step to combine the theory for first particle motion with the permeability law of section 2 gives a theoretical prediction for the critical gradients. It

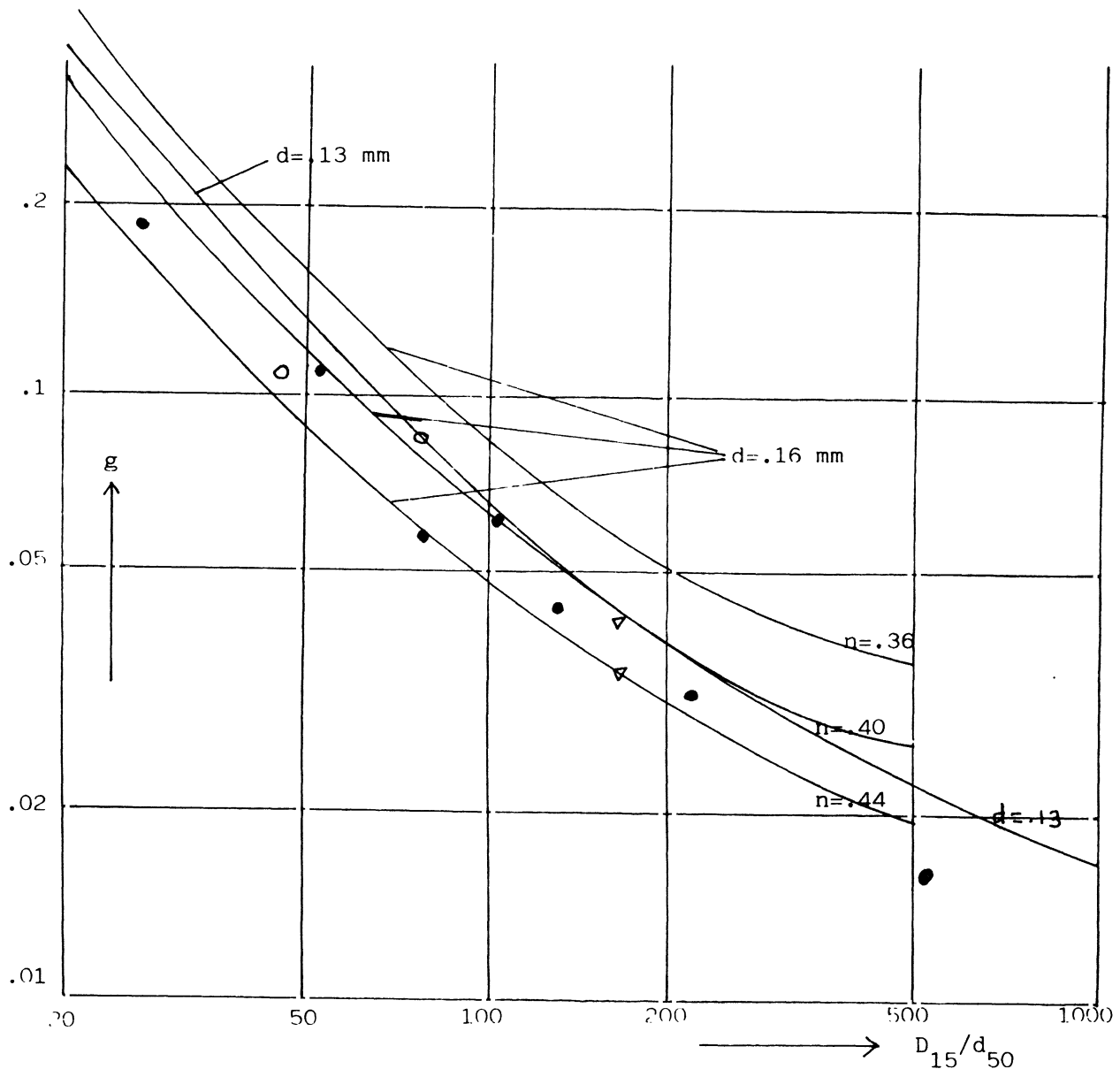


Fig. 21. Predictions for the critical gradient.

also gives some insight into the sensitivity of various parameters such as n and the average size of the base material d . Everything is plotted in fig. 21. The correspondence is good everywhere except in the tail where - rather unfortunately - the inadequacies of the permeability law at high n combine with the deviations of the boundary layer theory. It is also noted that in the deviant point at $D_{15}/d_{50} = 500$

a different filter material is used which a different angularity compared to all the other materials used. Measurement of the permeability law is vital in filter design. Looking further to fig 21 in particular the particle size effect. For high gradient the smaller size takes a higher critical gradient, for low gradient the smaller size takes a lower critical gradient. This can be understood directly from the limits of the permeability law (2.3) and (2.4) in connection with the criterion (7.22). In the high gradient limit the critical gradient varies as:

$$g \sim \left(\frac{D}{d}\right)^{-5/3} \cdot d^{-1} \quad (8.6)$$

In the low gradient limit:

$$g \sim \left(\frac{D}{d}\right)^{-1/3} \cdot d^{2/3} \quad (8.7)$$

Combined horizontal and vertical gradient.

The effects discussed in section 6 p 33-38 which predict that there is a turnover point at which the material finds a continuum mode more attractive are more or less confirmed by experiment: report S469 fig 5 (lit 10). the experiments were done on small bsae material at $D/d = 30$ and at $D/d \sim 15$. The latter shows some effects which this report does not deal with, but the former confirms quite well the turnover effect at $g_3^b \sim .75$. Also the weight reduction due to a vertical gradient as described by (7.25) is observed. A plot of the tests is made in

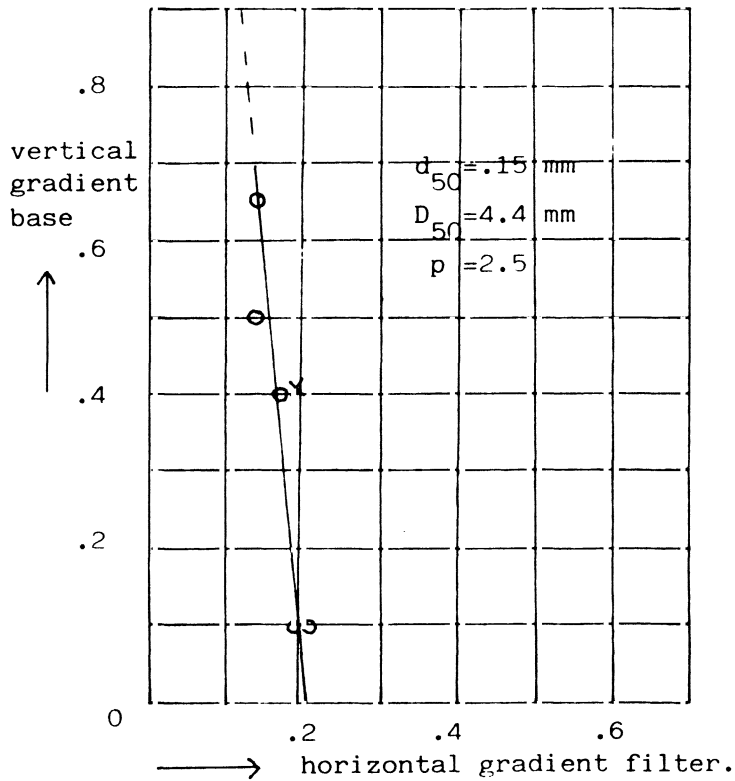


Fig.22. Combined flow.

Cyclic flow.

Suppose a cyclic gradient is imposed with period T . The criteria derived may change in two ways. One is that the force exerted by the flow on the particles changes significantly. The other is that the permeability law is different for cyclic gradients. To avoid influence on the force on the particles T must not be too short:

$$TU \gg d \tag{8.8}$$

For $d = .16 \text{ mm}$ first motion is observed at $U = .1 \text{ m/s}$ so the range of interest is:

fig. 22. the exact turn-over point was not reached in the series of tests, but there is little doubt that it exists around the indicated point.

$$T \gg 50\mu s \quad (8.9)$$

(8.9) must be regarded as an order of magnitude. In practice only shock waves are excluded. The only thing different in cyclic loading as opposed to static loading is the permeability law. So:

$$\hat{v} = \frac{k}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |g|}} \hat{g} \quad (8.10)$$

must be replaced by something else. No literature was found on the subject but the following conjecture seems reasonable. Replace $|g|$ by its root mean squared value $|\bar{g}|$ and k by its cyclic equivalent, then:

$$\hat{v} = \frac{\hat{k}(T)}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma |\bar{g}|}} \hat{g} \quad (8.11)$$

where now \hat{v} and \hat{g} are amplitudes (Fourier transforms to be more precise) and $\hat{k}(T)$ is:

$$\hat{k}(T) = \frac{k(\infty)}{1 + i\bar{R}^2/(2\pi\nu T)} \quad (8.12)$$

$k(\infty)$ is the stationary value of \hat{k} and \bar{R} is some hydraulic radius - a fraction of the average particle size. Cyclic effects become important when:

$$\frac{\bar{R}^2}{2\pi\nu T_c} > 1 \quad (8.13)$$

or:

$$T_c < \frac{\bar{R}^2}{2\pi v} \quad (8.14)$$

For a sand with $\langle d \rangle = .1\text{mm}$ $T_c \sim 10\text{ms}$, but for a gravel with $\langle D \rangle = 4\text{mm}$ $T_c \sim 2.5 \text{ s}$. Comparing the critical gradients for the static case with the cyclic case (that is $\hat{v}(T)/\hat{v}(\infty)=1$):

$$\left| \frac{\hat{g}(T)}{\hat{g}(\infty)} \right| = \left| \frac{\hat{k}(\infty)}{\hat{k}(T)} \right|^2 = 1 + \frac{\bar{R}^4}{2\pi v^2 T^2} \quad (8.15)$$

Here the turbulent limit was taken. In the laminar limit one gets:

$$\left| \frac{\hat{g}(T)}{\hat{g}(\infty)} \right| = \left| \frac{\hat{k}(\infty)}{\hat{k}(T)} \right| = \sqrt{1 + \frac{\bar{R}^4}{2\pi v^2 T^2}} \quad (8.16)$$

Experiments reported in S469 lit 10 (fig 7 there) confirm at least qualitatively the assumptions made. As T decreases the critical gradient increases. The characteristic time is about 8 sec. This is of the order of magnitude given by (8.14). The tests shown with the arrow pointing in the direction of increasing T were done after a long time when material was allowed to wash into the filter (fig 23). This would have reduced both the filter velocity (explaining the magnitude of the critical gradient) and the characteristic period T_c (explaining the independence of T).

* * *

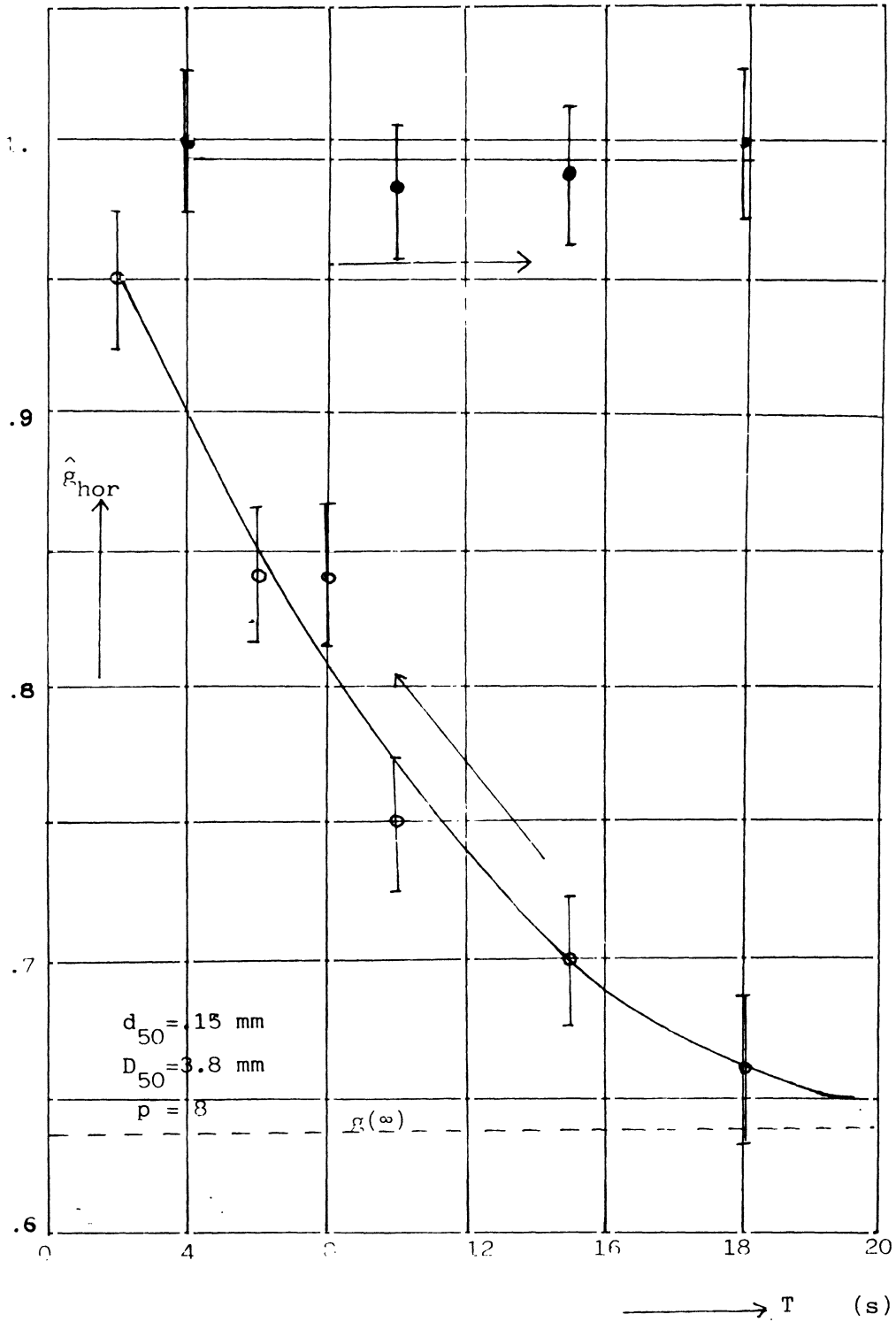


Fig. 23. Critical gradient for cyclic horizontal flow.

Summarising it may be said that most available experiments with $D/d > 20$ can be understood. A hydraulic criterion expressed in the local velocity seems to work reasonably well. The difficulties in

expressing the hydraulic conditions in a critical gradient are reduced to the establishment of a correct permeability law.

9. Summary.

Two possible modes of failure have been encountered:

- a. The continuum mode. Only important for the case of high gradients perpendicular to the filter interface. (see p 33-38)
- b. The particle mode. Important especially for small perpendicular gradient.

In order to arrive at a hydraulic criterion a ϕ -value must be ascertained. This ϕ -value depends on the slope of the interface. It also depends on a subjective criterion, that is how much damage can one allow. For major changes in the base layer $\phi \sim 45^\circ$. For the motion of some prominent particles which are not very well embedded: $\phi \sim 35^\circ$ (horizontal values, values for slopes are read from fig.12.

The conversion of a set ϕ to a hydraulic condition cannot be generally done but two limiting cases are found:

- a. Minor influence of the particles of the base layer on the local flow. in this case the critical value depends on the size of the base particles as well as on the size of the filter particles (see fig. 20)
- b. Major influence of the particles of the base layer on the flow near the boundary. Here the critical velocity depends on the size of the particles of the base layer only. (see also fig. 20)

The critical filter velocity is converted to a critical gradient using a permeability law. The permeability law for static flow is derived inspired by the Navier Stokes equation and wants two constants which must be measured. For cyclic flow a form has been put forward but no experimental confirmation is available.

List of literature.

1. R. Sakhivadivel and V. Thanikachlam. Grain size criteria for protective filters - an enquiry. Soils and Foundations Vol 14 no 4. Dec 1974.
2. F. Barends. Advanced methods in Groundwater flow computation. LGM mededelingen part XIX 1978
3. Open waterloop analogie. M1881-16 November 1984 Delft Hydraulics Lab
4. G.K. Batchelor. An introduction to Fluid Mechanics. CUP
5. M.A. Koenders. Nonhomogeneous modelling of granular material. IUTAM conference on Deformation and Failure in Gran. Mat. Balkema Rotterdam 1982
6. P.W. Rowe. The stress dilatancy Relation etc. Proc Roy Soc. London series A, Vol 269, 1962 pp500-527
7. Stroming evenwijdig scheidingsvlak. M898-IV. September 1984. Delft Hydraulics Lab.
8. J.R.F. Arthur and T.Dunstan. Rupture layers in granular media. Conf. IUTAM Deformation and Failure of Gran. Mat. Balkema. Rotterdam 1982
9. M.A. Koenders. A two dimensional non-homogeneous deformation model for sand. Thesis Univ. of London 1984
10. Stand van zaken etc. S469. July 1980. Delft Hydraulics Lab.
11. Filteropbouw Havendammen III Kritieke Verhagen. M905. January 1969. Delft Hydraulics Lab.

Appendix.

Working out the formulas to solve the A's and B's

Continuity of pressure:

$$p_0^f + g_1^f x + g_2^f y + g_3^f \epsilon = g_1^f x + g_2^f y + g_3^f \epsilon \quad (A1)$$

$$p_0^b + g_1^b x + g_2^b y - g_3^b \epsilon = g_1^b x + g_2^b y - g_3^b \epsilon$$

$$\int d_2 \Omega e^{i(\Omega_x x + \Omega_y y)} e^{-\lambda^f \epsilon} A^f(\Omega) = \int d_2 \Omega e^{i(\Omega_x x + \Omega_y y)} \cdot \left\{ A(\Omega) e^{\lambda_1 \epsilon} + B(\Omega) e^{\lambda_2 \epsilon} \right\} +$$

$$C_1 \sin \omega x + C_2 \sin \omega y \quad (A2)$$

Continuity of velocity (assuming the n's are in the same region):

$$\frac{k^f}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma^f} |<g^f>|} <g_3^f> + \int d_2 \Omega e^{i(\Omega_x x + \Omega_y y)} A^f(\Omega) e^{-\lambda^f \epsilon}.$$

$$\therefore (ik_{31}^f x + ik_{32}^f y - \lambda^f k_{33}^f) = \frac{<k>}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma} |<g>|} <g_3> + \frac{k^\dagger(x,y)}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \gamma} |<g>|} <g_3>$$

$$+ \int d_2 \Omega e^{i(\Omega_x x + \Omega_y y)} \cdot \left\{ (ik_{31}(x,y) \Omega_x + ik_{32}(x,y) \Omega_y) (Ae^{\lambda_1 \epsilon} + Be^{\lambda_2 \epsilon}) + \right.$$

$$\left. + k_{33}(x,y) (\lambda_1 Ae^{\lambda_1 \epsilon} + \lambda_2 Be^{\lambda_2 \epsilon}) \right\} + k_{31}(x,y) \omega C_1 \cos \omega x + k_{32}(x,y) \omega C_2 \cos \omega y \quad (A3)$$

formulas (A2) and (A3) are repeated for the lower boundary: all super-
scripts f are replaced by b and all ϵ are replaced by $-\epsilon$.

The two equations (A1) are old friends: equations (1.3) and (1.4).

Similarly the constant parts of (A3) and its lower boundary equivalent
are recognised as (1.7). the interesting equations are the fluctuating
ones. The following abbreviations are helpful:

$$R^f = i(k_{31}^f \Omega_x + k_{32}^f \Omega_y) - k_{33}^f \lambda^f$$

$$R^b = i(k_{31}^b \Omega_x + k_{32}^b \Omega_y) + k_{33}^b \lambda^b$$

(A4)

$$R_1 = i(\langle k_{31} \rangle \Omega_x + \langle k_{32} \rangle \Omega_y) + \langle k_{33} \rangle \lambda_1$$

$$R_2 = i(\langle k_{31} \rangle \Omega_x + \langle k_{32} \rangle \Omega_y) + \langle k_{33} \rangle \lambda_2$$

The spectral composition of $C_1 \sin \omega x + C_2 \sin \omega y$ is denoted by $C(\Omega)$. The
spectral composition of the terms with $\cos \omega x$ and $\cos \omega y$ is denoted by
 $S(\Omega)$. The relevant equations now become:

$$e^{-\lambda^f \epsilon} A^f(\Omega) = A(\Omega) e^{\lambda_1 \epsilon} + B(\Omega) e^{\lambda_2 \epsilon} + C(\Omega)$$

$$e^{-\lambda^b \epsilon} A^b(\Omega) = A(\Omega) e^{-\lambda_1 \epsilon} + B(\Omega) e^{-\lambda_2 \epsilon} + C(\Omega)$$

(A5)

$$R^f(\Omega) A^f(\Omega) e^{-\lambda^f \epsilon} = R_1(\Omega) A(\Omega) e^{\lambda_1 \epsilon} + R_2(\Omega) B(\Omega) e^{\lambda_2 \epsilon} + S(\Omega)$$

$$R^b(\Omega) A^b(\Omega) e^{-\lambda^b \epsilon} = R_1(\Omega) A(\Omega) e^{-\lambda_1 \epsilon} + R_2(\Omega) B(\Omega) e^{-\lambda_2 \epsilon} + S(\Omega)$$

$A^f(\underline{\Omega})$ and $A^b(\underline{\Omega})$ are eliminated. This leaves two equations with right hand sides:

$$\begin{aligned} H^f &= -C(\underline{\Omega}) + \frac{S(\underline{\Omega})}{R^f(\underline{\Omega})} \\ H^b &= -C(\underline{\Omega}) + \frac{S(\underline{\Omega})}{R^b(\underline{\Omega})} \end{aligned} \quad (A6)$$

Define the determinant of the system as:

$$\det = e^{(\lambda_1 - \lambda_2)\epsilon} \left(1 - \frac{R_1}{R^f}\right) \left(1 - \frac{R_2}{R^b}\right) - e^{(\lambda_2 - \lambda_1)\epsilon} \left(1 - \frac{R_2}{R^f}\right) \left(1 - \frac{R_1}{R^b}\right) \quad (A7)$$

Then :

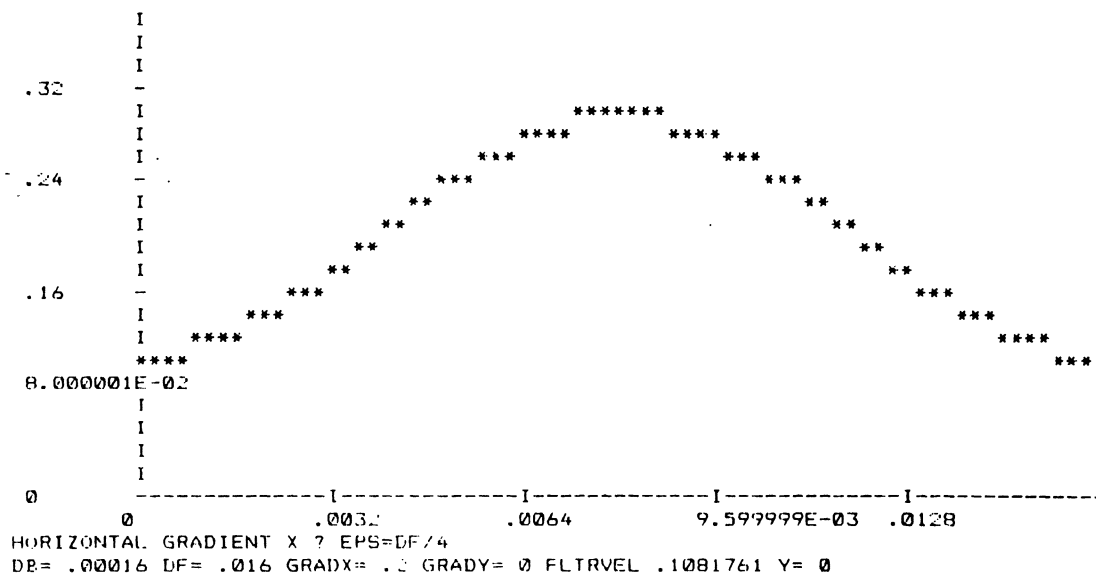
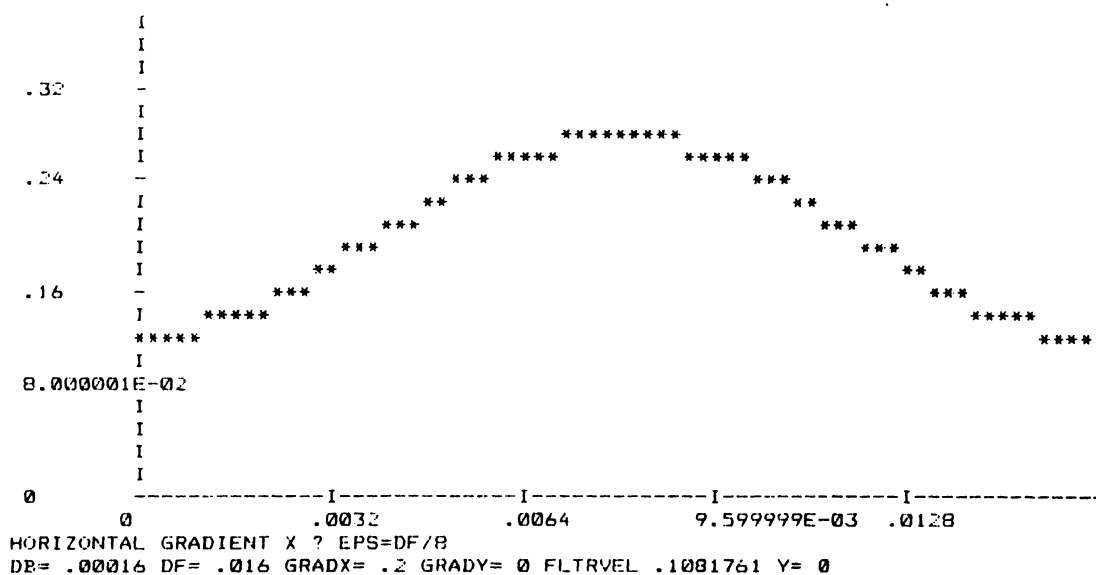
$$\begin{aligned} A(\underline{\Omega}) &= \frac{1}{\det} \left\{ e^{-\lambda_2\epsilon} \left(1 - \frac{R_2}{R^b}\right) H^f - e^{\lambda_2\epsilon} \left(1 - \frac{R_2}{R^f}\right) H^b \right\} \\ B(\underline{\Omega}) &= \frac{1}{\det} \left\{ -e^{-\lambda_1\epsilon} \left(1 - \frac{R_1}{R^b}\right) H^f + e^{\lambda_1\epsilon} \left(1 - \frac{R_1}{R^f}\right) H^b \right\} \end{aligned} \quad (A8)$$

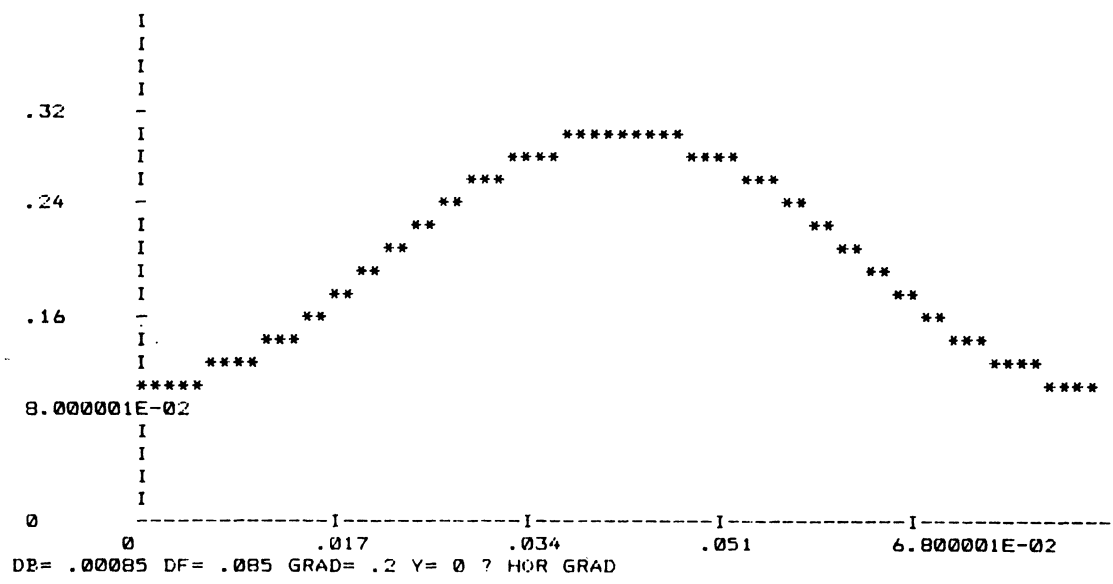
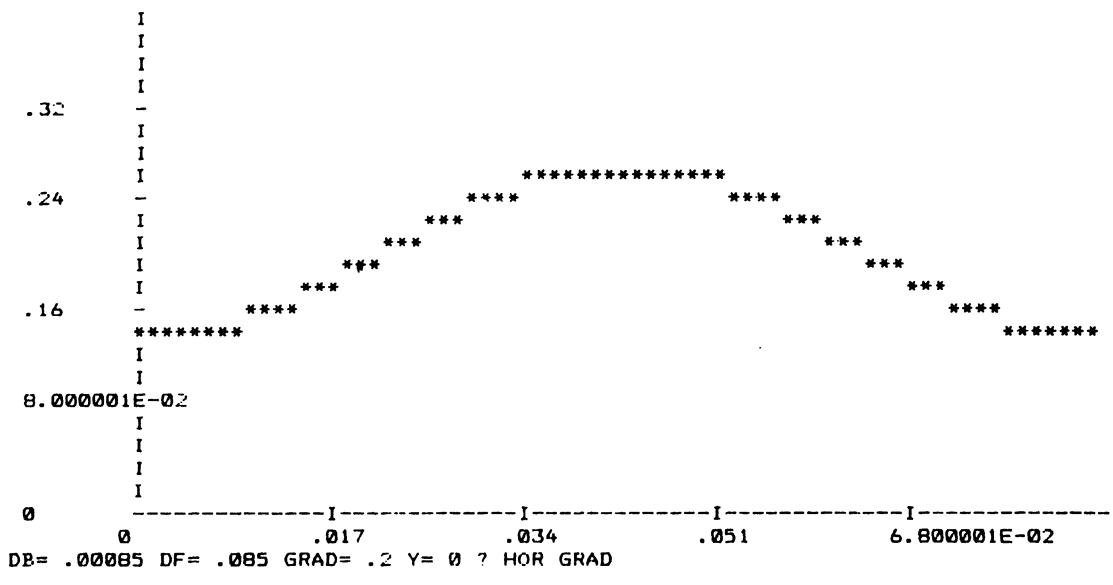
In first instance - while the constant part of $k(\underline{x})$ is being considered - there are contributions in $\underline{\Omega} = (0, \pm\omega)$ and $\underline{\Omega} = (\pm\omega, 0)$ only. These contributions combine with the fluctuating part of k to give terms in $\underline{\Omega} = (\pm\omega, \pm\omega)$ and so on.

Taking for the $k(x,y)$ the formula (3.3) then the term $\mu(\cos\omega x + \cos\omega y)$ leaves a source term of the form $\mu^2(\sin\omega x \cos\omega y + \cos\omega x \sin\omega y + H0)$ which will be called the coupling term. This coupling term combines with $C_3 \sin\omega x \cos\omega y + C_4 \cos\omega x \sin\omega y$ to give a higher order approximation. The

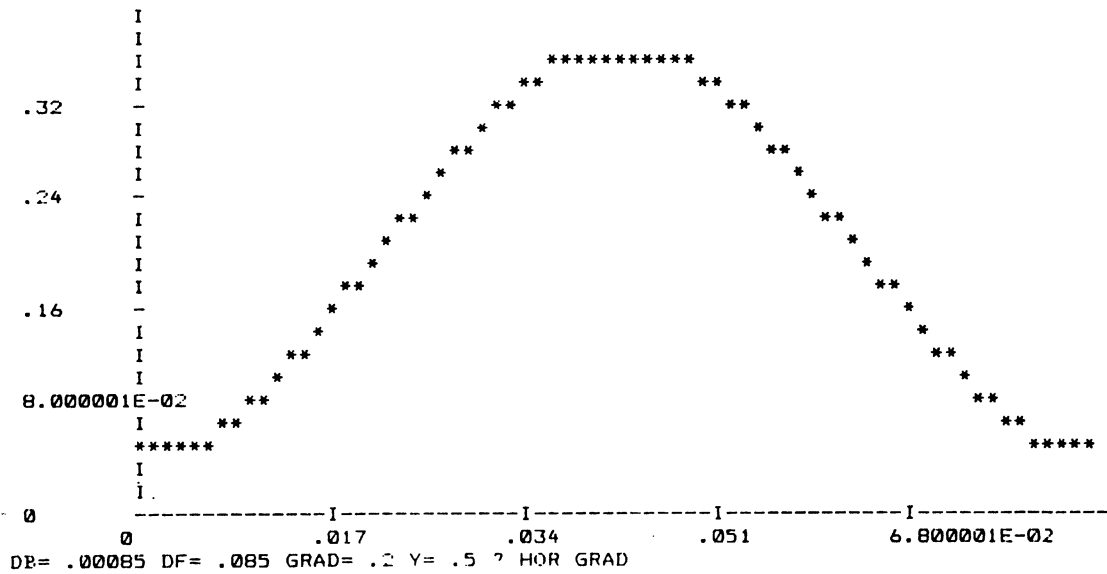
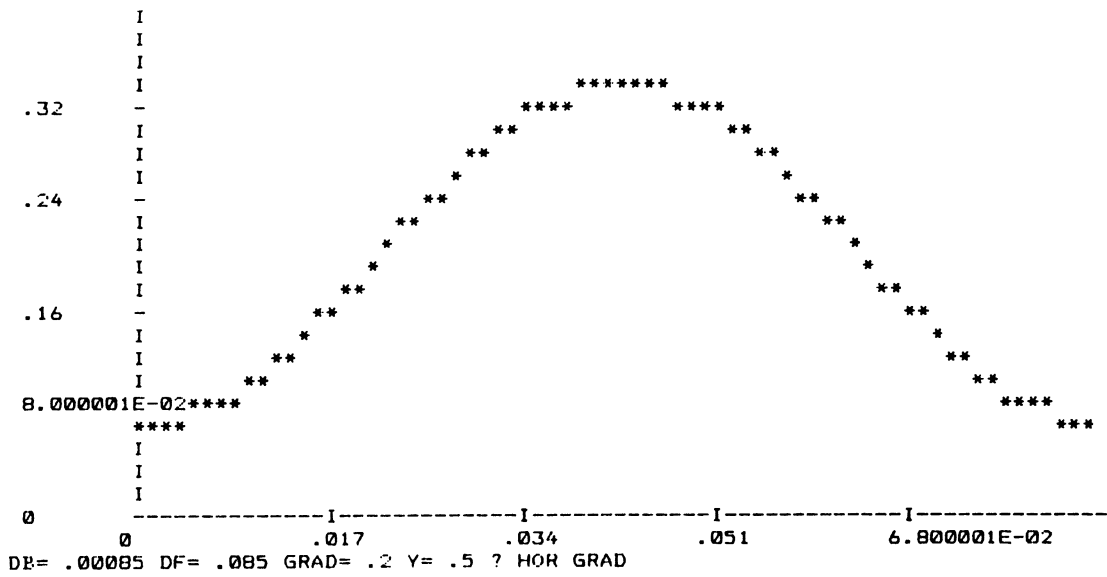
effects of coupling are small as is illustrated in the figure below. Thus the omission of higher order coupling terms is given some confidence.

Also illustrated is the effect of doubling the thickness of the transition layer. It is seen that it is an insensitive parameter.





Effect of coupling term. Top with coupling, bottom without



Effect of coupling. Top with coupling. Bottom without.

```

20 REM SOURCE2 SOURCE2 SOURCE2 SOURCE2
40 PI=3.141593
60 GAW=10000'
80 VISC=.001
100 GRAV=10
120 DIM DET(2,2),R1(2,2),R2(2,2),RF(2,2),RB(2,2)
140 DIM GF(3),GB(3),KTENF(3,3),KTENB(3,3),RLAF(2,2),ILAF(2,2),RLAB(2,2),ILAB(2,2),
),RLA1(2,2),ILA1(2,2),RLA2(2,2),ILA2(2,2),D1(3,3),D00(2,2)
160 KEY OFF
180 REM PARTICLE SIZES
200 DB=.00016
220 INPUT "PARTICLE SIZE RATIO D50/d50";DRA
240 DF =DRA*CB
260 EPS=DF/8
280 OMEGA=2*PI/DF
300 REM POROSITIES
320 NF=.4
340 NB=.4
360 N=NF*1.5
380 REM CONSTANTS
400 C1F=.002
420 C1B=.002
440 C2=.14
460 REM PERMEABILITIES
480 KF=C1F*GAW/VISC*DF^2*NF*(NF/(1-NF))^2
500 KB=C1B*GAW/VISC*DB^2*NB*(NB/(1-NB))^2
520 GAF=KF^2*C2/DF*1.4/GRAV/NF^5
540 GAB=KB^2*C2/DB*1.4/GRAV/NB^5
560 LA=C1F*GAW/VISC*DF^2*N*(N/(1-N))^2
580 MU=LA
600 NU=0
620 GA=LA^2*C2/DF*1.4/GRAV/N^5
640 REM GRADIENTS
660 INPUT "HORIZONTAL GRADIENT X":GF(1)
680 INPUT "HORIZONTAL GRADIENT Y":GF(2)
700 GF(3)=0
720 REM ITERATE FOR G3
740 PERMF=KF/(.5+SQR(.25+GAF*SQR(GF(1)^2+GF(2)^2+GF(3)^2)))
760 DEF FNKK(X)=LA*X/(.5+SQR(.25+GA*SQR(GF(1)^2+X^2)))
780 XS=PERMF/LA*GF(3)
800 YS=FNKK(XS)
820 IF XS=0 THEN 900
840 X1=XS*PERMF*GF(3)/YS
860 DELTA=ABS((X1-XS)/XS)
880 IF DELTA<.00001 THEN 900 ELSE XS=X1:GOTO 800
900 G(3)=X1
920 G(1)=GF(1)
940 G(2)=GF(2)
960 GB(1)=G(1)
980 GB(2)=G(2)
1000 GB(3)=PERMF*GF(3)*KB

```

```

1020 REM FILL PERMEABILITY TENSORS
1040 ABSGF=SQR(GF(1)^2+GF(2)^2+GF(3)^2)
1060 ABSG=SQR(G(1)^2+G(2)^2+G(3)^2)
1080 HELPF=.5*KF/(.5+SQR(.25+GAF*ABSGF))^2/SQR(.25+GAF*ABSGF)*GAF/ABSGF
1100 HELP=.5*LA/(.5+SQR(.25+GA*ABSG))^2/SQR(.25+GA*ABSG)*GA/ABSG
1120 PERM=LA/(.5+SQR(.25+GA*ABSG))
1140 FOR I=1 TO 3
1160 KTEMF(I,I)=PERMF
1180 KTEMB(I,I)=KB
1200 D(I,I)=PERM
1220 NEXT I
1240 FOR I=1 TO 3
1260 FOR J=1 TO 3
1280 KTEMF(I,J)=KTEMF(I,J)-HELPF*GF(I)*GF(J)
1300 KTEMB(I,J)=KTEMB(I,J)-HELPE*GB(I)*GB(J)
1320 D(I,J)=D(I,J)-HELP*G(I)*G(J)
1340 NEXT J
1360 NEXT I
1380 REM START SOLUTION
1400 DEF FNDELTA(X)=EXP(-1000*X^2)
1420 REM SINGLE SINE AND COSINE
1440 C1=-.3*PERM/OMEGA/D(1,1)*G(1)
1460 C2=-.3*PERM/OMEGA/D(2,2)*G(2)
1480 REM COMPUTE THE LAMBDS
1500 FOR I=0 TO 1
1520 FOR J=0 TO 1
1540 OX=I*(2*J-1)*OMEGA
1560 OY=(1-I)*(2*J-1)*OMEGA
1580 DISF=-4*(OX*KTEMF(1,3)+OY*KTEMF(2,3))^2+4*KTEMF(3,3)*(OX^2*KTEMF(1,1)+OX*OY
*2*KTEMF(1,2)+OY^2*KTEMF(2,2))
1600 RLAF(I,J)=-SQR(DISF)/(2*KTEMF(3,3))
1620 DISB=-4*(OX*KTEMB(1,3)+OY*KTEMB(2,3))^2+4*KTEMB(3,3)*(OX^2*KTEMB(1,1)+OX*OY
*2*KTEMB(1,2)+OY^2*KTEMB(2,2))
1640 RLAB(I,J)=SQR(DISB)/(2*KTEMB(3,3))
1660 DIS=-4*(OX*D(1,3)+OY*D(2,3))^2+4*D(3,3)*(OX^2*D(1,1)+OX*OY*2*D(1,2)+OY^2*D
(2,2))
1680 RLA1(I,J)=SQR(DIS)/(2*D(3,3))
1700 RLA2(I,J)=-RLA1(I,J)
1720 RF(I,J)=KTEMF(3,3)*RLAF(I,J)
1740 RB(I,J)=KTEMB(3,3)*RLAB(I,J)
1760 R1(I,J)=D(3,3)*RLA1(I,J)
1780 R2(I,J)=D(3,3)*RLA2(I,J)
1800 DET(I,J)=EXP((RLA1(I,J)-RLA2(I,J))*EPS)*(1-R1(I,J)/RF(I,J))*(1-R2(I,J)/RB(I
,J))-EXP((RLA2(I,J)-RLA1(I,J))*EPS)*(1-R2(I,J)/RF(I,J))*(1-R1(I,J)/RB(I,J))
1820 HF(I,J)=.5*C1*(FNDELTA(OX-OMEGA)-FNDELTA(OX+OMEGA))*FNDELTA(OY)+.5*C2*(FNDE
LTA(OY-OMEGA)-FNDELTA(OY+OMEGA))*FNDELTA(OX)
1840 HB(I,J)=HF(I,J)
1860 A1(I,J)=(EXP(-RLA2(I,J)*EPS)*(1-R2(I,J)/RB(I,J))*HF(I,J)-EXP(RLA2(I,J)*EPS)
*(1-R2(I,J)/RF(I,J))*HB(I,J))/DET(I,J)
1880 P1(I,J)=(-EXP(-RLA1(I,J)*EPS)*(1-R1(I,J)/RB(I,J))*HF(I,J)+EXP(RLA1(I,J)*EPS)
*(1-R1(I,J)/RF(I,J))*HB(I,J))/DET(I,J)
1900 AB1(I,J)=EXP(RLAB(I,J)*EPS)*(A1(I,J)*EXP(-RLA1(I,J)*EPS)*R1(I,J)/RB(I,J)+B1
(I,J)*EXP(-RLA2(I,J)*EPS)*R2(I,J)/RB(I,J))
1920 RLAB1(I,J)=RLAB(I,J)
1940 PRINT I;J;OX;OY;A1(I,J);P1(I,J);AB1(I,J);RLAB1(I,J)
1960 NEXT J
1980 NEXT I

```

```
2000 C3=-PERM/(3*OMEGA)*(-(D(1,1)+D(2,2))*G(1)+2*D(1,2)*G(2))/((D(1,1)+D(2,2))^2
-4*D(1,2)^2)
2020 C4=-PERM/(3*OMEGA)*(-(D(1,1)+D(2,2))*G(2)+2*D(1,2)*G(1))/((D(1,1)+D(2,2))^2
-4*D(1,2)^2)
2040 AMPL2F=1/3*D(3,3)*(-2*A1(1,1)*RLA1(1,1)*EXP(RLA1(1,1)*EPS)-2*B1(1,1)*RLA2(1
,1)*EXP(RLA2(1,1)*EPS))
2060 AMPL1F=1/3*D(3,3)*(-2*A1(0,1)*RLA1(0,1)*EXP(RLA1(0,1)*EPS)-2*B1(0,1)*RLA2(0
,1)*EXP(RLA2(0,1)*EPS))
2080 AMPL2B=1/3*D(3,3)*(-2*A1(1,1)*RLA1(1,1)*EXP(-RLA1(1,1)*EPS)-2*B1(1,1)*RLA2(
1,1)*EXP(-RLA2(1,1)*EPS))
2100 AMPL1B=1/3*D(3,3)*(-2*A1(0,1)*RLA1(0,1)*EXP(-RLA1(0,1)*EPS)-2*B1(0,1)*RLA2(
0,1)*EXP(-RLA2(0,1)*EPS))
2120 REM COMPUTE THE LAMBDA S
2140 FOR I=0 TO 1
2160 FOR J=0 TO 1
2180 OX=(I*2-1)*OMEGA
2200 OY=(J*2-1)*OMEGA
2220 DISF=-4*(OX*KTENF(1,3)+OY*KTENF(2,3))^2+4*KTENF(3,3)*(OX^2*KTENF(1,1)+OX*OY
*2*KTENF(1,2)+OY^2*KTENF(2,2))
2240 RLAF(I,J)=-SQR(DISF)/(2*KTENF(3,3))
2260 DISB=-4*(OX*KTENB(1,3)+OY*KTENB(2,3))^2+4*KTENB(3,3)*(OX^2*KTENB(1,1)+OX*OY
*2*KTENB(1,2)+OY^2*KTENB(2,2))
2280 RLAB(I,J)=SQR(DISB)/(2*KTENB(3,3))
2300 DIS=-4*(OX*D(1,3)+OY*D(2,3))^2+4*D(3,3)*(OX^2*D(1,1)+OX*OY*2*D(1,2)+OY^2*D(
2,2))
2320 RLA1(I,J)=SQR(DIS)/(2*D(3,3))
2340 RLA2(I,J)=-RLA1(I,J)
2360 DOO(I,J)=OX*OX*D(1,1)+OX*OY*2*D(1,2)+OY^2*D(2,2)
2380 RF(I,J)=KTENF(3,3)*RLAF(I,J)
2400 RB(I,J)=KTENB(3,3)*RLAB(I,J)
2420 R1(I,J)=D(3,3)*RLA1(I,J)
2440 R2(I,J)=D(3,3)*RLA2(I,J)
2460 DET(I,J)=EXP((RLA1(I,J)-RLA2(I,J))*EPS)*(1-R1(I,J)/RF(I,J))*(1-R2(I,J)/RB(I
,J))-EXP((RLA2(I,J)-RLA1(I,J))*EPS)*(1-R2(I,J)/RF(I,J))*(1-R1(I,J)/RB(I,J))
2480 HF(I,J)=-.25*(FNDELTA(OMEGA-OX)*FNDELTA(OMEGA-OY)*(AMPL1F+AMPL2F)+FNDELTA(O
MEGA-OX)*FNDELTA(OMEGA+OY)*(AMPL2F-AMPL1F)+FNDELTA(OMEGA+OX)*FNDELTA(OMEGA-OY)*(
AMPL1F-AMPL2F)-FNDELTA(OMEGA+OX)*FNDELTA(OMEGA+OY)*(AMPL1F+AMPL2F))
2500 HF(I,J)=HF(I,J)/RF(I,J)
2520 HB(I,J)=-.25*(FNDELTA(OMEGA-OX)*FNDELTA(OMEGA-OY)*(AMPL1B+AMPL2B)+FNDELTA(O
MEGA-OX)*FNDELTA(OMEGA+OY)*(AMPL2B-AMPL1B)+FNDELTA(OMEGA+OX)*FNDELTA(OMEGA-OY)*(
AMPL1B-AMPL2B)-FNDELTA(OMEGA+OX)*FNDELTA(OMEGA+OY)*(AMPL1B+AMPL2B))
2540 HB(I,J)=HB(I,J)/RB(I,J)
2560 HELP =-.25*(FNDELTA(OMEGA-OX)*FNDELTA(OMEGA-OY)*(C3+C4)+FNDELTA(OMEGA-OX)
*FNDELTA(OMEGA+OY)*(C3-C4)+FNDELTA(OMEGA+OX)*FNDELTA(OMEGA-OY)*(-C3+C4))
2580 HELP =HELP -.25*(FNDELTA(OMEGA+OX)*FNDELTA(OMEGA+OY)*(-C3-C4))
2600 HF(I,J)=HF(I,J)+HELP
2620 HB(I,J)=HB(I,J)+HELP
2640 A(I,J)=(EXP(-RLA2(I,J)*EPS)*(1-R2(I,J)/RB(I,J))*HF(I,J)-EXP(RLA2(I,J)*EPS)*
(1-R2(I,J)/RF(I,J))*HB(I,J))/DET(I,J)
2660 B(I,J)=(-EXP(-RLA1(I,J)*EPS)*(1-R1(I,J)/RB(I,J))*HF(I,J)+EXP(RLA1(I,J)*EPS)
*(1-R1(I,J)/RF(I,J))*HB(I,J))/DET(I,J)
2680 AB(I,J)=EXP(RLAB(I,J)*EPS)*(A(I,J)*EXP(-RLA1(I,J)*EPS)*R1(I,J)/RB(I,J)+B(I,
J)*EXP(-RLA2(I,J)*EPS)*R2(I,J)/RB(I,J))
2700 PRINT I;J;OX;OY;A(I,J);B(I,J);AB(I,J);RLAB(I,J)
2720 NEXT J
2740 NEXT I
```

```
2760 DEF FNK(X,Y)=(1+(COS(OMEGA*X)+COS(OMEGA*Y))/3-COS(OMEGA*X)*COS(OMEGA*Y)/3)
2780 ASIX=-2*AB1(1,1)*EXP(-RLAB1(1,0)*EPS)
2800 ASIY=-2*AB1(0,1)*EXP(-RLAB1(0,1)*EPS)
2820 SC= 2*(AB(1,1)+AB(1,0))*EXP(-RLAB(1,1)*EPS)
2840 ACS= 2*(AB(0,1)-AB(0,0))*EXP(-RLAB(0,1)*EPS)
2860 DEF FNGX(X,Y)=G(1)+(ASIX*COS(OMEGA*X)+ SC*COS(OMEGA*X)*COS(OMEGA*Y)-ACS*SIN
(OMEGA*X)*SIN(OMEGA*Y))*OMEGA
2880 DEF FNGY(X,Y)=G(2)+(ASIY*COS(OMEGA*Y)- SC*SIN(OMEGA*X)*SIN(OMEGA*Y)+ACS*COS
(OMEGA*X)*COS(OMEGA*Y))*OMEGA
2900 GOTO 3780
2920 XL=0:XH=DF
2940 XS=(XH-XL)/70
2960 INPUT "YL , YH ":YL,YH
2980 YS=(YH-YL)/23
3000 CLS
3020 FOR X=10 TO 80
3040 LOCATE 23,X
3060 PRINT "-";
3080 NEXT
3100 FOR Y=1 TO 22
3120 LOCATE Y,10
3140 PRINT "I";
3160 NEXT
3180 FOR I=0 TO 4
3200 XP=I*XS*70/5+XL
3220 LOCATE 23,10+I*70/5
3240 PRINT "I";
3260 LOCATE 24,I*70/5+9
3280 PRINT XP;
3300 NEXT
3320 FOR I=0 TO 4
3340 YP=I*YS*23/5+YL
3360 LOCATE 23-I*23/5,10
3380 PRINT "-";
3400 LOCATE 23-I*23/5,1
3420 PRINT YP;
3440 NEXT
3460 XP=9
3480 Y=Y*DF
3500 FOR X=XL TO XH STEP XS
3520 XP=XP+1
3540 ON NG GOSUB 4020,4080,4140,4200,4260
3560 YP=23-(YC-YL)/(YH-YL)*23
3580 IF YP>24 OR YP<1 THEN GOTO 3640
3600 LOCATE YP,XP
3620 PRINT CHR$(42 );
3640 NEXT
```

```
3660 LOCATE 25,1
3680 PRINT "DB=";DB;"DF=";DF;"GRADX=";GF(1);"GRADY=";GF(2);"FLTRVEL"PERM*SQR(GF(
1)^2+GF(2)^2);"Y=";YCHOSEN/DF;TEX$(NG);
3700 INPUT X$
3720 PRINT " ANOTHER ONE ?"
3740 INPUT "Y/N ";A$
3760 IF A$<< "Y" THEN STOP
3780 TEX$(1)="HORIZONTAL GRADIENT X "
3800 TEX$(2)="HORIZONTAL GRADIENT Y "
3820 TEX$(3)= "VELOCITY X "
3840 TEX$(4)= "VELOCITY Y"
3860 TEX$(5)= "VERTICAL GRADIENT BASE"
3880 FOR J=1 TO 5
3900 PRINT J;TEX$(J)
3920 NEXT
3940 INPUT NG
3960 INPUT "Y ";YCHOSEN
3980 YCHOSEN=YCHOSEN*DF
4000 GOTO 2920
4020 REM SUBROUTINE FOR DP/CX
4040 YC=FNGX(X,YCHOSEN)
4060 RETURN
4080 REM SUBROUTINE FOR DP/DY
4100 YC=FNGY(X,YCHOSEN)
4120 RETURN
4140 REM SUBROUTINE FOR VX
4160 YC=FNK(X,YCHOSEN)*(PERM*G(1)+D(1,1)*(FNGX(X,YCHOSEN)-G(1))+D(1,2)*(FNGY(X,Y
CHOSEN)-G(2)))
4180 RETURN
4200 REM SUBROUTINE FOR VY
4220 YC=FNK(X,YCHOSEN)*(PERM*G(2)+D(2,1)*(FNGX(X,YCHOSEN)-G(1))+D(2,2)*(FNGY(X,Y
CHOSEN)-G(2)))
4240 RETURN
4260 REM SUBROUTINE FOR DP/DX
4280 YC=GB(3)+(ASIX*SIN(OMEGA*X)+ASIY*SIN(OMEGA*YCHOSEN))*(-RLAB(1,1))+SC*SIN(
OMEGA*X)*COS(OMEGA*YCHOSEN)+ACS*COS(OMEGA*X)*SIN(OMEGA*YCHOSEN))*(-RLAB(1,1))
4300 RETURN
```

List of symbols

Superscripts "f" and "b" mean "filter" and "base"; an "-" means "transition layer". "< >" means average; "+" means fluctuations.

- a constant to describe force on particle in turbulent conditions
- A() amplitude of first order correction of pore pressure
- b like a
- B() like A()
- $c_0..c_3$ constants associated with permeability model
- $C_1..C_4$ constants defined by (4.21)...(4.24)
- d average particle size base
- D average particle size filter
- $F, F_1, F_{//}, F_a$ force on a base particle or components thereof
- g_e engineering gradient
- g_r gravitational acceleration
- h critical thickness of base layer
- k laminar permeability
- k_t turbulent permeability tensor defined by (4.8)
- K tortuosity constant
- K_0 ratio of vertical to horizontal skeleton stress
- n porosity
- n, \bar{n} unit normal vector, vector perpendicular to it
- $p(x), p_0$ pressure field and pressure constant
- $q(x)$ perturbation of pressure field
- R, R_c Reynolds number, critical value
- \bar{R} hydraulic radius
- T, T_c period of cyclic loading and critical value
- u water velocity field
- U average unidirectional value of u
- v (specific) discharge, "filter velocity"
- V Volume
- x position vector; components (x,y,z) or (x_1, x_2, x_3)
- Y distance from top of base particle where the force exerted by the fluid effectively applies

α	boundary layer parameter
β	angle of slope
γ	turbulence parameter in permeability law
Δ	$\frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_w}$
δ_{\sim}	Kronecker delta
ϵ	half thickness of transition layer
ω	$2\pi/D$
Ω_{\sim}	Fourier conjugate of (x,y) position vector
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda^f, \lambda^b$	eigenvalues
λ	parameter to describe permeability in transition layer
μ	viscosity
$\bar{\mu}$	$\lambda/3$
ν	kinematic viscosity
$\bar{\nu}$	$-\lambda/3$
θ	position angle base particle
Θ	momentum thickness
ϕ	one particle friction angle
ϕ_{μ}	interparticle friction angle
ϕ'	continuum friction angle
ρ_w	density water
ρ_b	density particle- ρ_w
σ_{\sim}	stress tensor
τ	shear component of σ_{\sim}

SECTIE 4

Alternatief filtermateriaal

laboratorium voor grondmechanica

stichting waterbouwkundig laboratorium



postbus 69, 2600 AB delft
stieltjesweg 2, delft
telefoon 015-569223
telex: 38234 soil nl
postgiro: 234342
bank: mees en hope nv delft
rek.nr. 25.92.35.911
(giro: 6400)
k.v.k. S 145040 delft

**ALTERNATIEF FILTERMATERIAAL.
RAPPORT**

CO-272550/18
september 1985
Adel/AO

Opgesteld in opdracht van
de Deltadienst
te Den Haag

Projectleider: dr. H. den Adel
Projectbegeleider: ir. A. Bezuijen
Afdeling WATERBOUWKUNDIGE CONSTRUCTIES
Afdelingshoofd: ir. P. Lubking



- 0. Inhoudsopgave
 - Lijst van de gebruikte symbolen

- 1. Inleiding

- 2. Vraagstelling

- 3. Het verslag in een notedop
 - 3.1. Inleiding
 - 3.2. Samenvatting

- 4. Filtersterkte
 - 4.1. Buitenland
 - 4.2. Nederland
 - 4.2.1. Verhangen loodrecht op het grensvlak
 - 4.2.2. Verhangen parallel aan het grensvlak
 - 4.2.3. Samengestelde verhangen
 - 4.2.4. Niet stationair
 - 4.2.5. Hellend vlak
 - 4.2.6. Bepaling verhouding D_{15}/d_{50}
 - 4.3. Interne stabiliteit
 - 4.4. Doorlatendheid

- 5. Fysische en chemische eigenschappen
 - 5.1. Staalslakken
 - 5.2. Mijnsteen
 - 5.3. Silex
 - 5.4. Vergelijking
 - 5.5. Chemische eigenschappen, het milieu
 - 5.5.1. LD slakken
 - 5.5.2. Mijnsteen
 - 5.5.3. Silex
 - 5.5.4. Fosforslakken

- 6. Effecten van splijting
 - 6.1. Simpel splijtingsmodel



- 6.2. Verificatie van het model
- 6.3. Gedrag in de tijd
- 6.4. Beperkingen van het model
- 6.5. Effect op de doorlatenheid
- 6.6. Effect op de filterwerking
 - 6.6.1. Effect op de loodrechte filterwerking
 - 6.6.2. Effect op de parallelle filterwerking
- 6.7. Effect op de uitstroming door de spleten
- 6.8. Effect op de interne stabiliteit

- 7. Hydraulische randvoorwaarden
 - 7.1. Verhangen parallel aan het grensvlak
 - 7.2. Verhangen loodrecht op het grensvlak
 - 7.3. Golfklappen

- 8. Effecten t.g.v. verkitting
 - 8.1. Doorlatendheid
 - 8.2. Filterwerking
 - 8.3. Voorbeeld
 - 8.4. Golfklappen
 - 8.5. Vertikale korrelspanning

- 9. Zeefeisen voor stabiel materiaal
 - 9.1. Probleemstelling
 - 9.1.1. Illustratie
 - 9.2. Ontwerpverhang
 - 9.3. Onderzochte situaties
 - 9.4. Berekening zeefband
 - 9.4.1. De eerste eis
 - 9.4.2. De tweede eis
 - 9.5. Zeefband bij smalle korrelverdelingen
 - 9.6. Zeefband bij brede korrelverdelingen
 - 9.7. Doorlatendheid
 - 9.8. Conclusie en kanttekeningen

- 10. Zeefeisen voor alternatief materiaal



- 10.1. Splitsing en verwerking
 - 10.1.1. Voorspelling van de cumulatieve korrelverdeling
 - 10.1.2. Restricties
 - 10.1.3. Aanbevelingen
- 10.2. Verkitting
 - 10.2.1. Analyse
 - 10.2.2. Restricties
 - 10.2.3. Aanbevelingen
- 11. Casestudie mijnsteen van de Deltagootproeven
 - 11.1. Inleiding
 - 11.2. Uitwerking
 - 11.2.1. Porositeit
 - 11.2.2. Loodrecht kritiek verhang
 - 11.2.3. Parallel kritiek verhang
 - 11.2.4. Interne stabiliteit
 - 11.3. Doorlatendheid
 - 11.4. Conclusies
- 12. Verwachting voor slakken
 - 12.1. Algemeen
 - 12.2. Eenlaagsfilter
 - 12.2.1. LD slakken 0/10 mm
 - 12.2.2. LD slakken 10/80 mm
 - 12.3. Meerlaagsfilter
 - 12.4. Menging van de 10/80 en de 0/10 slakken
 - 12.5. Fosforlakken
 - 12.6. Conclusies
- 13. Aanbevelingen
 - 13.1. Verkennend erosie onderzoek
 - 13.2. Begripsverruimend onderzoek
 - 13.2.1. Verwerking en splitsing
 - 13.2.2. Verkitting
- 14. Referenties



Appendix A

Appendix B



Lijst van de gebruikte symbolen.

A	Oppervlakte doorstroomopening
B	Hulpcoefficient
C	Constante van Chézy
D	Diameter van het filtermateriaal
D_x	Diameter van de zeefopening waarbij x% door de zeef valt
F	Reductie factor
H	Golfhoogte
O_x	Maat voor de opening, waarbij x% door het geotextiel valt
P	Druk
$P(x)$	Massafractie door zeef met diameter x
R	Hydraulische straal
S	Dikte stenen
U	Uniformiteit
V	Volume per seconde door het filter
b	Dikte onderlaag
c	Halveringskans
d	Diameter van het basismateriaal
d_a	Maximale diameter
d_i	Minimale diameter
d_{max}	Maximale diameter
d_{min}	Minimale diameter
e	Ruwheid
f_i	i-de zeeffractie
g	Versnelling van de zwaartekracht
h	Breedte en hoogte van een kanaaltje
i	Verhang
i_l^c	Loodrecht kritiek verhang
i_p^c	Parallel kritiek verhang
i_l	Loodrecht optredend verhang
i_p	Parallel optredend verhang
k	Doorlatendheid
k_t	Turbulente doorlatendheid



n	Porositeit
p	Gradatie
q	Debiet
r	Evenredigheidsconstante (golfklappen)
t	Tijd
v	Watersnelheid
v_*	Kritieke schuifspanningssnelheid volgens Shields
z	Zeeffractie tussen C31.5 en C45
Δ	Relatieve dichtheid van de korrels onder water
α	Macht van het verhang
β	Hellingshoek van het talud
δ	Laminaire sublaag
γ	Filter parameter
γ_w	Volumieke kracht van water
η	Viscositeit
λ	Leklengte
μ	Ruwheid bodem
ν	Kinematische viscositeit
ψ_s	Shields parameter
ρ	Volumieke massa korrels
ρ_w	Volumieke massa water
ρ'_b	Volumieke massa van het basismateriaal, onder water
gemeten	
ϕ	Inwendige hoek van wrijving
σ	Korrelspanning
τ	Relaxatie tijd halveringsproces
χ	Variatie coëfficiënt



1. Inleiding.

Bij de produktie van metalen zoals staal, koper en niet-metalen zoals fosfor komen in ruime hoeveelheden nevenprodukten vrij, in de vorm van slakken. Voor deze slakken wordt meestal wel een afnemer gevonden. Bijvoorbeeld in de wegenbouw worden slakken gebruikt als verharde onderlaag, maar niet alle typen slakken zijn bruikbaar, vanwege onvoldoende stabiliteit en onaantrekkelijkheid ten gevolge van hun soms hoge volumieke massa.

Ook bij de mergelwinning voor de bereiding van van cement blijft veel restmateriaal over. De mergel is voorzien van natuurlijke materialen, die echter niet in het cement gebruikt kunnen worden. Dit restmateriaal, onder de verzamelnaam Silex, wordt reeds een tiental jaren gebruikt in de waterbouw, b.v. als opvullaag onder gezette steen.

Een derde materiaal, dat in ruime mate vooral in het buitenland is opgeslagen is mijnsteen. Dit materiaal is een restprodukt bij de kolenwinning. Mijnsteen kan zeer verschillende samenstellingen hebben, het is een typisch verzamel produkt. De spreiding in de eigenschappen, bijvoorbeeld de verweringsgevoeligheid kan daarom groot zijn. Ook mijnsteen wordt reeds geruime tijd toegepast in de waterbouw bijvoorbeeld als perskade of als tussenlaag onder gezette steen.

De slakken en de mijnsteen vormen zowel voor de producent als voor de overheid een probleem. Dumping van dit materiaal leidt tot extra kosten voor de producent en het wekt vanwege milieuaspecten argwaan bij de kritische burgerij. Vooral in stilstaand of langzaam stromend water kunnen slakken en mijnsteen een bijdrage leveren aan de vervuiling van het water ten gevolge van uitloging. Momenteel wordt deze problematiek nog diepgaand bestudeerd.



In de waterbouw bestaat behoefte aan granulaire materialen, ter voorkoming van erosie van waterkerende constructies. Het is dan logisch om na te gaan, of deze materialen, nog breder dan tot nu toe ook in de waterbouw toegepast kunnen worden. Over de bruikbaarheid, voornamelijk als opvul materiaal, zijn reeds diverse nota's verschenen [1],[2].



2. Vraagstelling.

In het kader van het onderhoud van oude dijken en de constructie van nieuwe zal in de toekomst materiaal nodig zijn, zowel als filter als ook als uitvullaag. Daarom heeft de Deltadienst van Rijkswaterstaat aan het LGM opdracht verleend de volgende vragen te beantwoorden:

- * Is alternatief materiaal bruikbaar als filter, direkt op de te beschermen onderlaag?
- * Welke eisen moeten aan het te gebruiken granulaire materiaal gesteld worden?
- * Welke extra eisen moeten aan alternatieve materialen gesteld worden?
- * Wat zijn de knelpunten bij de beoordeling?
- * Is praktisch vervolgonderzoek nodig, en zo ja welk?

De te beschouwen alternatieve materialen zijn staalslakken (LD), mijnsteen en Silex.



3. Het rapport in een notedop.

3.1. Inleiding.

Onderzoek aan steenzettingen heeft aangetoond, dat de stabiliteit van afzonderlijke stenen afhangt van de verhouding in de doorlatendheid van de onderlagen en die van de stenen. Door het pakket stenen doorlatend te maken, wint de zetting aan stabiliteit; dit heeft echter tot gevolg dat er eisen aan het materiaal van de onderlagen gesteld moeten worden. De verhangen in de onderlaag worden immers door de doorlatende steenlaag groter. Om te voorkomen dat de dijk zelf beschadigd wordt, moeten er bovendien eisen voor de grootte van het gebruikte materiaal in de onderlagen worden gesteld.

De beide eisen zijn tegenstrijdig. Enerzijds mag het onder de stenen liggende materiaal niet door de spleten wegspoelen, anderzijds moet het de onderlaag tegen erosie beschermen. Dit houdt in, dat het materiaal voldoende grof moet zijn om niet door de spleten te kunnen verdwijnen, en voldoende fijn om een adequaat filter voor de ondergrond te zijn. Uit deze voorwaarden kunnen waarden afgeleid worden voor de zeefband van het materiaal in de onderlaag.

Een extra complicatie vormt de verweringsgevoeligheid van alternatieve materialen. Door voortschrijdende verwerking kan na verloop van tijd het materiaal zo ver verfijnd zijn, dat het door de spleten kan uitspoelen. Een niet te verontachtzamen effect ten gevolge van de verwerking is de verlaging van de interne stabiliteit van de tussenlaag.

Een hiermee samenhangend effect is verpapping. Dit treedt vooral bij mijnsteen op. Door capillaire werking van het verloederde materiaal ontstaat een klei-achtige slurry met een geringe doorlatendheid. De drainerende werking van de tussenlaag komt hierdoor in gevaar.

Een ander nadelig effect heeft de verkitting van het materiaal; hierdoor kunnen krachtendragende lagen gevormd worden, die onder invloed van een bovenbelasting slechts weinig vervormen.



Bij gedeeltelijke erosie kan dan het filter niet meer voldoende bijzakken, zodat de erosie in versterkte mate kan doorgaan.

De alternatieve materialen zijn gevoeliger voor breuk dan bijvoorbeeld grind. Derhalve hebben de afgeleide eisen betrekking op het materiaal, zoals dit na het aanbrengen aanwezig is. Dit elimineert een voorgeschreven wijze van behandelen van het materiaal.

Dit rapport zal een kwalitatief antwoord zien te geven voor de grenswaarden, die bij de constructie aangehouden moeten worden. Daarnaast worden aanbevelingen gedaan voor nog uit te voeren speurwerk naar die zaken, die met behulp van de theorie slechts gebrekkig kunnen worden beschreven, of waarvoor een verificatie van de theorie noodzakelijk is.

3.2. Samenvatting.

Er is uitgezocht, aan welke eisen de onderlaag van een steenzetting moet voldoen. Hierbij is vastgesteld dat voor stabiel materiaal, dat wil zeggen materiaal dat niet verweert, breekt of verkit, een band kan worden aangegeven, waarbinnen de cumulatieve korrelverdeling van de onderlaag moet liggen. Als slechts één materiaal als filter gebruikt wordt voor een fijnkorrelige basis, voldoet een materiaal met een smalle korrelverdeling als tussenlaag niet. Voor een materiaal met een brede korrelverdeling is dit wel mogelijk. Opgelet dient te worden dat de korrelverdeling niet te breed wordt, omdat dan interne instabiliteit optreedt.

Met een simpel model is berekend hoe de korrelverdeling van een aan verwerking onderhevig materiaal er na een aantal jaren zal uitzien. Het model voorspelt dat het materiaal intern instabiel wordt. Er zijn echter onvoldoende gegevens beschikbaar om dit model over een lange tijdsduur te toetsen. Er worden aanbevelingen gegeven hoe onderzoek naar deze verschijnselen kan worden opgezet.

Voor de verkitting van het materiaal, dat wil zeggen de vorming van samenhangende brokken, zijn te weinig gegevens bekend om iets te kunnen voorspellen over het langeduur gedrag. Evenmin is bekend of verkitting optreedt in het diameter gebied, dat aangegeven



- 13 -

is voor stabiele materialen. Aanbevelingen voor onderzoek om dit te toetsen zijn aangegeven.



4. Filtersterkte.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken over de bestaande empirische regels voor filterstabiliteit en doorlatendheid. Een aantal begrippen, die veelvuldig bij deze regels gebruikt worden, zijn aangegeven in appendix A.

4.1. Buitenland.

In de loop van de tijd zijn veel filterregels gepubliceerd, verworpen en aangepast. Het merendeel van de experimentele onderzoekingen betreft stromingscondities, waarbij de stromingsrichting loodrecht op het grensvlak tussen de onderlaag (basis) en bovenlaag (filter) staat. De hieruit afgeleide criteria geven aan of bij een opgegeven verhouding van karakteristieke diameters van beide materialen een filter-basisconstructie nog net stabiel is. Hieronder wordt verstaan, dat het basismateriaal niet door het filtermateriaal heen getransporteerd wordt. Het valt op, dat bij deze criteria de porositeit van het filtermateriaal van ondergeschikt belang wordt geacht, in dier voege, dat deze grootte niet gemeten maar (af)geschat wordt, of gerelateerd aan de maximale droge kritieke dichtheid. Voor stromingscondities parallel aan het grensvlak tussen basis en filter wordt in de buitenlandse literatuur nauwelijks of niets gevonden.

Aan constructies bij stroming parallel aan en voor stroming loodrecht op het scheidingsvlak worden dezelfde voorwaarden gesteld, terwijl toch bekend is, dat de kritieke verhangen aanzienlijk verschillen.

Thanikachalan en Sakthivadivel [3] hebben in het begin van de zeventiger jaren een evaluatie gemaakt van de filtercriteria. Zij legden correlaties tussen de verhoudingen van de diverse karakteristieke diameters zowel van de onder- als bovenlagen. Er is voor de notatie afgesproken, dat met de kleine letter d de diameter van een basisdeeltje bedoeld wordt, en met de grote D de diameter van een filterdeeltje. De index i slaat op het massapercentage, dat door de zeef valt. De volgende relatieve criteria zijn opgesteld:



$$\frac{D_{10}}{d_{10}} < 2.5 \frac{d_{60}}{d_{10}} + 5 \quad (4.1)$$

$$\frac{D_{60}}{D_{10}} > 0.941 \frac{D_{10}}{d_{10}} - 5.65 \quad (4.2)$$

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} < 2.4 \frac{D_{60}}{D_{10}} + 8 \quad (4.3)$$

Daarnaast is er nog een absoluut criterium van Kawakami et al [4]:

$$\log \left\{ \frac{D_{10}}{d_{10}} - 2 \right\} < \frac{1.9}{\log(d_{10} - 0.001) + 3} \quad (4.4)$$

met d_{10} in mm. N.B. De ongelijkheden (4.1) t/m (4.4) gelden voor stationaire verhangen, loodrecht op het grensvlak.

De formules 4.1 t/m 4.3 zijn weergegeven in bijlage 4.1. De formules zijn in een vorm gegoten, zodat uitgaande van een bekend basismateriaal, het filtermateriaal kan worden bepaald. Laat gegeven zijn een basismateriaal met $d_{60}/d_{10} = 3$, punt A in bijlage 4.1. Ga nu naar punt B. Dit is nog een stabiele verhouding, bij $D_{10}/d_{10} = 8$. Ga vervolgens naar punt C. Ook dit is een stabiele verhouding, $D_{60}/D_{10} = 13$. Ga dan naar punt D, ook deze is weer stabiel, bij $D_{50}/d_{50} = 19$. Tenslotte moet geverifieerd worden of de combinatie d_{60}/d_{10} en D_{50}/d_{50} nog in het stabiele gebied valt. De punten B, C en D zijn vrij gekozen, punt E ligt door de voorafgaande keuzes vast.

De gegeven criteria zijn erg streng, er is geen transport toegestaan. Deze eisen zijn dus veilig. Het criterium van Kawakami, formule (4.4) is in bijlage 4.2 getekend.

Recente buitenlandse publicaties [5] en [6] aangaande proeven met uniform zand en sterk gegradeerd filtermateriaal voor de constructie van stuwdammen geven aan dat:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 9 \quad (4.5)$$



Porositeiten werden niet vermeld, maar de dichtheid bedroeg volgens opgave 80 tot 100% van de maximale droge dichtheid. De metingen zijn echter snel uitgevoerd, zodat een langzaam optredend transport niet als zodanig onderkend is. Formule (4.5) is dus onveilig.

4.2. Nederland.

Door het Oosterschelde projekt heeft het Nederlandse filteronderzoek een enorme stimulans gekregen. Naast stationaire verhangen loodrecht op en parallel aan het grensvlak, werden ook cyclische verhangen onderzocht. Een goede samenvatting van het recente experimentele filteronderzoek wordt gegeven in [7]. Bij de onderzoeken is veelal wel de porositeit van het filtermateriaal betrokken, omdat deze van essentieel belang bleek te zijn. Daarnaast is niet alleen bepaald of er transport van basismateriaal optrad, maar ook bij welke verhangen er transport ging optreden. Deze benadering laat een aanpak van de dimensionering toe, die aangepast is aan het specifieke ontwerp.

4.2.1. Verhangen loodrecht op het grensvlak.

De criteria voor de verhangen loodrecht op het grensvlak zijn niet in formule vorm uitgedrukt. In bijlage 4.3 zijn de curves uitgezet voor basismateriaal met een d_{50} van 0.15 mm (bovenste curve), 0.22 mm (gestreepte curve) en 0.46 mm (onderste curve). Voor cyclische verhangen loodrecht op het grensvlak zijn twee curves gegeven, zie bijlage 4.4. De bovenste (gestreepte) curve geldt voor een basismateriaal met een d_{50} van 0.15 mm, de onderste curve voor een basismateriaal met een d_{50} van 0.55 mm. De tendens is dat naarmate het basismateriaal grover wordt, het kritieke verhang bij dezelfde parameter $\gamma (=n_p D_{15}/d_{50})$ lager is. De waarden van de cyclische kritieke verhangen zijn op hun beurt lager dan die van de stationaire kritieke verhangen. De uniformiteit van het filtermateriaal bij de proeven bedroeg 1.5 à 4.



4.2.2. Verhangen parallel aan het grensvlak.

Voor de verhangen parallel aan het grensvlak is een empirische formule opgesteld [7]. Deze relateert het kritieke verhang aan de schuifspanningssnelheid volgens Shields, v_* .

$$i_p^c = \left\{ \frac{0.06}{n^3 D_{15}^{4/3}} + 0.001 (n^5 D_{15} / d_{50}^5)^{1/3} \right\} v_*^2 \quad (4.6)$$

v_* wordt bepaald of uit een figuur, of in het geval van zand met behulp van de volgende uitdrukking:

$$v_* = 1.3 d_{50}^{0.57} + 8.3 \times 10^{-8} d_{50}^{-1.2} \quad (4.7)$$

Onlangs is een heranalyse [8] van de proeven uitgevoerd, in termen van kritieke snelheden. Deze heeft geleid tot de "openwaterloop analogie". Er staan aanhalingstekens, omdat nog niet zeker is, dat het om een analogie in de ware zin des woords gaat. Bij de "openwaterloop analogie" wordt een relatie gelegd tussen de kritieke poriesnelheden en de diameters van basis- en filtermateriaal. Het kritieke verhang wordt met behulp van een doorlatendheids formule bepaald. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen turbulente, laminaire en overgangsströmung. Voor turbulente en overgangsströmung geldt dat:

$$i_p^c = \frac{0.14 \psi_s \Delta}{e^2} \frac{d_{50}}{D_{15} n^3} \quad (4.8)$$

met

$$\Delta = \rho / \rho_w - 1 \quad (4.9)$$



ψ_s is de Shields parameter, e de ruwheids coefficient, ρ de volumieke massa van het materiaal en ρ_w de volumieke massa van water. Voor fijn basismateriaal ($d_{s_0} < 0.8 \text{ mm}$) is $e=0.2$, voor grof materiaal ($d_{s_0} > 0.2 \text{ mm}$) is $e=0.35$. Voor het type overgangsstroming wordt e afhankelijk van de $D_{1.5}$. Hierbij moet echter in rekening worden gebracht, dat de doorlatendheid daarbij ook anders afhangt van $D_{1.5}$ dan bij turbulente stroming. Dit wordt tamelijk ingewikkeld, maar als een experimenteel gegeven blijkt nu, dat toch van de turbulente formule (4.7) mag worden gebruik gemaakt, indien voor de e waarde 0.2 wordt ingevuld. Waarom dit kan, is nog onduidelijk.

In [9] wordt een theoretische onderbouw aangegeven voor het bezwijkmechanisme van filters bij parallelle stroming. Er wordt hierbij rekening gehouden met microscopische fluctuaties van de orde grootte van een filterkorrel in de stroming van het water in het filter. Deze veroorzaken in de basis macroscopische fluctuaties, van de orde grootte van veel korrels. Op grond van een bezwijkgedrag, dat met een inwendige wrijvingshoek kan worden gekarakteriseerd wordt een formule voor het kritieke verhang, parallel aan het scheidingsvlak, afgeleid. Een relatie wordt gelegd tussen de schuifspanning en de filtersnelheid, v_f via de doorlatendheid.



$$v_f = 0.25 n_f \left\{ \frac{\pi}{6} \frac{t g \phi}{\eta} \rho_b' g \langle d \rangle (\nu D_{15})^{1/2} \right\}^{2/3} \quad (4.10)$$

$$i_1^c = \frac{v_f}{C0} + \frac{v_f^2}{C1} \quad (4.11)$$

met

$$C0 = C2 \frac{g D^2}{\nu} \quad (4.12)$$

$$C1 = \frac{g D}{C3} \quad (4.13)$$

$$C2 = 0.0035 n_f^3 / (1 - n_f)^2 \quad (4.14)$$

$$C3 = 0.14/n_f^5 \quad (4.15)$$

De resultaten van de drie formules voor het parallelle kritieke verhang zijn weergegeven in bijlage 4.5, bij een vaste filterporositeit van $n_f = 0.4$. Het basis materiaal bezit een mediane diameter van $d_{50} = 0.16$ mm. Formule (4.6) is met vierkantjes aangegeven, formule (4.8) met driehoekjes en formule (4.10) met kruisjes. In het gebied van D_{15}/d_{50} tussen 10 en 100 ontlopen de drie formules elkaar weinig. Voor grote waarden van D_{15}/d_{50} divergeert formule (4.6).

De invloed van de porositeit is vrij groot, zie bijlage 4.6. Dit wordt aangetoond met formule (4.10). De vorm van de korrels uit zich niet in de meetresultaten. Binnen de meetnauwkeurigheid leveren hoekige en ronde korrels dezelfde resultaten.



4.2.3. Samengestelde verhangen.

Voor verhangen, die componenten bezitten, zowel parallel aan als loodrecht op het grensvlak is in [10] op grond van een eenvoudig model een relatie afgeleid tussen de loodrechte en de parallelle component van het kritieke verhang, respectievelijk i_p^c en i_1^c . Deze formule, (4.16) beschrijft echter niet voldoende nauwkeurig het gemeten verband tussen i_p^c en i_1^c .

$$i_1 / i_1^c = 1 - i_p / i_p^c \quad (4.16)$$

De relatie tussen i_1^c en i_p^c is schetsmatig in figuur 1 aangegeven.

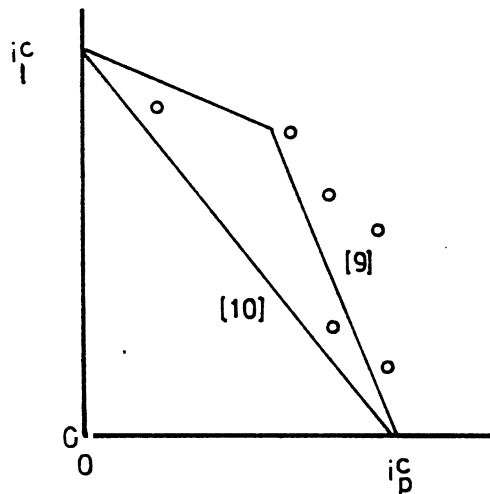


Fig. 1. De relatie tussen de kritieke verhangen bij stroming schuin op het grensvlak. De metingen zijn met rondjes aangegeven.



De metingen tonen aan dat het parallelle kritieke verhang bij lage waarden van het loodrechte verhang nauwelijks beïnvloed wordt. Pas bij een loodrecht verhang van 0.75 neemt het parallelle kritieke verhang snel af naar nul. In [9] wordt een verklaring gegeven voor dit verschijnsel. Bij lage waarden van het loodrechte verhang treedt transport van materiaal op tengevolge van het rollen van afzonderlijke korrels. De invloed van de loodrechte stroming op de bovenste korrels is tamelijk gering. De verticale sleepkracht op een bovenliggende korrel is veel geringer dan op de dieperliggende korrels. Als het loodrechte verhang tamelijk groot is geworden, treedt transport op, omdat de grond afschuift. Er vormt zich een glijvlak op 10 à 20 korrels diep in de basis. Dit is de continuummode. Het loodrechte verhang helpt de grond over de drempel heen om op deze manier te kunnen bezwijken. In [9] wordt aangetoond dat de afhankelijkheid van het loodrechte verhang voor bezwijken in de continuummode veel groter is. De curve knikt, zie figuur 1.

4.2.4. Niet stationair.

Van cyclische effecten is nog weinig bekend. De proeven, die zijn uitgevoerd, zijn onbruikbaar, omdat door de pulserende belasting verdichting van het filter is opgetreden. Het gevolg hiervan is dat de experimenten niet reproduceren. Zeer recent is nieuw experimenteel onderzoek verricht, voornamelijk van een verkennend karakter. Een dominante rol speelt het gedrag van de doorlatendheid als functie van de periode van de cyclische stroming. Bij openwaterlopen is vastgesteld, dat de schuifspanning op de korrels toeneemt bij korter wordende periode en gelijkblijvende watersnelheid. De doorlatendheid neemt echter af, zodat de watersnelheid niet constant blijft. Er zijn dus twee elkaar tegenwerkende effecten. De watersnelheid neemt echter sterker af dan dat de schuifspanning toeneemt. De voorspelling, dat het kritieke verhang bij kleiner wordende golfperiode toeneemt, wordt hierdoor dus bevestigd. De resultaten van de proeven zijn echter nog niet van dien aard, dat uit de metingen een stukje theorie kan worden afgeleid.



4.2.5. Hellend grensvlak.

Het effect van een hellend talud is o.a. in [10] beschreven. De invloed van een helling heeft een verschillende uitwerking op de waarde van de beide kritieke verhangen. Indien de hoek die het grensvlak maakt met een horizontaal vlak β bedraagt, dan geldt voor verhangen loodrecht op het grensvlak:

$$i_1^c(\beta) = i_1^c(0) \cos \beta \quad (4.17)$$

De invloed van de helling is gering. Als $\beta=0.4$ rad, dan is $\cos\beta=0.92$. Voor verhangen parallel aan het grensvlak geldt dat:

$$i_p^c(\beta) = i_p^c(0) \frac{\sin(\phi - \beta)}{\sin(\phi)} \quad (4.18)$$

met ϕ de inwendige wrijvingshoek. Deze laatste formule is dezelfde, die ook bij praktisch onderzoek aan openwaterlopen is aangetoond [8]. De daarbij gevonden waarde van ϕ is vrij hoog (0.8 rad), waarbij aangetekend dient te worden dat $\beta \leq 0.4$ rad was. De verwachting is dat voor $\beta > 0.4$ rad, formule (4.18) niet meer opgaat. Relatie (4.18) is experimenteel voor filters geverifieerd [21]. De waarde van ϕ is eveneens hoog, 1.1 radiaal. De invloed van een helling op het parallelle verhang is vrij groot. Ter illustratie zijn de verhoudingen $i_1^c(\beta) / i_1^c(0)$ en $i_p^c(\beta) / i_p^c(0)$ in bijlage 4.7 getekend.



4.2.6. Bepaling verhouding D_{15}/D_{50} .

Voor de bepaling van D_{15}/d_{50} zijn een zestal bijlagen, 4.8 t/m 4.13, voor d_{50} van 0.15 mm t/m 0.25 mm en voor $d_{50} > 0.82$ mm. De figuur werkt analoog aan bijlage 4.1. Ter verduidelijking wordt de procedure hier schetsmatig aangegeven, via figuur 2. Uit metingen of berekeningen volgen het optredende parallelle en loodrechte verhang, i_p en i_l . Dit levert het punt A en het punt B. Tengevolge van het loodrechte verhang moet het kritieke verhang dus iets hoger zijn. Deze correctie wordt in het 3e kwadrant uitgevoerd. In het tweede kwadrant wordt de correctie voor het hellende talud aangebracht, waarna via de curve in het eerste kwadrant de D_{15}/d_{50} (punt E) kan worden afgelezen.

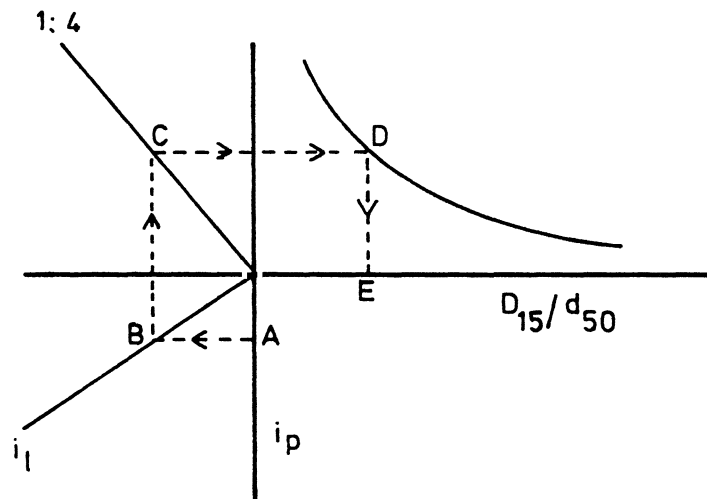


fig. 2. Schematische weergave voor de bepaling voor D_{15}/d_{50} .



4.3. Interne stabiliteit.

Een filter-basisconstructie kan ook falen, indien er in het filter interne erosie optreedt. Hieronder wordt verstaan, dat bijvoorbeeld de kleine korrels in het filter niet voldoende kunnen worden tegengehouden door de eigen filterkorrels. De kleine korrels spoelen dan uit het filter, waardoor de porositeit toeneemt. Tevens wordt de waarde van D_{15} groter, waardoor het kritieke verhang afneemt. Basismateriaal kan door de poriën van het filter worden afgevoerd. Dit verschijnsel treedt vooral op bij sterk gegradeerde materialen.

Aan interne erosie heeft Lubochkov twee moeilijk toegankelijke artikelen gewijd, [12] en [13]. De essentie van het betoog is als volgt:

1. Een zeefcurve wordt in stukken onderverdeeld; de verhouding van de grenzen van een interval bedraagt 2.4. De bedoeling hiervan is, dat korrels uit een interval niet meer door de openingen heen kunnen, die door deeltjes uit het eigen interval gevormd worden.
2. De verhouding tussen de massa's in opvolgende intervallen moet in een bepaald interval (deels empirisch, deels theoretisch bepaald) liggen. De bedoeling hiervan is, dat er voldoende deeltjes zijn om de poriën, gevormd door grote deeltjes, uit het direkt opvolgende interval, te kunnen afsluiten.



Op grond van bovenstaande uitgangspunten worden twee lijnen opgesteld, zie bijlage 4.14. Een materiaal, waarvan de zeefcurve geheel rechts van de onderste lijn ligt, is stabiel. Een zeefcurve, geheel links van de bovenste lijn, is onvoorwaardelijk instabiel. Een curve tussen de twee lijnen in, is stabiel bij niet te grote verhangen. Welke getalwaarden Lubochkov hieronder verstaat, is niet bekend. Een zeefcurve, die aan de kant van de grote deeltjes diameters links van de bovenste curve ligt in het instabiele gebied, maar bij de kleine en middelgrote diameters rechts van de onderste curve, (zie de cirkeltjes in bijlage 4.15), is toch stabiel. Ten eerste zijn de grote korrels veelal krachtendragend, zodat ze ingeklemd liggen en ten tweede zijn er geen poriën, waardoorheen deze korrels kunnen ontsnappen. De grootste kans op interne instabiliteit treedt op, als een interval niet voldoende gevuld is, zie als voorbeeld de curve aangegeven met de kruisjes in bijlage 4.15.

4.4. Doorlatendheid.

Er zijn zeer vele doorlatendheidsformules. Het nadeel is meestal dat ze of in het laminaire gebied gelden of in het turbulente gebied. Ook de meningen over de invloed van de porositeit verschillen nogal. De in [10] afgeleide formule geldt zowel in het laminaire als in het turbulente gebied. Voor water geldt dat:

$$v = 2.2 \times 10^{-5} \frac{(1-n)^2}{n \langle D \rangle} \left\{ \left(1 + 3.6 \times 10^9 \left\{ \frac{n}{1-n} \right\}^4 i \langle D \rangle^3 \right)^{1/2} - 1 \right\} \quad (4.19)$$

waarbij v de watersnelheid (m/s) is gemiddeld over het gehele pakket (een soort debiet), $\langle D \rangle$ de gemiddelde diameter (m), naar aantallen korrels, n de porositeit en i het verhang. De formule is niet toepasbaar voor zand-klei mengsels of voor klei. Een nadeel van deze formule is, dat deze de watersnelheid geeft als functie van het verhang. Voor laminaire stroming wordt via de wet van Darcy de doorlatendheid, k , bepaald:



$$k = v/i \quad (4.20)$$

Voor turbulente of type overgangsstroming wordt veelal een andere (empirische) doorlatendheidswet geponeerd:

$$v = k_t i^\alpha \quad (4.21)$$

met α een getal tussen 0.5 (turbulent) en 1.0 (laminair); k_t is de turbulente doorlatendheid. Voor formule (4.19) kan aangetoond worden dat deze bij turbulente stroming een waarde van α oplevert van 0.5; voor laminaire stroming nadert α naar 1. De formule is in goede overeenstemming met metingen.

De waarde van α wordt gevonden door:

$$\alpha = \frac{d \ln(v)}{d \ln(i)} = \frac{Bi}{2(1 + Bi - \sqrt{1 + Bi})} \quad (4.22)$$

met

$$B = 3.6 \times 10^9 \left\{ \frac{n}{1-n} \right\}^4 \langle D \rangle^3 \quad (4.17)$$

De logaritmes van snelheid en verhang worden gedifferentieerd, omdat α de macht van het verhang is, zie vergelijking (4.21).

De waarde van k_t wordt gevonden door gelijkstelling van de vergelijkingen (4.19) en (4.21):

$$k_t = A \left\{ \sqrt{1+Bi} - 1 \right\} / i^\alpha \quad (4.22)$$

met:

$$A = 2.2 \times 10^{-5} \frac{(1-n)^2}{n \langle D \rangle} \quad (4.25)$$



De gelineariseerde turbulente doorlatendheid, k_1 , bedraagt:

$$k_1 = A \{ \sqrt{(1+Bi)} - 1 \} / i \quad (4.26)$$

De doorlatendheid speelt een dominante rol bij de bepaling van de filterstabiliteit. Via de doorlatendheid wordt de filtersnelheid berekend, die een maat voor de schuifspanning op de korrels is.



5. Fysische en chemische eigenschappen.

In dit hoofdstuk worden de fysische en chemische eigenschappen gezien. De chemische aspecten worden aan het eind van het hoofdstuk behandeld.

5.1. Staalslakken.

Bij de productie van staal komen slakken vrij. De eigenschappen, zoals bestendigheid van de slakken hangen sterk af van het productieproces. Het Linz-Donawitz proces levert echter slakken op, die minder onbestendig zijn, dan andere productieprocessen [14]. De aanbeveling is dan ook om slechts slakken te gebruiken vervaardigd met het Linz-Donawitz proces. Deze slakken worden kortweg LD slakken genoemd. De dichtheid van de slakken is hoger dan die van steen, hetgeen bij de waterbouw een voordeel kan zijn. Als richtwaarde voor de gemiddelde dichtheid wordt 3250 kg/m^3 aangegeven. De sterkte van het materiaal wordt vastgelegd door de snelheid van afkoelen van de slakken, die uit de smelt komen. Gaat deze afkoeling geleidelijk, dan ontstaan er veel minder scheuren en holten, dan wanneer de afkoeling snel verloopt. De sterkte van de slakken is in hoge mate afhankelijk van het voorkomen van deze scheuren en holten. De gemeten druksterkte van één slak varieert tussen de 50 en 400 MPa. Grootheden van een meer vergelijkende waarde, zoals het Los Angeles getal, zijn opgenomen in paragraaf 5.4.

Staalslakken kunnen in een vochtig milieu uiteenvallen. Dit hangt af van de hoeveelheid vrije oxiden. Met water reageren deze tot hydroxiden; hierbij treedt een volumevergroting op. Ingesloten vrije oxiden kunnen op deze manier de slak splijten. Er zal dus een eis aan de gemiddelde hoeveelheid vrije oxiden en hun spreiding moeten worden gesteld, teneinde deze splijting te vermijden of te minimaliseren. Thermische invloeden op de sterkte zijn gering of afwezig.



LD slakken zijn hydraulisch, d.w.z. onder invloed van water binden de fijne delen de grote delen aaneen, het materiaal verkit. Met water gedragen de fijne delen zich als een soort lijm. Er is sprake van een "chemische" reactie. Op deze manier vormt zich een materiaal dat een aanzienlijke druksterkte kan weerstaan. Veel laboratoriumgegevens hierover zijn nog niet bekend. In [14] worden proeven vermeld aangaande een materiaal met een gegeven herkomst en samenstelling. De tendens is, dat de druksterkte van de verkitte slakken nog langzaam in de tijd toeneemt, van ongeveer 0.4 MPa na een week tot 0.6 MPa na een maand. De verkitting vormt een nadeel voor de goede werking van een filter. Dit aspect wordt verder verduidelijkt in hoofdstuk 8.

5.2. Mijnsteen.

De voor Nederland gebruikelijke mijnsteen is vrijgekomen bij de winning van steenkool. Het bestaat deels uit voor de exploitant onbruikbaar gesteente met zeer weinig kool, tot hoeveelheden steenkool, waarvoor het niet meer rendabel is, om de kool eruit te halen. De mijnsteen, die tot nu toe in Nederland is aangeboden, is een sterk gelaagd materiaal. Het is samengesteld uit kleisteen en leisteen. Door consolidatie van klei is kleisteen ontstaan. De dichtheid ligt tussen de 2450 en 2600 kg/m³. Onder atmosferische omstandigheden valt kleisteen uiteen in fijner materiaal: plaatjes van minimaal 2mm. Deze rest is sterk anisotroop. De oorzaak van de verwerking is gelegen in de fluctuaties in de vochtigheidsgraad. Dit is aangetoond door middel van herhaalde bevochtiging en droging. In hoeverre het thermische effect van de droging debet is aan de verwerking, is niet duidelijk, maar ook bij niet thermische vochtigheidsvariatiën treedt verwerking op.



Mijnsteen verloedert. Onder invloed van mechanische belasting verfijnt mijnsteen. Bij toevoeging van water gaat door de verfijning van het materiaal capillaire werking optreden. Er ontstaat cohesief gedrag. Er is daarvoor een optimaal vochtgehalte. Indien er nog meer vocht toestroomt, neemt de cohesie weer af. Er ontstaat dan een papperig materiaal, een slurry. Zonder vocht treedt slechts verfijning op, het water voor de cohesie ontbreekt. Uit experimenten is bekend, dat ook de verdichtingsgraad hierbij een rol speelt. Onverdichte en matig verdichte mijnsteen blijft voldoende doorlatend om water af te voeren. Sterk verdichte mijnsteen wordt zeer ondoorlatend, waardoor onder invloed van water verpapping optreedt.

Mijnsteen zal onder water geen of nauwelijks bruggen kunnen vormen, omdat het optimale vochtgehalte ver overschreden is. Voor krachtendragende bruggen behoeft dus niet gevreesd te worden.

Kleisteel bestaande uit Montmorilloniet kan ten gevolge van reacties met van Cl^- -ionen in zeewater uiteenvallen. Kleisteel uit Illiet en Kaoliniet bleek na twee jaren aan zeewater te zijn blootgesteld, niet gedesintegreerd.



5.3. Silex.

Bij de winning van mergel ten behoeve van de fabricage van cement komt Silex vrij. Dit bestaat voor het grootste gedeelte uit vuursteen en berggrind; de rest bevat het zogeheten tau (zandsteen en kalkzandsteen) en soms harde mergel. De dichtheid van tau is laag, ongeveer 1500 kg/m^3 . De vochtopname is groot, want het bevat veel holten. Silex heeft een dichtheid van 2550 kg/m^3 , vergelijkbaar dus met mijnsteen. De wateropname is gering. Deze vindt voornamelijk aan de oppervlakte plaats, in een dun laagje kalksteen. Silex is resistent voor wisselende atmosferische omstandigheden. Het tau is een tamelijk zacht gesteente. Dooi-vorst variaties veroorzaken in het tau een aanzienlijke verwerking en breuk. Uit analyses is gebleken, dat hoe fijner een uitgezeefde fractie Silex is, des te meer tau deze bevat. Een hoog tau gehalte is nadelig voor de sterkte van het totale materiaal. Silex en tau zijn niet hydraulisch. Onder invloed van tau en kalksteen kan Silex zich cohesief gaan gedragen.

5.4. Vergelijking.

In deze paragraaf worden de grootheden van de drie alternatieve materialen nogmaals vermeld in tabel 5.1. Ook worden grootheden vermeld, die beter tot hun recht komen bij een onderlinge vergelijking van materialen, dan wanneer ze als op zichzelf staande getallen worden gegeven.

Het Los Angeles getal, LAG, geeft aan, in hoeverre een materiaal tegen "malen en breken" kan. Naarmate het getal lager is (minder materiaal door zeef C31.5, zie appendix B), des te beter kan het tegen malen. De verbrijzelings factor, VF, geeft aan, in hoeverre het materiaal een langzaam toenemende dynamische belasting kan weerstaan. Naarmate dit getal hoger is, des te beter is het hiertegen bestand. Bij de dynamische verbrijzelingsfactor, DVF, wordt gezien, in welke mate het materiaal tegen slagbelastingen kan. Hoe lager het getal, des te beter is de weerstand tegen slagen en stoten.



Tabel 5.1

	LD slakken	Mijnsteen	Silex	Tau
ρ (kg/m ³)	3250	2550	2550	1500
Hydraulisch	ja, fijn	nee	nee	nee
LAG (%)	20	---	---	---
VF (%)	85	68 - 74	---	---
DVF (%)	10	---	14	70 - 75
Wateropname %	0.1-10	1 - 5	1	25

Uit deze tabel blijkt, dat LD slakken wat sterker en zwaarder zijn, dan mijnsteen en Silex. Tau is een ongeschikt materiaal. Het is ter vergelijking vermeld. Tau komt echter in Silex voor, dus er dient rekening mee te worden gehouden.



5.5. Chemische eigenschappen, het milieu.

In deze paragraaf worden enige chemische eigenschappen vermeld in verband met de gevolgen voor het milieu bij toepassing van de alternatieve materialen. Een systematisch onderzoek van de effecten op het milieu van een aantal alternatieve materialen is gaande en zal binnenkort worden afgerond. Verder zijn nog enige gegevens bekend van onderzoek dat op "ad hoc" basis is uitgevoerd.

Verontreiniging van het milieu in de waterbouw door alternatief materiaal kan drie oorzaken hebben, te onderscheiden in de volgende categorieën. Er is sprake van primaire verontreiniging, indien het materiaal onder invloed van water in voldoende mate stoffen afstaat die samengevoegd of in combinatie met de reeds aanwezige stoffen schadelijk zijn voor het milieu. Hierbij wordt er van uitgegaan dat het begrip "schadelijk" goed omschreven is. Secundaire verontreiniging ontstaat als in de loop der tijd tijdens de opslag aan het alternatieve materiaal vreemde, daar niet toe horende, stoffen zijn toegevoegd, die schadelijk voor het milieu zijn. Binaire verontreiniging is een vorm van secundaire verontreiniging. Hierbij zijn aan het oorspronkelijke materiaal stoffen toegevoegd waardoor een reactie is ontstaan met schadelijke nevenprodukten. Het belang van deze scheiding is, dat primaire verontreiniging inherent aan het materiaal is, terwijl secundaire en binaire verontreiniging veelal voorkomen kan worden, waardoor toepassing toch plaats kan vinden. Verder is van belang te onderscheiden of het water, zoet of zout is en of er sprake is van stilstaand cq. weinig stromend water of dat er voldoende aan- en afvoer is.

5.5.1. LD slakken.

Het RIZA [23] en het Hygiene Insitut des Ruhr Gebiets [24] hebben vastgesteld, dat LD slakken in zout of zoet water nauwelijks zware metalen afscheiden. Er treedt slechts een geringe verhoging van de pH op, (neutraal water zou iets basisch worden) en ook de afgifte van fluor is voldoende klein.



5.5.2. Mijnsteen.

In het kader van de opvulling met mijnsteen van een zandwinput aan de Maas is onderzoek verricht aan mijnsteen. In zoet water met weinig stroming bleek de concentratie sulfaten te stijgen tot waarden uiteenlopend van enige honderden milligrammen tot enkele grammen per liter. Deze concentraties liggen boven de norm voor sulfaten in IMP-oppervlakte water: maximaal 100 mg/l.

5.5.3. Silex.

Silex bestaat voor het grootste gedeelte uit grind. Dit zal nauwelijks aanleiding kunnen geven tot verontreiniging. In hoeverre Tau en Kalksteen het water verontreinigen is onbekend.

5.5.4. Fosforslakken.

Fosforslakken bevatten 3% fluorverbindingen. In zout water levert dit geen problemen op, ook niet door uitwisseling via micro organismen. Het RIZA ontraadt het gebruik in stilstaand of traag stromend zoet water. Voor stromend water is er op dit moment nog geen eenduidig advies. Toepassing zal voorlopig per situatie beoordeeld moeten worden. De aanwezige natuurlijke radioactiviteit is weliswaar hoog maar hij ligt ver beneden de huidige wettelijke normen. Fosforslakken leveren geen relevante bijdrage aan het aanwezige natuurlijke stralingsniveau.



6. Effecten van splijting.

Van de alternatieve materialen is vooral mijnsteen onderhevig aan splijting tengevolge van atmosferische invloeden. Hierdoor verandert de korrelverdeling. Dit heeft invloed op de filterstabiliteit. De splijting van mijnsteen is in [1] conform de RWS normen slechts aan een gedeelte van de korrelverdeling onderzocht. Voor de bepaling van filterstabiliteit moet echter het gedrag van de gehele korrelverdeling bekend zijn. Om toch iets over de invloed van breuk op de doorlatendheid en de filterwerking te kunnen zeggen, wordt een simpel splijtingsmodel opgezet. Dit wordt getoetst aan de experimenten van de bovengenoemde mijnsteenfractie. Met behulp van dit model kan dan het gedrag van de gehele curve worden benaderd.

6.1. Simpel splijtingsmodel.

Er wordt uitgegaan van een zeeffractie tussen twee zeven, in dit geval C31.5 en C45, zie appendix B. Laat de korrels uit deze fractie splijten onder invloed van interne en externe belastingen. Veronderstel dat bij een splijting de korrel in twee gelijke delen breekt. Als de korrels niet al te sterk zijn afgeplat, zijn alle afmetingen van een korrel na drie opeenvolgende splijtingen de helft kleiner geworden. Er zijn acht korrels ontstaan. Deze drie splijtingen worden als één proces beschouwd, al zijn ze dat niet. Dit wordt halvering genoemd. De kans op een halvering, c , hangt van de tijd af, die verstreken is na het aanbrengen van het materiaal en van de mechanische en atmosferische belastingen.

Voor het gemak bij de afleiding wordt nu de kans op splijting gedurende de gehele tijd constant verondersteld. Na die tijd bevindt er zich nog $(1-c)$ -deel van de oorspronkelijke fractie zich tussen de eerstgenoemde zeven; c -deel is gehalveerd, en zou zich tussen de zeven C16 en C22.4 moeten bevinden. Van deze nieuwe fractie zal c -deel inmiddels wederom zijn gehalveerd, dus er resteert $c \times (1-c)$ -deel tussen C16 en C22.4. De rest $c \times c$ -deel zou zich tussen C8 en C11.2 moeten bevinden, maar ook hier zal weer halvering



zijn opgetreden. Dus tussen C8 en C11.2 bevindt zich nog $c \times c \times (1-c)$ -deel. Dit gaat zo door totdat de minimale korreldiameter bereikt is. De fractie, f , na m halveringen bedraagt dus:

$$f(m) = c^m(1-c) \quad (6.1)$$

De fractie na de laatste halvering, n , -er is immers een ondergrens voor de korreldiameters- bedraagt:

$$f(n) = c^n \quad (6.2)$$

Als de oorspronkelijke fractie zich bevond tussen d_{\min} en d_{\max} , dan zijn de diametergrenzen na m halveringen $2^{-m}d_{\min}$ en $2^{-m}d_{\max}$.

De behandeling van een complete zeefcurve gaat analoog. Deel hiertoe eerst de zeefcurve op in allerlei fracties. Hoe een fractie behandeld moet worden, is inmiddels bekend. De hoeveelheid aanwezig materiaal tussen twee zeven kan nu in twee delen worden gesplitst:

1. Oorspronkelijk materiaal. Deze fractie is wat afgenomen.
2. Nieuw materiaal t.g.v. de halveringen. Dit materiaal is na 1,2 of meer halveringen in deze fractie terecht gekomen. Laat f_i de i -de fractie zijn, zie fig.3.

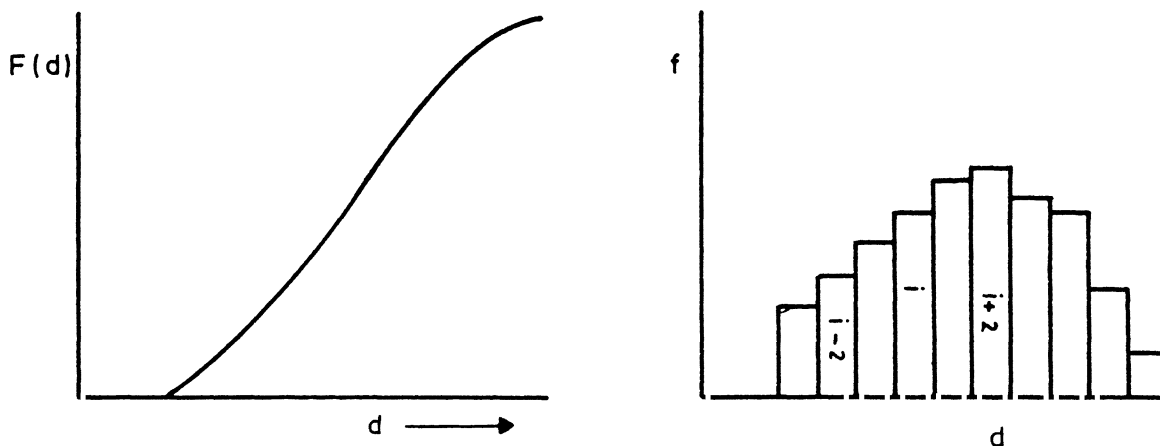


Fig. 3. Zeefcurve en zeeffracties.



De maten van de plaatzeven zijn zo gedimensioneerd, dat na iedere halvering zowel de minimale als de maximale maat twee zeven kleiner geworden is. C90 slaat C63 over maar wordt C45 na een halvering. C63 slaat C45 over maar gaat naar C31.5 na een halvering. Dus de fractie $f_i(t)$ na verloop van tijd bevat

1. $f_i(0) (1-c)$ aan oorspronkelijk materiaal en

2. $\sum_{k=1}^m f_{i+2k}(0) (1-c) c^k$ aan nieuw materiaal, dus:

$$f_i(t) = f_i(0) (1-c) + \sum_{k=1}^m f_{i+2k}(0) (1-c) c^k \quad (6.3)$$

Voor de fracties, die niet meer kunnen halveren worden de bijdragen:

1. $f_i(0)$ aan oorspronkelijk materiaal en

2. $\sum_{k=1}^m f_{i+2k}(0) c^k$ aan nieuw materiaal, dus de totale i -de fractie bedraagt:

$$f_i(t) = f_i(0) + \sum_{k=1}^m f_{i+2k}(0) c^k \quad (6.4)$$

Hierbij moet worden aangetekend, dat in beide gevallen de fracties $f_{i+2k}(0)$ nul kunnen zijn, indien niet van dit soort (grof of fijn) materiaal aanwezig is.

6.2. Verificatie van het model.

Voor de verificatie van het model zijn de gegevens gebruikt van mijnsteen uit "Zollverein" [1]. De gegevens zijn gedigitaliseerd en weergegeven als rondjes in bijlage 6.1. De oorspronkelijke cumulatieve korrelverdeling is getekend als de rechtlijn tussen C31.5 en C45. Er zijn drie lijnen gestippeld. Deze lijnen zijn berekend m.b.v. de simpele theorie voor splijting. De bovenste lijn geldt voor een waarde van $c=0.3$, de middelste voor $c=0.4$ (deze levert de beste resultaten) en de onderste lijn geeft de voorspelling aan voor $c=0.5$. De overeenstemming voor deze mijnsteen is goed. Dit is een indicatie, dat het model redelijk is en dat het



ook toegepast kan worden voor een totale zeefcurve. Ook hiervoor zijn weer de gegevens van de mijn Zollverein gebruikt. De bijbehorende berekening met $c = 0.4$ is grafisch weergegeven in bijlage 6.2. Deze berekening kan niet getoetst worden aan experimentele gegevens. De resultaten staan vermeld in tabel 6.1.

Tabel 6.1

	Onverweerd	Verweerd
D_{15} (mm)	27.6	15.3
D_{50} (mm)	61.2	41.7
$\langle D \rangle$ (mm)	26.3	5.1

De waarden van D_{15} en D_{50} zijn de waarden waarbij 15 respectievelijk 50 procent van de massa door de zeef verdwijnt. $\langle D \rangle$ is de gemiddelde diameter van het materiaal, naar aantal korrels bepaald. Deze volgt uit een vrij lastige berekening, maar uit tabel 6.1 blijkt dat $\langle D \rangle$ kleiner of gelijk is aan D_{15} . Aan het gebruik van D_{15} wordt dan ook de voorkeur gegeven boven D_{50} , als het te ingewikkeld is om $\langle D \rangle$ te bepalen.

6.3. Het gedrag in de tijd.

In het voorafgaande werd de kans op halvering na een zekere tijd gezien. Intuitief wordt reeds aanvoeld, dat naarmate het materiaal langer blootgesteld wordt aan belastingen en vochtigheidsfluctuaties, de kans op splijting groter wordt. In [16] is experimenteel aangetoond, dat de zeefrest op C31.5, z , uit de fractie tussen C31.5 en C45 als volgt van de tijd afhangt:

$$z = \exp(-t/\tau) \quad (6.5)$$

τ is de relaxatietijd van dit proces. De waarde van τ verschilt van mijn tot mijn. Hoe groter τ is, des te gringer is de invloed van



verwerking op dit materiaal. Aangezien z in het simpele splijtingsmodel direkt aan $1-c$ gerelateerd is, zie bijlage 6.3,

$$c(t) = 1 - z = 1 - \exp(-t/\tau), \quad (6.6)$$

is de afleiding in hoofdstuk 6.1 dus eigenlijk niet correct. Er werd daar immers van uitgegaan, dat gedurende de periode, dat de mijnsteen aan splijting veroorzakende omstandigheden was blootgesteld, de kans op splijting, c , constant was. c is dus het tijd gemiddelde van $c(t)$. De waarde is afhankelijk van de beschouwde tijdsduur, a .

$$c(a) = \int_{t=0}^a dt c(t) / \int_{t=0}^a dt = 1 - \frac{\tau}{a} (1 - \exp(-a/\tau)) \quad (6.7)$$

Het verloop van $c(a)$ is eveneens getekend in bijlage 6.3, de onderste curve. In [16] wordt afgeleid dat τ ongeveer twee jaar is. Zodoende wordt voor $c(2) \approx 0.37$ gevonden. Deze waarde komt redelijk overeen met de 0.4, die uit bijlage 6.1 volgt.

In principe moet een ingewikkelder probleem worden opgelost, maar aangezien het model in zijn totaliteit bij gebrek aan experimentele gegevens nog niet geverifieerd kan worden, is van de uitwerking voorlopig afgezien. De waarde van c wordt constant verondersteld.

6.4. Beperkingen van het model.

Een van de aannamen is dat de splijtingskans voor alle diameterwaarden dezelfde is. Slechts voor de kleinste korrels, waarvan experimenteel is vastgesteld, dat deze niet meer splijten, is de breekkans gelijk aan nul gesteld. In een reëler model zou de splijtingskans langzaam met de diameter moeten afnemen. Ook van deze uitbreiding is voorlopig afgezien.



De zeefcurve werd ingedeeld in intervallen, begrensd door de waarden van de C-zeven. De verdelingsfunctie van de massa mondt daardoor uit in een grof histogram. Als de verdelingsfunctie benaderd kan worden door middel van een continu differentieerbare functie, wordt de berekende zeefcurve minder hoekig; deze hoekigheid viel reeds in bijlage 6.1 op.

Het nu afgeleide model gaat uit van een aantal benaderingen. Desondanks is het echter wel geschikt voor simpele demonstraties om kwalitatieve voorspellingen te ondersteunen.

6.5. Effect op de doorlatendheid.

De in hoofdstuk 4.4 gebruikte doorlatendheidsformule (4.19) wordt hier toegepast. Door verwerking treden twee effecten op: de gemiddelde diameter van het materiaal en de porositeit nemen af. Beide verlagen de doorlatendheid. Vooral omdat het aanvangsmateriaal grof is, treedt er turbulente stroming op, terwijl na verwerking de stroming van het overgangstype kan zijn. Dit maakt een vergelijking in de vorm van doorlatendheden niet simpel. Daarom worden de filtersnelheden gegeven. Dit is de gemiddelde snelheid, gemeten via het debiet. De aannames voor de vergelijking en de resultaten staan in tabel 6.2.

Tabel 6.2

	Onverweerd	Verweerd
p	5.0	9.7
U	3.3	5.0
n	0.35	0.3
$\langle D \rangle$ (mm)	26.3	5.1
i	0.5	0.5
v_f (mm/s)	52	1.2



De filtersnelheid wordt een factor 4 lager. De verhouding tussen de doorlatendheid van de toplaag en de onderlaag verandert dus eveneens sterk. De waarde van de turbulente doorlatendheid wordt met behulp van de formules (4.19), (4.21) en (4.22) bepaald. Voor onverweerde mijnsteen wordt gevonden:

$$v = k_t i^{0.51} \quad (6.8)$$

$$k_t = 0.075 \text{ (m/s)}$$

en voor verweerde mijnsteen:

$$v = k_t i^{0.75} \quad (6.9)$$

$$k_t = 0.024 \text{ (m/s)}$$

6.6. Effect op de filterwerking.

Ook voor de filterwerking zijn er verschillen. Omdat het materiaal is verfijnd, is het filter in staat om bij hogere verhangen de basis te beschermen, of anders gesteld kan fijner basismateriaal gebruikt worden bij een gelijkblijvend kritiek verhang. De effecten worden voor stroming loodrecht op en parallel aan het grensvlak separaat behandeld.

6.6.1. Effect op de loodrechte filterwerking.

Breng onverweerde mijnsteen aan op een basis bestaande uit zand met een d_{50} van 0.2 mm. De verhouding $n D_{15}/d_{50}$ bedraagt dan ongeveer 48. Het bijbehorende kritieke verhang is ruwweg 1. Voor verweerde mijnsteen wordt de verhouding ≈ 27 , met een onveranderd kritiek verhang.



6.6.2. Effect op de parallelle filterwerking.

Er wordt hetzelfde basismateriaal gebruikt, met een d_{50} van 0.2 mm. Voor de berekening van het kritieke parallelle verhang wordt gebruikt gemaakt van formule (4.10), zie bijlage (4.10). Het parallelle kritieke verhang is dan ongeveer 0.05. Na de verwerking is de waarde van D_{15} een factor twee kleiner geworden, zodat het parallelle kritieke verhang dan is opgelopen tot 0.1. Bij onverweerd materiaal zou een veel grover basis materiaal gebruikt moeten zijn.

6.7. Effect op de uitstroming door de spleten.

Voorkomen dient te worden dat de opvullaag (het filter) tussen de spleten van de steenzetting kan verdwijnen. Dit legt zekere eisen op aan de korrelgrootte van het filtermateriaal. Indien hieraan voldaan is voor onverweerd materiaal, kan door de verfijning de korreldiameter zodanig veel kleiner worden, dat het materiaal moeiteloos kan ontsnappen van onder de stenen. Omdat door de verwerking de gradatie van het materiaal groter wordt, kan er afpleistering optreden. Alleen uit het bovenste gedeelte van de opvullaag stromen de kleinste korrels weg. De grote blijven achter, zodat een soort afdekkende laag ontstaat, waardoor de kleine korrels uit dieper gelegen lagen niet meer passeren. De interne stabiliteit moet dan in feite voor de bescherming zorgen.

6.8. Effect op de interne stabiliteit.

Door de verwerking wordt de gradatie van het materiaal steeds groter. Hierdoor neemt de kans op verlies aan interne stabiliteit toe. Of dit nadelig is, kan het best grafisch getoetst worden, zie bijlage 6.4. Voor diameters grover dan C31.5 loopt de zeefcurve van het verweerde materiaal in het meta-stabiele gebied. Omdat het hier om grove korrels gaat is er bij deze graad van verwerking nog geen gevaar voor verlies aan interne stabiliteit.



7. Hydraulische randvoorwaarden

Dit hoofdstuk heeft niet als oogmerk het probleem van de belastingen op te lossen. Het wordt aan de begeleidingsgroep "Steenzettingen" overgelaten hierover een beslissing te nemen. Er wordt slechts gebruik gemaakt van de kennis op dit gebied, zoals deze bijvoorbeeld in [17] is uiteengezet.

7.1. Verhangen parallel aan het grensvlak.

Het naar beneden gerichte verhang parallel aan het talud in de onderlaag is een functie van de golfhoogte H , de lek lengte, λ , en de taludhelling β :

$$i_p / \sin \beta = f(H/\lambda) \quad (7.1)$$

met:

$$\lambda = \sin \beta \sqrt{(bS)} \sqrt{(k/k')} \quad (7.2)$$

b is de dikte van de onderlaag, S de dikte van de stenen, k de doorlatendheid van de onderlaag, k' die van de stenen. De redactie van vergelijking (7.2) is iets anders dan gebruikelijk. Deze vorm heeft als voordelen dat onmiddellijk duidelijk wordt dat λ een lengtemaat is (de wortel uit het produkt van twee lengtematen) en dat de verhouding van de doorlatendheden slechts van belang is, en dus niet hun absolute waarde. Voor $H/\lambda > 4$ wordt $i_p / \sin \beta \approx 1$. De golfhoogte is dan niet meer van belang. De lek lengte bedraagt enige decimeters, dus voor golven van een meter of hoger geldt dat:

$$i_p \approx \sin \beta \quad (7.3)$$



In het algemeen is de ontwerpgolf groter dan een meter, dus als bovengrens voor het parallelle verhang kan $\sin \beta$ worden aangehouden. De naar boven gerichte component (de helling op) kan nog wat groter zijn. Voor de korrelstabiliteit is deze component van weinig belang. De zwaartekracht werkt bij deze transportrichting tegen, terwijl bij transport het talud af de zwaartekracht meewerkt.

7.2. Verhangen loodrecht op het grensvlak.

Over het verhang loodrecht op het grensvlak is minder bekend. Bij metingen werd de aandacht gericht op de verhangen in het filter [18]. De verhangen in het zand van een dijk zijn hier echter bepalend voor het transport. Uit de metingen valt op te maken dat er in de filterlaag een aanzienlijke demping optreedt van de verhangen. Het verhang loodrecht op het grensvlak in het filter bedraagt ruwweg 0.05. Uit de verhouding van de doorlatendheid van het zand ($k_z \approx 3 \times 10^{-4}$ m/s) en die van de filterlaag ($k_f \approx 0.1$ m/s) zou een vertikaal verhang volgen van ongeveer 15. Dit is wel wat veel, om geloofwaardig over te komen.

Het loodrechte verhang is voornamelijk niet stationair. Uit berekeningen met een golfindringings model is bekend dat de demping van niet stationaire verhangen in zand aanmerkelijk is. De verhangen zijn dan juist bovenin nabij de grenslaag basis-filter maximaal.

Uit [19] is bekend, dat het loodrechte verhang ruwweg 0.3 bedraagt. De beïnvloeding op het parallelle verhang is gering, zie hoofdstuk 4.2.3.



7.3. Golfklappen.

Door het breken van golven op het talud ontstaan golfklappen. De intensiteit van deze klappen wordt aangegeven door middel van drukken, P [17]:

$$P = \gamma_w r H, \quad (7.4)$$

met

$$\gamma_w = \rho_w g \quad (7.5)$$

waarbij γ_w de volumieke kracht van water is, H de golfhoogte en r een constante (ruwweg 3), ρ_w de dichtheid van water en g de versnelling van de zwaartekracht. De afhankelijkheid van r van de taludhelling wordt hier verwaarloosd. De golfhoogte varieert voor beschut open water van 1.3 m tot ruwweg 5 m voor buiten water.



8. Effecten t.g.v. verkitting.

Onder invloed van water worden de LD slakken samen gekit door de fijne fracties. Het materiaal kan daardoor trek opnemen en druk weerstaan. Voor de interne stabiliteit van het filter is dit gunstig, maar als het filter niet meer bijzakt in een eventuele erosiegeul, is dit juist ongunstig.

8.1. Doorlatendheid.

De invloed van verkitting op de doorlatendheid hangt sterk af van de aanwezige hoeveelheid fijn materiaal. Indien weinig fijn materiaal aanwezig is, zullen de wat grotere slakken aaneengebonden zijn door de kleinere. De poriën zullen in hun algemeenheid open blijven voor waterdoorstroming, zodat de doorlatendheid nauwelijks beïnvloed zal worden. Indien echter veel fijn materiaal aanwezig is en de poriën van de grote slakken opgevuld zijn met fijn materiaal, kan de doorlatendheid door de verkitting afnemen. Metingen hiervan zijn niet mogelijk, omdat door de doorlatendheidsmeting altijd verkitting zal optreden.

8.2. Filterwerking.

Het effect bij filterwerking wordt geïllustreerd met figuur 4.

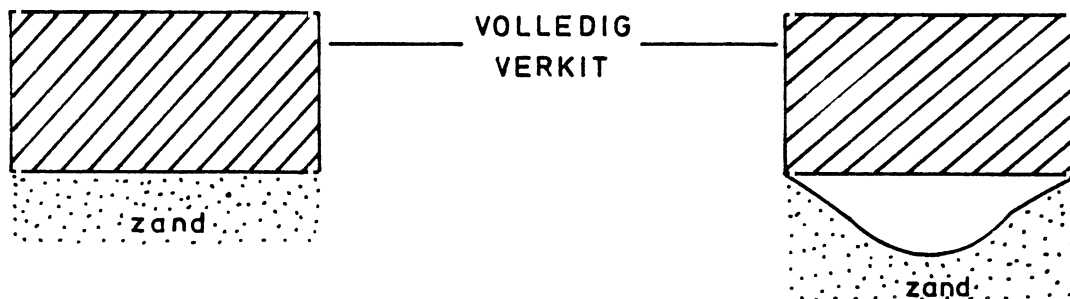


fig. 4. De effecten van verkitting bij erosie.



Door de verkitting zal het filtermateriaal star worden. Indien nu erosie van de basis optreedt, bijvoorbeeld zand wordt getransporteerd, dan kan het filter in zijn totaliteit veel moeilijker bijzakken, dan wanneer er geen verkitting zou zijn opgetreden. De mate waarin het filter de basis volgt, hangt af van de druksterkte van het materiaal.

8.3. Voorbeeld.

Dit voorbeeld is bedoeld om te illustreren, wat er bij voldoende grote druksterkte bij verkitting van het filter kan optreden. Het staat niet vast dat de berekende waarden in werkelijkheid ook zullen worden vastgesteld. De aannames zijn daarvoor niet voldoende gefundeerd. Laat door het filter water stromen. De parallel optredende verhangen zijn ongeveer gelijk aan de sinus van de helling [17] dus:

$$i_p = \sin \beta. \quad (8.1)$$

kanaaltje nu een gedeelte van het filter af, en bepaal het volume, V , dat per seconde door dit gedeelte stroomt:

$$V = A q = A k_t i_p^\alpha. \quad (8.2)$$



A is de oppervlakte van de doorsnijing, q het specifieke debiet, k_t de turbulente doorlatendheid en i het verhang. Laat bijvoorbeeld het deel 0.25 m hoog zijn en 1 m breed. Bij onverweerde mijnsteen, zie hoofdstuk 6, is $k_t \approx 0.075 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en $\alpha \approx 0.5$. Derhalve is $V \approx 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$. Neem nu aan dat het filtermateriaal volledig ondoorlatend is. Tengevolge van erosie vormt zich een kanaaltje in het zand, direkt onder het filter. Door de verkitting zakt het filter niet bij. Dit kanaaltje zal, onder aanname dat het debiet niet verandert, het volume V afvoeren. De vraag is nu: "hoe groot moet dit kanaaltje zijn, zodat de snelheid in het kanaaltje bij de bodem voldoende laag is, dat er geen zand meer wordt getransporteerd?". Ga uit van turbulente stroming. Achteraf moet nog gecontroleerd worden of de stroming inderdaad turbulent is. De gemiddelde snelheid in het kanaaltje wordt beschreven met:

$$\bar{v} = C \sqrt{Ri}, \quad (8.3)$$

waarbij R de hydraulische straal van het kanaaltje is en C de coefficient van Chézy. C wordt gegeven door:

$$C = 18 \log (6R / (\mu + \delta/7)) ; \quad (8.4)$$

μ is de ruwheid van de bodem. Deze wordt gelijkgesteld aan $3d_{50}$; δ is de dikte van de visceuse sublaag. Deze is grof benaderd met 1 mm. Het volume, dat door dit kanaaltje stroomt is:

$$V_k = h^2 v \quad (8.5)$$

Het kanaaltje wordt geschematiseerd door middel van een rechthoekig profiel van h hoog en breed. De hydraulische straal R is dan:

$$R \approx h/4 \quad (8.6)$$



De relatie tussen de kritieke schuifspanningssnelheid v_* en de gemiddelde snelheid, \bar{v} , in het kanaaltje luidt [8]:

$$\bar{v} = \frac{C}{\sqrt{g}} v_* \quad (8.7)$$

met

$$v_* = \{ \psi_S \Delta g d_{50} \}^{1/2} \quad (8.8)$$

g is de versnelling van de zwaartekracht. Δ is gegeven door formule (4.9); ψ_S is de Shieldsparameter, zie bijlage 8.1; d_{50} is de mediane diameter van het zand.

Eis nu dat het volume, dat door het gedeelte van het filter stroomde, voordat verkitting optrad thans geheel door het kanaaltje stroomt:

$$V = V_k \quad (8.9)$$

Door substitutie van de formules (8.4), (8.5), (8.6), (8.7) en (8.8) in (8.9) volgt hieruit:

$$V = 18h^2 \log \left\{ \frac{1.5h}{\mu + \delta/7} \right\} \sqrt{\psi_S \Delta d_{50}} \quad (8.10)$$

h is de onbekende in deze vergelijking; d_{50} bedraagt 0.2 mm, zodat $\psi_S = 0.065$; $\Delta = 1.65$.



Bij oplossing van (8.10) wordt voor de waarde van h ongeveer 20 cm gevonden. Dit houdt in, dat als deze benadering mag worden toegepast, er een geul zich zal vormen in het zand van 20 cm diep en breed. Ter controle wordt het Reynoldsgetal bepaald van deze stroming. De gemiddelde snelheid wordt berekend uit vergelijking (8.5); $\bar{v} = 0.25$ m/s. De hydraulische straal van het kanaal, $R = 0.05$ m, zodat $Re \approx 10^4$. Bij deze waarde is de stroming turbulent, dus de benadering van Chézy mag in dit geval gemaakt worden.

Bij deze berekening dient opgemerkt te worden, dat het een "worst case" situatie betreft. Pas in exorbitante gevallen zal het filter geheel ondoorlatend zijn. Bij slechts een geringe doorlatendheid hoeft niet al het water door het kanaaltje te worden afgevoerd. Filter en basis zijn dan nog voldoende doorlatend, om ook in de drainerende taak bij te dragen. De aanname van slechts één kanaaltje per strekkende meter is volkomen willekeurig. Er is bovendien geen rekening gehouden met een taludhelling. Aan de buitenzijde kan niets van dit kanaaltje opgemerkt worden, omdat het verkitte filter geen zakking vertoont. Ook bij gedeeltelijke verkitting kan extern niet beoordeeld worden, of er erosie van de dijk is opgetreden.

8.4. Golfklappen.

De vraag is gerezen of golfklappen verkitting kunnen verbreken. Het is zinnig om naast elkaar te zetten de druksterkte van bijvoorbeeld slakken en de drukken afkomstig van golfklappen. Deze waarden staan in bijlage 8.2. Hieruit blijkt dat de druksterkte groter is dan de golfdrukken, dus de verkitte lagen kunnen niet gebroken worden door de golfklappen.



8.5. Vertikale korrelspanning.

Er wordt een benadering gemaakt voor de verticale korrelspanning, uitgaande van een laag verzadigde LD-slakken van 0.6m dik, met daarbovenop een laag stenen van 0.2m dik (zie figuur 5).

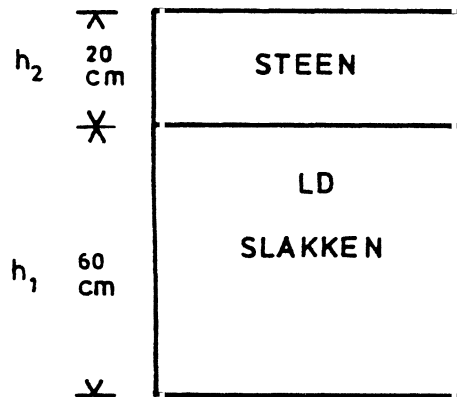


fig. 5. Schets van de opbouw van het pakket.

Uitgaande van een droge dichtheid van 3200 kg/m^3 en een porositeit van 0.4 wordt de natte dichtheid 2300 kg/m^3 . De korrelspanning σ_v , is dan:

$$\sigma_v = g (\rho_{\text{verz}} - \rho_w) h_1 + g \rho_{\text{beton}} h_2 \quad (8.11)$$

ρ_{verz} is de dichtheid van de verzadigde LD-slakken, ρ_{beton} de dichtheid van beton, h_1 de dikte van de laag slakken en h_2 de dikte van de stenen. Met $\rho_{\text{beton}} = 2000 \text{ kg/m}^3$ bedraagt σ_v ongeveer 11 kN/m^2 . Ter vergelijking: de druksterkte van een soort LD-slakken bedraagt ruwweg 500 kN/m^2 , een factor 50 sterker.



9. Zeefeisen voor stabiel materiaal.

9.1. Probleemstelling.

Zoals reeds in hoofdstuk 3 is uiteengezet lijken er tegenstrijdige eisen te zijn voor de karakteristieke diameters van het filtermateriaal.

1. Het moet voldoende klein zijn om de basis te kunnen beschermen.
2. Het moet voldoende groot zijn om niet tussen de stenen door naar buiten te kunnen spoelen.

Voorkomen moet worden, dat deze eisen daadwerkelijk tegenstrijdig zijn.

9.1.1. Illustratie.

In het onderstaande worden schematisch twee tegenstrijdige eisen gecombineerd. Uit de eerste eis volgt dat de diameters van de korrels kleiner moeten zijn dan een zekere waarde. De zeefcurve van het materiaal moet dus links van de (arbitraire) rechte lijn liggen, zie figuur 6a.

De tweede voorwaarde vereist dat de zeefcurve van het filter rechts van de (even zo arbitraire) rechte komt te liggen. De geldige gebieden zijn aangegeven met "in orde", de ongeldige gebieden met "onvoldoende". De "in orde" gebieden zijn gearceerd.

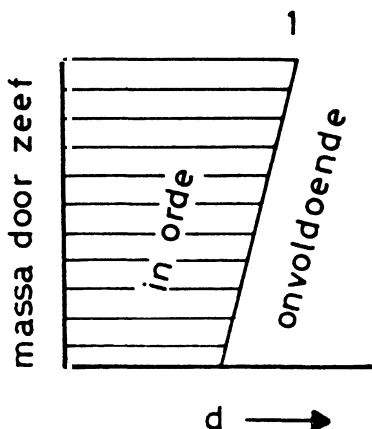


Fig. 6a. Eis 1.
vanwege basis

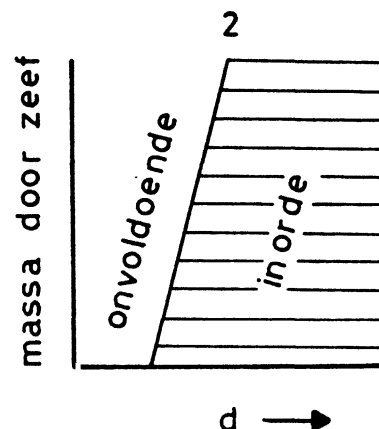


Fig. 6b. Eis 2.
vanwege filter



Er moet echter aan beide eisen worden voldaan. Er zijn dan drie mogelijkheden:

- a). De lijn van eis 2 ligt links van die van eis 1. De gebieden "in orde" overlappen elkaar. In dit overlappende gebied wordt aan beide eisen voldaan, dus dit gebied bakent geldige zeefcurves af, zie figuur 7a.
- b). De lijn van eis 2 valt samen met die van eis 1. Juist op deze lijnen overlappen de gebieden elkaar; er wordt daar aan beide eisen voldaan. Dit soort situaties dient vermeden te worden omdat ze kritiek zijn. Bij geringe afwijkingen van de vereiste rechte wordt de situatie instabiel. Het diagram staat in figuur 7b.
- c). De lijn van eis 2 ligt rechts van de lijn van eis 1. De gebieden overlappen elkaar niet meer. Nergens wordt aan beide eisen voldaan. De eisen zijn dus tegenstrijdig, zie figuur 7c.

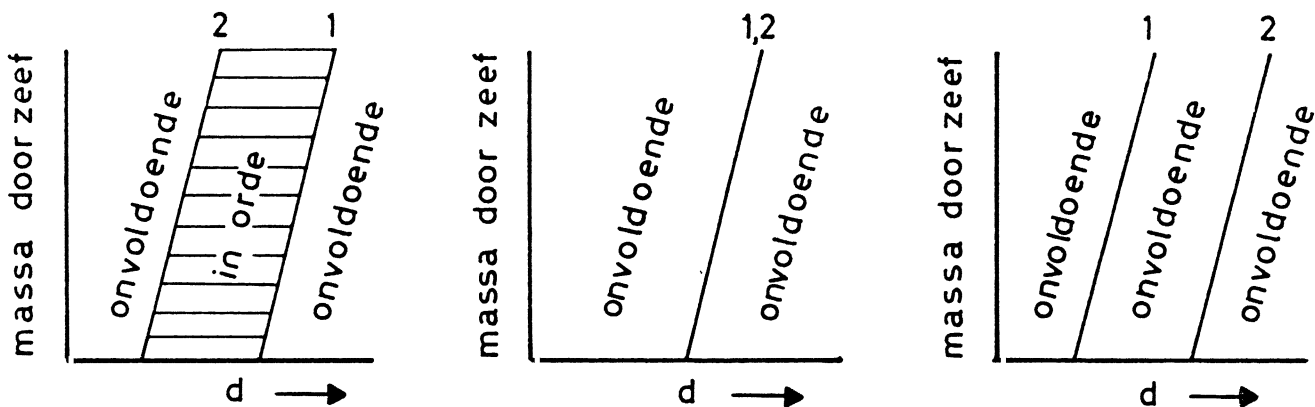


Fig. 7a. Overlappend. Fig. 7b. Kritiek. Fig 7c. Tegenstrijdig.

Indien de gevallen b en c optreden, kan er met slechts één tussenlaag geen stabiele onderlaag worden geconstrueerd. Met twee tussenlagen is dit dan wellicht wel mogelijk. Dit wordt op dezelfde manier onderzocht als bij één tussenlaag.



9.2. Ontwerp verhang.

De in hoofdstuk 7 geformuleerde verhangen worden gebruikt als ontwerp verhangen. Aangezien geen analytische oplossing voor de zeefbanden beschikbaar is, wordt de afbakening van de zeefband grafisch geïllustreerd. Er is geen veiligheidsfactor ingebouwd. Indien dit toch gewenst is, gaat dit het eenvoudigst door het ontwerp verhang te delen door de gewenste veiligheidsfactor.

Bij steenzettingen treden gecombineerde parallelle en loodrechte verhangen op. Daarnaast zijn de verhangen gedeeltelijk niet-stationair. In hoofdstuk 4.2.4 wordt aangetoond, dat het effect van cyclische verhangen nog niet geheel duidelijk is. De schrijver dezes is meer geneigd om er van uit te gaan dat het kritieke verhang door de cyclische effecten zal toenemen. Er wordt hier als compromis aangehouden, dat de kritieke verhangen onveranderd blijven. De loodrechte verhangen in het zand zijn maximaal 0.3. Omdat de waarde van deze verhangen minstens een factor drie kleiner is dan het loodrechte kritieke verhang, volstaat het om het parallelle verhang als maatgevend te beschouwen. De invloed van het loodrechte verhang op het parallelle verhang wordt in hoofdstuk 4.2.3 beschreven.

Ook de taludhelling heeft invloed op de waarde van het parallelle kritieke verhang, zie hoofdstuk 4.2.5. Hiermee en met de mediane korreldiameter van de basis wordt rekening gehouden bij de bepaling van de zeefbanden. Bij de invloed van de taludhelling wordt een ϕ -waarde van 1.0 radiaal aangenomen. Uitgaande van het ontwerp verhang kan nu via de diverse formules de verhouding D_{15}/d_{50} worden berekend. Om het rekenwerk te vereenvoudigen waren de constructie grafieken getekend. Hun werking is in hoofdstuk 4.2.6 uiteengezet. De laatste variabele is de diameter van de openingen in de toplaag. Deze openingen hangen sterk van de gebruikte steensoort af. Hierbij moet aan spleten van ongeveer 2 mm gedacht worden. Basalt of basaltachtige toplagen vertonen meestal wat grotere gaten van 5 mm tot ongeveer 25 mm.



9.3. Onderzochte situaties

Er worden taludhellingen gebruikt, n.l, 1:2, 1:3 en 1:4. Daarnaast wordt er van twee verschillende soorten zand uitgegaan: $d_{50} = 0.2$ mm en $d_{50} = 0.82$ mm. Voor de toplaag zijn er ook nog drie mogelijkheden: spleten van 2 mm, een dichte laag met gaten van 5 mm en een open laag met gaten van 25 mm. Er zijn dan achttien combinaties; deze zijn aangegeven in tabel 9.1.

tabel 9.1.

m	talud			d_{50} (mm)		toplaag gaten (mm)		
	1:2	1:3	1:4	0.2	0.82	2	5	25
1	x			x		x		
2	x			x			x	
3	x			x				x
4	x				x	x		
5	x				x		x	
6	x				x			x
7		x		x		x		
8		x		x			x	
9		x		x				x
10		x			x	x		
11		x			x		x	
12		x			x			x
13			x	x		x		
14			x	x			x	
15			x	x				x
16			x		x	x		
17			x		x		x	
18			x		x			x

Achtereenvolgens worden deze mogelijkheden gezien.



9.4. Berekening zeefband.

9.4.1. De eerste eis.

Bereken met de reductie factoren voor helling en gecombineerde verhangen een totale reductiefactor, $F (< 1)$. Als het kritieke verhang bij een horizontaal grensvlak zonder verticale stroming i^c bedraagt, dan verminderen de helling en de loodrechte stroming dit verhang tot $F i^c$. Het optredende verhang, i , mag dan $F i^c$ niet overschreiden, met andere woorden:

$$i < F i^c \quad (9.1)$$

Het kritieke verhang moet dan bij de dimensionering van het filter gelijk zijn aan:

$$i^c < i/F \quad (9.2)$$

Uit het kritieke verhang volgt de waarde van D_{15} bij een (aangenomen) porositeit van het filtermateriaal en een waarde van d_{50} . De gradatie van het filtermateriaal ligt dan nog niet vast, evenals de vorm van de zeefcurve. Hiervoor moeten eveneens weer aannamen worden gemaakt. Indien er geen aannamen zouden worden gemaakt, dan zouden er nog meer mogelijkheden dan de huidige twaalf moeten worden nagegaan. Derhalve wordt arbitrair vastgelegd dat de zeefcurve logaritmisch verloopt. Er zullen twee korrelverdelingen behandeld worden, een brede en een wat smallere. Uit de theorie volgen de karakteristieke diameters. Om de cumulatieve korrelverdelingen snel te kunnen tekenen, is het handig als de minimale en maximale diameters bekend zijn.

In figuur 8 is aangegeven hoe voor een bepaalde korrelverdeling uit de zeefcurve deze waarden bepaald kunnen worden. Door de cumulatieve korrelverdeling op daartoe geschikt grafiek papier uit te zetten tegen de diameter kan meestal een recht middenstuk in de cumulatieve verdeling worden aangetroffen.



Door extrapolatie hiervan worden de waarden van de minimale en maximale diameter gevonden. Voor de berekening zijn formules afgeleid.

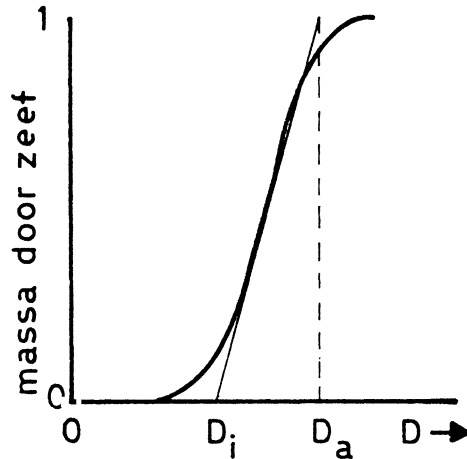


fig. 8 Bepaling van de minimale en maximale diameter.

Omdat de cumulatieve korrelverdeling logaritmisch met de diameter verloopt, geldt voor de fractie $P(x)$ door de zeef met zeefmaat x :

$$P(x) = \{ \ln(x / D_i) \} / \{ \ln(D_a / D_i) \} \quad (9.3)$$

en

$$D_{90}/D_{10} = (D_a / D_i)^{0.8} \quad (9.4)$$

D_i en D_a zijn de minimale en maximale diameters van dit geschematiseerde materiaal. Uit (9.4) volgt dat:

$$D_a = (D_{90}/D_{10})^{1.25} D_i \quad (9.5)$$

Via het kritieke verhang wordt D_{15} bepaald. Vul nu in dat $P(D_{15})=0.15$ in formule (9.3). Daaruit volgt dat:

$$D_i = D_{15} (D_{10} / D_{90})^{0.1875} \quad (9.6)$$



De berekening van D_{15} gaat schematisch als volgt:

1. Bepaal uit (4.18) de invloed van de taludhelling en combineer deze met de correctie voor gecombineerde verhangen.
2. Stel hieruit het parallelle kritieke verhang samen.
3. Bereken met (4.10) de waarde van D_{15} .
4. Bepaal met (9.6) en (9.5) D_i en D_a . De zeefcurve volgens eis 1 kan dan getekend worden.

Deze opzet maakt een geautomatiseerde berekening van de zeefcurves mogelijk. Voorlopig is hiervan nog afgezien. De figuren 6a kunnen nu in principe getekend worden.

9.4.2. De tweede eis.

Voor de tweede eis moet gezien worden of het filtermateriaal voldoende grof is, om niet door de gaten tussen de stenen te kunnen spoelen. De stenen vormen op zich geen filter, de laag is slechts één steen dik. Het is een eerder afdekkende laag, die op een geotextiel lijkt. Er zijn nu diverse eisen ter voorkoming van uitspoeling te formuleren, in opvolgende mate van strengheid:

1. De kleinste korreldiameter van het filter moet groter zijn dan de grootste gaten tussen de stenen.
2. De D_{15} van het filter moet groter zijn dan de grootste gaten tussen de stenen.
3. De gemiddelde diameter van de filterkorrels moet groter zijn dan de grootste gaten tussen de stenen.
4. De grootste korreldiameter van het filter moet groter zijn dan de grootste gaten tussen de stenen.

Wordt een vergelijking gemaakt met de criteria voor de geotextielen, dan resteren er twee mogelijkheden, te weten 2 en 4. Bij geotextielen wordt een verhouding gezien tussen de O_{98} en een D_x . O_{98} is die grootte van de gaten, waarvoor geldt dat 98% van de gaten kleiner is dan O_{98} . De twee criteria maken onderscheid tussen de gradatie van het te beschermen materiaal.



Onder dynamische belastingen en een smalle korrelverdeling geldt [20] dat:

$$O_{98} / D_{15} < 1.0 \quad (9.7)$$

Hierbij wordt toegestaan dat maximaal 15 volumepercent van het filter uitspoelt.

Een materiaal, dat een brede korrelverdeling heeft, kan afpleistering vertonen. Bij afpleistering treedt slechts transport op van het fijne materiaal. Voor de korrels met kleine diameters kan de kritieke schuifspanningssnelheid reeds overschreden zijn, terwijl voor de grote korrels dit nog niet het geval is. De grote korrels blijven daarom achter in de constructie. Het oorspronkelijke nog niet uitgespoelde materiaal wordt dan afgedekt met een laagje, dat uit grote korrels bestaat. Dit laagje kan als filter beschouwd worden voor het onderliggende onaangetaste materiaal. Dit is nog verduidelijkt in figuur 9.

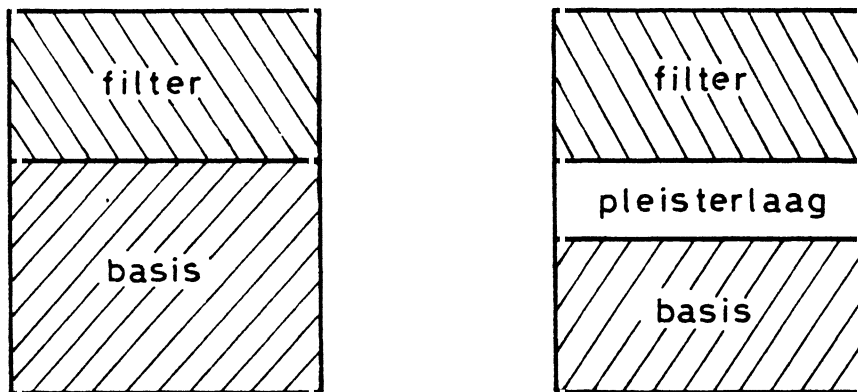


Fig. 9. Afpleistering.

Indien het filtermateriaal voldoende gegradeerd is, (een brede korrelverdeling) zodat afpleistering kan optreden, wordt als eis gesteld dat:

$$O_{98} / D_{85} < 1.0 \quad (9.8)$$



Voldoende gegradeerd betekent in het algemeen dat de gradatie $p > 10$.

Uit deze twee vergelijkingen blijkt dat het voordelig is om uit te gaan van een grote gradatie, $p > 10$, maar de kans op interne instabiliteit en ontmenging neemt hierdoor toe. Met de relaties (9.7) of (9.8) kan eveneens een zeefcurve getekend worden, uitgaande van een in hoofdstuk 9.5 en 9.6 aangenomen gradatie. Dit wordt een curve volgens figuur 6b. De combinatie van deze twee curves levert of een geldige zeefband, of slechts ongeldige gebieden. Omdat de curves parallel lopen, kan al direct door vergelijking van de waarden van de D_{15} afgeleid worden of er een geschikte zeefband getekend kan worden of dat er sprake is van strijdige eisen. Er is een zeefband als de D_{15} van de eerste eis (bescherming basis) groter is dan die van de tweede (voorkoming van uitspoeling). In alle andere gevallen is er geen zeefband, waarin aan beide eisen kan worden voldaan.

Voor smalle korrelverdelingen wordt een D_{15} vastgesteld. Voor brede korrelverdelingen is dit de D_{85} , zie relatie (9.8). Deze wordt omgerekend naar D_{15} via:

$$D_{15} = (D_{10} / D_{90})^{0.875} D_{85} \quad (9.9)$$

Voor D_{90} wordt de geschatte grootte van het grootste gat genomen.

9.5. Zeefband bij smalle korrelverdelingen.

Voor de gradatie wordt een arbitraire waarde van 3.5 aangehouden. De waarde van de porositeit is niet bekend. Als waarde wordt 0.37 gebruikt. Dit is een gemiddelde voor de maximale droge dichtheid en los gestort materiaal. Omdat de gradatie kleiner dan 10 is, zal er geen afpleistering optreden. Daarom moet gebruik gemaakt worden van criterium (9.7). Hieruit volgt dat:

$$D_{15} > 5 \text{ of } 25 \text{ mm} \quad (9.10)$$



De waarden van D_{15} staan voor beide eisen in tabel 9.2.

tabel 9.2.

m	F	i^c	Eis 1			Eis 2		
			D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)	D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)
1	0.52	0.87	1.8	1.5	7.0	2.0	1.6	7.6
2	0.52	0.87	1.8	1.5	7.0	5.0	3.9	19.0
3	0.52	0.87	1.8	1.5	7.0	25.0	20.0	95.0
4	0.52	0.87	4.9	3.8	17.0	2.0	1.6	7.6
5	0.52	0.87	4.9	3.8	17.0	5.0	3.9	19.0
6	0.52	0.87	4.9	3.8	17.0	25.0	20.0	95.0
7	0.63	0.50	2.7	2.2	10.5	2.0	1.6	7.6
8	0.63	0.50	2.7	2.2	10.5	5.0	3.9	19.0
9	0.63	0.50	2.7	2.2	10.5	25.0	20.0	95.0
10	0.63	0.50	4.9	3.8	17.0	2.0	1.6	7.6
11	0.63	0.50	4.9	3.8	17.0	5.0	3.9	19.0
12	0.63	0.50	4.9	3.8	17.0	25.0	20.0	95.0
13	0.69	0.35	3.6	2.9	13.8	2.0	1.6	7.6
14	0.69	0.35	3.6	2.9	13.8	5.0	3.9	19.0
15	0.69	0.35	3.6	2.9	13.8	25.0	20.0	95.0
16	0.69	0.35	4.9	3.8	17.0	2.0	1.6	7.6
17	0.69	0.35	4.9	3.8	17.0	5.0	3.9	19.0
18	0.69	0.35	4.9	3.8	17.0	25.0	20.0	95.0

Het nummer m refereert naar de condities, zoals deze vermeld zijn in tabel 9.1.

De cumulatieve korrelverdeling volgens de eerste eis is getekend, samen met de criteria van Lubochkov in bijlage 9.1. De interne stabiliteit is verzekerd. De diameter is in dimensieloze eenheden ongerekend. Dit vereenvoudigt de mogelijkheid tot vergelijken van twee verschillende korrelverdelingen.



Door te eisen dat D_{15} volgens eis 2 (voorkom uitspoeling tussen de stenen) kleiner moet zijn dan D_{15} volgens eis 1 (voorkom erosie van de basis) kan de filterlaag aan beide voorwaarden voldoen.

Bij inspectie van tabel 9.2 valt op dat slechts bij m is 4, 7, 10, 13 en 16 aan beide voorwaarden kan worden voldaan. Dit houdt in dat een éénlaagsfilter voldoet onder een zetting met spleten van 2 mm. De zeefbanden voor de filterlaag zijn getekend in de bijlagen 9.2 t/m 9.4. In de overige gevallen blijkt echter dat D_{15} van eis 1 altijd kleiner is dan de D_{15} volgens eis 2. Er kan dus geconcludeerd worden dat een éénlaagsfilter met een smalle korrelverdeling niet voldoet tussen een laag gezette stenen, waarvan de 0_{98} groter is dan 5 mm en een basis materiaal met een d_{50} kleiner dan 0.82 mm. Wel stabiele combinaties zijn mogelijk als de d_{50} van het basismateriaal groter is dan ongeveer 1 mm en/of de 0_{98} van de zetting kleiner is dan 4.5 mm. Bij spleten van 2 mm voldoet dus een éénlaagsfilter wel.

9.6. Zeefband bij brede korrelverdelingen.

De waarde van de gradatie wordt arbitrair vastgesteld op 16. De waarde van de porositeit wordt analoog met het vorige hoofdstuk vastgelegd op 0.3. De gradatie is groter dan 10, daarom kan er afpleistering optreden, dus er wordt nu van voorwaarde (9.8) gebruik gemaakt:

$$D_{85} > 5 \text{ of } 25 \text{ mm} \quad (9.11)$$

Met formule (9.9) wordt D_{85} omgerekend tot een D_{15} waarde. De minimale en maximale diameters volgen analoog. De situaties uit tabel 9.1. zijn weer uitgezet in tabel 9.3. Door de vrij hoge waarde van de gradatie kunnen er problemen met de interne stabiliteit komen. Ook dreigt bij dit soort materiaal het gevaar voor ontmenging.



De waarden van D_{15} volgend uit de eerste eis (bescherming basis) zijn eveneens vermeld in tabel 9.3.

tabel 9.3.

m	Eis 1			Eis 2		
	D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)	D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)
1	2.9	1.7	55.8	0.17	0.10	3.3
2	2.9	1.7	55.8	0.44	0.26	8.4
3	2.9	1.7	55.8	2.2	1.31	42.0
4	4.9	2.9	94.0	0.17	0.10	3.3
5	4.9	2.9	94.0	0.44	0.26	8.4
6	4.9	2.9	94.0	2.2	1.31	42.0
7	4.5	2.7	81.7	0.17	0.10	3.3
8	4.5	2.7	81.7	0.44	0.26	8.4
9	4.5	2.7	81.7	2.2	1.31	42.0
10	4.9	2.9	94.0	0.17	0.10	3.3
11	4.9	2.9	94.0	0.44	0.26	8.4
12	4.9	2.9	94.0	2.2	1.31	42.0
13	6.3	3.7	121.0	0.17	0.10	3.3
14	6.3	3.7	121.0	0.44	0.26	8.4
15	6.3	3.7	121.0	2.2	1.31	42.0
16	4.9	2.9	94.0	0.17	0.10	3.3
17	4.9	2.9	94.0	0.44	0.26	8.4
18	4.9	2.9	94.0	2.2	1.31	42.0

Bij inspectie van tabel 9.3 valt op dat nu alle combinties voldoen. De oorzaak hiervan is, dat er afpleistering kan optreden, omdat de korrelverdeling breed is. De zeefbanden zijn getekend in de bijlagen 9.5 t/m 9.8.



9.7. Doorlatendheid.

Voor de doorlatendheid kunnen twee globale eisen worden geformuleerd.

1. De doorlatendheid van de filterlaag moet minimaal enige keren groter zijn dan de doorlatendheid van de basis.
2. De doorlatendheid van de filterlaag moet minimaal enige keren lager zijn dan de doorlatendheid van de toplaag [17].

Aan de eerste eis kan voldaan worden als de verhouding $D_{15} / d_{50} > 3$ is. Als stroming zowel in de basis als in het filter turbulent is, moet $D_{15} / d_{50} > 7$.

De tweede eis komt voort uit de voorwaarden dat $H/\lambda > 8$ moet zijn voor open zettingen [17]. Uit vergelijking (7.2) volgt dan dat:

$$k < (H^2 k') / (64 b S \sin^2 \beta) \quad (9.12)$$

De doorlatendheid k wordt via de vergelijkingen (4.20) en (4.13) omgerekend naar een diameter $\langle D \rangle$, dat wil zeggen bij vaste waarden van de dikte van de onderlaag, taludhelling, toplaag en golfbelasting kan nog een eis voor de diameter van het materiaal in de filterlaag opgesteld worden. Een wat meer praktische benadering is om de dikte van de onderlaag, b , te berekenen, uitgaande van een uitvoerbaar ontwerp en vastliggende materialen:

$$b < (H^2 k') / (64 k S \sin^2 \beta) \quad (9.13)$$

Gebruikmakend van onverweerde mijnsteen uit tabel 6.2, $k \approx 10$ mm/s en $k' \approx 1$ mm/s, een dikte van de toplaag van 0.2 m, een talud van 1:4 en een ontwerpgolf van 1.3 m volgt hieruit dat $b < 0.2$ m moet zijn. Zowel van vergelijking (9.12) in combinatie met (4.19) en (4.26) als ook (9.13) kunnen ontwerpgrafieken getekend worden.



9.8. Conclusie en kanttekeningen.

Uit de berekeningen volgt dat materialen met een smalle korrelverdeling alleen geschikt zijn om met een éénlaagsfilter de basis te beschermen en ook onder de stenen te blijven bij spleten smaller dan 2 mm. De lagen met een brede korrelverdeling vertonen afpleistering, zodat er een nieuwe filterlaag wordt gevormd, direct onder de toplaag. Deze houdt verdere erosie van de onderlaag tegen. Bij de toetsing, of een materiaal voldoet, moet tevens gelet worden op de helling van cumulatieve korrelverdeling. Deze moet ongeveer gelijk zijn aan de helling van de bandgrenzen. Een te smalle verdeling vertoont immers geen afpleistering en een te brede of onregelmatige verdeling loopt kans intern instabiel te zijn.

Indien het te gebruiken materiaal toch een smalle cumulatieve korrelverdeling heeft, dan moet of een meerlaagsfilter worden toegepast, een beschermend geotextiel voor het basismateriaal, of de toplaag moet smalle spleten hebben. De eisen voor de verschillende lagen van zo'n filters kunnen zo ruim geformuleerd worden, dat het zinvoller is van een specifiek geval (voorhanden zijnde materialen) uit te gaan, in plaats van een algemene opzet.



10. Zeefeisen voor alternatief materiaal.

In dit hoofdstuk wordt analoog aan het vorige hoofdstuk te werk gegaan voor het alternatieve materiaal. Er moeten nu nog twee neveneffecten behandeld worden: splijting (c.q. verwerking) en verkitting. De splijting houdt in, dat het materiaal verfijnt. Voor de stabiliteit van de basis is dit niet erg, maar het materiaal wordt te fijn, om nog door de stenen te worden tegengehouden. De verkitting verhoogt de kans op erosie van de basis. Als de druksterkte gering is, zakt het filter bij die erosie weer bij, zodat het proces wordt verminderd.

In het vorige hoofdstuk is aangetoond, dat slechts materiaal met een brede korrelverdeling in een éénlaagsfilter adequaat kan functioneren. Daarom wordt er voor het alternatieve materiaal, slechts van brede verdelingen uitgegaan, waarin afpleistering kan optreden.

10.1. Splijting en verwerking.

10.1.1. Voorspelling van de cumulatieve korrelverdeling.

Indien met het model uit hoofdstuk 6.3 geëxtrapoleerd wordt naar een situatie na 10 jaren, wordt gevonden dat $\bar{c}(10) \approx 0.8$, zie bijlage 6.3. De zeefcurve van de mijnsteen is getekend in bijlage 10.1, aangegeven met kruisjes. De met driehoekjes berekende curve is de schatting na twee jaren. Tevens zijn de originele curve (vierkantjes) en de criteria van Lubochkov voor interne stabiliteit getekend. Op grond van de extrapolatie met het simpele zakkingsmodel wordt voorspeld dat na 10 jaren het verweerde materiaal niet meer intern stabiel is. De fijne fracties kunnen door het filter uitspoelen. Deze fijne fracties zijn tevens voldoende klein, om tussen de stenen door te kunnen verdwijnen.



10.1.2. Restricties.

Uit bovenstaande analyse volgt dat na een tiental jaren het materiaal intern instabiel is geworden. Het model, dat dit voorspelt, is niet perfect. Het halveert steeds een korrel, het middelt over de tijd, de splijtingskans neemt niet af voor kleine diameters en tenslotte is de verdelingsfunctie van het materiaal grof geschematiseerd. Al deze feiten vormen een slechte basis om een betrouwbare extrapolatie naar een tijdsduur van 10 jaren te maken; met andere woorden: de werkelijkheid kan sterk afwijken van de voorspelling.

De uitspoeling van het materiaal zal vooral aan de kant van de fijne korrels van de zeefcurve plaatsvinden. De curve vlakt daar ter plaatse af. In hoeverre dit transport optreedt, kan nog niet aangegeven worden.

10.1.3. Aanbevelingen.

Het is pas zinvol een splijtingsmodel verder te gaan ontwikkelen, als het ook getoetst kan worden aan experimentele gegevens, die vergaard zijn specifiek voor splijting. Ook onderzoek aan in de praktijk gebruikt materiaal kan gebruikt worden, mits de begin condities, zoals zeefcurve, soort materiaal en herkomst eenduidig vastgelegd en te achterhalen zijn. Verlies van materiaal uit de onderlagen is daarbij niet te kwantificeren. Voor de bepaling van de hoeveelheden weggestroomd materiaal bij interne erosie moet gebruik gemaakt worden van een transportmodel in combinatie met experimenten.

10.2. Verkitting.



10.2.1. Analyse.

Uit de beschouwingen in hoofdstuk 8 is gebleken dat volledige ondoorlatendheid van het filter moet worden voorkomen. De stroming van het water in de onderlagen verloopt daarbij geheel in de basis (dijk); aanzienlijke erosie van de basis kan daardoor optreden.

Indien er weinig verkitting optreedt, heeft dit vrijwel geen invloed op de doorlatendheid van de slakken. Er is dan nog voldoende drainerende werking. Verder is de druksterkte van belang. Indien de druksterkte van de orde van grootte is van de verticale gronddruk, kan de binding tussen de slakken verbroken worden, indien onder de slakken lokaal geen grond aanwezig is; er ontbreekt dan steundruk. In hoofdstuk 8.5 is aangetoond, dat bij een pakket slakken van een halve meter dik de gronddruk aldaar ruwweg 10 kN/m^2 bedraagt. Dit is dus een richtwaarde voor de maximaal toelaatbare druksterkte.

10.2.2. Restricties.

Er is geen model dat de verkitting beschrijft. Er zijn immers geen of te weinig gegevens, waaruit zelfs maar een simpel model kan worden afgeleid danwel getoetst. Er ligt dus nog een geheel onderzoeksterrein open.

10.2.3. Aanbevelingen.

Primair dient te worden nagegaan of bij materialen met een D_{15} waarde in het millimeter gebied (2 à 3 mm) verkitting optreedt. Ook praktisch onderzoek aan bestaande constructies kan hierover informatie verschaffen. Indien verkitting bij deze diameters voorkomt, moet de sterkte ervan onderzocht worden, enerzijds als functie van de tijd anderzijds als functie van de concentratie fijn materiaal. Daarnaast moet onderzocht worden hoe de relatie druksterkte t.g.v. verkitting versus korreldiameter verloopt. Met deze gegevens kan dan een model opgesteld en getoetst worden, om het verschijnsel te kwantificeren.



11. Casestudie mijnsteen van de Deltagootproeven.

In dit hoofdstuk zal worden geïllustreerd, in hoeverre de proeven, die met mijnsteen in de Deltagoot gedaan zijn, behandeld kunnen worden met de theorie uit de voorafgaande hoofdstukken.

11.1. Inleiding.

Er zijn experimenten op het Waterloopkundig Laboratorium "de Voorst" uitgevoerd om de doorlatendheid van mijnsteen te bepalen. De doorlatendheid van het in de Deltagoot gebruikte materiaal is op indirecte wijze bepaald uit metingen in de filterbak. De zeefcurves van het zand en de mijnsteen zijn getekend in bijlage 11.1. Het zand is tamelijk steil. Het kan gekarakteriseerd worden door een d_{50} van 0.24 mm. Voor mijnsteen zijn drie curves getekend in opvolgende mate van grofheid. Het grofste materiaal werd in de Deltagoot aangetroffen, het fijnste materiaal dichtbij de bodem van het verdichte pakket in de filterbak. De D_{15} waarden staan in tabel 11.1. Ook de gradatie is daarin vermeld. Voor de monsters 2 en 3 zijn deze geschat uit de extrapolatie van de bekende zeefcurves. De dichtheid van de mijnsteen is door onderdompeling bepaald: $\rho \approx 2600 \text{ kg/m}^3$. De droge dichtheid van het materiaal uit de Deltagoot bedroeg $\rho \approx 1800 \text{ kg/m}^3$.

Tabel 11.1

Monster	D_{15} (mm)	p (-)
1	4.2	30
2	3.5	≈ 40
3	2.7	≈ 60



11.2. Uitwerking.

11.2.1. Porositeit.

Uit de metingen van de dichtheid en de droge dichtheid volgt dat de porositeit, n , van het materiaal uit de Deltagoot 0.3 ± 0.02 bedraagt. Hierbij is de conclusie uit het WL rapport gevolgd, dat $\rho \approx 2600 \text{ kg/m}^3$ bedraagt. Het feit dat er nog andere waarden van de porositeit zijn gevonden, is verdisconteerd in de opgegeven onzekerheid in de porositeit.

11.2.2. Loodrecht kritiek verhang.

De waarden van n (0.3), d_{50} (0.24 mm) en D_{15} zijn nu bekend. Hieruit wordt γ ($= n D_{15} / d_{50}$) berekend, waarmee uit bijlage 4.3 de verhangen kunnen worden afgelezen. De verhangen staan in tabel 11.2. De onzekerheden worden hier veroorzaakt door de afleesnauwkeurigheid in combinatie met het feit dat voor $d_{50} = 0.24 \text{ mm}$ geen curve is gegeven. Er is daarom geïnterpoleerd.

Tabel 11.2

Monster	γ	i_1^c
1	5.4	1.7 ± 0.2
2	4.5	2.8 ± 0.4
3	3.5	5.5 ± 0.7



11.2.3. Parallel kritiek verhang.

Het parallelle kritieke verhang is bepaald met de 10 formule (4.0). De verhangen staan in tabel 11.3

Tabel 11.3

Monster	D_{15} (mm)	i_p^c (-)
1	4.2	0.7 ± 0.1
2	3.5	0.8 ± 0.15
3	2.7	1.0 ± 0.2

Op grond van de helling van het talud en het te verwachten loodrechte verhang wordt de waarde van D_{15}/d_{50} bepaald met behulp van bijlage 4.12 ($d_{50} = 0.25$ mm). De maximale waarde van D_{15} die hieruit berekend wordt, bedraagt 6.5 mm. Omdat de gradatie van het materiaal groot is ($p \approx 40$), kan met het uitspoelcriterium volgens vergelijking (9.11) gewerkt worden. De berekende zeefband staat in tabel 11.4. Een grafische weergave van de zeefband met de zeefcurve van het gebruikte mijnsteen is in bijlage 11.2 gegeven.

Tabel 11.4

O_{max} (mm)	D_{15} (mm)	Eis 1			Eis 2	
		D_i (mm)	D_a (mm)	D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)
2	6.5	3.2	320	0.08	0.04	4.0
5	6.5	3.2	320	0.2	0.1	10
25	6.5	3.2	320	1.0	0.5	50

Het grootste gedeelte van alle curves ligt binnen de zeefband.

Slechts de stofstaart valt er gedeeltelijk buiten.



11.2.4. Interne stabiliteit.

In bijlage 11.3 is de zeefcurve van het materiaal uit de Deltagoot getekend samen met de criteria van Lubochkov. Als maximale diameter is 100 mm aangehouden. Het fijne deel van het materiaal, 1 tot 10 mm, ligt in het stabiele gedeelte. Het grove deel, 10 tot 100 mm, ligt gedeeltelijk in het instabiele gebied. Volgens het in hoofdstuk 4.3 gestelde kan er dan uitspoeling van dit materiaal optreden. Echter de middenfractie, rond 10 mm, ligt in het gebied, waar het materiaal bij kleine verhangen nog intern stabiel is.

Visuele waarnemingen bij de de doorlatendheidsproeven in de filterbak duiden er op dat bij het vullen met water en het inspoelen van het pakket slechts de stofstaart gedeeltelijk is weggespoeld. De grove fractie kon de bak niet verlaten, omdat een rooster dit verhinderde. Dit rooster is niet verstopt geraakt met fijner materiaal. Het maximale verhang bij deze proeven bedroeg 0.8. Massaverlies werd niet aangetoond; er werden helaas geen metingen daartoe verricht.

11.3. Doorlatendheid.

Op grond van de uit de zeefcurves afgeleide waarden van de D_{15} en de afgeschatte waarde van de porositeit wordt voor monster 2 de volgende doorlatendheidsrelatie voorspeld, geldend rond $i = 0.5$:

$$k_t \approx 0.015 \times i^{0.75} \quad (\text{m/s}). \quad (11.1)$$



CO-272550/18

- 73 -

11.4. Conclusies.

1. De waarde van het loodrechte kritieke verhang is vele malen groter dan de opgetreden loodrechte verhangen.
2. De gebruikte mijnsteen is nog intern stabiel bij niet te grote verhangen. Doorlatendheids metingen bevestigen dit gedeeltelijk.
3. De zeefcurves van de mijnsteen liggen binnen de toelaatbare zeefband voor stabiel materiaal, zoals deze met de theorie berekend kan worden. Het tijdsbestek van de proeven was te kort om verfijning aan te tonen.



12. Verwachting voor slakken.

12.1. Algemeen

Bij de LD-slakken van de firma Pelt & Hooykaas valt op, dat de zeefcurve recht is op \sqrt{d} papier. De zeefkromme is dus een verschoven Fullercurve; deze wordt beschreven d.m.v.:

$$P(x) = \frac{\sqrt{x/D_a} - \sqrt{D_i/D_a}}{1 - \sqrt{D_i/D_a}}, \quad (12.1)$$

zodat als $x = D_y$ geldt dat

$$D_y = D_a \{ 0.01xy + (100-y) \times 0.01 \sqrt{D_i/D_a} \}^2 \quad (12.2)$$

y is het massapercentage dat door de zeef valt, met opening D_y . De gradatie, $p(= D_{90}/D_{10})$ bedraagt dus:

$$p = \frac{(0.9 + 0.1 \sqrt{D_i/D_a})^2}{(0.1 + 0.9 \sqrt{D_i/D_a})^2} \quad (12.3)$$

Indien de gradatie of de D_i/D_a verhouding gegeven is, kan bij een opgegeven D_y de waarde van D_a en D_i worden berekend:

$$D_a = \frac{D_y}{(0.01xy + 0.01 \times (100-y) \sqrt{D_i/D_a})^2} \quad (12.4)$$

en tamelijk triviaal

$$D_i = (\sqrt{D_i/D_a})^2 D_a \quad (12.5)$$



12.2. Eenlaags filters.

Bekeken zal worden hoe de LD slakken 0/10 mm en 10/80 mm, zie bijlage 12.1, als een eenlaags filter kunnen werken. Er worden twee soorten analyses gemaakt. De ene is vergelijkbaar met de analyse uit hoofdstuk 9. Indien geen stabiele combinatie mogelijk is, wordt in de andere nagegaan aan welke eisen het basismateriaal en de toplaag van stenen moet voldoen, om wel een stabiele combinatie te verkrijgen.

12.2.1. LD slakken 0/10 mm.

De gradatie $p = (D_{90}/D_{10})$ van dit materiaal bedraagt 16. Er kan dus afpleistering optreden. De ondergrens van het materiaal wordt gerelateerd aan een D_{85} waarde (9.11). De vergelijking van onder- en bovengrens wordt vereenvoudigd als de D_{85} wordt omgerekend naar een D_{15} :

$$D_{15} = D_{85} \left\{ \frac{0.15 + 0.85 \sqrt{D_i/D_a}}{0.85 + 0.15 \sqrt{D_i/D_a}} \right\}^2 \quad (12.6)$$

Alle mogelijkheden uit hoofdstuk 9 worden ook voor de slakken nagegaan. Tabel 9.1 wordt hier nogmaals vermeld.



tabel 9.1.

m	talud			d ₅₀ (mm)		toplaag gaten (mm)		
	1:2	1:3	1:4	0.2	0.82	2	5	25
1	x			x		x		
2	x			x			x	
3	x			x				x
4	x				x	x		
5	x				x		x	
6	x				x			x
7		x		x		x		
8		x		x			x	
9		x		x				x
10		x			x	x		
11		x			x		x	
12		x			x			x
13			x	x		x		
14			x	x			x	
15			x	x				x
16			x		x	x		
17			x		x		x	
18			x		x			x

Omdat p groot is, wordt voor de porositeit 0.3 aangenomen. Een tabel, vergelijkbaar met tabel 9.3 kan nu voor de LD slakken 0/10 worden opgezet uitgaande van een verschoven Fullerkromme. De ligging van de zeefcurve, aangegeven met vierkantjes, ten opzichte van de onder en bovengrenzen is grafisch weergegeven in de bijlagen 12.2 t/m 12.5.

De waarden van de eisen staan ook vermeld in tabel 12.1.



CO-272550/18
- 77 -

tabel 12.1

m	Bovengrens			Ondergrens		
	D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)	D_{15} (mm)	D_i (mm)	D_a (mm)
1	2.9	0.8	39.4	0.19	0.05	2.6
2	2.9	0.8	39.4	0.48	0.13	6.5
3	2.9	0.8	39.4	2.4	0.6	33.0
4	4.9	1.4	66.5	0.19	0.05	2.6
5	4.9	1.4	66.5	0.48	0.13	6.5
6	4.9	1.4	66.5	2.4	0.6	33.0
7	4.5	1.3	61.0	0.19	0.05	2.6
8	4.5	1.3	61.0	0.48	0.13	6.5
9	4.5	1.3	61.0	2.4	0.6	33.0
10	4.9	1.4	66.5	0.19	0.05	2.6
11	4.9	1.4	66.5	0.48	0.13	6.5
12	4.9	1.4	66.5	2.4	0.6	33.0
13	6.3	1.7	86.0	0.19	0.05	2.6
14	6.3	1.7	86.0	0.48	0.13	6.5
15	6.3	1.7	86.0	2.4	0.6	33.0
16	4.9	1.4	66.5	0.19	0.05	2.6
17	4.9	1.4	66.5	0.48	0.13	6.5
18	4.9	1.4	66.5	2.4	0.6	33.0

Uit de bijlagen blijkt dat deze staalslakken onder dichte zettingen met een $O_{9,8}$ van 2 tot 5 mm nog kunnen voldoen, daarentegen dat het materiaal door een open zetting ($O_{9,8} = 25$ mm) kan uitspoelen. Er is in dit laatste geval aan tweede laag nodig. Steenzettingen met een $O_{9,8}$ kleiner dan 8 mm voldoen nog.

12.2.2. LD slakken 10/80 mm.

Uit hoofdstuk 9 volgt dat de D_{15} van de slakken maximaal 6 mm mag zijn, zie tabel 9.3. De D_{15} waarde van de slakken is echter 16 mm. Er is dus geen stabiele filter-basis combinatie mogelijk; het basis materiaal kan uitspoelen. Er wordt vervolgens nagegaan, wat de diameter van het basismateriaal moet zijn, als er geen uitspoeling mag plaatsvinden. Reeds aangetoond is, dat 0.82 mm te fijn was, dus de stroming is geheel turbulent. De berekende situaties bevinden zich bij een aantal taludhellingen tussen 1:2 en 1:5. Omdat de optredende belasting voor het grove materiaal hoog is, moet het filter geometrisch dicht zijn. De minimale waarde van de d_{50} van de basiskorrels moet dus 2.7 mm zijn.

De gradatie van deze slakken bedraagt 5.5. Deze waarde is te laag om afpleistering te laten optreden. Er moet dus voldaan worden aan criterium (9.10). De karakteristieke waarden van de ondergrens zijn gegeven in tabel 12.2

tabel 12.2

	ondergrens			LD slakken
$O_{9,8}$ (mm)	D_i (mm)	D_{15} (mm)	D_a (mm)	D_{15} (mm)
2	1.1	2	10.7	15
5	2.9	5	26.5	15
25	14.5	25	134.0	15

Uit tabel 12.2 blijkt dat open zettingen ($O_{9,8} = 2$ tot 5 mm) voldoende dicht zijn om de slakken tegen te kunnen houden. De open zetting ($O_{9,8} = 25$ mm) heeft te grote gaten. Het houdt de slakken niet tegen. Een steenlaag met een $O_{9,8}$ van 15 mm is de ondergrens. Groter mogen de openingen niet zijn. De ondergrenzen zijn getekend in bijlage 12.6.



12.3. Meerlaagsfilter.

In hoofdstuk 12.2.1 is aangetoond dat het LD 0/10 mm als bescherming van het basismateriaal voldoet. Dit is voornamelijk gebaseerd op de afpleistering die in de slakken moet optreden. Deze afpleistering is een verschijnsel, waarvoor de grenzen niet scherp gedefinieerd zijn. Uit de bijlagen 12.2 t/m 12.5 blijkt dat de cumulatieve korrelverdeling vrij dicht bij de ondergrens ligt. Als er gedeeltelijke afpleistering optreedt, is er een aanzienlijke erosie mogelijk. Om een wat meer betrouwbare constructie te beschouwen, wordt een meerlaagsfilter behandeld, bestaande uit een laag LD slakken 0/10 mm met daarbovenop een laag LD slakken 10/80 mm.

De stabiliteit van het 0/10 mm t.o.v. de basis is reeds in hoofdstuk 12.2.1. behandeld. De stabiliteit van het 10/80 t.o.v. de steenzetting is in hoofdstuk 12.2.2. gezien. Resteert de stabiliteit van het 0/10 t.o.v. het 10/80. De verhouding tussen D_{15} (10/80) en d_{50} (0/10), D_{15}/d_{50} bedraagt 3.5. Dit is een verhouding, die in het geometrische dicht gebied ligt. Transport zal pas gaan optreden bij een verhang van groter dan 1. De combinatie (0/10)-(10/80) is onderling stabiel.

12.4. Menging van de 10/80 en de 0/10 slakken.

Als beide materialen gemengd worden, ontstaat een materiaal, dat sterk gegradeerd is. Dit is voordelig, omdat dan afpleistering kan optreden. Het materiaal zal niet zo snel door de toplaag kunnen verdwijnen, dan wanneer de gradatie klein is. Er ontstaat echter het gevaar van ontmenging bij het aanbrengen van het materiaal. Ook verlies van interne stabiliteit moet voorkomen worden. Of deze verschijnselen zullen optreden, hangt af van de mengverhouding van beide materialen. Aangezien niet vast staat, in welke verhouding 0/10 en 10/80 gemengd worden, of gemengd zijn, kan hierop nog geen antwoord worden gegeven.



12.5. Fosforslakken.

De fosforslakken (zie bijlage 12.7) hebben een gradatie van 7. Ook dit is een materiaal, waarin volgens de theorie nauwelijks afpleistering kan optreden. Het kan dus niet als een eenlaagsfilter gebruikt worden, zie tabel 9.2. Er is dus nog een extra filter nodig, om de basis met fijn zand, $d_{50} = 0.2$ mm te beschermen. De waarde van D_{15} is 5.6 mm. Dit betekent dat de O_{98} van de toplaag kleiner dan 5.6 mm moet zijn. De slakken kunnen door open zettingen ($O_{98} = 25$ mm) uitspoelen. Omdat de belastingen hoog zijn en het filtermateriaal grof is, moeten de fosforslakken een geometrische filter vormen voor de extra onderlaag. Dit betekent dat de d_{50} van het materiaal onder de fosforslakken 0.9 a 1 mm groot moet zijn.

tabel 12.3

	Ondergrens (mm)	Bovengrens (mm)
D_i	0.19	1.0
D_{15}	0.37	2.0
D_{50}	1.0	5.4
D_a	2.5	13.3

Ga er van uit dat deze tussenlaag ook een gradatie van ruwweg 7 heeft en dat de korrelverdeling ook volgens een verschoven Fullerverdeling verloopt. Uitgaande van een D_{50} van dit extra filter van 1 mm is de waarde van D_{15} 0.37 mm. De d_{50} van het zand is 0.2 mm, dus $D_{15}/d_{50} = 1.85$. Dit is geometrisch dicht. De band, waarbinnen de cumulatieve korrelverdeling van dit extra filter moet liggen, is aangegeven in bijlage 12.8. De karakteristieke diameters staan in tabel 12.3.



Bij de fosforslakken moet er goed op worden toegezien dat de afkoeling gelijkmatig is verlopen. Zogeheten "tout venant" materiaal is vaak te snel afgekoeld, waardoor de slakken sterk verpulveren. Dit veroorzaakt instabiliteit.

12.6. Conclusies.

- * Indien LD slakken 0/10 mm worden afgedekt met 10/80 mm, is een stabiele filterconstructie ontstaan bij toplagen met een $O_{9,8}$ van kleiner dan 15 mm.
- * Bij gebruik van toplagen met een $O_{9,8}$ van 25 mm dient het 0/10 mm met een grover materiaal dan 10/80 mm te worden afgedekt.
- * Vermenging van 0/10 mm met 0/80 mm wordt ontraden in verband met verlies van interne stabiliteit en gevaar op ontmenging bij het aanbrengen.
- * Tussen de fosforslakken en de onderlaag dient nog een extra filter of een geotextiel gebruikt te worden.
- * Ook de fosforslakken zijn te fijn om onder een open zetting ($O_{9,8} = 25$ mm) te blijven liggen.



13. Aanbevelingen.

13.1. Verkennend erosie onderzoek.

Er dient een simpele modelproef gedaan te worden. Mijntsteen wordt blootgesteld aan voor onderlagen vigerende omstandigheden. Het massaverlies wordt gemeten. De proef moet na afloop zorgvuldig afgebroken worden, zodat de te meten verschillen in zeefcurve geheel en al afkomstig zijn van de proef en niet van het menselijke ingrijpen na het experiment.

13.2. Begripsverruimend onderzoek.

13.2.1. Verwering en splijting.

Er dient onderzocht te worden, hoe het langeduur gedrag van het materiaal is. Daarbij dient het complete materiaal en niet slechts een fractie beschouwd te worden. Voor een snelle afwikkeling van de proeven dient zachte mijntsteen gebruikt te worden, met een korte relaxatietijd, bijvoorbeeld "Walsum". Tegelijkertijd moet voor de verklaring en de berekeningen een theoretisch model opgezet worden, dat aan bovenstaande metingen getoetst kan worden. Voor het goede begrip van de splijting en de verwering dient een gedeelte van het materiaal in een separaat experiment gemarkeerd te worden, zodat het splijtingsproces gevolgd kan worden.

13.2.2. Verkitting.

Primair zal experimenteel vastgesteld moeten worden of staalslakken met diameters tussen de 2 en 10 mm verkitten. Indien er zulk een verkitting optreedt, moet nagegaan worden hoe de druksterkte en van de tijd, concentratie en diameter afhangt.

14. Referenties.

- 1 G.J. Laan.
De toepasbaarheid van mijnsteen in de waterbouw.
WKE-R-78156, vierde versie, mei 1983

- 2 K. Dekker.
Onderzoek gebruik van mijnsteen. Deltadienst afd. O.N.W.
rapport 2.1.7. okt. 1965

- 3a V. Thanikachalam, R. Sakthivadivel.
Rational design criteria for protective filters. Can.
Geotechn. J. 11(1974) blz. 309.

- 3b V. Thanikachalam, R. Sakthivadivel.
Grain size criteria for protective filters - an enquiry. Soil
and foundations, Vol 14 no.4 dec. 1974, Jap. Soc. of Soil
Mechanics and Foundation Eng.

- 3c V. Thanikachalam, R. Sakthivadivel.
Design of filter thickness based on the application of the
queueing theory. Theory Journ. of Hydr. Res. Vol 13(1975)2
blz. 207-219

- 4 K. Kawakami, Y. Esashi
On drainage filter for earth structure. Abstract of papers.
16th ann. meeting, Jap. Soc. of Civ. Eng. 1961

- 5 J.L. Sherard, L.P. Dunnigan, J.R. Talbot
Basic properties of sand and gravel filters. Journ.
Geotechn. Eng 110(1984)6 blz. 684-700

- 6 J. la Fleur
Filtertesting of broadly graded cohesionless tills. Can.
Geotechn. Journ. 21(1984)4 blz 634-643



- 7 A.F.F. de Graauw, T. van der Meulen, M van der Does de Bye
Design criteria for granular filters. Publicatie 287. W.L.
jan. 1983
- 8 M. Klein Breteler
De openwaterloop analogie. Nota 1881-16. Nov 1984. W.L.V.
- 9 M.A. Koenders
Hydraulic criteria for filters. Estuary Physics London
juli 1985.
- 10 H. den Adel
Literatuurstudie filters. LGM 1983. CO-258901/88
- 11 A.A.F. de Graauw
Stabiliteit van granulaire filters bij cyclische verhangen
evenwijdig aan het grensvlak. W.L. M1544. jul. 1981
- 12 E.A. Lubochkov
Piping resistant non cohesive soils. Isvestia VN II G
71(1962) blz 61-89. In het Russisch. Engelse vertaling
- 13 E.A. Lubochkov
Grafische en analytische methoden voor de bepaling van de
interne stabiliteit van niet cohesieve grondsoorten.
Isvestia VN II G 78(1965) blz 255-280. In het Russisch.
Nederlandse vertaling
- 14 G.J. Laan
Kwaliteit en kwaliteitscontrole van slakken voor de
waterbouw. Concept rapport/ mondelinge mededelingen
- 15 G.J. Laan
Onderzoek van zwarte mijnsteen ter beoordeling van de
toepasbaarheid in de wegenbouw. BGA 76-10. Nov. 1977.



- G.J. Laan
De bestandheid van zwarte mijnsteen tegen verwerking.
WKE-R-80001, RL-KO-R-80-01
- 17 A. Bezuijen, K. den Boer
Taludbekleding van gezette steen, overzicht onderzoek 1980-1984. M1975 / M 1881 deel XV (WL), CO-272500/7 (LGM). Okt. 1984.
- 18 Diverse auteurs
Taludbekledingen van gezette steen, fase 2. M1795 / M1881 deel VII (WL), CO-258901/118 (LGM). Mei 1984.
- 19 A. Bezuijen, M.Th. de Groot
Oeverbeschermingen. M1115 deel XII-B (WL), CO-273160/13, CO-416459/37
- 20 H.J.M. Ogink
Investigation on the hydraulic characteristics of synthetic fabrics
- 21 M. Klein Breteler
Erosie in granulaire filters, voorlopige resultaten
W.L.V., H 4174/M 1881-16, juni 1985.
- 22 NNI
Controle zeven. Draadzeven en plaatzeven met ronde e vierkante gaten. NEN 2560 (1980)
- 23 A.H.H. Dijkzeul
De afgifte van zware metalen en fluoride door diverse oeverbeschermingsmaterialen. RIZA nota 79.025
Lelystad 1979



CO-272550/18
- 86 -

Bewig, Schlössner

Das Wasserverhalten von Stahlwerkschlacken

Beurteilung aus gewässerkundlichen Sicht. Dir. Tgb Nr A
1038/82

Hygiene Institut des Ruhrgebiets. Gelsenkirchen, mei 1982.

Appendix AEnige begrippen in verband met zeven.

Voor de volledigheid worden nog enige begrippen verduidelijkt, die veelvuldig bij het ontwerpen filters worden gebruikt.

* De porositeit, n , van het materiaal is de verhouding tussen het volume van de niet vaste stoffen, V_{gl} in een verzameling korrels en het volume, V , van de verzameling korrels, inclusief de holten:

$$n = \frac{V_{gl}}{V} \quad (A.1)$$

* De mediane diameter d_{50} , de massa gemiddelde diameter, is die waarde van de diameter waarvoor geldt dat 50 gewichtsprocenten van het materiaal een kleinere diameter heeft dan d_{50} . Voor de d_{10} is dit 10 gewichtsprocenten.

* De gemiddelde diameter, $\langle d \rangle$, is een ensemble gemiddelde. De diameter wordt gemideld naar het aantal deeltjes. Deze diameter speelt een dominante rol bij de doorlatendheid.

$$\langle d \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(i) \quad (A.2)$$

met N het aantal deeltjes en $d(i)$ de diameter van deeltje met nummer i .

* De gradatie, p , is de verhouding tussen de d_{90} en de d_{10} van het materiaal. Het is een maat voor de breedte van de korrelverdeling.

$$p = d_{90}/d_{10} \quad (A.3)$$



* Een andere maat voor de breedte van de korrelverdeling is de uniformiteit, U . Dit is de verhouding tussen d_{60} en d_{10} .

$$U = d_{60}/d_{10} \quad (\text{A.4})$$

Bij benadering geldt voor een lognormale korrelverdeling dat

$$p \approx \frac{1+\chi}{1-\chi} \quad (\text{A.5})$$

met χ de variatie coefficient.

Er is met een kleine letter d gewerkt, dus strikt gesproken zouden deze formules slechts voor het basismateriaal gelden. Ze gelden natuurlijk ook voor het filter.

* De filtersnelheid, v_f , is de snelheid van het door het filter stromende water, waarbij het debiet q (in m^3/s) gedeeld wordt door de oppervlakte, A , van de dwarsdoorsnede op de stromingsrichting:

$$v_f = q/A \quad (\text{A.6})$$

De poriesnelheid, v_p , wordt uit het debiet en de uitstroomopening van het filter bepaald:

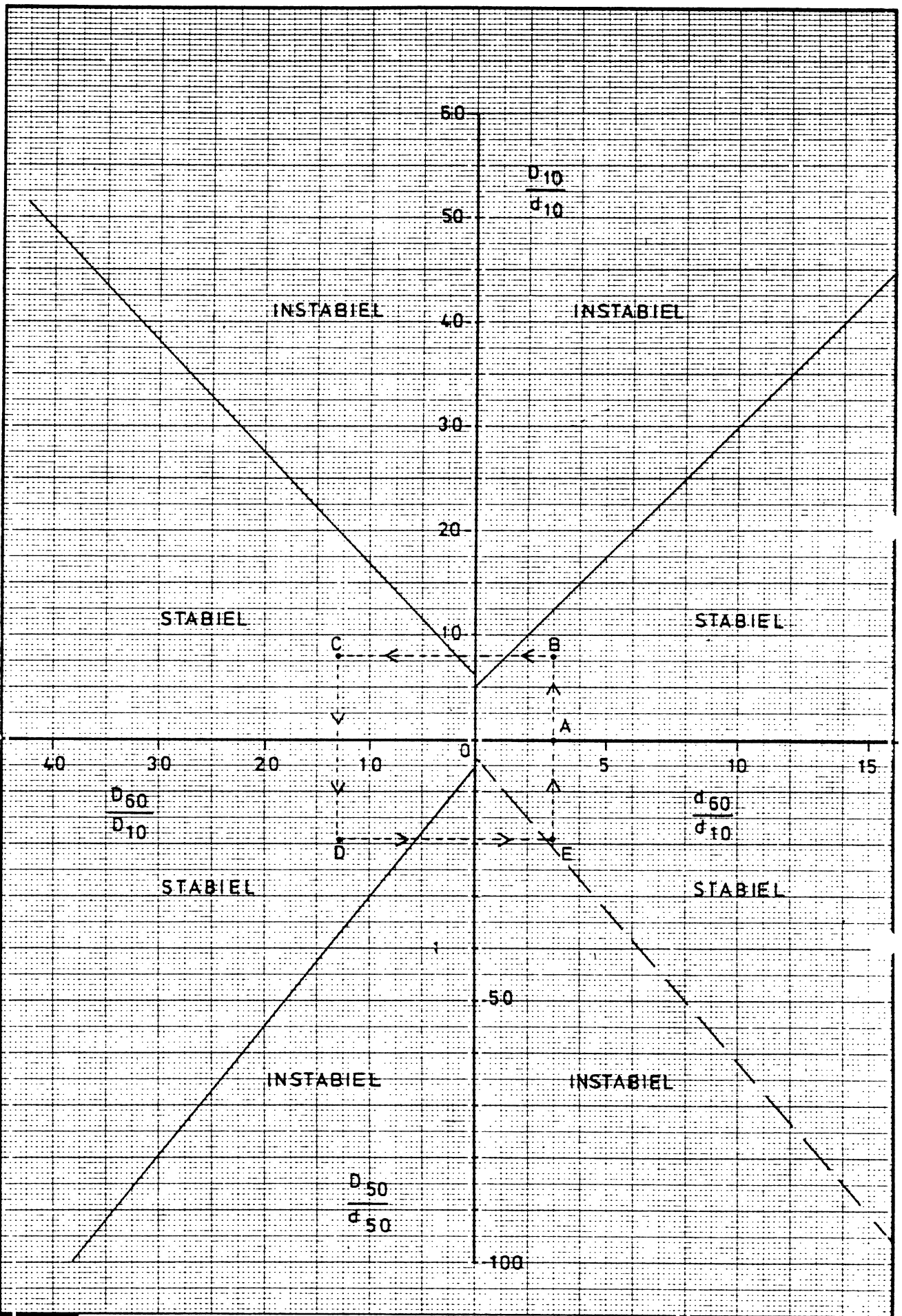
$$v_p = q/nA \quad (\text{A.7})$$

Appendix B.

Enige opmerkingen over zeven.

De cumulatieve korrelverdeling van een materiaal wordt in het algemeen met zeven discreet benaderd. Het Nederlands Normalisatie Instituut (NNI) heeft een standaard voor zeven opgesteld [21]. Er zijn twee soorten zeven, draadzeven en plaatzeven. Draadzeven bestaan uit een gevlochten net van draden. De draadzeven, die voornamelijk toegepast worden bij korreldiameters beneden de 4 mm, hebben altijd vierkante gaten. De afmeting van de openingen wordt opgegeven in mm of cm. Bij plaatzeven zijn de openingen in de bodem geboord of gestanst. Deze kunnen zowel rond (R) als vierkant (C = carré) zijn. De afmeting van de openingen is in mm opgegeven, voorafgegaan door C of R.





laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon (015) - 56 92 23
 telex 33326 solab nl

d.d.

85 09 04



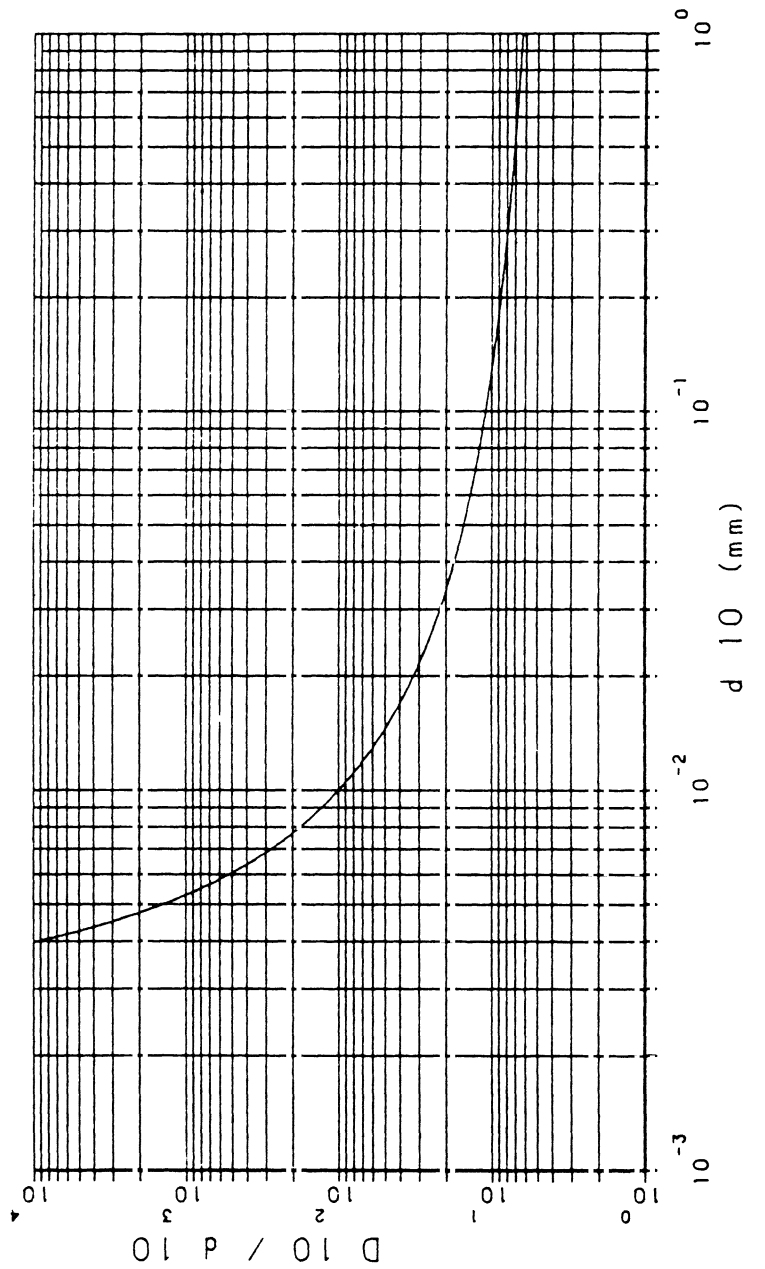
gec.

FORMULES (4,1),(4,2) EN (4,3)

CO-416640

BIJL. 4.1

form.
A₄



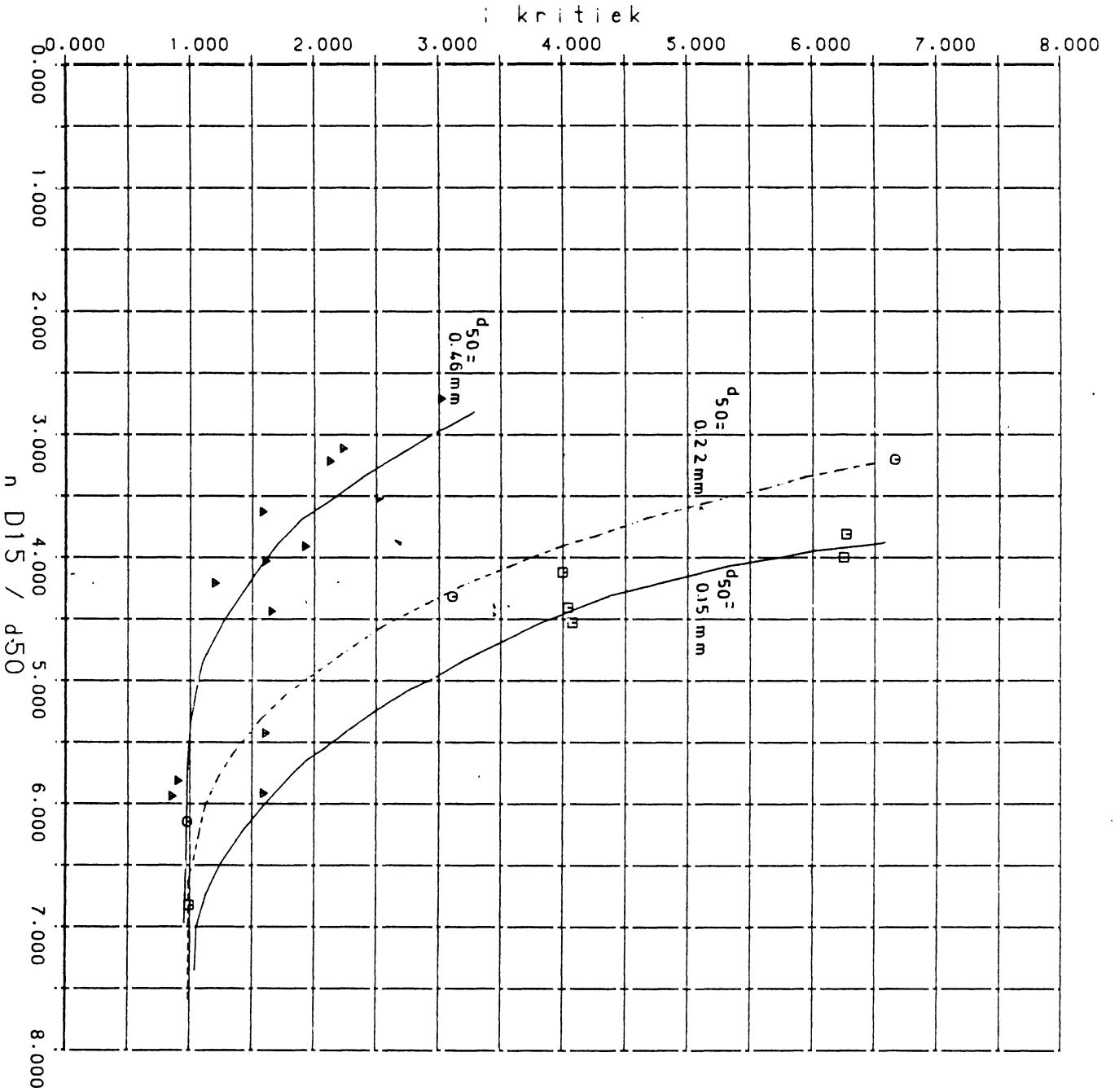
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

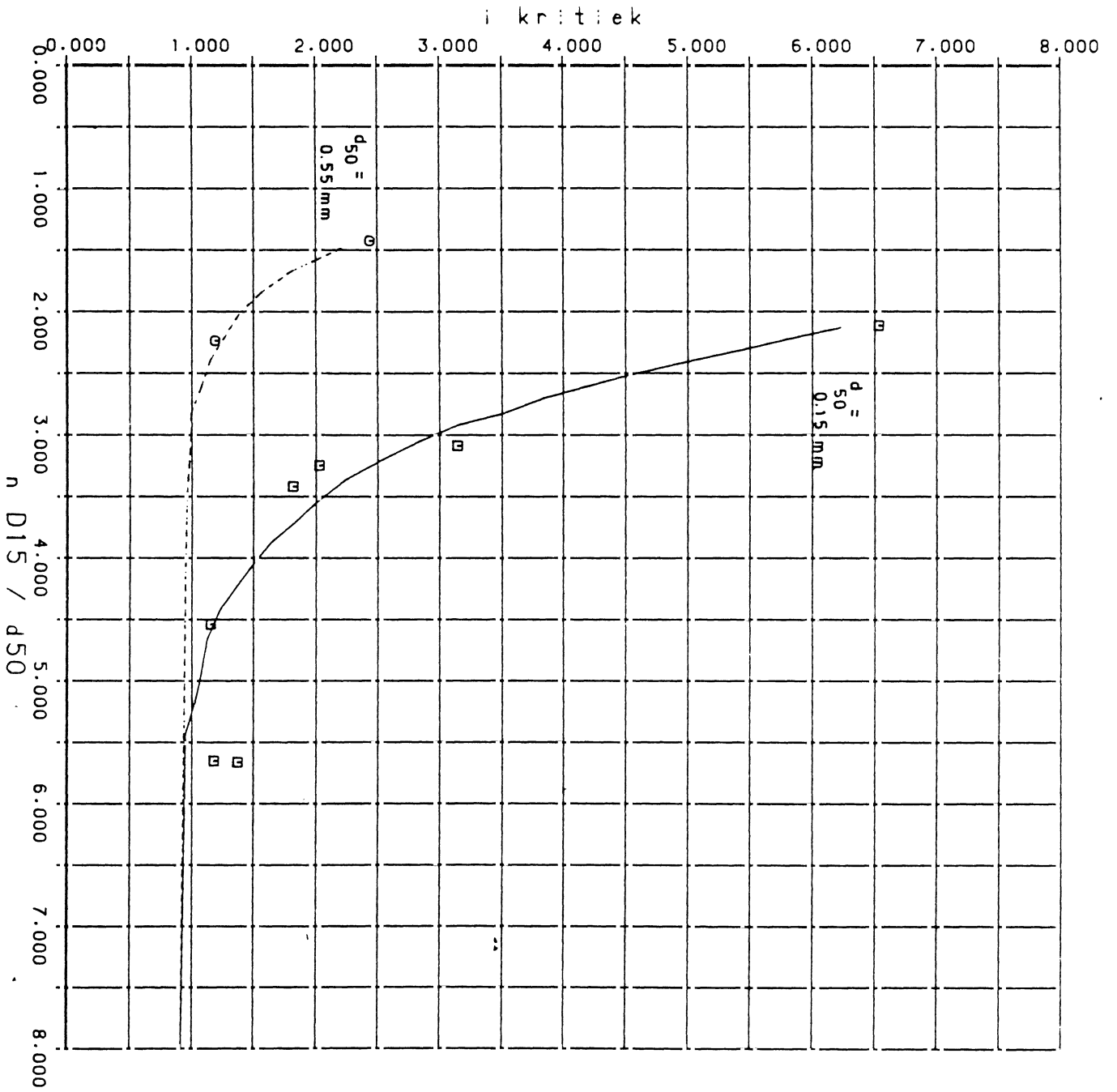
85-09-17

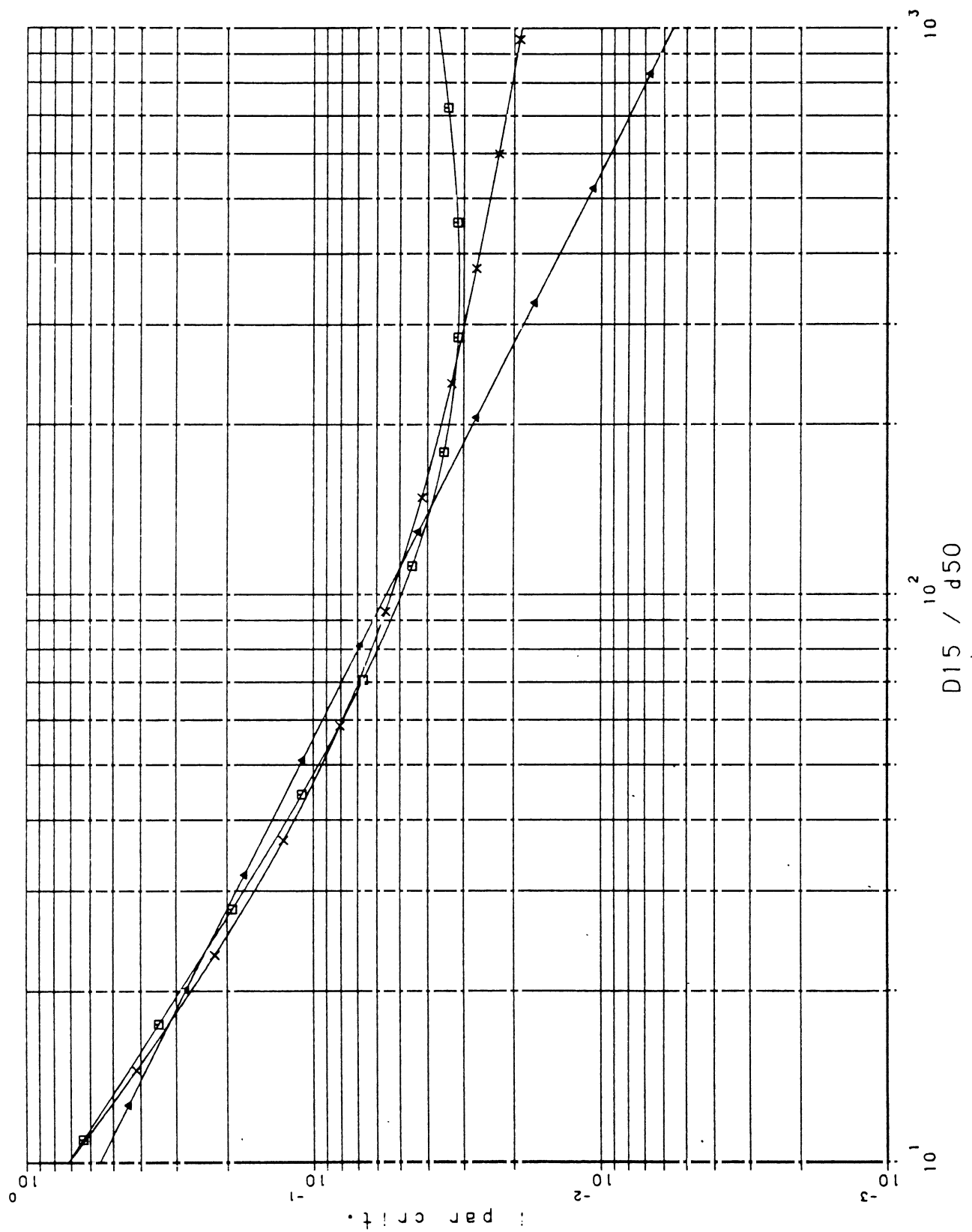
Absoluut criterium van Kawakami [4]
Formule (4.4)

CO-416640 Hda

BIJL. 42







LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

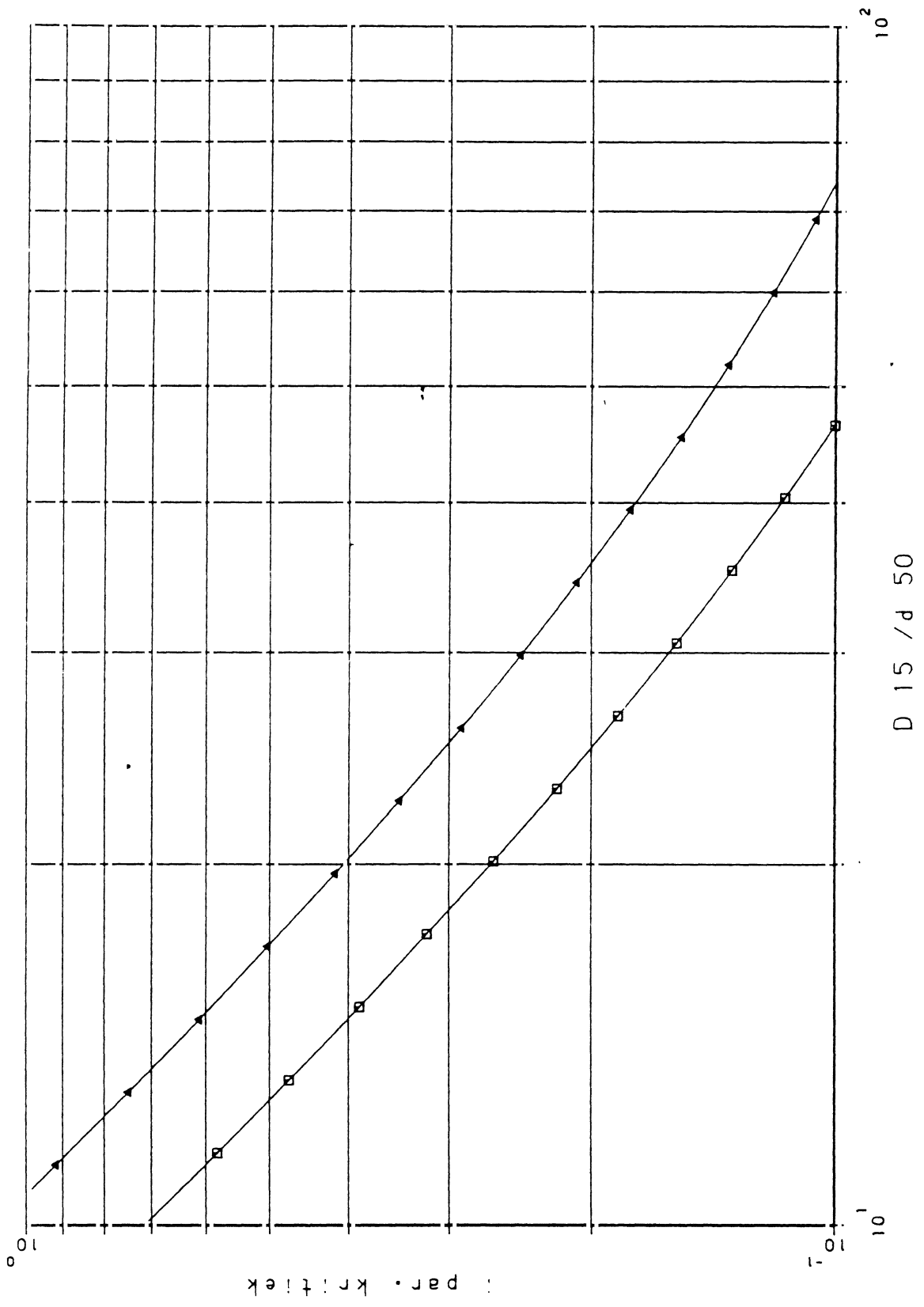
85-09-17

De formules 4.6 (vierkantjes), 4.8 (drie hoekjes) en 4.10 (kruisjes)

CO-416640

Hda

BIJL. 45



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

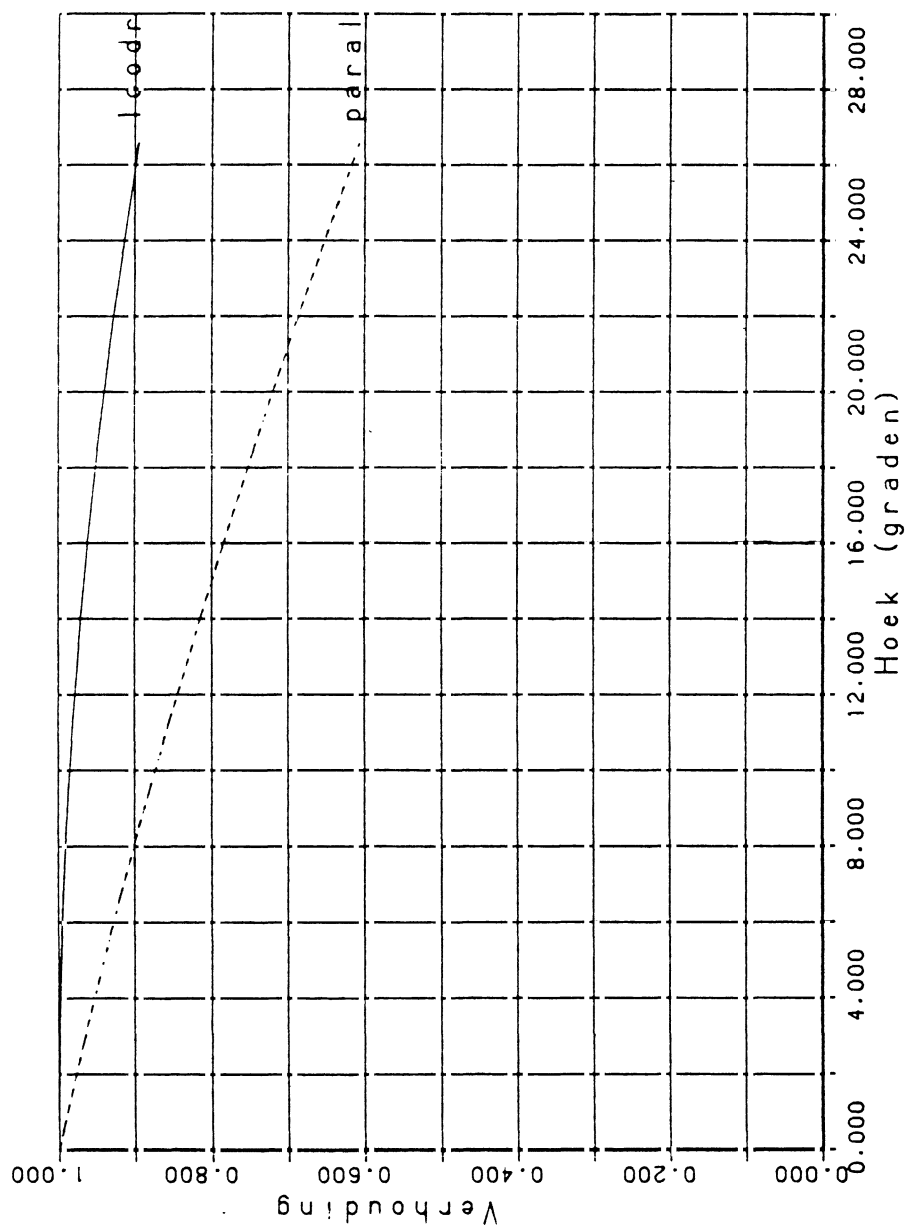
85-09-17

De invloed van de porositeit. $n=0.4$
(rondjes) en $n=0.35$ (driehoekjes)

CO-416640

Hda

BIJL. 4.6



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Verband tussen helling en reductiefactor
bij parallelle en loodrechte verhangen

CO-416640 Hda

BIJL. 47

Talud	i loodrecht	porositeit
A = horizontaal	a = 0	1 = 0.3
B = 1:10	b = 0.1	2 = 0.35
C = 1:7	c = 0.2	3 = 0.4
D = 1:5	d = 0.3	4 = 0.45
E = 1:4	e = 0.4	
F = 1:3	f = 0.5	
G = 1:2.5	g = 0.6	
H = 1:2	f = 0.7	



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon (015) 569223 telex 38234 soil nl

^{d d}
85-09-09

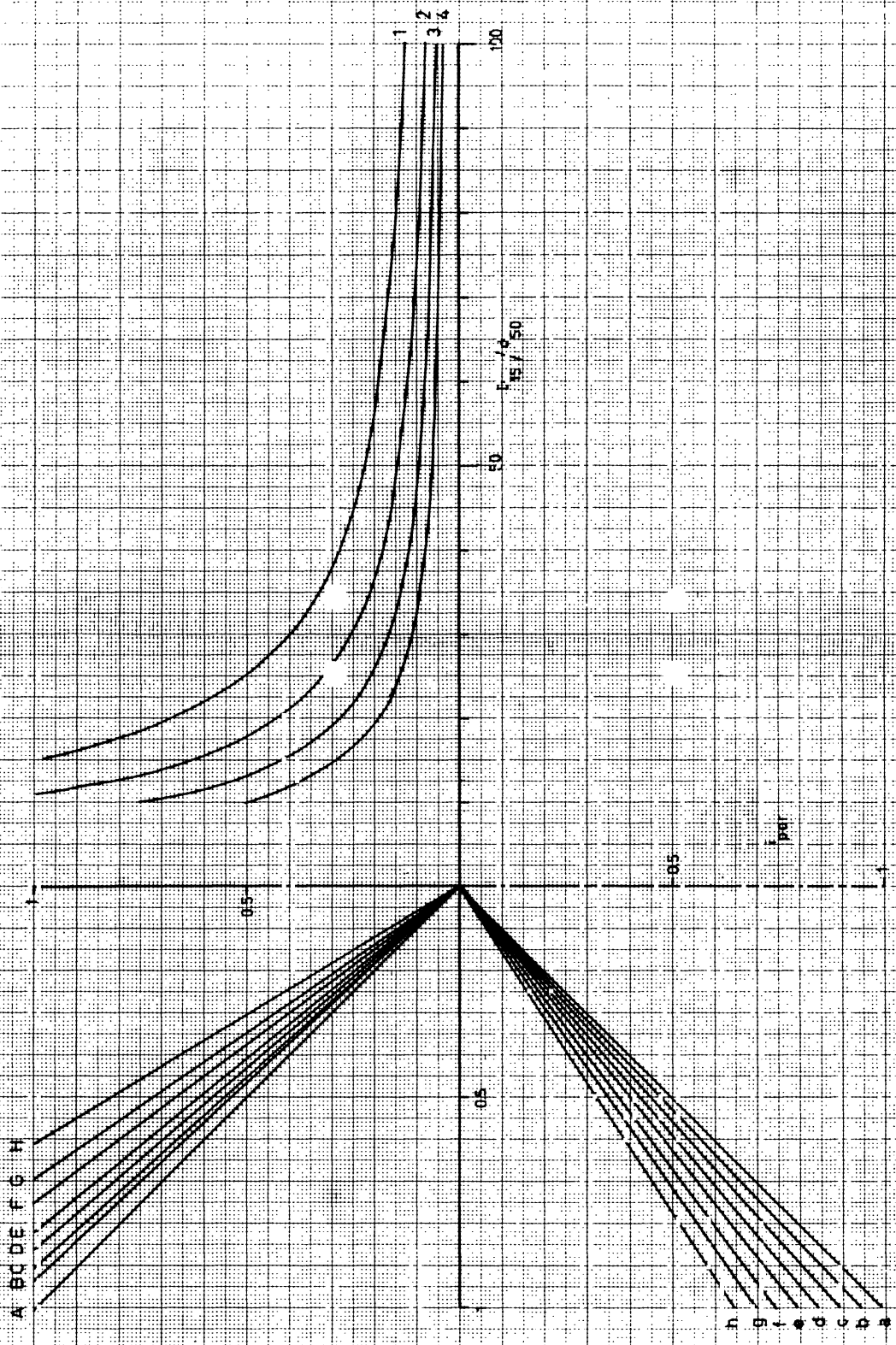
gek
2


LEGENDA BIJ DE VOLGENDE ZES BIJLAGEN

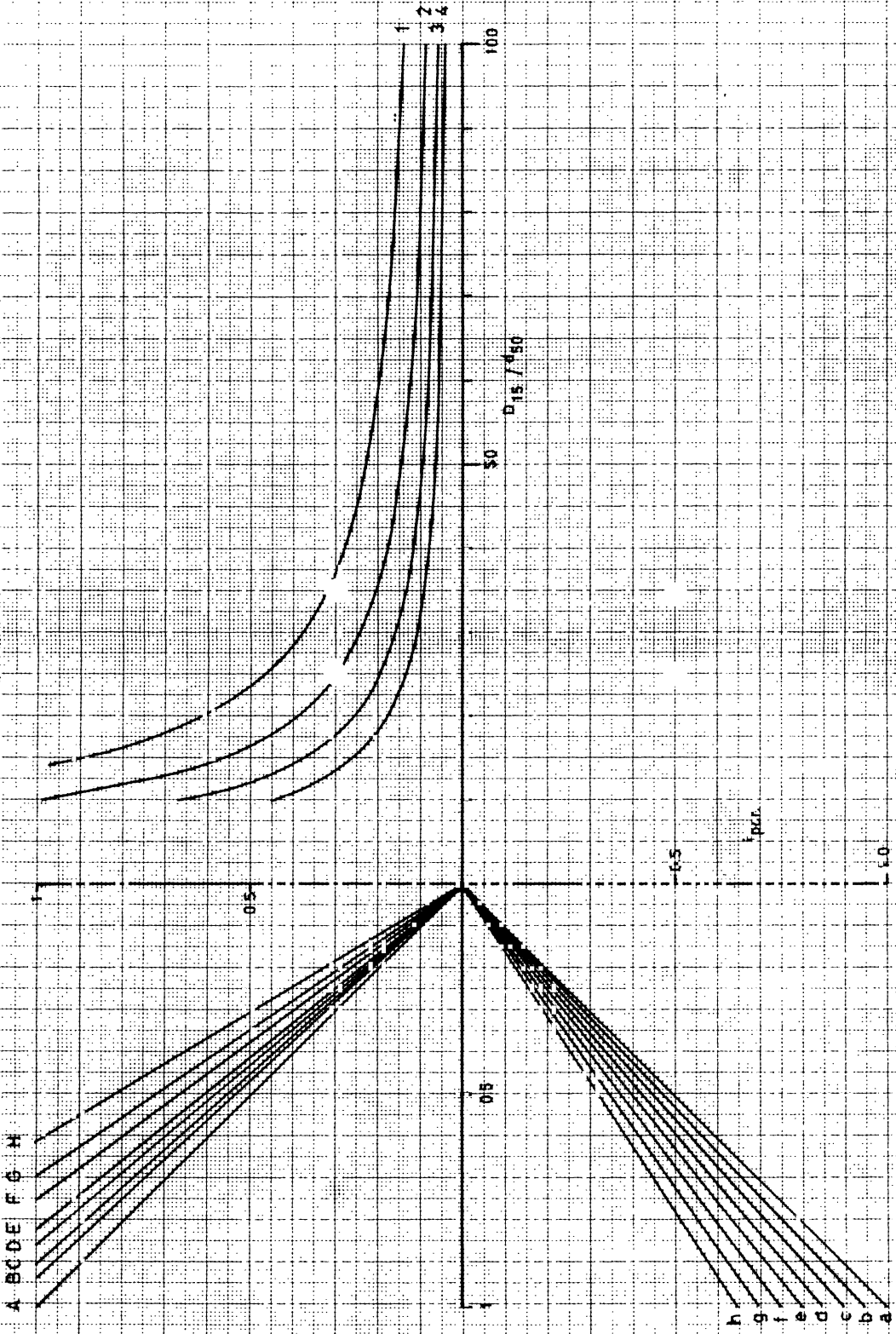
CO-416640

BIJL 4.7 a

form
A₄

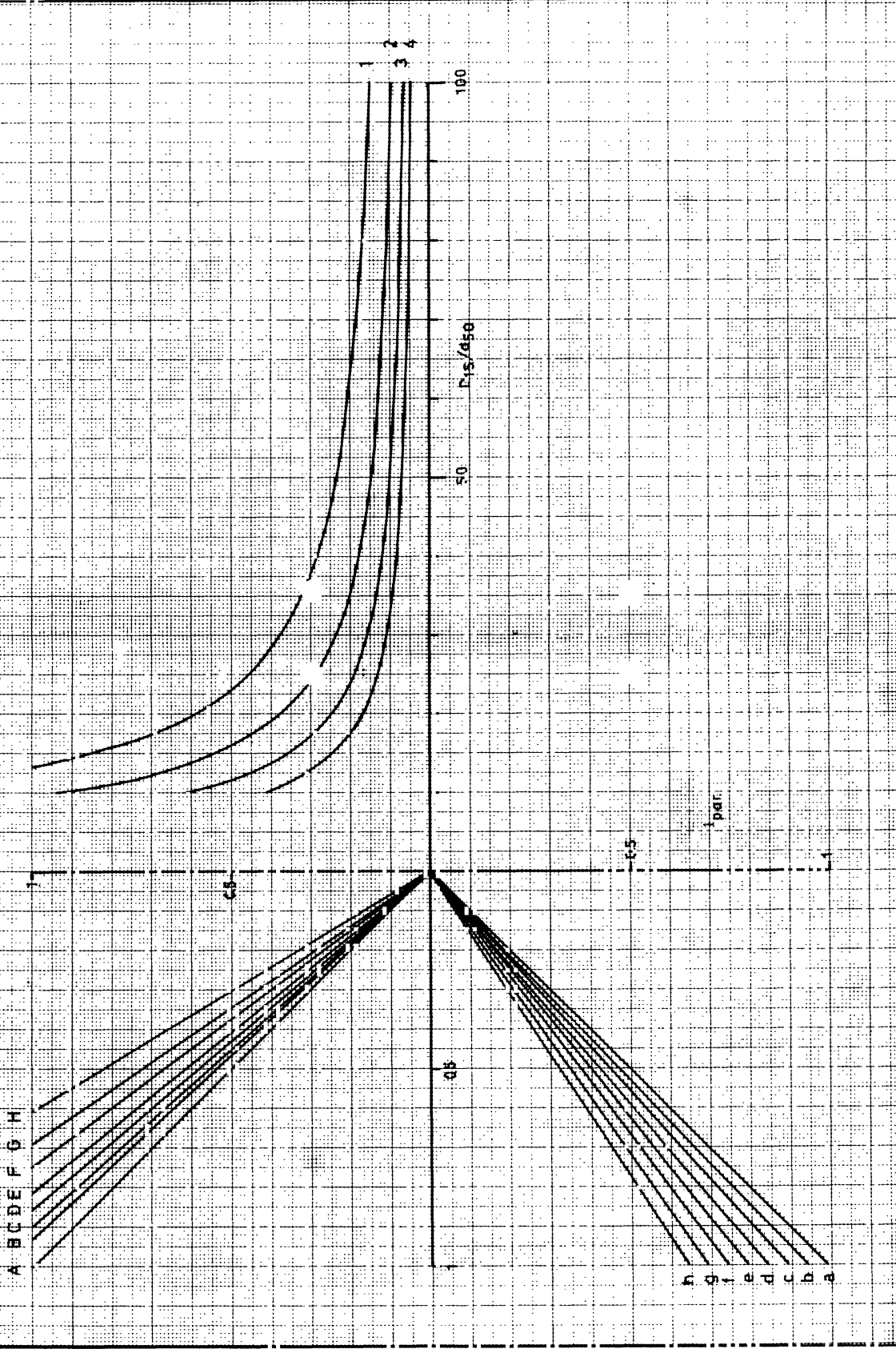


 laboratorium voor grondmechanica deift <small>telefoon: (015) 569223</small> <small>telefax: 36234 - 501811</small>	85-09-03	$\frac{p^d}{p^c}$
	CO-415640	$\frac{p^m}{p^c}$
d = 0.150 mm		$\frac{p^m}{p^c}$
BIJL 4.8		30/40



 laboratorium voor grondmechanica delft <small>WAG-3234, 569223</small>	<small>85-09-03</small> <small>85-09-03</small>	<small>85-09-03</small> <small>85-09-03</small>
	<small>CO-416640</small> <small>CO-416640</small>	<small>30%</small> <small>30%</small>
	<small>BUL 4.9</small> <small>BUL 4.9</small>	<small>40</small> <small>40</small>

d = 0.175 mm



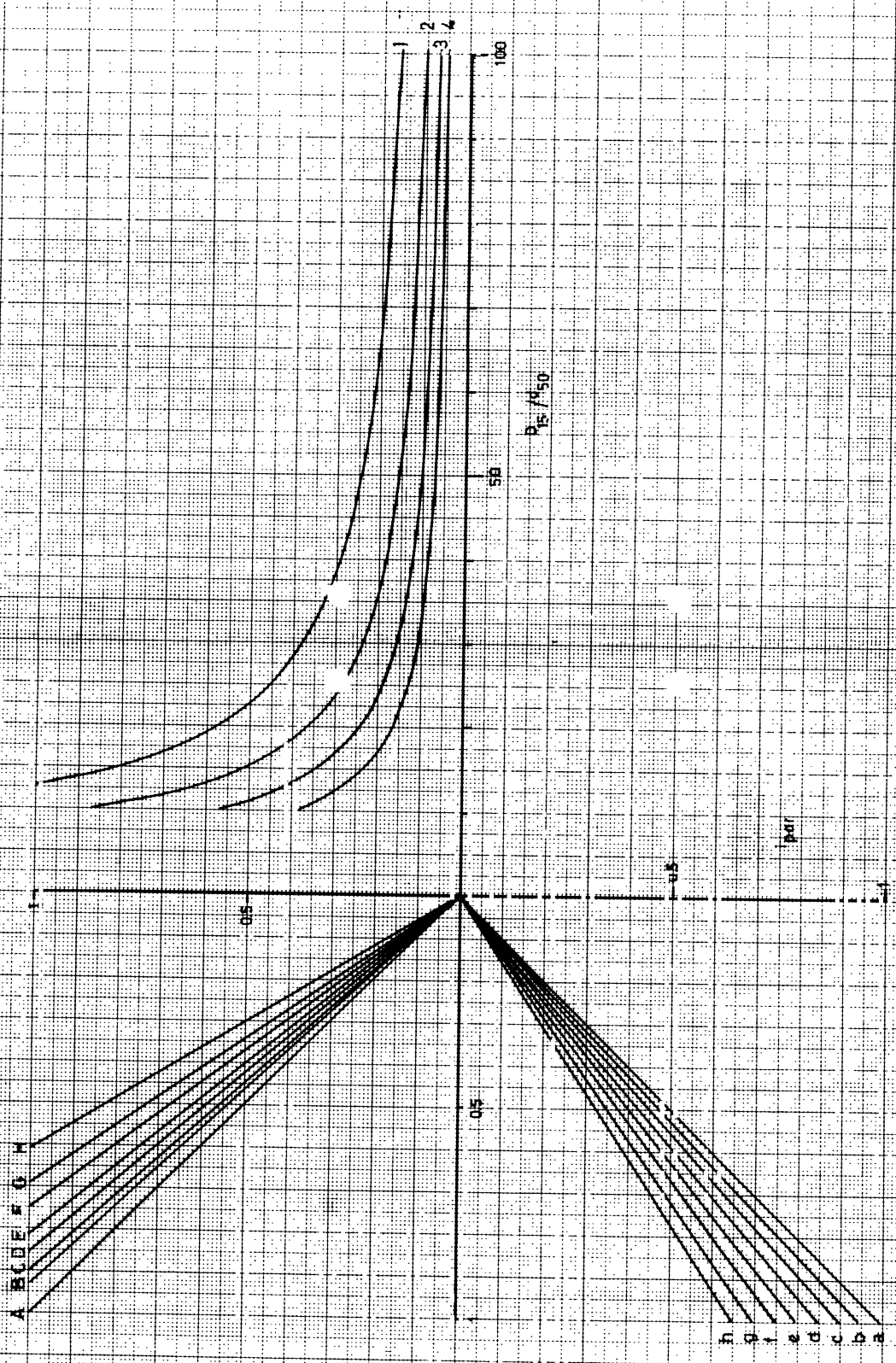
A B C D E F G H

h g f e d c b a

85-09-03	d_d	q_c
CO-416640		q_m
BIJL 4.10		q_0

laboratorium voor grondmechanica deift
1988, 38234, 1010B NI

d = 0.200 mm



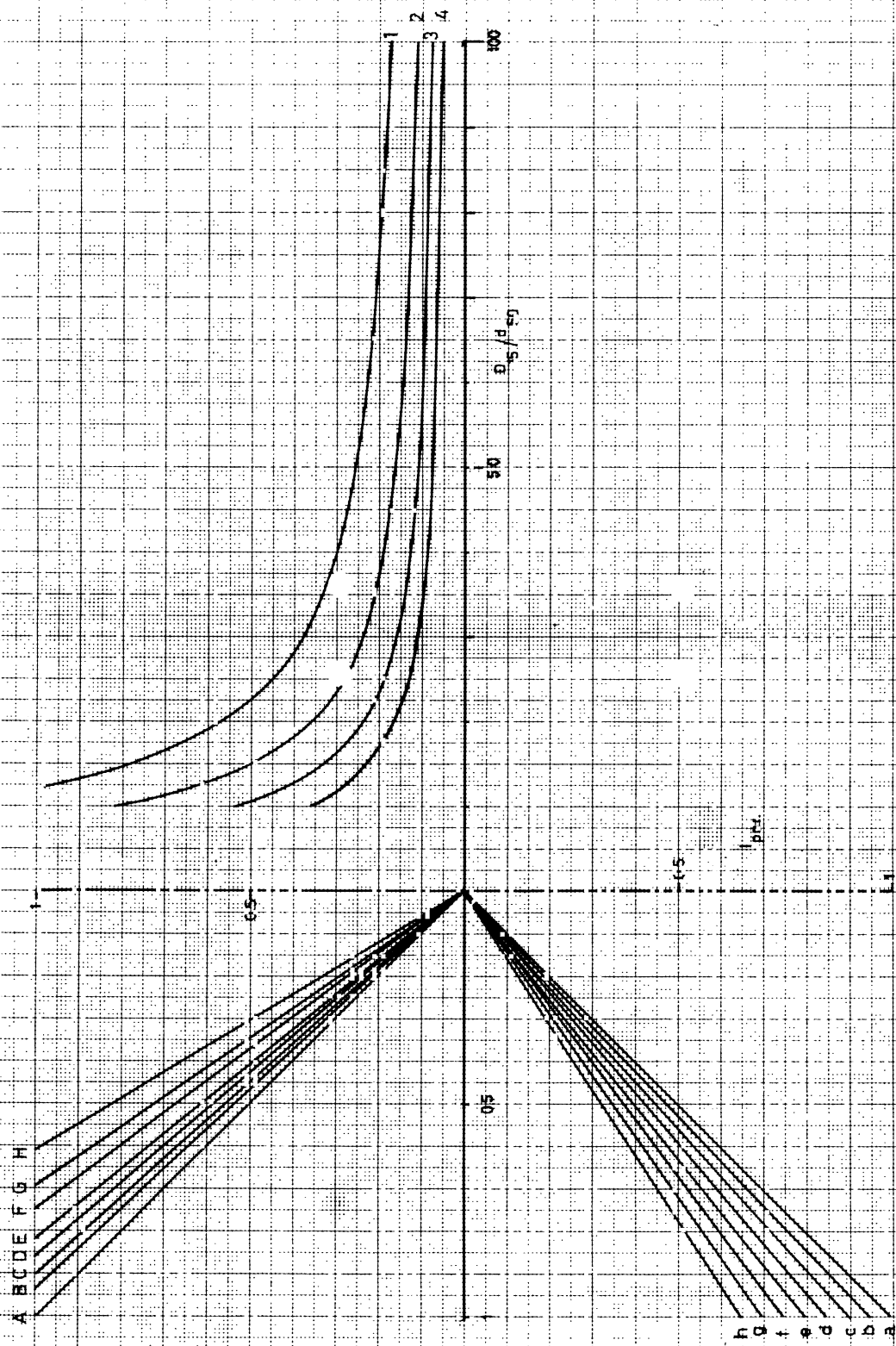
laboratorium voor grondmechanica deift
 telefoon (015) 569223
 fax 38234 mob nr

85-09-03
 CO-416640

BIJL 4.11

d = 0.225 m

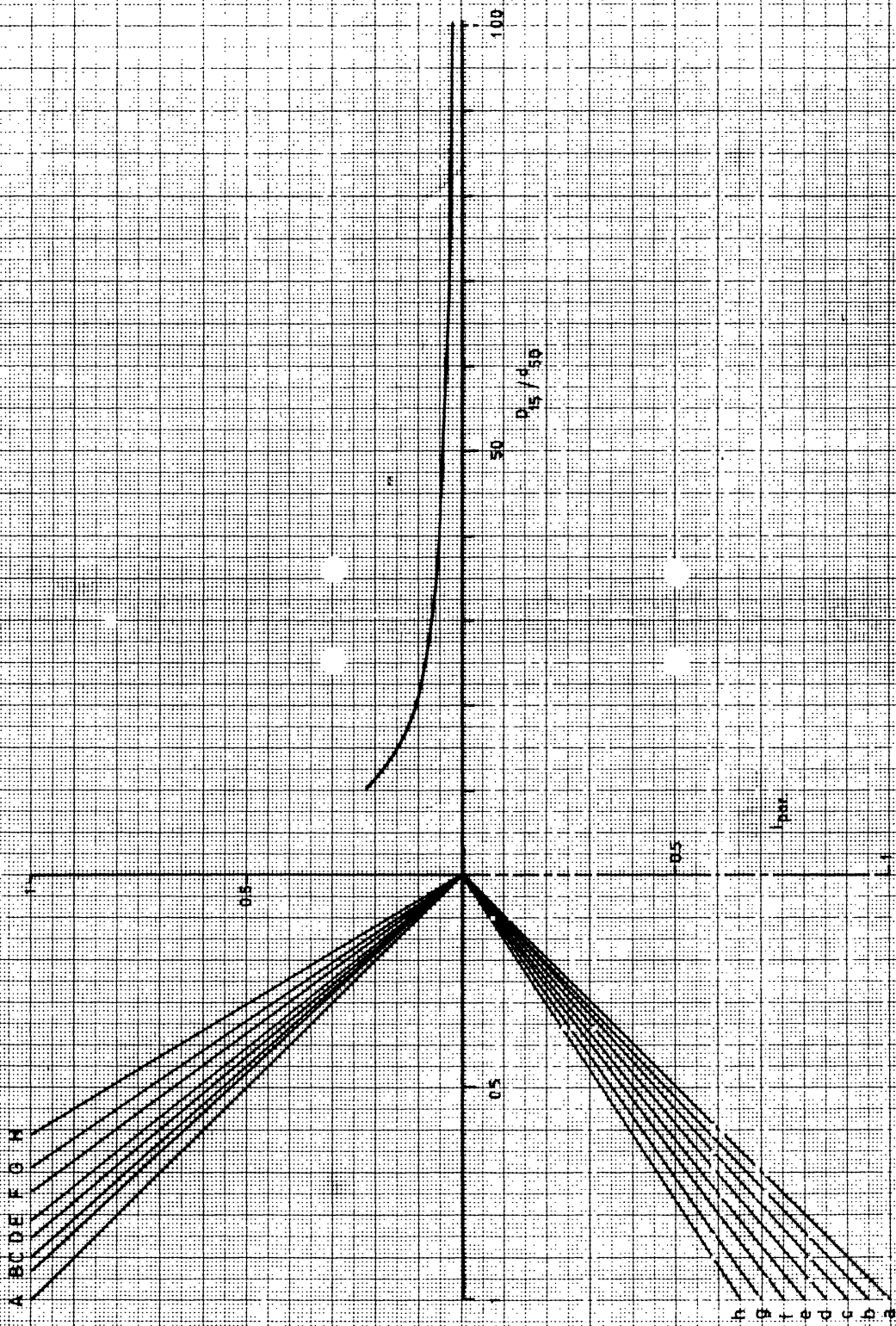
30/40



laboratorium voor grondmechanica deift
telefoon (015) 569223
telefax 38234 sohb nl

d.d. 85-09-03 g.c.
g.c.
 CO-416640 loc m
 BIJL 4 12 30/40

d = 0.250 mm



laboratorium voor grondmechanica delft
laboon 0151 589223
tel. 30234 10100 n

85-09-03
 CO-416640
 BIJL 4.13

ϕ
 p-c
 $\frac{100}{40}$

d = 0.820 mm

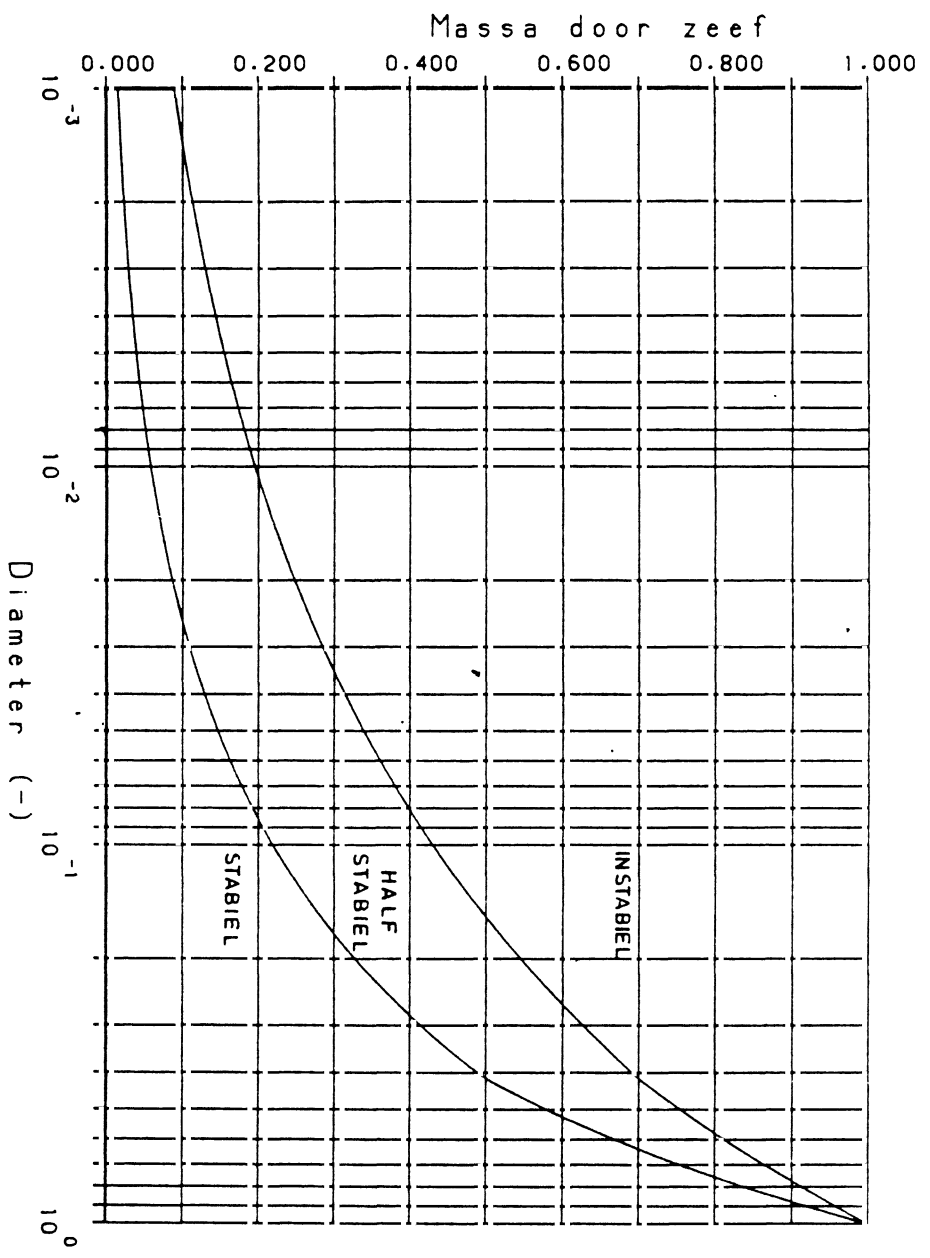


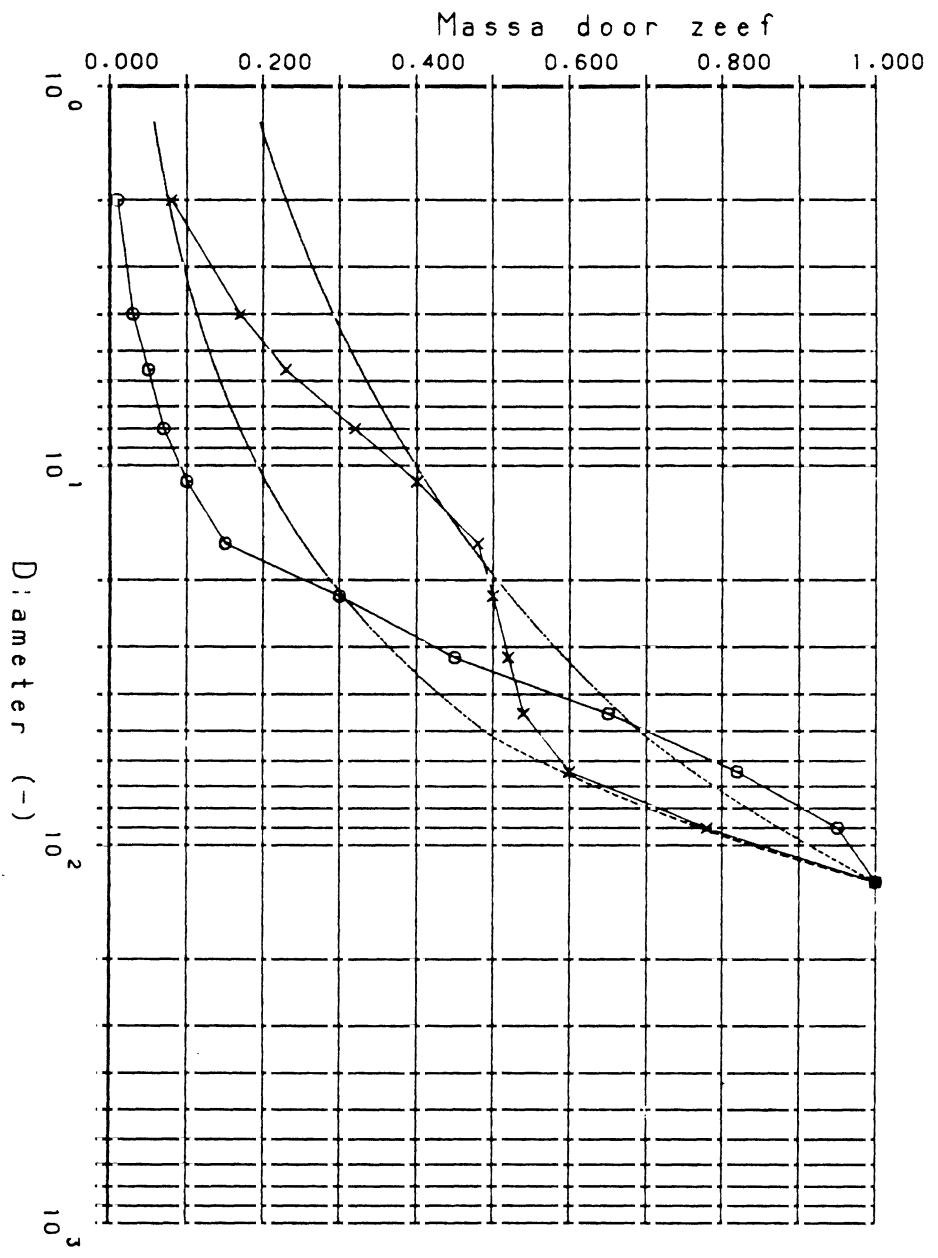
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Interne stabiliteitscurves volgens Lubochkov

CO-416640 Hda
BIJL. 414







LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

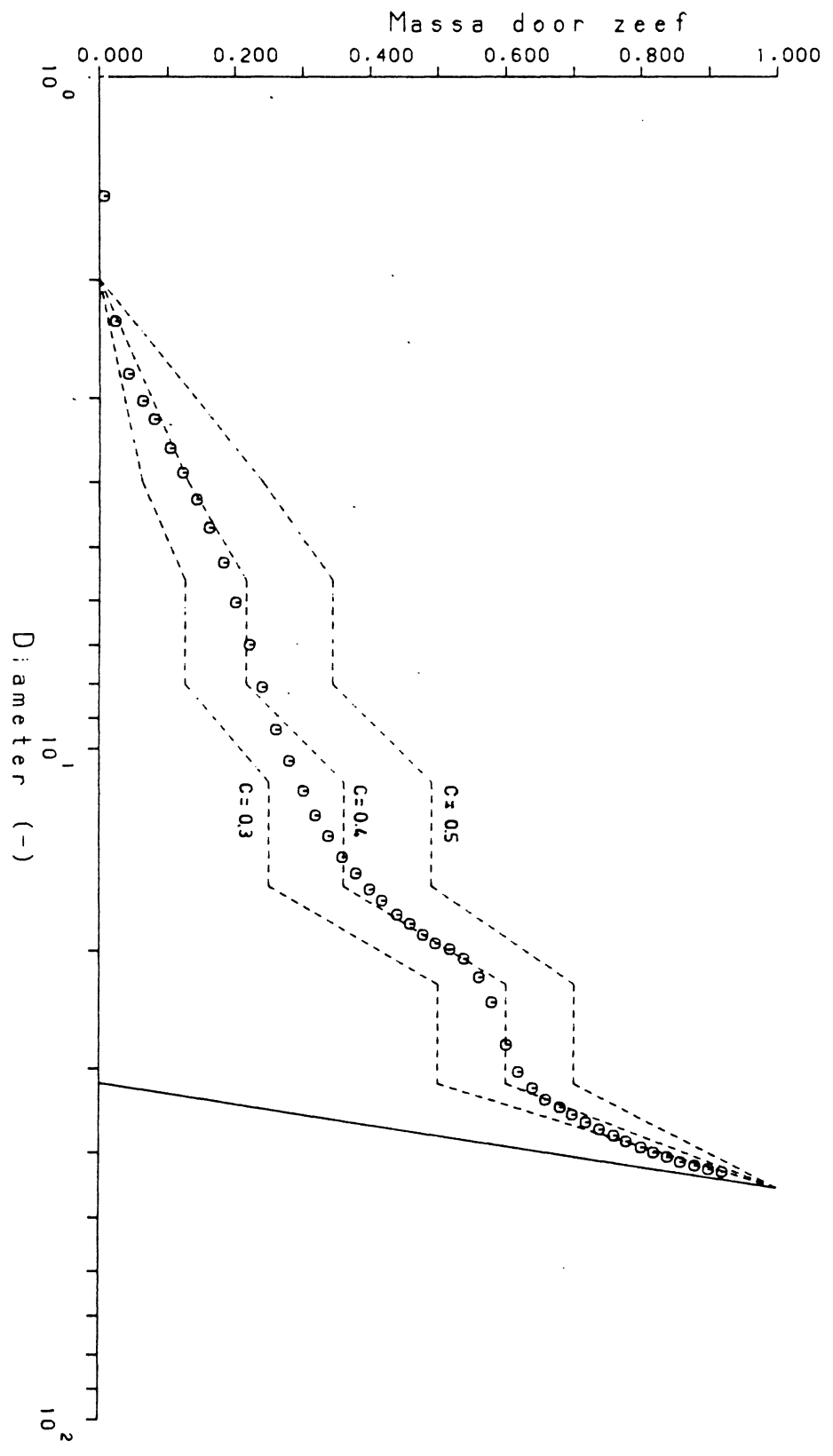
85-09-17

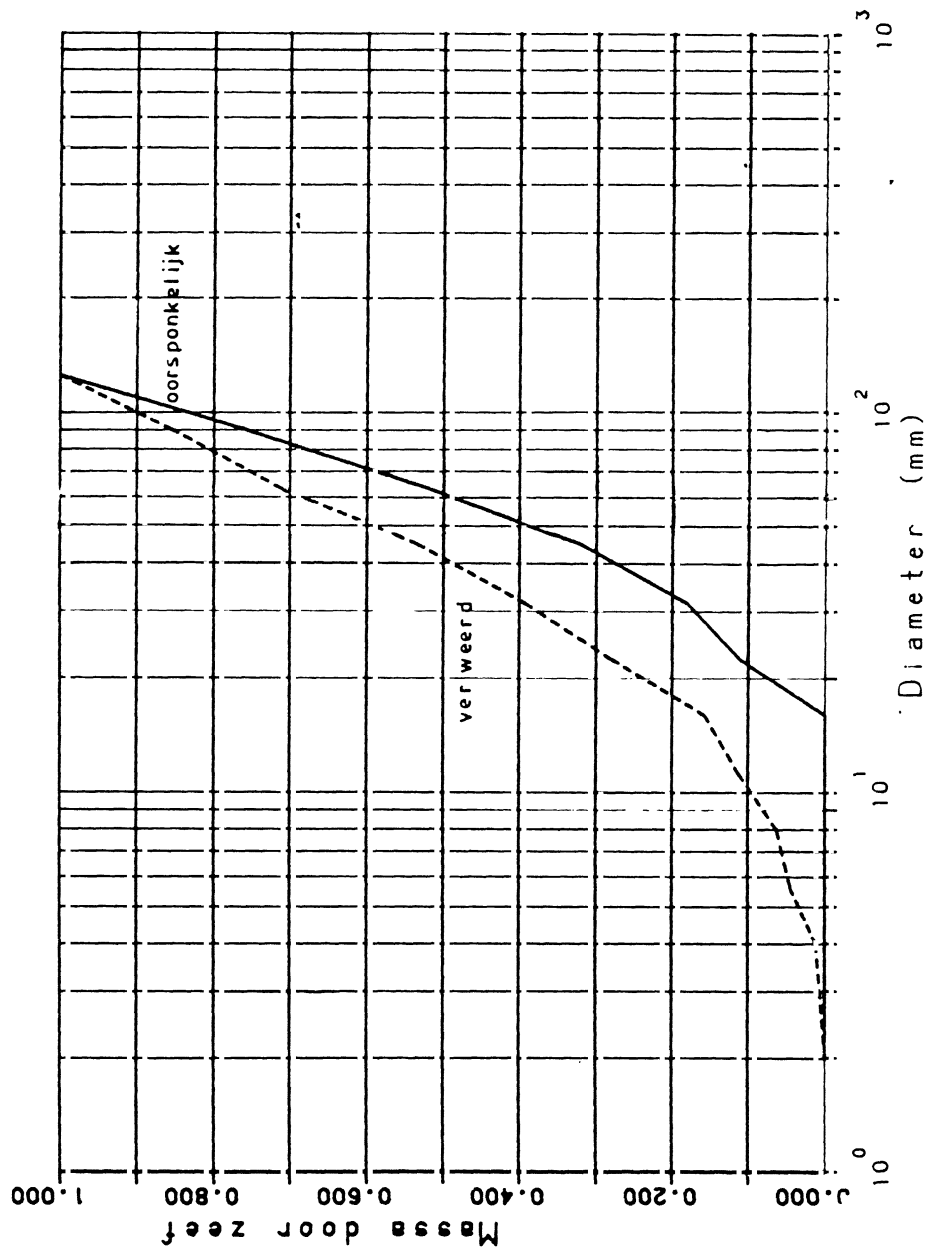
Verweerde mijnsteen, fractie C31.5-C45

na 2 jaren

CO-416640 Hda

BIJL. 61





LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Splijting en verwerings model toegepast
op mijnsteen uit Zollverein

CO-416640 Hda

BIJL. 6.2



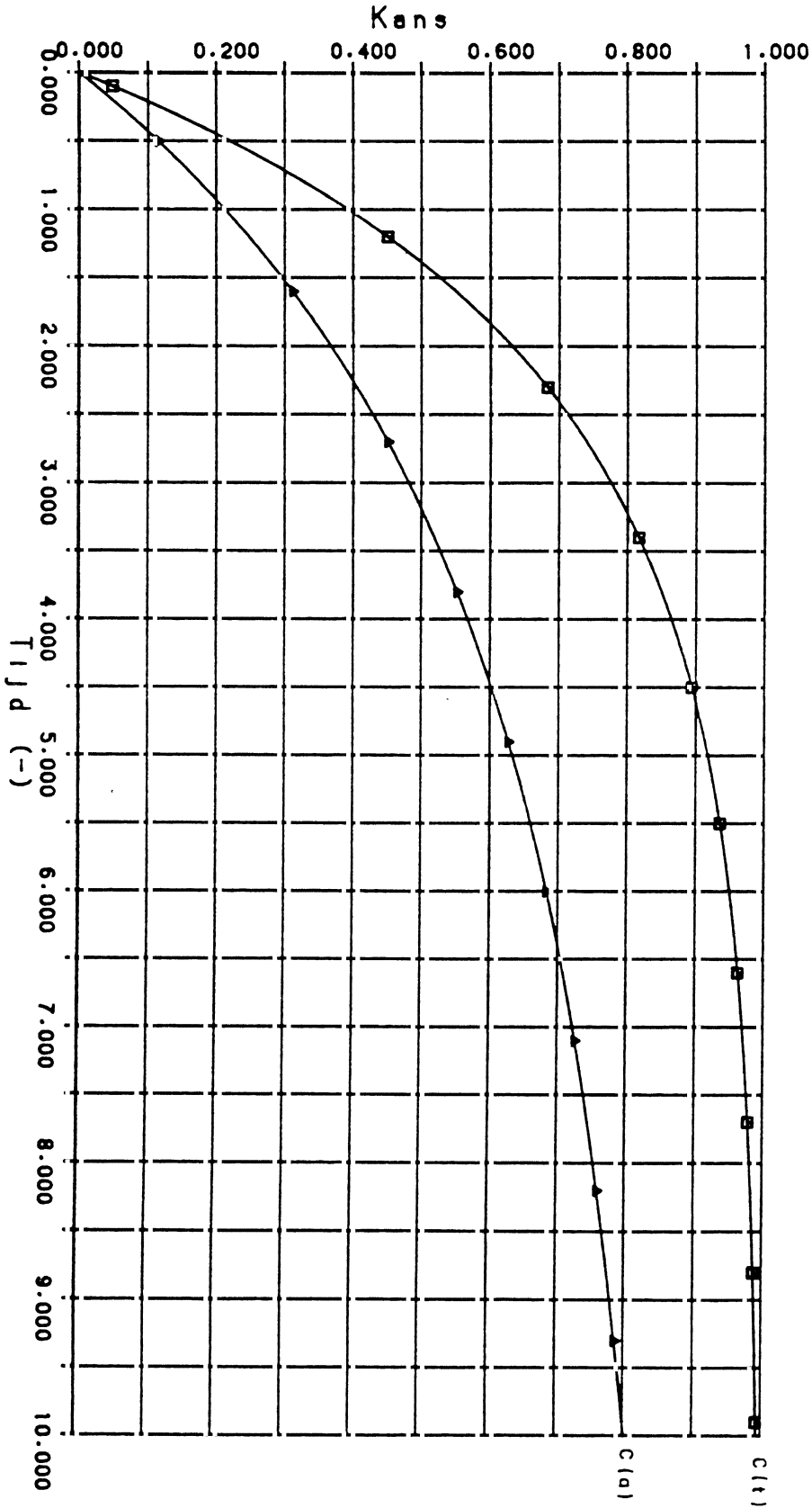
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Kans op halvering $c(t)$ (rondjes) en het
tijdgemiddelde $c(a)$ (driehoekjes)

B.I.J.L. 63

CO-416640 Hda





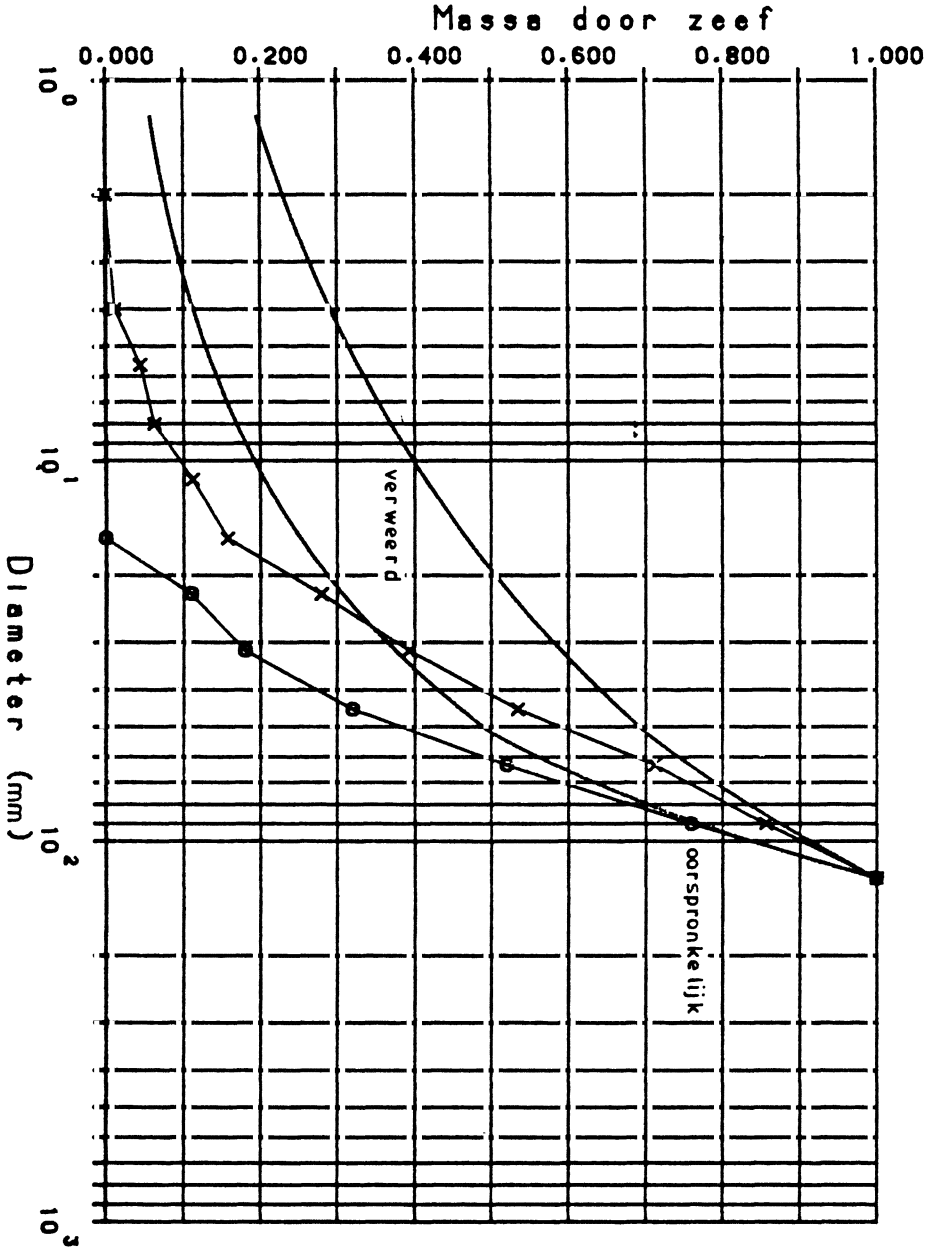
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

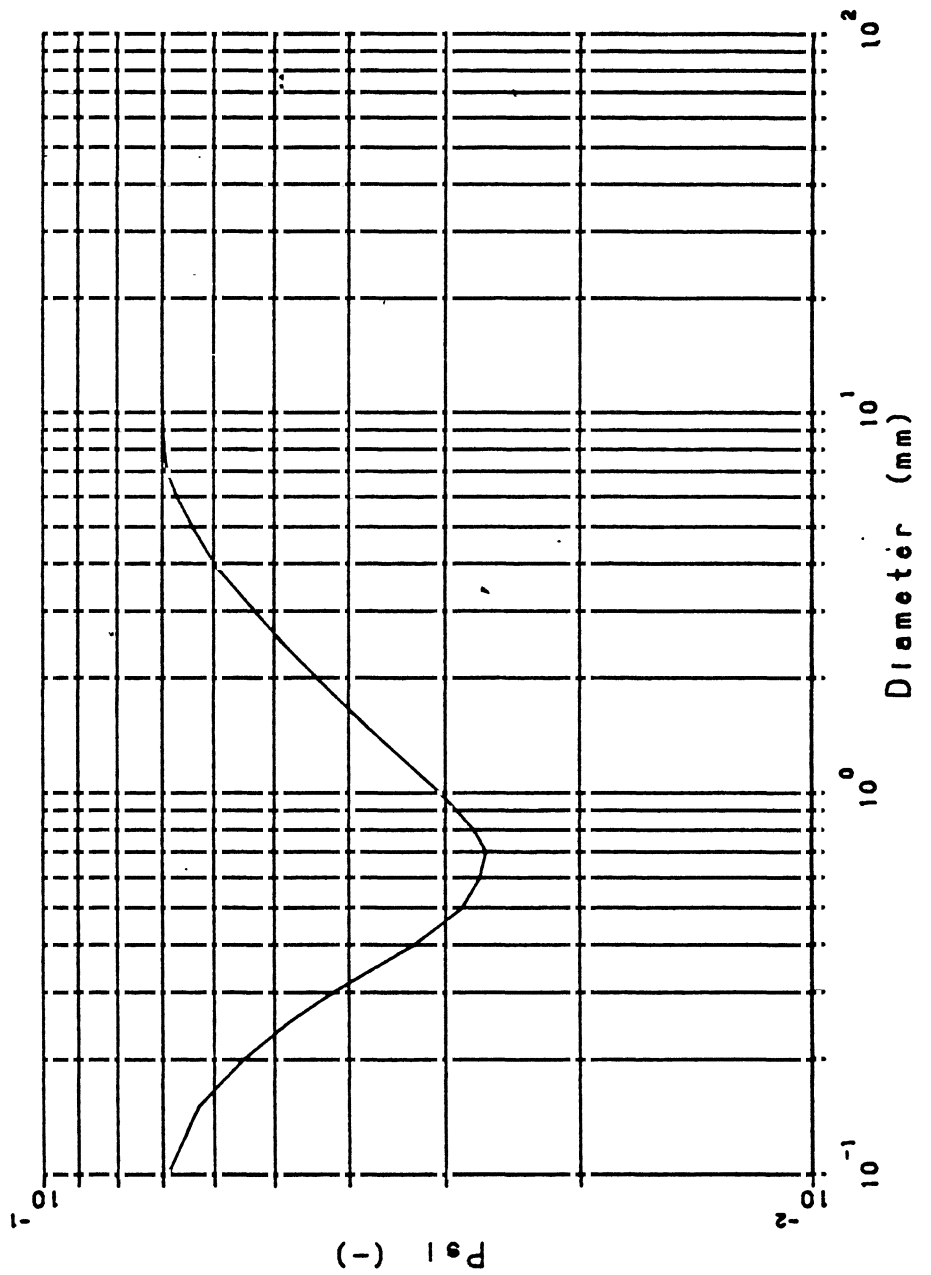
85-09-17

CO-416640 Hda

BIJL. 64

Splijting en verwerings model voor mijn-
steen, Zoliverein, Intern stabiel?





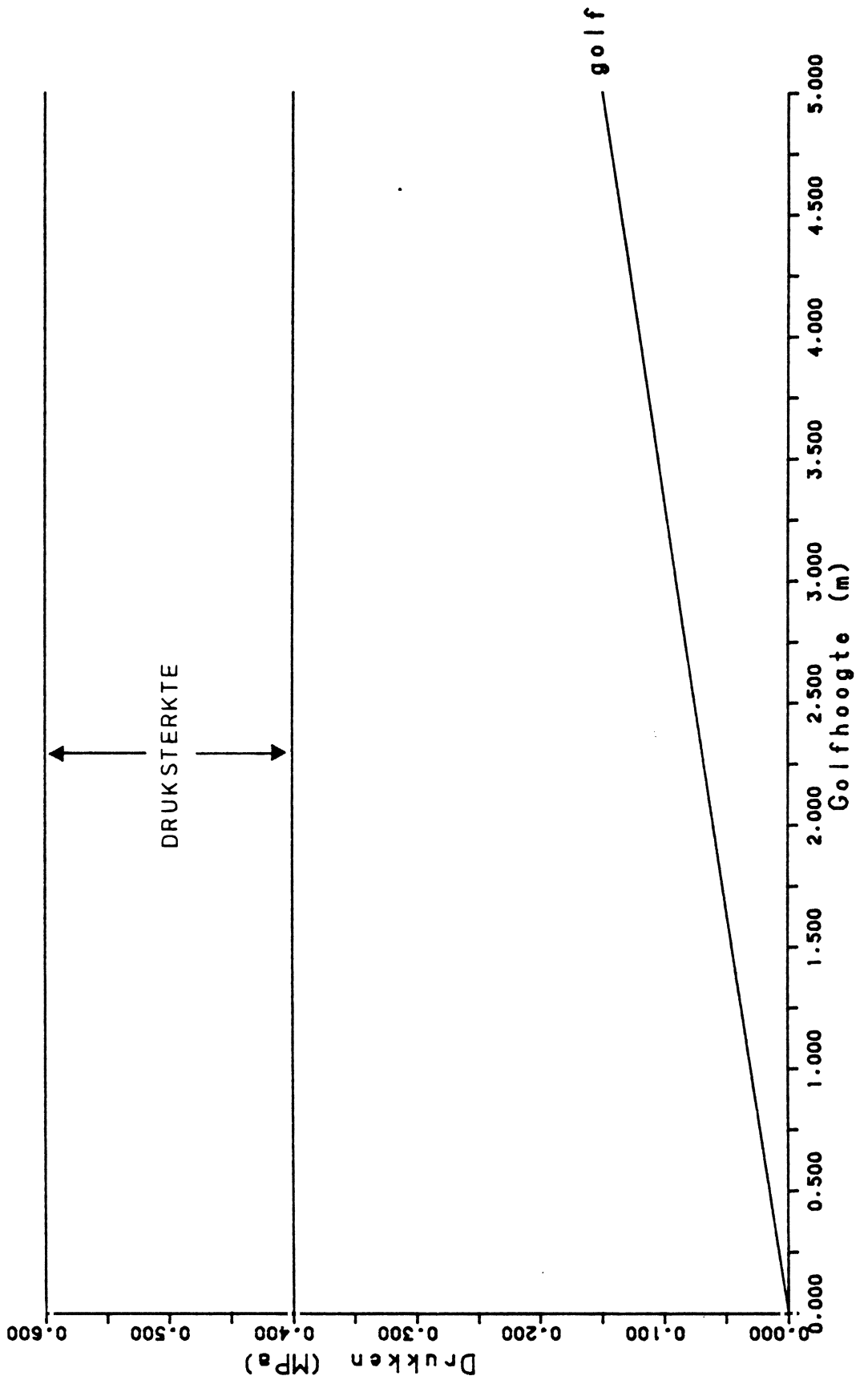
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Shields parameter, omgerekend naar diameter

CO-416640 Hda

BIJL. 8.1



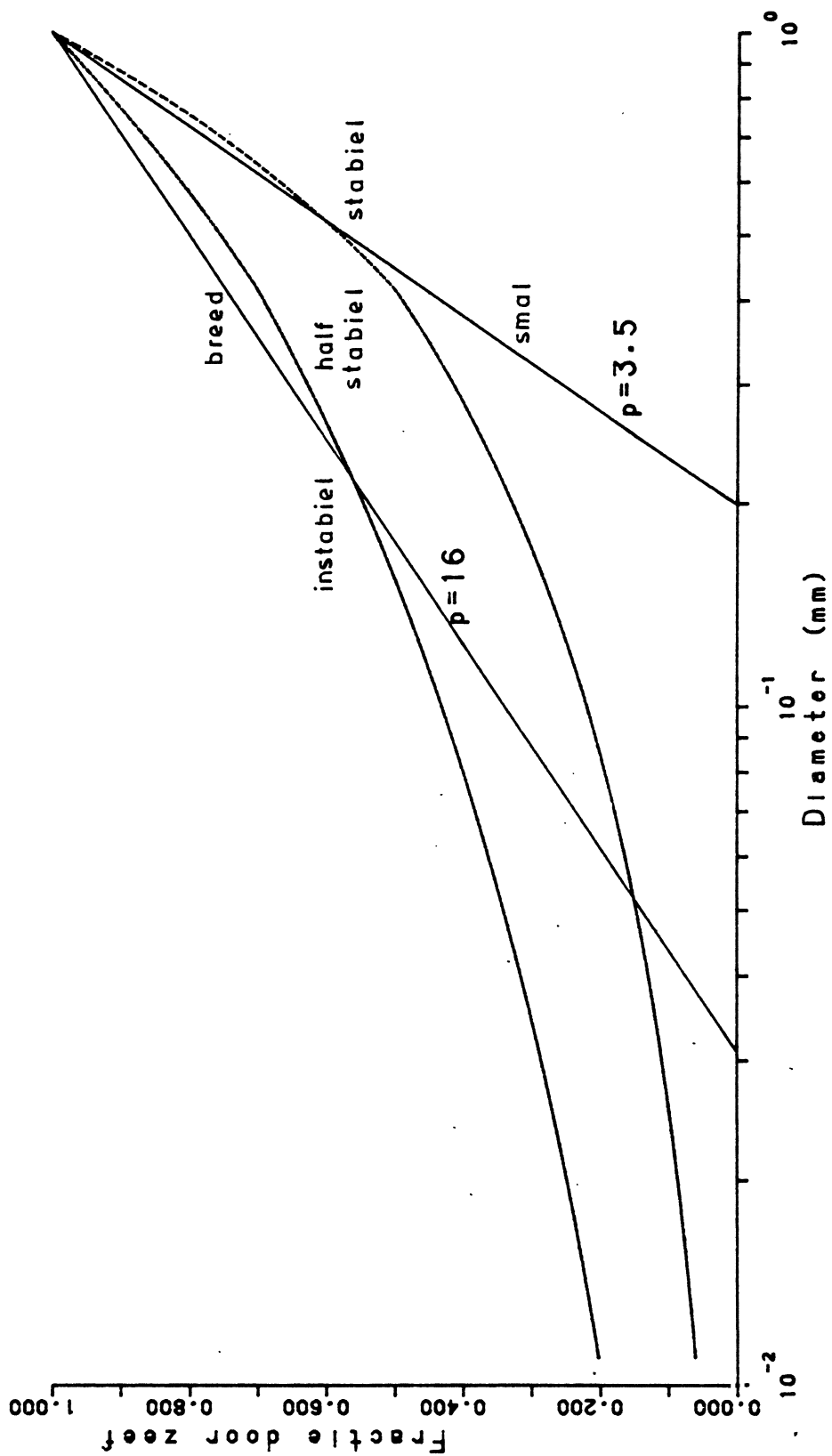
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Vergelijking van de druksterkte van LD-slakken met drukken van de golfklappen

CO-416640 Hda

BIJL. 82



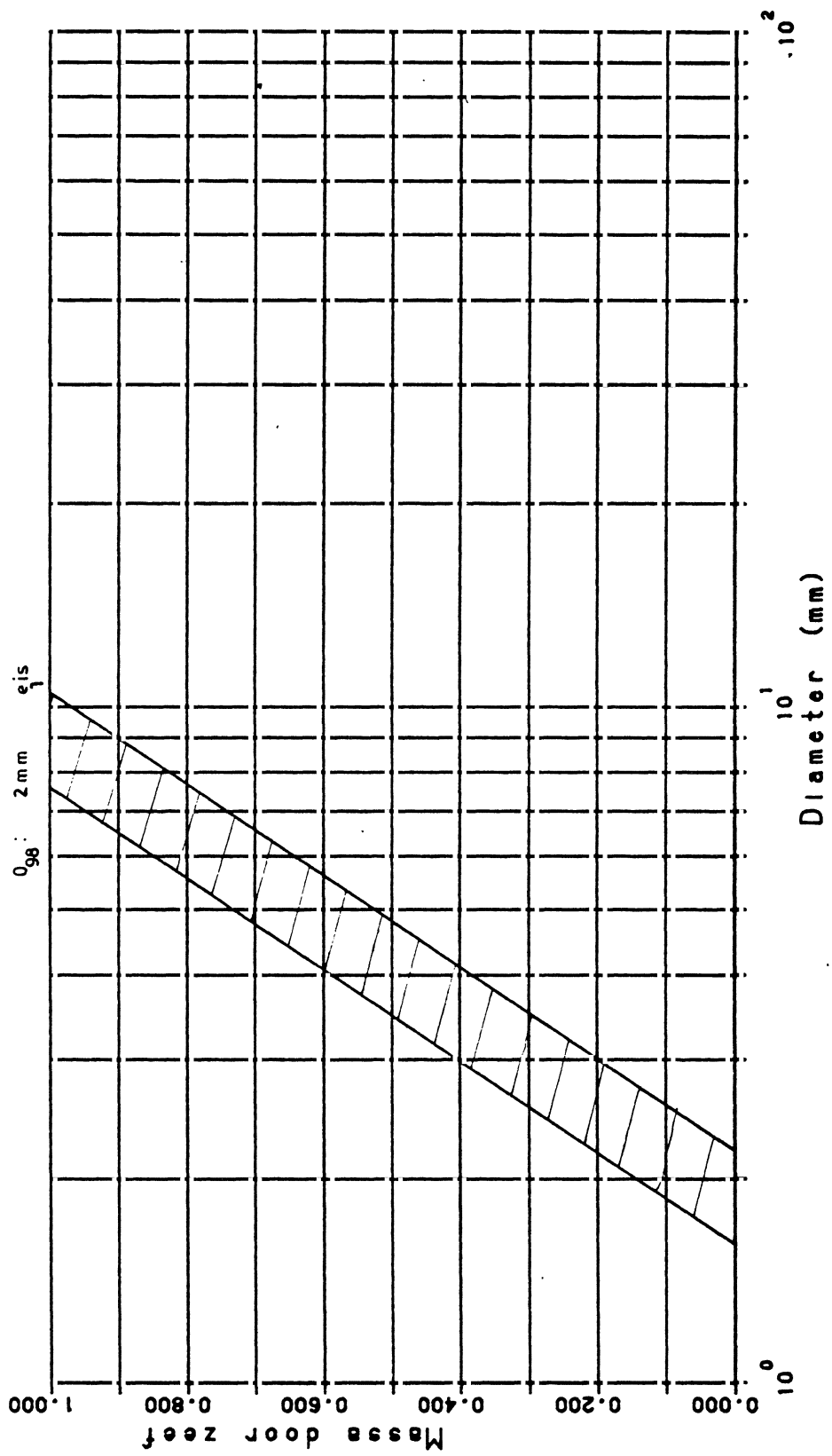
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Toetsing interne stabiliteit. Criteria
Lubochkov en moedercurves $p=3.5$ en 16.

CO-416640 Hda

BIJL. 91



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

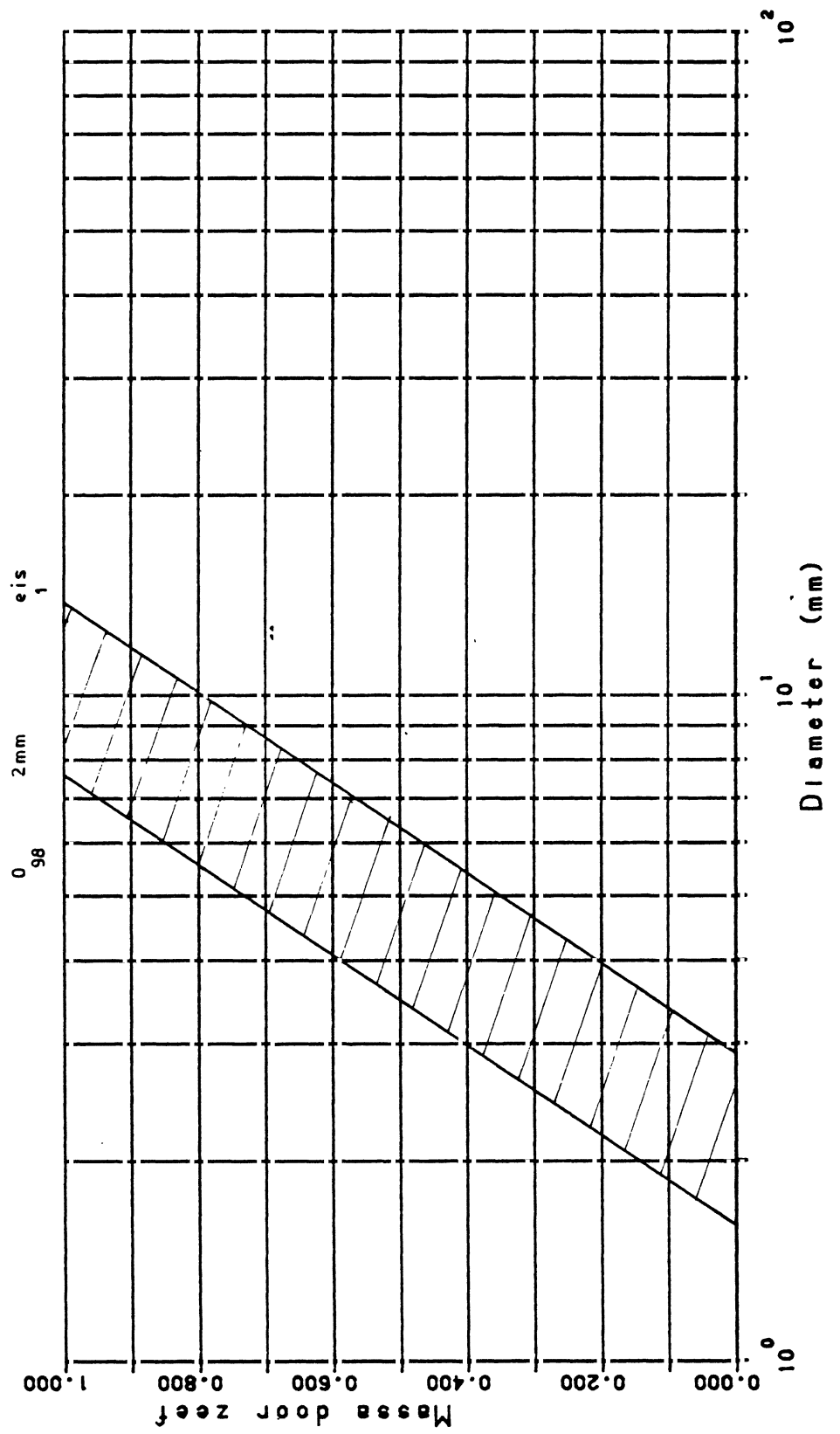
85-09-17

Zeefband bij een smalle korrelverdeling
 Talud 1:3 d₅₀=0.2mm

CO-416640

Hda

BIJL. 92



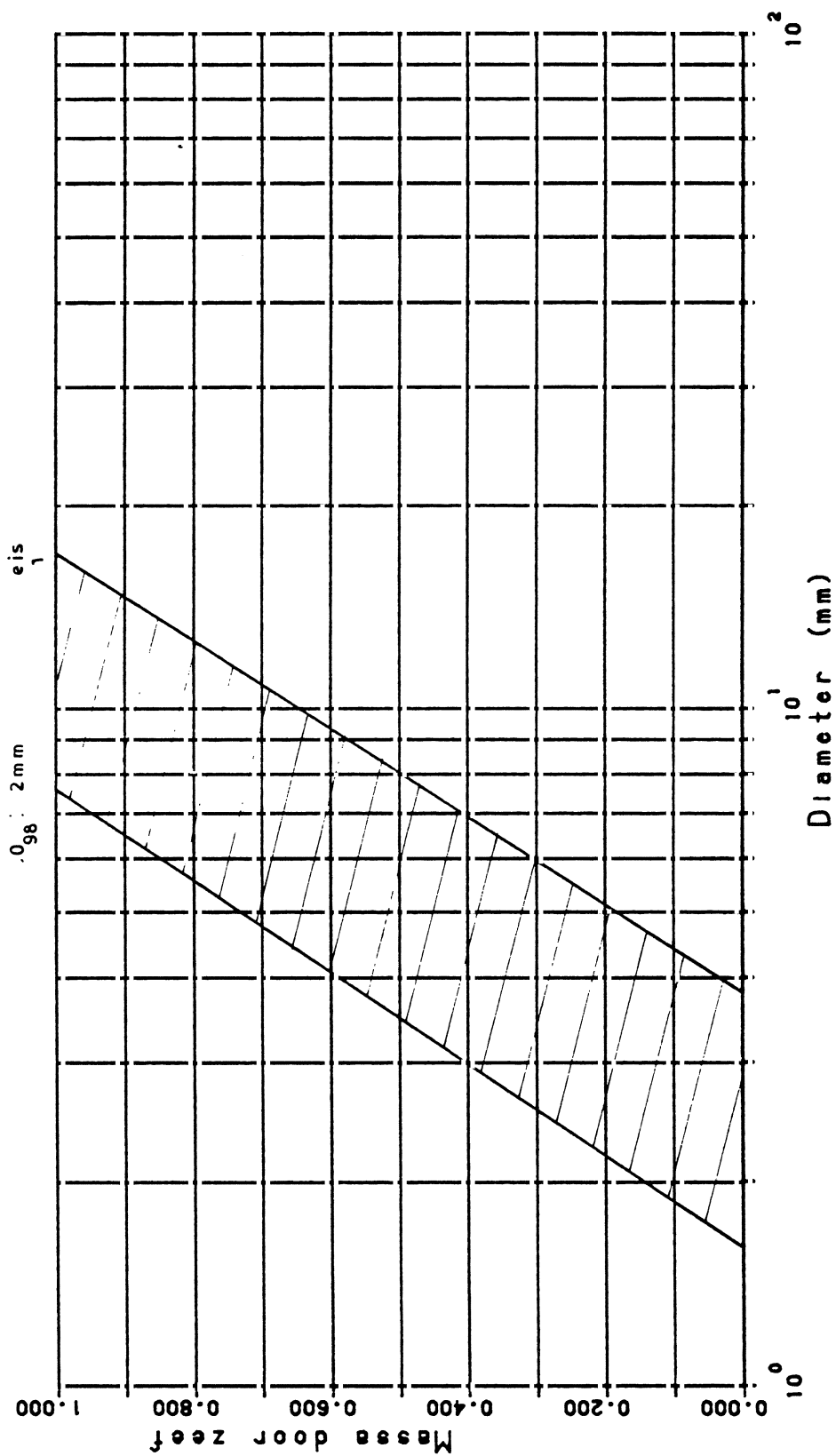
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Zeefband bij een smalle korrelverdeling
Talud 1:4 d₅₀=0.2mm

CO-416640 Hda

BIJL. 93



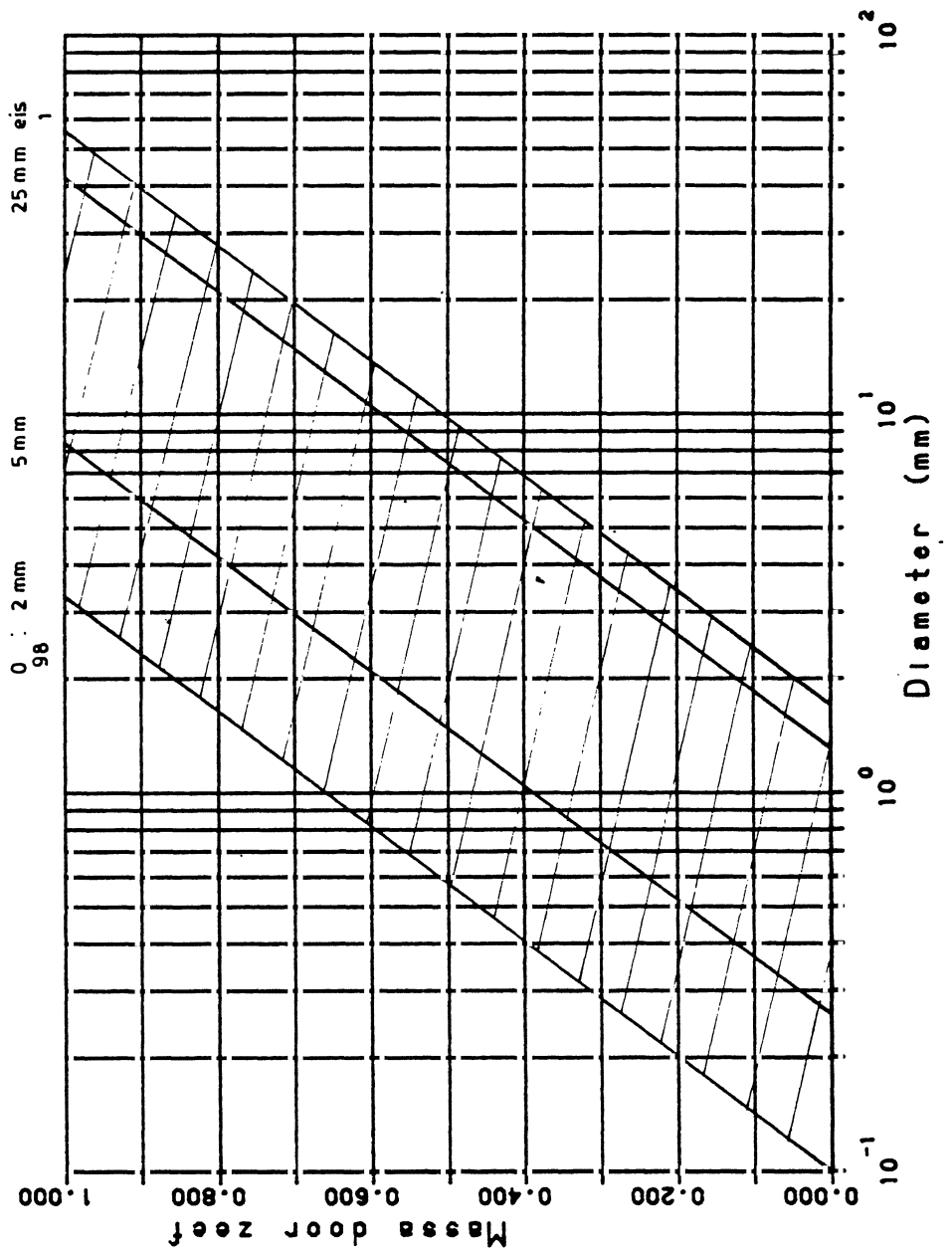
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Zeefband bij een smalle korrelverdeling
 Talud 1:2, 1:3 en 1:4; d₅₀=0.82mm

CO-416640 Hda

BIJL. 94



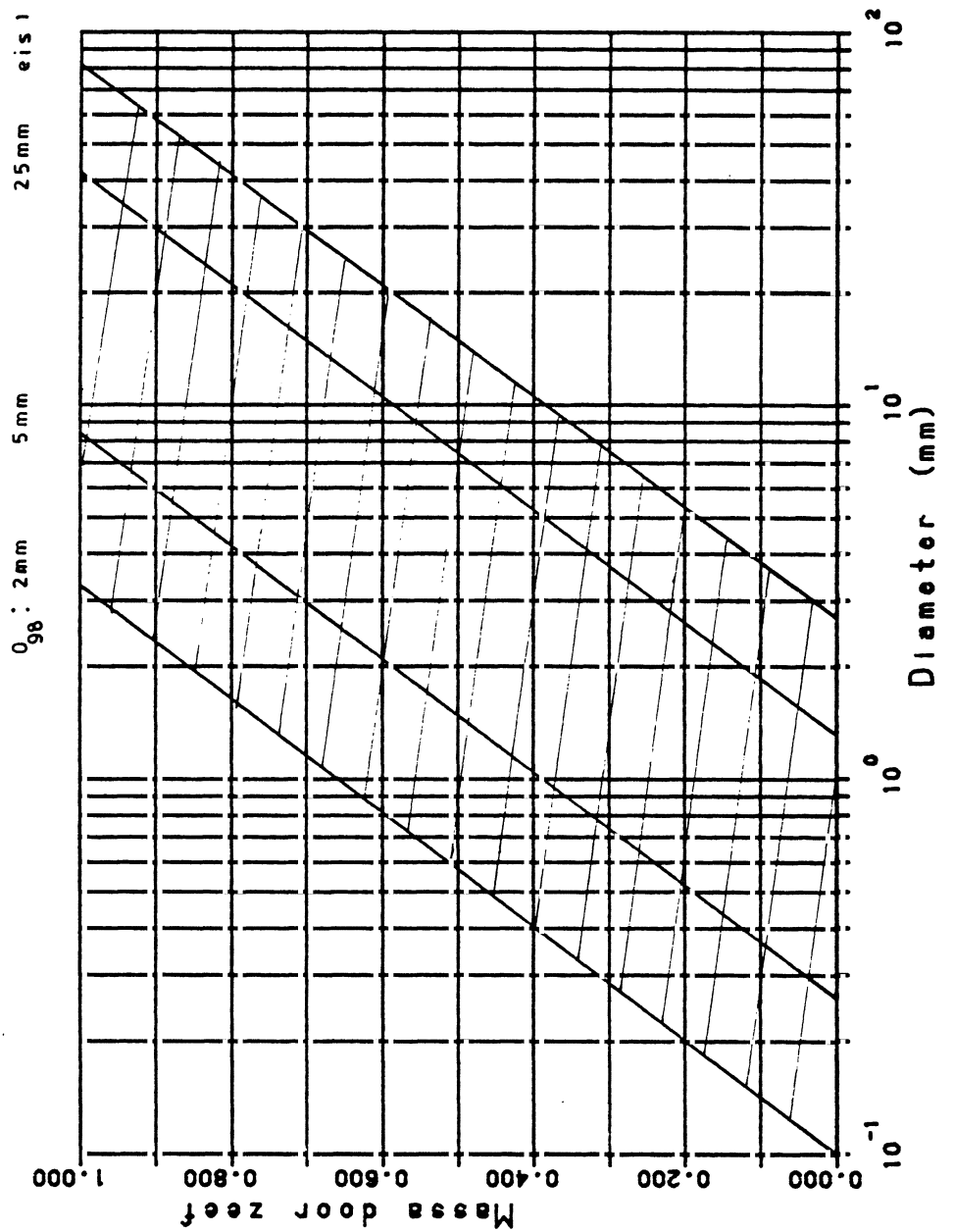
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Zeefband bij een brede korrelverdeling
Talud 1:2 d₅₀=0.2mm

CO-416640 Hda

BIJL. 95



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

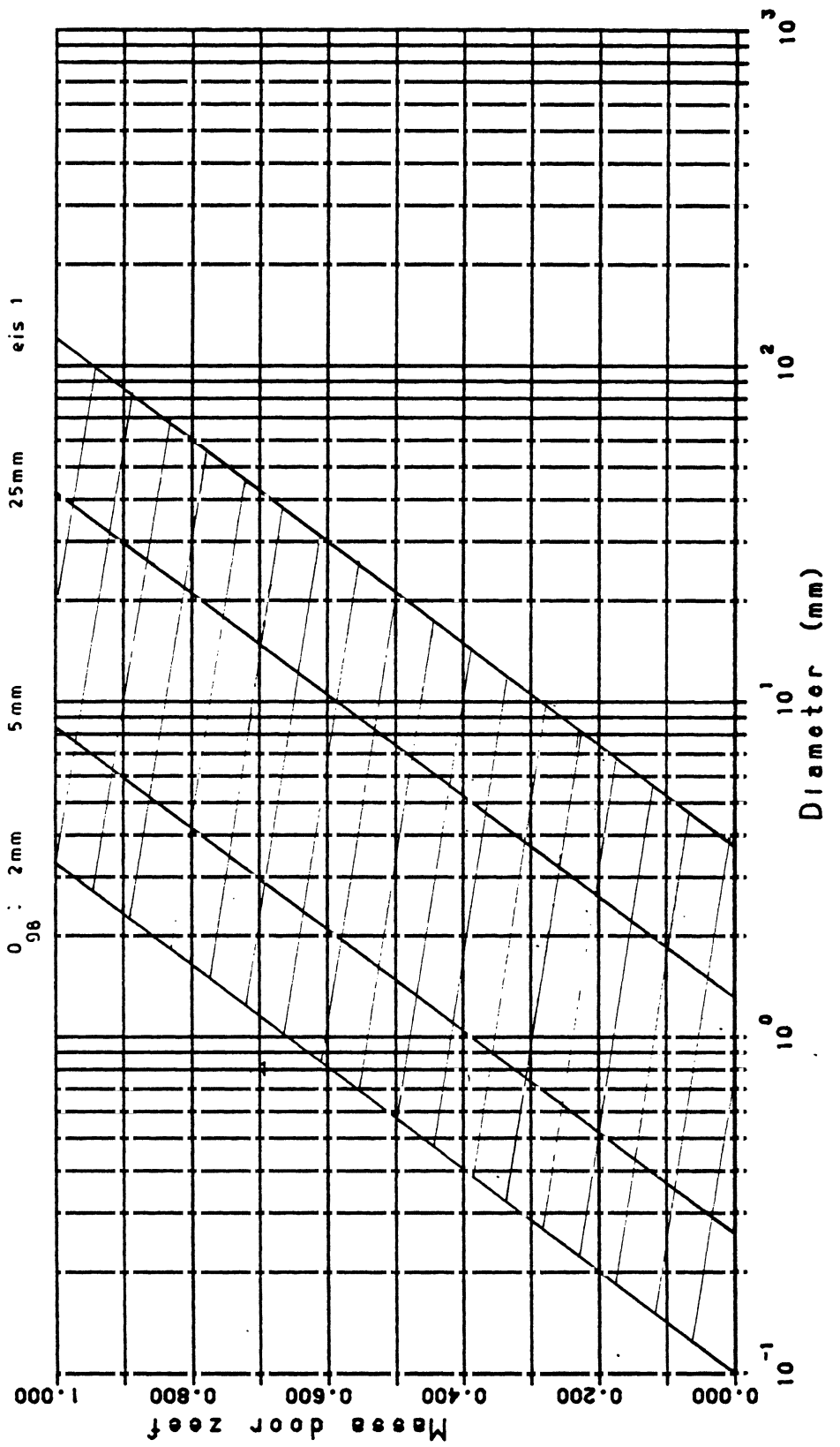
85-09-17

Zeefband bij een brede korrelverdeling
Talud 1:3 $d_{50}=0.2\text{mm}$

CO-416640

Hda

BIJL. 96



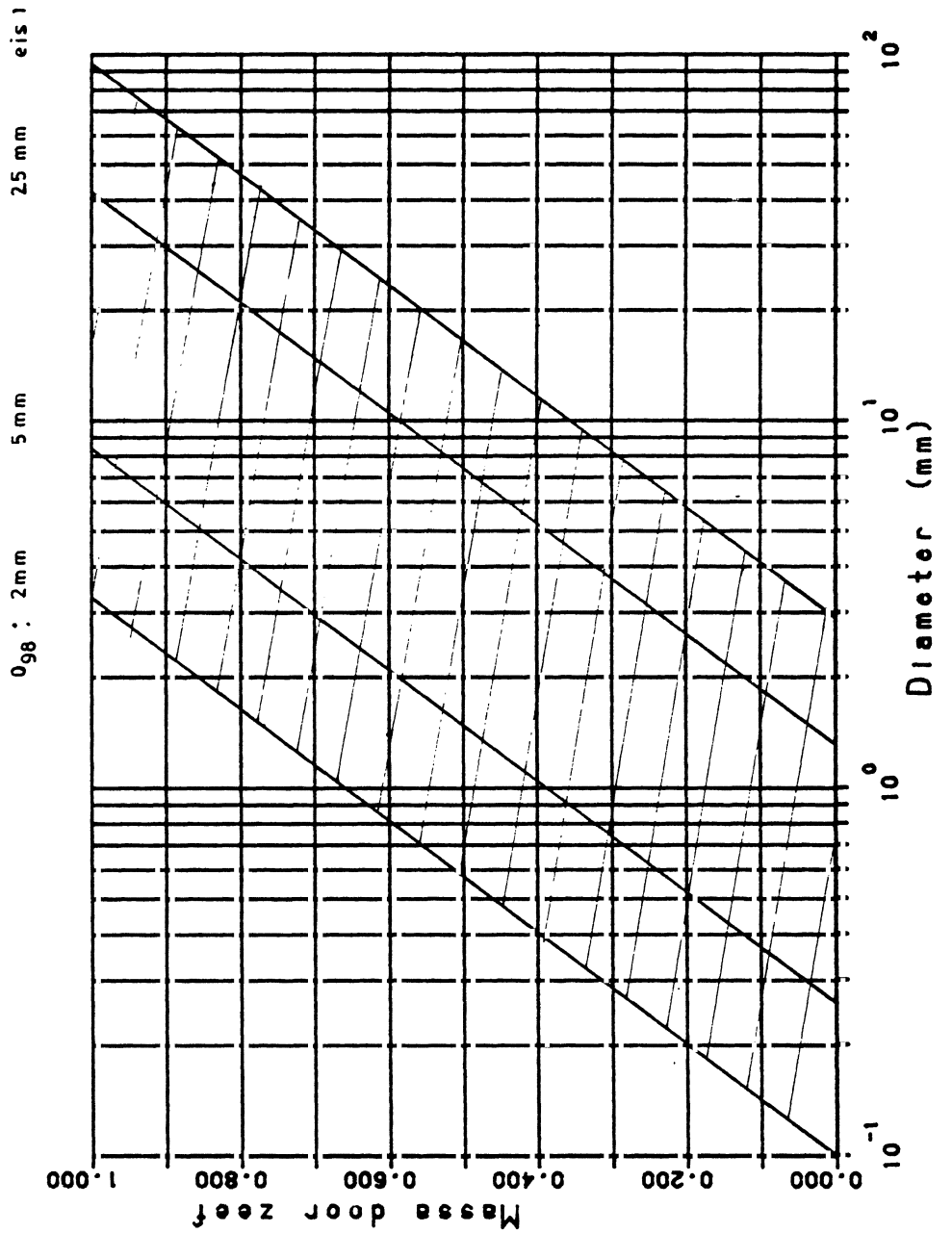
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Zeefband bij een brede korrelverdeling
 Talud 1:4 $d_{50}=0.2\text{mm}$

CO-416640 Hda

BIJL. 97



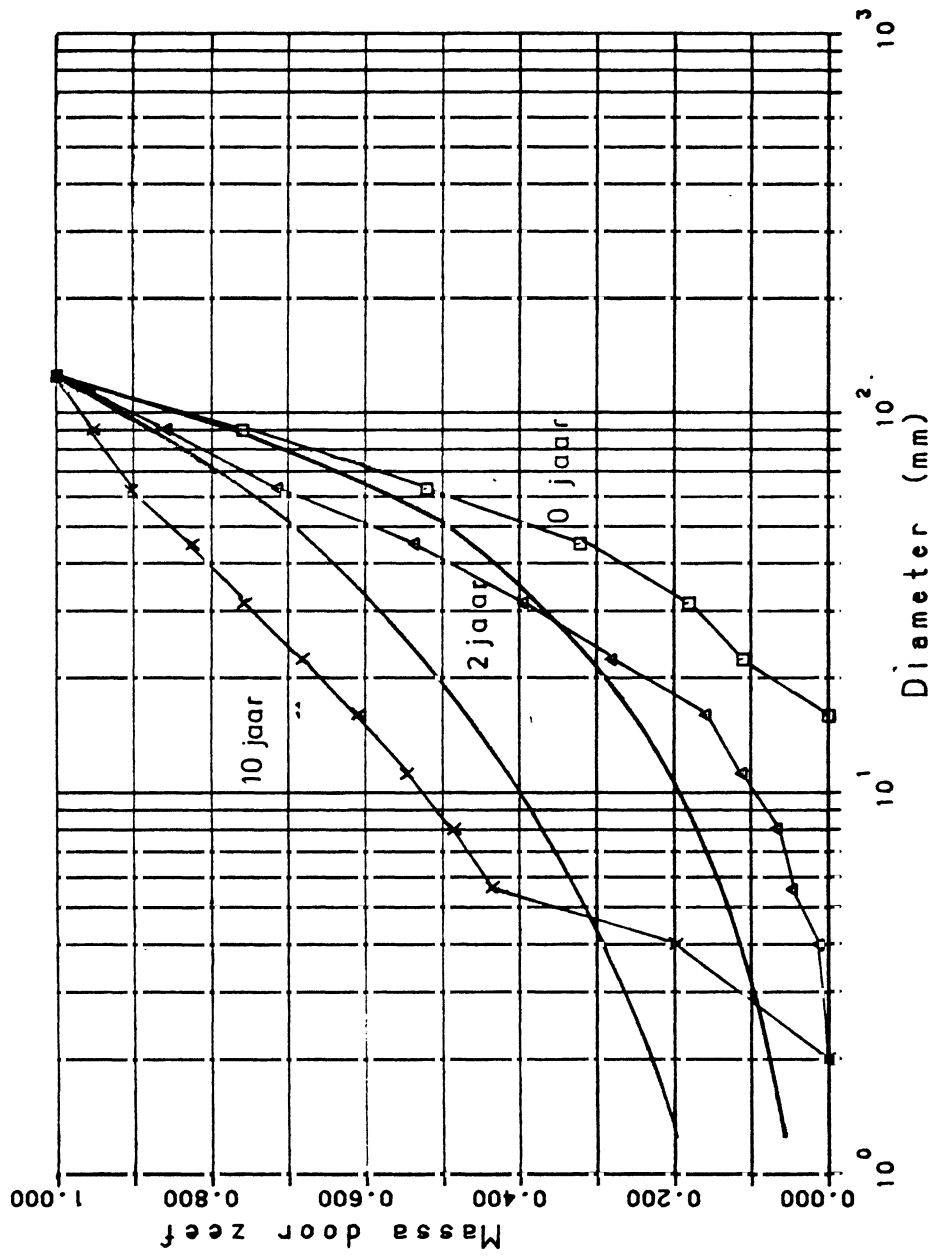
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Zeefband bij een brede korrelverdeling
 Talud 1:2, 1:3 en 1:4; $d_{50}=0.82\text{mm}$

CO-416640 Hda

BIJL. 98



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

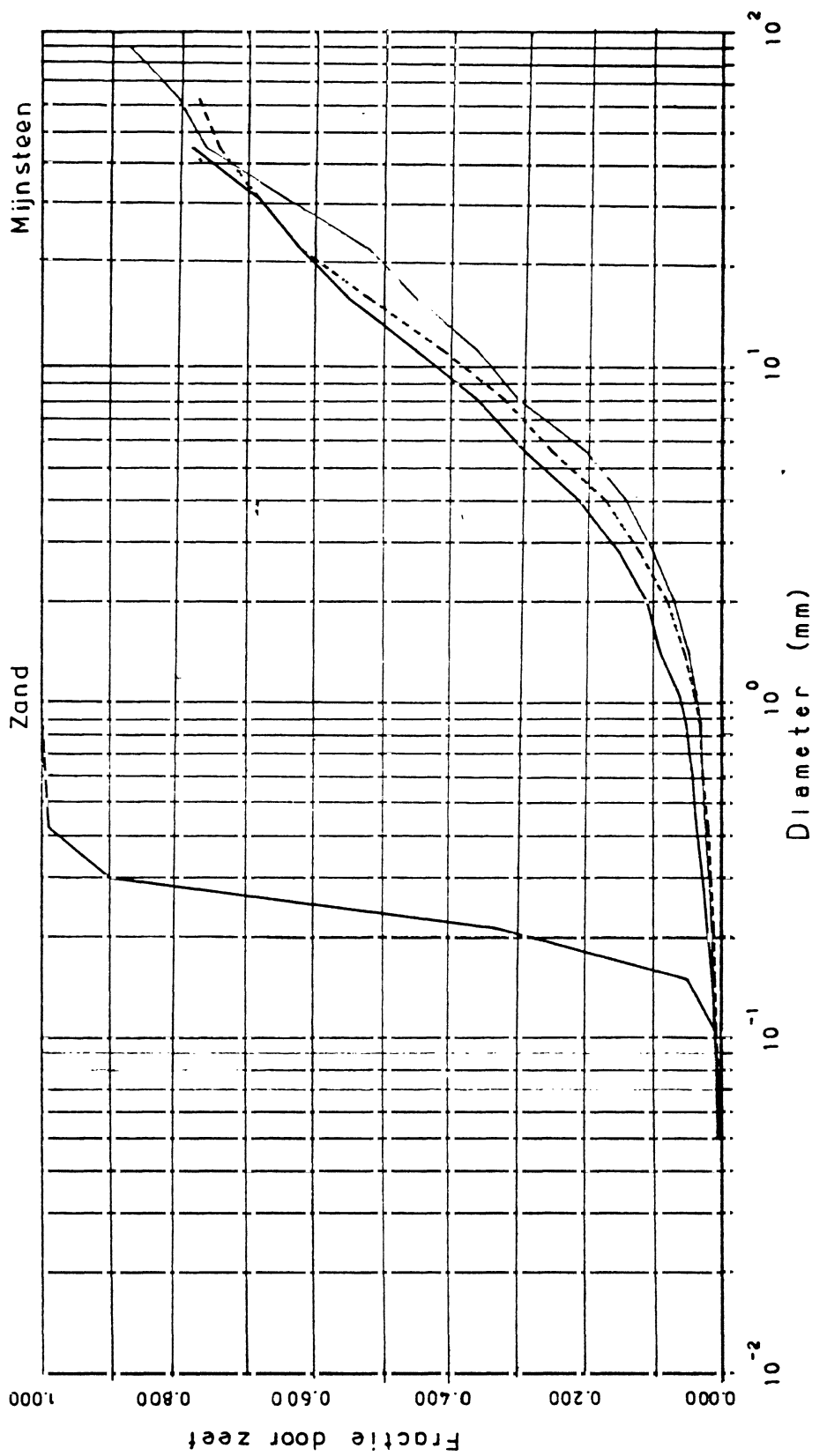
85-09-17

Verweringsmodel. Resultaten na 0, 2 en 10 jaar.

CO-416640

Hda

BIJL. 10.1



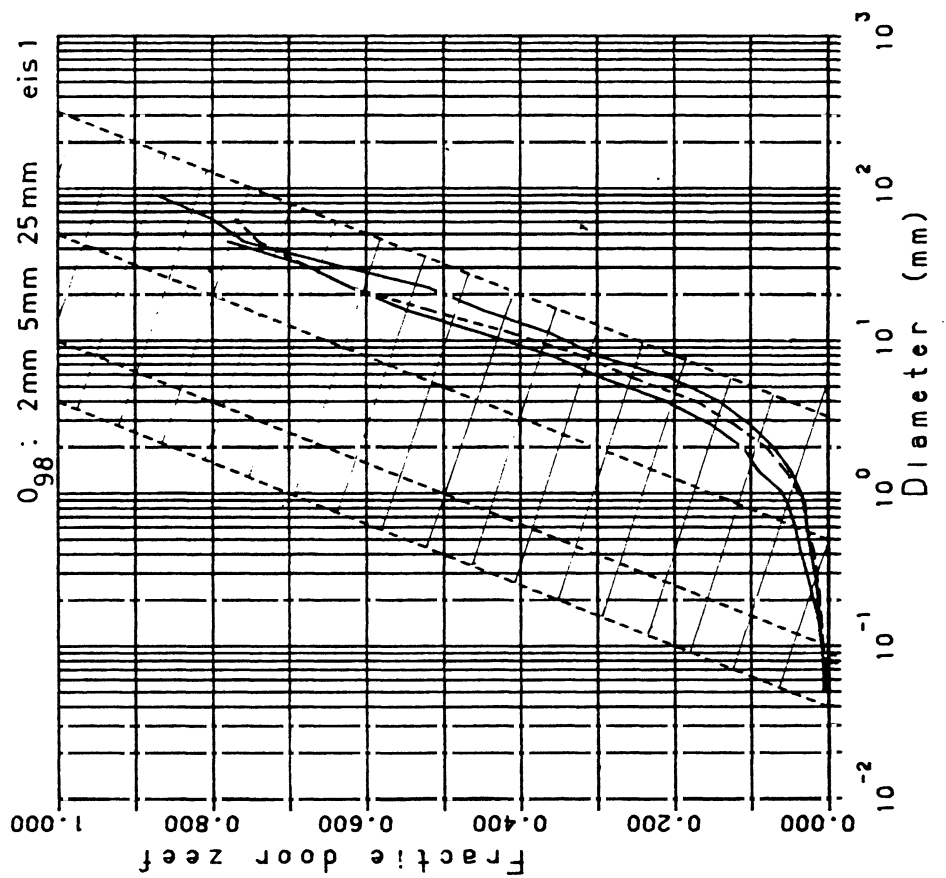
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Zeefcurves van mijnsteen en het zand
monsters uit Deltagoot en filterbak

CO-416640 Hda

BIJL. 11.1



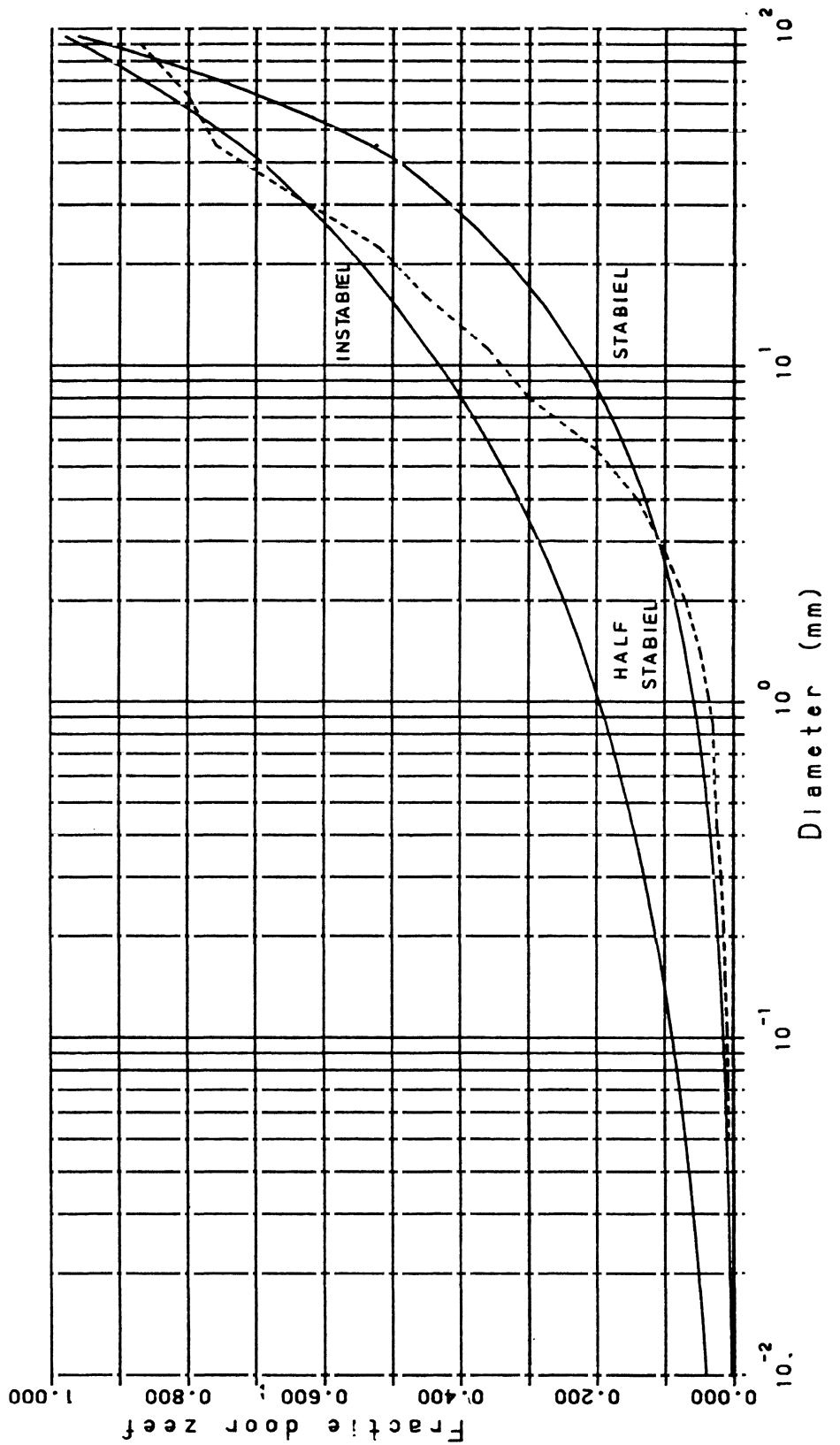
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Toetsing zeefcurves van mijnsteen uit de Deltagoot en filterbak aan de zeefbanden

CO-416640 Hda

BIJL. 11.2



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Beoordeling van de interne stabiliteit
boven- en ondergrens volgens Lubochkov

CO-416640 Hda

BIJL. 113

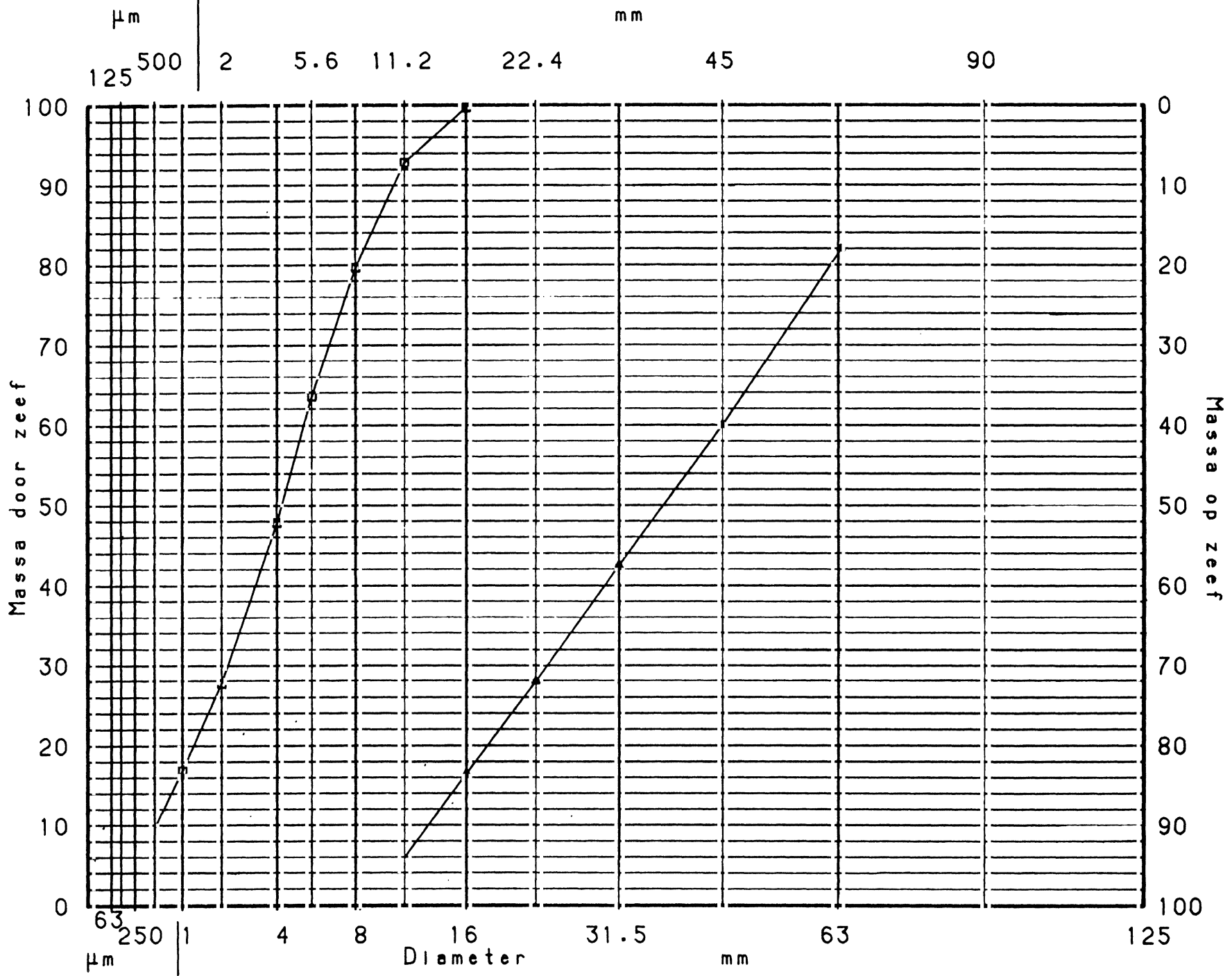


LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT 85-09-17

Cumulative korrelverdeling van
LD slakken, 0/10 mm en 10/80 mm

CO-416640 Hda

BIJL. 121



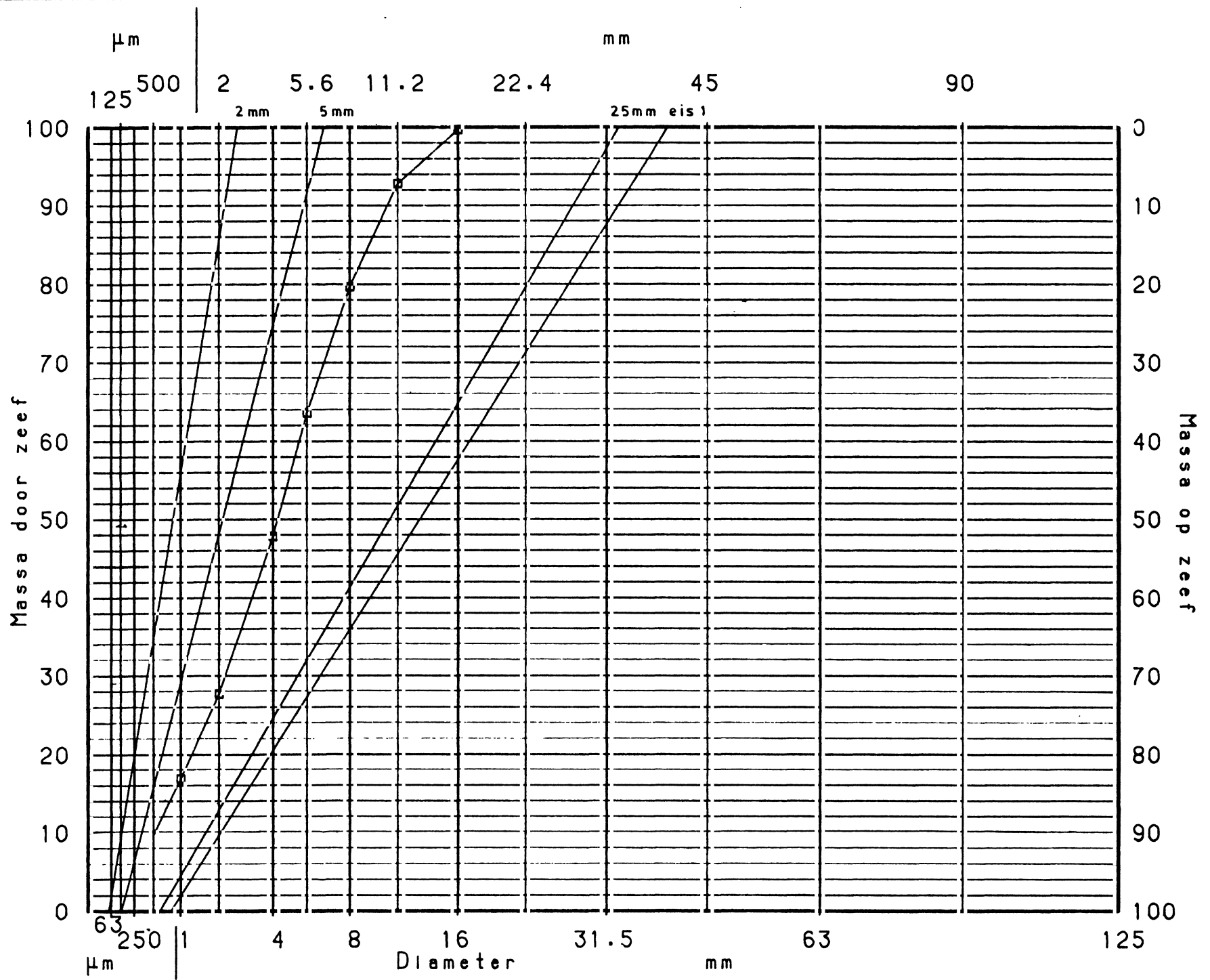


LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT 85-09-17

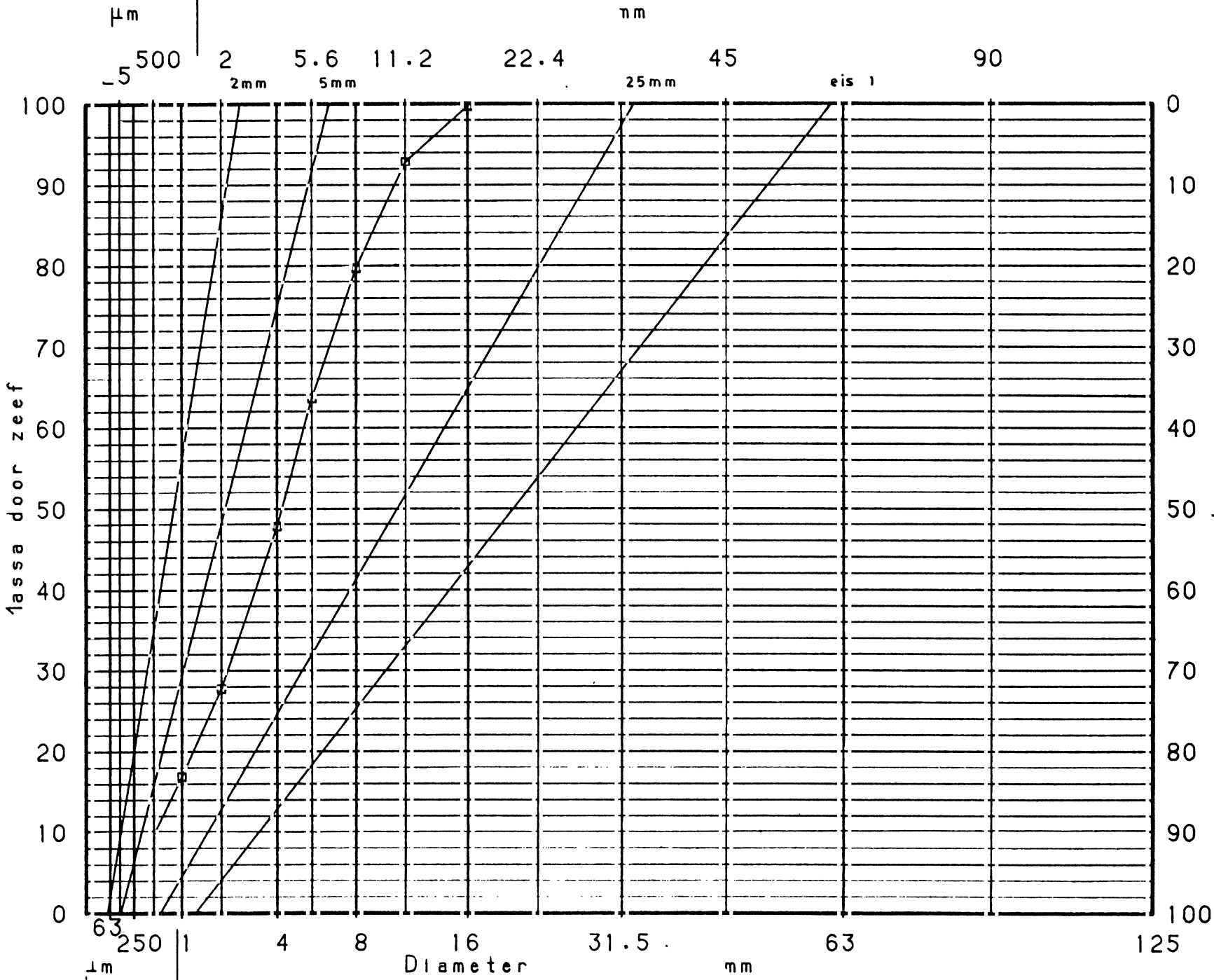
Toetsing cumulatieve korrelverdeling van LD slakken 0/10 mm; talud 1:2; d50=0.2mm

CO-416640 Hda

BIJL. 122



Massa op zeef



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT 85-09-17

Toetsing cumulatieve korrelverdeling van LD slakken 0/10 mm; talud 1:3; d50=0.2mm

CO-416640 Hda

BIJL. 123



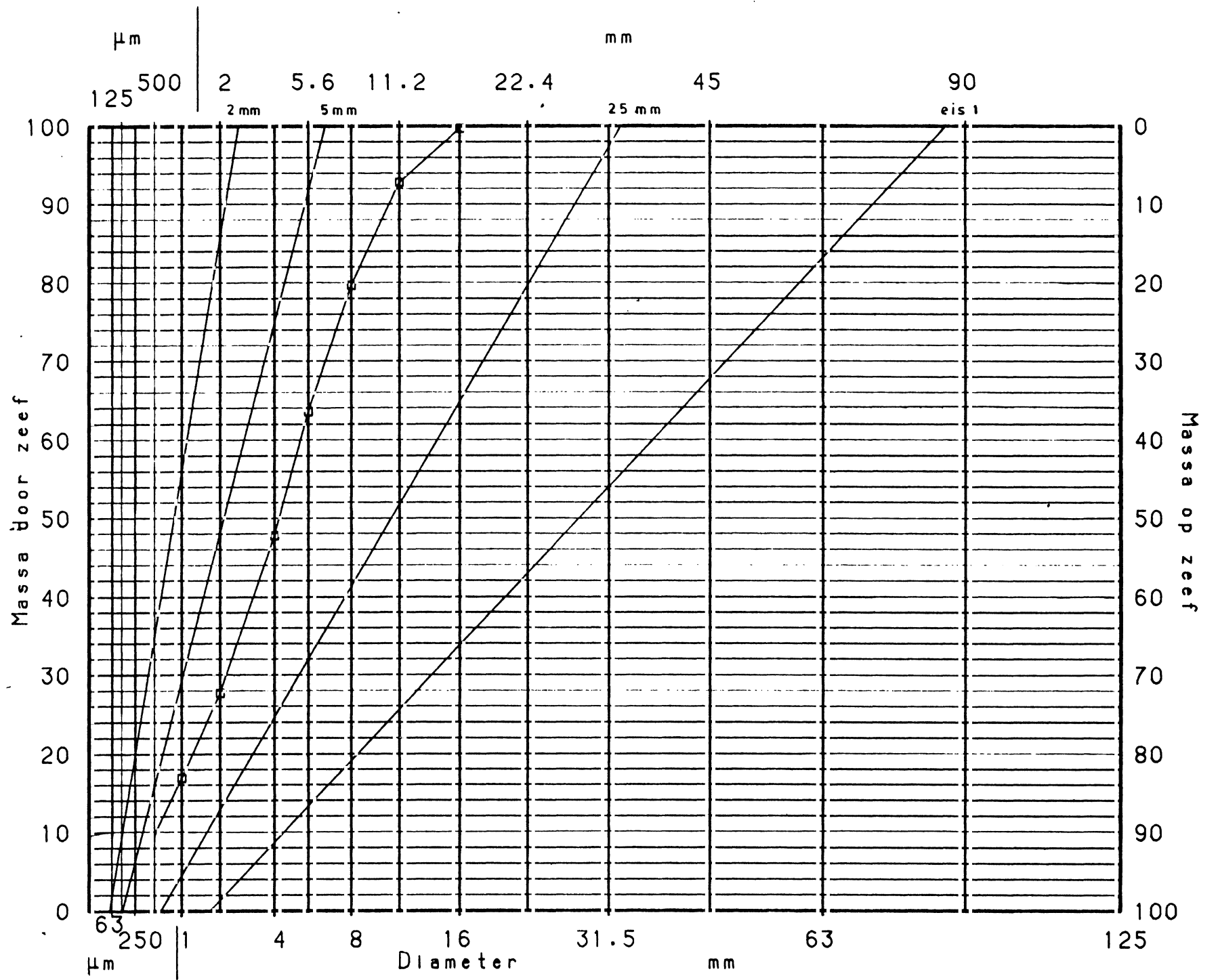
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT

85-09-17

Toetsing cumulatieve korrelverdeling van
LD slakken 0/10 mm; talud 1:4; $d_{50}=0.2\text{mm}$

CO-416640 Hda

BIJL. 124



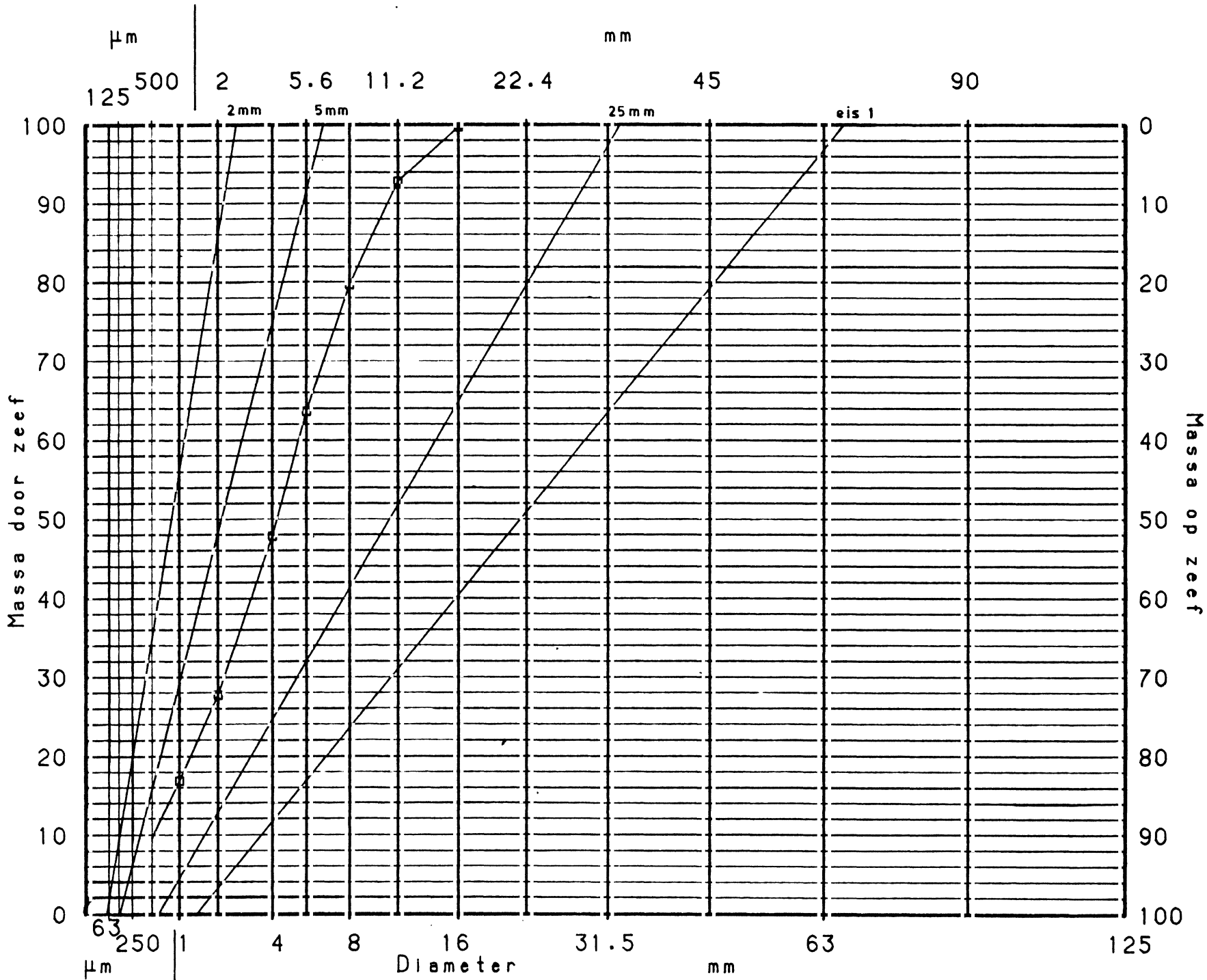


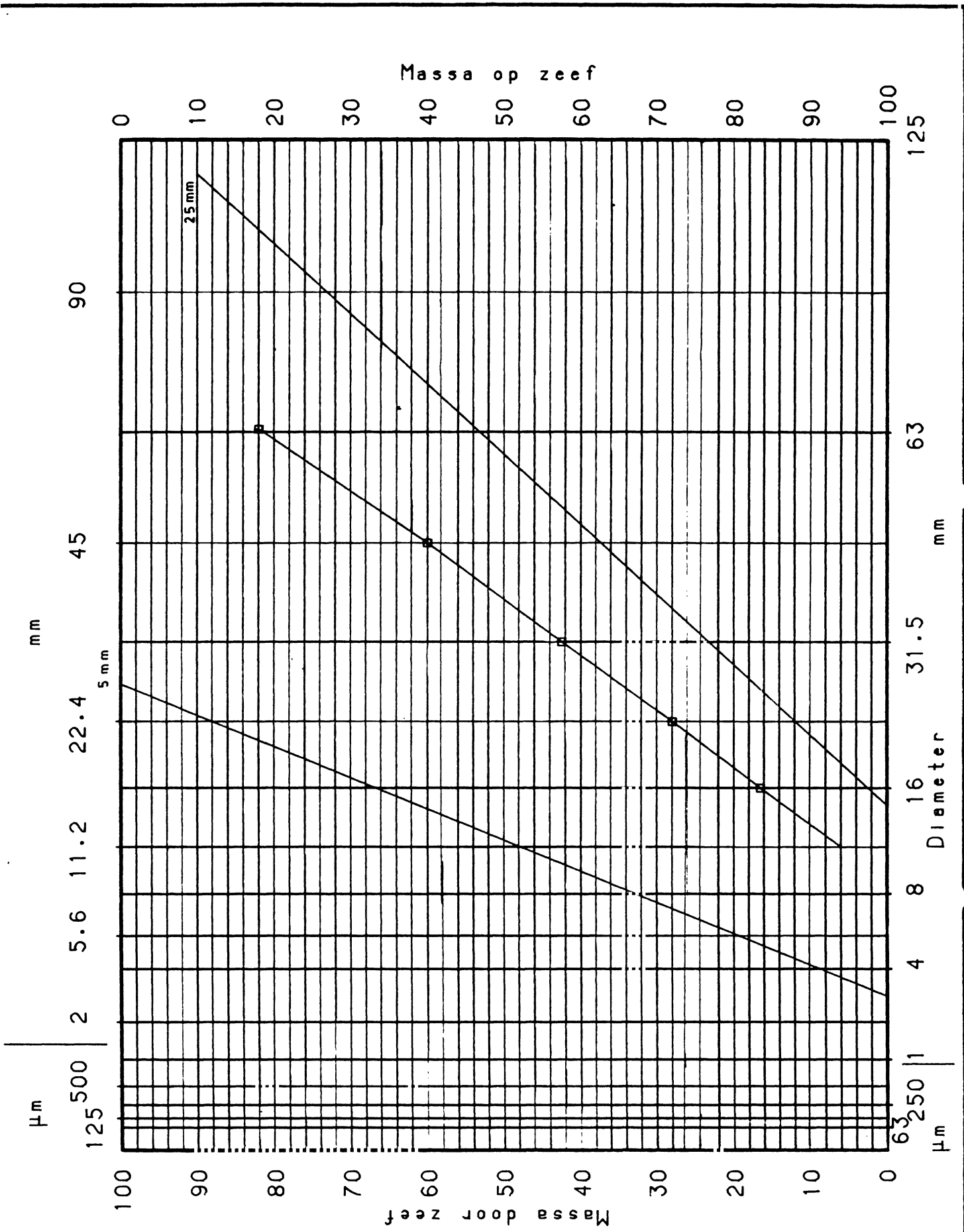
LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT 85-09-17


Toetsing cumulatieve korrelverdeling van
LD slakken 0/10 mm; $d_{50}=0.82\text{mm}$

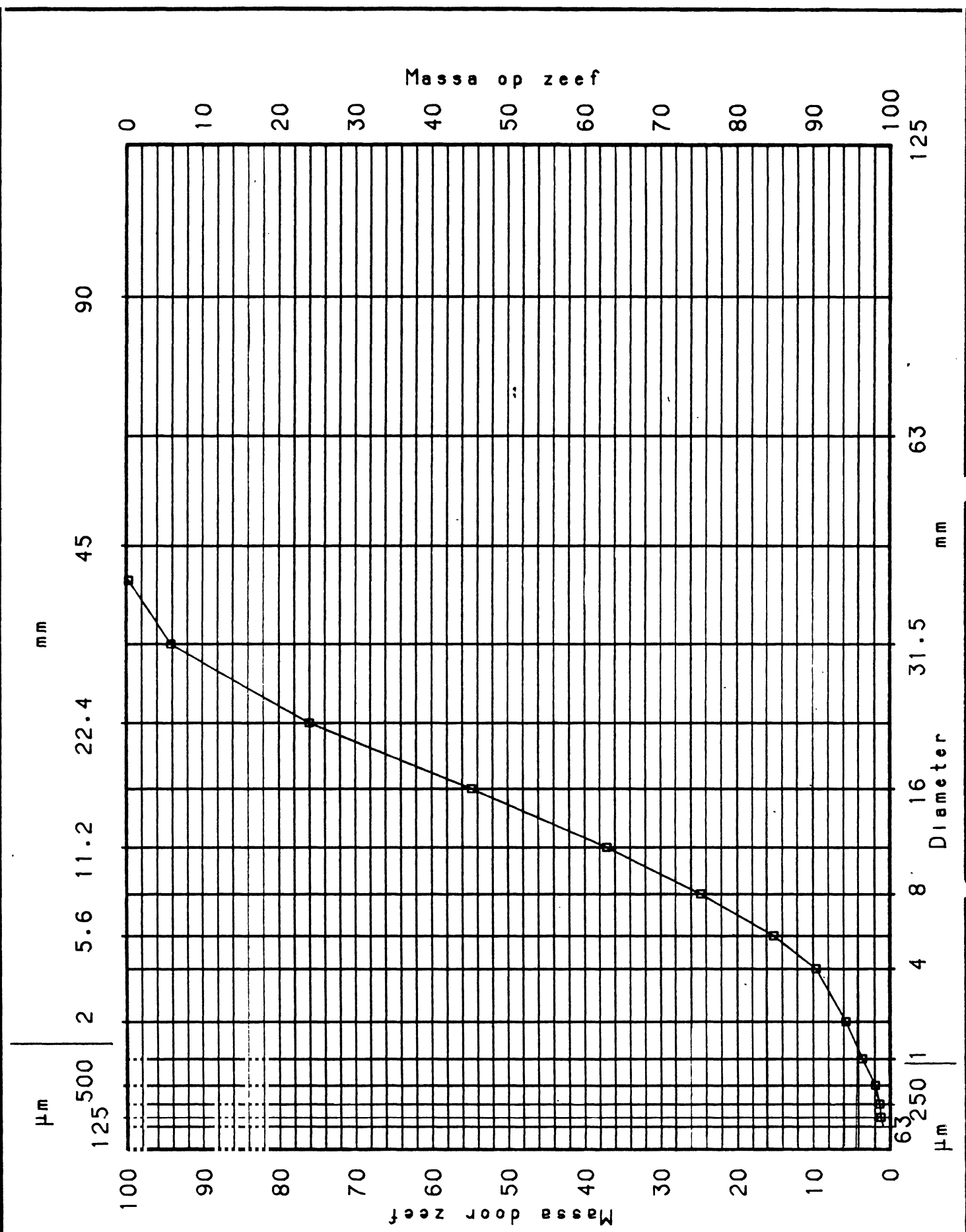
CO-416640 Hda


BIJL. 125



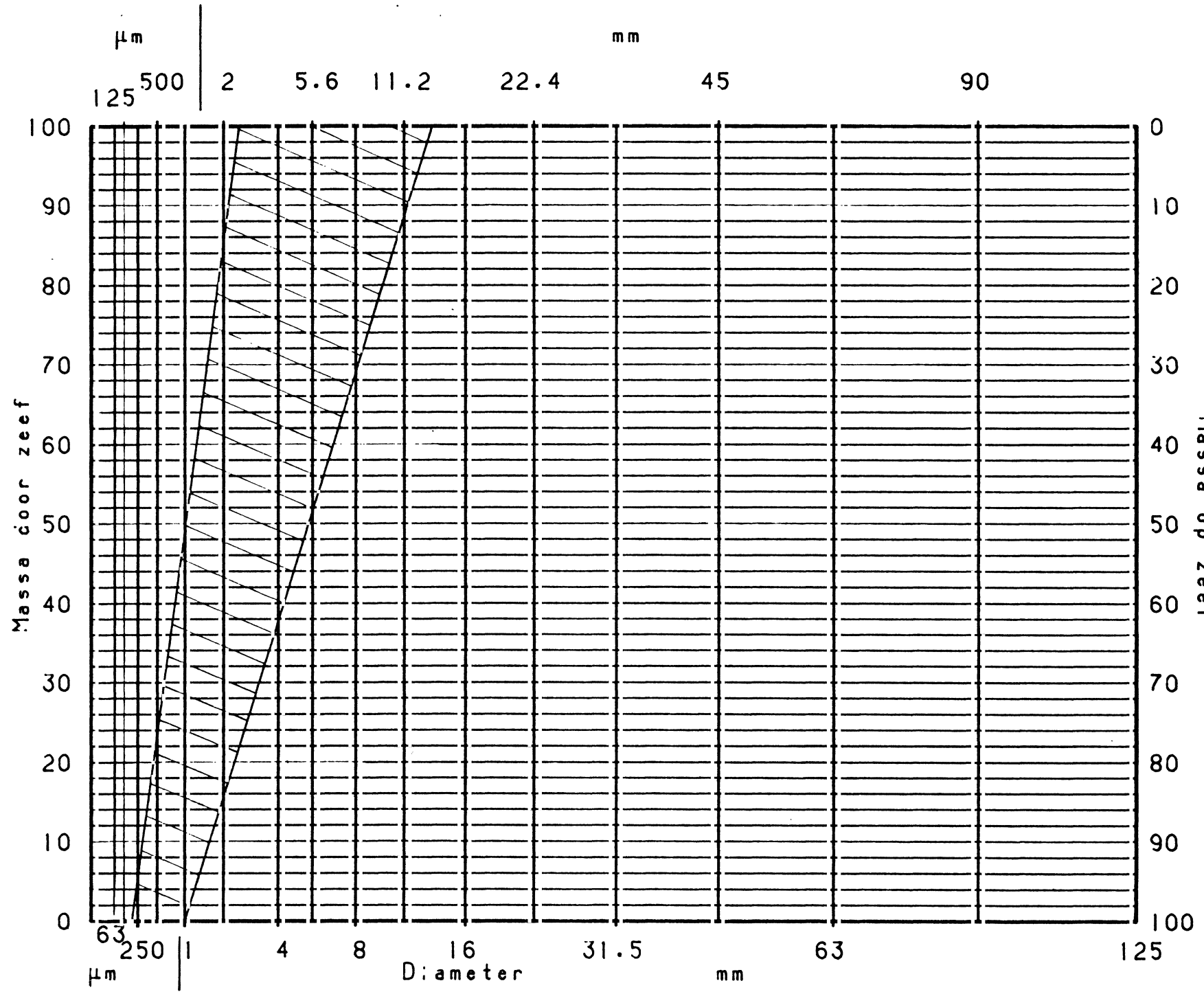


	LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA D LFT		85-09-17
	Toetsing cum. korverd. LDslakken 10/80mm talud 1:2-1:4 bij d50=0.82 mm		CO-416640 Hda
			BIJL. 126



	LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT		85-09-17
	Cumulatieve korrelverdeling van fosfor slakken 1/40 mm		CO-416640 Hda
			BIJL. 127

Massa op zeef



LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA DELFT 85-09-17

Zeefband voor het extra filter onder de fosforlakken 1/40 mm

CO-416640 Hda

BIJL. 128

Taludbekleding van gezette steen

Inventarisatie van erosiedetektiemethoden

Notitie

H 195-16

April 1987

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
2. <u>Ferrietdetektor</u>	2
3. <u>Grondradar</u>	2
4. <u>Radioactieve tracers</u>	3
5. <u>Elektrische weerstand</u>	3
6. <u>Fluorescerende tracers</u>	4

Referentie

bijlage 1

M. Klein Breteler

Talubekleding van gezette steen

Meting van begin van zandbeweging met ferrietdetektor

Waterloopkundig Laboratorium, Notitie H195-16, Oktober 1986

bijlage 2

J.W. de Feijter

Verkennd onderzoek naar de detektie van holle ruimten onder steenzettingen met behulp van grondradar.

Grondmechanica Delft, concept meetrapport CO-272510/71, aug. 1986

bijlage 3

J. Weijers

Notitie aan de staf van COW inzake grondradar

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, maart 1985

bijlage 4

K.J. Bakker

Verslag naar aanleiding van het bijwonen van het colloquium "Een fluorescerende slibtracer; ontwikkeling en toepassing"

Dienst Weg- en Waterbouwkunde, notitie van 24 mei 1985

INVENTARISATIE VAN EROSIEDETEKTIEMETHODEN

1. Inleiding

In het kader van het onderzoek naar de stabiliteit van taludbekledingen van gezette steen is de erosie van de onderlagen onder de toplaag als belangrijk schademechanisme onderkend. Uitvoerig onderzoek heeft zich gericht op de stabiliteit van het grensvlak tussen filter (bv. mijnsteen) en de basis van zand (dijkkern). Hier dreigt transport van zand dat uiteindelijk leidt tot verzakking van filter en toplaag. Daarnaast wordt er aandacht geschonken aan de mogelijke uitspoeling van filtermateriaal door gaten in of tussen de stenen waaruit de toplaag is opgebouwd en aan klei-erosie.

Tijdens de uitvoering van het onderzoek zijn ideeën ontwikkeld ten aanzien van het detekteren van beginnende erosie of gevormde erosiekuilen. Deze ideeën, waarvan er enkele onder laboratoriumomstandigheden zijn getoetst, kunnen wellicht een veel bredere toepassing hebben dan uitsluitend bij de uitvoering van modelproeven met steenzettingen. Gedacht kan worden aan de beoordeling van bestaande dijken. Ten einde een brede groep betrokkenen van de ideeën en ervaringen kennis te laten nemen is besloten tot het opstellen van deze notitie. Tevens wordt melding gemaakt van de ogenschijnlijk veelbelovende methoden die na nadere bestudering niet haalbaar bleken.

Deze notitie is opgesteld door ir. M. Klein Breteler met behulp van ideeën en suggesties van de leden van de begeleidingsgroep steenzettingen.

2. Ferrietdetektor

De ferrietdetektor bestaat uit een spoel waarvan de eventueel veranderende zelfinductie nauwkeurig gemeten wordt. Daar waar zandtransport wordt verwacht, wordt ferrietpoeder gemengd met het aanwezige zand, waarbij aangenomen wordt dat het ferrietpoeder zich samen met het zand zal verplaatsen. Tijdens de proef kan de plaats van het ferriet met de detektor vastgesteld worden, omdat de zelfinductie van de spoel in de detektor groter zal zijn als in de nabijheid ferriet aanwezig is.

Deze methode is voor modelonderzoek zeer geschikt gebleken. Een uitvoerige omschrijving is in bijlage 1 te vinden.

3. Grondradar

De werking van grondradar is gebaseerd op het principe dat een elektromagnetische golf, die in de bodem wordt gezonden, reflekteert op diskontinuiteiten in de bodem. Hiermee kan bijvoorbeeld de laagdikte van een filter of kleilaag worden bepaald, maar ook of er holle ruimten in de konstruktie voorkomen. In bijlage 2 is een onderzoek beschreven dat is gericht geweest op de detektie van holle ruimten direkt onder een toplaag van 20 cm dikke betonblokken. Er is gekonkludeerd dat de laterale dimensies van de holten goed zijn te meten, maar de diepte van het gat helaas niet.

De snelheid waarmee gescand kan worden is zodanig laag dat het nog ondoenlijk is om een compleet dijkvlak te bekijken. Een oppervlak van enkele tientallen vierkante meters is wel haalbaar.

Andere toepassingen van grondradar zijn (zie bijlage 3 en [1]):

- Het vaststellen van de ligging van de freatische lijn in bijvoorbeeld een drainage-systeem.
- Opsporen van vreemde elementen.
- Opsporen van gaten (scheuren) in asfaltlagen.

Opgemerkt moet worden dat de grondradar nog niet geheel is uitontwikkeld, waardoor de toepassing van de apparatuur en interpretatie van de resultaten vaak nog problemen geeft.

4. Radioactieve tracers

De toepassing van radioactieve tracers bij het volgen van bewegend granulair materiaal is volgens het IRI (Interuniversitair Reaktor Instituut) zeker technisch haalbaar. Gedacht kan worden aan het gebruik van bestraald zand (waarvoor de natrium of magnesium atomen radioactief worden), bolletjes glas die radioactief goud of iridium bevatten of toepassing van zand met een daarop aangebrachte laag radioactief materiaal.

De grootste problemen schuilen echter in de vele procedures die het gebruik ervan voorafgaan. Van een verdere technische uitwerking is daarom afgezien.

5. Elektrische weerstand

De elektrische weerstand tussen twee metalen draden, die op kleine afstand van elkaar in de ondergrond zijn aangebracht, is afhankelijk van de aanwezigheid

van holten in de direkte nabijheid van de draden. Vooral als een open ruimte (gevuld met water) tussen de draden ontstaat, dan is dit gemakkelijk te constateren aan de hand van de weerstand tussen de draden.

Op basis van dit principe is het mogelijk om de vorming van erosie-kanaaltjes in een grensvlak van bijvoorbeeld klei te registreren. Hoe meer kanaaltjes er ontstaan of hoe groter de kanaaltjes worden, hoe kleiner de weerstand wordt. Met een vergelijkbare opzet is al eens met succes het verloop van de bodemhoogte in een stroomgoot geregistreerd.

6. Fluorescerende tracers

Een fluorescerende tracer is een merkstof die ook bij uiterst geringe concentratie aantoonbaar is. Door de tracer aan het eroderende materiaal te koppelen kan na verloop van tijd vastgesteld worden of het materiaal inderdaad getransporteerd is, wellicht ook waar naartoe.

De methode is vooral bruikbaar voor het volgen van slib bij de verspreiding in een estuarium. Voor de toepassing bij zand stuit men op het probleem dat het niet goed mogelijk is om de tracer aan de zandkorrels te koppelen. Voor meer informatie wordt verwezen naar bijlage 4.

Referentie

1. J.W. de Feijter

Samenvatting grondradaronderzoek aan de filterkonstructie Spijkse dijk
Grondmechanica Delft, interim rapport CO-265863/4, april 1985.

Bijlage 1

TALUDBEKLEDING VAN GEZETTE STEEN

Meting van begin van zandbeweging met ferrietdetektor

Notitie

H 195.16

Oktober 1986

Meting van begin van zandbeweging met ferrietdetektor

1. Inleiding

Recent is er uitvoerig modelonderzoek uitgevoerd met betrekking tot niet geometrisch dichte granulaire filters. Onderzocht is bij welk kritieke hydraulische belasting het basismateriaal (zand) onder grind met voldoende grote poriën tussen de korrels in beweging komt.

Bij het gekompliceerder worden van de te onderzoeken belastinggevallen is de behoefte ontstaan om het begin van beweging van zandkorrels op afstand te detekteren. De methode is een alternatief voor het opvangen en wegen van getransporteerd zand.

In deze notitie wordt een meetmethode beschreven die gebaseerd is op het detekteren van ferrietgruis, dat vermengd is met het basismateriaal. Het ontwikkelen en testen van de meetmethode is uitgevoerd onder leiding van ir. M. Klein Breteler, die tevens deze notitie heeft samengesteld. Het is uitgevoerd in het kader van het onderzoek naar de stabiliteit van taludbekledingen van gezette steen in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat.

2. Meetprincipe

De aanwezigheid van een metaal (metaalpoeder) is aantoonbaar door middel van een spoel. De zelfinductie van de spoel zal hoger zijn als het metaal groter is of zich dichterbij de spoel bevindt. Dit geldt ook voor metaalpoeder, echter in mindere mate.

Het begin van erosie van zand is indirect te detekteren op basis van het bovengenoemde principe door de bovenste laag van het zand te mengen met metaalpoeder. Om praktische redenen (korrosiebestendigheid en detekteerbaarheid) is vooral ferrietpoeder bij uitstek geschikt. Hoewel dit materiaal een veel hogere soortelijke massa heeft dan zand (ferriet: 4700 kg/m^3 ; zand: 2600 kg/m^3) mag verwacht worden dat een mengsel van zand met ferriet, dat een wat kleinere korrelgrootte dan het zand heeft, bij dezelfde belasting erodeert als zand alleen. Deze veronderstelling is gebaseerd op het feit dat de ferriet-korrels

beschermd worden door de zandkorrels zolang het zand nog niet in beweging komt en als de zandkorrels tussen de ferrietkorrels wegspoelen de ferrietkorrels een uiterst kwetsbare positie innemen. Immers: de stromingskracht op een korrel die duidelijk boven een zandbed uitsteekt is veel groter dan wanneer de korrel tussen andere korrels inligt (zie [1]).

Uit het bovenstaande moet gekonkludeerd worden dat de detektie-methode slechts goed zal werken als een kleine hoeveelheid ferriet met zand wordt vermengd, zodat er veel meer zandkorrels dan ferrietkorrels zijn.

Voor details omtrent het detektie-apparaat wordt verwezen naar de appendix.

3. Proefopstelling en resultaten

De detektie-methode is beproefd in de Deltagoot, waarin een talud is aangebracht van zand met daarop een geotextiel en een toplaag van Basalton. De opstelling is schematisch weergegeven in figuur 1. Twee foto's zijn te vinden in figuur 2. Op twee plaatsen op het zandtalud is een vak van $\pm 30 \times 30$ cm voorzien van zand met ferriet; beide in een gebied waar de golfaanval zodanig is, dat gevreesd moet worden voor zandtransport onder het geotextiel langs het talud naar beneden.

De mengverhouding zand/ferriet was ongeveer 5:1. De zeefkromme van het ferriet is gegeven in figuur 3.

Er is gemeten met een verplaatsbare spoel in een cilindervormige spoelhouder met een diameter van ongeveer 2,4 cm. Doordat een toplaag van Basalton vele openingen tussen de zuilen kent, was het mogelijk de meetspoel op enkele millimeters van het ferriet op het talud te houden, waardoor het zelfinductie-verschil tussen plaatsen met ferriet en zonder ferriet zeer duidelijk meetbaar was.

Na lange tijd golven met zowel regelmatige als onregelmatige golven met hoogte tot $H_s = 1,24$ m en periode $T_p = 3,79$ s bij een waterdiepte van 4,5 m, was wel op sommige plaatsen schade aan de toplaag ontstaan, maar werd met de detektor het ferriet nog op precies dezelfde plaats als bij aanvang gevonden.

Bij een golfaanval met regelmatige golven met $H_1 = 1,38$ m en $T = 5,37$ s bezweek het talud en ontstond een S-profiel. Het ferriet was toen totaal verdwenen.

Voor meer details omtrent de proefopstelling en gebruikte golfbelasting wordt verwezen naar [2].

4. Konklusie

Gekonkludeerd kan worden dat het ferriet met de detektor gemakkelijk geregistreerd kan worden, mits de detektor dicht bij het ferriet gehouden wordt. Het verloop van de proef in de Deltagoot was echter zodanig dat er geen ervaring is opgedaan met een geleidelijk erosie-proces.

Referenties

1. M. v.d. Wal e.a.

Aantasting dwarsprofielen in vaarwegen.

Erosie en stabiliteit van bodems en oevers, inleiding tot relevante verschijnselen.

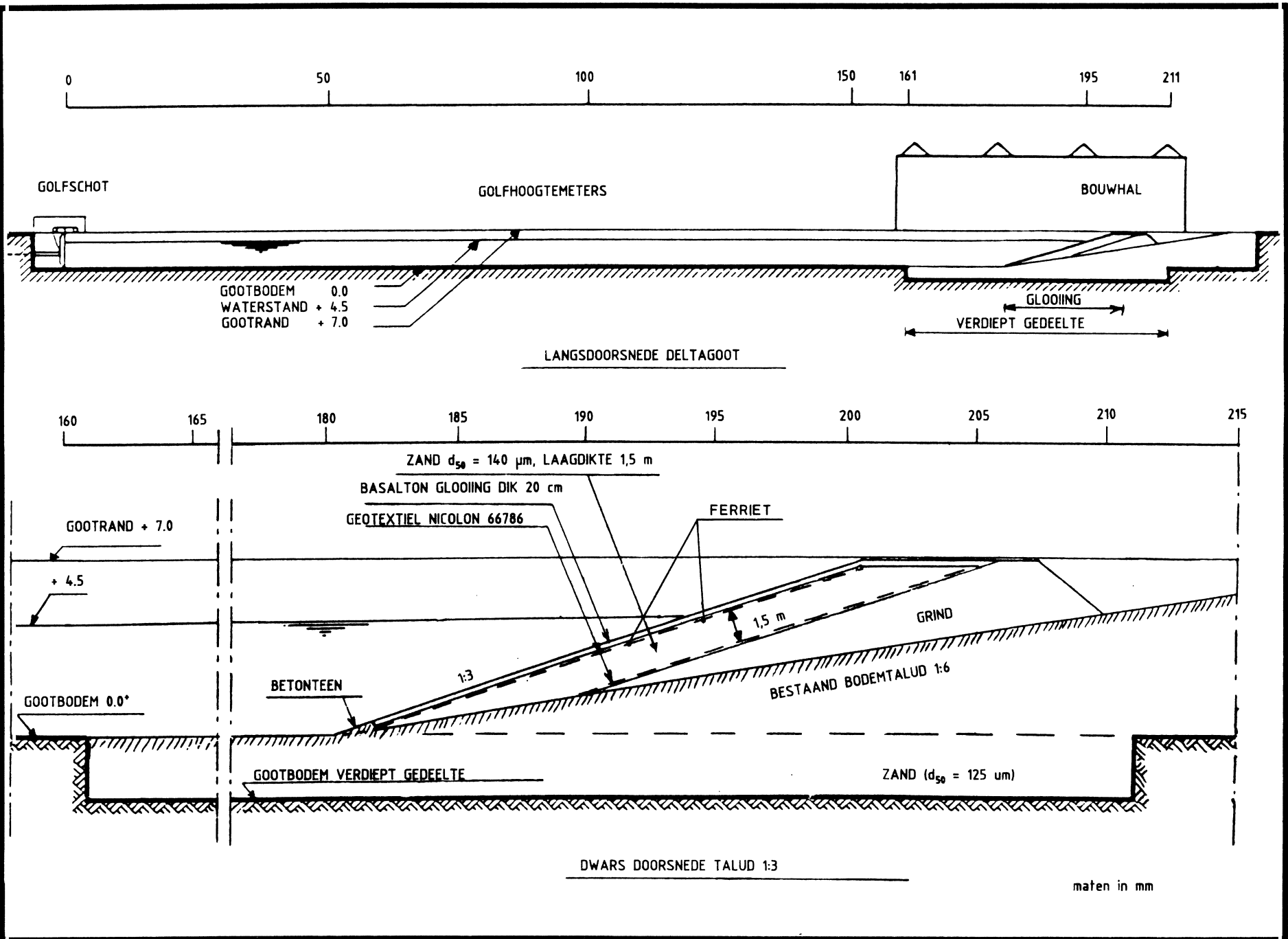
Waterloopkundig Laboratorium; M1115 deel VIII, jan'62.

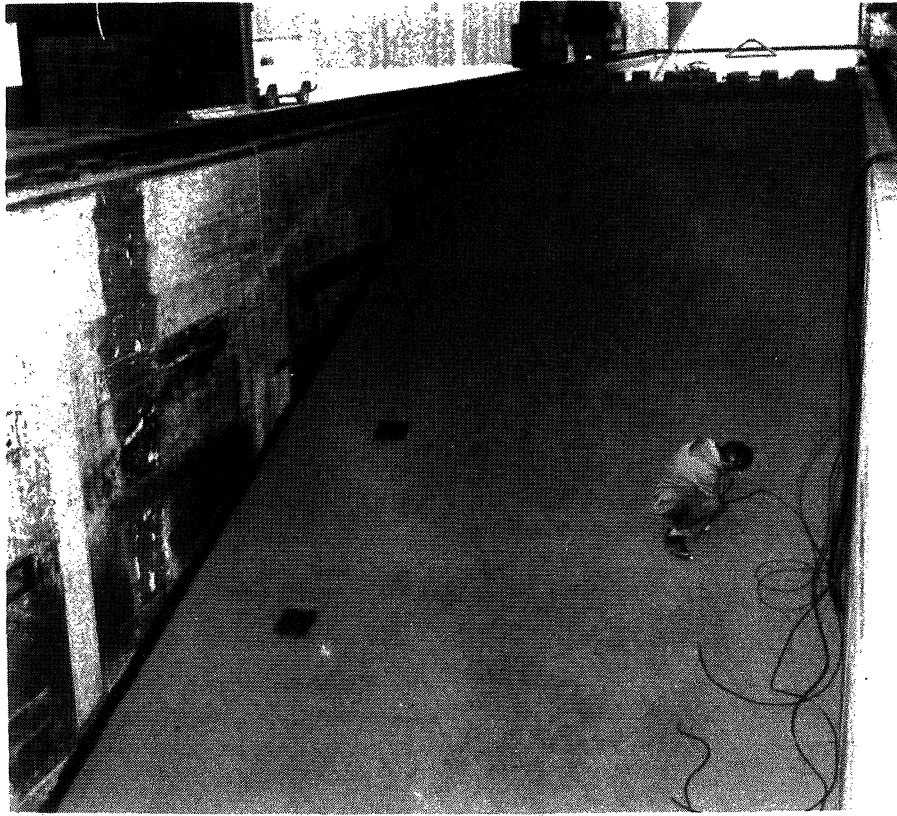
2. J. Lindenberg

Verwerking van zand onder een steenzetting, talud 1:3 onder invloed van golfbelasting.

Verslag experimenteel onderzoek in Deltagoot, WL/LGM; H122, CO 416751/16; sept. '86.

BASALTON OP ZAND
MODELOPSTELLING DELTAGOOT, STEENZETTING





Zandtalud met ferrietvlakken



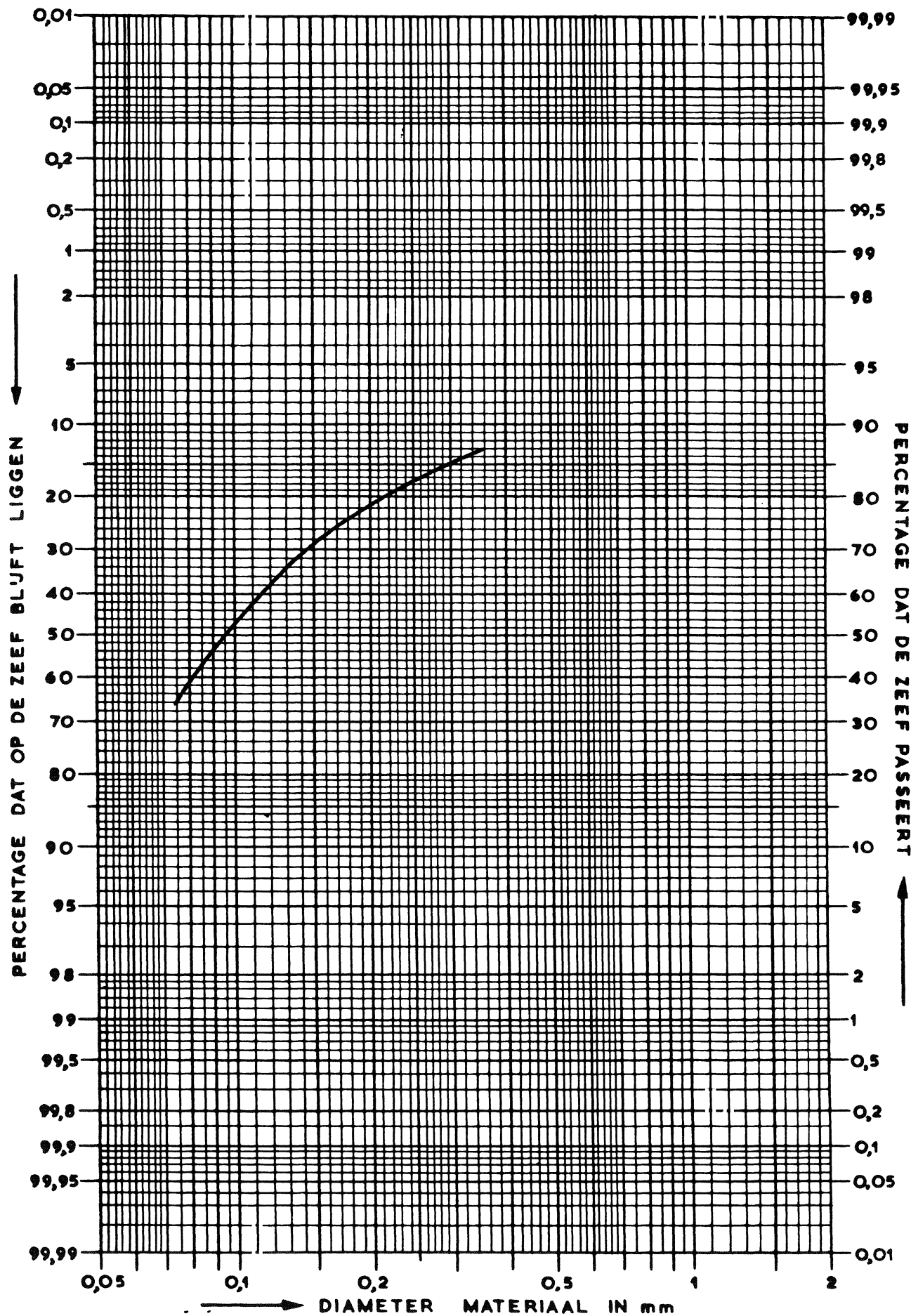
Toplaag van basalton

PROEF-OPSTELLING IN DELTAGOOT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 2



ZEEFKROMME VAN FERRIET-POEDER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 3

APPENDIX

De ferriet-detector bestaat uit een trovidur cylinder met daarop twee spoelen gewikkeld (fig. 1). Deze twee spoelen vormen samen een halve brug, die wordt aangesloten op een Hottinger meetbrug.

Als de detector is aangesloten moet de meetbrug met behulp van de 'R' en de 'C' in evenwicht gebracht worden (fig.2), de wijzer staat dan in het midden. Wanneer de brug uit evenwicht raakt, b.v. door verandering van de zelfinductie, is dat te zien doordat de wijzer een andere stand inneemt.

De detector is 200 mm lang en 24 mm in doorsnee. De spoelen zijn op een zodanige afstand van elkaar aangebracht dat zij elkaar niet kunnen beïnvloeden. De spoelen zijn met lak geïnpregneerd waarna de gehele detector waterdicht is afgesloten met isolatiekous.

Door 1 spoel als meetspoel te gebruiken (spoel 1) zal de wijzer meer of minder uitslaan als er meer of minder ijzer (of ferriet) bij de spoel in de buurt komt. Dit komt omdat dan de zelfinductie van de spoel verandert. De meetspoel is het gevoeligst precies boven de meetspoel.

De maximale meetafstand is afhankelijk van de hoeveelheid te detecteren metaal. Dit is 1 mm (enkele ferriet korrels van 200 μm), tot 50 mm (blok metaal van 125 cm^3).

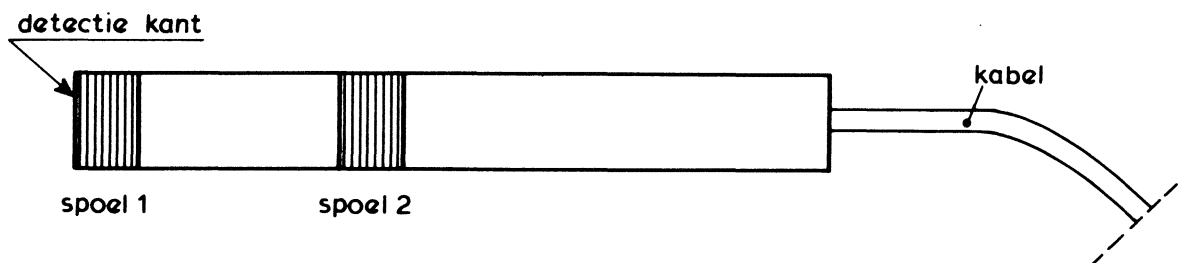
De meetopstelling kan op twee manieren geschieden, n.l.: met de detector vast opgesteld of de detector met de hand op die punten plaatsen waar gemeten moet worden:

- Bij de vaste opstelling wordt de detector in het zand aangebracht met het ferriet op een bepaalde afstand boven de meetspoel. Als het ferriet verdwijnt zal dit op de meter te zien zijn.
- Met de hand meten kan gedaan worden als er niet tijdens een proef maar erna gemeten kan worden en als de te meten plaatsen bereikbaar zijn. Voor de proef moet dan aangegeven worden of het ferriet nog aanwezig is. Eventueel kan met de detector gezocht worden waar het ferriet naartoe is getransporteerd.

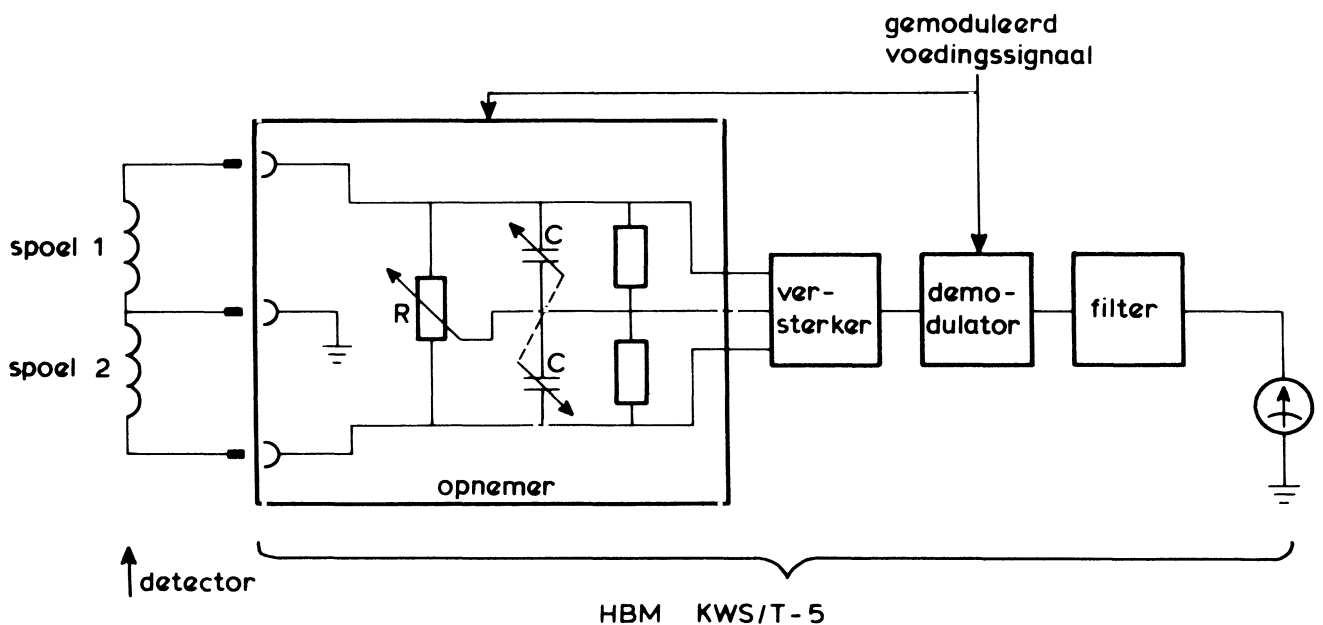
Enkele opmerkingen:

- De detector is temperatuur gevoelig en de brug moet dan ook voor iedere proef in evenwicht gebracht worden.
- Er is niet exact aan te geven hoeveel ferriet er ligt of verdwenen is, maar de aanwijzing is te gebruiken om een indicatie te krijgen van de hoeveelheid verdwenen of erbij gekomen ferriet.

Voorbeeld: voor de proef wijst de meter 100 aan. Na de proef wijst de meter 30 aan. Dan is ongeveer $\frac{2}{3}$ van de oorspronkelijke hoeveelheid verdwenen.



FIGUUR 1, DETECTOR



FIGUUR 2, MEETBRUG

Bijlage 2

laboratorium voor grondmechanica

stichting waterbouwkundig laboratorium



postbus 69, 2600 AB delft
stieltjesweg 2, delft
telefoon 015-569223
telex: 38234 soil nl
postgiro: 234342
bank: mees en hope nv delft
rek.nr. 25.92.35.911
(giro: 6400)
k.v.k. S 145040 delft

CONCEPT MEETRAPPORT

VERKENNEND VOORONDERZOEK NAAR DE DETECTIE VAN HOLLE RUITEN ONDER
STEENZETTINGEN MET BEHULP VAN GRONDRADAR

Onderzoek uitgevoerd in het kader van de TAW-werkgroep
"Fundamenteel Onderzoek naar Steenzettingen"

augustus 1986
CO-272510/71
dFe/Oes/72/detec

Behandeld door: ir. J.W. de Feijter
Toegepaste Fysica en Geofysica

Samenvatting

Dit verkennende vooronderzoek heeft tot doel de mogelijkheden van grondradar vast te stellen voor het detecteren van relatief kleine holle ruimten onder steenzettingen, zodat tijdig maatregelen getroffen kunnen worden om ernstige beschadiging van de dijkbekleding te voorkomen.

Er is een proefopstelling gebouwd bestaande uit een zandbed met daarboven op betonblokken. Op een aantal plaatsen zijn tussen beton en zandbed holle ruimten van diverse afmetingen gemaakt. De radarexperimenten zijn uitgevoerd met antennes van 900 en 300 MHz. Het resultaat is positief. Er is een duidelijk verschil tussen een radaropname met of zonder holle ruimte. Alle holle ruimten zijn apart gedetecteerd. De laterale dimensie is goed terug te vinden; de diepte van het gat echter niet. Met behulp van nog in ontwikkeling zijnde data-inwinnings- en verwerkingsapparatuur dienen enkele nog niet begrepen verschijnselen bestudeerd te worden.

De snelheid waarmee de detectie kan worden uitgevoerd is zodanig dat de methode geschikt is voor het nader bestuderen van verdachte plekken in een glooiing met een oppervlak van enkele tientallen m². Onderzoek van een compleet dijkvak is met de huidige apparatuur niet haalbaar, omdat daarvoor de scansnelheid te laag is.

Een verdere ontwikkeling van de grondradartechniek ten behoeve van het detecteren van kleine holle ruimten onder dijkbekledingen lijkt voorts nog gerechtvaardigd.

LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA

Ir. A. Bezuijen
projectleider steenzettingen
Waterbouwkundige Constructies

Ir. J.W. de Feijter
grondradarspecialist
Toegepaste Fysica en Geofysica

Inleiding

A. Doel

Het doel van dit vooronderzoek is de mogelijkheden van grondradar vast te stellen voor het detecteren van kleine holle ruimten onder dijkbekledingen, die uit betonblokken of andere blokken bestaan. Dit verkennende onderzoek wordt verricht in het kader van fundamenteel onderzoek naar steenzettingen in opdracht van RWS-DWW, voorheen Centrum voor Onderzoek der Waterkeringen.

Onder steenzettingen ontstaan door diverse oorzaken holle ruimten. Als deze gaten door erosie steeds groter worden kan een gedeelte van de steenzetting plotseling bezwijken. Het tijdig signaleren van holle ruimten is van groot belang voor de veiligheid en het beheer van de waterkering, zodat vroegtijdig onderhoud gepleegd kan worden.

B. Grondradar-meetmethode

Een toelichting op de meetmethode grondradar is opgenomen in bijlage A. Voor het detecteren van holle ruimten kan hier nog het volgende aan toegevoegd worden. Grote (diepe) holle ruimten, dieper dan een halve golflengte, worden in der radarechogram gekarakteriseerd door extra zwarte banden bij de overgang van topdeklaag naar onderliggende laag (op deze scheiding ontstaan vaak ongewenste gaten). Indirect kunnen dit soort gaten ook gesignaleerd worden doordat dieper gelegen reflectoren, zoals een overgang tussen twee grondlagen, ter plekke van een gat zwaardere reflecties geven dan over de rest van een overgang: in een met gas (lucht) gevulde ruimte wordt de electromagnetische golf minder gedempt dan in de grond, zodat er ter plekke meer signaal op de reflector valt en derhalve ook meer energie gereflecteerd wordt dan in de niet-verstoorde omgeving.

De holle ruimten onder dijkbekledingen zijn op het gewenste moment van detectie veel kleiner dan een halve golflengte. Er ontstaat een dun "interface" tussen stenen en ondergrond; zo'n tussenlaag geeft aanleiding tot extra faseverdraaiing bij de reflectie.

Als deze faseverdraaiing voldoende is, dan ontstaat er ook een afwijkend zwartingspatroon op het radarechogram ter plekke van het extra-interface (N.B.: een interface dat voldoende diep is geeft een extra faseverdraaiing van ongeveer 180° ten opzichte van een overgang van een lagere naar een hogere diëlectische constante).

De proefopstelling

Op het fabrieksterrein van de betonfabriek Nederhemert te Aalst, heeft deze onderneming in overleg met het LGM een proefopstelling aangelegd: een langwerpige terp zand van 80 cm hoogte met daarboven op 32 betonblokken van 50 * 50 * 20 cm. Op diverse plaatsen zijn kunstmatige gaten onder de stenen aangebracht door blokken polystyreen in het zandbed te leggen; daarna is de dekking van betonblokken aangebracht. Als extra indicatoren zijn twee zeer harde reflectoren aangebracht: twee ijzeren staven, één tussen beton en zandbed en één tussen zandbed en maaiveld. De afmeting van het betondek is 5,5 bij 1,5 m. De opstelling ligt onder de open hemel. Het zandbed is enigszins vochtig. In de figuren 1 en 2 is de proefopstelling geschetst.

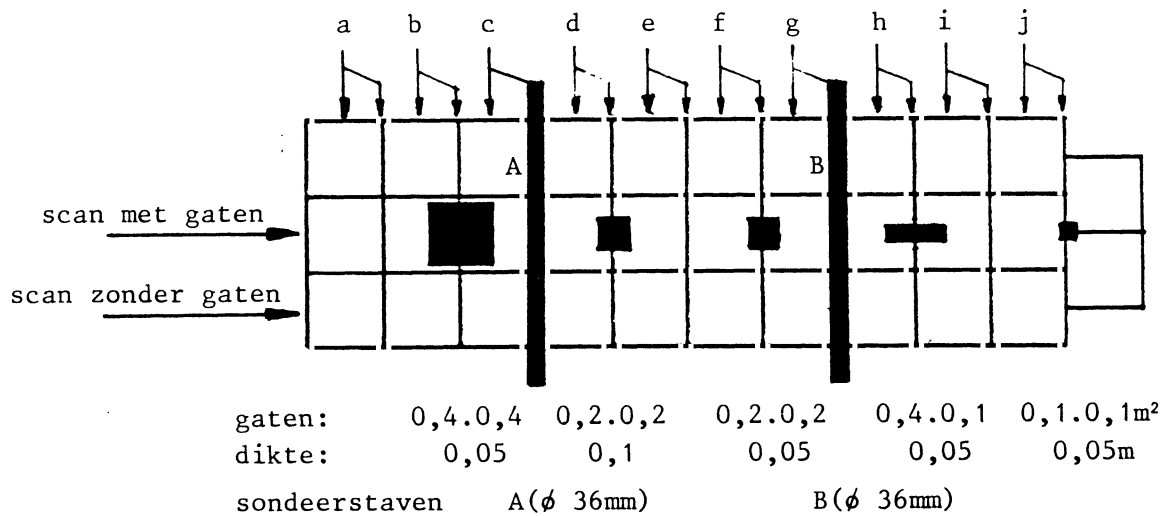


Fig. 1 Bovenaanzicht proefopstelling.

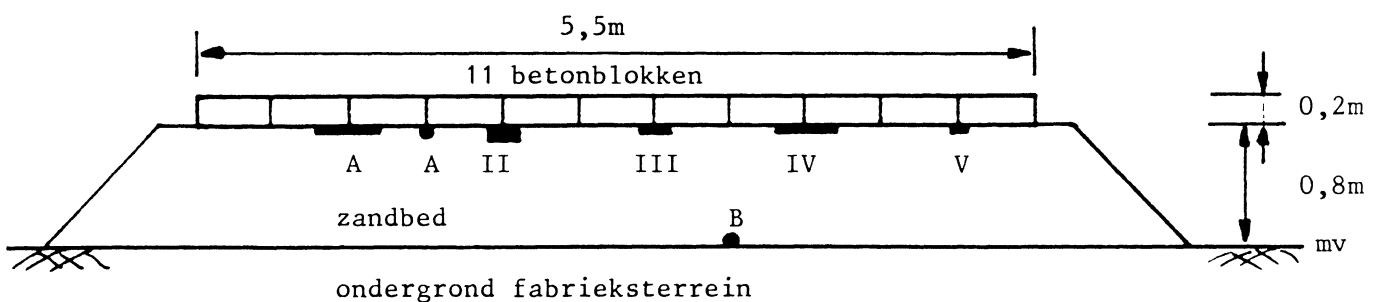


Fig. 2 Dwarsdoorsnede proefopstelling.

Legenda figuren 1 en 2:

- A : ijzeren staaf tussen beton en zand (ϕ 36 mm)
- B : ijzeren staaf tussen zand en bodem (ϕ 36 mm)
- I : polystyreen blok 0,4 * 0,4 * 0,05 m
- II : polystyreen blok 0,2 * 0,2 * 0,1 m
- III: polystyreen blok 0,2 * 0,2 * 0,05 m
- IV : polystyreen blok 0,4 * 0,1 * 0,05 m
- V : polystyreen blok 0,1 * 0,1 * 0,05 m

Tijdens de metingen waren er enkele hagelbuien. In de directe omgeving werd intensief gewerkt met grote kranen en staalconstructies. De metingen werden daar nauwelijks door beïnvloed. De opstelling was zeer precies gebouwd: er waren geen oneffenheden bij de overgang van de ene steen op de andere.

De metingen

Voor de metingen zijn twee antennes gebruikt. De 900 MHz-antenne moet gezien zijn onderscheidend vermogen geschikt zijn voor deze toepassing; ook het penetrerend vermogen moet voldoende zijn. De 300 MHz-antenne heeft een beter penetrerend vermogen, maar ziet minder details; er komt echter wel veel meer informatie beschikbaar over de opbouw van de ondergrond, hetgeen soms nuttig is. Ook kan met de 300 MHz-antenne een groter oppervlak van de dijk in een keer worden onderzocht.

Er is een aantal experimenten uitgevoerd. De belangrijkste zijn:

- I. 900 MHz in lengterichting in het midden over de holle ruimten (zie figuren 3a en 3b).
- II. 900 MHz in lengterichting langs de zijkant, dus zonder holle ruimten (zie figuren 4a en 4b).
- III. 300 MHz in lengterichting in het midden over de holle ruimten (zie figuren 5a en 5b).
- IV. 300 MHz in lengterichting langs de zijkant, dus zonder holle ruimten (zie figuren 6a en 6b).
- V. 900 MHz in dwarsrichting over het midden van de betonblokken (zie figuren 7a en 7b).
- VI. 900 MHz in dwarsrichting over de naden tussen de betonblokken (zie figuren 8a en 8b).

De a-figuren geven het totale (zowel + als - fase) radarechogram; de b-figuren uitsluitend die fase, waarin de interface reflectie wordt weergegeven: voor 900 MHz de plusfase en voor 300 MHz de minfase.

- I. 900 MHz antenne over de holle ruimten. De holle ruimten veroorzaken een optilling van de interface reflectie, terwijl men zou verwachten dat er een verlaging zou optreden, daar de overgang holle ruimte naar zandbed dieper ligt. De afzonderlijke gaten komen er wel duidelijk uit. Het verschil in lengte van de gaten (gaten I en IV ten opzichte van gaten II en III) 40 cm ten opzichte van 20 cm is goed te zien. De diepte van het gat komt veel minder duidelijk tot uiting; Het interface-gebeuren, wat dat ook moge zijn, is dominerend ten opzichte van de diepte van het gat. De indicatoren, sondeerstaven, zijn terug te vinden op het echogram. Een dieptebereik van 1 m blijkt onder deze omstandigheden haalbaar. De op het interface aanwezige staafijzer heeft ook invloed op de antenne: het signaal wordt omhoog getrokken.

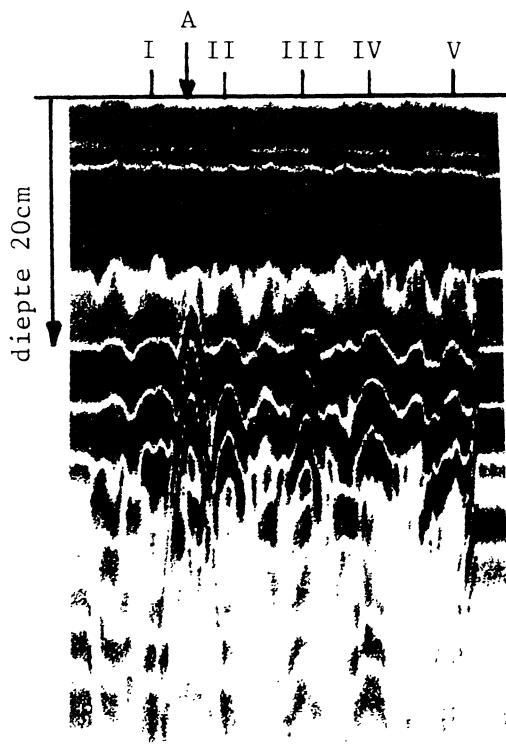


Fig. 3a Echogram 900 MHz-scan in lengterichting over de holle ruimten.

holle ruimten en staven

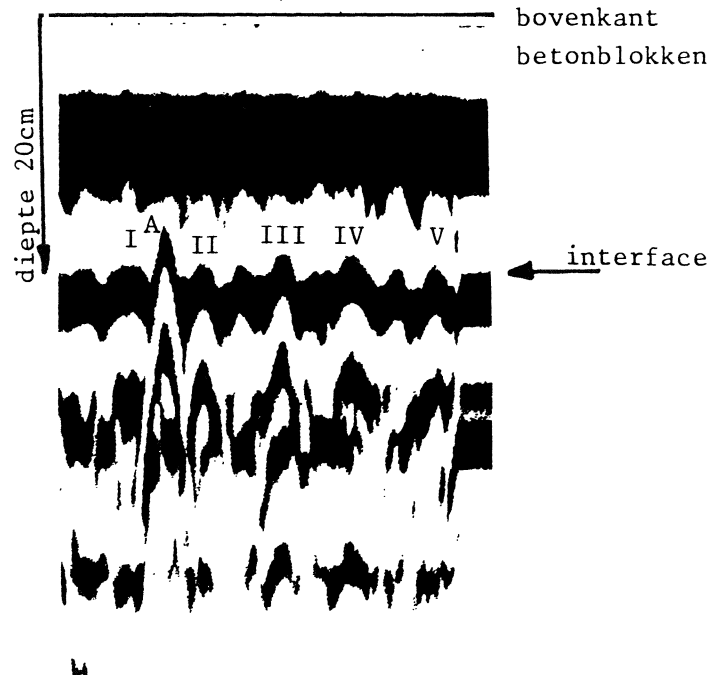


Fig. 3b Idem, alleen positieve amplituden als zwart afgebeeld.

II. 900 MHz antenne over betonblokken op zand zonder gaten in het interface. De interface reflectie is nu veel vlakker; alle verhogingen ten gevolge van holle ruimten zijn verdwenen. Wel zijn de naden tussen de betonblokken te zien als scherpe piefjes: de voortplantingssnelheid van de golven in deze naden (lucht) is hoger dan in de blokken (beton), zodat de reflectie van het zandbed eerder in de tijd binnenkomt (slechts een klein gedeelte van de golfenergie gaat door de naad). De ijzeren staven reflecteren weer op dezelfde wijze als bij I (zie vorige pagina).

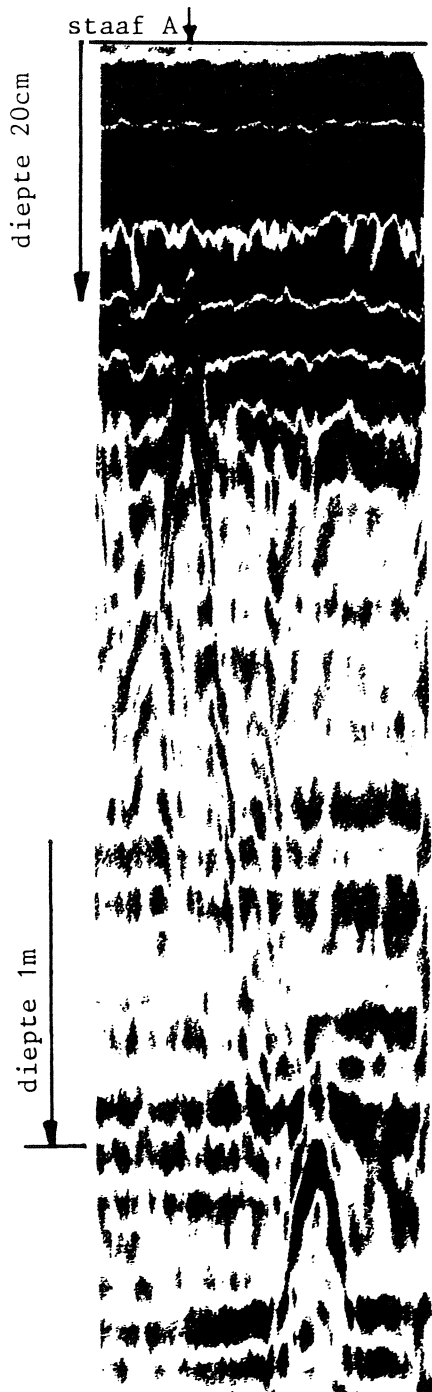


Fig. 4a Echogram 900 MHz-scan in lengterichting zonder holle

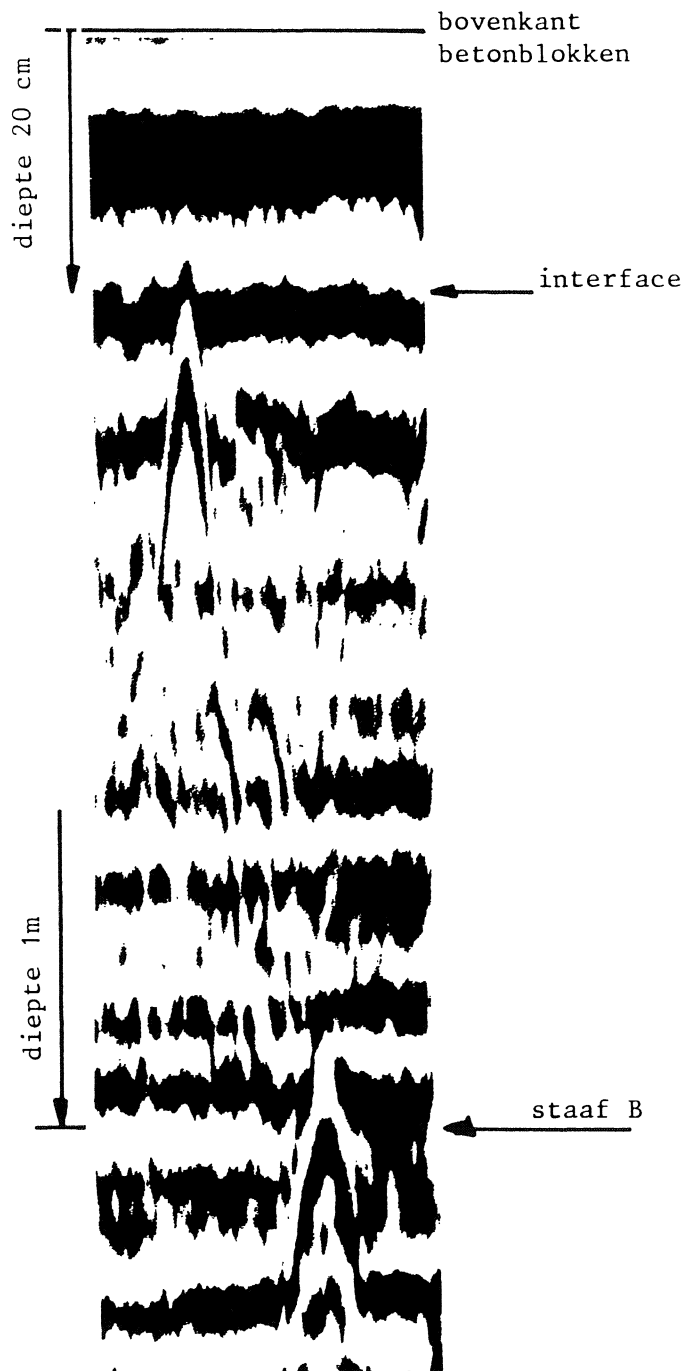


Fig. 4b Idem, alleen de positieve amplituden als zwart afgebeeld.

III. 300 MHz antenne over de holle ruimten. Ook bij deze opname dezelfde verschijnselen als bij de 900 MHz opname. Het kleinste gat van 10 bij 10 cm wordt nu niet meer waargenomen. Toch vertoont de opname bijna net zoveel details als de 900 MHz-opnames. Voor het geval er meer informatie uit de diepte geëist wordt, zal men met redelijk succes de 300 MHz-antenne kunnen toepassen. Waarschijnlijk is er beneden in het zandbed een "grondwaterstand" zichtbaar, die circa 5 cm boven het maaiveld ligt.

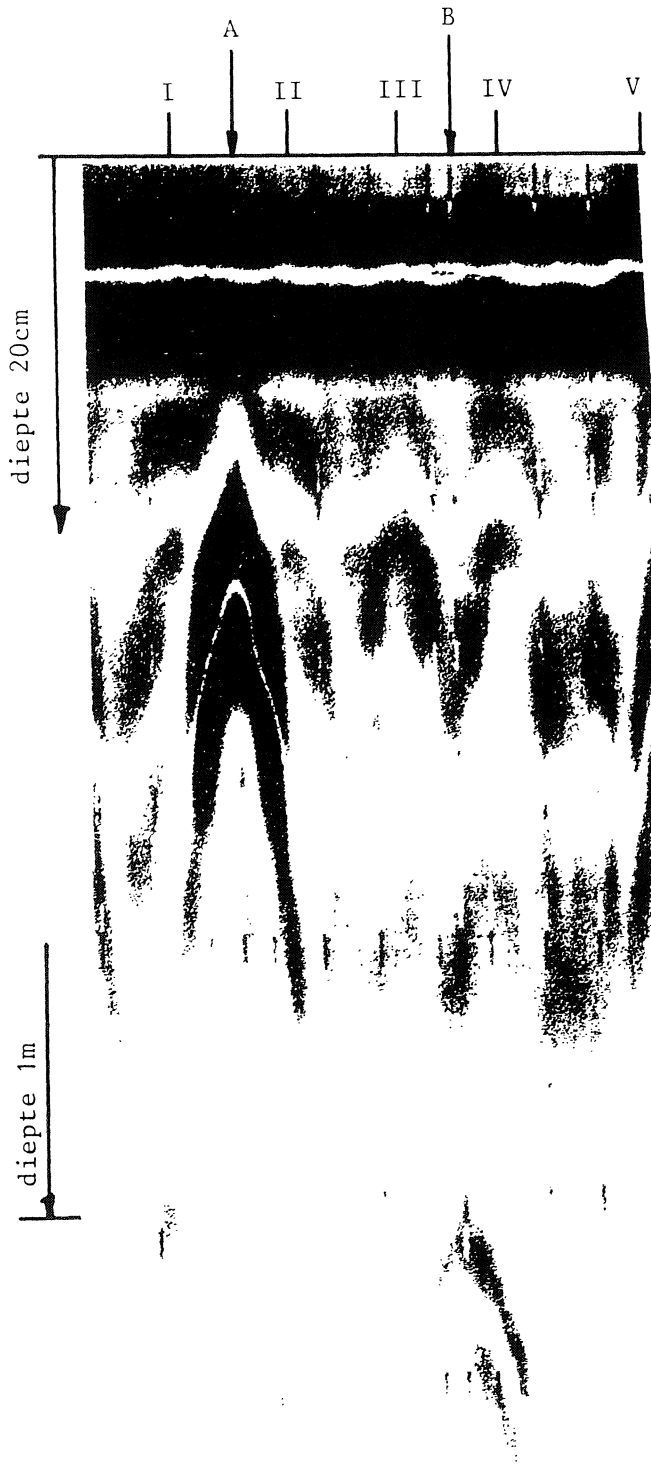


Fig. 5a Echogram 300 MHz-scan in lengterichting over de holle ruimten.

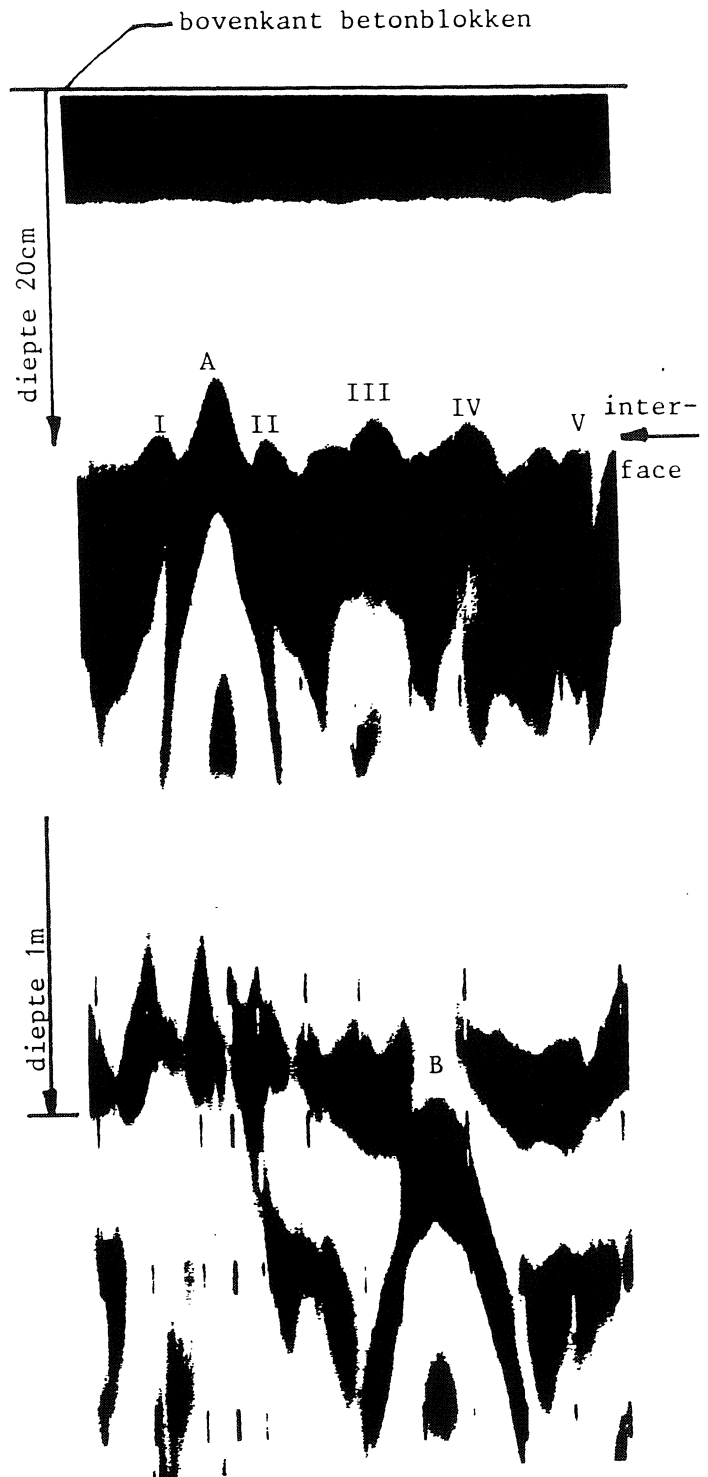


Fig. 5b Idem, alleen negatieve amplituden als zwart afgebeeld.

IV. 300 MHz-antenne over betonblokken op zand zonder holle ruimten eronder. Ook nu zijn de effecten van de naden waarneembaar; echter er is een duidelijk verschil met opname III (zie vorige pagina).

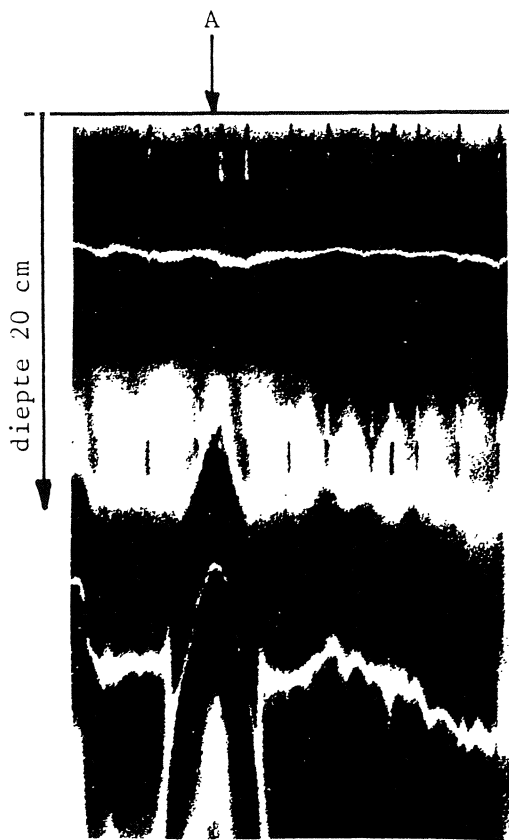


Fig. 6a Echogram 300 MHz-scan in lengte richting zonder holle ruimten tussen beton blokken en zandbed.

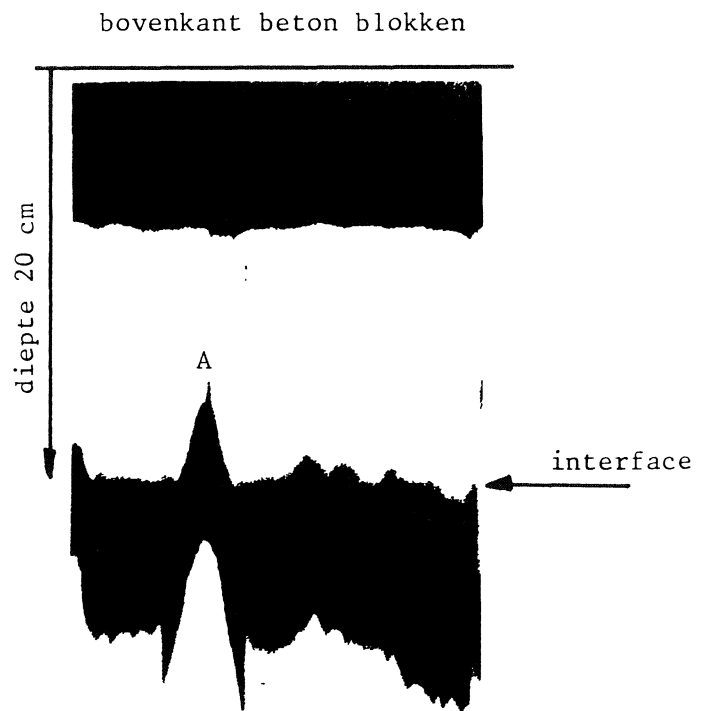


Fig. 6b Idem, alleen negatieve amplituden als zwart afgebeeld.

V. 900 MHz antenne in dwarsrichting over het midden van de betonblokken. De antenne is met de hand langzaam over de eerste drie blokken getrokken; daarna opgetild en geplaatst op de tweede rij van drie blokken en weer getrokken. Zo zijn alle tien rijen van drie blokken achter elkaar gescand. De registratie-apparatuur heeft continu doorgedraaid. Opmerkelijk is dat er bijna geen reflecties zichtbaar werden: eigenlijk alleen in de achtste rij, waarschijnlijk is er dicht langs het langgerekte gat IV gescand. Ook in de tiende rij is een reflector te zien. Een korte beschouwing van dit resultaat gaf duidelijkheid: de centra van de gaten lagen onder de naden tussen de blokken en niet onder het midden van de blokken!

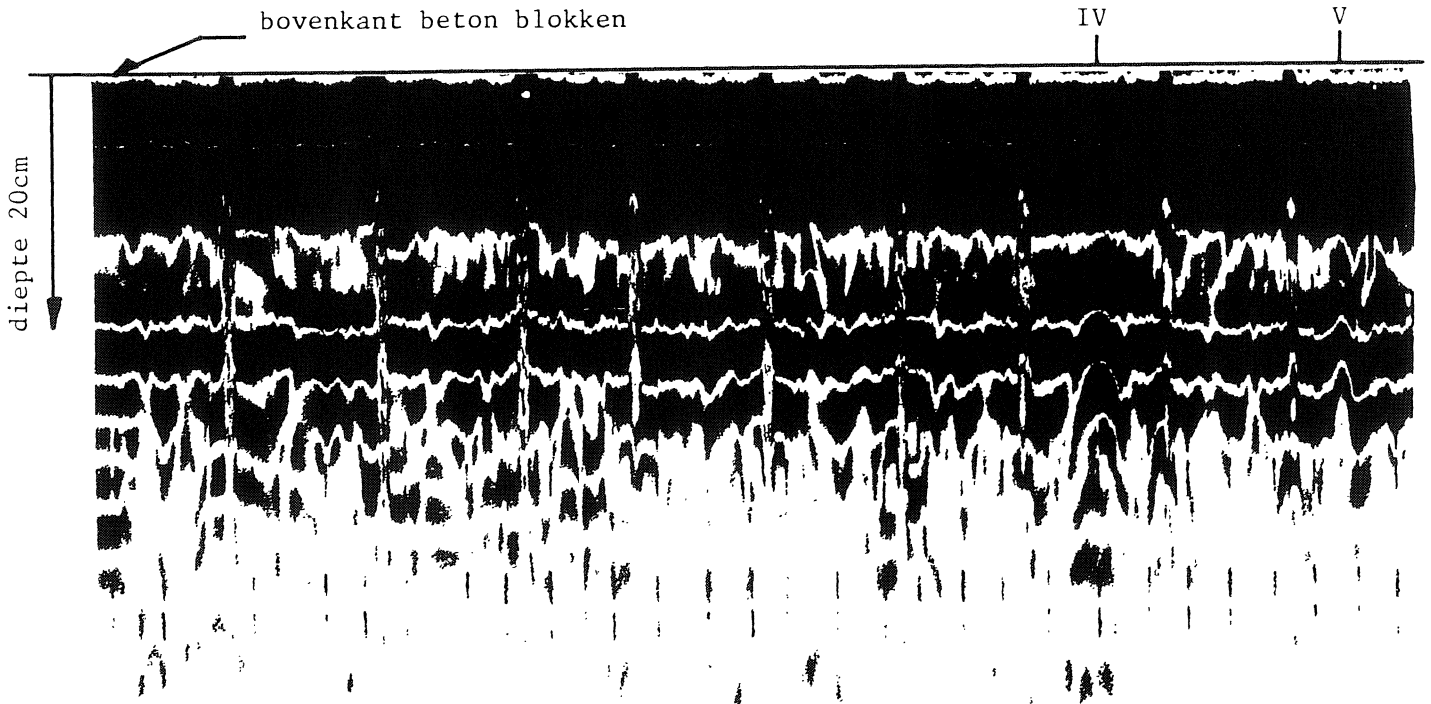


Fig. 7a Echogram 900 MHz-scan tienmaal in dwarsrichting over het midden van de beton blokken.

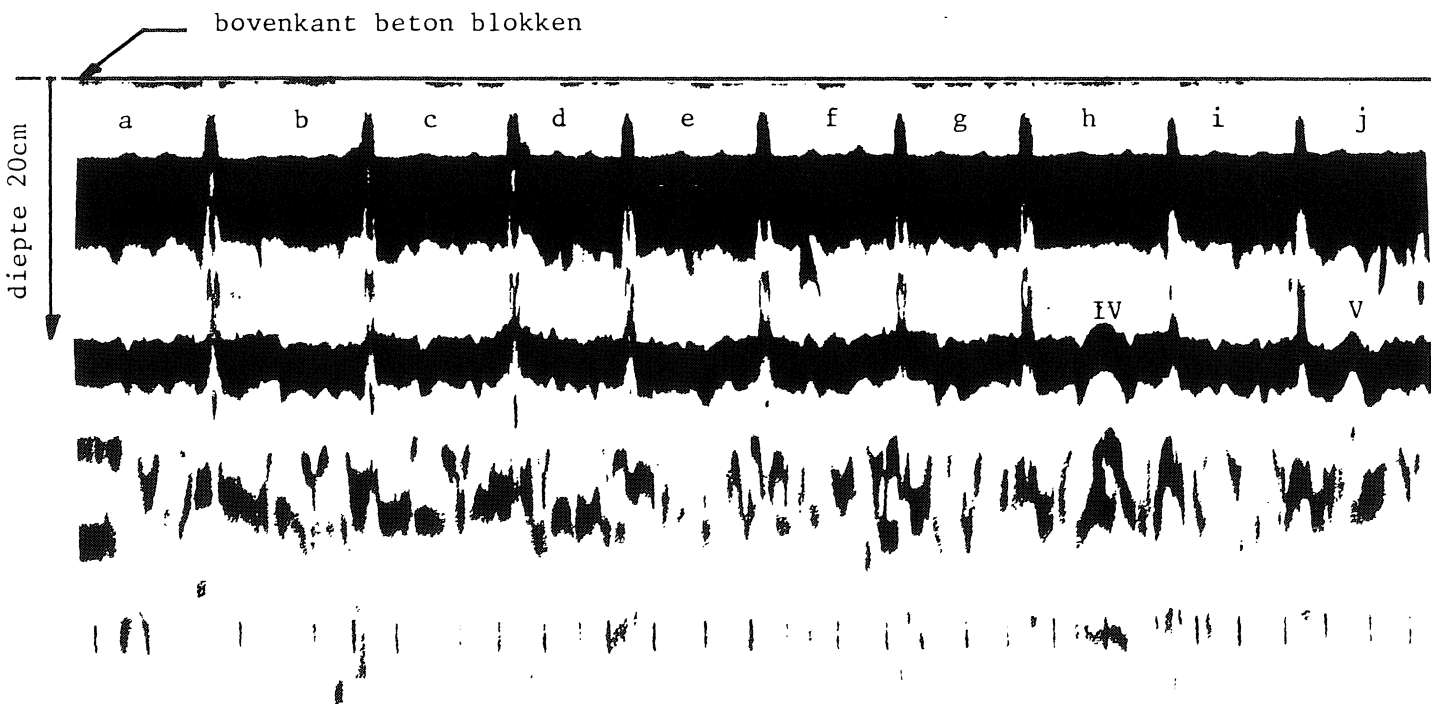


Fig. 7b Idem, alleen positieve amplituden als zwart afgebeeld.

VI. 900 MHz antenne in dwarsrichting over de naden tussen de betonblokken. Voor de wijze van uitvoering (zie V, vorige pagina). De holle ruimten I, II en III zijn duidelijk waarneembaar. De smalle gaten IV en V worden echter niet waargenomen. Mogelijk liggen deze twee gaten verschoven ten opzichte van de naden, daar ze onder de betonblokken (zie V) wel te zien waren.

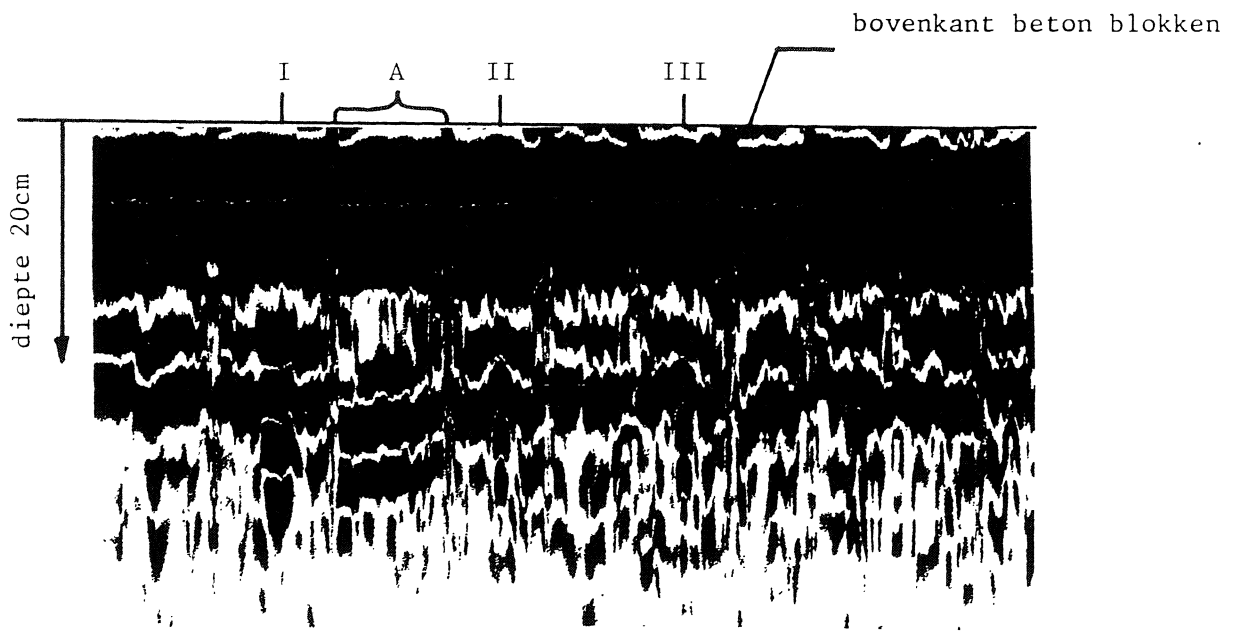


Fig. 8a Echogram 900 MHz-scan tien maal in dwarsrichting over de naden tussen de beton blokken.

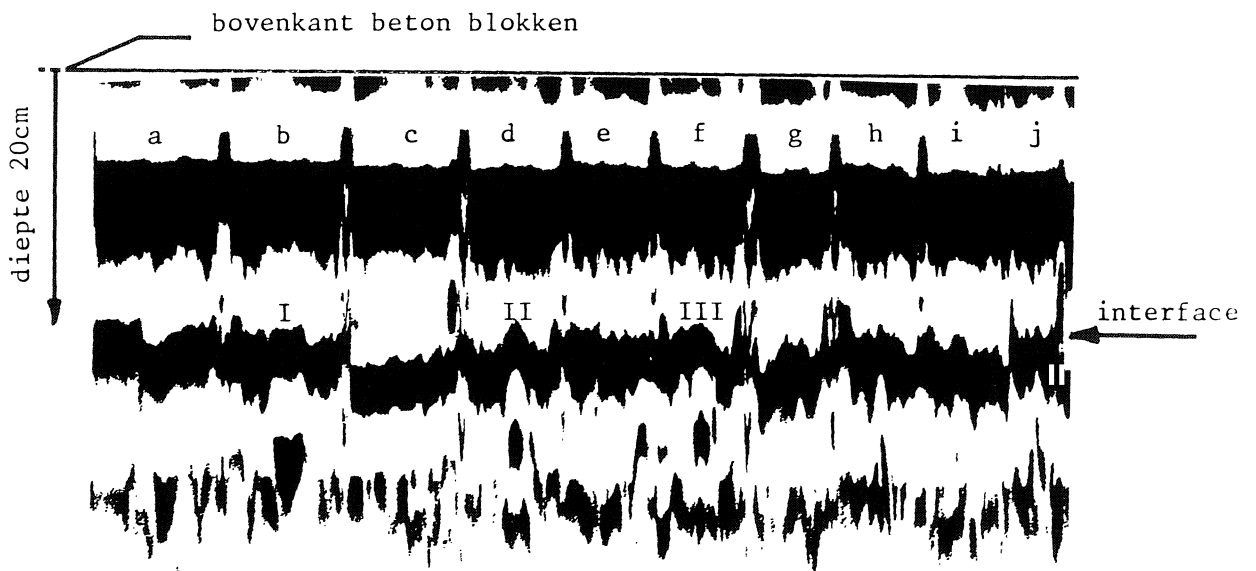


Fig. 8b Idem, alleen positieve amplituden als zwart afgebeeld.

Evaluatie meetgegevens

Vergelijking van de metingen I en II leert dat er een duidelijk verschil is tussen een radaropname over de holle ruimten en één zonder holle ruimten. Alszodanig lijkt grondradar een hoopvolle bijdrage te kunnen leveren aan het detecteren van gaten onder dijkbekledingen. Gaten tot een laterale afmeting van 10 cm zijn nog goed waar te nemen met de 900 MHz antenne. Laterale afmetingen van 40 en 20 cm geven duidelijke verschillen; tussen 20 en 10 cm is weinig verschil te zien. Het verschil in diepte van het gat (5 en 10 cm) kwam niet tot uitdrukking in het echogram.

Het vervelende aan deze radarechogrammen is dat de verzonken gaten onder de betonblokken zich manifesteren als verhogingen in het echogram, iets wat niet verklaarbaar is uit eenvoudige reflectieprincipes en looptijden in de media. Dit opmerkelijke verschijnsel heeft er toe geleid om direct naar de reflectiepuls (de "wiggles") te kijken om het verschil tussen de situaties met en zonder gat te bestuderen. De "wiggles" is het tijdsignaal en geeft zowel amplitude als fase informatie; bij de normale wijze van weergave wordt slechts amplitude boven (+) of beneden (-) een bepaalde waarde als zwart afgebeeld: de meeste informatie gaat derhalve verloren. In figuur 9a is de wiggle afgebeeld van een reflectie van een holle ruimte en in figuur 9b die van een interface zonder holle ruimte. Er is een groot verschil tussen beide opnamen. Een nadere analyse van deze signaalvormen kan op dit moment nog niet gebeuren.

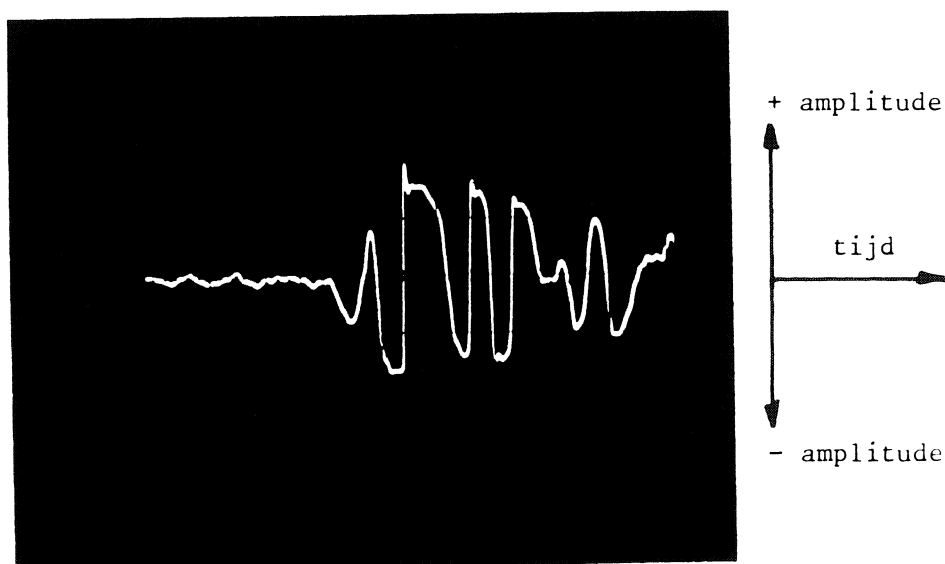


Fig. 9a Interface met holle ruimte (wiggle trace).

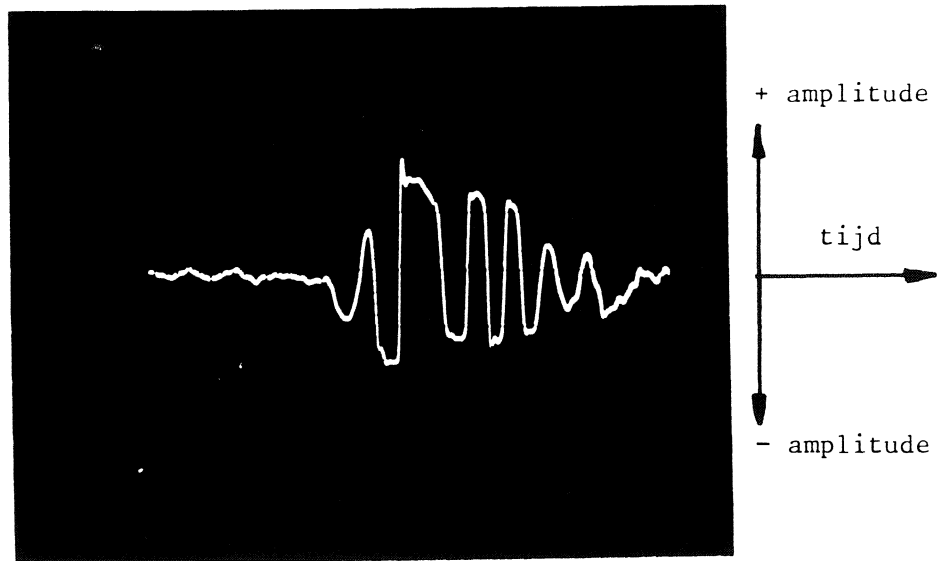


Fig. 9b Interface zonder holle ruimte (wiggly trace).

Thans wordt in opdracht van het LGM door de TPD een data-acquisitie- en verwerkingseenheid gebouwd, zodat de grondradar signalen met behulp van computers bewerkt kunnen worden en de gemeten amplitude en faseinformatie vollediger gebruikt kan gaan worden.

Het interface tussen beton en zandbed is geen sterke reflector. De (relatieve) diëlectische constante van het beton is circa 4,5 en van het zandbed circa 5,5. Het interface wordt door een gat met een diëlectische constante van 1 goed verstoord. Deze verstoring is zeer goed te detecteren. Dit zou kunnen betekenen dat wellicht zeer dunne "gaten" zoals folies en vliezen ook waarneembaar zijn. Een nadere studie kan hier mogelijk licht inbrengen.

Afhankelijk van de grootte van het waar te nemen gat is het gebruik van een 300 MHz-antenne ook mogelijk, er is dan meer informatie over de diepere ondergrond. Voor een goede interpretatie van grondradar is het van belang om af en toe referentiepunten te hebben, zodat de opbouw van de ondergrond bekend is en de interpretatie gevalideerd kan worden. Uit de grondradarechogrammen kunnen dan de afwijkingen en het verloop tussen de referentiepunten vastgesteld worden.

Eindconclusie

De algemene conclusie die uit dit onderzoek naar het detecteren van holle ruimten onder steenzettingen op dijken getrokken kan worden luidt:

Relatief kleine holle ruimten kunnen met behulp van grondradartechnieken gedetecteerd worden; reeds in gang gezette ontwikkelingen op het gebied van data-inwinning en data-bewerking zullen de interpretaties van de radarreflecties uit dijkbekledingen gaan vergemakkelijken . De scansnelheid van de huidige apparatuur laat het onderzoeken van enkele tientallen m² glooifing toe. Onderzoek van een compleet dijkvak is met de huidige apparatuur niet mogelijk.

Grondradar.A. Inleiding.

Grondradar is een reflectietechniek: er wordt een golf de bodem ingezonden en de reflecties worden ontvangen. De gebruikte golf is de electromagnetische golf (EM-golf); de eigenschappen van deze golf kunnen het best vergeleken worden met lichtgolven. De reflectie- en brekingswetten uit de optica gelden derhalve ook voor de grondradar. Het verschil met licht is de golflengte: in lucht geldt

$$\lambda_{\text{licht}} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m en } \lambda_{\text{radar}} = 1 \text{ m of uitgedrukt in frequentie:}$$

$$\nu_{\text{licht}} = 5 \cdot 10^8 \text{ MHz en } \nu_{\text{radar}} = 300 \text{ MHz.}$$

Door de veel lagere frequentie is grondradar in staat om in materialen door te dringen; in goed geleidende materialen, hoge elektrische geleidbaarheid, wordt de golf sterk gedempt. De reflectie- en brekingshoek worden in hoofdzaak bepaald door de diëlectrische constante van het materiaal.

Onderstaande tabel I geeft een indruk van de orde van grootte van deze eigenschappen van grondsoorten:

materiaal	electrische geleidbaarheid	diëlectrische constante	voorplantings-snelheid
lucht	$\sigma = 0 \text{ mho/m}$	$\epsilon_r = 1$	$v = 3.0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
water	10^{-3}	81	$0.3 \cdot 10^8$
droog zand	10^{-4}	4	$1.5 \cdot 10^8$
nat zand	10^{-3}	25	$0.6 \cdot 10^8$
klei	10^{-1}	9	$1.0 \cdot 10^8$
veen	10^{-3}	49	$0.4 \cdot 10^8$

Tabel I: Materiaaleigenschappen

N.B.: De penetratie in kleilagen dikker dan 0.3 meter kan door de hoge elektrische geleidbaarheid problemen geven.

De indringing is mede afhankelijk van de frequentie van het

uitgezonden radarsignaal. Onderstaande tabel II geeft een indruk over de indringing voor met zoet water verzadigd zand:

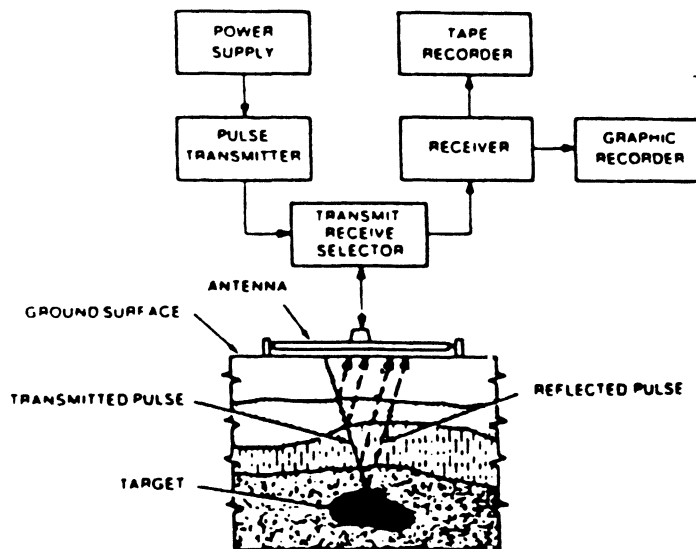
antenne frequentie	indringdiepte nat zand	beschikbaar sinds
900 MHz	0.5 m	1982
300 MHz	3 m	1982
80 MHz	12 m	1985

Tabel II: Indringdiepte voor verzadigd zand.

B. Weergave van reflecties.

De grondradar die door het COW en het LGM gebruikt wordt bestaat uit een gekombineerde zend- en ontvangstantenne (zero offset profiling). Gedurende een korte tijd (enkele nanoseconden) wordt een puls radargolven de grond ingezonden; op een reflectievlak (verschil in diëlectrische constante) wordt een gedeelte teruggekaatst naar de antenne; hier is een zekere looptijd mee gemoeid: hoe langer deze looptijd is hoe dieper het reflectievlak is gelegen. Dus reflecties van onder elkaar gelegen lagen komen op verschillende tijden binnen.

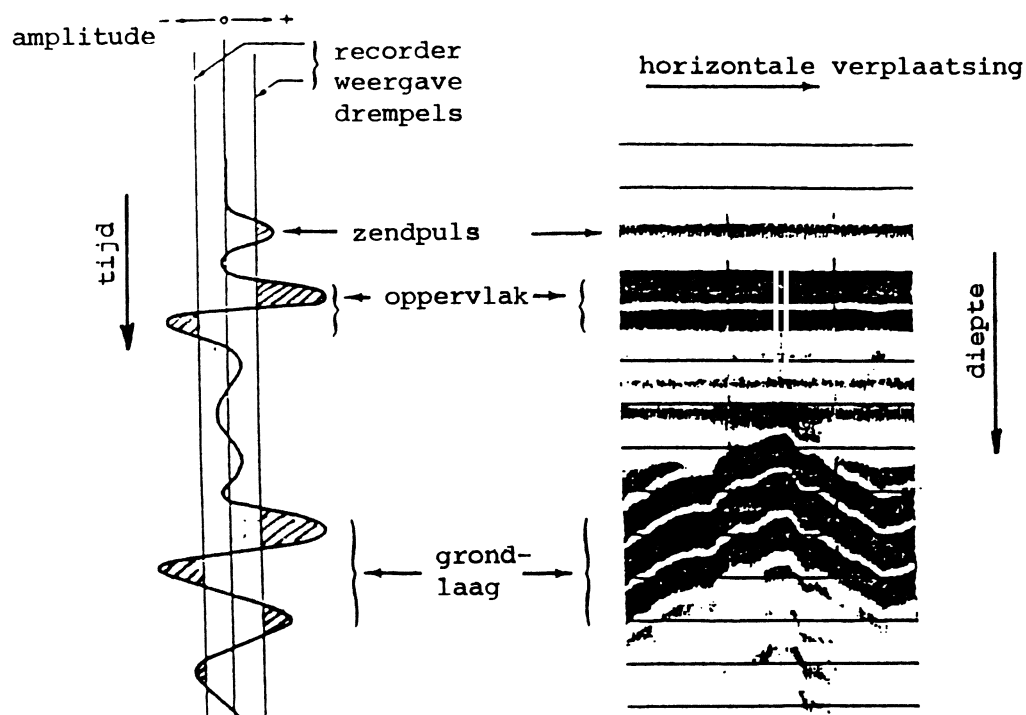
Figuur 1 geeft het principe weer.



Figuur 1: Principe grondradar.

Figuur 2 (links) toont het ontvangen reflectiesignaal. De registratie gebeurt in de vorm van een amplitude - looptijd weergave, waarbij amplituden boven een bepaalde waarde als zwart worden afgebeeld. Door de antenne over het terrein te verplaatsen onder het uitzenden van pulsen kan een reflectiebeeld verkregen worden van de ondergrond. De relatie tussen looptijd en diepte wordt bepaald door de voortplantingssnelheid in de diverse lagen (zie tabel I).

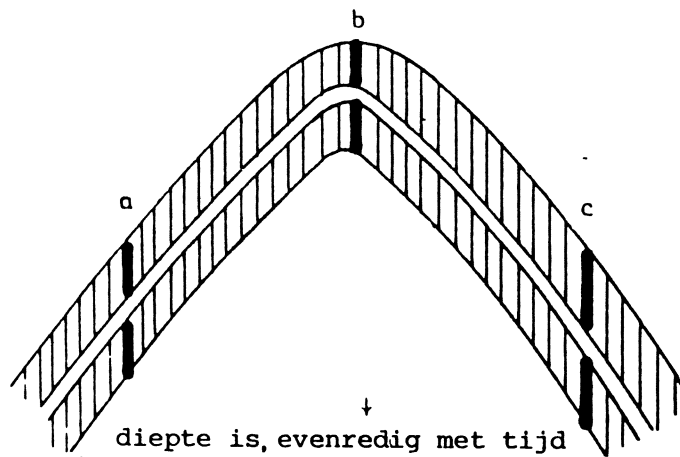
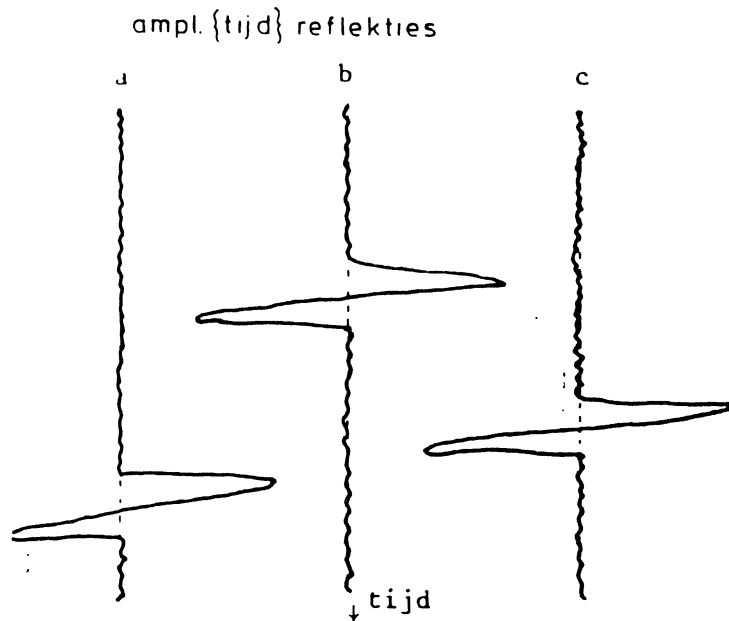
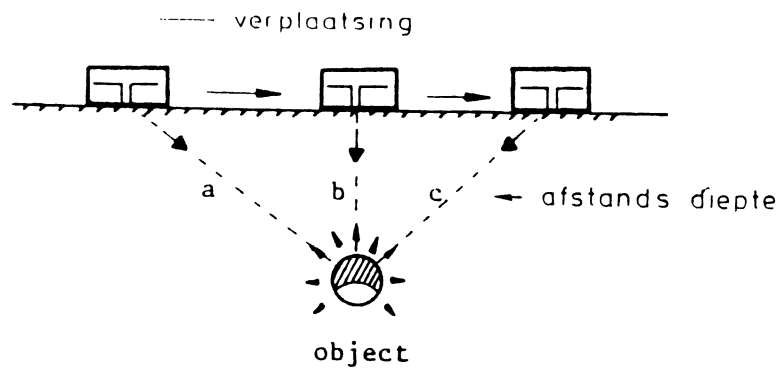
Figuur 2 (rechts) geeft een voorbeeld van het ontstane radarbeeld op de uitvoer.



Figuur 2: Voorbeeld van een radarsignaal.

Afbeelding van een object.

Bij het scannen dwars op een object, zoals een leiding, neemt de afstand van de antenne tot het object af tot de antenne loodrecht boven het object is gekomen; daarna neemt de afstand en dus de looptijd van de golven weer toe. Het gevolg hiervan is dat er een hyperbolische afbeelding ontstaat (zie figuur 3).



$$t = \frac{L}{c} = \frac{\text{afstand}}{\text{golfsnelheid}}$$

Figuur 3: Hyperbolische afbeelding van een klein object.

Bijlage 3

Notitie nr.: datum: maart 1985
 Aan : Staf COW
 Van : J. Weijers
 Inzake : Grondradar

Bijlage :
 Afschrift :

Hierbij een overzicht van het gebruik van de grondradar op dit moment en van de stand van zaken m.b.t. de ontwikkeling van deze apparatuur.

In het kader van werkgroep 2 is recent een rapport uitgebracht over de radarcontrole van filterconstructies aan de Spijkse dijk.

Nu dit rapport is uitgebracht lijkt het nuttig alle zaken m.b.t. de grondradar kort even op een rij te zetten. Dit is met deze notitie gebeurd.

V.w.b. werkgroep 2 is er momenteel geen financiële ruimte aanwezig om meer aan het project te doen.

Het lijkt echter wel nuttig om het project voortgang te laten hebben. Voor de goede afwikkeling (reproductie van het rapport t.b.v. de TAW) is in ieder geval nog wat geld nodig.

Ook voor een voortzetting in de toekomst zal nog geld nodig zijn.

Stand van zaken onderzoek m.b.t. grondradar

1. Inleiding

Bij het COW wordt reeds enige tijd (vanaf \approx 1982) gewerkt met grondradar.

Het apparaat wordt beheerd door het LGM.

De onderzoeks methodiek m.b.v. radar is tot nu toe voornamelijk gebruikt door werkgroep 6 t.b.v. onderzoek naar muskusratten en door werkgroep 2 in het kader van onderzoek naar de kwaliteit van filters.

Deze notitie is geschreven vanuit de ervaringen die werkgroep 2 met de techniek heeft. Er zal een poging worden gedaan om een totaaloverzicht te geven, maar voor gedetailleerde gegevens over het opsporen van holen in de bodem e.d. wordt verwezen naar werkgroep 6.

2. Projecten

Er zijn twee projecten geweest waarbij de grondradar door het COW is ingezet. Het onderzoek is uitgevoerd door het LGM en het COW samen. De rapportage is opgesteld door het LGM.

Het eerste project had als naam:

"Evaluatie van een demonstratie m.b.t. gebruik van grondradar voor de lokatie van gangenstelsels in waterkeringen" (CO-262580/2)

Bij deze evaluatie wordt opgemerkt dat het apparaat mogelijkheden biedt, maar dat niet te verwachten is dat grondradar kan worden ontwikkeld tot een "fool proof" muskusholen meter. Het apparaat zal, volgens het rapport, afhankelijk blijven van de interpretatie van de operateur.

Het wordt wel nodig geacht het apparaat aan te passen voor het gebruik bij de controle van waterkeringen. De rapportage van het tweede project waarbij radar is gebruikt had de volgende titel:

"Samenvatting onderzoek grondradar aan de filterconstructie Spijkse dijk" (CO-265862/4)

De belangrijkste conclusies van dit rapport zijn:

- de methode is geschikt voor het volgen van de grondwaterspiegel in de bodem.
- De grenzen van het (onderzochte) filter zijn goed waarneembaar (doordringing is vele meters (tot 10 m))
- De zichtbaarheid van lagen in de verzadigde zone is niet erg goed.
- Het afbeelden van (erg) scheve vlakken is moeilijk
- De doordringing in klei is moeilijk, zeker bij de hogere frequenties. Naar verwachting zal dit iets verbeteren als een laag frequente antenne wordt gebruikt (doordringing $\approx 0,5$ m).
- De interpretatie vergt veel inzicht van de operateur en liefst wat voorkennis van de situatie ter plaatse (referentie vlakken of punten).

De eindconclusie was: De apparatuur kan worden gebruikt om filters op te sporen die als verdacht moeten worden beschouwd. Er was een duidelijk verschil zichtbaar tussen slechte filters en filters die waarschijnlijk goed functioneren. Een definitief oordeel over (het filter en) de apparatuur kan echter pas na meer studie worden opgesteld.

Het probleem van de beperkte doordringing in bepaalde lagen kan worden aangepakt door een laag frequente antenne te gebruiken. Deze antenne is per 1-1-'85 beschikbaar zodat proeven kunnen worden opgestart om e.e.a. uit te proberen.

Een andere mogelijkheid om de gegevens te verbeteren is het toepassen van dataprocesing. Dit kan op beperkte schaal nu reeds gebeuren bij de TPD. Verdere studie is echter in dit kader noodzakelijk.

Op de mogelijkheden om te komen tot verbetering en de kosten die daaraan zijn verbonden zal nader worden ingegaan in hoofdstuk 4.

3. Andere toepassingsgebieden van Grondradar

Over de toepassing van grondradar bij het opsporen van muskusratholen en de controle van filters is hiervoor reeds gesproken. Nu zullen een paar andere mogelijkheden op een rij worden gezet. Een beperking die daarbij wel in acht zal worden genomen is de toepasbaarheid in de civiele waterbouw.

- Controle van de ligging van het freatische vlak

Tijdens prototype onderzoek naar de ligging van het freatische vlak wordt tot nu toe gebruik gemaakt van stijgbuizen. Uit praktische overwegingen is het aantal buizen altijd beperkt.

Met behulp van grondradar kan een goed beeld worden verkregen (onder een aantal omstandigheden) van het verloop van het freatische vlak tussen de stijgbuizen. Ook worden de twee dimensionale gegevens van een raai waarin de buizen zijn geplaatst uitgebreid tot een driedimensionaal beeld.

- Bepaling laagdiktes

Als er een antenne wordt ontwikkeld die voldoende diep in klei kan doordringen dan zou met behulp van deze techniek een controle kunnen worden uitgevoerd van de dikte van een afdeklaag achter (of voor) een dijk. Ook de afdeklaag op een dijk zou kunnen worden onderzocht. Hierbij moet echter wel worden bedacht dat de doordringing in klei altijd beperkt zal blijven.

Een dikte van 1 meter klei is een redelijke schatting van de mogelijkheden die in de toekomst haalbaar zijn.

Naast de kleilaag controle kunnen ook andere laagdiktes worden gecontroleerd zoals filterlagen, steenzettingen, asfalt.

De eis die moet worden gesteld is dat de dieëlectrische constante van de twee materialen voldoende verschillen om een reflectie op het radarbeeld te geven.

Voor verschillende lagen in een filter zou dit evt. problemen op kunnen leveren. Vooral als de korrelgroottes van de lagen en de samenstelling van het materiaal niet veel verschilt.

- Opsporing openingen onder afdeklagen

In de civiele techniek worden vaak afdeklagen toegepast in waterbouwkundige constructies. Het is daarbij van belang dat er een goede aansluiting is tussen de afdeklaag en de ondergrond. Eventuele uitspoelingen kunnen ook nog in de gebruikssituatie optreden. Een controle (opspoor) techniek van deze openingen zou grondradar kunnen zijn.

Het verschil in de dieëlectrische constante van lucht (in de holte) en die van het afdek materiaal (steen, beton, asfalt etc.) is vrijwel altijd groot genoeg om een "harde" reflectie te geven.

Als de 900 meter antenne wordt gebruikt dan is het oplopend vermogen theoretisch ongeveer 4 cm. In de praktijk is gebleken dat ook 2 à 3 cm haalbaar is.

Dit betekent dat openingen met een afmeting als hierboven aangegeven kunnen worden opgespoord.

Verstorend kunnen eventueel werken

- a) Wapening in beton. Waarschijnlijk kan dit probleem worden omzuid, maar e.e.a. moet nog worden aangetoond.
- b) Een dermate ruw oppervlak dat de antenne niet dicht genoeg aan het oppervlak kan worden gepositioneerd.
Ook dit probleem wordt volledigheidshalve gemeld. Waarschijnlijk levert het geen onoverkomelijke problemen op.
- c) "Alternatieve" vulstoffen in asfalt.
Eventueel kan een vulstof in asfalt dempend werken op het radar signaal. Dit zou problemen op kunnen leveren. (Tot nu toe is dit niet voorgekomen.
- d) Een te hoge zoutconcentratie in de grond bemoeilijkt ook het onderzoek. Hoe deze gevoeligheid precies ligt is nog niet bekend.

- Opsporing vreemde elementen

Voor de opsporing van vreemde elementen in zandige bodems kan het systeem goed worden ingezet.

Het is echter altijd mogelijk dat een element wordt gemist.

Een absolute garantie dat alles is opgespoord kan niet worden gegeven. Dit is voor sommige toepassingen een beperkende factor.

- Opsporing van gaten (scheuren) in asfaltlagen

Het is mogelijk openingen op te sporen in asfaltlagen.

(Asfalt wordt in de civiele techniek vaak als afdichtmiddel gebruikt).

Het asfalt is ook zichtbaar als er water boven de laag aanwezig is.

Als er een afzetting of een bestorting boven op het asfalt aanwezig is dan zou dit het eindresultaat negatief kunnen beïnvloeden.

4. Algemene inzetbaarheid

De apparatuur waarmee de onderzoeken zijn uitgevoerd is inzetbaar via het LGM.

Soortgelijke apparatuur is in Nederland ook beschikbaar bij bureau Bernard (via Heidemij).

- In het algemeen kunnen nu reeds een aantal situaties worden genoemd waarin de radartechniek moeilijk inzetbaar zal zijn:

a) De doordringing in klei is afhankelijk van de structuur van de klei en de gebruikte frequentie beperkt (0,5 meter maximaal met 80 meter misschien 1 meter).

b) De toepasbaarheid in een zout milieu is waarschijnlijk beperkt.

- Voor wat betreft de kosten moet worden gedacht aan een bedrag (inclusief rapportage) van $\approx f$ 10.000,- per dag. Voor langdurige projecten kan dit natuurlijk veranderen.

Voor projecten waarbij het niet zeker is dat de techniek met succes kan worden ingezet verdient het aanbeveling eerst een "pilot" proef in het LGM uit te voeren.

De kosten hiervan zullen f 5.000,- zijn.

E.e.a. is uiteraard sterk afhankelijk van het soort proefopstelling dat nodig is.

5. Toekomstige ontwikkelingen

De techniek wordt momenteel gebruikt door een aantal probleemgebieden.

- In de eerste plaats in situaties zoals ze voorkomen in de natte waterbouw.

- In de tweede plaats bij de wegeaanleg.
- In de derde plaats zijn er een aantal toepassingen in de mijnbouw (vooral buitenland).
- Tenslotte wordt de techniek gebruikt om milieu verontreinigingen op te sporen.

5.1. Wegenbouw

In Nederland wordt er momenteel vooral door de wegenbouwers veel aandacht aan de ontwikkeling van het systeem geschonken.

Dit wordt vooral gedaan om een techniek te ontwikkelen die de mogelijkheid schept kabels en leidingen onder wegen en op plaatsen waar wegen worden geprojecteerd op te kunnen sporen.

Het is daarbij van belang dat er geen kabels of leidingen worden gemist. Het oplopende vermogen zal dus erg hoog moeten zijn.

De ontwikkeling gaat in twee richtingen:

- a) Er wordt over gedacht om een totaal nieuwe opzet te maken voor een antenne. De antenne vormt namelijk het belangrijkste element in het systeem.
De indruk bestaat namelijk dat met een nieuwe antenne veel winst te boeken is.
- b) Er worden ook voorstudies gepleegd om te komen tot een dataprocessing techniek van het weerkaatste signaal.

Voor de kosten worden bedragen genoemd die in de vele miljoenen lopen.

5.2. Fabrikant (GSSI)

De fabrikant heeft momenteel een dataprocessingsunit ontwikkeld. Dit kan zo worden toegepast op het bestaande apparaat.

Het bestaat uit een IBM computer met een stuk aangebouwde hardware en bijgeleverde software.

Het geheel kost iets minder dan f 100.000,-.

6. Conclusies en Voorstel

6.1. Conclusies

Concluderend kan worden gezegd dat de ontwikkeling van deze techniek zeker een goede zaak is.

Het is echter niet volledig door ontwikkeld.

Voordat er duidelijkheid over alle mogelijkheden is zal er zeker nog veel inspanning in onderzoek gaan zitten.

Het COW zal bij het bekijken van de toepasbaarheid van de techniek in de praktijk een belangrijke rol kunnen spelen. Het eventueel mee betalen aan ontwikkelingswerk is echter geen COW taak. Ook ontbreekt de deskundigheid hiertoe binnen het COW.

6.2. Voorstel

Voorgesteld wordt nu deze techniek, in de vorm waarin deze nu beschikbaar is, binnen de waterbouw in een wat breder kader in te zetten. Hierbij wordt vooral gedacht aan controle van dijkbekledingen en aan de controle van asfalt als bodemafsluiting.

Ook binnen het kader waarin de radar tot nu toe is gebruikt kan verder onderzoek worden gepleegd.

Bij dit laatste kan dan vooral worden gedacht aan het uittesten van de nieuwste mogelijkheden die er nu beschikbaar zijn.

Hierbij wordt gedacht aan de 80 mhz antenne (nu beschikbaar) en aan de dataprocessing-unit die de fabrikant uit heeft gebracht.

Voor wat betreft het gebruik in het kader van werkgroep 2 kan er ook nog worden gedacht aan het voortzetten van de studie aan de Spijkse dijk.

Bijlage 4

24 mei 1985

Ir. K.J. Bakker

Fluorescerende slibtracer

Verslag naar aanleiding van het bijwonen van het colloquium:

Een fluorescerende slibtracer; ontwikkeling en toepassing.

door: Ir. C.J. Louisse (RWS, Fysische Afdeling)

In de inleiding werd eerst duidelijk gemaakt, in welke context we de fluorescerend slibtracer moesten zien, namelijk in het algemene rijtje van traceerbare stoffen, zoals

- natuurlijke tracers
- radioactieve tracers
- fluorescerende tracers.

De bedoeling is om aan de hand van metingen, de verspreiding van een gegeven stof te kunnen volgen. In dit geval was dat de verspreiding van slib. Hiertoe wordt een gegeven hoeveelheid van deze stof met een gegeven concentratie van de tracer in het prototype gebracht. Daarna wordt op gezette tijden in een aantal meetpunten monsters genomen. Deze monsters worden in het laboratorium op concentratie tracer onderzocht, en aan de hand van deze gegevens wordt de verspreiding van de stof afgeschat.

De fluorescerende tracer bestaat zelf voor 97% uit een dragerstof en voor 3% uit de fluorescerende stof zelf. De milieubelasting bij het toepassen van deze op zich giftige stof is dus toch verwaarloosbaar klein.

De tracer wordt bij het slib gebracht terwijl het in suspensie is. De tracerdeeltjes worden in het slib als het ware mechanisch gevangen. Bij het floculeren zitten de tracerdeeltjes, welke veel kleiner zijn dan de kleiplaatjes (waar het slib uiteindelijk uit bestaat) hier als het ware tussen opgesloten. Van enige chemische binding wordt verondersteld geen sprake te zijn.

Het werken met de fluorescerende tracer werd geïllustreerd aan de hand van een grootschalige proef in het Eems-Dollard estuarium. Men stelde zich daar de vraag hoe opgebaggerd slib uit de haven van o.a. Delfzijl, zich na het storten

buiten de haven zou verspreiden. Onder andere de Duitsers vroegen zich af of het door Nederland gestorte slib niet voor een groot deel bij hun in de haven terecht kwam.

Bij deze proef zijn een aantal splijtbakken met gemerkt slib op korte tijd na elkaar gestort, en zijn een aantal meetpunten in het gehele estuarium regelmatig bemonsterd.

Achteraf bleek het moeilijk om alle gemerkte slib te achterhalen. Dit bleek slechts voor ca 20% mogelijk. De oorzaak hiervan werd gezocht in het vrij grove meetnet, en in het feit, dat alleen bodemonsters zijn onderzocht, en niet de waterkolom.

Op dit moment is men bezig om gedeeltelijk aan dit probleem tegemoet te komen, door een methode van continue meten vanaf een schip te ontwikkelen. Het moet dan mogelijk worden om al varende metingen in de waterkolom en van de bodem te nemen. Hiermee zou dan in kortere tijd veel meer informatie kunnen worden ingewonnen en geanalyseerd, zodat een beter resultaat te verwachten zal zijn. Bij deze in ontwikkeling zijnde meetmethode wordt gebruik gemaakt van glasvezeltechnieken.

Ten aanzien van het traceren van zand, mag verwacht worden, dat de fluorescerende tracer geen soulaas zal bieden, omdat het vermoedelijk niet mogelijk is om de tracer aan het zand te binden. De oorzaak hiervan is, dat geen mechanische binding met de zandkorrel zal optreden, deze is daarvoor veel te glad.

Bij de verdere discussie tijdens de vragenronde kwam het onderwerp zandtracer ook aan de orde. In het algemeen maakt men hiervoor gebruik van radioactieve tracers. Bijvoorbeeld in Frankrijk wordt in ruime mate gebruik gemaakt van radioactieve zandtracers met een korte halfwaardetijd en lage activiteit (1/2 - 1 curie).

Het nadeel van radioactieve tracers is de achtergrond "ruis" welke altijd aanwezig is, als gevolg van de natuurlijke radioactiviteit. Het voordeel van een fluorescerende tracer zou juist zijn, dat hierbij geen natuurlijke achtergrond ruis aanwezig is, het komt in de natuur vrijwel niet voor.

Een ander nadeel van een radioactieve tracer zijn de procedurele problemen, het heeft een slechte naam.

Als alternatief voor de radiactieve zandtracer werd nog genoemd, het kleuren van het zand. Een nadeel van deze methode is, dat het hierbij vrijwel onmogelijk is om in het model, tijdens de proef te kunnen constateren of er deeltjes in beweging zijn gekomen.

Voor verdere informatie over zandtracers, zou contact kunnen worden opgenomen met dhr. Ir. J. de Reus (adviesdienst Hoorn).

Ook dhr. Dr. J. Wiersma van de Deltadienst heeft volgens zeggen van dhr. de Reus een grote kennis op het gebied van zandtracers.

Over de fluorescerende slibtracer is een conceptrapport in de maak, bij afronden zal hiervan kennis worden gegeven.

K.J. Bakker

SECTIE 6

Interne stabiliteit van granulaire filters bij stationaire stroming

interne stabiliteit van granulaire filters bij stationaire stroming

M. Klein Breteler (WL) en H den Adel (GD)

INHOUD

LIJST VAN SYMBOLEN

	pag.
1. <u>Inleiding</u>	1
1.1 Onderzoekskade.....	1
1.2 Probleembeschrijving.....	2
1.3 Opzet van het onderzoek.....	3
2. <u>Samenvatting en konklusies</u>	5
3. <u>Makroskopische invalshoek</u>	8
3.1 Theorie.....	8
3.2 Opzet en uitvoering van het modelonderzoek.....	11
3.3 Resultaten van het modelonderzoek.....	14
3.4 Analyse van resultaten.....	18
3.5 Kanalentheorie.....	21
4. <u>Microscopische invalshoek</u>	29
4.1 Inleiding.....	29
4.2 Potentiele instabiliteit.....	30
4.3 Transportmodel.....	30
4.3.1 Geometrie.....	31
4.3.1.1 Toepassing van de geometrische aspecten.....	32
4.3.2 Krachten.....	33
4.4 Macroscopisch transport.....	34
4.4.1 Algemeen.....	34
4.4.2 Analyse metingen bij grensvlak instabiliteit.....	34
4.4.3 Transport bij interne instabiliteit.....	38
4.4.4 Synthese theorie en experimenten.....	39
4.5 Voorspelling van het transport.....	40
4.5.1 Methode.....	40
4.5.2 Berkeningen.....	41
4.5.3 Reproduceerbaarheid.....	41
4.5.4 Conclusie.....	42

INHOUD (vervolg)

	pag.
4.6 Vergelijking met de modelexperimenten.....	42
4.6.1 Inhomogeniteiten.....	42
4.6.2 Doorlatendheid.....	43
4.6.3 Vergelijking.....	43
4.6.4 Conclusie.....	45
4.7 Een stochastisch model.....	45
4.7.1 Inleiding.....	45
4.7.2 Waarnemingen.....	46
4.7.3 Theorie.....	46
4.7.4 Kwalitatieve verklaring.....	48
4.7.5 Conclusie.....	50
5. <u>Aanbevelingen voor vervolgonderzoek</u>	51

REFERENCES

TABELLEN

FIGUREN

APPENDIX A: Zandtransport volgens Meyer - Peter Müller

APPENDIX B: Resultaten van proeven in zeeflab met mijnsteen

LIJST VAN SYMBOLEN

$c_i(j)$	= evenredigheidsconstante	(diverse)
D	= korrelgrootte van het filter	(m)
D_{f15}	= korrelgrootte die door 15 gewichtsprocenten wordt onderschreden	(m)
F	= gewichtspercentage van de korrels die kleiner zijn dan D	(%)
g	= zwaartekrachtsversnelling	(m/s ²)
$g(D)$	= relatieve massa functie met korrels D	(-)
H	= gewichtspercentage van korrels met grootte tussen D en $4D$	(%)
i	= verhang	(m/m)
i_{cr}	= verhang bij begin van interne instabiliteit	(-)
$K(D)$	= poriekanaaltjesverdeling	(-)
L_f	= lengte filterpakket, // gemiddelde stromingsrichting	(m)
n	= porositeit van filter	(-)
n_s	= porositeit van skelet	(-)
n_k	= porositeit in de klusters	(-)
M	= massa filter	(kg)
$O(D)$	= overschrijdingskans op de grootte van een korrel	(-)
$P(D)$	= korrelverdeling	(-)
p	= transport intensiteit	(m ³ /m/s)
p_{int}	= transport intensiteit bij interne instabiliteit	(m ³ /s/m ²)
s	= materiaaltransport per m ² doorstroomprofiel	(gr/s/m ²)
T	= getransporteerde massa	(kg/s/m)
T_{int}	= getransporteerde massa bij interne instabiliteit	(kg/s/m ²)
$t(D)$	= massa getransporteerd materiaal met diameter D	(kg/s/m ²)
t_{merk}	= tijdsduur die een merkstof nodig heeft om een afstand L_f af te leggen	(s)
$v_{fcr}(D)$	= kritieke filtersnelheid, functie van de diameter	(m/s)
v_{pcr}	= kritieke poriesnelheid bij begin van beweging	(m/s)
v_{fcr}	= filtersnelheid bij begin van interne instabiliteit	(m/s)
V	= volume filter (korrels en poriën)	(m ³)
V_k	= volume van klusters (korrels en poriën)	(m ³)
V_{kan}	= volume van kanalen (korrels en poriën)	(m ³)
V_{eff}	= effectief kanaalvolume	(m ³)
v_{fkr}	= filtersnelheid in recht kanaal	(m/s)
v_{fk}	= filtersnelheid in reëel kanaal	(m/s)

LIJST VAN SYMBOLEN (vervolg)

α	= evenredigheidsconstante tussen poriekanaaltjesverdeling en korrelverdeling	(-)
α_t	= koëfficiënt die invloed van doodlopende kanalen weergeeft	(-)
α_w	= koëfficiënt die grilligheid van kanalen weergeeft	(-)
ρ	= volumieke massa van het gebruikte materiaal	(kg/m ³)
ψ_s	= koëfficiënt van Shields	(-)
Δ	= relatieve soortelijke massa van potentieel transporteerbare korrel	(-)

INTERNE STABILITEIT VAN GRANULAIRE FILTERS

1. Inleiding

1.1 Onderzoekskader

Bij vele waterbouwkundige konstrukties wordt een granulair filter toegepast ten einde een verantwoorde overgang van de verdedigingskonstruktie naar de ondergrond (bodem of basis) te verkrijgen. Tevens wordt het gebruikt als tijdelijke taludverdediging tijdens de bouw van de konstruktie.

Het filter vervult een blijvende funktie in bijvoorbeeld oever- en dijkbekledingskonstrukties, funderingen en bodembeschermingen. Uit de funkties die het granulaire filter moet vervullen, vloeien een aantal eisen voort:

- de ondergrond mag niet eroderen en door het filter uitspoelen.
- het filter moet voldoende erosie bestendig zijn; het mag niet wegspoelen onder invloed van de externe belasting.
- het moet voldoende doorlatend zijn.
- het moet duurzaam deze funkties vervullen.

Ten aanzien van de eerste twee punten is (en wordt) uitvoerig onderzoek uitgevoerd (zoals t.b.v. het onderzoek voor de Oosterschelde, Steenzettingen, Oeverbeschermingen en Alternatieve materialen). Over de duurzaamheid van een filter is veel minder bekend. De volgende aspecten spelen een rol (zie [1]):

- interne stabiliteit (dat wil zeggen: migratie (en eventuele uitspoeling) van fijne fraktie)
- verwerking (dat wil zeggen: splijting van korrels)
- verkitting (met als gevolg: flexibiliteits verlies)
- verpapping (met als gevolg: vermindering doorlatendheid)

Het onderhavige onderzoek richt zich op kennisvergroting op het gebied van interne stabiliteit van het filter. Ten einde de kennis op het gebied van de interne stabiliteit te vergroten en regels op te stellen onder welke condities interne instabiliteit van belang wordt, is opdracht verleend deze zaken te onderzoeken. Het onderzoek is uitgevoerd door het Waterloopkundig Laboratorium en Grondmechanica Delft in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat en de CUR. Het onderzoek bij WL is uitgevoerd onder leiding van ir. M. Klein Breteler en dat bij Grondmechanica Delft door dr. H. den Adel.

1.2 Probleembeschrijving

Een granulair filter wordt intern stabiel genoemd als de fijne fractie van het filter niet tussen de grotere korrels weg kan spoelen. Verlies aan interne stabiliteit wordt ook wel suffosie of interne erosie genoemd. Het heeft uitsluitend iets te maken met de filterlaag zelf, en niets met de grensvlakken die in een verdedigingskonstructie aanwezig zijn.

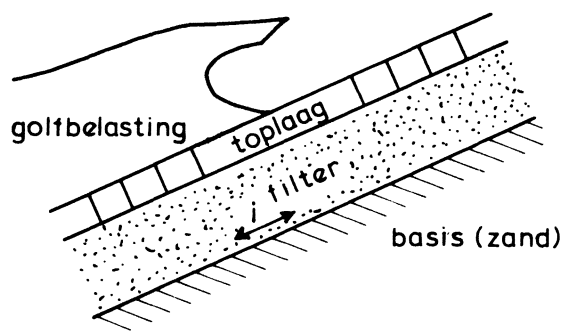
Interne instabiliteit is alleen mogelijk als het filter een voldoende flauwe zeefkromme (brede gradering) heeft, omdat dan de kleine korrels kleiner zijn dan de door de grote korrels gevormde poriën.

Naast grind en puin wordt veelal mijnsteen, maar soms ook silex of slakken als filter toegepast, de zogeheten alternatieve filtermaterialen. Vooral ongesorteerde mijnsteen heeft een flauwe zeefkromme zodat verlies van interne stabiliteit kan optreden. Dit is niet iets specifiek voor de alternatieve filtermaterialen, ook in wijd gegradeerd grind kan suffosie optreden. Bij mijnsteen is de suffosie gevaarlijker dan bij grind, omdat door veranderingen van de omstandigheden (nat- droog cycli) verwerking optreedt [1]. Hierdoor neemt de fijne fractie weer toe, zodat nog meer fijn materiaal beschikbaar komt voor erosie. Ook bij silex kan door verbrokkeling van het aanwezige tau (kalk); gevolgd door uitspoeling, een verandering optreden van de gemiddelde korrelgrootte.

Het gevolg van interne instabiliteit is een langzaam maar zeker vergroten van de karakteristieke korrelgrootte: de D_{f15} (korrelgrootte van het filtermateriaal dat door 15 gewichtsprocenten wordt onderschreden). Dit is onder andere door Kenney & Lau [2] gemeten:

proef nr.	D_{f15} vóór doorstromen mm	D_{f15} na doorstromen mm
1	0,70	5,0
2	0,70	1,4
3	0,90	1,7
4	3,5	12,0
5	1,0	2,0
6	1,7	5,0

In verdedigingskonstrukties kan de door de suffosie veroorzaakte vergroving van het filter op zijn beurt weer aanzienlijke gevolgen hebben voor de stabiliteit van de basis (zie onderstaande figuur), zelfs bij gelijkblijvende hydraulische belasting (verhang i). Bovendien kan dit laatste door de suffosie ongunstiger worden.



VOORBEELD VAN EEN VERDEDIGINGS-KONSTRUKTIE

Neemt de D_{f15} bijvoorbeeld met een faktor 2 toe, dan moet men ruw weg rekenen op een doorlatendheidsvergroting met een faktor 3. Hierdoor kan de verschil-druk over een top laag van gezette steen bij golfaanval met een faktor $1\frac{1}{2}$ toenemen en het kritieke verhang ten aanzien van erosie van de ondergrond met een faktor 5 afnemen. Op den duur dreigt dus zowel instabiliteit van de top laag als erosie van het zandlichaam onder het filter.

Het doel van dit onderzoek is het vaststellen van de kritieke hydraulische belasting waarbij interne migratie van filterkorrels aanvangt, en tevens het met dit resultaat opstellen van een praktische ontwerprichtlijn.

1.3 Opzet van het onderzoek

Het onderzoek is opgesplitst in twee delen, die zich van elkaar onderscheiden door de verschillende invalshoek van waaruit het probleem is geanalyseerd:

- Makroskopische invalshoek
- Mikroskopische invalshoek

Bij de makroskopische invalshoek staan de gemiddelde processen centraal, die zich voordoen op een schaal van enkele tot vele malen de grootte van de D_{50} (korrelgrootte die door 50 gewichtsprocenten wordt onderschreden). Grootheden die hierin een rol spelen zijn onder andere:

- filtersnelheid (gemiddeld over orde $\frac{1}{2}$ m²)
- verhang (gemiddeld over decimeters)
- materiaaltransport (gemiddeld over orde $\frac{1}{2}$ m² doorstroomoppervlak)
- inhomogeniteiten over een lengteschaal van centimeters

Deze grootheden zijn meetbaar in een modelopstelling. De resultaten van het uitgevoerde modelonderzoek vormen het uitgangspunt van de analyse.

Dit deel van het onderzoek is verzorgd door WL en is in detail beschreven in hoofdstuk 3.

Bij de mikroskopische invalshoek staan de eigenschappen van de individuele korrels, die voor transport in aanmerking komen, centraal. Belangrijke grootheden zijn:

- het aantal korrels
- de grootte en ligging van de korrels
- de grootte van poriën
- de lokale poriesnelheid
- de krachten op de korrels

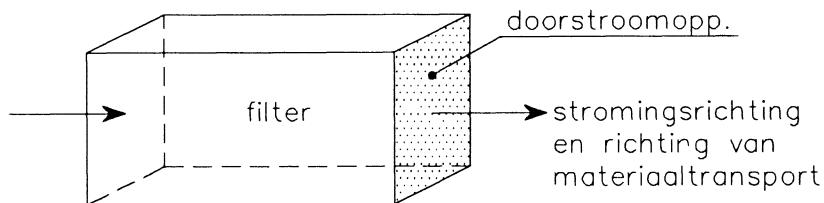
Deze afzonderlijke grootheden zijn nauwelijks in een model meetbaar, waardoor dit deel van het onderzoek een zuiver theoretisch karakter lijkt te hebben. Echter uit de wisselwerking van microscopische grootheden en hun onderlinge verband kunnen macroscopische grootheden worden voorspeld. Dit deel is verzorgd door Grondmechanica Delft. Het is in detail beschreven in hoofdstuk 4.

In hoofdstuk 2 is een samenvatting gegeven van beide onderzoeksdelen.

2. Samenvatting en konklusies

In de inleiding is interne instabiliteit, ofwel suffosie, gedefinieerd als de migratie van kleine filterkorrels in een filter als gevolg van een hydraulische belasting. Dit laatste wordt gekarakteriseerd door een verhang of filtersnelheid.

Het doel van dit modelonderzoek is het vaststellen van de kritieke hydraulische belasting waarbij de interne migratie van filterkorrels aanvangt. Om praktische redenen is dit vage begrip vertaald in de hydraulische belasting bij een materiaaltransport van 1 gr/s per m² filter (loodrecht op de stromingsrichting). Bovendien moet het onderzoek leiden tot een praktische ontwerprichtlijn.



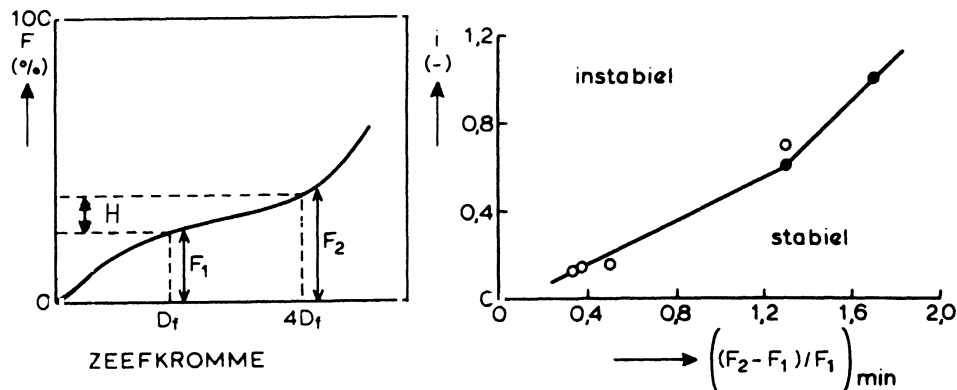
Het onderzoek naar de kritieke belasting is opgesplitst in twee delen:

- makrosopisch onderzoek, gericht op het vinden van de kritieke belasting via modelonderzoekresultaten en via analogieën met vergelijkbare processen, zoals begin van beweging op een grensvlak tussen filter en basis.
- mikrosopisch onderzoek, dat uitgaat van de krachten op individuele korrels.

In paragraaf 3.1 is een korte beschrijving gegeven van de relevante informatie uit de literatuur. Het blijkt dat er slechts voorspellingstechnieken zijn voor potentiële interne instabiliteit. Een filter is potentieel intern instabiel als er een verhang bestaat (hoe groot ook) waarbij interne migratie optreedt.

In paragraaf 3.2 en 3.3 is het modelonderzoek beschreven. Vier proeven zijn uitgevoerd met een zand/grind mengsel en twee proeven zijn uitgevoerd met mijnsteen. Bij de eerste vier proeven is het materiaal zo samengesteld dat de invloed van de hoeveelheid fijne korrels, de hoeveelheid grove korrels en de homogeniteit onafhankelijk gemeten kon worden. Steeds is de grootte van de D_{f15} konstant gehouden. Uit de proeven blijkt dat vooral de doorlatendheid van de bovenstroomse helft van het filter door materiaaltransport toeneemt. In de benedenstroomse helft neemt ook de inhomogeniteit toe, hetgeen de toename van de doorlatendheid tegenwerkt.

De methode van Kenney en Lau [2] om het filter te karakteriseren blijkt zeer bruikbaar te zijn. Volgens deze methode is de verhouding tussen het onderscheidingspercentage bij een korrelgrootte D_f en bij $D_f/4$ maatgevend, waarbij D_f zo gekozen moet worden dat deze verhouding minimaal is:



Met: F = onderschrijdingspercentage van de betreffende korrelgrootte (%)
 $H = F_2 - F_1$

○ grind/zand mengsel
 ● mijnsteen

Bovenstaande beschouwing geldt voor de fijnste 20% van het filter (zie paragraaf 3.1). In [2] wordt gebruik gemaakt van de variabelen H en F :

$$(H/F)_{\min} = \left(\frac{F(D_f)}{F(D_f/4)} - 1 \right)_{\min}$$

Uit de proefresultaten blijkt er een verband te bestaan tussen het kritieke verhang en de minimale waarde van H/F . Het volgende kan gekonkludeerd worden (zie ook bovenstaande figuur):

- $(H/F)_{\min} = 0,3 \text{ à } 0,5$ dan intern stabiel tot $i_{cr} = 0,16$
- $(H/F)_{\min} = 1,3$ dan intern stabiel tot $i_{cr} = 0,6$
- $(H/F)_{\min} = 1,7$ dan intern stabiel tot $i_{cr} = 1$

De resultaten van het onderzoek geven geen aanleiding tot twijfel aan de interpolerbaarheid van bovenstaande relaties (zie paragraaf 3.4). Er moet echter opgemerkt worden dat met de method van karakteriseren door middel van H/F er geen rekening gehouden wordt met de absolute waarde van de korrelgrootte. Daardoor kunnen de onderzoeksresultaten niet te ver buiten het bereik van de metingen worden toegepast (dus: korrelgrootte van het getransporteerde materiaal in de orde van 0.1 tot 0.6 mm).

De proefresultaten laten zien dat de homogeniteit van het filter een invloed heeft op het kritieke verhang. Uit de vergelijking van het resultaat van T1 en T3 kan gekonkludeerd worden dat een meer gelaagde opbouw resulteert in een wat lager kritiek verhang dan verwacht mag worden op basis van $(H/F)_{\min}$.

In hoofdstuk 4 is er een transportmodel beschreven dat is opgesteld om vanuit de microscopische invalshoek de grootte van de getransporteerde massa bij interne instabiliteit te beschrijven. Dit model is afgeleid uit de transportmetingen aan instabiele filter-basis combinaties. Bij de heranalyse hiervan is gebleken dat de transportformule volgens Meyer-Peter en Mueller de meest geschikte beschrijving levert. Het transportmodel voor interne instabiliteit is hiervan afgeleid. De evenredigheidscoëfficiënt in de formule is aangepast aan de bij interne instabiliteit verwachte verschijnselen. De overeenkomst tussen het met het transportmodel gesimuleerde en het gemeten transport is redelijk. De verschillen zijn voor een groot deel te wijten aan de inhomogene opbouw van het monster. Het transportmodel beschrijft zelfs de hysteresis, zoals deze in het transport wordt waargenomen bij stijgende en dalende verhangen. Door de aannamen voor de kritieke filtersnelheid, die moesten worden gedaan, kan het model echter niet verklaren waarom de korrelverdeling van het getransporteerde materiaal zo weinig afhangt van de optredende watersnelheid.

Ten einde ook dit laatste punt te kunnen beschrijven en op grond van additionele visuele waarnemingen is een stochastisch model opgesteld. Dit beschrijft momenteel nog slechts op kwalitatieve basis het transport. Alle waargenomen verschijnselen, dus ook de geringe afhankelijkheid van de korrelverdeling van de getransporteerde materiaal als functie van de watersnelheid, kunnen hiermee worden verklaard. Indien de stochastische aspecten opgenomen zullen worden in het huidige transportmodel, zal ook een kwantitatieve beschrijving kunnen worden geleverd.

Tot slot wordt er een aanbeveling voor verder onderzoek in hoofdstuk 5 gegeven. Dit omvat aanvullende proeven ter ondersteuning van de gevonden empirische relatie voor het kritieke verhang en proeven die moeten leiden tot een kwantificering van de kanalentheorie. Deze theorie is beschreven in paragraaf 3.5 en gaat uit van een inhomogeen mengsel van een grove en fijne fraktie. Verder worden er concrete suggesties gegeven teneinde de theorie, die aan de basis van de mikroskopische lijn staat, te verbeteren.

3. Makroskopische invalshoek

3.1 Theorie

Een filter wordt intern instabiel genoemd als de fijne fraktie tussen de poriën van het filter kan uitspoelen. Uit deze definitie kan afgeleid worden dat enerzijds de korrelgrootteverdeling (zeefkromme) en anderzijds de poriegrootteverdeling van belang is. Dit laatste is afhankelijk van het eerste. De literatuur beperkt zich tot richtlijnen waaraan de korrelgrootteverdeling moet voldoen om een zodanige poriegrootteverdeling te verkrijgen dat de korrels groter zijn dan de poriën.

In [5] wordt bijvoorbeeld de eis gesteld dat D_{f60} kleiner moet zijn dan $10 \cdot D_{f10}$.

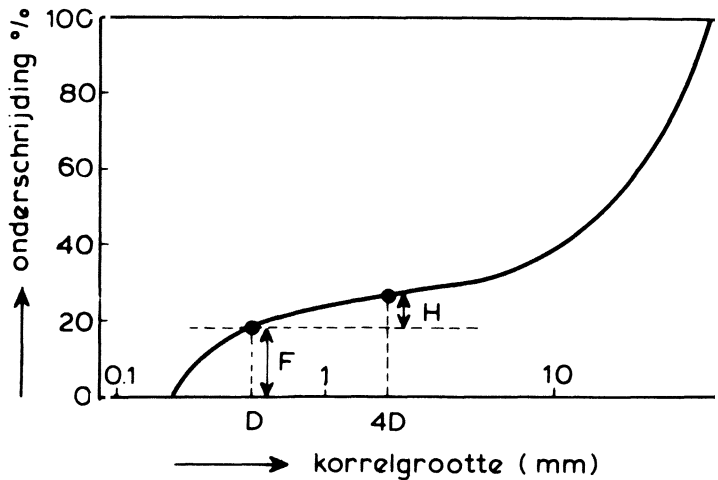
In [3] wordt de grafische theorie van Lubochkov beschreven. Hij verdeelt de korrels in klassen die zodanig gekozen zijn dat de kleinste deeltjes uit zo'n klasse groter zijn dan de poriën tussen de grootste korrels. Vervolgens wordt een algemene formule afgeleid die het relatieve aantal deeltjes in een klasse voorschrijft ten einde een intern stabiel filter te hebben. Uit een groot aantal experimenten zijn de koëfficiënten in de formules afgeleid.

Lubochkov's theorie resulteert in twee krommen (zie figuur 1). Als de zeefkromme van een filter geheel onder de onderste kromme ligt, dan is het materiaal intern stabiel. Ligt een deel tussen beide krommen in, dan is het stabiel bij kleine verhangen. Raakt het echter de bovenste kromme, dan is het instabiel. Hoe groot 'kleine verhangen' zijn, is niet vermeld.

Kenney en Lau [2] geven een wat verfijndere theorie voor potentiële interne instabiliteit. Een filter is potentieel intern instabiel als het bij een bepaald verhang, hoe groot ook, instabiel is. Dit komt praktisch gezien overeen met het criterium dat Lubochkov voor de onderste kromme heeft gehanteerd en kan ook geometrische stabiliteit genoemd worden, omdat het uitsluitend gebaseerd is op de (geometrische) verhoudingen tussen korrelgrootte en poriegrootte.

Kenney en Lau karakteriseren een filter door de verhouding te bezien tussen het massapercentage tussen D en $4D$ (D = korrelgrootte) en het onderschrijdingspercentage van D . Zowel het percentage tussen D en $4D$ (= H) als het onderschrijdingspercentage (= F) worden voor de fijnste 20% berekend en in een figuur tegen elkaar uitgezet. Als voor elke waarde van D (mits $D < D_{20}$) geldt

dat $H/F < 1,3$ dan is het materiaal stabiel. Merk op dat deze methode geen rekening houdt met de absolute grootte van de korrels.



Ter illustratie is voor een mijnsteen het F - H diagram getekend (zie figuur 2). Tevens is het criterium van Lubochkov aangegeven. Een belangrijk verschil met Lubochkov is dat Kenney en Lau alleen kijken naar de kleinere korrels: $D < D_{20}$. Verder normeert Lubochkov alles op de grootste korrel in het filter, ondanks dat dit in de praktijk nauwelijks kwantificeerbaar is.

Bovenstaande theorieën gaan ervan uit dat alleen de geometrie van belang is en gaan voorbij aan het feit dat een potentieel instabiel filter bij de in de praktijk voorkomende verhangen nog stabiel kan zijn. Het in dit verslag beschreven onderzoek richt zich juist op de vraag hoe groot het kritieke verhang (of filtersnelheid) is bij beginnend verlies van stabiliteit. Ook andere zaken zijn dan van invloed, zoals de ligging van de korrels die voor transport in aanmerking komen ten opzichte van de andere korrels. Aangenomen wordt dat voor een niet cohesief mengsel de volgende factoren bepalen of er transport van de fijne fraktie gaat optreden:

- Grootte van de potentieel transporteerbare korrels,
- Geometrische hindering (korrelgrootte/poriegrootte verhouding),
- Ligging van potentieel transporteerbare korrels ten opzichte van stabiele korrels,
- Homogeniteit van het mengsel,
- Hydraulische belasting: - lokale waterbeweging (filter- en poriesnelheid)
- lokaal verhang.

Al deze zaken zijn voor elke plaats en elke korrel verschillend.

Theorie-vorming omtrent de hydraulische belasting waarbij interne instabiliteit optreedt, kan starten bij de aanname dat de schuifspanning op een korrel bij begin van beweging in een filter gelijk gesteld kan worden aan die in een open waterloop. Door inhomogeniteit en klustering van fijne korrels is het zeer wel denkaan dat er "kanalen" van grove korrels tussen de klusters, bestaande uit een mengsel van gemiddeld fijne korrels, ontstaan. De bodem van zo'n kanaal bestaat uit de bovenzijde van een cluster, dus uit fijne korrels. Echter, meestal zijn de korrels op de bodem van een open waterloop van ongeveer gelijke grootte. Hierdoor is de kritieke schuifspanning altijd hetzelfde, terwijl bij gegradeerd materiaal het probleem zich voordoet dat de kritieke schuifspanning langzaam toeneemt, omdat eerst wat fijn materiaal erodeert en de achterblijvende grove korrels voor een pantsering van het grensvlak kunnen zorgen. Deze grove korrels eroderen pas bij een hogere belasting, totdat die weer beschermd worden door nog grovere korrels. Met andere woorden: de ligging van de potentieel transporteerbare korrels wordt gunstiger (stabiel) naarmate er meer transport heeft plaatsgevonden.

Is de hydraulische belasting voldoende om een korrel in beweging te brengen, dan moeten de poriën voldoende groot zijn om de korrel niet vast te laten lopen. Dit aspect wordt geometrische hindering genoemd. De poriënverdeling van een homogeen mengsel is afhankelijk van de zeefkromme, met name de linker staart met de kleinste korrels. Bij een grind/zand mengsel is het denkbaar dat het mengsel niet homogeen is, bijvoorbeeld omdat er sprake is van een skelet van grote korrels met daartussen kleine korrels die de poriën in het skelet niet volledig vullen. Er is dan een splitsing noodzakelijk in een deel van het filter dat voor transport in aanmerking komt en een deel dat de poriën vormt (het skelet). Het is dan niet meer de staart van de zeefkromme die de poriënverdeling domineert, maar de kleinste korrels uit het skelet, die net niet meer voor transport in aanmerking komen. Tevens wordt de lokale hydraulische belasting bepaald door de kanalen die gevormd worden door het niet met de fijne fraktie gevulde deel van het skelet. Uitgaande van een zeker debiet door het filter, is immers het doorstroomoppervlak van de kanalen bepalend voor de grootte van de lokale filtersnelheid. Samen met de korrelgrootte en de porositeit in de kanalen is dan met een doorlatendheidsrelatie het verhang te berekenen. Dit is verder uitgewerkt in paragraaf 3.6.

Met het bovenstaande in gedachten is een voorspelling mogelijk van het proces dat zich afspeelt bij verlies van interne stabiliteit. Bij een stap voor stap

toenemend verval ontstaat bij een bepaald verval een zodanige watersnelheid dat de kleine korrels, die ongunstig (lage stabiliteit) liggen, getransporteerd worden. Omdat er nog geen eerder transport is geweest, zijn er nog veel van deze korrels. Ze willen allen in beweging komen, maar door de beperkte transportcapaciteit van het water spoelt niet elke korrel instantaan uit. Na verloop van tijd zijn er reeds veel van die korrels verdwenen en neemt het transport dus geleidelijk af.

Wordt het verval verhoogd, dan kunnen zowel kleine korrels getransporteerd worden, die bij de vorige stap nog een voldoende stabiele ligging hadden, als ook grotere korrels die minder stabiel liggen. Er bevinden zich daardoor steeds zowel grote als kleine korrels in het getransporteerde materiaal. Bij iedere verhoging van het verval komen er enerzijds successievelijk grotere en anderzijds steeds stabielere liggende kleine korrels in beweging. Dit betekent dat de korrelgrootte van het getransporteerde materiaal bij een toenemend verhang niet a priori hoeft toe te nemen.

Bij een verlaging van het verval, aannemende dat het hogere verval geruime tijd aanwezig was, mag verwacht worden dat het transport sterk terugloopt en veel lager is dan bij het overeenkomstige verval bij een toenemende belasting. Er is een hysteresis effect te verwachten. De reden hiervoor is dat de korrels, die bij dit verhang voldoende gunstig liggen voor transport, reeds verwijderd zijn. Deze verhangen waren minstens even groot als het nu ingestelde verhang.

3.2 Opzet en uitvoering van het modelonderzoek

Het modelonderzoek is uitgevoerd in de Filterbak van het Waterloopkundig Laboratorium 'de Voorst'. Een verticale langsdoorsnede van het model is gegeven in figuur 3. De figuur laat een bovenstroomse druktoeren met regelbare overlaat zien, een modelsektie met ongeveer 0,5 m³ filtermateriaal op een verhoogde bodem, en een benedenstrooms deel waar het getransporteerde materiaal kan bezinken. In figuur 4 zijn de plaatsen aangegeven waar stijghoogten bij de achterwand en boven de bodem zijn gemeten. In tabel 1 zijn de coördinaten van de stijgbuisjes gegeven, ten opzichte van een punt aan de bovenstroomse onderrand van het filter tegen de achterwand.

De eerste vier proeven zijn uitgevoerd met een grind/zand mengsel dat is opgebouwd door 6 grind- en zandfrakties te mengen volgens de onderstaand beschreven procedure. De zeefkrommen van de 6 frakties zijn in figuur 5 gegeven.

Bij proef 1 en 2 zijn, vóór het in het model aanbrengen van het materiaal, een fijn mengsel met fraktie 1, 2 en 3 en een grof mengsel met fraktie 4, 5 en 6 gemaakt. Vervolgens is steeds eerst een laag van het grove mengsel (orde 5 cm dik) in de modelsektie aangebracht, en daarna is in de juiste verhouding het fijne mengsel tussen de grove korrels gestrooid.

Bij proef 3 en 4 is naast de Filterbak een vlak van ongeveer 10 m² bedekt met achtereenvolgens fraktie 6, 5, 4, 3, 2 en 1. Daarna is het materiaal emmer voor emmer in de modelsektie gebracht. Deze methode leverde een andere vorm van inhomogeniteit dan bij T1 en T2. Waarschijnlijk was de mate van homogeniteit van het mengsel in de modelsektie wat groter. Het verschil is te zien op de foto's die gemaakt zijn door de ruit aan de voorzijde van modelsektie (zie figuur 6). In de bovenste foto (T2) is de gelaagde opbouw duidelijk zichtbaar, terwijl bij proef T3 (onderste foto) de concentraties van fijne fraktie meer willekeurig verdeeld zijn. Een volkomen homogeen mengsel bleek niet haalbaar te zijn.

De mijnsteen voor proef 5 en 6 is in vochtige toestand, overeenkomstig de levering, emmer voor emmer aangebracht. Die voor proef 6 leek bij verwerking minder stof te bevatten en iets kruimeliger te zijn dan de mijnsteen van proef 5.

De porositeit van het filter is bepaald door de massa te meten van de ingebrachte korrels. Met het totale volume van het filter en de soortelijke massa van de korrels is hiermee de porositeit te berekenen.

De mijnsteen is vochtig gewogen en derhalve is ook de soortelijke massa van vochtige korrels gebruikt om de porositeit te berekenen. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

proef	porositeit
T1	0,20
T2	0,23
T3	0,19
T4	0,28
T5	0,19
T6	0,21

Vóór de proeven zijn enkele monsters uit de mijnsteen onderzocht in het zeeflab van het Waterloopkundig Laboratorium. Het doel hiervan was om vast te stellen of er lucht opgesloten raakt als vochtige mijnsteen langzaam onder water wordt gezet. Tevens is de soortelijke massa van de vochtige mijnsteen bepaald. De resultaten zijn samengevat in de bijlage. Gekonkludeerd kan worden dat er weinig lucht wordt ingesloten.

De zeefkromme van het uiteindelijke mengsel in de modelsektie is bij proef 1 en 2 bepaald door zeping van een monster van de grove fraktie en een monster van de fijne fraktie. De zeefkromme is daarna samengesteld op basis van de gewichtsverhouding van beide frakties in het model. Bij proef 1 is dit twee maal gedaan om de methode op z'n reproduceerbaarheid te kunnen controleren. Uit figuur 7 blijkt dat dit vooral voor de fijne fraktie zeer goed is. Bij proef 3 en 4 zijn steeds monsters gestoken en is het resultaat hiervan vergeleken met een zeefkromme, die op basis van de mengverhouding te berekenen is.

Ook voor proef 5 en 6 zijn de zeefkrommen bepaald aan de hand van gestoken monsters. Deze zijn langzaam bij kamertemperatuur gedroogd en op de standaard wijze gezeefd. Hierbij is het mogelijk dat het resultaat een onderschatting geeft van de fractie die kleiner dan ongeveer 0,1 mm is. Dit is een gevolg van het feit dat de zeer kleine korrels aan de grote blijven kleven.

De zeefkrommen zijn gegeven in figuur 7 tot en met 12.

Bij de opzet van de proeven is er naar gestreefd om de invloed op de interne stabiliteit van de volgende factoren te onderzoeken:

- Wijze van aanbrengen van mengsel (homogeniteit): T1 in vergelijking tot T3,
- Hoeveelheid zeer fijne korrels: T2 in vergelijking tot T1,
- Hoeveelheid zeer grove korrels: T4 in vergelijking tot T3.

Bij alle proeven is getracht de grootte van de D_{f15} gelijk te houden ($D_{f15} = 4\text{mm}$). De gerealiseerde D_{f15} varieerde echter tussen 3 en 4 mm.

De zeefkromme van de mijnsteen ligt tussen die van T2 en T4 in.

Bij proef 1 was aan de boven en benedenstroomse zijde een gaas aanwezig met een maaswijdte van 0,85 mm. Vanaf proef 2 is het benedenstroomse gaas vervangen door een gaas met maaswijdte van 3 mm, omdat bij T1 bleek dat bij een groot verhang ook korrels met een diameter groter dan 0,8 mm worden getransporteerd.

Op de modelsectie is ballast aangebracht met een totaalgewicht van ongeveer 400 kg. Aan de bovenstroomse zijde was het meeste geplaatst. Bij een verhang van 0,4 à 0,5 is de ballast verhoogd. Tijdens proef 2 is de ballast te veel gekoncentreerd op het bovenstroomse deel, waardoor bij een filtersnelheid van 12.4 mm/s gedurende enkele minuten een spleet van een paar centimeter tussen dak en filter aanwezig was. Dit resulteerde in een vergroting van het transport.

De watertemperatuur tijdens de proeven was 8 à 10°C.

De proeven zijn uitgevoerd door stap voor stap het verhang te verhogen en bij elke stap na een half uur het benedenstrooms bezonken materiaal op te zuigen. Tijdens elke proef is zonder onderbreking gestroomd. Het opgezogen materiaal is gedroogd en gewogen. Bij sommige stappen is tevens een zeefanalyse van het getransporteerde materiaal gemaakt.

Het opzuigen gebeurt bij gelijkblijvend verhang. De duur hiervan bedraagt ruwweg 5 minuten. Het opzuigen geschiedt in smalle stroken loodrecht op de stromingsrichting, bij het einde van de modelsectie beginnend. Bij visuele waarneming blijkt dat gedurende het opzuigen er geen of nauwelijks nieuw getransporteerd materiaal zich heeft verzameld.

Tijdens elke stap is de lokale stijghoogte en het totale debiet door het model gemeten.

Vanaf proef 4 is er ter toetsing van de kanalentheorie (zie paragraaf 3.6) ook getracht om de poriesnelheid te meten met behulp van een fluorescerende merkstof. Aangenomen kan worden dat de merkstof zich met een snelheid verplaatst die gelijk is aan de poriesnelheid. Omdat de merkstof vlak voor de meetsectie in de bovenstroomse druktoeren werd gespoten en het vervolgens enkele seconden duurde voordat het in het filter stroomde, is de nauwkeurigheid van de methode erg laag.

De resultaten van de proeven zijn beschreven in het volgende hoofdstuk.

3.3 Resultaten van het modelonderzoek

De resultaten van de modelproeven zijn weergegeven in figuur 13 tot en met 45. Alle registraties met de stijgbuisjes zijn opgenomen in tabel 2 t/m 7. In figuur 13 zijn de gemeten stijghoogten in het filter tijdens de vierde stap van T1 weergegeven. Bij deze stap is een filtersnelheid van 5,0 mm/s en een

zandtransport van $1,84 \text{ gr/s/m}^2$ gemeten. De vaststelling van het optredende verhang in het filter levert echter problemen op, omdat aan de bovenstroomse zijde ($0 < x < 30 \text{ cm}$) het verhang ongeveer half zo groot is als in de rest van het filter. Tevens is waarneembaar dat de stijghoogte in het middenvlak ($y = 50 \text{ cm}$) in de benedenstroomse helft wat lager is dan in het wandvlak (bij een overeenkomstige raai). Dit kan slechts verklaard worden door aan te nemen dat er materiaaltransport heeft plaatsgevonden, waardoor de bovenstroomse helft een grotere doorlatendheid heeft verkregen. Het getransporteerde materiaal is echter niet geheel uit de meetsektie gespoeld, maar is (wellicht vanwege geometrische hindering) in de benedenstroomse helft voor een deel vastgelopen. Dit resulteert in een verlaging van de doorlatendheid.

Bij verhoging van het verhang (zie figuur 14) blijkt het gekonstateerde nog duidelijker uit de metingen.

In figuur 15 is de relatie tussen het verhang in de benedenstroomse helft en de filtersnelheid weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat er een hysteresis aanwezig is. Als het meeste transport heeft plaatsgevonden (tijdens stap 1 tot en met 5), dan treedt er bij een ingesteld verhang een grotere filtersnelheid op (vergelijk bijvoorbeeld stap 4 en 6). Hieruit kan gekonkludeerd worden dat de doorlatendheid (zelfs van het benedenstroomse deel van het filter) duidelijk is toegenomen. Deze toename bedraagt ongeveer een faktor 1,5.

De transportintensiteit is in figuur 16 tegen de filtersnelheid uitgezet en in figuur 17 tegen het verhang in het benedenstroomse deel van het model. Tijdens stap 6 is gekonstateerd dat het benedenstroomse rooster dichtgeslibd raakte. Het gemeten transport is daardoor waarschijnlijk te laag.

Al vanaf stap 2 was door het inspektieraam het transport zichtbaar. Er trad bij deze stap ook zwevend transport op. De bewegingsrichting van de korrels was voornamelijk horizontaal en gekoncentreerd in ongeveer 9 lagen.

Bij het verhogen van het verhang tussen stap 3 en 4 bleken zelfs korrels van orde 1 mm doorsnede te bewegen. Korte tijd later was dit niet meer zichtbaar. Steeds neemt, gedurende de tijd dat er met een konstant verhang is gestroomd, het transport sterk af.

Bij de laatste stap is gekonstateerd dat grote korrels (orde $1 \text{ à } 2 \text{ mm}$) over een beperkte afstand voortbewegen en vervolgens in het pakket vastlopen. Het is dan zichtbaar dat er een 'pantsering' van de oppervlakken met grove korrels bestaat. Steeds storten plaatselijke opeenhopingen van korrels in, waarna plaatselijk en gedurende korte tijd het transport verhevigt.

Het getransporteerde materiaal dat zich verzamelde in de benedenstroomse bezinkbak is bij stap 3 en 5 van T1 nader geanalyseerd op korrelgrootte. De zeefkromme is weergegeven in figuur 18. Opvallend is dat de zeefkrommen nagenoeg identiek zijn. Opgemerkt moet worden dat korrels die kleiner zijn dan 0,1 mm niet allemaal bezinken. De linker staart van de zeefkromme is daardoor minder betrouwbaar. De D_{f50} van het uitgespoelde zand bedraagt 0,18 mm.

De resultaten van T2 zijn weergegeven in figuur 19 tot en met 25. De gemeten verhangen laten precies dezelfde tendens als bij T1 zien. Het verhang in de bovenstroomse helft is lager dan elders en de stijghoogte in het middenvlak in de benedenstroomse helft gaat langzamerhand afwijken van de overeenkomstige stijghoogten in het wandvlak.

Het verloop van de doorlatendheid in de bovenstroomse helft is te zien in figuur 21. Bij een bepaald verhang valt op dat de filtersnelheid vóór korreltransport lager is dan erna (vergelijk stap 2 en 10). Dit betekent dat de doorlatendheid is toegenomen, te weten met een faktor 1,2.

Vooraf aan de benedenstroomse kant van de modelsektie zijn de lokale verhangen soms sterk afwijkend van het gemiddelde verhang. Dit komt tot uiting in figuur 22. Bij een bepaalde filtersnelheid zijn er in de figuur steeds twee punten getekend, de ene overeenkomend met het gemiddelde van de kleinste verhangen en de andere overeenkomend met de grootste. Bij stap 9 bijvoorbeeld ($v_f = 9,2$ mm/s) is het gemiddelde van de grootste verhangen een faktor 2,3 groter dan het gemiddelde van de kleinste. Deze verschillen ontstaan vooral nadat het transport op gang is gekomen (stap 4 à 5) en blijft konstant vanaf het moment dat er nauwelijks meer materiaal uit het model spoelt (stap 9 en 10). Uit figuur 21 en 22 kan gekonkludeerd worden dat materiaal over een beperkte afstand verplaatst is en dus een verhoging van de doorlatendheid verzorgt, maar benedenstrooms vastloopt als gevolg van de geometrische hindering. Dit laatste resulteert in een groeiende inhomogeniteit van het filter dat leidt tot verlaging van de doorlatendheid.

In figuur 23 is het gemeten zandtransport als functie van de filtersnelheid getekend en in figuur 24 als functie van het gemiddelde benedenstroomse verhang. Bij stap 8 is er korte tijd onvoldoende ballast op het benedenstroomse deel van de modelsektie aanwezig geweest, waardoor het dak enkele centimeters boven het filter ging zweven. Na enkele minuten was dit verholpen, maar desondanks is er een duidelijk verhoogd transport waargenomen. Tijdens de eerste helft van deze stap was reeds 89% van het totaal opgevangen zand getransporteerd.

De zeefkromme van het getransporteerde zand van stap 5, 6 en de tweede helft van stap 8 zijn weergegeven in figuur 25. Ten opzichte van T1 valt op dat de korrelgrootte nu wel iets is toegenomen bij toenemend transport en dat de D_{f50} veel groter is ($D_{f50} = 0,38 \text{ à } 0,52 \text{ mm}$).

De resultaten van T3 zijn te zien in figuur 26 tot en met 30. Uit figuur 27 valt af te leiden dat de doorlatendheid gedurende de proef is toegenomen met een faktor 1,2. In vergelijking tot T1, die is uitgevoerd met materiaal met dezelfde zeefkromme, valt in figuur 28 op dat het zandtransport bij een bepaalde filtersnelheid nu duidelijk lager is. Dit verschil kan slechts toegeschreven worden aan het verschil in opbouw (homogeniteit) van het pakket. In figuur 30 is af te lezen dat de D_{f50} van het getransporteerde materiaal ongeveer 0,20 mm is. Dit is bijna gelijk aan dat in T1.

Tijdens T4 is wel een groot zandtransport waargenomen (figuur 33), maar de doorlatendheid van het filter is er nauwelijks door veranderd (zie figuur 32). Ten opzichte van T3 is deze proef uitgevoerd met grotere korrels, zonder dat de zeefkromme onder de D_{15} is gewijzigd. Het resultaat is een bijna identiek verband tussen filtersnelheid en zandtransport. Opvallend is dat het grote verschil in porositeit niet tot uiting komt in een verschil in doorlatendheid. De karakteristieke korrelgrootte van het uitgespoelde materiaal blijkt bij een hogere filtersnelheid iets toe te nemen: $D_{f50} = 0,18 \text{ mm}$ in stap 3 en $D_{f50} = 0,20 \text{ mm}$ in stap 6. De grootte van deze korrels zijn ongeveer gelijk aan die van T1 en T3.

De proeven T5 en T6 zijn uitgevoerd met mijnsteen. In figuur 36 tot en met 45 zijn de resultaten weergegeven. De zeefkromme van de mijnsteen vertoont de grootste overeenkomst met die van T2. Net als bij T2 is het materiaaltransport bij T5 en T6 erg laag. Waarschijnlijk is dit een gevolg van de geometrische hindering die bewegende korrels ondervinden op hun weg door het pakket. Wellicht is deze hindering bij mijnsteen nog groter dan bij T2, omdat de korrelgrootte van het uitgespoelde materiaal kleiner is. In figuur 40 en 45 is te zien dat de D_{f50} hiervan respectievelijk 0,31 mm en 0,30 mm is, terwijl uit figuur 25 blijkt dat tijdens T2 grotere korrels konden uitspoelen. Het wat lagere transport zou ook een gevolg kunnen zijn van de cohesieve eigenschappen van de mijnsteen.

Een indicatie voor de grootte van de poriesnelheid door het pakket is verkregen door aan de instroomzijde van het model een gekleurde merkstof in het water te doen. De tijd die de stof nodig had om het pakket in te komen en vervolgens getransporteerd te worden naar de benedenstroomse zijde is gemeten. Onderstaande tabel geeft de resultaten:

proef nr.	stap	op basis van debietmeting		op basis van merkstof	
		filtersnelheid mm/s	porie- snelheid mm/s	gemeten tijd s	berekende porie- snelheid mm/s
2	4	4,8	21	16 à 20	50 à 80
2	7	12,0	52	17	60 à 80
4	4	7,0	25	21	50 à 60
4	6	10,7	38	15	70 à 90
5	8	4,8	25	25	40 à 50
6	3	3,3	16	23	40 à 50

Er is bij bovenstaande berekende poriesnelheden rekening gehouden met de mogelijkheid dat de merkstof enkele seconden nodig heeft om het pakket in te stromen.

3.4 Analyse van resultaten

De modelproeven hebben een groot aantal processen aan het licht gebracht die de bouwstenen kunnen vormen van een gedetailleerd rekenmodel. In deze paragraaf blijft de analyse van de resultaten echter beperkt tot de relatie tussen de karakteristieke waarden van het materiaal en de hydraulische belasting waarbij interne instabiliteit aanvangt. Voor de fysische processen wordt verwezen naar paragraaf 3.5 en hoofdstuk 4.

In figuur 46 is voor elk filtermateriaal dat is toegepast de zeefkromme omgewerkt naar een lijn in het F-H diagram van Kenney en Lau. Karakteristiek voor zo'n lijn is kleinste waarde van H/F (ook in figuur 39 aangegeven). Volgens Kenney en Lau en de grafische theorie van Lubochkov geldt:

- $(H/F)_{\min} < 0,6$ dan intern instabiel,
 $0,6 < (H/F)_{\min} < 1,3$ dan tot een verhang i_{cr} intern stabiel,
 $(H/F)_{\min} > 1,3$ dan intern stabiel, zelfs bij zeer grote verhangen.

De resultaten van de proeven laten zien dat er geen i_{cr} bestaat waarbij plotseling het filter totaal leegspoelt, maar dat er een geleidelijke overgang is van weinig naar veel interne migratie van fijne korrels. Daarom is het noodzakelijk een criterium voor interne (in)stabiliteit te definiëren. Hier wordt arbitrair gekozen voor een materiaaltransport van 1 gr/s/m^2 . Met deze definitie kunnen de resultaten van de proeven als volgt samengevat worden. Tevens zijn de kleinste waarden van H/F weergegeven.

proef nr.	i_{cr}	v_{fcr} mm/s	$(H/F)_{min}$
1	0,17	4,0	0,5
2	0,7	12	1,3
3	0,16	5,0	0,37
4	0,16	5,5	0,33
5	0,6	6	1,3
6	1	7	1,7

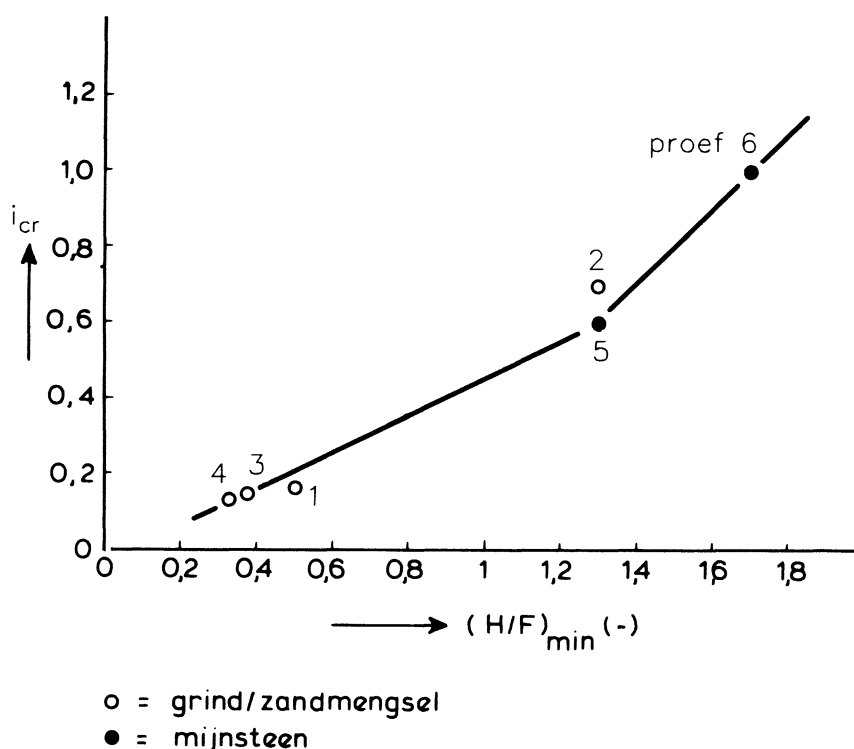
Zoals reeds uitvoerig is beschreven in de vorige paragraaf, is er geen sprake van een (bij benadering) plaatsonafhankelijk verhang. Omdat het bovenstroomse verhang wellicht beïnvloed is door randeffekten, is voor de bepaling van het kritieke verhang steeds het gemiddelde verhang in de benedenstroomse heeft van het model genomen. Lokaal kan het verhang hier sterk van afwijken, met name in T2 (zie figuur 22).

Een ander probleem wordt veroorzaakt door het feit dat bij T2, T5 en T6 het gekozen kritieke transport (1 gr/s/m^2) niet is gehaald. Voor deze proeven is daarom een zo goed mogelijk extrapolatie van het verband tussen het transport en het verhang uitgevoerd. Hierbij is vooral gelet op de stappen die nog een significante transporttoename te zien gaven, en niet op de laatste stappen uit een proef. Dit is zo gedaan om te voorkomen dat de bijzondere invloeden aan het eind van de proef leiden tot een wellicht te grote (onveilige) waarde van het kritieke verhang. Deze bijzondere invloeden kunnen bijvoorbeeld bestaan uit het "leeg" gespoeld zijn van het model, zodat ook bij een kleine toename er geen materiaaltransport optreedt. Extrapolatie van deze tendens naar een grote verhangtoename leidt tot onjuiste konklusies, omdat dan weer andere korrels in aanmerking zullen komen om getransporteerd te worden (zie hoofdstuk 4). Dit probleem treedt op als de proef uit te veel stappen bestaat.

Uit bovenstaande tabel blijkt dat er een consistent verband bestaat tussen het kritieke verhang en de minimale waarde van H/F , ondanks dat de gebruikte filtermaterialen zowel qua samenstelling als qua eigenschappen zeer verschillend waren. Derhalve kan het volgende gekonkludeerd worden:

$(H/F)_{\min} = 0,3 \text{ à } 0,5$ dan intern stabiel tot $i_{cr} = 0,16$,
 $(H/F)_{\min} = 1,3$ dan intern stabiel tot $i_{cr} = 0,6$,
 $(H/F)_{\min} = 1,7$ dan intern stabiel tot $i = 1$.

Dit is samen met de metingen grafisch in onderstaande figuur weergegeven:



De resultaten van het onderzoek geven geen aanleiding tot twijfel aan de interpoleerbaarheid van bovenstaande relaties. De nauwkeurigheid van i_{cr} van T2, T5 en T6 (rechts in de grafiek) is echter niet zo groot.

Vergelijken we de proeven T1 en T3 dan valt op dat het kritieke verhang van beide proeven nagenoeg gelijk is, ondanks dat $(H/F)_{\min}$ van proef T1 groter is. Gezien dit laatste zou men verwachten dat i_{cr} wat hoger zou zijn. Gekonkludeerd kan worden dat het feit dat T1 een meer gelaagde opbouw had, resulteert in een wat lager kritiek verhang dan verwacht wordt op basis van $(H/F)_{\min}$.

De resultaten van de proeven laten zien dat er geen duidelijk verband tussen v_{fcr} en $(H/F)_{min}$ bestaat. De reden hiervoor is nog onduidelijk.

3.5 Kanalentheorie

Tijdens het verloop van de proeven is duidelijk geworden dat de inhomogeniteit van het filter een belangrijke rol speelt bij het al dan niet op gang komen van materiaaltransport. Onderstaand wordt aangegeven hoe de proefresultaten verklaard zouden kunnen worden door uit te gaan van de extreme situatie van een totaal ontmengd filter. Het idee dat ontmenging een belangrijke (of zelfs overheersende) rol bij interne stabiliteit speelt, is reeds aangegeven door Ripley [6].

Het (fiktieve) filter wordt hier verondersteld te bestaan uit een korrelskelet van grote korrels, waarvan plaatselijk de poriën geheel gevuld zijn met kleine korrels. Er is derhalve sprake van een grof filter met klusters fijne korrels. De vraag dient beantwoord te worden of een dergelijk inhomogeen filter de werkelijkheid beter benadert dan een homogeen geschematiseerd filter.

Tussen de klusters fijn materiaal zijn kanalen aanwezig die uitsluitend bestaan uit de grove korrels. Gezien het feit dat deze korrels orde tien maal groter zijn dan de korrels in de klusters kan aangenomen worden dat al het water door de kanalen wordt getransporteerd.

Het doorstroomoppervlak van de kanalen worden begrensd door klusters. Ook de 'bodem' van een kanaal bestaat dus uit fijne korrels. Lokaal is de situatie vergelijkbaar met het grensvlak tussen een granulair filter op een basis van zand. Met behulp van de kennis over dergelijke grensvlakken (zie [4]) kan het begin van beweging worden gekwantificeerd en daarmee de belasting bij beginnende interne instabiliteit.

Deze kanalentheorie wordt onderstaand in detail beschreven aan de hand van de resultaten van proef T4, die voor dit doel geselecteerd is vanwege het feit dat hierbij de meting van de werkelijke poriesnelheid redelijk goed gelukt is.

De zeefkromme van het filter van T4 (figuur 10) laat zien dat er drie frakties zijn te onderscheiden, te weten:

- grove fraktie, bestaande uit 80% van filter. Korrelgrootte: $5 < D < 35$ mm
- fijne fraktie, bestaande uit 10% van filter. Korrelgrootte: $0.1 < D < 0.5$ mm
- overgangsgebied (10% van filter). Korrelgrootte: $0.5 < D < 5$ mm

Gezien de verhouding van de korrelgroottes kan verwacht worden dat de fijne fraktie zonder geometrische hindering kan uitspoelen tussen de poriën van de grove fraktie door. Uit de zeefkromme van het uitgespoelde materiaal (figuur 35), blijkt dat de korrels uit het overgangsgebied niet (kunnen) uitspoelen.

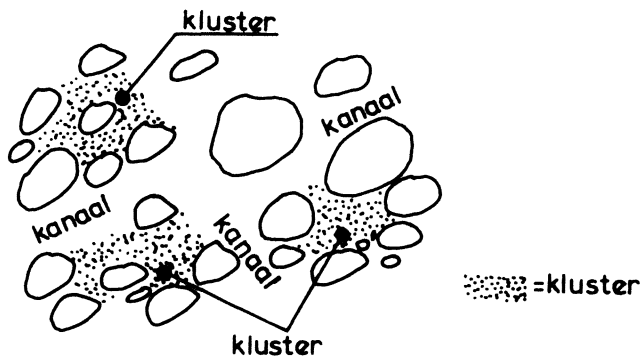
De onderverdeling leidt tot een schematisatie van het filter in een grove fraktie (kanaalvulling), die verondersteld wordt te bestaan uit 80% van het filter, en klusters fijn materiaal (20% van gewicht). Aangenomen wordt dat slechts de fijnste 10% voor uitspoeling in aanmerking komt.

We definiëren nu de variabele K als het deel van het filter dat in klusters zit. Volgens bovenstaande veronderstelling geldt:

$$\begin{aligned} K &= 0,2 \\ M_s &= M_{tot} \cdot (1-K) \\ M_k &= M_{tot} \cdot K \end{aligned} \tag{3.1}$$

met:

- K = deel van filter in klusters (-)
- M_s = massa van skelet (kg)
- M_{tot} = totale massa filterkorrels (kg)
- M_k = massa van klusters (kg)



Definitie-schets van kluster (alléén gespikkelde volume)

Het grove skelet neemt wel het volle filtervolume V in beslag. Samen met de soortelijke massa van de korrels ($\rho_f = 2590 \text{ kg/m}^3$) kan de porositeit van het skelet, n_s , worden berekend:

$$n_s = 1 - \frac{M_s / \rho_f}{V} \tag{3.2}$$

met:

n_s = porositeit van het skelet [-]

ρ_f = soortelijke massa van filterkorrels [kg/m³]

V = Volume van filter (korrels & poriën) [m³].

De rest van het filter zit in de clusters. Omdat bekend is dat de massa van de clusters gelijk is aan $K \cdot M_{tot}$, kan het volume van de clusters V_k (korrels & poriën) berekend worden als de lokale porositeit erin bekend is:

$$V_k = \frac{K \cdot M_{tot}}{\rho_f (1 - n_k)} \quad (3.3)$$

Met:

n_k = porositeit in clusters (-)

Met bovenstaande formules kan ook een relatie afgeleid worden tussen de porositeit van het hele filter, n , de porositeit in de clusters, n_k , en de porositeit van het skelet (zonder clusters), n_s :

totale porievolume = (porievolume in clusters) + (rest in skelet)

$$n \cdot V = n_k \cdot V_k + (V \cdot n_s - V_k) \quad (3.4)$$

Met $M_k = K \cdot M_{tot}$ kan afgeleid worden dat:

$$V_k = K \cdot V \frac{1-n}{1-n_k} \quad (3.5)$$

Substitutie in formule (3.5) geeft:

$$n = K \cdot n_k \frac{1-n}{1-n_k} + n_s - K \frac{1-n}{1-n_k} \quad ==>$$

$$n_s = K + n (1-K) \quad (3.6)$$

De clusters vullen deels de ruimte op tussen de grove korrels. Daardoor nemen de clusters in het totale filter een veel grotere ruimte in dan V_k , namelijk V_k/n_s . Het kanaalvolume (poriën en korrels) is derhalve:

$$V_{kan} = V - V_k/n_s \quad (3.7)$$

Omdat er ook doodlopende kanalen zijn, doet niet het gehele kanaalvolume mee aan het transport van water. Het kanaalvolume dat effectief meewerkt aan het watertransport, V_{eff} , is daarom het produkt van het kanaalvolume en een (onbekende) koëfficiënt:

$$V_{\text{eff}} = V_{\text{kan}} * \alpha_t \quad (3.8)$$

Een perfekte horizontale gelaagdheid resulteert in $\alpha_t = 1$. Zijn er evenveel kanalen in elke koördinaatrichting, dan is $\alpha_t = 0.33$. Naar verwachting ligt de werkelijkheid hier tussenin.

Met het effectieve kanaalvolume en de aanname dat er uitsluitend door deze kanalen water wordt getransporteerd, kan de filtersnelheid in rechte kanalen worden berekend:

$$\begin{aligned} v_{\text{fkr}} &= v_f \cdot V / V_{\text{eff}} \\ &= v_f \cdot V / (V_{\text{kan}} * \alpha_t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

met:

v_{fkr} = filtersnelheid in een recht kanaal [m/s]

v_f = filtersnelheid door hele filter [m/s]

Het is echter waarschijnlijk dat de kanalen niet recht, maar grillig lopen. De schijnbaar afgelegde weg (in de richting van het verhang) is door het niet recht lopen van de kanalen een factor α_w korter dan de werkelijk afgelegde kanaallengte. In een grillig verlopend kanaal is de filter en poriesnelheid daarom een factor α_w groter ($\alpha_w \geq 1$):

$$v_{\text{fk}} = v_{\text{fkr}} \alpha_w = v_f \cdot \alpha_w \cdot V / (V_{\text{kan}} * \alpha_t) \quad (3.10)$$

$$v_{\text{pk}} = v_{\text{fk}} / n_k \quad (3.11)$$

met:

v_{fk} = filtersnelheid in een willekeurig verlopend kanaal [m/s]

v_{pk} = poriesfalheid in een willekeurig verlopend kanaal [m/s]

De grootte van α_w is afhankelijk van het verloop van de kanalen:

- recht: $\alpha_w = 1$
- lichaamsdiagonaal: $\alpha_w = 1.50$
- sinus (golflengte = golfhoogte): $\alpha_w = 2.3$
- driehoekig (45°): $\alpha_w = 1.41$

Ook voor het verhang over het hele filterpakket in verhouding tot het verhang in een kanaal moet rekening gehouden worden met de grotere weglengte vanwege de grilligheid van de kanalen. Immers: het stijghoogteverschil over het gehele filter is een gegeven, maar door de grilligheid van de kanalen moet er door de grotere kanaallengte worden gedeeld ten einde het verhang te krijgen:

$$i_{\text{totaal}} = i_{\text{kanaal}} \alpha_w \quad (3.12)$$

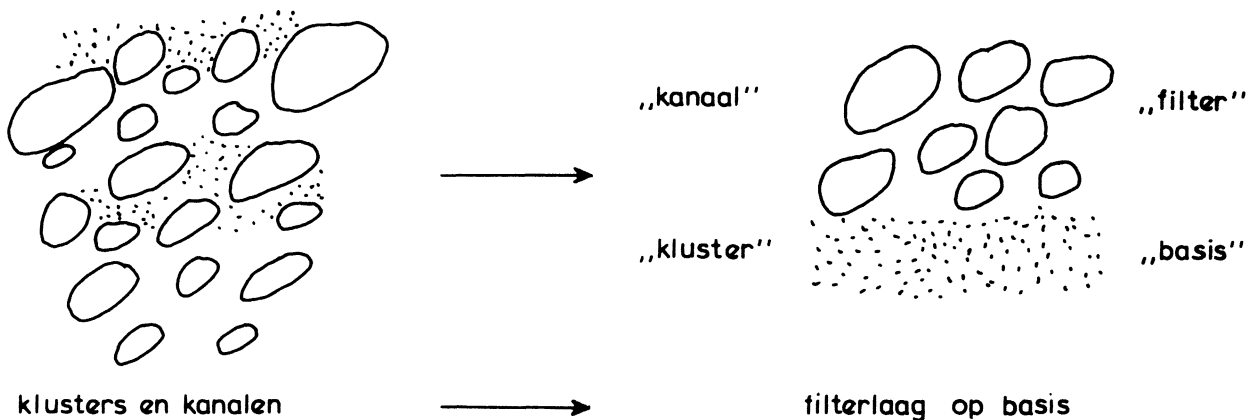
Voor de tijdsduur die een merkstof nodig heeft om zich te verplaatsen van de ene naar de andere zijde van het filterpakket geldt het volgende:

$$t_{\text{merk}} = \frac{\text{kanaallengte}}{\text{poriesnelheid}} = \frac{\alpha_w L_f}{v_{fk}/n_s} \quad (3.13)$$

met:

t_{merk} = tijdsduur die een merkstof nodig heeft om een afstand af te leggen [s]
 L_f = lengte filterpakket [m]

De grootte van het kritieke verhang en de kritieke filtersnelheid bij begin van materiaaltransport kan met formule (3.6), (3.7) en (3.10) en de formules voor een grensvlak tussen filter en zand [4] berekend worden. Hiertoe beschouwt men het materiaal in een kanaal als de filterlaag (volgens de definitie uit [4]) en het materiaal in het kluster als basis:



Dit betekent dat de formules uit [4], toegepast op klusters en kanalen, de kritieke filtersnelheid (en verhang) in de willekeurig verlopende kanalen oplevert. Met formule (3.6), (3.7) t/m (3.10) kan dit vertaald worden naar een kritieke filtersnelheid en verhang voor het gehele filterpakket met betrekking tot interne stabiliteit.

$$[v_{fcr}]_{\text{volgens [4]}} = [v_{fkcr}]_{i.s.} \quad (3.14)$$

$$= [v_{fcr}]_{i.s.} \cdot \frac{V \cdot \alpha_w}{V_{kan} \cdot \alpha_t}$$

$$= [v_{fcr}]_{i.s.} \cdot \frac{V \cdot \alpha_w}{\alpha_t \cdot (V - V_k / (K + n(1-K)))} \quad (3.15)$$

met:

$[v_{fcr}]_{\text{volgens [4]}}$ = kritieke filtersnelheid bij grensvlak tussen zand en grind volgens [4] (m/s)

Met formule (3.5) wordt dit:

$$[v_{fcr}]_{i.s.} = [v_{fcr}]_{[4]} \cdot \frac{\alpha_t}{\alpha_w} \left(1 - \frac{K(1-n)}{(K+n(1-K))(1-n_k)} \right) \quad (3.16)$$

Gezien het feit dat het water bij benadering volledig getransporteerd wordt door de kanalen, is de doorlatendheid vooral afhankelijk van de opbouw van de kanalen. Dit wordt gekarakteriseerd door n_s en D_{15} van het kanaal. Hiervoor geldt:

$$n_s = K + n(1-K) \quad (\text{formule 3.6})$$

$$D_{15s} = D_x \text{ totaal} \quad \text{met } x = (1-K) \cdot 0.15 + K \quad (3.17)$$

Met:

D_{15s} = D_{f15} van het skelet (= D_{15} van kanaal) (m)

$D_x \text{ totaal}$ = korrelgrootte die door x gewichtsprocenten van het totale filter wordt onderschreden (m)

Met het bovenstaande kan het kritieke verhang in een kanaal berekend worden. Men gebruikt daartoe $[v_{fcr}]_{[4]}$ en een doorlatendheidsrelatie (bv. [8]) met D_{15s} en n_s . Vervolgens kan met formule (3.12) het kritieke verhang in het kanaal omgerekend worden naar een verhang over het gehele filterpakket.

De beschreven berekeningsmethode is toegepast op T4. De resultaten hiervan zijn in onderstaande tabel gepresenteerd:

aanname: $K = 0,2$
 $n_k = 0,35$
 $\alpha_w = 1,5$
 $\alpha_t = 0,8$

gemeten: $n = 0,28$
 $D_{f5} = 0,22 \text{ mm}$
 $D_{f15} = 3 \text{ mm}$
 $D_{f32} = 9 \text{ mm}$

kanaal: $n_s = 0,424$ (formule 3.6)
 $x = 0,32 \Rightarrow D_{15} \text{ kanaal} = D_{f32} = 9 \text{ mm}$ (formule 3.17)

kritieke filtersnelheid en verhang in kanaal [4]:

$v_{fker} = 21 \text{ mm/s}$
 $i_{\text{kanaal cr}} = 0,081$

kritieke filtersnelheid en verhang voor gehele filter:

$v_{fcr} = 5,3 \text{ mm/s}$ (formule 3.16)
 $i_{cr} = 0,12$ (formule 3.12)

Deze resultaten zijn te vergelijken met de gemeten resultaten: $v_{fcr} = 5,5 \text{ mm/s}$ en $i_{cr} = 0,16$. Deze grote overeenstemming tussen berekende en gemeten waarden is mede het gevolg van een geschikte keuze van α_t , α_w en n_k . De waarden die hiervoor zijn gekozen liggen echter in de range van de te verwachten waarden. Hierdoor kan gekonkludeerd worden dat de kanalentheorie hoopvolle resultaten geeft.

Met formule (3.13) kan de duur die de merkstof nodig heeft om het einde van de modelopstelling te bereiken, berekend worden:

$$t_{\text{merk}} = \frac{\alpha_w L_f}{v_{fk}/n_s} = \frac{1,5 \cdot 1,05}{21 \cdot 10^{-3} / 0,42} = 31 \text{ s.}$$

De gemeten tijd was echter duidelijk korter: 21 s.

Gezien de veelbelovende resultaten tot nu toe kan gekonkludeerd worden dat het aanbeveling verdient om de kanalentheorie verder uit te werken en bij modelonderzoek in de toekomst meer aandacht te besteden aan de meting van t_{merk} .

4. Microscopische invalshoek

4.1 Inleiding

Naast de in het vorige hoofdstuk beschreven macroscopische invalshoek kan de interne instabiliteit ook microscopisch worden beschouwd. Hiermee wordt bedoeld dat uit eigenschappen van de korrels, zoals hun diameter, en eigenschappen van het langsstromende water, bijvoorbeeld de snelheid, op korrelniveau wordt gezien of er interne instabiliteit optreedt. Deze methode heeft voordelen op een zuiver fenomenologische aanpak. Dit blijkt vooral, indien een voorspelling moet worden gemaakt van de interne stabiliteit van een materiaal dat nog niet eerder of nog niet onder die specifieke omstandigheden is beproefd. Daarnaast vergroot deze methode het begrip van het mechanisme dat verantwoordelijk is voor de interne stabiliteit. Een nadeel is dat dit soort microscopische modellen wat moeilijker te hanteren valt dan een vuistregel, zoals die kunnen worden afgeleid uit alleen macroscopische beschouwingen. Echter dit weegt niet op tegen de voordelen van de microscopische methode zoals een betere betrouwbaarheid en inzicht in het mechanisme.

De microscopische eigenschappen van een materiaal zijn lastig te meten, daarentegen macroscopische grootheden zijn wel goed meetbaar. Via een transportmodel worden de microscopische eigenschappen vertaald in macroscopisch meetbare grootheden. Het model is afgeleid uit het transportmodel voor deeltjes, zoals dit in het kader van het fundamentele filteronderzoek op Grondmechanica Delft is en wordt ontwikkeld. Het doel van dit model gaat veel verder dan het op ad hoc basis voorspellen van transporten. Daarom zijn slechts die gedeelten gebruikt, die voor de interne stabiliteit van belang zijn. Met dit afgeleide model zijn de volgende taken verricht:

- De keuze van het materiaal bij het uitvoeren van de proeven
- De voorspelling van de grootte van het transport bij die materiaalkeuze en een vast opgelegd meetprogramma
- De vergelijking tussen de berekende en de gemeten transporten bij het bij de proeven gerealiseerde materiaal en meetprogramma

4.2 Potentiele instabiliteit

Lubochkov [3] en Kenney et al. [2] hebben criteria opgesteld voor interne instabiliteit. Deze criteria gaan uit van potentiele instabiliteit. Hieronder wordt verstaan, dat het mogelijk doch niet noodzakelijk is dat er interne instabiliteit optreedt. Indien er geen of nauwelijks water door het korrelpakket stroomt, zal zeer waarschijnlijk een potentieel intern instabiel materiaal zijn fijne fractie niet verliezen. Om korrels in beweging te krijgen moet een zekere weerstand worden overwonnen. Dit kan slechts optreden als de locale watersnelheid rond een korrel een zekere kritieke waarde overschrijdt.

Evenmin kwantificeren Lubochkov en Kenney de interne instabiliteit op een manier die nauwkeuriger is dan toch wat vage klassen: stabiel, semi-stabiel en instabiel. Zoals in hoofdstuk 3.4 is beschreven, kan de mate van interne stabiliteit worden uitgedrukt in een hoeveelheid getransporteerd materiaal. Om de mate van interne instabiliteit kwantitatief te kunnen voorspellen, moet de relatie bekend zijn tussen overschrijding van de kritieke watersnelheid en de massa van het getransporteerde materiaal. In combinatie met de eventuele geometrische beperkingen die door het korrelskelet worden veroorzaakt, kan dan voor iedere filtersnelheid bepaald worden of er transport optreedt en indien dit het geval is, hoeveel transport.

4.3 Transportmodel

Het transportmodel voor de beschrijving van interne instabiliteit bevat twee delen:

- Het eerste aspect is de geometrische hindering voor korrels om door het eigen korrelskelet te kunnen bewegen. Dit komt ruwweg overeen met de denkbeelden van Lubochkov en Kenney. Het beschrijft het al dan niet mogelijk zijn van transport.
- Het tweede aspect is de krachtenbalans tussen de wrijving van korrels onderling en de sleep cq. drukkracht op de korrels. Deze term geeft aan of een potentieel intern instabiel materiaal ook daadwerkelijk korrels verliest.

De mathematische formulering van het transportmodel bestaat uit twee differentiaalvergelijkingen. De eerste vergelijking volgt uit de wet van behoud van

massa. Het is een dus continuïteitsvergelijking. De tweede vergelijking beschrijft de verandering van de bewegingstoestand van de korrels. De bewegingstoestand geeft aan hoeveel korrels er stilstaan en hoeveel er bewegen. De opzet van deze vergelijking is min of meer statistisch. De processen om een korrel in beweging te brengen of te stoppen worden beschreven met frequenties. Zo is er een losfrequentie (kans in een infinitesimale tijd om een korrel in beweging te brengen) en een vangfrequentie (kans in een infinitesimale tijd om een korrel tot stilstand te brengen). Er moeten frequenties worden gebruikt omdat de differentiaal-vergelijking een verandering van de bewegingstoestand beschrijft.

4.3.1 Geometrie

Voor het geometrische gedeelte kan gebruik worden gemaakt van de resultaten van het geometrische spoor [10]. Bij dit onderzoek is vastgesteld dat vanuit de korrelverdeling, naar aantallen korrels bepaald, de poriekanaaltjesverdeling via een evenredigheidsconstante berekend kan worden. Deze laatste beschrijft de verdeling van de kleinste openingen in een korrelpakket. Indien in een korrelpakket zich korrels bevinden die kleiner zijn dan de grootste poriekanaaltjes, kunnen deze korrels intern in het korrelskelet migreren. De potentiële interne instabiliteit kan dus op geometrische gronden worden afgeleid uit de overlap van de kansdichtheid van de korrels (naar aantallen) en de kansdichtheid van de poriekanaaltjes.

Omdat in de civiele techniek meestal met verdelingen wordt gewerkt, kan deze overlap in termen van verdelingen worden vertaald. Het is echter niet precies hetzelfde. Bij een overlap van twee kansdichtheidsfuncties is er altijd een die een kleinere gemiddelde waarde heeft dan de andere. De kansdichtheidsfunctie met de kleinste gemiddelde waarde wordt geïntegreerd tot een overschrijdingskans. De kansdichtheidsfunctie met de grootste gemiddelde waarde wordt geïntegreerd tot een onderschrijdingskans. In dit specifieke geval is de korrelverdeling als een onderschrijdingskans getekend (de gebruikelijke vorm: aantallen door zeef), terwijl de poriekanaaltjesverdeling als een overschrijdingskans is getekend (aantallen op de 'poriekanaaltjes-zeef'). Beide curves zullen elkaar altijd snijden. Karakteristiek voor de grootte van de overlap is de waarde van de deeltjesverdeling in het snijpunt. Dit is een maat voor de fractie van het materiaal dat potentieel intern instabiel is. De verklaring

gaat als volgt. Indien de waarde in het snijpunt gering is, zie figuur 47 boven, is het materiaal intern stabiel. Vrijwel alle korrels zijn immers groter dan de grootste poriekanaaltjes in het eigen korrelskelet. Indien de waarde in het snijpunt groot is, zie figuur 47 onder, zijn er in het korrelpakket voldoende openingen aanwezig, die groter zijn dan een redelijke fractie van de korrels. Deze voornamelijk kleine korrels kunnen door deze openingen ontsnappen.

4.3.1.1 Toepassing van de geometrische aspecten

Het doel van het onderzoek omvat de verificatie van het transportmodel voor de voorspelling van de interne instabiliteit. Hiervoor is gebruik gemaakt van kunstmatig samengestelde mengsels van zand en grind. Het was bij het begin van het onderzoek nog tamelijk onduidelijk met welke materiaalsamenstelling de verificatie zo optimaal mogelijk zou kunnen verlopen. Daarom is met behulp van de resultaten van het geometrische spoor allereerst uitgezocht hoe de potentiële instabiliteit afhangt van de vorm van de deeltjesverdeling. De methode gaat als volgt:

- Er wordt een schatting gemaakt voor een geschikte korrelverdeling, naar massa bepaald.
- Hieruit wordt de korrelverdeling naar aantal berekend. De kansdichtheidsfunctie van de korrels wordt hiertoe in klassen verdeeld en zodoende tot een histogram herleid. Het 'aantal' korrels in een klasse wordt bepaald uit de bijdrage van die klasse aan de massa van het totale monster gedeeld door de massa van een gemiddelde korrel uit zo'n klasse. Het aldus verkregen histogram en de hieruit herleide kansdichtheidsfunctie wordt genormeerd. Door integratie van de kansdichtheidsfunctie van de korrels wordt de korrelverdeling naar aantal gevonden.
- Met behulp van de gradatie van de korrelverdeling wordt de evenredigheidsfactor α bepaald, waarmee de poriekanaaltjesverdeling wordt berekend [10]:

$$\alpha = 4.8 + 1.1 \times 10^{\log(D_{f90}/D_{f10})} \quad (4.1)$$

De poriekanaaltjesverdeling $P(x)$ wordt uit de korrelverdeling $K(x)$ bepaald volgens:

$$P(x/\alpha) = K(x) \quad (4.2)$$

De in figuur 47 gebruikte overschrijdingskans $O(x)$ wordt gevonden uit:

$$O(x) = 1 - P(x) \quad (4.3)$$

- Bepaal nu de waarde van de korrelverdeling in het snijpunt van korrelverdeling en poriekanaaltjesverdeling. Indien deze waarde zeer laag is, kan er geen materiaalverlies optreden. Er wordt gestopt als de waarde van de korrelverdeling in het snijpunt van korrelverdeling en poriekanaaltjesverdeling enkele procenten bedraagt. Zo niet, dan wordt de korrelverdeling (naar massa) vlakker gemaakt, waarna het berekeningsschema opnieuw wordt gevolgd.

Er kleven twee nadelen aan deze methode.

- Het is niet bekend of de bij het onderzoek via het geometrisch spoor afgeleide formules voor het berekenen van de poriekanaaltjesverdeling bij extrapolaties naar zeer brede kansdichtheidsfuncties voor de korrels nog geldig zijn.
- Tevens treedt bij dergelijke vlakke korrelverdelingen het effect op dat de fijne korrels in sterke mate de wat grovere korrels in aantal overheersen. Dit heeft tot gevolg dat een kleine onzekerheid in de fijne staart van de korrelverdeling (naar massa bepaald, zoals bij zeven en wegen) grote invloed heeft op het verloop van de korrelverdeling naar aantal. Het is moeilijk voorstelbaar dat dergelijke kleine fluctuaties in werkelijkheid ook zulke grote gevolgen kunnen hebben voor de interne stabiliteit.

De algemene conclusie die hieruit kan worden getrokken is, dat het geometrische spoor voor de voorspelling van de interne instabiliteit geen accurate oplossing kan bieden. Wegens het ontbreken van een andere bruikbare theorie is toch van deze methode de materiaalkeuze voor de proeven gebruik gemaakt.

4.3.2 Krachten

Op de korrels in het pakket werken krachten, veroorzaakt door het langsstromende water. Indien de sleepkracht op een korrel voldoende groot is geworden, kan een korrel in beweging komen. Omdat de kwantificatie van de afzonderlijke krachten op korrels nog een moeizame zaak is en omdat voor de interne stabili-

teit slechts de gevolgen van de krachten van belang zijn, wordt de aandacht gericht op de grootte van het transport van korrels. Hierop wordt in paragraaf 4.4 dieper ingegaan.

Er wordt van een microscopische beschouwing overgeschakeld op een semi-microscopische beschouwing. De gedachtengang gaat als volgt: macroscopisch meetbare grootheden zoals transport bestaan uit de som van op microscopische schaal optredende verschijnselen. Stel bij een bepaald ingesteld verhang treedt een zeker transport op, een macroscopisch verschijnsel. Het opgevangen materiaal bestaat uit een aantal korrels. Indien het aantal in de constructie aanwezige korrels bekend is, kan hieruit de gemiddelde waarde van de resulterende kracht op een korrel afgeleid worden. De afzonderlijke krachten op een korrel zijn dus niet bekend. Wel is de resultante van alle krachten op een korrel bekend, als het ware de uitkomst van de krachtenbalans.

4.4 Macroscopisch transport

4.4.1 Algemeen

Uit de vorige paragraaf is duidelijk geworden dat bij overschrijding van een zekere waarde van de kracht op een korrel deze in beweging kan komen. De aandrijvende kracht op de korrels wordt geleverd door het langs de korrels stromende water. Om een korrel in beweging te krijgen moet dan ook de watersnelheid een zekere specifieke waarde overschrijden. Naar mate de watersnelheid verder toeneemt, zal bij een gelijkblijvende concentratie van korrels in het water, het massatransport lineair met de watersnelheid toenemen. Omdat het te verwachten is dat bij een toenemende watersnelheid ook de concentratie van de korrels in het water zal toenemen, zal het transport niet lineair maar progressief van de watersnelheid afhangen. Dit verschijnsel is ook bij proeven op materialen die instabiele grensvlakken vormen, waargenomen [11].

4.4.2 Analyse metingen bij grensvlak instabiliteit

Om het transport als functie van de watersnelheid te bepalen zijn metingen uit [11] gezien. In het onderstaande wordt het transport vergeleken met drie verschillende analytische relaties. Hieruit kan dan de beste worden gekozen. Uit eerdere analyses van korreltransport zoals deze onder andere voor de grens-

vlakstabiliteit van de negatieve overlap [12] zijn uitgevoerd, bleken twee empirische transport formules bruikbaar:

$$T_1 = \rho p_1 (i/i_{cr} - 1)^{1.25} \quad (4.4)$$

en

$$T_2 = \rho p_2 (i/i_{cr})(i/i_{cr} - 1) \quad (4.5)$$

T_i is het transport (kg/m's), ρ de volumieke massa van het getransporteerde materiaal, i het verhang, i_{cr} het kritieke verhang en p_i de transport intensiteit. Bij herschrijving van deze formules naar kritieke watersnelheden worden deze, uitgaande van turbulente stroming (het verhang is evenredig met het kwadraat van de filtersnelheid):

$$T_1 = \rho p_1 \left\{ (v_f/v_{fcr})^2 - 1 \right\}^{1.25} \quad (4.6)$$

en

$$T_2 = \rho p_2 (v_f/v_{fcr})^2 \left\{ (v_f/v_{fcr})^2 - 1 \right\} \quad (4.7)$$

v_f is de filtersnelheid, v_{fcr} de kritieke filtersnelheid. Naast deze formules kan ook een relatie worden afgeleid, zie appendix A, uit de klassieke formule voor bodemtransport in open waterlopen van Meyer-Peter en Mueller:

$$T_3 = \rho p_3 \left\{ (v_f/v_{fcr})^2 - 1 \right\}^{1.5} \quad (4.8)$$

Deze formules hebben een gemeenschappelijke term, namelijk dat ze evenredig zijn met een specifieke vorm van de overschrijding van de kritieke snelheid. Om een uitspraak te kunnen doen over welke relatie het meest geschikt is, moeten de relaties met meetgegevens worden vergeleken. Omdat de relaties tussen transport en filtersnelheid niet lineair zijn, kunnen zij lastig visueel met de metingen worden vergeleken. Teneinde dit te vergemakkelijken, worden ze herschreven tot:

$$(T_1/\rho)^{0.8} = p'_1 \left\{ (v_f/v_{fcr})^2 - 1 \right\} = c_1(1) + c_1(2) c_f^2 \quad (4.9)$$

$$T_2 / (v_f^2 \rho) = p_2' \{ (v_f / v_{fcr})^2 - 1 \} = c_2(1) + c_2(2) v_f^2 \quad (4.10)$$

$$(T_3 / \rho)^{(1/1.5)} = p_3' \{ (v_f / v_{fcr})^2 - 1 \} = c_3(1) + c_3(2) v_f^2 \quad (4.11)$$

In alle gevallen is een lineaire relatie tussen 'transport' en het kwadraat van de filtersnelheid verkregen. De coëfficiënten $c_i(j)$ kunnen grafisch worden bepaald of bijvoorbeeld met een kleinste kwadraten methode. De waarden van p_i en v_{fcr} kunnen uit de $c_i(j)$ worden berekend:

$$v_{fcr} = \{ -c_1(2) / c_1(1) \}^{1/2} \text{ en } p_1 = \{ -c_1(1) \}^{1.25} \quad (4.12)$$

$$v_{fcr} = \{ -c_2(2) / c_2(1) \}^{1/2} \text{ en } p_2 = -c_2(1) v_{fcr}^2 \quad (4.13)$$

$$v_{fcr} = \{ -c_3(2) / c_3(1) \}^{1/2} \text{ en } p_3 = \{ -c_3(1) \}^{1.5} \quad (4.14)$$

De gemeten transporten uit [11] zijn met deze formules geanalyseerd. De resultaten zijn vermeld in tabel 4.1

Proef	Df15 (mm)	Formule (4.6)		Formule (4.7)		Formule (4.8)	
		p_1 (m ² /s) x 10 ⁻⁶	v_{fcr} (mm/s)	p_2 (m ² /s) x 10 ⁻⁶	v_{fcr} (mm/s)	p_3 (m ² /s) x 10 ⁻⁶	v_{fcr} (mm/s)
T2	4.2	3.0	39.0	1.3	37.9	2.3	37.1
T16	7.4	1.5	47.9	0.4	44.0	0.9	44.7
T3	8.4	2.3	43.7	0.9	42.3	1.6	41.4
T4	12.6	1.5	41.8	0.6	40.9	1.0	39.9
T5	16.8	3.3	50.0	1.5	49.4	2.7	48.2
T6	21.0	3.1	52.1	1.2	50.9	2.3	50.0
T7	34.7	3.6	66.5	1.5	65.4	2.7	63.8
T8	83.8	1.0	66.8	0.2	61.1	0.6	62.8
T11A	12.6	2.2	84.8	1.1	83.3	1.9	82.1
T11B	12.6	4.4	87.4	2.5	87.8	4.3	85.6
T13	34.7	9.0	101.0	5.2	101.5	8.6	98.5
T13A	34.7	4.6	81.9	1.7	78.8	7.9	78.9
T14	52.0	1.6	81.2	0.1	57.6	0.8	72.3

Tabel 4.1 Analyse van de proefresultaten.

De eerste serie proeven, T2 t/m T8 en T16, werd uitgevoerd met fijn basismateriaal, $d_{50}=0.16\text{mm}$. Bij de tweede serie, T11 t/m T14, werd grof basis materiaal, $d_{50}=0.82\text{mm}$, gebruikt. Zoals uit de tabel blijkt, zijn de kritieke snelheden voor het fijne basis materiaal afhankelijk van de diameter van het filtermateriaal. Voor het grove basis materiaal is dit niet het geval. Tevens blijkt dat de kritieke snelheden volgens de verschillende formules elkaar weinig ontlopen. Ook voor de transport intensiteit p gelden dergelijk vage uitspraken. De waarde van p is ruwweg onafhankelijk van de diameter van het getransporteerde materiaal. De formule van Meyer-Peter en Mueller (4.8) levert een iets betere overeenstemming met de meetgegevens op dan de twee andere formules, (4.6) en (4.7). Daarom wordt voor de analyse van de metingen vergelijking (4.8) gebruikt.

Voor p wordt gevonden:

$$p = 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}'\text{s} \quad (4.15)$$

Voor de bepaling van het transport is niet een gemiddelde snelheid als de filtersnelheid vereist, maar veeleer de poriesnelheid, v_p . Omdat de vergelijking (4.8) het quotient van twee snelheden bevat, is voor het transport bij de transformatie van filtersnelheid naar poriesnelheid de porositeit niet meer van belang. De formule wordt dan:

$$T = \rho p \left\{ \left(\frac{v_p}{v_{pcr}} \right)^2 - 1 \right\}^{1.5} \quad (4.16)$$

T is het transport, in $\text{kg}/\text{m}'\text{s}$. De eenheid van de transport intensiteit, p , is gegeven in $\text{m}^3/\text{m}'\text{s}$. Er wordt gedeeld door de breedte van de opstelling, loodrecht op de stromingsrichting van het water. De hoogte van de meetfaciliteit is van geen belang, omdat immers alleen op het grensvlak tussen filter en basis erosie kan optreden.

Verder is uit experimenten gebleken dat als de meetfaciliteit langer dan ruwweg 1 meter is, de massa van het getransporteerde materiaal onafhankelijk is van de lengte van de opstelling. De oorzaak hiervan is gelegen in het feit dat de opname capaciteit van water voor korrels beperkt is. Het schone water raakt binnen een afstand van 1 m verzadigd met basismateriaal. Het kan dan netto geen materiaal meer opnemen. Dit houdt in, dat als er stroomopwaarts erosie plaatsvindt, waardoor het water verzadigd raakt, er verder stroomaf-

waarts pas weer erosie kan optreden als stroomopwaarts de erosie voldoende is afgenomen.

Dit verzadigingsproces heeft een karakteristieke lengteschaal. Op afstanden korter dan deze schaal van het beginpunt van erosie treedt er nog veel erosie op, maar op afstanden veel verder dan deze lengtemaat wordt nauwelijks meer materiaal in het water opgenomen. Om wat specifiek te zijn, er kan een soort karakteristieke lengte voor verzadiging worden gedefinieerd. Dit is de lengte in de constructie, waarover de opname van basismateriaal met een zeker percentage is afgenomen.

4.4.3 Transport bij interne instabiliteit

Uit de afgeleide grootte van de transport intensiteit bij grensvlak instabiliteit moet nu bepaald worden, hoe bij interne instabiliteit de massa van het getransporteerde materiaal kan worden voorspeld. Er is een effect dat verhindert dat de transport intensiteit, zoals bepaald voor grensvlak instabiliteit, onmiddellijk kan worden gebruikt: overal in het korreelpakket kan bij het proces van interne instabiliteit materiaal worden opgenomen. Dit is niet meer beperkt tot het grensvlak. Dit heeft tot gevolg dat het transport nu niet meer alleen op de breedte van de opstelling moet worden genormeerd, maar ook op de hoogte. Het transport bij interne instabiliteit wordt dus uitgedrukt in $\text{kg/m}^2\text{s}$. Bij interne instabiliteit treedt erosie van materiaal overal in het korreelpakket op. Om een vergelijking met grensvlak instabiliteit te kunnen maken, wordt het korreelpakket opgedeeld in denkbeeldige lagen. Er wordt verondersteld dat in ieder van die lagen het zelfde proces als bij grensvlak instabiliteit optreedt. Het aantal lagen wordt afgeschat uit de dikte van een laag en de hoogte van het korreelpakket. De dikte van een laag is gecorreleerd aan de diameter van de korrels. Omdat vooral de openingen, waardoorheen de kleine korrels kunnen passeren, door de grote korrels worden gevormd, wordt de dikte van een laag gelijkgesteld aan D_{85} . Bij de gebruikte materialen komt dit overeen met ongeveer 50 mm. Het transport wordt genormeerd op een doorstroomoppervlakte van 1 m^2 . Bij een breedte van de opstelling van 1 m moet de hoogte van de opstelling dus 1 m zijn. Gezien de dikte van een laag zijn er volgens deze beschouwing 20 lagen. Er zal door dit effect in dit specifieke geval twintigmaal zoveel transport kunnen optreden als bij grensvlak instabiliteit. Het transport is daarom:

$$T_{int} = \rho p_{int} \left\{ (v/v_{fcr})^2 - 1 \right\}^{1.5} \quad (4.17)$$

met

$$p_{int} = 3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s} \quad (4.18)$$

Het transport wordt nu uitgedrukt in kilogram per eenheid van doorstroomoppervlak per tijdseenheid. Het doorstroomoppervlak staat loodrecht op de stromingsrichting.

4.4.4 Synthese theorie en experimenten

In paragraaf 4.4.3 is de waarde van de transport intensiteit bij interne instabiliteit afgeschat uit de gemeten transporten bij grensvlak instabiliteit. Bij deze metingen is steeds gebruik gemaakt van tamelijk homogeen zand als basismateriaal. Er trad bij deze metingen net zo lang transport op als er basismateriaal voorradig was en de watersnelheid maar voldoende groot is.

Bij interne instabiliteit is het te transporteren materiaal echter niet meer homogeen, het maakt immers deel uit van al het in de opstelling aanwezige materiaal. De getransporteerde massa moet dus worden berekend uit het gewogen gemiddelde van alle mogelijke transporten. Hoewel bij de analyse van de metingen bij interne instabiliteit niet is gebleken dat de diameter van het getransporteerde materiaal afhangt van de kritieke snelheid, wordt in het onderstaande hiervan wel uitgegaan. Volgens de theorie [13] moet dit namelijk het geval zijn. Zo is bij grensvlak stabiliteit de kritieke snelheid uitgedrukt in de schuifspanningssnelheid van Shields. Deze benadering wordt ook bij de voorspelling van het interne transport toegepast. Voor iedere verschillende korreldiameter, D , is er dus een verschillende kritieke snelheid:

$$v_{fcr} = v_{fcr}^{(D)} \quad (4.19)$$

Stel nu voor de eenvoud dat D de karakteristieke diameter is van een bepaalde klasse van korrels. Laat het aandeel van die klasse tot de massa van alle korrels uit het monster gegeven zijn door $g(D)$. De bijdrage, $t(D)$, van die klasse van deeltjes aan het totale transport is dan:

$$t(D) = \rho p_{int} g(D) \left\{ \left(v_f / v_{fcr}(D) \right)^2 - 1 \right\}^{1.5} \quad (4.20)$$

Voorwaarde is dat v_f groter is dan $v_{fcr}(D)$. Het totale transport wordt gevonden door de sommatie van alle bijdragen $t(D)$:

$$T_{int} = \sum_{\text{alle klassen}} \{t(D)\} \quad (4.21)$$

T_{int} wordt uitgedrukt in $\text{kg/m}^2\text{s}$.

4.5 Voorspelling van het transport

4.5.1 Methode

Met behulp van de in 4.3.1.1 beschreven methode zijn twee keuzes gemaakt voor de te onderzoeken materialen. Voor beide materialen is berekend hoe groot het transport zal zijn bij een vast opgelegd belastingspad. Hierbij is er vanuit gegaan dat het verhang in stappen van 0.05 van 0.0 naar 0.5 wordt verhoogd. Tussen deze stapjes wordt het verhang gedurende een half uur constant gehouden. De berekeningsmethode wordt in het onderstaande beschreven.

Het materiaal in de filterbak wordt in klassen verdeeld. Iedere klasse heeft een karakteristieke diameter, D . Uit de korrelverdeling kan worden bepaald welke bijdrage, $g(D)$, iedere klasse levert tot de totale massa van het monster. Uit de verhangen wordt de filtersnelheid berekend via de doorlatendheid. Deze wordt bepaald uit de D_{f15} en de porositeit. De waarde van D_{f15} bedraagt 4 mm. Voor de porositeit wordt 0.35 aangenomen.

Met deze gegevens en formule (4.20) wordt in stapjes van 5 minuten bepaald hoeveel materiaal van een bepaalde klasse er in die periode is weggespoeld. Daarnaast wordt de totale hoeveelheid verwijderd materiaal berekend. Door de interne erosie verandert de korrelverdeling. Deze wordt aangepast, zodat ook een nieuwe waarde voor $g(D)$ kan worden bepaald. Daarna wordt het transport gedurende de volgende periode van vijf minuten doorgerekend. Na een half uur wordt gezien hoeveel materiaal er in totaal is opgevangen. Dit is het cumulatieve transport. Deze hoeveelheid wordt door een half uur en de doorstroom oppervlakte gedeeld om het transport s ($\text{kg/m}^2\text{s}$) te vinden.

4.5.2 Berekeningen

Voor beide typen van materialen zijn de geaccumuleerde transporten getekend in figuur 48. Voor type 'a' wordt er ongeveer 15 kg getransporteerd na ophoging van het verhang van 0.0 tot 0.5 in stapjes van 0.05. Voor type 'b' is dit ongeveer 1 kg. Het transport, s , is in figuur 49 uitgezet.

Beide materialen hebben dezelfde waarde van D_{f15} . Hun doorlatendheid zal dan ook bij het begin de proeven gelijk zijn. Beide proeven eindigen na de belastingstap met een verhang van 0.5. Toch is er een klein verschil in de doorlatendheid. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat bij type 'a' meer materiaal is weggespoeld dan bij type 'b', waardoor de D_{f15} groter is geworden. Dit heeft invloed op de doorlatendheid, die voor type 'a' sterker is toegenomen dan bij materiaal 'b'.

4.5.3 Reproduceerbaarheid

Bij eerdere proeven [11] is gebleken dat het transport bij afnemende verhangen niet reproduceert met het transport zoals is verkregen bij toenemende verhangen. De vermoedelijke oorzaak hiervan is de vorming van een hellend grensvlak. Bij interne erosie, waar er slechts een beperkte hoeveelheid erodeerbaar materiaal aanwezig is, kan uitputting van de beschikbare hoeveelheid materiaal ook een oorzaak zijn. Dit verschijnsel is met het rekenmodel onderzocht. Hiervoor zijn simulaties van de uit te voeren proeven verricht. De simulaties zijn in chronologische volgorde eerst bij stapsgewijs toenemende vervallen over de constructie uitgevoerd. Het maximaal bereikte verhang is 0.5. Daarna zijn bij stapsgewijs afnemende vervallen de transporten berekend. Het gesimuleerde transport blijkt evenmin te reproduceren: bij gelijke watersnelheden wordt bij toenemend verval over de constructie meer materiaal getransporteerd, dan bij afnemend verval, zie figuur 50.

De verklaring hiervoor gaat als volgt. Bij de toenemende vervallen (dus toenemende watersnelheden) kunnen steeds grotere korrels uit de opstelling worden verwijderd. Tevens wordt bij die hoge watersnelheden het transport van de kleine korrels groter, waardoor zij in toenemende mate worden meegenomen. Als vervolgens een lagere waarde van de watersnelheid wordt ingesteld, zijn er geen of nog slechts weinig van die kleine korrels aanwezig. Dit gemis aan

kleine korrels kan niet door grote korrels worden gecompenseerd, die bij deze lagere watersnelheid niet meer kunnen worden afgevoerd. Dit heeft tot gevolg dat het transport bij dalende verhangen lager is dan bij stijgende verhangen. Bij vergelijking van het gemeten en gesimuleerde transport, bijvoorbeeld figuur 17 en figuur 50 valt de gelijke vorm van beide curves op. De waarden van de filtersnelheid bij de gesimuleerde curve is echter niet gelijk aan die van de gemeten curve.

4.5.4 Conclusies

- Uit metingen ten behoeve van de bepaling van de grensvlak stabiliteit is de relatie tussen transport en overschrijding van de kritieke watersnelheid afgeleid. Het macroscopisch gemeten transport wordt het beste beschreven door de formule van Meyer-Peter en Mueller.
- Met het transportmodel zijn voorspellingen gedaan over de grootte van het transport en over de waarde van de kritieke filtersnelheid. Op grond van vooraf uitgevoerde analyses en de voorspellingen van de transporten kon het aantal proeven beperkt blijven en de geschikte meetapparatuur geselecteerd worden.
- Uit de berekeningen met het transportmodel volgt dat er tamelijk veel transport zal optreden, in de orde van enkele kilos tot een tiental kilos, afhankelijk van de vorm van de korrelverdeling.
- Verder kan uit berekeningen met het transportmodel worden afgeleid dat het transport-belastingsdiagram hysteresis zal vertonen.

4.6 Vergelijking met de modelexperimenten

4.6.1 Inhomogeniteiten

Bij de uitvoering van de proeven bleek dat het mengen van de verschillende soorten grind en zand slecht uitvoerbaar was. Er trad een aanzienlijke ontmenging op. Hierdoor komen grote clusters met vooral kleine korrels voor. Er is sprake van een gelaagde opbouw van het monster. De lagen liggen horizontaal, hetgeen overeenkomt met de manier van opbouwen van het monster. Ook het aantal visueel waarneembare lagen langs de glazen zijwand is ruwweg gelijk aan het aantal aangebrachte lagen. Bij de berekeningen vooraf is er echter steeds vanuit gegaan dat de kleine korrels homogeen in het pakket verdeeld zouden zijn.

4.6.2 Doorlatendheid

Teneinde de vooraf uitgevoerde berekeningen reeds tijdens de proef met zo min mogelijk tussenberekeningen te kunnen verifiëren, is steeds opgegeven hoe groot de getransporteerde massa per half uur is als functie van het opgelegde verhang. Echter om te berekenen of er korrels in beweging kunnen komen, moet de watersnelheid bekend zijn. Voor de omrekening van verhang naar watersnelheid is de doorlatendheid nodig. Deze is berekend met behulp van de Forchheimer relatie [8]. Een verificatie van de uitdrukking voor de bijbehorende coëfficiënten als functie van korreldiameter en porositeit is echter nooit voor inhomogene mengels van zand en grind uitgevoerd. Het is daarom heel goed mogelijk dat de gemeten doorlatendheid van dergelijk materiaal afwijkingen van de voorspelling zal vertonen. Om deze afwijkingen te elimineren is gebruik gemaakt van de a en b coëfficiënten in de doorlatendheidsrelatie, zoals deze uit de proeven volgen. De a coëfficiënt bleek een factor 4.5 lager te zijn dan berekend, de b coëfficiënt is een factor 6 lager.

Daarnaast bleek ook de porositeit van de mengsels aanzienlijk lager te zijn (0.2) dan bij de voorspelling was gebruikt (0.35). Voor deze lagere waarde van de porositeit is met behulp van de Forchheimer relatie het effect op de doorlatendheid bepaald. Bij de bepaling van de eerder genoemde factoren 4.5 en 6 is hierbij rekening gehouden.

4.6.3 Vergelijking

Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee typen van materialen. Type 'a' is potentieel zeer instabiel, terwijl type 'b' potentieel wat minder instabiel is. In figuur 51 is het gemeten transport van proef T3 en T4 getekend. Deze zijn van type 'a'. Daarnaast is ook het voorspelde transport getekend. Voor de grafieken zijn geen lineaire schalen gebruikt. De schalen zijn net als bij de analyse van het transport bij grensvlak instabiliteit zodanig getransformeerd, dat de metingen cq. berekeningen volgens de theorie als een rechte lijn kunnen worden weergegeven. Op de horizontale schaal is daarom de filtersnelheid kwadratisch uitgezet, op de verticale as staat het transport tot de macht $2/3$.

Uit de verificatie metingen van de kanalentheorie, zie paragraaf 3.5, kan uit de tracertijd worden afgeleid dat de filtersnelheid in de opstelling bij proef

T4 in werkelijkheid een factor 1.5 groter is dan bij aanname van een homogeen pakket kan worden bepaald. Lokaal is dus de watersnelheid groter dan uit de metingen volgt. Dit verklaart, dat erosie optreedt bij een schijnbaar lagere watersnelheid dan uit de theorie [13] volgt. In figuur 51 is proef T4 voor dit effect gecorrigeerd. Dit is aangegeven met T4'. Omdat zowel de filtersnelheid als de kritieke filtersnelheid met dezelfde factor worden vergroot, verandert hierdoor de waarde van de transport intensiteit niet. In figuur 52 zijn de type 'b' materialen, te weten proef T2, T5 en T6 uitgezet. Tevens is ook de voorspelling van het transport voor proef T2 meegetekend.

In tabel 4.2 zijn de waarden van p en v_{fcr} volgens de formules van Meyer-Peter en Mueller (4.17) vermeld. Omdat in tegenstelling tot de proeven op zand niet al het aanwezige materiaal beschikbaar is voor transport, is de uit de simulatie berekeningen volgende transport intensiteit, p , niet gelijk aan de waarde van p die in paragraaf 4.4.3 is afgeleid.

Proef	type	p (m^3/m^2s)	v_{fcr} (mm/s)
T2	b	1.0×10^{-8}	4.8
T3	a	2.5×10^{-8}	1.8
T4	a	1.0×10^{-7}	3.0
T4'	a	1.0×10^{-7}	4.5
T5	b	6.0×10^{-9}	1.6
T6	b	3.0×10^{-9}	1.7
Simulatie	a	3.5×10^{-7}	5.8
Simulatie	b	7.0×10^{-8}	6.3

Tabel 4.2 Parameters van het transport ten gevolge van interne instabiliteit.

In figuur 51 valt op dat de waarde van het gesimuleerde transport dezelfde orde van grootte heeft als het gemeten transport. Indien wordt gecorrigeerd voor het feit dat zich bij T4 en wellicht ook T3 kanalen in de opstelling hebben bevonden, is de overeenstemming tussen het gemeten en gesimuleerde transport redelijk. Voor de type 'b' materialen, zie figuur 52, is slechts 1 proef met zand-grind mengsels uitgevoerd, proef T2. Ook hier is de overeenkomst tussen gemeten transport en gesimuleerd transport redelijk. Voor de mijnstenen zijn nog geen simulaties uitgevoerd. De waarde van het gemeten

transport bij mijnsteen wijkt echter sterk af van die van proef T2. De kritieke snelheid van de mijnsteen monsters is lager dan die voor het zand-grind mengsel. De verklaring hiervan kan gezocht worden in het feit dat het getransporteerde materiaal van T2 niet zo'n fijnkorrelige staart heeft als het getransporteerde materiaal van de beide mijnstenen. Er zal dus voor T5 en T6 reeds bij lagere poriesnelheden transport kunnen optreden.

4.6.4 Conclusie

- De waarde van het gesimuleerde transport is van dezelfde orde van grootte als de gemeten waarde.
- De voorspelde waarde van de kritieke snelheid is niet in overeenstemming met de gemeten waarde.
- Inhomogeniteiten in de opbouw van het monster verlagen schijnbaar de kritieke snelheid.
- Het transportmodel is geschikt om het transport dat bij interne instabiliteit optreedt, te beschrijven.

4.7 Een stochastisch model

Uit de korrelverdelingen van het bij het transport opgevangen materiaal blijkt dat de korrelverdeling nauwelijks van de optredende filtersnelheid afhangt. Daarnaast blijkt uit visuele waarnemingen dat het transport niet constant in de tijd is. Deze verschijnselen kunnen met het transportmodel niet worden verklaard. Hiervoor is een stochastisch model opgesteld.

4.7.1 Inleiding

De basis van het stochastische model is dat voor iedere korrel in het pakket een verschillende snelheid gevonden wordt, waarbij die korrel in beweging komt. Deze snelheid hangt onder andere af van de grootte van de korrels en van hun ligging. Het verschil met de oude transport theorie is dat de snelheid om een korrel in beweging te brengen daar niet afhangt van de ligging van de korrels. Omdat de ligging van de korrels sterk van korrel tot korrel verschilt, ontstaat er een aanzienlijke diversiteit in snelheden. Er kan dus met recht over een verdeling van snelheden worden gesproken. Dit verklaart het stochastische in de benaming.

4.7.2 Waarnemingen

De stelling dat het transport door een stochastisch proces gestuurd wordt, volgt uit drie feiten:

- De visuele waarnemingen van het transport
- De gemeten transporten bij afnemende filtersnelheid
- De korrelgrootte van het getransporteerde materiaal hangt weinig van de filtersnelheid af

Bij verhoging van het verval over de constructie wordt door de glazen zijwand waargenomen dat het korreltransport plotseling sterk toeneemt. Hieronder wordt verstaan dat er zeer veel korrels in beweging zijn gekomen en er tevens veel materiaal uit de opstelling stroomt. Na zo'n vijf minuten is het aantal bewegende korrels echter aanzienlijk verminderd, terwijl na een half uur het transport zelfs vrijwel nul is geworden. Tijdens het afzuigen van het getransporteerde materiaal hoopt zich aan de benedenstroomse zijde van de opstelling nauwelijks materiaal meer op. Het afzuigen duurt zo'n 10 minuten.

Bij de uitvoering van de proeven werd het verval over de constructie in stappen vergroot. Na het bereiken van het maximaal realiseerbare verval wordt bij afnemende vervallen nogmaals een serie metingen gedaan. Het doel is om de reproduceerbaarheid van de metingen te onderzoeken. Er bleek echter dat na het bereiken van het maximale verval het transport aanzienlijk minder was dan bij vergelijkbare waarden van de filtersnelheid bij toenemende vervallen.

Bij het zeven van het getransporteerde materiaal is gebleken dat de bij een zekere filtersnelheid opgevangen korrelgrootte niet homogeen is. Er is een aanzienlijke diversiteit in korrelgrootte, zodat beter over een verdeling van de korrelgrootte kan worden gesproken. De gemiddelde waarde en de standaard deviatie van die verdeling blijkt bovendien slechts weinig van de watersnelheid af te hangen.

4.7.3 Theorie

De tendens, dat naar mate een korrel groter wordt, de snelheid waarbij hij in beweging zal komen ook groter wordt [13], wordt doorkruist door de ligging van de korrels. Zo kan een kleine korrel, die bijvoorbeeld 'ongunstig' ligt, pas

bij een veel hogere snelheid in beweging komen, dan een wat grotere korrel, die wel 'gunstig' ligt om getransporteerd te worden. Gunstig kan inhouden dat een korrel in een vrij grote porieholte ligt of dat de waterstroom direct op het oppervlak van de korrel kan aangrijpen. Ongunstig betekent dat de korrel in een kleine porieholte ligt, waardoor er vrij weinig water langs de korrel stroomt. Ook is het mogelijk dat hij in de 'schaduw' van de waterstroom van een andere korrel ligt, waardoor hij geen of nauwelijks sleepkracht ondervindt. Voor het verduidelijken van de theorie wordt een gedachten experiment uitgevoerd. Er is hier voor een gedachten experiment gekozen, omdat niet alle stappen in het volgende betoog technisch realiseerbaar zijn. Alle korrels worden, net als bij het zeven, onderverdeeld in klassen, afhankelijk van hun grootte. Voor iedere korrel uit een bepaalde klasse wordt daarnaast geregistreerd bij welke watersnelheid die korrel in beweging komt. Dit is mede afhankelijk van de ligging van de korrels. Technisch is dit natuurlijk niet haalbaar maar voor het gemak wordt het wel mogelijk verondersteld. Om de registratie overzichtelijk te houden, wordt niet de exacte watersnelheid genoteerd, maar slechts de klasse. Ook de watersnelheid is dus in klassen onderverdeeld, afhankelijk van de waarde.

Het resultaat van de waarnemingen is een tabel, die allereerst is gesorteerd op korrelgrootte. Per klasse zijn de korrels vervolgens gesorteerd op de watersnelheid waarbij zij in beweging komen. Hieruit kan berekend worden, welk gedeelte van een klasse bij een bepaalde watersnelheid in beweging zal komen. Grafisch leidt dit tot een histogram van de watersnelheden per korrelgrootte. Hieruit wordt de kansdichtheidsfunctie afgeleid, die geldt voor een oneindig groot aantal klassen van watersnelheden. De kansdichtheidsfuncties zijn schematisch in figuur 53 aangegeven voor korrelgroottes van 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 en 0.3 mm. De grootheden langs de horizontale as hebben geen fysische betekenis, ze zijn 'verzonnen'. De klokvormige curves geven apart aan, hoe groot de kansdichtheid is dat bij een gegeven watersnelheid korrels van een van die groottes in beweging kunnen komen. Door integratie van ieder van die curves wordt voor elke korrelgrootte bepaald, hoe groot de relatieve fractie van de korrels is, die in beweging kan komen als functie van de watersnelheid. Deze gegevens zijn getekend in figuur 54. Hieruit kunnen de fracties van de korrels die in beweging kunnen worden gezet, worden afgeleid, zie tabel 4.3.

D (mm)	$P(v_{fcr} < v)$ (-)	p(D) (-)	Pxp (-)	cumulatief (-)
0.05	1.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.6	0.01	0.0006	0.66
0.15	0.12	0.02	0.00024	0.925
0.2	0.016	0.04	0.000064	0.995
0.25	0.002	0.02	0.000004	1.0
0.3	0.0003	0.0	0.0	1.0

Tabel 4.3 Bepaling korrelverdeling van het getransporteerde materiaal met het stochastische model

De korrelverdeling, (p) zelf geeft informatie over de hoeveelheid korrels van een bepaalde grootteklasse die in de constructie aanwezig is. Tevens is bij een bepaalde watersnelheid de kans voor het in beweging brengen van korrels van die grootteklasse, (P) bekend. Hieruit wordt via de gewogen som (Pxp) bepaald worden hoeveel materiaal, ongeacht de grootte, bij een gegeven watersnelheid kan worden getransporteerd. Zo'n lijn is in figuur 55 getekend. Als indicatie is ook een gemeten korrelverdeling van getransporteerd materiaal getekend.

Op grond van deze aannamen kan het verloop van een proef kwalitatief worden verklaard. Indien er reële gegevens over het verloop van de curves in figuur 53 aanwezig zijn, is, zoals in het bovenstaande is aangetoond, ook een kwantitatieve analyse mogelijk. De kwalitatieve verklaring wordt in het volgende hoofdstuk gegeven.

4.7.4 Kwalitatieve verklaring

De proef wordt vanaf snelheid nul opgestart. Er wordt een verval ingesteld, waarbij een zekere filtersnelheid optreedt. Omdat nog niet eerder water door het pakket is gestroomd, zijn er nog veel korrels die gunstig liggen om getransporteerd te worden. Deze korrels komen in beweging. Het water heeft echter een beperkte vervoerscapaciteit, waardoor niet alle transporteerbare korrels instantaan het pakket uitstromen. Na enige tijd zijn er reeds veel bij die snelheid transporteerbare korrels verdwenen. Het aantal gunstig liggende korrels neemt hierdoor af. Door die afname neemt het transport eveneens af als

functie van de tijd. Het aspect beperkte opname capaciteit in combinatie met de kansdichtheidsfunctie voor het in beweging brengen van een klasse van korrels levert een verklaring voor het tijdsafhankelijke transport, zoals dit visueel is waargenomen.

In de volgende stap wordt het verval verhoogd, waardoor een hogere filtersnelheid ontstaat. Hierdoor kunnen nu ook kleine korrels getransporteerd worden, die bij de vorige snelheid nog voldoende ongunstig lagen. Tevens kunnen grotere korrels met een wat gunstige ligging in beweging komen. Er bevinden zich dus weer zowel grote als kleine korrels in het getransporteerde materiaal. Bij iedere verhoging van het verval komen enerzijds successievelijk grotere anderzijds steeds ongunstiger liggende kleine korrels in beweging. De gunstig liggende kleine korrels zijn na verloop van tijd grotendeels uit de constructie verdwenen. Het verband, dat bij toenemende watersnelheid steeds grotere korrels kunnen worden getransporteerd, wordt in geringe mate experimenteel gevonden. De verklaring hiervoor is dat de breedte van de kansdichtheidsfunctie voor afzonderlijke klassen de verwachte scherpe piek in de korrelgrootte uitmiddelt. Het opraken van de korrels heeft hiermee weliswaar ook te maken, maar dit aspect heeft de grootste gevolgen voor het transport bij dalende vervallen.

Bij verlaging van het verval kunnen slechts de kleinere korrels of de gunstig liggende grote korrels in beweging worden gebracht. Bij de lage vervallen zijn deze vrijwel alle reeds getransporteerd. Er zijn veelal alleen nog maar ongunstig liggende grote korrels overgebleven, want de gunstig liggende grote korrels zijn ook al grotendeels verwijderd. Ondanks het feit dat de watersnelheid bij de dalende vervallen gelijk is aan die bij de toenemende vervallen, reproduceert het transport niet. Immers, aan de andere voorwaarde, te weten de beschikbaarheid van korrels, wordt niet meer voldaan. Omdat er altijd nog wel een restant gunstig liggende korrels is, reduceert het transport niet naar nul. Indien de voorafgaande stappen langer zouden hebben geduurd, wordt het restant materiaal steeds kleiner, zodat het transport lager zal zijn. Bij proef T1 is de afname expliciet waargenomen en gerapporteerd, zie figuur 17. Bij de andere proeven zijn de niet reproducerende takken van de transport curves niet meer in de figuren weergegeven.

De visuele waarneming van de afname van het transport duidt op een evenwichtsproces. Een verdere onderbouwing van de stelling wordt gevonden in het feit dat

tijdens het afzuigen van het getransporteerde materiaal er nauwelijks nieuw materiaal in de opvangbak stroomt. Stel nu eens dat het transport wel constant in de tijd zou zijn. In een half uur tijd heeft zich aan de benedenstroomse zijde van de filterbak X kg materiaal opgehoopt. Het meeste ligt dicht bij het uitstroomrooster van de filterbak. Het opzuigen van dit materiaal duurt ruwweg 10 minuten. Er wordt zo dicht mogelijk bij de filterbak begonnen. Daarna wordt materiaal in verder van de bak verwijderde stroken opgezogen. Na een periode van 10 minuten zou zich weer ruwweg $X/3$ kg materiaal aan de benedenstroomse zijde van de constructie moeten hebben opgehoopt. Dit wordt echter niet waargenomen. Hieruit volgt dat de veronderstelling dat het transport constant in de tijd is, onjuist is.

4.7.5 Conclusie

- Met het stochastische model kan zowel kwalitatief als kwantitatief het verloop van de experimenten worden verklaard.
- Het model is echter niet in staat een voorspelling te doen over de gemiddelde waarden en standaard afwijkingen van de watersnelheden voor het in beweging brengen van korrels en de hoeveelheden transporten.
- Aanvullende metingen c.q. analyses zijn nodig om het stochastische model en het klassieke transportmodel te integreren.

5. Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Het onderzoek heeft tot nu toe geleid tot een voor de praktijk toepasbare empirische ontwerpregel, zoals beschreven in paragraaf 3.4. Deze ontwerpregel heeft echter een beperkt toepassingsgebied vanwege het feit dat het is gebaseerd op een klein aantal proeven.

Het inzicht in de fysische processen die een rol spelen bij interne instabiliteit is met het onderzoek wel vergroot, maar heeft nog geen sluitende afronding kunnen krijgen.

Daarom wordt onderstaand een aanvullende onderzoek voorgesteld. De mikroskopische en makroskopische invalshoek zijn gescheiden beschreven. Uiteraard is het aan te bevelen er naar te streven deze twee invalshoeken nader tot elkaar te brengen in één breed toepasbare ontwerprichtlijn.

Makroskopische invalshoek

Vervolgonderzoek kan zich richten op de verdere invulling en verifikatie van de empirische ontwerpregel door aanvullende proeven uit te voeren op de volgende materialen:

- Silex
- Slakken
- Mijnssteen met flauwere zeefkromme dan reeds gebruikt is.

Daarnaast is het van groot belang om de konsekventies van het overschrijden van het kritieke verhang nader te onderzoeken. Het is bij reeds uitgevoerde onderzoek gebleken dat bij het ene mengsel wel een grote doorlatenheidsverandering optreedt, terwijl dat bij andere filters nauwelijks plaatsvindt. Dit hangt nauw samen met de gekozen waarde van het kritieke materiaaltransport.

Voor het breed toepasbaar maken van onderzoekresultaten, zonder daarvoor zeer veel modelproeven uit te voeren, is het belangrijk het inzicht in de relevante fysische verschijnselen te vergroten. Hierbij wordt gedacht aan de verdere uitwerking van de mikroskopische onderzoekslijn, die verderop in dit hoofdstuk wordt beschreven, en het uitwerken van de kanalentheorie. Voor dit laatste zijn aanvullende modelproeven noodzakelijk, die specifiek gericht zijn op het meten van de volgende zaken:

- de porie-snelheid in de kanalen.
- het verhang in de kanalen.
- zaken die met de inhomogeniteit verband houden, zoals:

- samenstelling (korrelgrootte) van klusters en kanalen
- volume van de kanalen
- gemiddelde lengte van effectieve kanalen
- aandeel van kanaalvolume dat bijdraagt aan het watertransport

Om deze zaken goed te kunnen meten moet de modelopstelling aan hoge eisen voldoen. De poriesnelheid in enkele kanalen kan redelijk betrouwbaar gemeten worden met EMF's (elektromagnetische snelheidsmeter) in kanalen in te bouwen. Het verhang in de kanalen kan gemeten worden door het aantal stijgbuisjes zo groot te maken dat niet alleen het lokale verhang, maar ook de richting van stroomlijnen kunnen worden gemeten.

Teneinde de inhomogeniteit goed te kunnen modelleren en te meten, is het wellicht noodzakelijk om een smal (kwasië twee-dimensionaal) model te maken. De horizontale afmeting loodrecht op de stroming kan gereduceerd worden tot orde 5 cm, zodat het verloop van de kanalen en alle klusters goed door het inspektieraam zichtbaar zijn. Met behulp van een goed zichtbare merkstof en een (video-) kamera kan het patroon van kanalen etc. vastgesteld worden. Verder kan gebruik gemaakt worden van de eigenschap van fijn materiaal om veel meer water vast te houden dan grof materiaal. Door gelijk na het legen van het model te meten hoeveel water nodig is om het weer te vullen, is een indicatie van het poriën-volume van de kanalen te verkrijgen.

De resultaten van het hier voorgestelde onderzoek zijn tevens van grote waarde voor een onderzoek naar de doorlatendheid van filters met een flauwe zeefkromme. Een geïntegreerd onderzoek is daarom zeker aan te bevelen.

Mikroskopische invalshoek

Uit de voorafgaande hoofdstukken is gebleken dat het huidige transport model met een onvoldoende nauwkeurigheid de metingen kan verklaren. Ook de stochastische theorie alleen is hiertoe niet instaat. De breedte van de kansdichtheidsfuncties van de watersnelheden, waarbij een korrel in beweging kan worden gebracht is bijvoorbeeld nog onbekend. Voor de gemiddelde waarde kan met behulp van de open waterloop analogie een goede schatting worden gemaakt.

Verder is onvoldoende bekend in welke mate geometrische hindering een rol speelt. Echter door de slechte menigeenschappen van zeer goed gegradeerde materialen lijkt het geometrische aspect van minder belang te zijn. De door de ontmenging geïntroduceerde inhomogeniteit zal de rol die de geometrie speelt, sterk verminderen. Dit levert een extra stukje onveiligheid.

Vanwege het beperkte aantal proeven dat is uitgevoerd, zal de veralgemenisering die uit de resultaten is afgeleid, niet altijd geldig zijn. Om het kritieke verhang met een betere betrouwbaarheid te kunnen voorspellen is een beter begrip over de processen die de interne stabiliteit veroorzaken, van belang. De basis voor de theorie is reeds aanwezig, maar alle stukjes uit de puzzel passen nog niet in elkaar. In concreto dient nog onderzocht te worden:

1. De invloed van de inhomogene opbouw van een monster
2. De inpassing van het transport model in het stochastische model
3. Kwantitatieve analyse van de huidig beschikbare metingen met het stochastische model.

ad 1. De niet regelmatige opbouw van het monster bij de modelproeven veroorzaakt een stuk onzekerheden in de algemene toepasbaarheid van de resultaten. Maar ook in de praktijk kan een onregelmatige opbouw van een filterlaag optreden. In hoeverre deze de werking van het filter en het intern instabiele gedrag ervan beïnvloedt, is momenteel nog onbekend. Bij een bepaalde inhomogeniteit zou daarvoor nagegaan kunnen worden, hoe de gemiddelde eigenschappen van de laag veranderen en of de gemiddelde eigenschappen maatgevend zijn.

ad 2. Door de inpassing van sommige stochastische elementen in het transport model kan een betere voorspelling worden gedaan over de hoeveelheid materiaal die bij een bepaalde watersnelheid zullen worden uitgespoeld. Een belangrijke oorzaak van de onzekerheid in de kritieke snelheid waarbij een korrel gaat bewegen, is de variabele ligging van een korrel. Aannemende dat dit de enige oorzaak van de spreiding is, kan de spreiding in de kritieke snelheid gekwantificeerd worden met behulp van beschikbare empirische relaties tussen de ligging van een korrel en de stromingskracht erop, zie bijvoorbeeld [9].

ad 3. Door een analyse te maken van de huidig beschikbare gegevens kan de relatie tussen het transport van materiaal en de optredende watersnelheid worden bepaald. De theoretisch afgeleide breedte van de kansdichtheidsfuncties voor de watersnelheden waarbij transport optreedt, kan hiermee geverifieerd worden. Het transport als functie van de tijd kan dan worden gesimuleerd, zodat tevens de invloed van de interne stabiliteit op de grensvlakstabiliteit kan worden nagegaan. Dit verschaft informatie over de gevoeligheid voor falen van de constructie ten gevolge van interne instabiliteit.

REFERENTIES

1. H. den Adel
Alternatieve materialen als filterlaag
Laboratorium voor Grondmechanica, C0272550/18, sept. '85.
2. T.C. Kenney and D. Lau
Internal stability of granular filters
Canadian Geotech. Journal 22. pp. 215-225, 1985.
3. H. den Adel
Literatuurstudie filters
Appendix 4 uit [4].
4. M. Klein Breteler
Talubekleding van gezette steen
Ontwerpregels voor het filter modelonderzoek
Concept verslag modelonderzoek
Waterloopkundig Laboratorium, M1795/H195 deel XXI, mei '87
5. A. de Graauw, T. v.d. Meulen en M v.d. Does de Bye
Design criteria for granular filters
Delft Hydraulics, Publication no. 287, jan. 1983.
6. C.F. Ripley
Internal stability of granular filters
Discussion Canadian Geotechn. Journal 23, page 255-258, 1986
7. F.C.M. van der Knaap, M. Klein Breteler en M.T. de Groot
Talubekleding van gezette steen
Belasting en sterkte van zetsteenverdedigingskonstrukties op oevers en dijken
Verslag oriënterende buro-studie
WL/LGM, M 1115 deel XIV, M 1795/M 1881 deel XVI, CO 416409/4, aug. '84

REFERENTIES (vervolg)

8. H. den Adel
Heranalyse van doorlatendheidsmetingen d.m.v. Forchheimer relatie
Grondmechanica Delft, CO-272550/56, nov. '87
9. R. Thabet e.a.
Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen
Erosie en stabiliteit van bodem en oevers,
inleiding tot relevante verschijnselen
Waterloopkundig Laboratorium, verslag M 1115 deel VIII, jan. 1982
10. H. den Adel
Eindrapportage van het onderzoek via het geometrische spoor
Grondmechanica Delft, CO-416461/28, april 1987
11. T. van der Meulen
Granulaire filters, stroming evenwijdig scheidingsvlak
Waterloopkundig Laboratorium M898 deel IV, september 1984
12. M. Klein Breteler
Taludbekleding van gezette steen, ontwerpregels voor het filter
Waterloopkundig Laboratorium, M1795/H195 deel XXI, mei 1987
13. T. van der Meulen
Stormvloedkering Oosterschelde, stabiliteit van de granulaire filters van
de negatieve overlap, scheidingsvlak zand-zeegrond
Waterloopkundig Laboratorium, M2034, juli 1984

nr.	koördinaten		
	x	y	z
	cm	cm	cm
1	93.5	50	10
2	71	50	10
3	48	50	10
4	29.5	50	10
5	6.5	50	10
6	93.5	50	0
7	71	50	0
8	48	50	0
9	29.5	50	0
10	6.5	50	0
11	88	0	4.5
12	68	0	4.5
13	48	0	4.5
14	28	0	4.5
15	11	0	4.5
16	88	2.5	9.5
17	88	0	14.5
18	68	0	14.5
19	48	0	14.5
20	28	0	14.5
21	11	0	14.5
22	88	2.5	19.5
23	88	0	24.5
24	68	0	24.5
25	48	0	24.5
26	28	0	24.5
27	11	0	24.5
28	88	2.5	29.5
29	88	0	34.5
30	68	0	34.5
31	48	0	34.5
32	28	0	34.5
33	11	0	34.5
34	88	2.5	39.5
35	88	0	44.5
36	68	0	44.5
37	48	0	44.5
38	28	0	44.5
39	11	0	44.5

x: evenwijdig aan stroming
y: loodrecht op stroming, horizontaal
z: vertikaal

(0,0,0) = punt op bodem aan bovenstroomse
zijde tegen achterwand

Tabel 1 Koördinaten van stijgbuisjes

		staprr								
		1	2	3	4	5	6	7		
buisnr	koordinaten									
	x	y	z							
[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]		
1	93.5	50.0	10.0	13.9	14.2	14.4	14.9	17.0	35.6	31.5
2	71.0	50.0	10.0	15.0	16.9	18.2	20.0	24.9	40.7	34.8
3	48.0	50.0	10.0	16.8	20.5	24.7	28.5	38.0	51.0	41.4
4	29.5	50.0	10.0	18.0	23.9	28.4	33.5	42.6	54.5	43.6
5	6.5	50.0	10.0	18.3	24.4	29.3	34.8	44.5	56.2	44.8
6	93.5	50.0	.0	14.2	14.8	15.0	15.4	16.9	32.9	29.1
7	71.0	50.0	.0	14.8	17.4	18.7	18.7	22.2	38.7	33.4
8	48.0	50.0	.0	16.5	20.3	23.1	26.5	32.2	49.6	40.5
9	29.5	50.0	.0	18.0	23.8	28.2	33.3	42.3	54.3	43.6
10	6.5	50.0	.0	18.1	24.1	29.2	34.1	44.3	56.0	45.4
11	88.0	.0	4.5	14.4	15.3	16.5	17.8	24.2	40.9	35.0
12	68.0	.0	4.5	15.5	17.7	19.8	21.2	28.6	44.0	37.0
13	48.0	.0	4.5	17.2	21.2	24.1	27.6	35.8	48.8	40.2
14	28.0	.0	4.5	17.8	22.9	26.9	31.6	41.0	53.0	42.9
15	11.0	.0	4.5	18.1	24.2	29.2	34.7	44.1	55.7	44.6
16	88.0	5.0	9.5	14.3	15.0	16.1	17.6	24.4	39.9	34.3
17	88.0	.0	14.5	14.4	15.2	16.3	17.7	24.5	40.0	34.5
18	68.0	.0	14.5	15.0	17.3	19.5	22.0	30.0	44.3	37.2
19	48.0	.0	14.5	16.8	20.8	23.8	27.4	36.1	43.9	40.2
20	28.0	.0	14.5	17.8	22.9	27.1	32.2	41.6	53.6	43.1
21	11.0	.0	14.5	18.2	24.1	29.0	34.6	44.2	55.8	44.7
22	88.0	5.0	19.5	14.7	16.3	17.6	19.2	26.0	40.8	35.0
23	88.0	.0	24.5	14.8	16.2	17.9	20.6	28.1	42.1	35.9
24	68.0	.0	24.5	15.6	18.5	20.9	24.5	32.2	45.5	38.0
25	48.0	.0	24.5	16.6	20.7	24.3	28.5	36.7	49.3	40.5
26	28.0	.0	24.5	17.5	22.6	27.0	32.0	41.3	53.2	43.0
27	11.0	.0	24.5	18.5	24.5	29.3	35.0	44.6	56.1	45.0
28	88.0	5.0	29.5	14.6	16.0	17.6	20.4	27.8	42.0	35.7
29	88.0	.0	34.5	14.8	16.0	17.5	20.5	27.7	41.8	35.6
30	68.0	.0	34.5	15.7	18.2	20.5	24.1	31.8	45.1	37.8
31	48.0	.0	34.5	16.8	20.9	23.9	28.2	36.8	49.3	40.4
32	28.0	.0	34.5	17.6	22.6	26.9	32.1	41.6	53.4	43.2
33	11.0	.0	34.5	18.3	24.2	29.0	34.7	44.4	56.0	44.8
34	88.0	5.0	39.5	14.6	15.7	17.0	19.6	27.0	41.0	35.1
35	88.0	.0	44.5	14.5	15.6	17.0	19.5	26.7	40.4	34.8
36	68.0	.0	44.5	15.5	17.6	19.1	23.6	31.4	44.6	37.6
37	48.0	.0	44.5	17.1	21.2	24.5	28.6	37.1	49.1	40.8
38	28.0	.0	44.5	17.6	22.4	26.5	31.5	41.0	53.0	43.0
39	11.0	.0	44.5	17.9	24.2	29.0	34.8	44.5	56.3	45.1
transport [gr/s/m ²]				.023	.139	.781	1.836	3.909	.582	(.03
filtersnelheid [mm/s]				1.25	2.53	3.76	4.98	6.19	6.18	4.61
gemiddeld verhang [-]				.05	.11	.16	.19	.24	.20	.13

Tabel 2 Gemeten stijghoogten in het filter

Proefnummer 1

		stapnr											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
buisnr	koordinaten												
	x	y	z										
[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	
1	93.5	50.0	10.0	14.4	14.9	15.4	16.0	16.4	16.8	17.1	17.2	16.2	15.1
2	71.0	50.0	10.0	15.7	17.4	19.3	21.4	24.2	27.6	30.7	30.9	29.2	21.4
3	48.0	50.0	10.0	17.2	20.2	24.1	28.5	35.5	43.2	55.2	74.8	56.1	35.2
4	29.5	50.0	10.0	18.5	22.4	27.6	33.3	41.7	50.6	63.8	83.5	61.6	38.1
5	6.5	50.0	10.0	19.2	23.9	30.2	36.7	45.9	55.6	69.1	88.7	65.0	39.6
6	93.5	50.0	.0	14.6	15.1	15.7	16.3	16.8	17.2	17.5	17.8	16.6	15.5
7	71.0	50.0	.0	15.7	16.3	19.2	21.2	23.6	26.4	29.4	34.3	27.3	20.5
8	48.0	50.0	.0	16.8	19.6	23.4	27.5	34.1	41.5	53.1	72.3	54.5	34.6
9	29.5	50.0	.0	18.2	22.2	27.2	32.8	40.9	50.0	62.8	82.6	61.0	37.6
10	6.5	50.0	.0	19.0	23.8	30.0	36.5	45.5	55.2	68.6	88.1	64.6	39.5
11	88.0	.0	4.5	14.9	15.8	17.0	18.1	20.0	23.2	29.8	35.2	27.6	20.7
12	68.0	.0	4.5	16.0	17.7	20.2	22.9	27.8	33.3	43.1	60.0	46.6	30.1
13	48.0	.0	4.5	17.4	20.5	24.5	28.8	35.7	43.5	55.2	74.3	55.8	35.2
14	28.0	.0	4.5	18.4	22.4	27.7	33.3	41.7	51.0	64.0	83.6	61.9	38.3
15	11.0	.0	4.5	18.8	23.5	29.5	35.8	44.6	54.3	67.6	87.1	64.0	39.1
16	88.0	5.0	9.5	14.8	15.7	16.9	18.1	20.0	24.3	29.0	32.4	25.8	19.6
17	88.0	.0	14.5	15.3	16.4	17.7	18.8	20.6	24.1	29.5	34.9	27.9	20.9
18	68.0	.0	14.5	16.2	17.3	21.0	23.8	28.3	34.5	44.6	61.8	48.0	31.1
19	48.0	.0	14.5	17.4	20.5	24.7	29.5	36.7	44.8	57.1	76.3	57.1	35.8
20	28.0	.0	14.5	18.3	22.2	27.5	33.0	41.4	50.2	63.2	82.8	61.3	37.8
21	11.0	.0	14.5	18.8	23.5	29.3	35.6	44.6	54.1	67.3	86.0	63.8	39.1
22	88.0	5.0	19.5	15.4	16.7	18.2	20.5	22.9	26.4	33.6	46.6	38.8	26.9
23	88.0	.0	24.5	15.2	16.4	17.8	19.3	22.0	25.4	32.3	49.6	40.2	27.5
24	68.0	.0	24.5	16.5	18.6	21.3	24.1	29.4	36.6	46.6	64.0	49.1	32.1
25	48.0	.0	24.5	17.3	20.3	24.5	29.0	36.5	44.7	57.1	76.7	57.3	36.0
26	28.0	.0	24.5	18.5	22.4	27.6	33.4	41.8	51.1	64.2	83.9	62.0	38.2
27	11.0	.0	24.5	19.4	23.9	29.9	36.5	45.3	54.9	68.2	87.8	64.6	39.7
28	88.0	5.0	29.5	15.2	16.3	17.7	19.1	21.4	25.1	30.6	38.0	30.5	22.2
29	88.0	.0	34.5	15.1	16.2	17.4	19.0	21.1	23.2	28.8	37.4	30.2	22.2
30	68.0	.0	34.5	16.4	18.5	21.4	24.8	30.7	37.8	43.7	67.6	51.8	33.5
31	48.0	.0	34.5	17.6	20.7	24.9	29.6	37.2	45.8	58.5	78.3	58.6	36.8
32	28.0	.0	34.5	18.5	22.4	27.6	33.4	41.8	51.5	64.2	84.0	62.1	38.4
33	11.0	.0	34.5	19.3	23.9	30.0	36.4	45.5	55.1	68.3	88.0	64.6	39.7
34	88.0	5.0	39.5	15.1	16.1	17.5	19.2	22.3	25.9	31.6	39.4	31.6	23.0
35	88.0	.0	44.5	15.0	16.0	17.3	19.0	23.1	28.8	33.9	51.5	40.6	27.7
36	68.0	.0	44.5	16.2	17.1	21.0	24.5	30.7	33.1	49.4	68.3	52.3	33.8
37	48.0	.0	44.5	17.8	20.9	25.0	29.8	37.2	45.8	58.5	78.3	58.7	36.8
38	28.0	.0	44.5	18.6	22.7	28.0	34.0	42.4	51.7	65.0	84.8	62.4	38.5
39	11.0	.0	44.5	19.2	23.8	29.8	36.2	45.1	55.1	68.5	88.3	64.7	39.9
transport [gr/s/m ²]	(.03	(.03	.036	.055	.168	.725	.451	.727	(.03	(.03			
filtersnelheid [mm/s]	2.93	4.84	6.87	8.49	9.95	11.10	12.03	12.37	9.21	5.77			
gemiddeld verhang [-]													
verhang benedenstrooms [-]	.05	.12	.18	.25	.41	.60	.80	.90	.70	.35			
verhang bovenstrooms [-]	.05	.09	.14	.18	.21	.22	.24	.23	.15	.09			

Tabel 3 Gemeten stijghoogten in het filter

Proefnummer 2

		stapnr			1	2	3	4	5	6	7	8
buisnr	koordinaten											
	x	y	z									
[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
1	93.5	50.0	10.0	14.1	14.4	14.7	15.1	15.5	15.8	15.8	14.8	
2	71.0	50.0	10.0	15.3	16.6	18.1	20.0	23.2	26.9	23.5	19.0	
3	48.0	50.0	10.0	16.8	19.4	22.9	26.7	32.6	38.5	32.1	23.3	
4	29.5	50.0	10.0	17.4	22.4	26.8	32.4	41.6	50.7	40.8	27.8	
5	6.5	50.0	10.0	19.0	23.6	28.7	35.0	45.1	55.2	44.2	29.1	
6	93.5	50.0	.0	14.2	14.5	14.8	15.2	15.7	16.0	15.7	15.1	
7	71.0	50.0	.0	15.7	17.3	18.9	21.0	22.1	23.9	22.1	18.2	
8	48.0	50.0	.0	16.5	18.9	22.1	25.6	29.8	34.6	29.1	21.7	
9	29.5	50.0	.0	18.5	22.7	27.4	32.5	41.0	48.8	39.5	27.1	
10	6.5	50.0	.0	18.9	23.5	28.6	34.8	44.9	55.1	44.2	29.5	
11	88.0	.0	4.5	14.9	15.8	17.3	18.7	20.7	22.7	19.9	17.0	
12	68.0	.0	4.5	15.2	16.7	19.0	21.7	24.6	29.1	23.8	18.8	
13	48.0	.0	4.5	17.3	20.0	22.5	25.5	30.8	37.4	30.8	22.5	
14	28.0	.0	4.5	18.0	21.6	25.7	31.0	39.1	46.7	38.2	26.4	
15	11.0	.0	4.5	18.7	23.3	28.4	34.5	44.4	54.3	43.5	29.1	
16	88.0	5.0	9.5	14.6	15.3	16.5	17.6	19.7	21.3	19.0	16.5	
17	88.0	.0	14.5	14.8	15.5	16.5	17.8	19.6	21.5	19.2	16.7	
18	68.0	.0	14.5	15.4	16.9	18.8	21.3	24.2	29.2	24.9	19.5	
19	48.0	.0	14.5	16.5	19.2	22.4	26.5	33.8	40.4	33.4	23.8	
20	28.0	.0	14.5	17.6	21.0	25.0	29.8	38.4	46.5	37.6	26.2	
21	11.0	.0	14.5	18.7	23.4	28.6	34.4	44.6	54.6	43.7	29.3	
22	88.0	5.0	19.5	14.7	15.5	16.5	17.5	18.9	20.7	18.8	16.5	
23	88.0	.0	24.5	14.3	14.9	15.7	16.6	18.2	20.3	18.3	16.3	
24	68.0	.0	24.5	15.5	16.9	18.4	20.7	24.4	28.6	24.8	19.6	
25	48.0	.0	24.5	16.4	19.1	22.4	26.5	33.8	40.5	33.4	23.9	
26	28.0	.0	24.5	17.6	21.4	25.8	31.4	40.6	50.0	40.2	27.5	
27	11.0	.0	24.5	18.9	23.4	28.6	34.6	44.5	54.5	44.0	29.6	
28	88.0	5.0	29.5	14.7	15.6	16.8	18.0	20.2	22.4	20.6	17.6	
29	88.0	.0	34.5	14.6	15.5	16.5	17.8	20.1	22.8	20.7	17.5	
30	68.0	.0	34.5	15.6	17.0	18.6	21.1	25.0	29.7	25.4	19.9	
31	48.0	.0	34.5	16.5	19.1	22.4	26.7	33.6	41.1	34.0	24.2	
32	28.0	.0	34.5	17.5	20.7	24.5	29.4	38.0	46.8	38.3	26.5	
33	11.0	.0	34.5	18.9	23.4	28.5	34.5	44.4	54.5	43.8	29.4	
34	88.0	5.0	39.5	14.9	15.7	16.6	18.0	20.3	23.6	21.1	17.7	
35	88.0	.0	44.5	15.0	15.9	17.0	18.8	21.5	25.0	22.1	18.4	
36	68.0	.0	44.5	15.6	17.1	19.0	21.9	26.4	31.6	26.9	20.8	
37	48.0	.0	44.5	17.0	19.6	21.6	26.8	34.3	41.9	34.9	24.8	
38	28.0	.0	44.5	17.8	21.6	25.2	30.6	39.7	49.0	40.0	27.4	
39	11.0	.0	44.5	19.0	23.4	28.4	34.5	44.5	54.8	44.1	29.5	
transport [gr/s/m ²]	.014	.189	1.130	3.062	7.200	8.978	.03	.03				
filtersnelheid [mm/s]	2.01	3.55	5.25	6.93	9.41	11.39	9.84	6.61				
gemiddeld verhang [-]	.06	.11	.17	.25	.38	.49	.35	.18				

Tabel 4 Gemeten stijghoogten in het filter

Proefnummer 3

		stapnr									
buisnr	koordinaten			1	2	3	4	5	6	7	8
	[-]	x [cm]	y [cm]	z [cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
1	93.5	50.0	10.0	14.1	14.6	15.0	15.6	16.1	16.5	16.0	15.1
2	71.0	50.0	10.0	15.7	17.5	19.3	21.1	24.1	27.4	23.8	19.0
3	48.0	50.0	10.0	17.0	19.9	23.0	25.1	32.5	40.2	34.2	24.4
4	29.5	50.0	10.0	17.6	21.4	25.5	30.2	39.1	48.7	39.7	27.2
5	6.5	50.0	10.0	19.1	23.7	28.8	34.4	45.0	55.8	45.0	29.9
6	93.5	50.0	.0	19.2	14.7	15.1	15.5	15.9	16.4	15.9	15.1
7	71.0	50.0	.0	14.6	17.3	19.0	20.5	23.0	25.9	22.8	18.5
8	48.0	50.0	.0	17.1	20.0	23.1	25.9	31.8	38.8	32.8	23.6
9	29.5	50.0	.0	17.8	21.2	25.2	28.9	36.8	45.2	37.2	25.9
10	6.5	50.0	.0	19.0	23.7	29.1	34.5	45.1	56.5	45.5	30.1
11	88.0	.0	4.5	15.0	16.1	17.4	18.6	21.2	23.4	20.7	17.4
12	68.0	.0	4.5	15.8	17.7	20.0	21.9	26.0	30.2	25.7	19.5
13	48.0	.0	4.5	17.1	19.9	23.7	25.3	31.6	38.9	32.2	23.1
14	28.0	.0	4.5	18.3	22.1	26.5	30.8	40.1	50.4	40.9	27.8
15	11.0	.0	4.5	18.8	23.5	28.7	33.7	44.6	55.5	44.6	29.7
16	88.0	5.0	9.5	14.8	15.7	16.7	17.7	20.1	22.2	19.7	17.0
17	88.0	.0	14.5	15.0	15.9	17.0	18.1	20.3	22.4	20.1	17.1
18	68.0	.0	14.5	15.7	17.6	19.6	21.7	26.2	30.7	26.3	20.3
19	48.0	.0	14.5	17.0	20.0	23.5	26.8	34.5	42.5	35.1	24.6
20	28.0	.0	14.5	18.1	21.8	26.3	30.7	40.4	50.0	40.8	27.8
21	11.0	.0	14.5	18.7	23.3	28.5	33.3	44.2	55.1	44.3	29.5
22	88.0	5.0	19.5	15.0	16.0	17.1	18.2	20.4	22.7	20.4	17.2
23	88.0	.0	24.5	15.0	16.1	17.4	18.7	21.2	23.7	21.1	17.7
24	68.0	.0	24.5	15.9	17.8	19.8	22.0	26.7	31.8	27.1	20.6
25	48.0	.0	24.5	17.0	19.9	23.3	26.8	34.9	43.4	36.0	25.2
26	28.0	.0	24.5	17.9	21.7	26.2	30.4	40.3	50.3	40.9	27.8
27	11.0	.0	24.5	19.1	23.6	28.7	33.5	44.5	55.5	44.8	29.9
28	88.0	5.0	29.5	15.2	16.3	17.6	18.9	21.9	25.0	22.3	18.5
29	88.0	.0	34.5	15.2	16.3	17.6	19.0	22.2	25.2	22.3	18.3
30	68.0	.0	34.5	15.9	17.7	20.0	22.1	27.7	33.8	28.7	21.6
31	48.0	.0	34.5	17.0	20.0	23.4	26.7	34.8	43.9	36.1	25.2
32	28.0	.0	34.5	17.9	21.5	25.8	29.9	39.9	50.3	40.3	27.7
33	11.0	.0	34.5	19.0	23.4	28.6	33.3	44.4	55.2	44.7	29.8
34	88.0	5.0	39.5	15.2	16.4	17.9	19.2	22.5	26.2	23.2	18.8
35	88.0	.0	44.5	15.1	16.2	17.5	18.8	22.2	25.9	22.9	18.6
36	68.0	.0	44.5	16.0	17.8	20.1	22.4	28.3	34.8	29.6	22.0
37	48.0	.0	44.5	17.3	20.3	23.7	27.3	36.0	45.4	37.5	26.1
38	28.0	.0	44.5	17.8	21.4	25.6	29.6	39.7	50.0	40.7	27.6
39	11.0	.0	44.5	18.9	23.2	28.4	33.1	44.2	55.3	44.6	29.7
transport [gr/s/m2]				1.03	1.110	1.020	2.490	7.810	7.480	1.03	1.03
filtersnelheid [mm/s]				2.02	3.73	5.52	6.98	9.12	10.69	9.02	5.89
gemiddeld verhang [-]				.06	.10	.16	.22	.35	.47	.35	.18

Tabel 5 Gemeten stijghoogten in het filter

Proefnummer 4

		stapnr											
buisnr	koordinaten			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	x	y	z										
[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
1	93.5	50.0	10.0	14.0	14.4	14.8	15.1	15.6	15.7	15.0	16.3	15.3	14.6
2	71.0	50.0	10.0	16.5	19.4	23.4	28.0	34.4	42.7	38.5	57.6	39.5	27.3
3	48.0	50.0	10.0	18.4	23.0	29.1	36.1	45.0	55.6	37.9	73.1	48.6	32.3
4	29.5	50.0	10.0	20.4	27.0	35.3	44.4	55.2	67.2	44.6	86.4	56.6	36.9
5	6.5	50.0	10.0	21.7	29.2	38.6	48.7	60.4	73.1	48.2	93.1	60.8	39.4
6	93.5	50.0	.0	15.1	14.5	15.0	15.3	15.8	15.8	15.1	16.1	15.2	14.6
7	71.0	50.0	.0	16.7	19.6	23.4	28.3	34.4	43.0	30.5	56.8	39.0	27.0
8	48.0	50.0	.0	18.2	22.7	28.6	35.2	43.7	53.8	37.0	71.4	47.6	31.9
9	29.5	50.0	.0	20.4	27.0	35.0	44.0	54.8	66.7	44.3	85.8	56.3	36.6
10	6.5	50.0	.0	21.5	29.3	38.7	48.7	60.4	73.0	48.0	91.9	60.5	39.3
11	88.0	.0	4.5	16.1	18.5	21.6	26.0	32.2	39.5	28.8	51.7	35.4	24.9
12	68.0	.0	4.5	17.8	22.2	27.7	34.3	42.5	52.1	36.2	66.9	45.2	30.7
13	48.0	.0	4.5	18.7	23.7	29.9	37.1	46.6	57.0	38.7	73.3	48.8	32.5
14	28.0	.0	4.5	20.0	26.2	33.8	42.1	52.7	64.1	43.0	80.6	53.3	35.4
15	11.0	.0	4.5	21.4	28.8	38.0	47.9	59.6	72.3	47.6	92.1	60.2	39.0
16	88.0	5.0	9.5	16.0	17.7	28.6	24.6	30.4	37.1	27.9	50.8	35.0	24.8
17	88.0	.0	14.5	15.8	17.8	20.3	24.4	30.5	36.8	27.3	49.6	33.7	23.8
18	68.0	.0	14.5	17.3	20.9	25.8	32.1	40.6	50.2	34.8	65.2	44.1	29.1
19	48.0	.0	14.5	18.5	23.4	29.7	37.0	46.2	56.7	38.7	73.3	48.9	32.3
20	28.0	.0	14.5	20.1	26.3	34.3	42.9	53.8	65.7	43.5	84.6	55.6	36.1
21	11.0	.0	14.5	21.7	29.3	44.0	49.1	60.7	73.7	48.5	93.5	61.0	39.5
22	88.0	5.0	19.5	15.5	17.4	20.0	24.2	30.1	37.7	27.8	50.4	34.9	24.5
23	88.0	.0	24.5	15.7	17.5	20.2	24.4	30.9	38.9	28.3	52.7	36.1	25.1
24	68.0	.0	24.5	16.8	19.8	23.7	29.3	37.6	47.9	33.5	62.9	42.5	28.6
25	48.0	.0	24.5	18.5	23.1	29.4	36.6	46.0	57.0	38.6	74.3	49.4	32.7
26	28.0	.0	24.5	20.2	26.3	34.2	43.0	53.7	65.6	43.7	85.1	55.8	36.3
27	11.0	.0	24.5	21.6	29.3	38.6	48.6	60.4	73.0	47.5	93.4	61.0	39.7
28	88.0	5.0	29.5	16.0	17.9	20.3	24.5	31.6	39.1	28.6	54.2	37.2	25.6
29	88.0	.0	34.5	15.3	16.6	18.2	24.3	30.5	38.1	28.0	53.0	36.3	25.0
30	68.0	.0	34.5	16.8	20.0	24.0	29.7	38.2	44.5	33.1	62.6	42.1	28.3
31	48.0	.0	34.5	18.6	23.4	29.4	36.8	46.1	57.0	38.7	74.4	49.4	32.6
32	28.0	.0	34.5	20.5	27.0	35.1	44.0	54.8	66.7	44.4	85.5	56.2	36.7
33	11.0	.0	34.5	21.7	29.6	39.0	49.1	60.7	73.2	48.5	93.2	61.0	39.6
34	88.0	5.0	39.5	15.2	16.6	18.1	23.1	29.4	37.3	27.4	51.3	34.9	24.0
35	88.0	.0	44.5	15.2	16.7	18.1	22.8	29.0	36.8	27.1	51.4	34.9	24.1
36	68.0	.0	44.5	17.1	20.4	24.6	30.4	38.1	46.7	33.0	61.6	41.7	28.2
37	48.0	.0	44.5	18.7	23.4	29.2	36.1	45.0	55.5	38.0	73.5	49.1	32.8
38	28.0	.0	44.5	20.5	27.0	35.1	44.2	54.9	67.0	44.6	85.8	56.6	37.0
39	11.0	.0	44.5	21.7	29.5	38.8	48.9	60.7	73.3	48.5	92.6	61.0	39.6
transport [gr/s/m2]				.03	.03	.060	.090	.230	.220	.03	.350	.03	.03
filtersnelheid [mm/s]				.80	1.53	2.40	3.15	3.78	4.31	2.92	4.81	3.37	2.23
gemiddeld verhang [-]				.08	.15	.24	.31	.37	.42	.24	.52	.31	.19

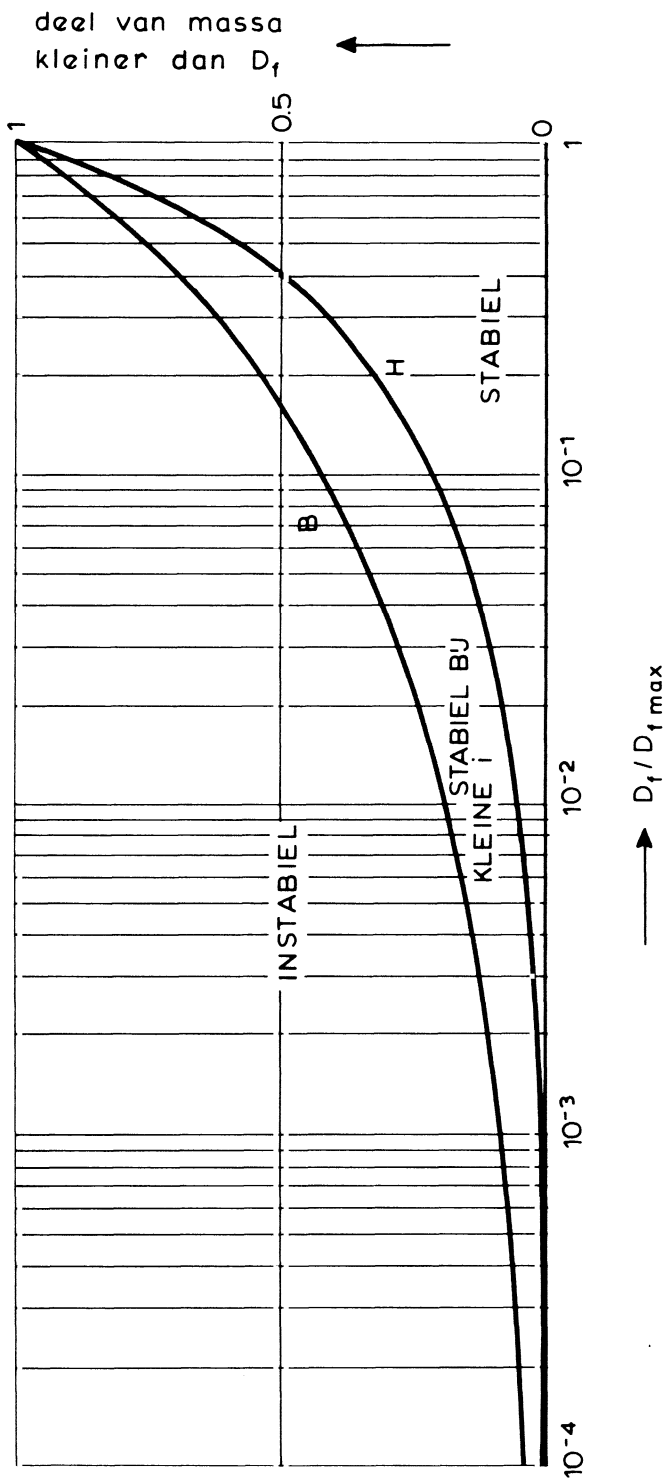
Tabel 6 Gemeten stijghoogten in het filter

Proefnummer 5

		stapnr									
buisnr	koordinaten			1	2	3	4	5	6	7	8
	x	y	z								
[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
1	93.5	50.0	10.0	14.7	15.4	16.5	17.0	16.0	20.4	18.8	16.4
2	71.0	50.0	10.0	20.3	25.6	30.2	36.1	41.6	53.1	43.6	28.7
3	48.0	50.0	10.0	23.0	30.1	36.4	44.7	53.4	68.4	55.1	34.4
4	29.5	50.0	10.0	27.1	37.4	45.6	56.6	67.5	86.0	68.1	41.1
5	6.5	50.0	10.0	29.0	40.5	49.7	61.8	73.5	93.3	73.7	44.2
6	93.5	50.0	.0	14.8	15.6	16.4	16.9	17.8	18.8	17.7	15.8
7	71.0	50.0	.0	29.0	26.6	31.4	37.8	44.2	55.2	45.2	29.6
8	48.0	50.0	.0	23.0	30.1	36.4	44.7	53.4	68.4	55.1	34.4
9	29.5	50.0	.0	27.1	37.5	45.5	56.4	67.3	85.6	67.8	41.1
10	6.5	50.0	.0	28.9	40.4	49.7	61.6	73.2	92.7	73.3	44.0
11	88.0	.0	4.5	17.0	19.8	22.3	25.3	28.6	37.2	31.1	22.2
12	68.0	.0	4.5	21.3	27.6	32.6	39.2	47.3	57.9	46.8	30.3
13	48.0	.0	4.5	23.8	31.6	38.1	46.9	55.4	70.1	55.9	34.8
14	28.0	.0	4.5	26.5	36.1	43.8	54.4	64.7	82.0	65.1	39.6
15	11.0	.0	4.5	28.4	39.7	48.7	60.2	71.9	91.0	71.8	43.2
16	88.0	5.0	9.5	16.7	19.3	22.1	25.1	28.1	35.8	30.4	21.9
17	88.0	.0	14.5	17.0	19.7	22.5	25.9	29.3	36.9	31.2	22.3
18	68.0	.0	14.5	19.4	24.4	28.8	35.4	41.7	52.7	43.7	28.6
19	48.0	.0	14.5	23.5	31.3	38.0	47.0	55.9	72.3	57.9	35.6
20	28.0	.0	14.5	26.4	35.8	43.9	54.5	65.0	83.0	65.8	39.5
21	11.0	.0	14.5	28.3	39.4	48.4	59.9	71.6	90.8	71.6	43.0
22	88.0	5.0	19.5	17.0	19.6	22.3	25.9	29.2	36.7	31.1	22.3
23	88.0	.0	24.5	16.5	18.9	21.5	24.8	28.4	35.6	30.5	22.0
24	68.0	.0	24.5	19.4	24.3	29.0	35.3	42.3	54.2	44.4	28.9
25	48.0	.0	24.5	23.3	31.2	37.7	46.7	55.5	71.6	57.2	35.6
26	28.0	.0	24.5	26.2	35.8	43.6	54.2	65.1	83.7	65.6	40.0
27	11.0	.0	24.5	28.8	40.0	49.0	60.6	72.0	91.5	72.2	43.6
28	88.0	5.0	29.5	16.7	19.3	22.3	26.4	30.1	39.0	33.3	23.5
29	88.0	.0	34.5	16.4	18.8	21.4	25.3	29.7	38.6	37.7	23.0
30	68.0	.0	34.5	19.5	24.5	29.0	35.2	41.8	54.4	44.6	29.4
31	48.0	.0	34.5	23.6	31.2	38.0	46.9	56.0	73.1	58.4	36.2
32	28.0	.0	34.5	26.8	36.6	45.2	55.9	66.6	84.6	67.1	40.8
33	11.0	.0	34.5	28.7	39.7	48.9	60.6	72.0	91.7	72.5	43.7
34	88.0	5.0	39.5	17.0	19.3	21.9	26.0	30.7	39.5	33.5	23.9
35	88.0	.0	44.5	16.9	19.6	22.6	26.8	31.9	40.8	34.4	24.0
36	68.0	.0	44.5	20.3	25.7	30.6	37.6	44.6	59.2	48.3	31.1
37	48.0	.0	44.5	23.8	31.8	38.8	48.4	57.8	74.6	59.9	37.2
38	28.0	.0	44.5	27.0	37.0	45.5	56.6	67.6	85.8	68.4	41.4
39	11.0	.0	44.5	28.6	39.7	48.9	60.7	72.3	91.5	72.6	43.8
transport [gr/s/m ²]	(.03	.040	.040	.080	.110	.230	(.03	(.03			
filtersnelheid [mm/s]	1.51	2.53	3.26	3.99	4.61	5.52	4.42	2.72			
gemiddeld verhang [-]	.17	.29	.37	.47	.58	.75	.54	.28			

Tabel 7 Gemeten stijghoogten in het filter

Proefnummer 6

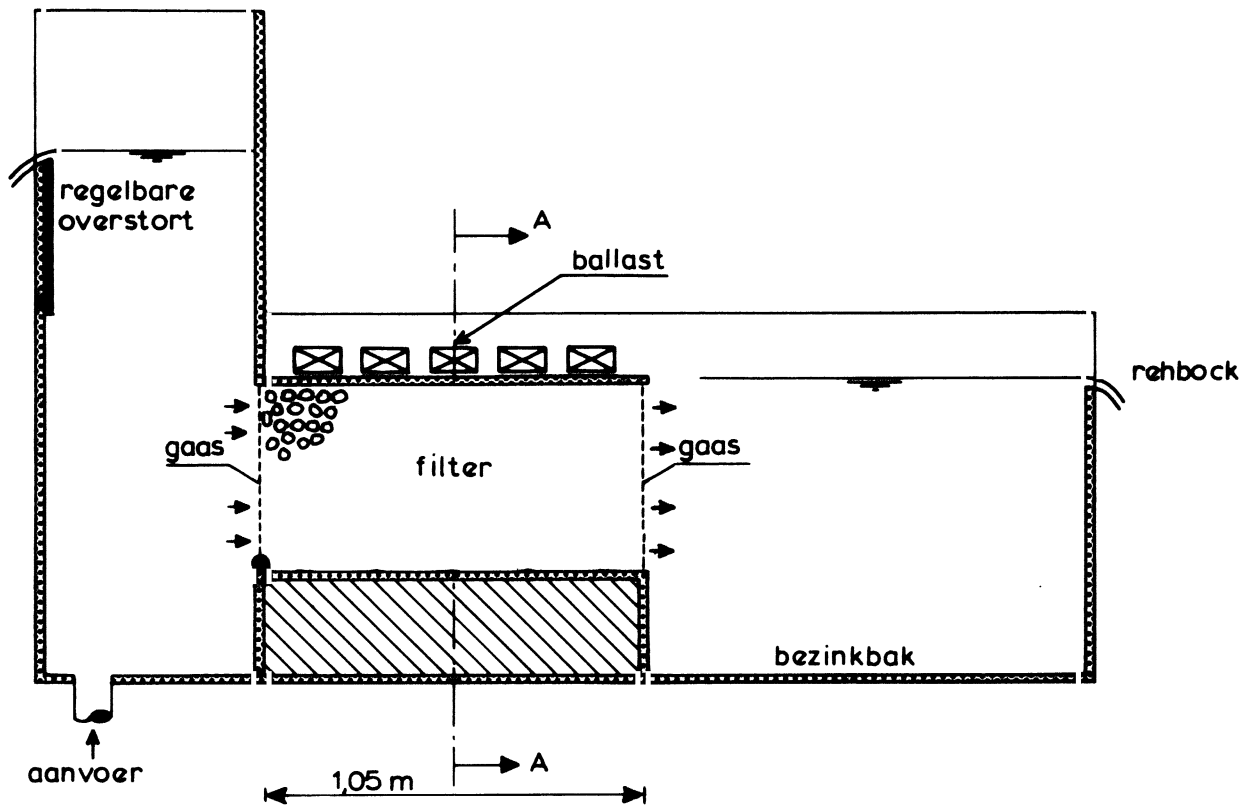


ONDER- EN BOVENGRENS VAN LUBOCHKOV

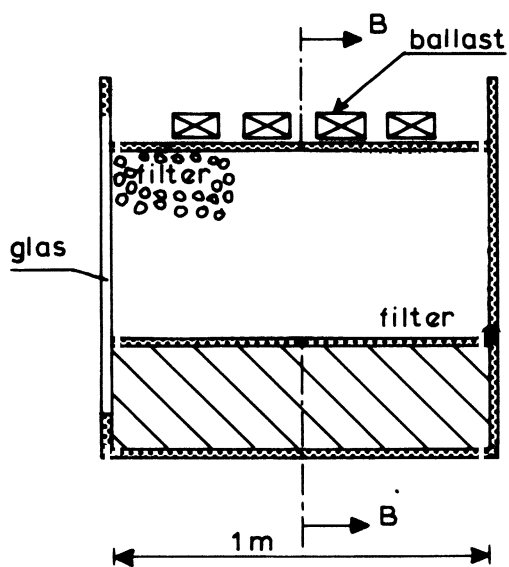
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 1



LANGSDOORSNEDE FILTERBAK
DSN B-B



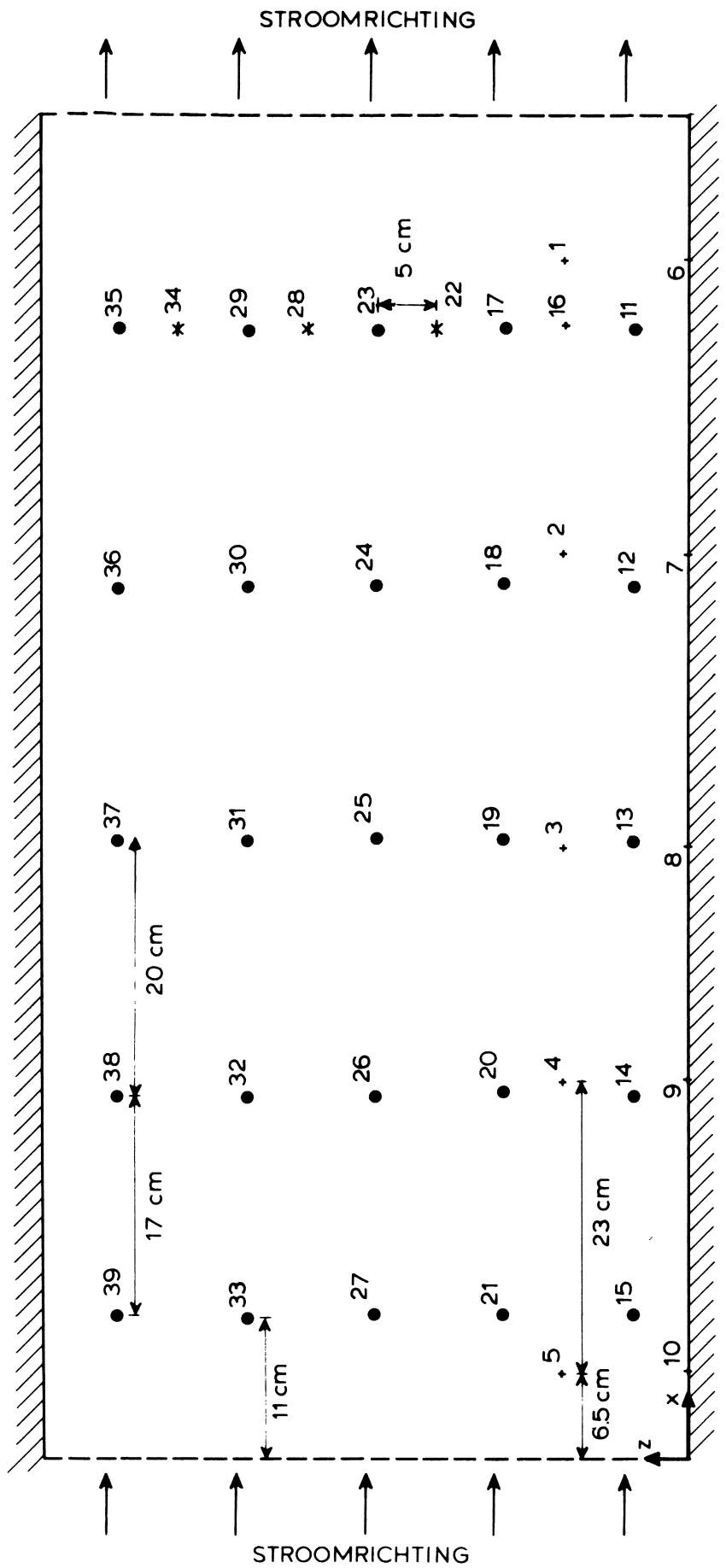
DWARSDOORSNEDE A-A

MODELOPSTELLING IN FILTERBAK
(SCHEMATISCH)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 3

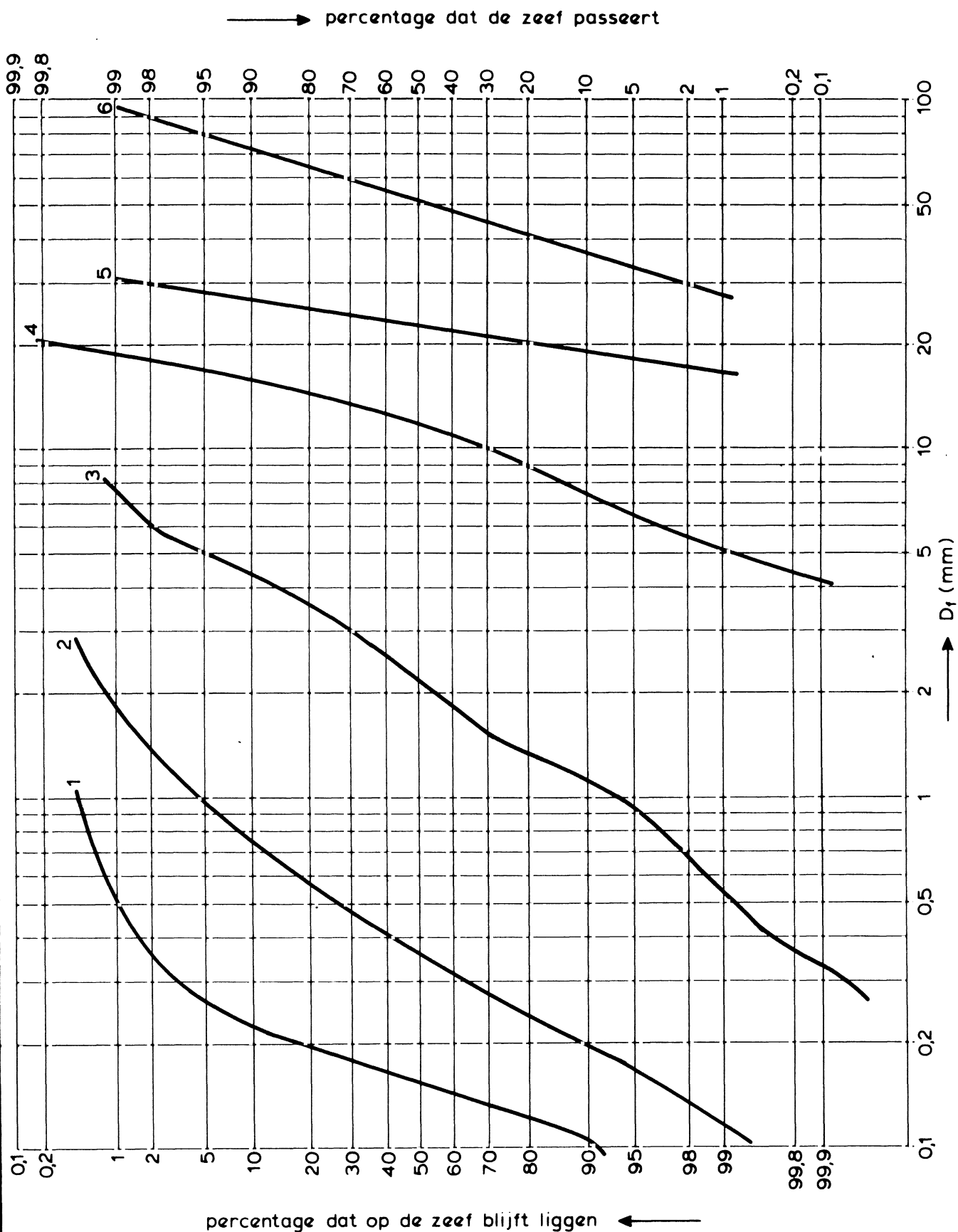


- stalenwand
- * stalenwand verlengd
- + in de bodem (1 cm links en rechts van de as)

SCHAAL 1:5

H 502

FIG. 4



ZEEFKROMMEN VAN GRINDFRAKTIES

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

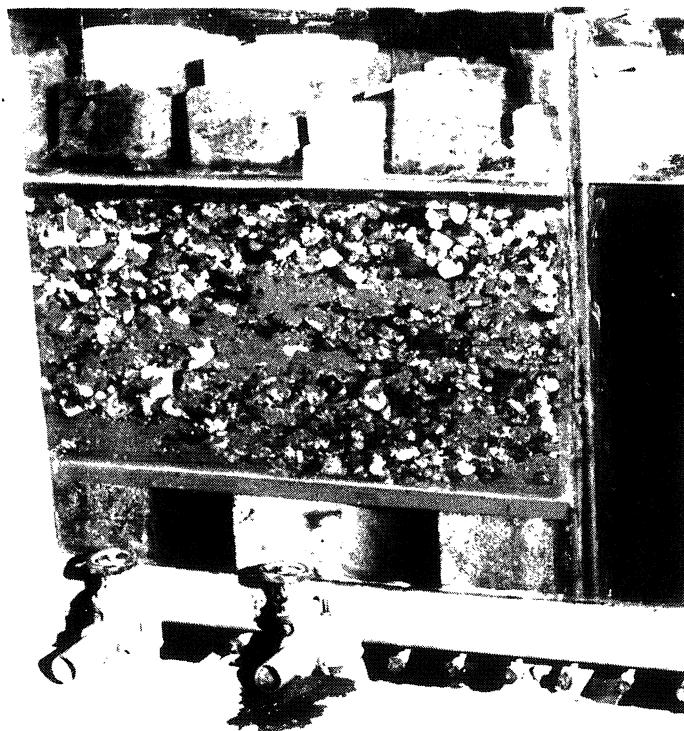
H 502

FIG. 5



T2

stroomrichting
→



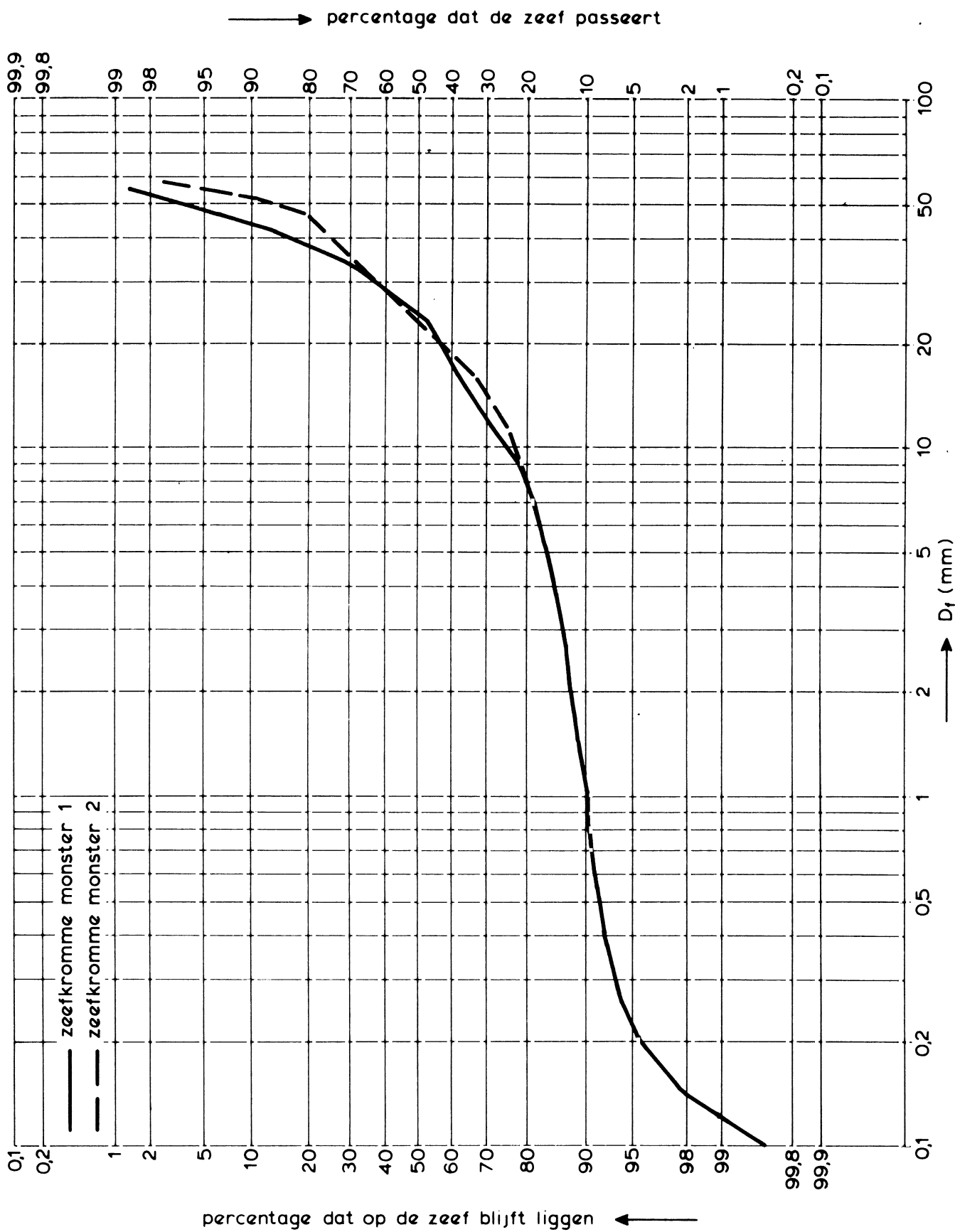
T3

FILTER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 6

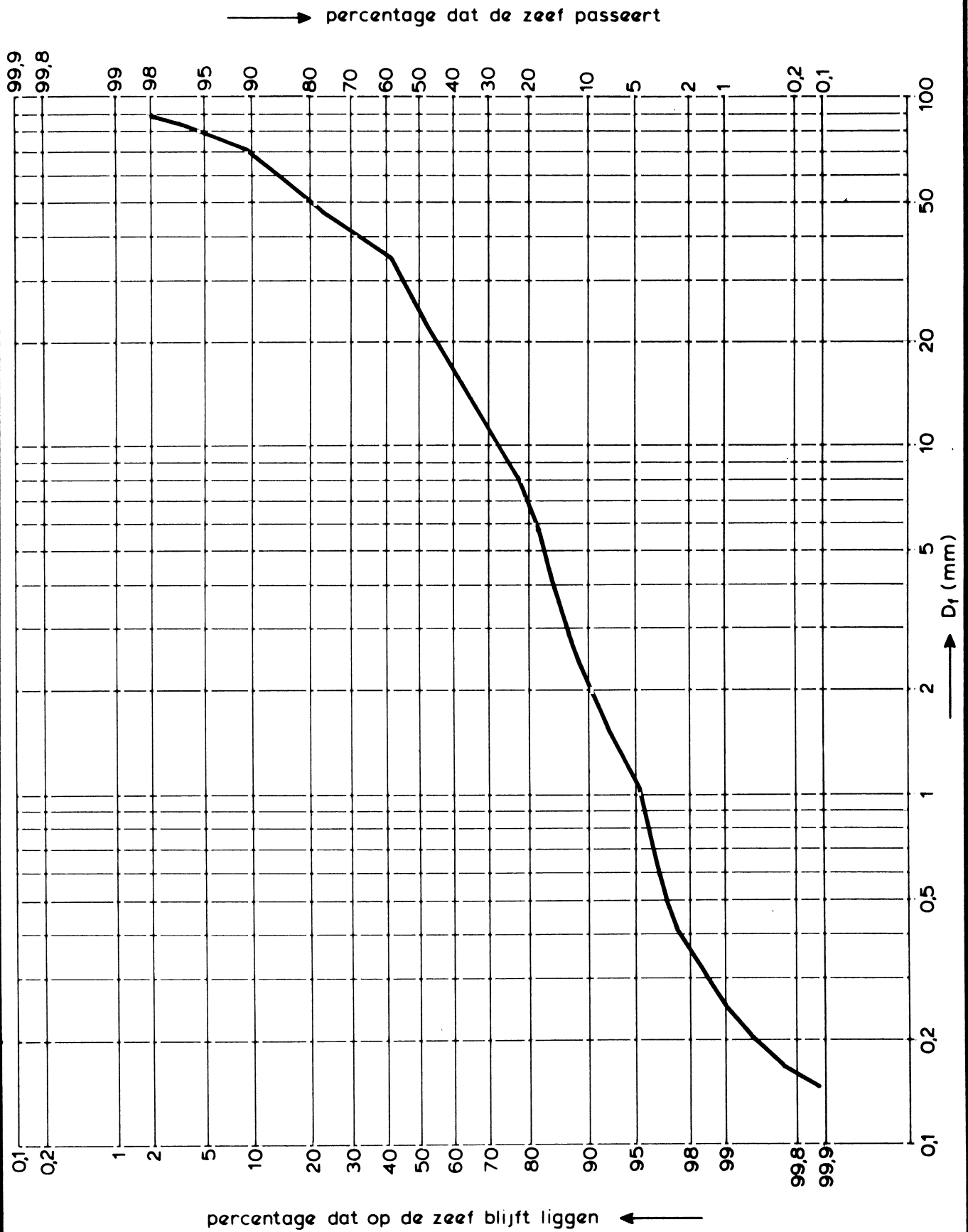


ZEEFKROMME VAN GRIND T1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 7

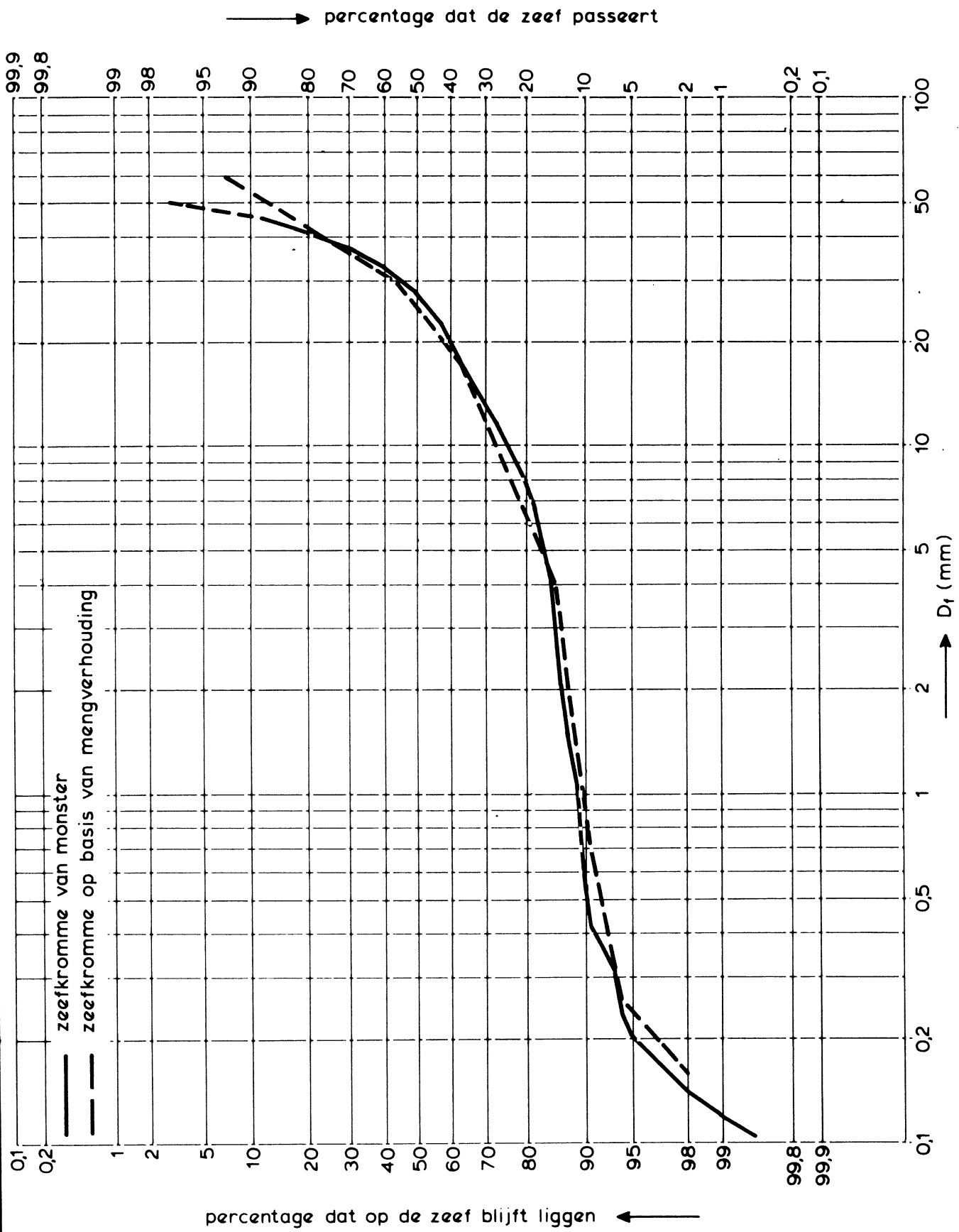


ZEEFKROMME VAN GRIND T2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 8

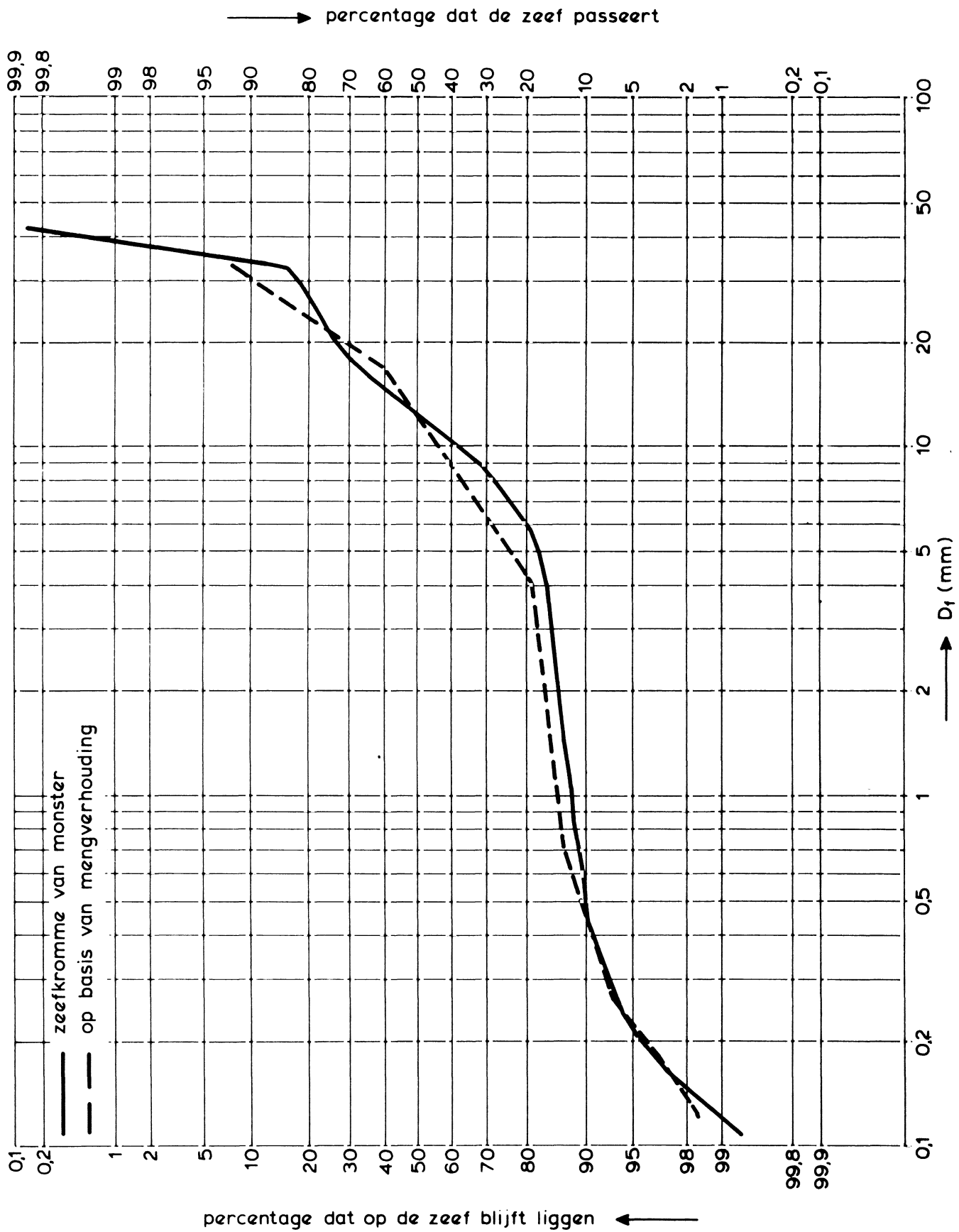


ZEEFKROMME VAN GRIND T3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 9

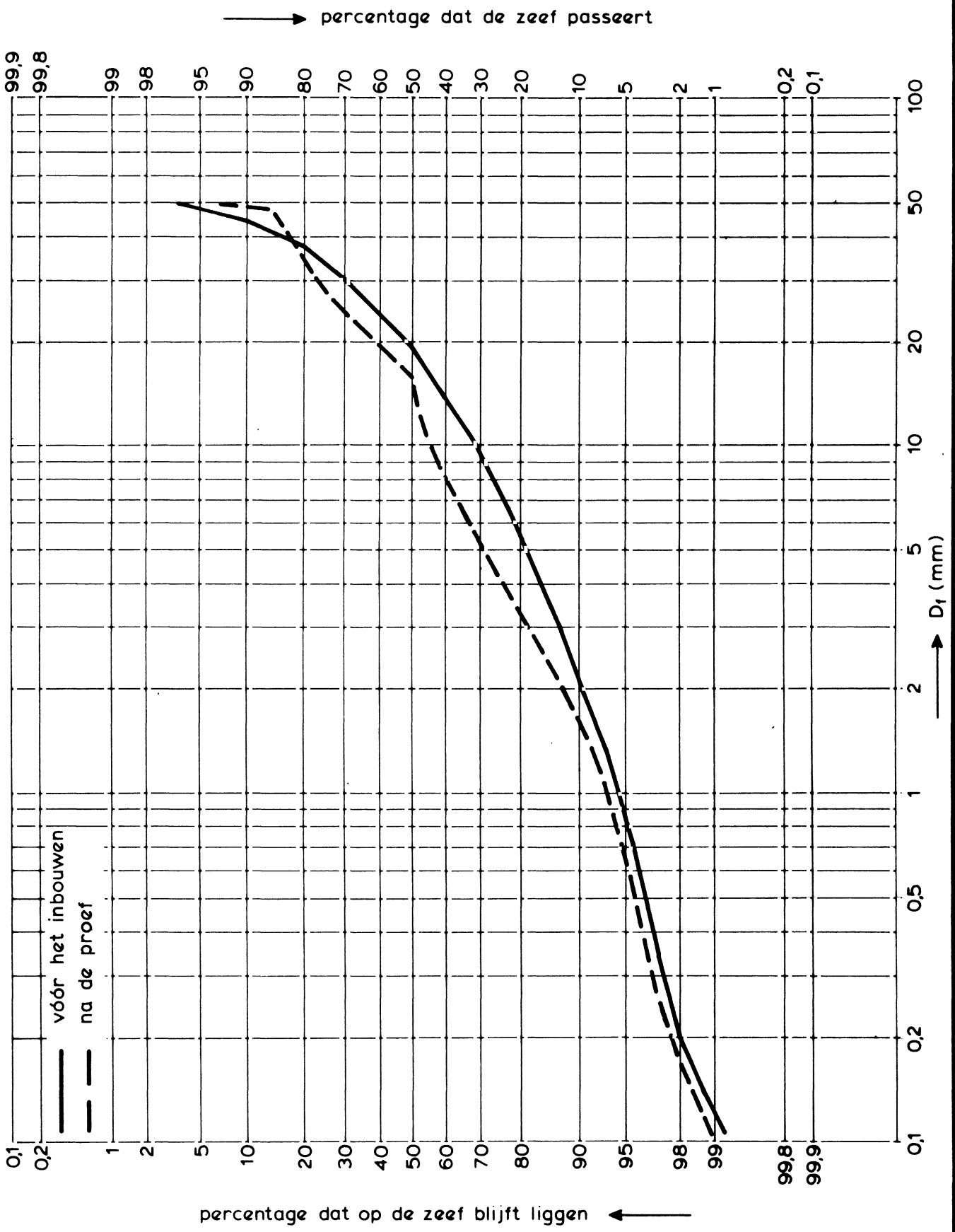


ZEEFKROMME VAN GRIND T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 10

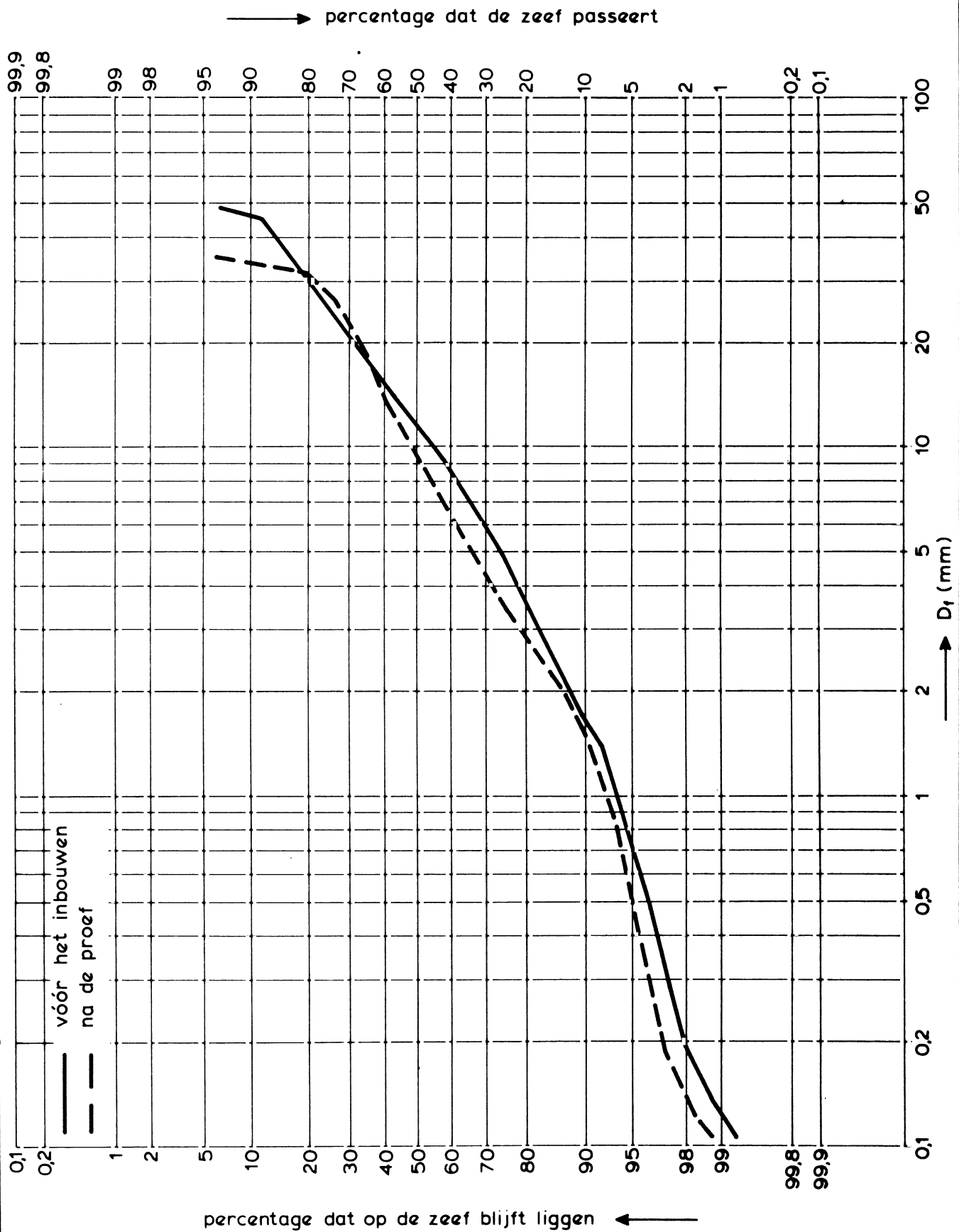


ZEEFKROMME VAN MUNSTEEN (T5)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 11



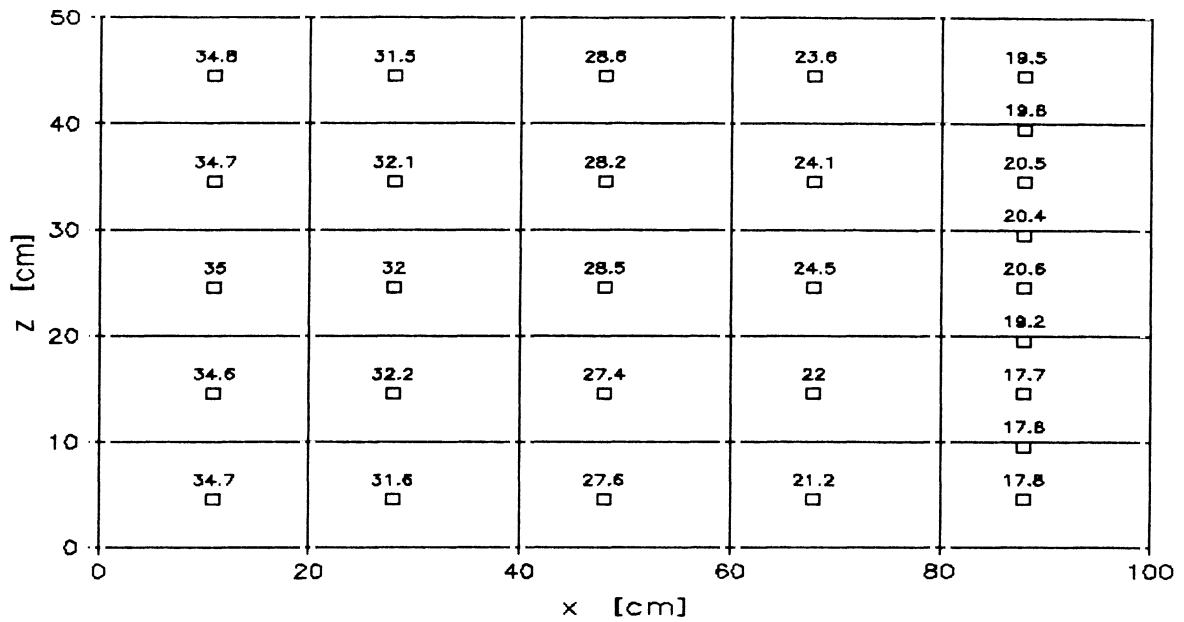
ZEEFKROMME VAN MIJNSTEEN T6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

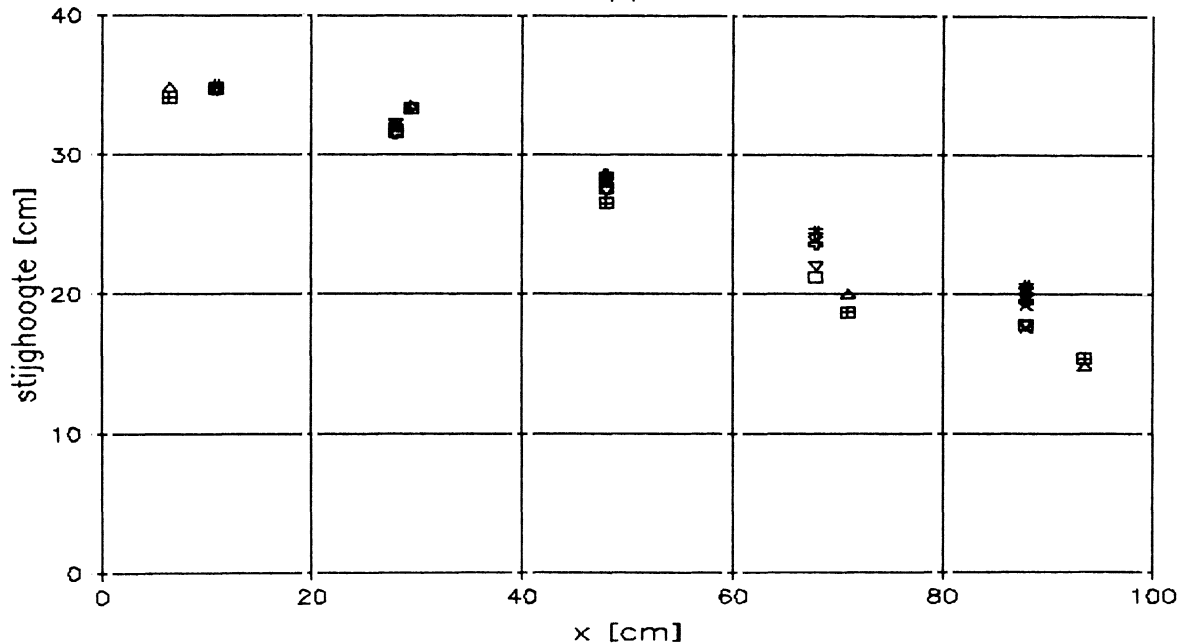
H 502

FIG. 12

GEMETEN STIJGHOOGTE T1 [cm] in wandvlak



STIJGHOOGTE a.f.v. plaats in stroomrichting T1



Δ ■ = middenvlak
 overige symbolen : wandvlak

GEMETEN STIJGHOOGTE T1, STAP 4

$v_f = 5,0 \text{ mm/s}$

$i = 0,19$

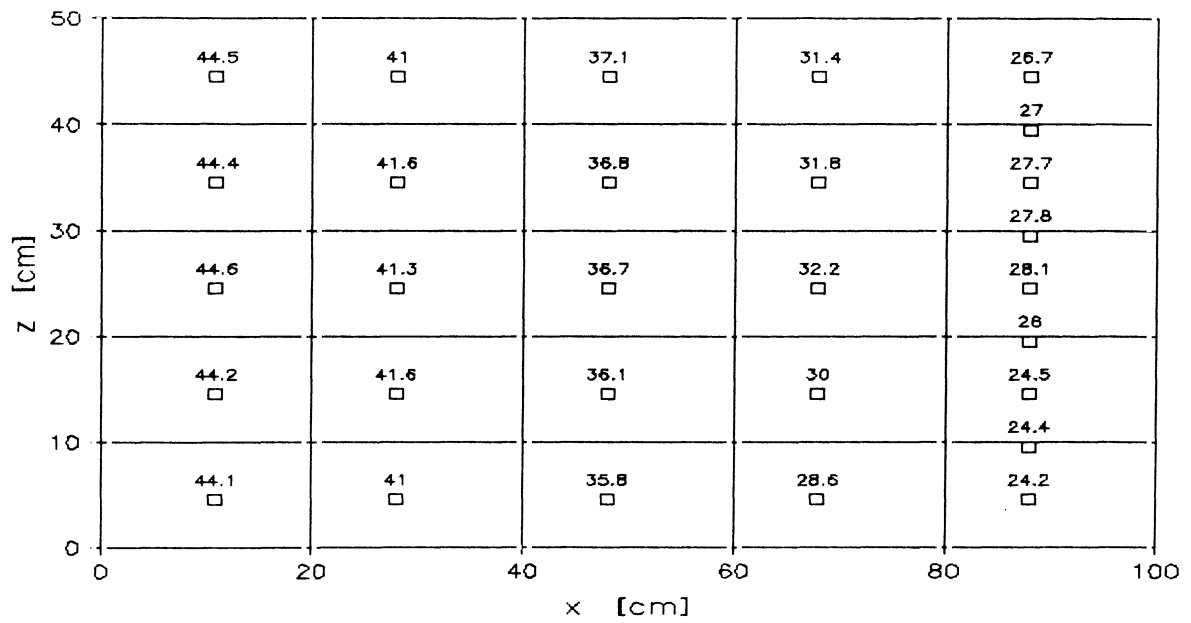
$s = 1,84 \text{ gr/s/m}^2$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

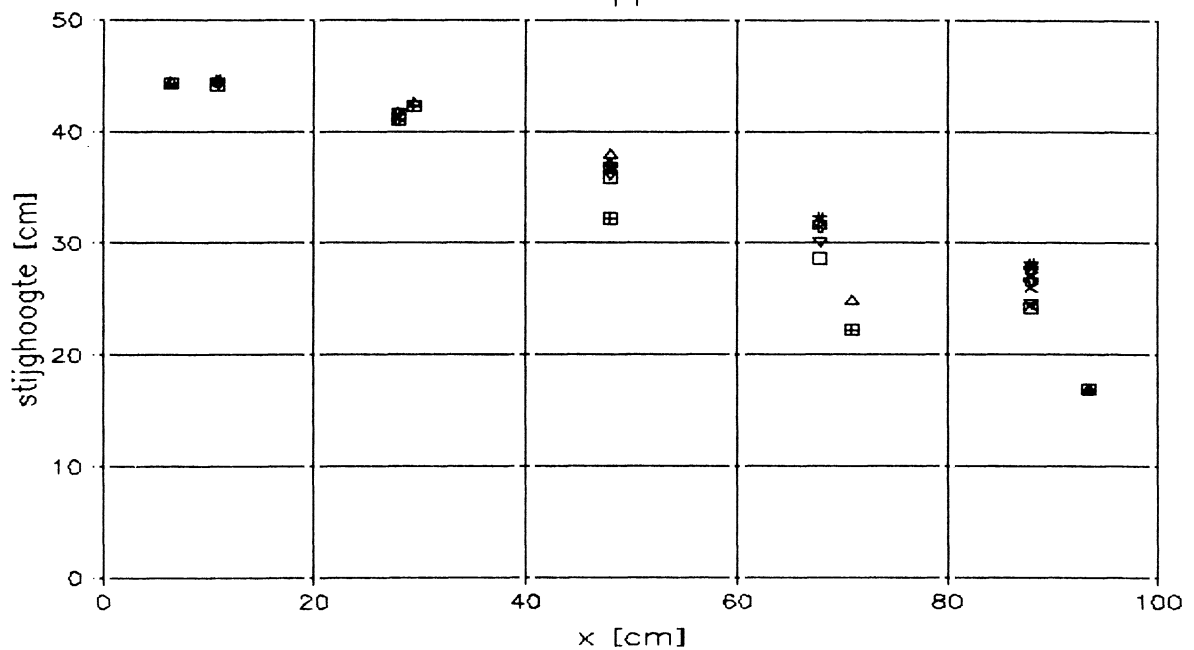
H 502

FIG. 13

GEMETEN STIJGHOOGTE T1 [cm] in wandvlak



STIJGHOOGTE a.f.v. plaats in stroomrichting T1



Δ \square = middenvlak
 overige symbolen : wandvlak

GEMETEN STIJGHOOGTE T1, STAP 5

$v_f = 6,18 \text{ mm/s}$

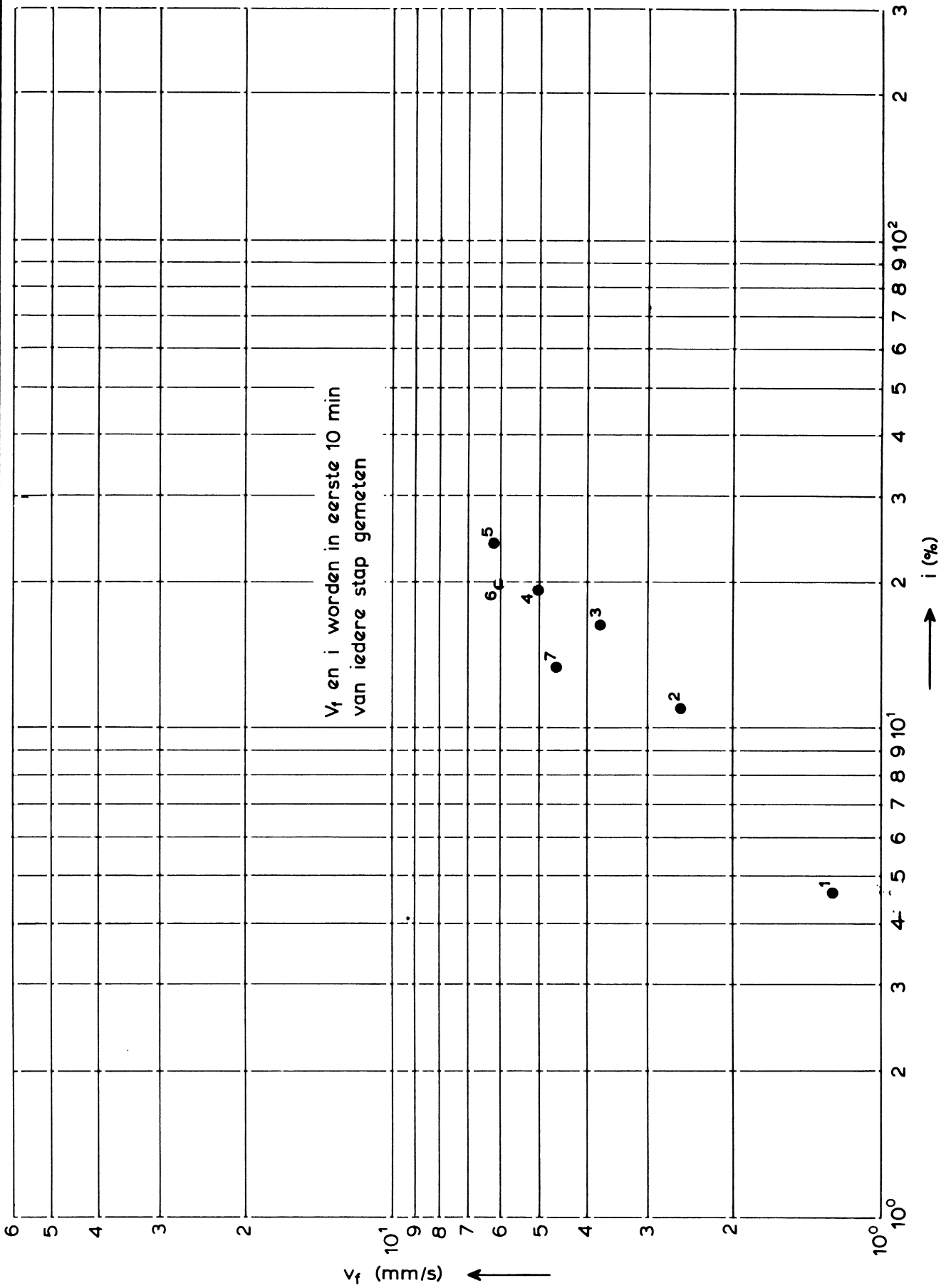
$\bar{i} = 0,24$

$s = 3,9 \text{ gr/s/m}^2$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 14



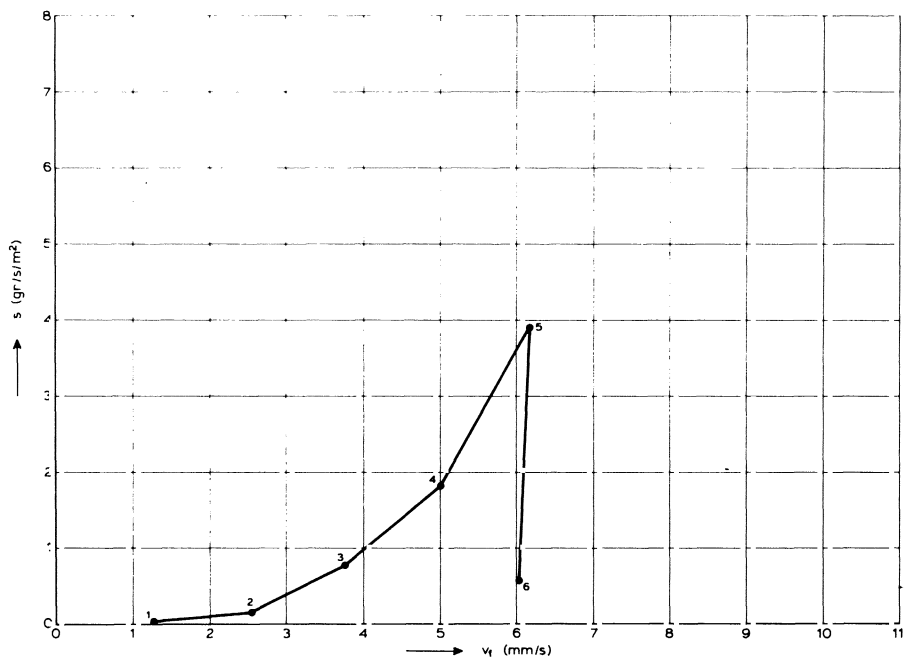
DOORLATENDHEID

T1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 15



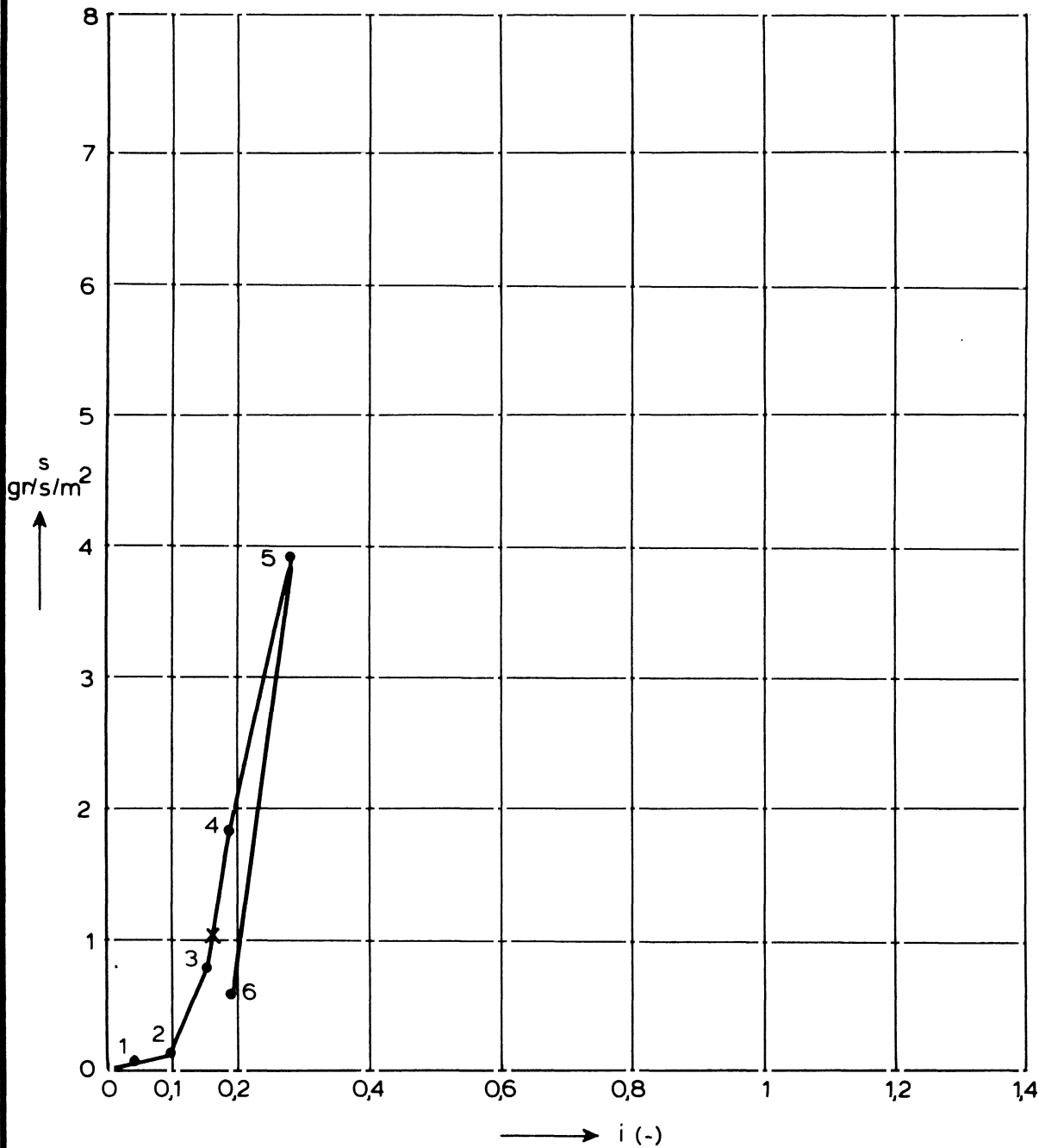
ZANDTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN FILTERSNELHEID

T 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG.16



x = kritiek verhang ($s = 1 \text{ gr/s/m}^2$)

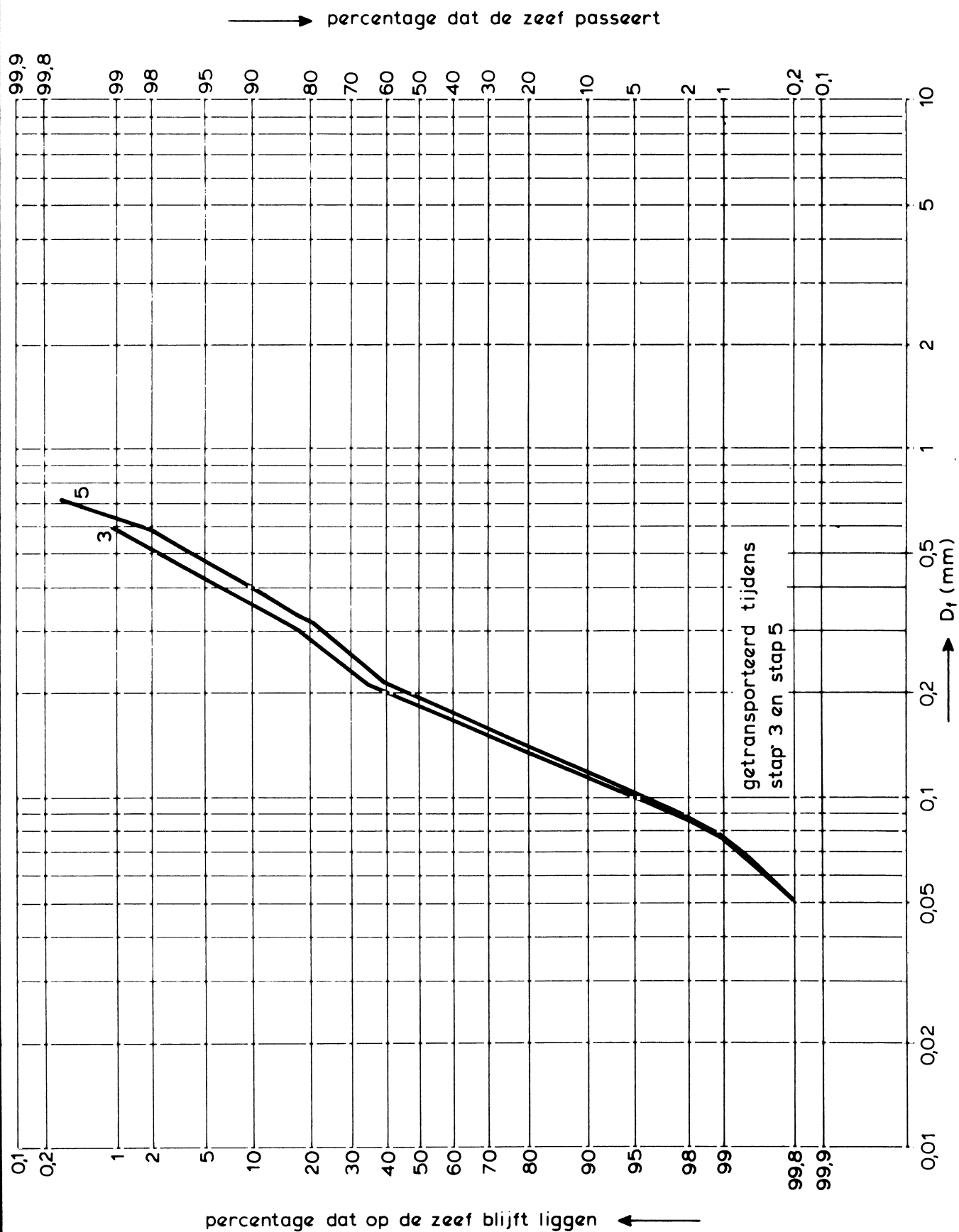
MATERIAALTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN VERHANG

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T 1

H 502

FIG. 17



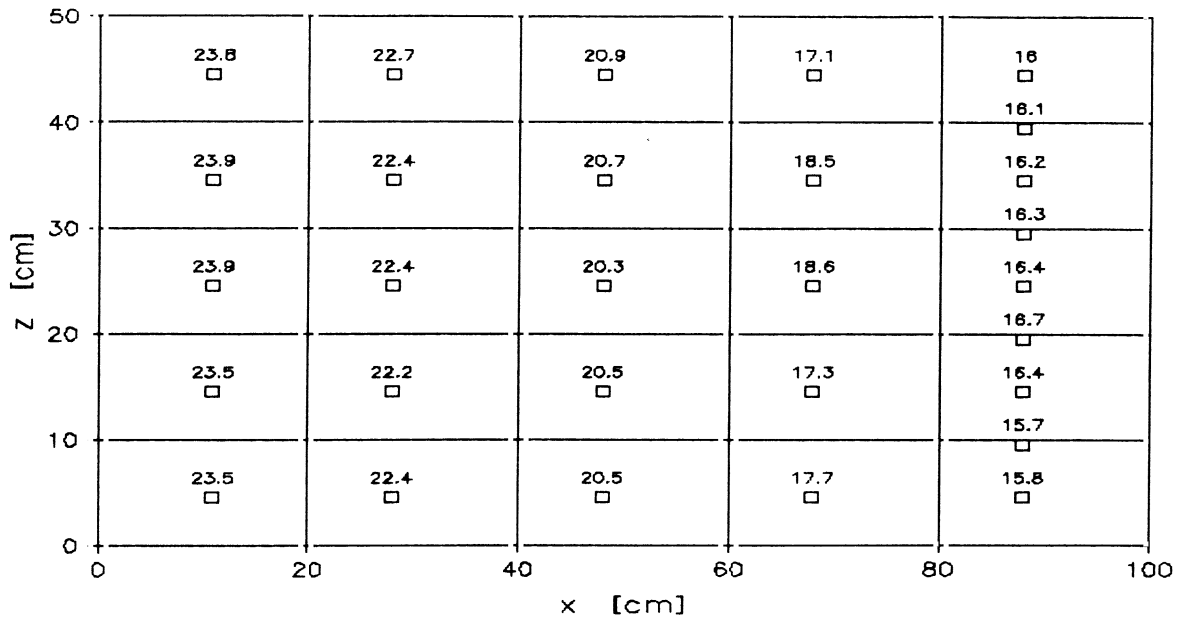
GETRANSPORTEERD MATERIAAL T1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

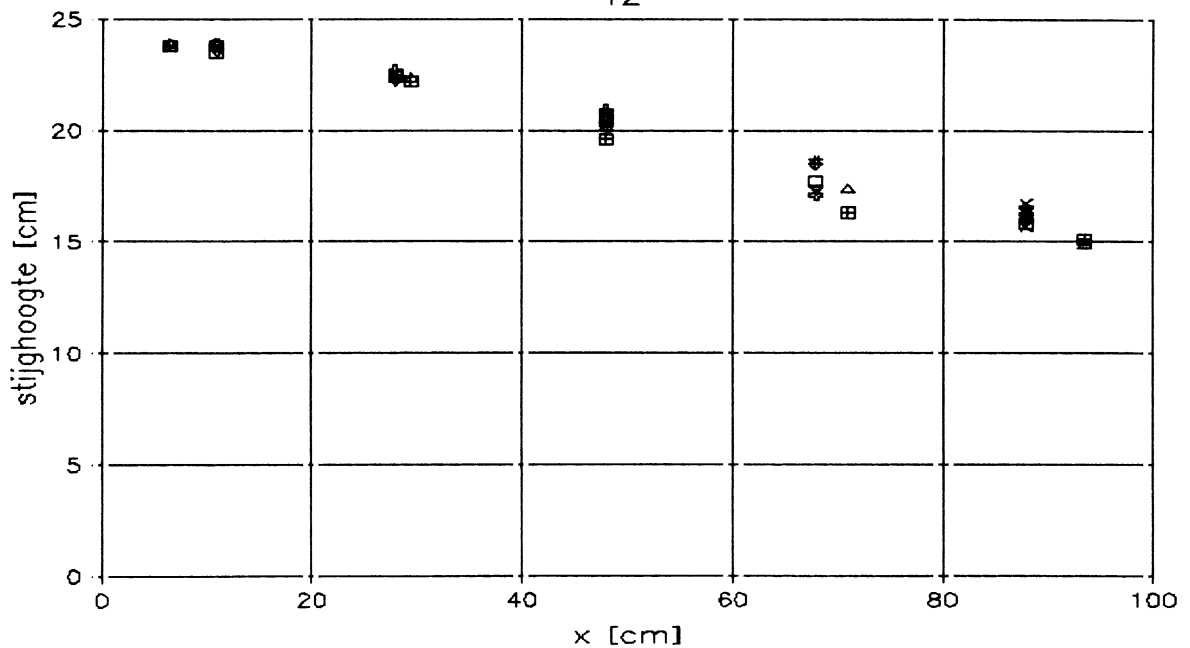
H 502

FIG. 18

GEMETEN STIJGHOOGTE T2 [cm] in wandvlak



STIJGHOOGTE a.f.v. plaats in stroomrichting T2



△ □ = middenvlak
 overige symbolen : wandvlak

GEMETEN STIJGHOOGTE T2, STAP 2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

$v_f = 4,8 \text{ mm/s}$

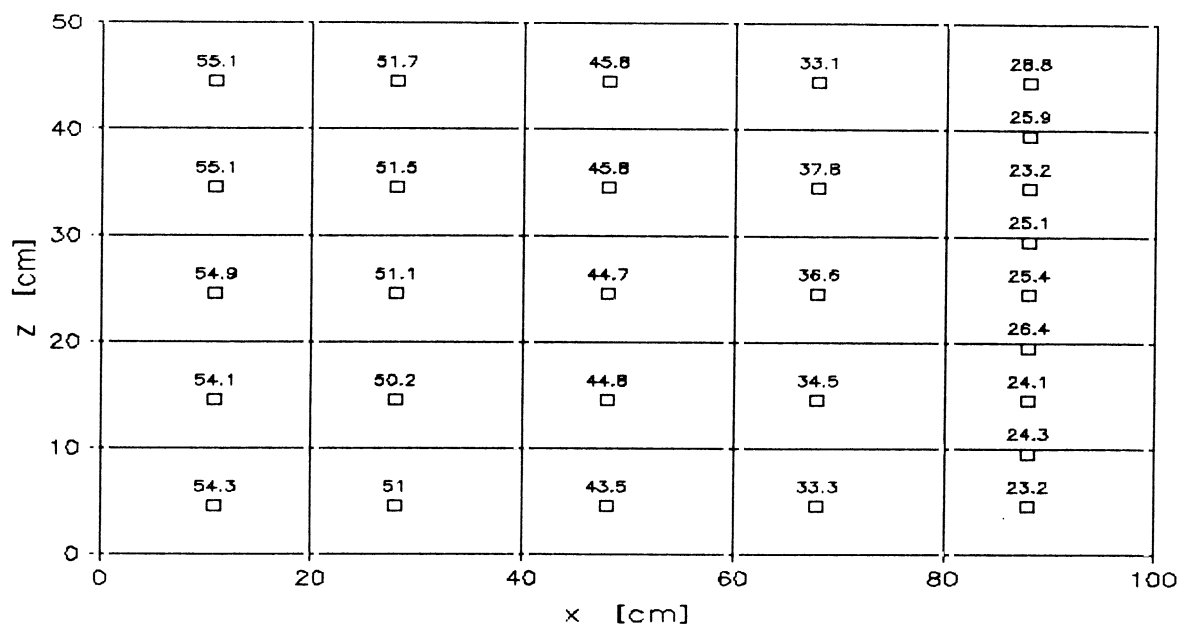
$i = 0,1$

$s = 0 \text{ gr/s/m}^2$

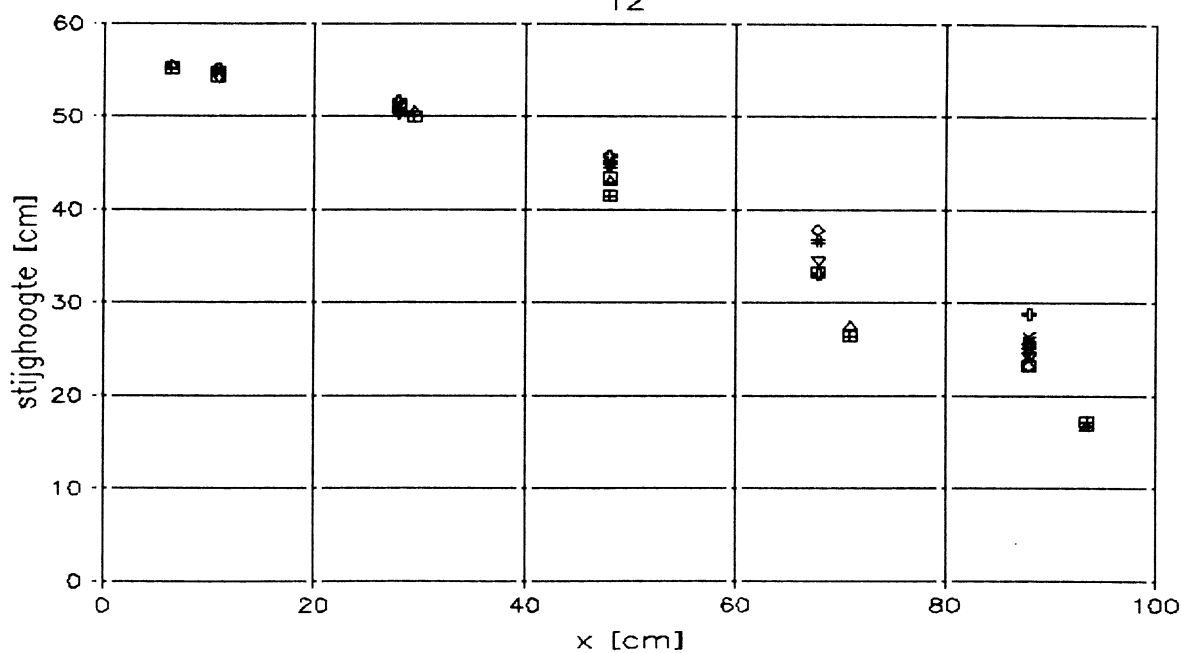
H 502

FIG 19

GEMETEN STIJGHOOGTE T2 [cm] in wandvlak



STIJGHOOGTE a.f.v. plaats in stroomrichting T2



Δ \boxplus = middenvlak
 overige symbolen : wandvlak

GEMETEN STIJGHOOGTE T2, STAP 6

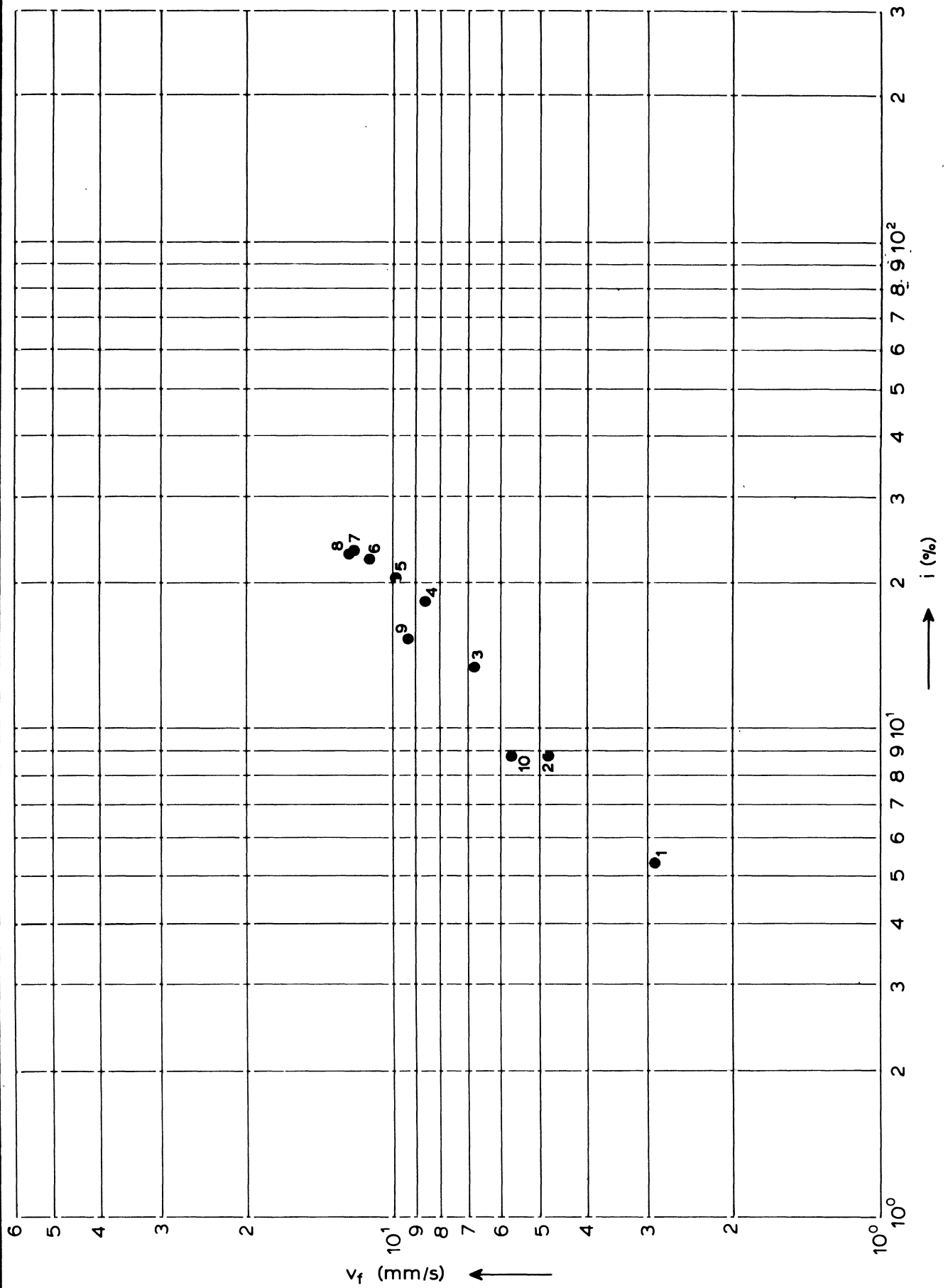
$v_f = 11,1 \text{ mm/s}$

$s = 0,73 \text{ gr/s/m}^2$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 20



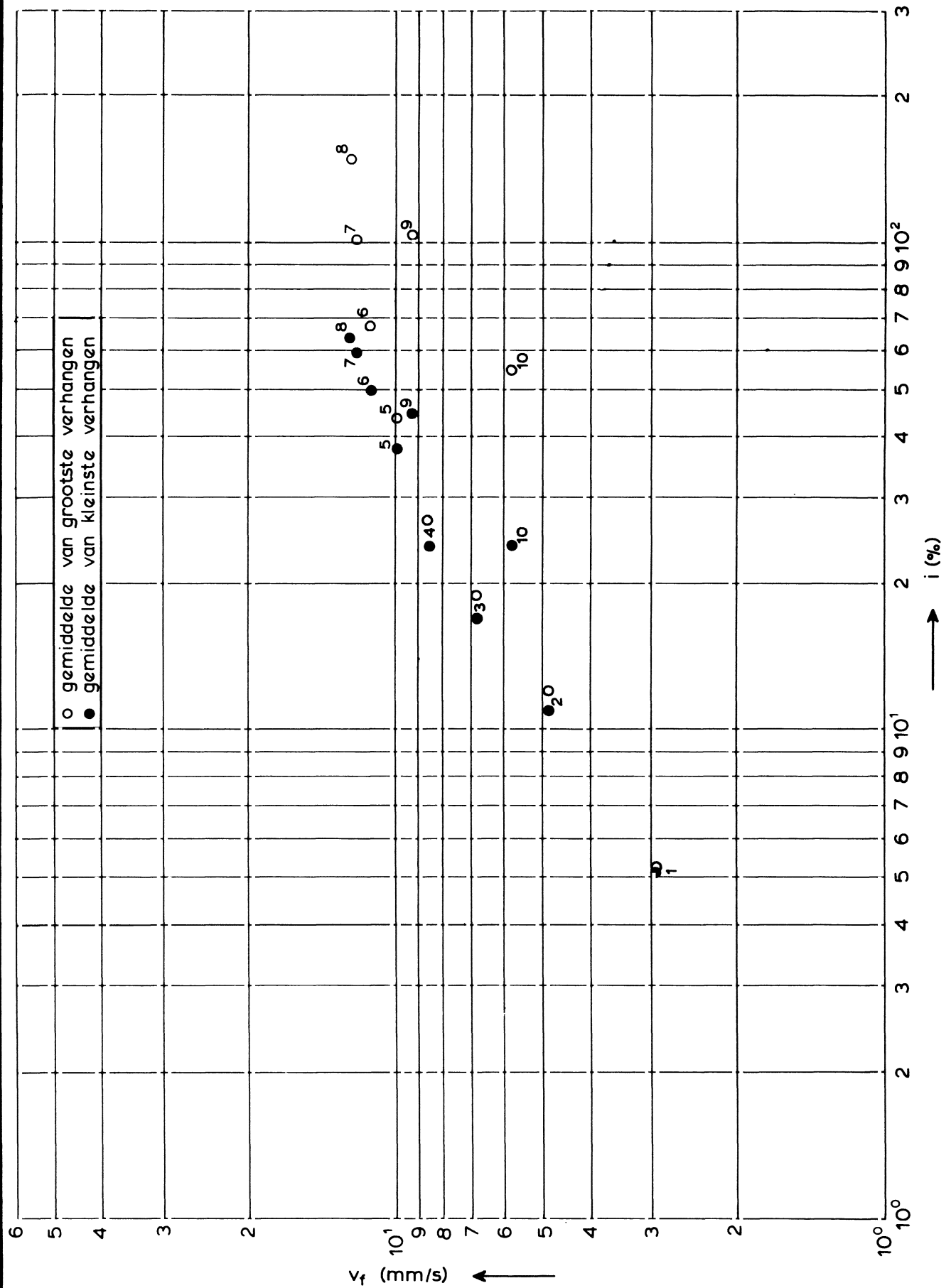
FILTERSNELHEID ALS FUNKTIE VAN
BOVENSTROOMS VERHANG

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T2

H 502

FIG. 21



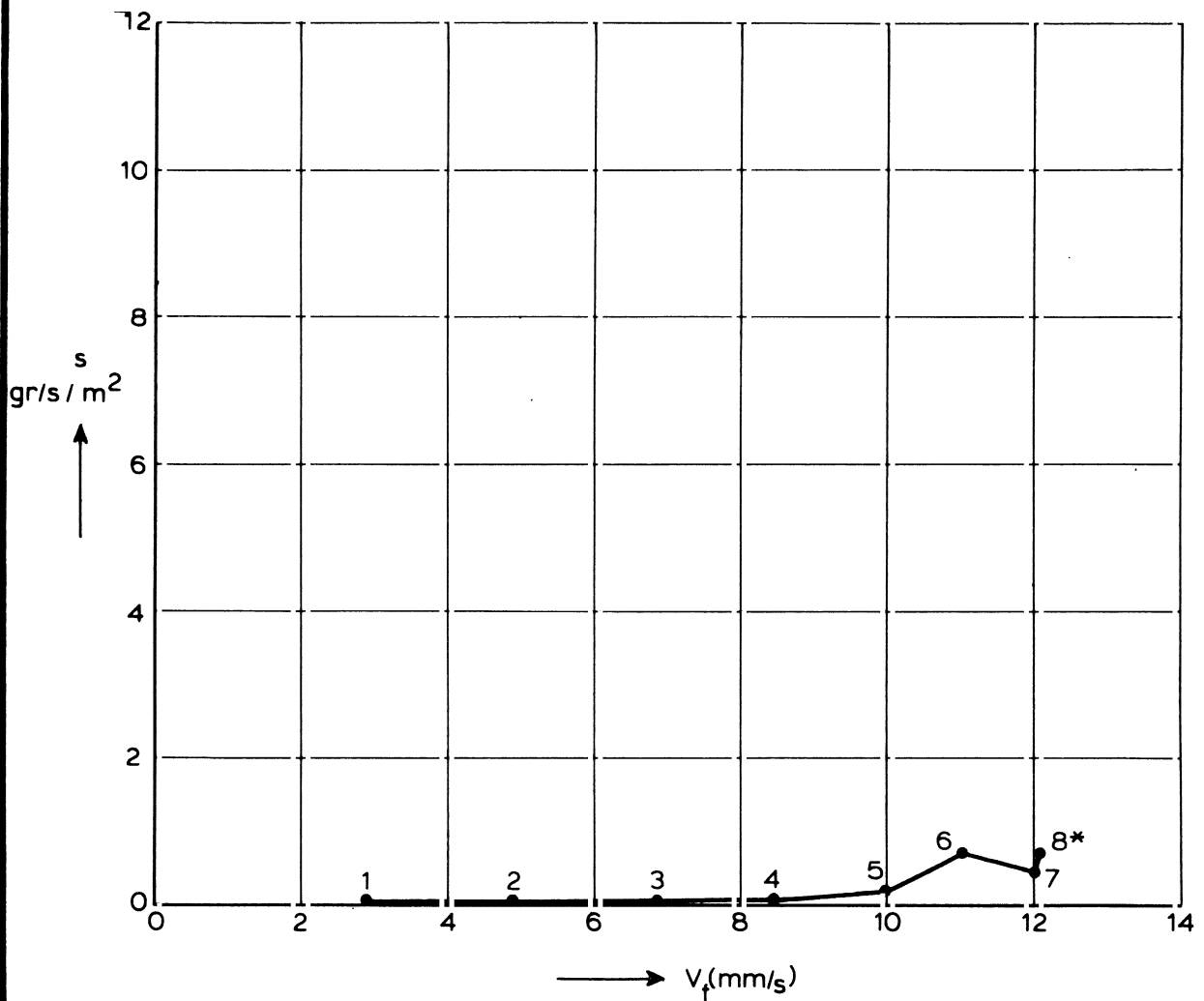
FILTERSNELHEID ALS FUNKTIE VAN
BENEDENSTROOMS VERHANG

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T2

H 502

FIG. 22



8* enkele minuten onvoldoende ballast bij $X = 70$ cm

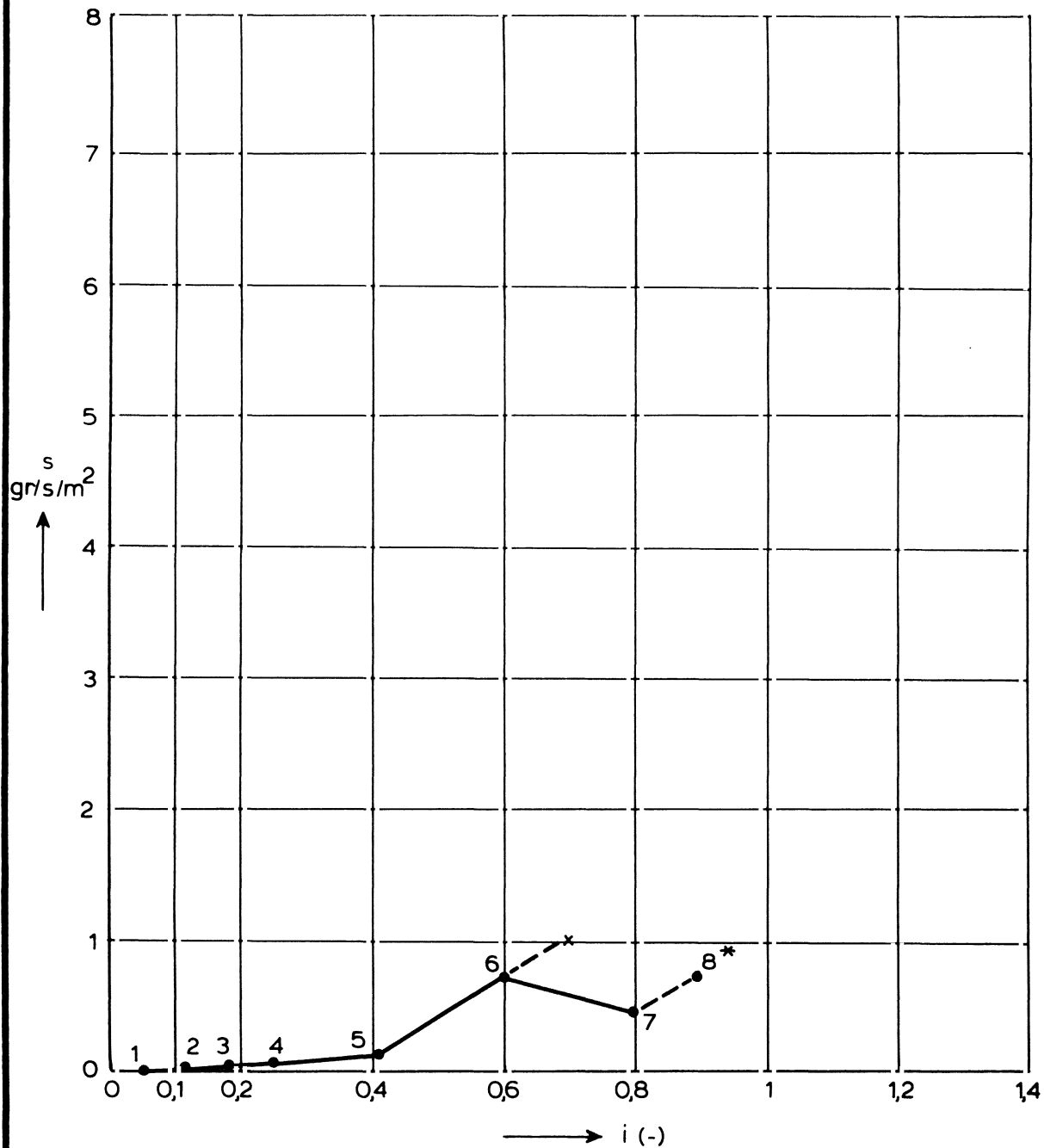
ZANDTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN FILTERSNELHEID

T 2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 23



x = kritiek verhang ($s = 1 \text{ gr/s/m}^2$)

8* enkele minuten onvoldoende ballast bij $\chi = 70 \text{ cm}$

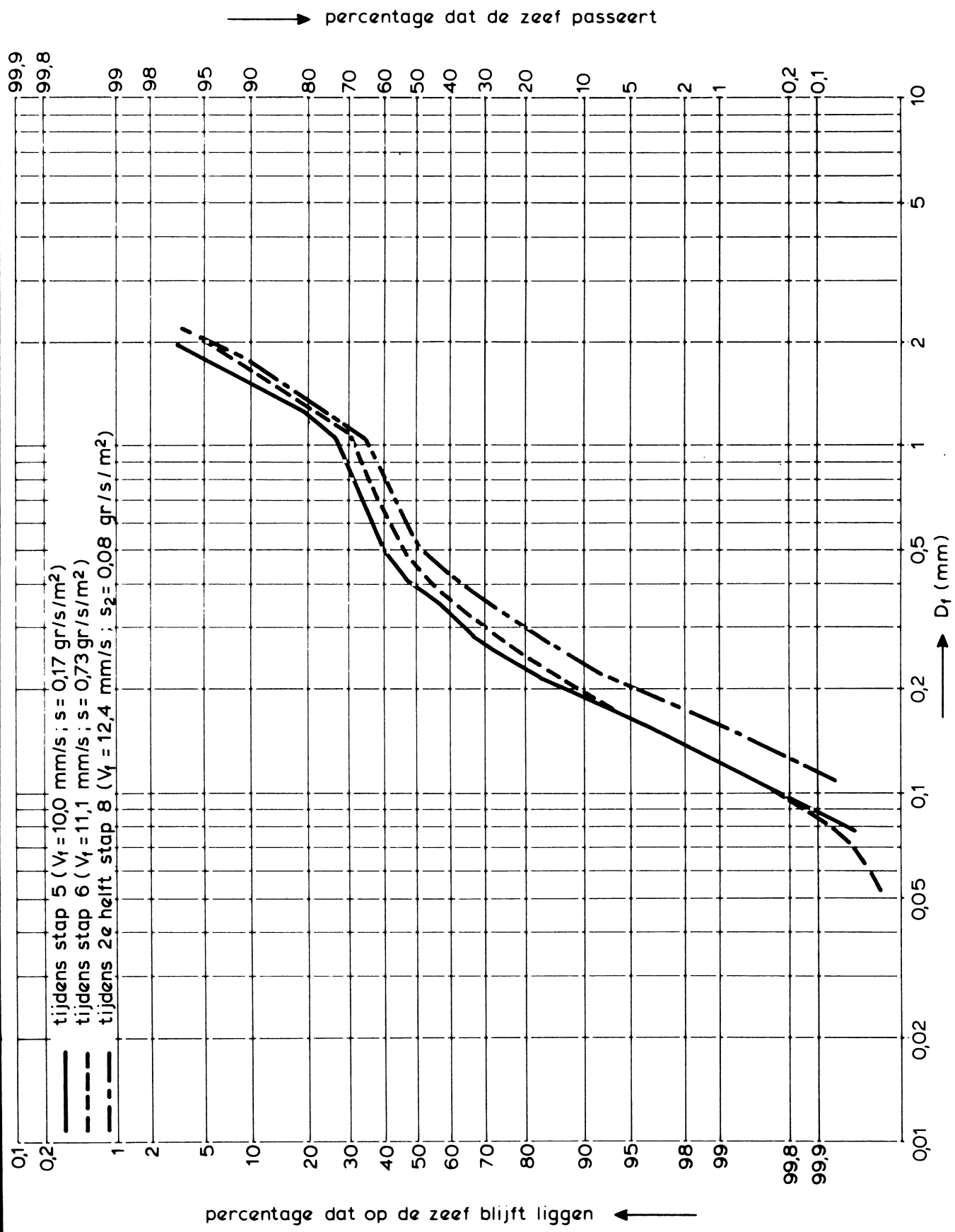
MATERIAALTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN VERHANG

T2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 24



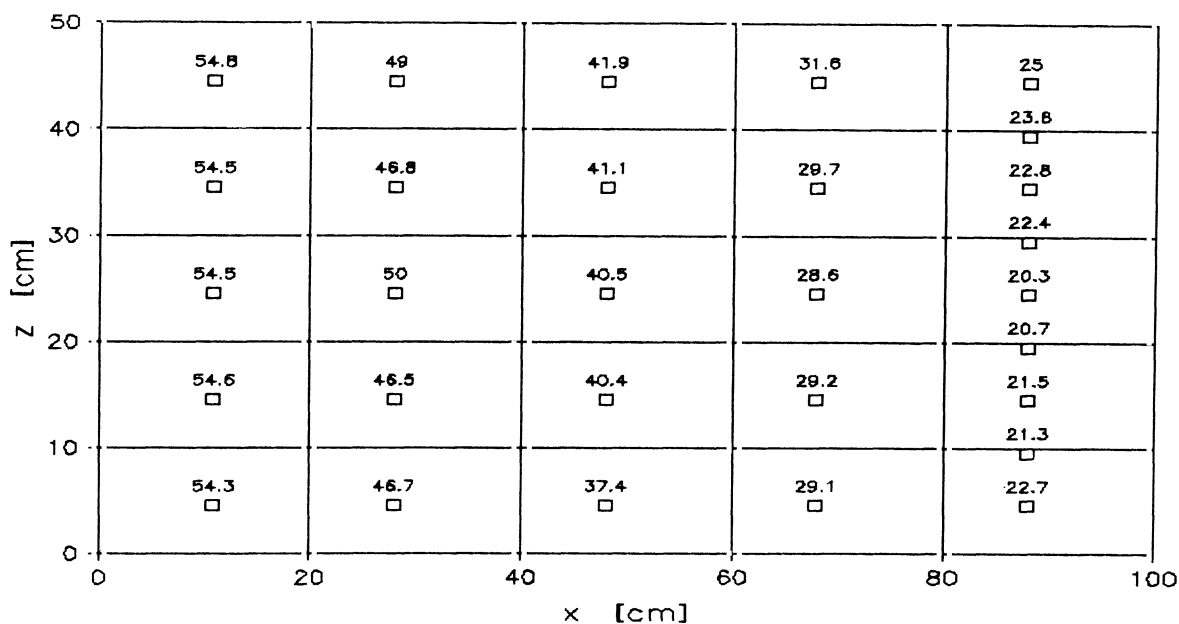
GETRANSPORTEERD TIJDENS T2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

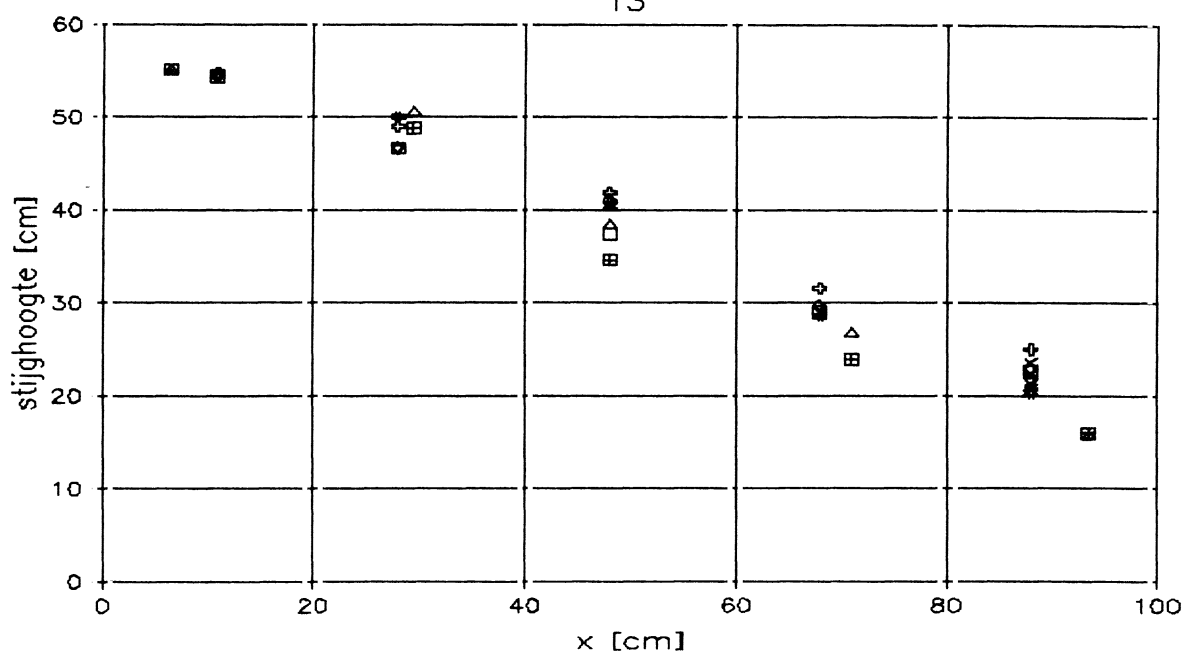
H 502

FIG. 25

GEMETEN STIJGHOOGTE T3 [cm] in wandvlak



STIJGHOOGTE a.f.v. plaats in stroomrichting T3



Δ \boxtimes = middenvlak
 overige symbolen : wandvlak

GEMETEN STIJGHOOGTE T3, STAP 6

$v_f = 11,4 \text{ mm/s}$

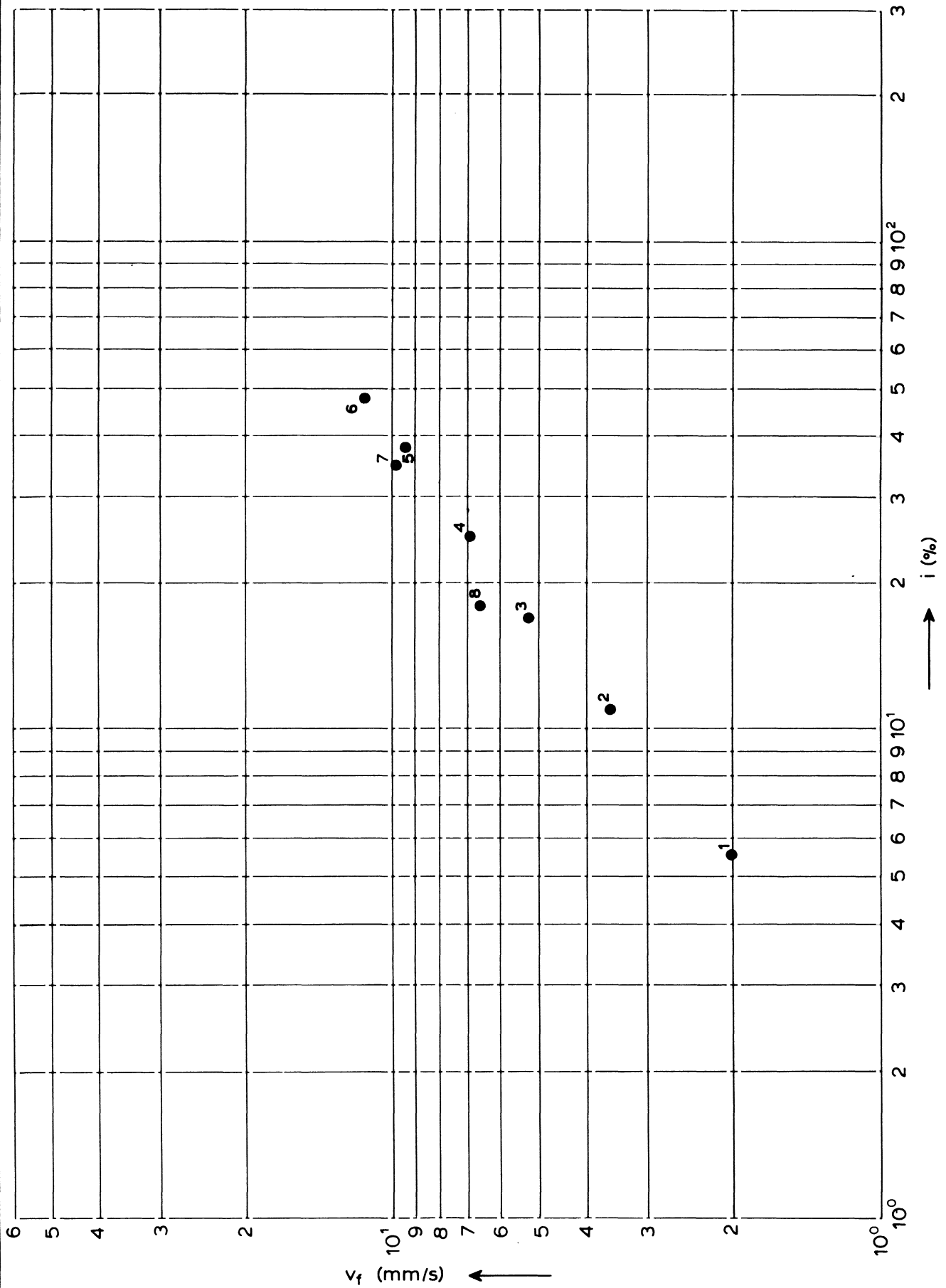
$i = 0,48$

$s = 8,98 \text{ gr/s/m}^2$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 26



DOORLATENDHEID

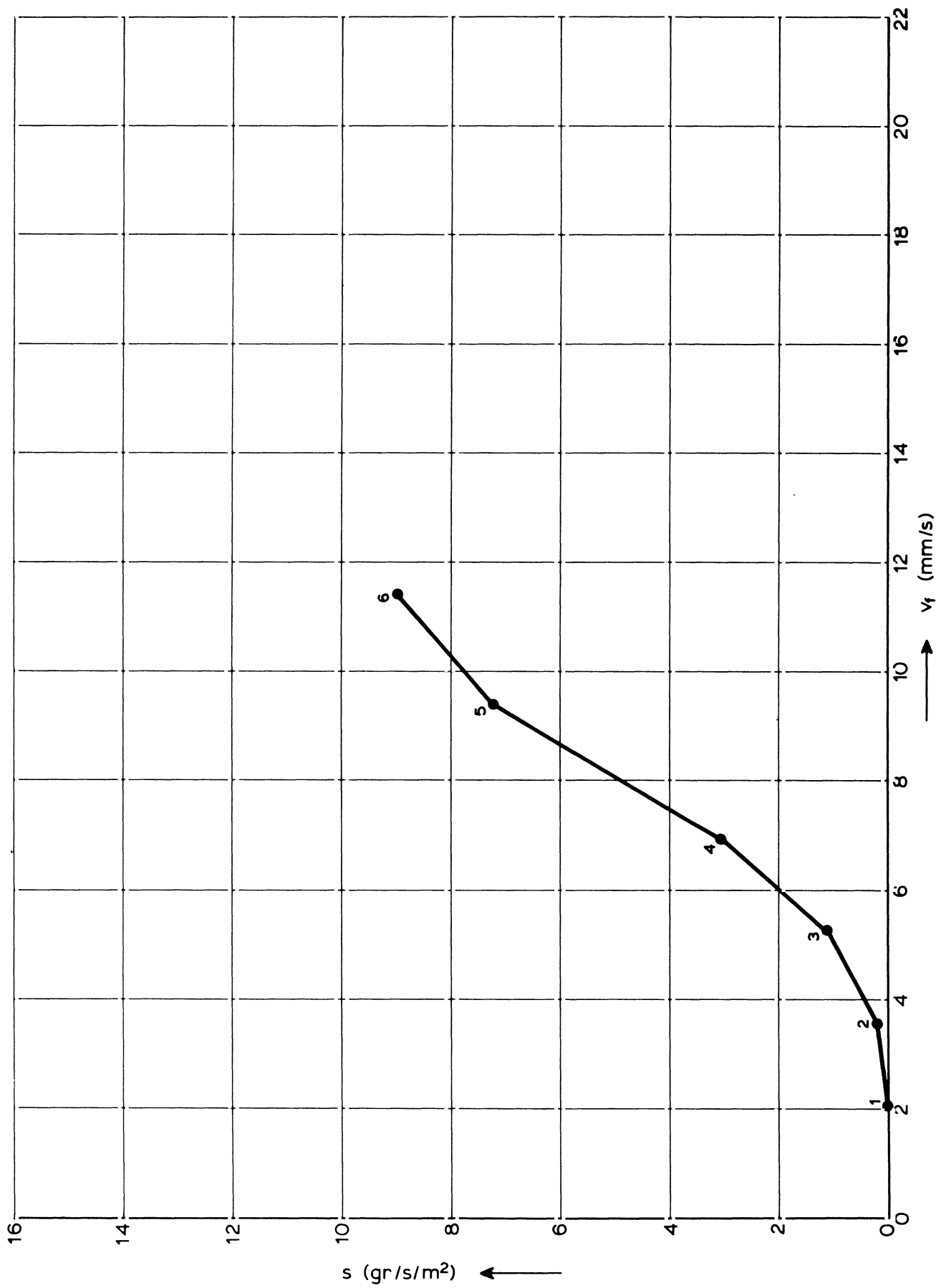
T3

POROSITEIT $n=19\%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 27



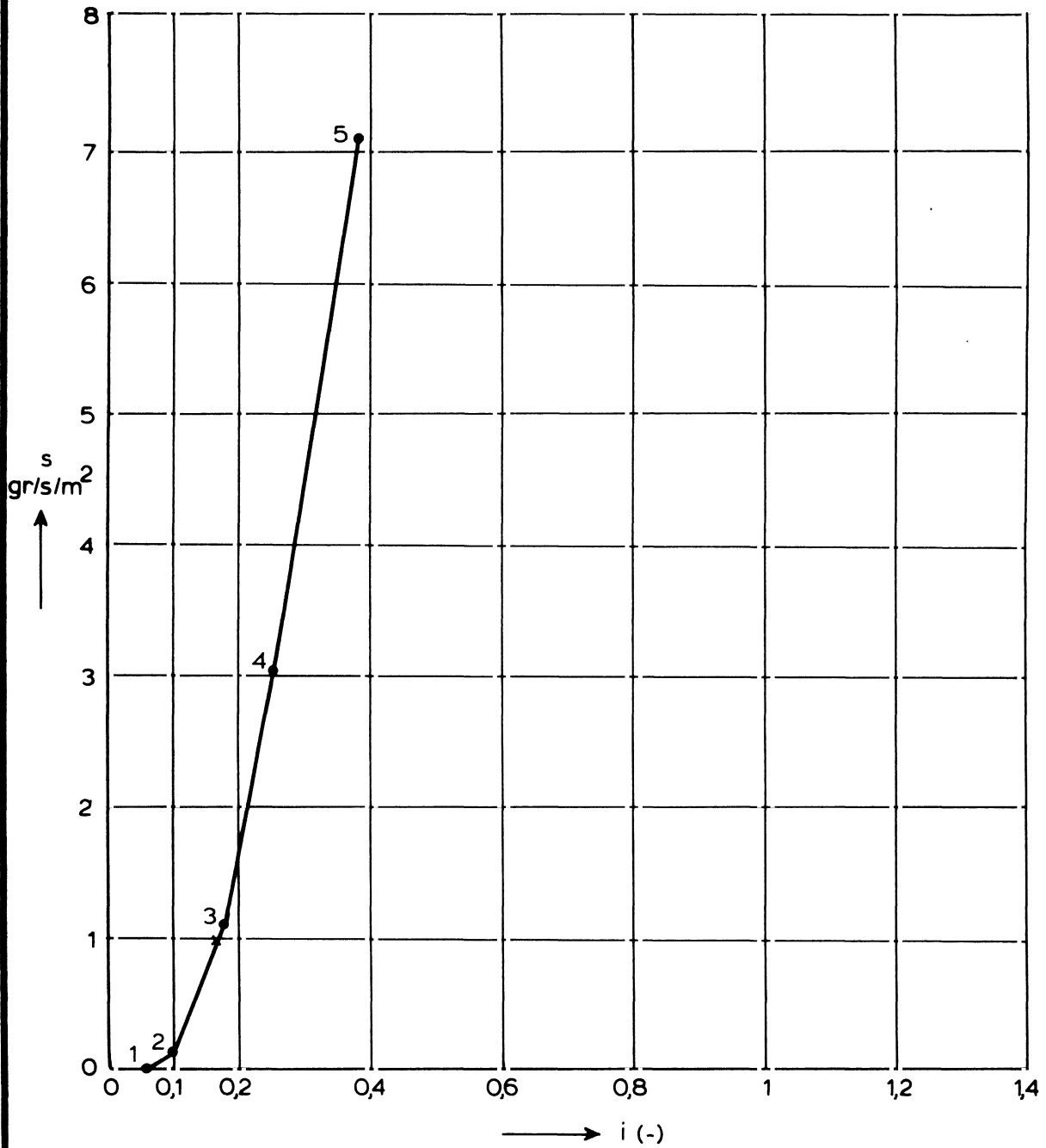
ZANDTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN FILTERSNELHEID

T3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 28



x = kritiek verhang ($s = 1 \text{ gr/s/m}^2$)

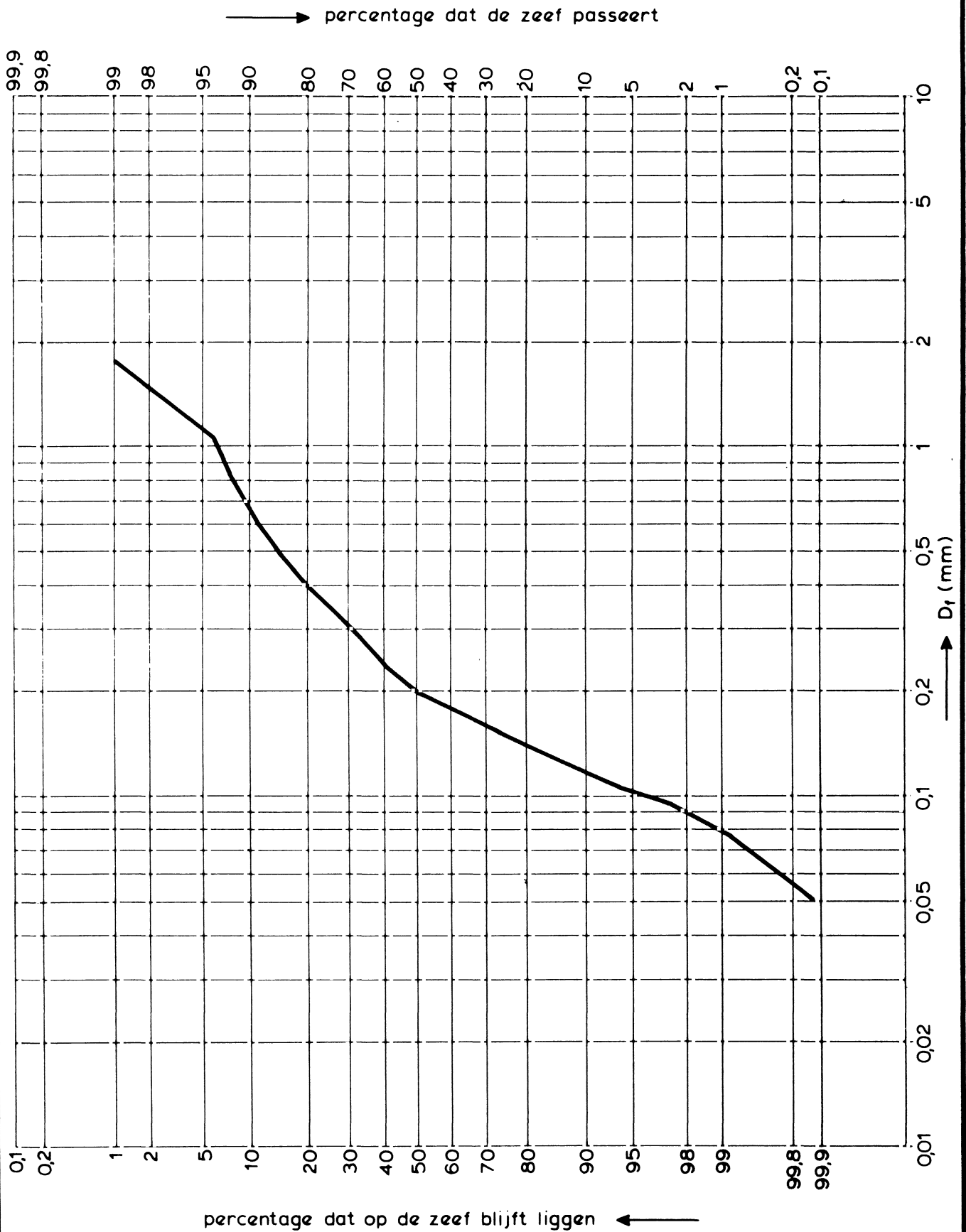
MATERIAALTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN VERHANG

T 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 29



GETRANSPORTEERD TIJDENS T3, STAP 6

$V_f = 11,4 \text{ mm/s}$

$i = 0,48$

$s = 8,98 \text{ gr/s/m}^2$

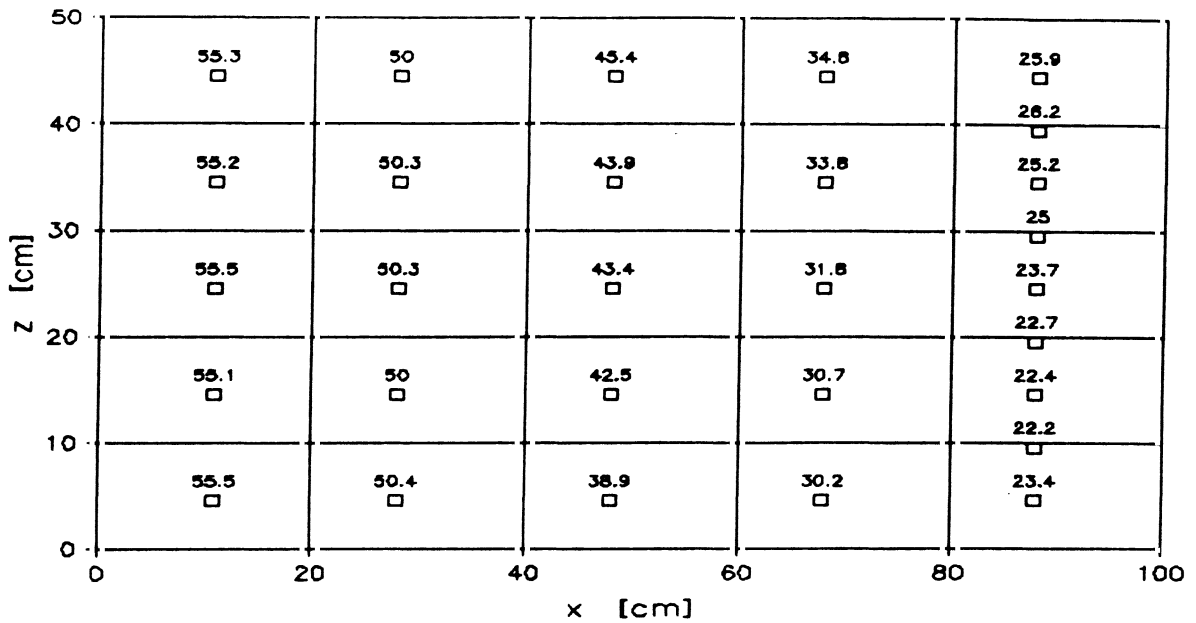
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

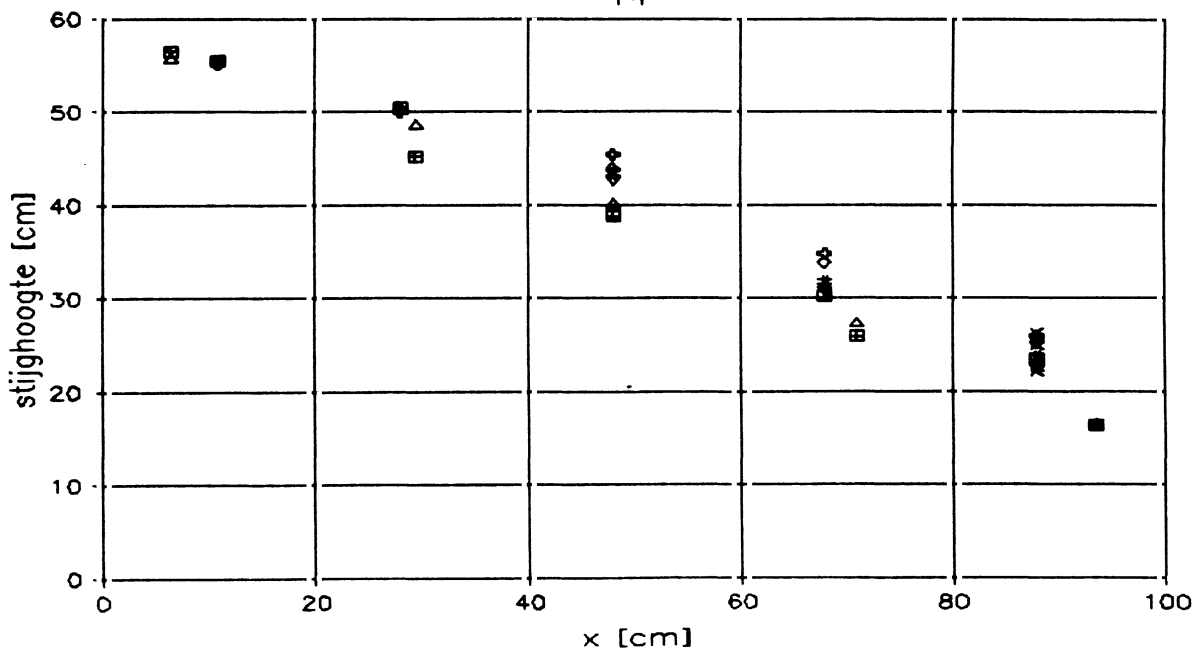
FIG. 30

GEMETEN STIJGHOOGTE T4 [cm]

in wandvlak



STIJGHOOGTE a.f.v. plaats in stroomrichting T4



△ ▣ = middenvlak
overige symbolen : wandvlak

GEMETEN STIJGHOOGTE T4, STAP 6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

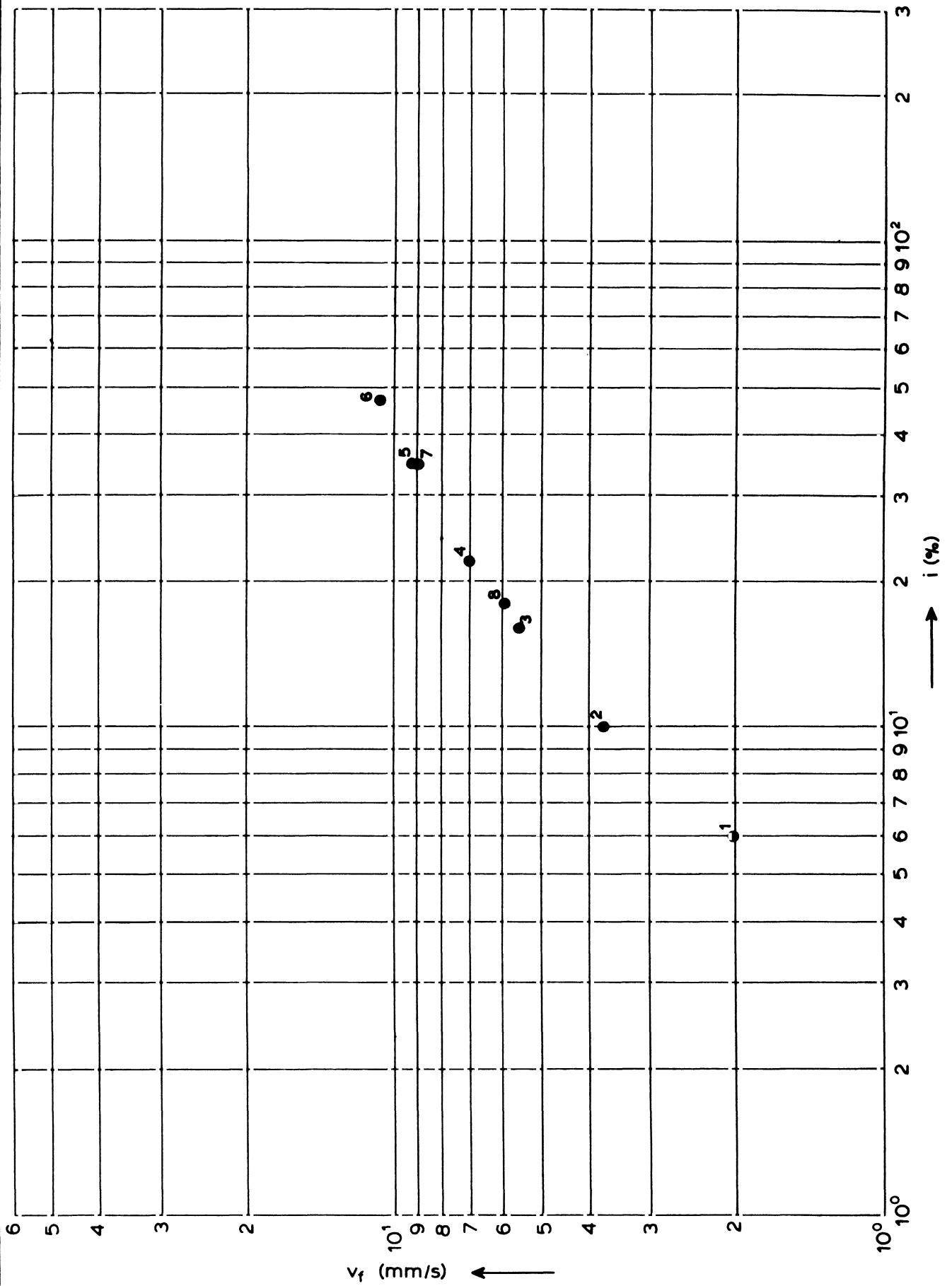
$v_f = 10,7 \text{ mm/s}$

$i = 0,47$

$s = 7,48 \text{ gr/s/m}^2$

H 502

FIG. 31



DOORLATENDHEID

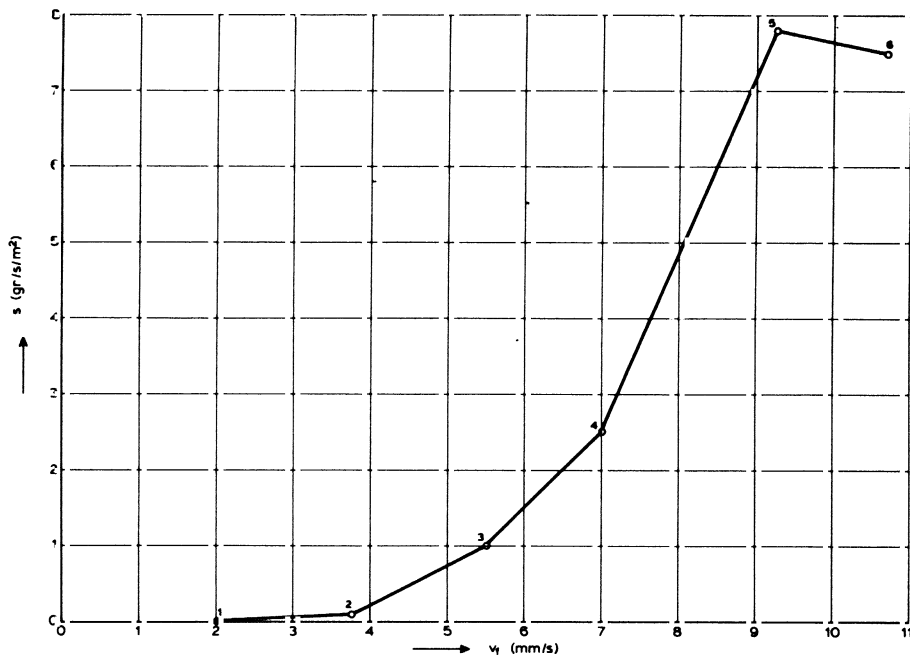
T4

POROSITEIT $n = 28\%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 32



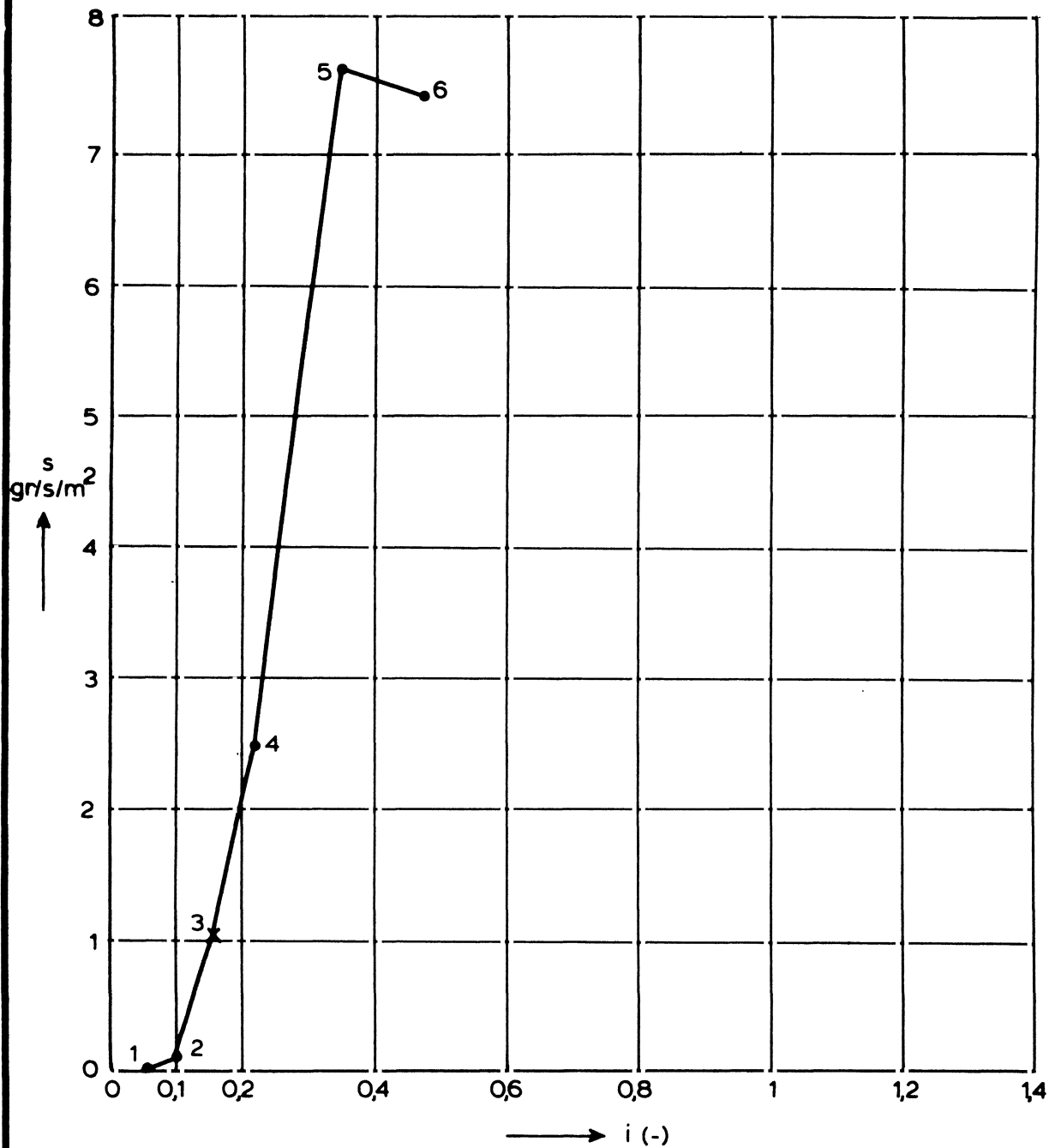
ZANDTRANSPORT

T 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 33



x = kritiek verhang ($s = 1 \text{ gr/s/m}^2$)

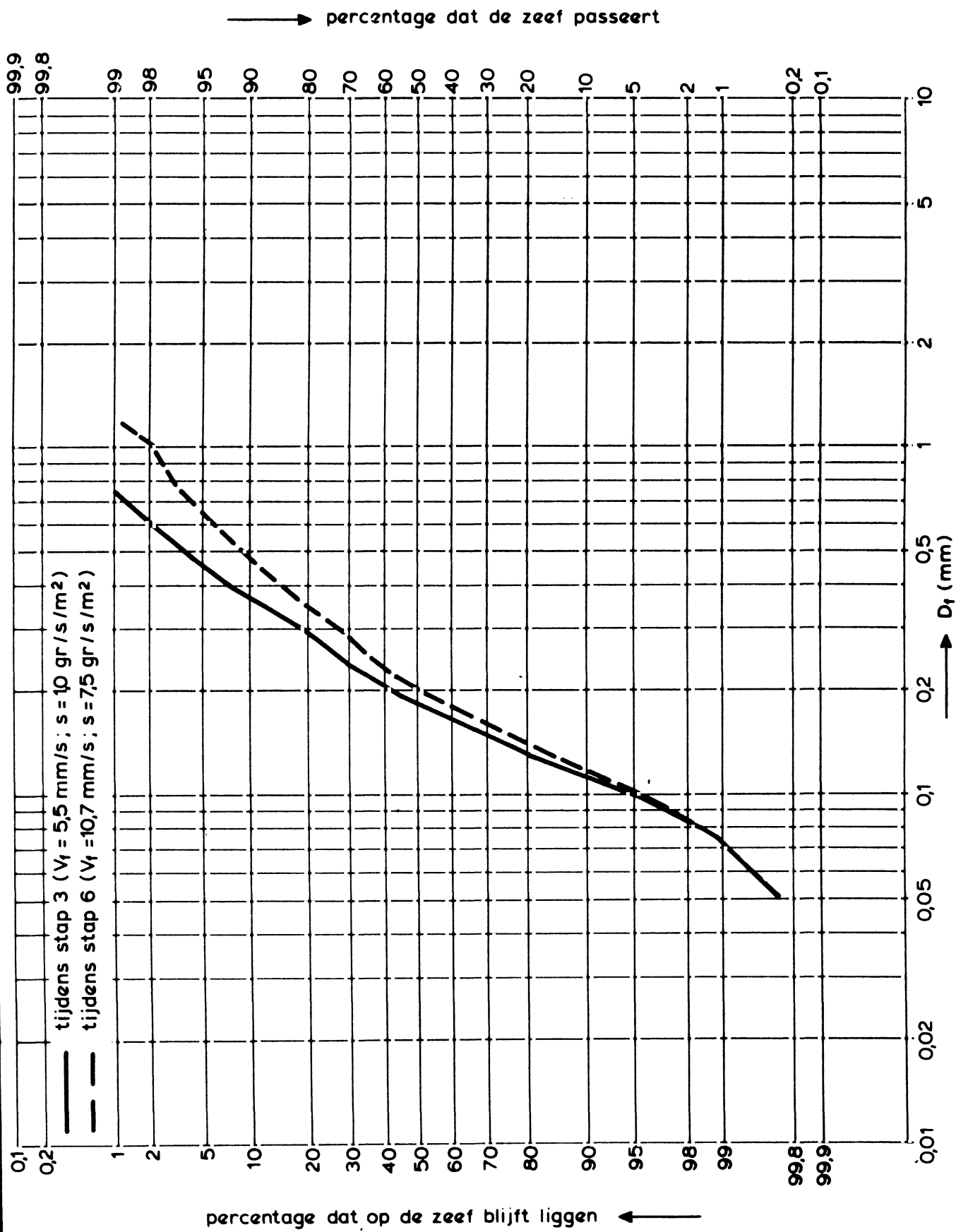
MATERIAALTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN VERHANG

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T4

H 502

FIG. 34



GETRANSPORTEERD TIJDENS T4

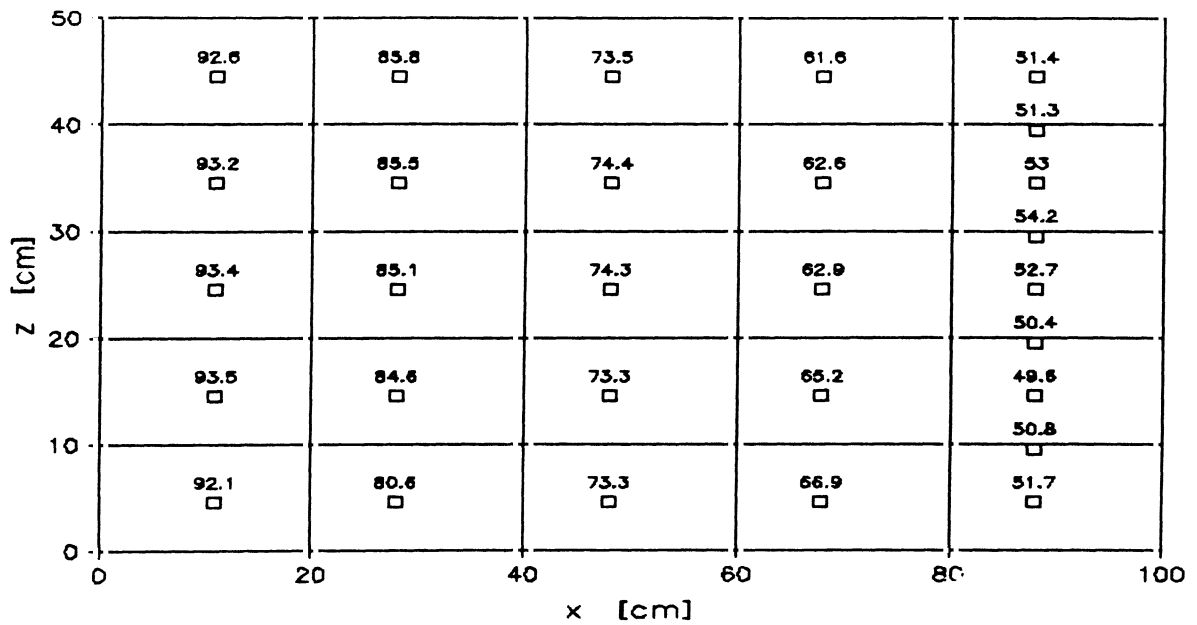
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

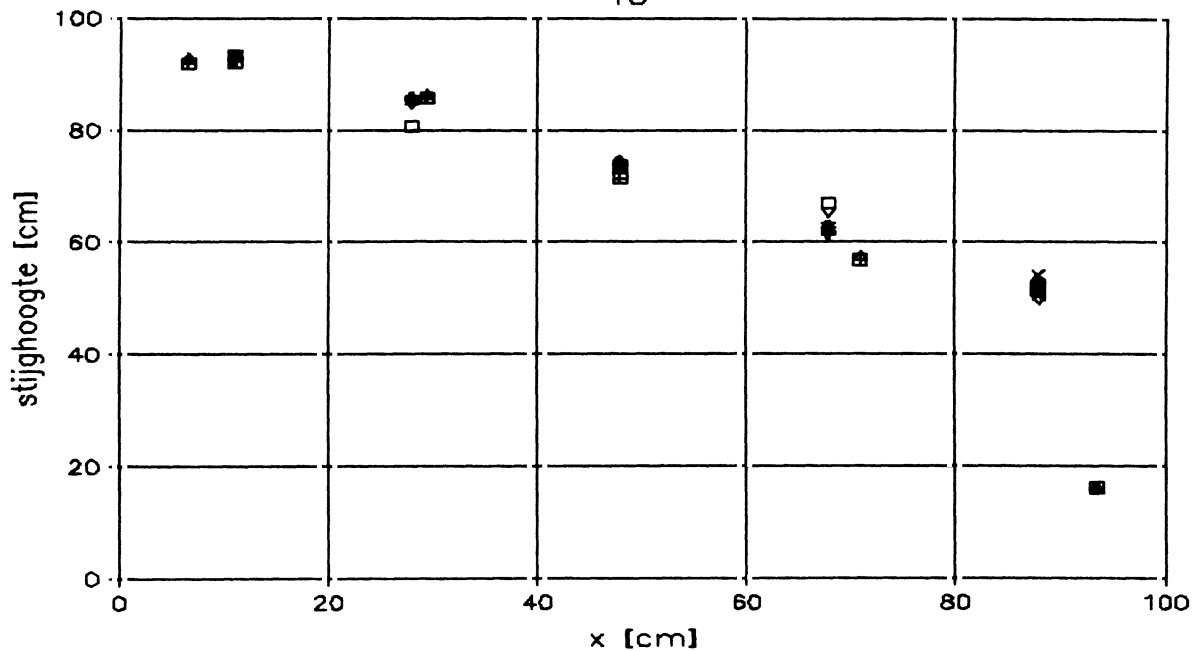
FIG. 35

GEMETEN STIJGHOOGTE T5 [cm]

in wandvlak



STIJGHOOGTE a.f.v. plaats in stroomrichting T5



△ ■ = middenvlak
overige symbolen : wandvlak

GEMETEN STIJGHOOGTE T5, STAP 8

$v_t = 4,8 \text{ mm/s}$

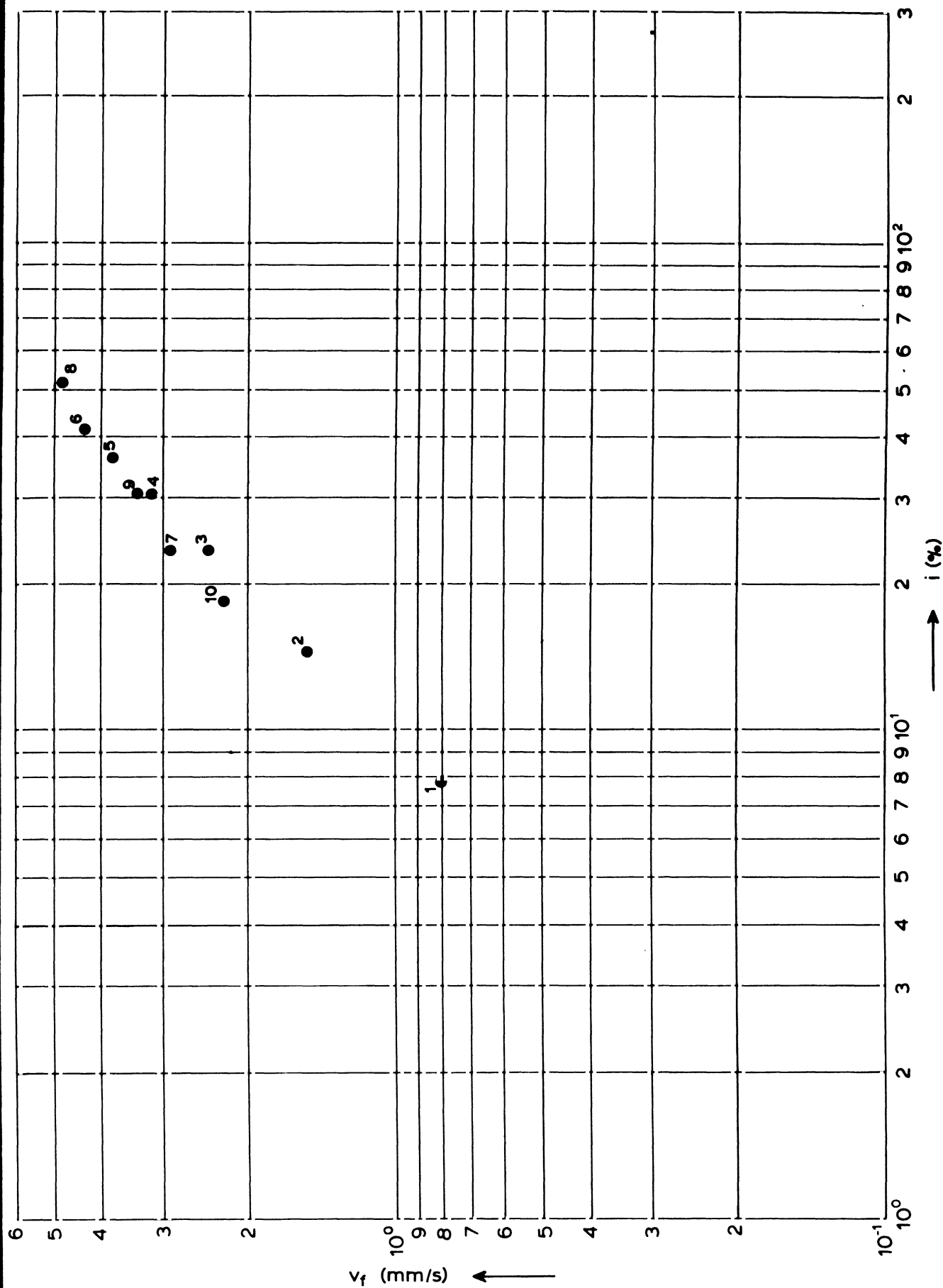
$i = 0,52$

$s = 0,35 \text{ gr/s/m}^2$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 36



DOORLATENDHEID

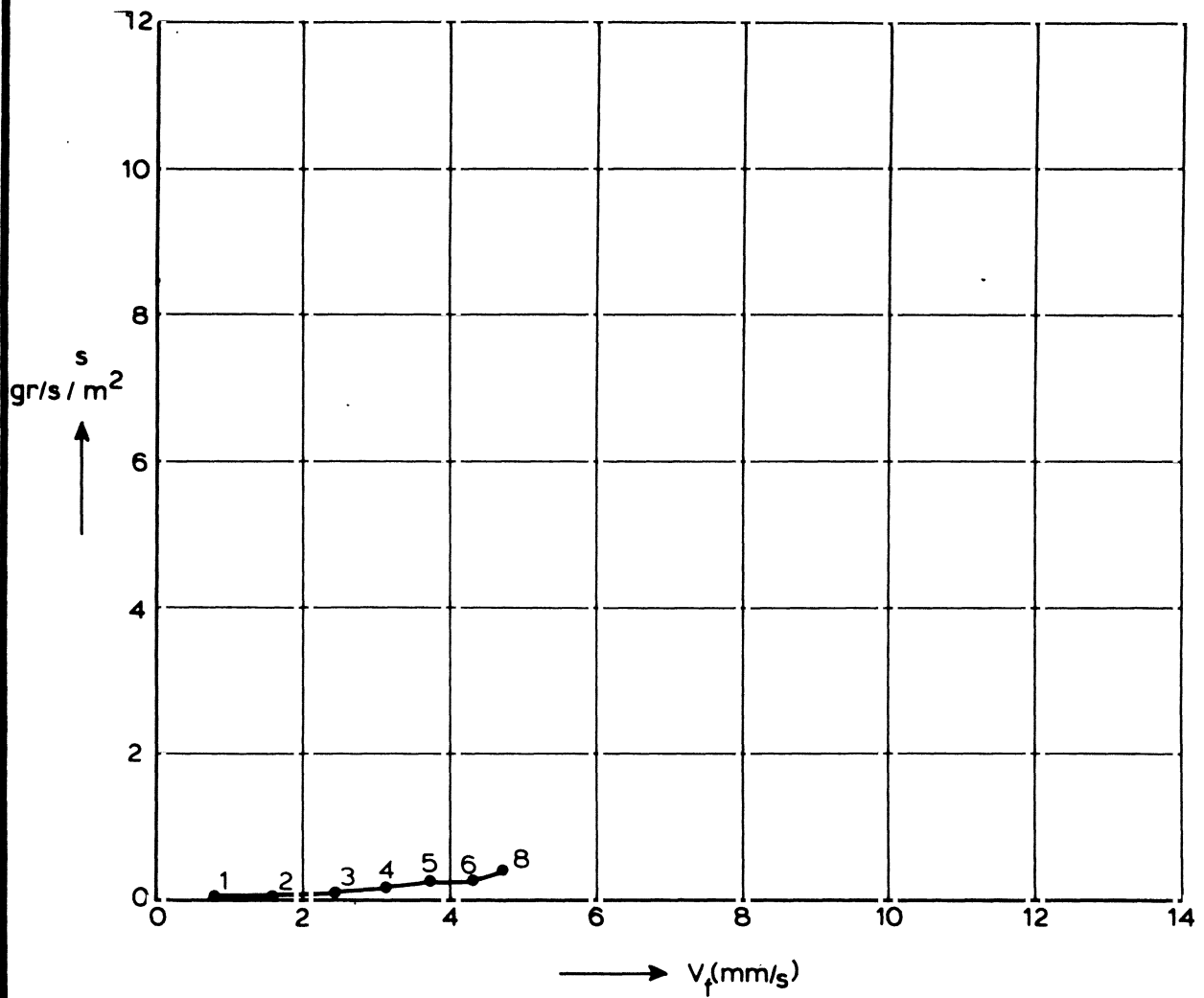
T5

POROSITEIT $n=19\%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H · 502

FIG. 37



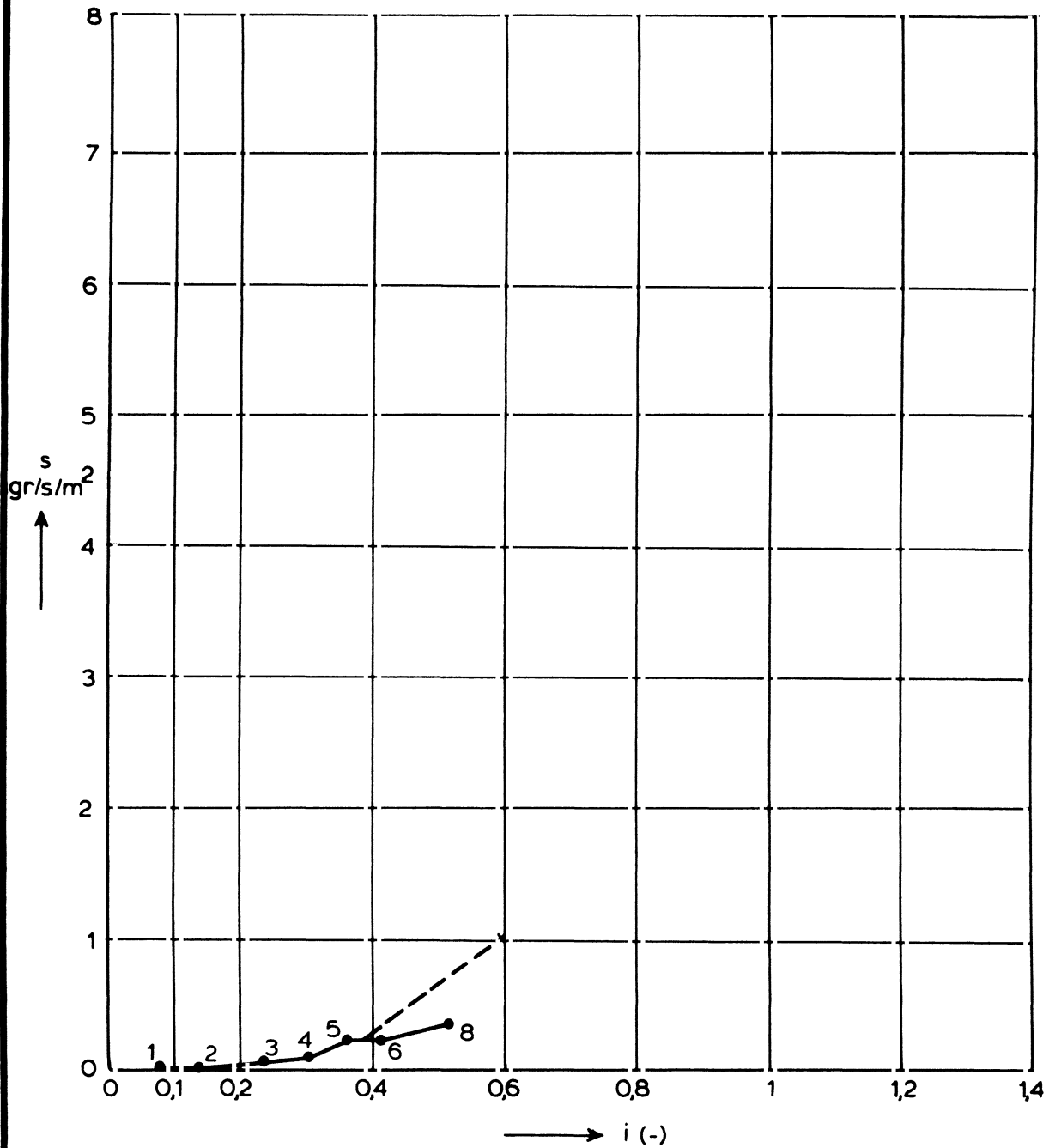
ZANDTRANSPORT

T 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 38



x = kritiek verhang ($s = 1 \text{ gr/s/m}^2$)

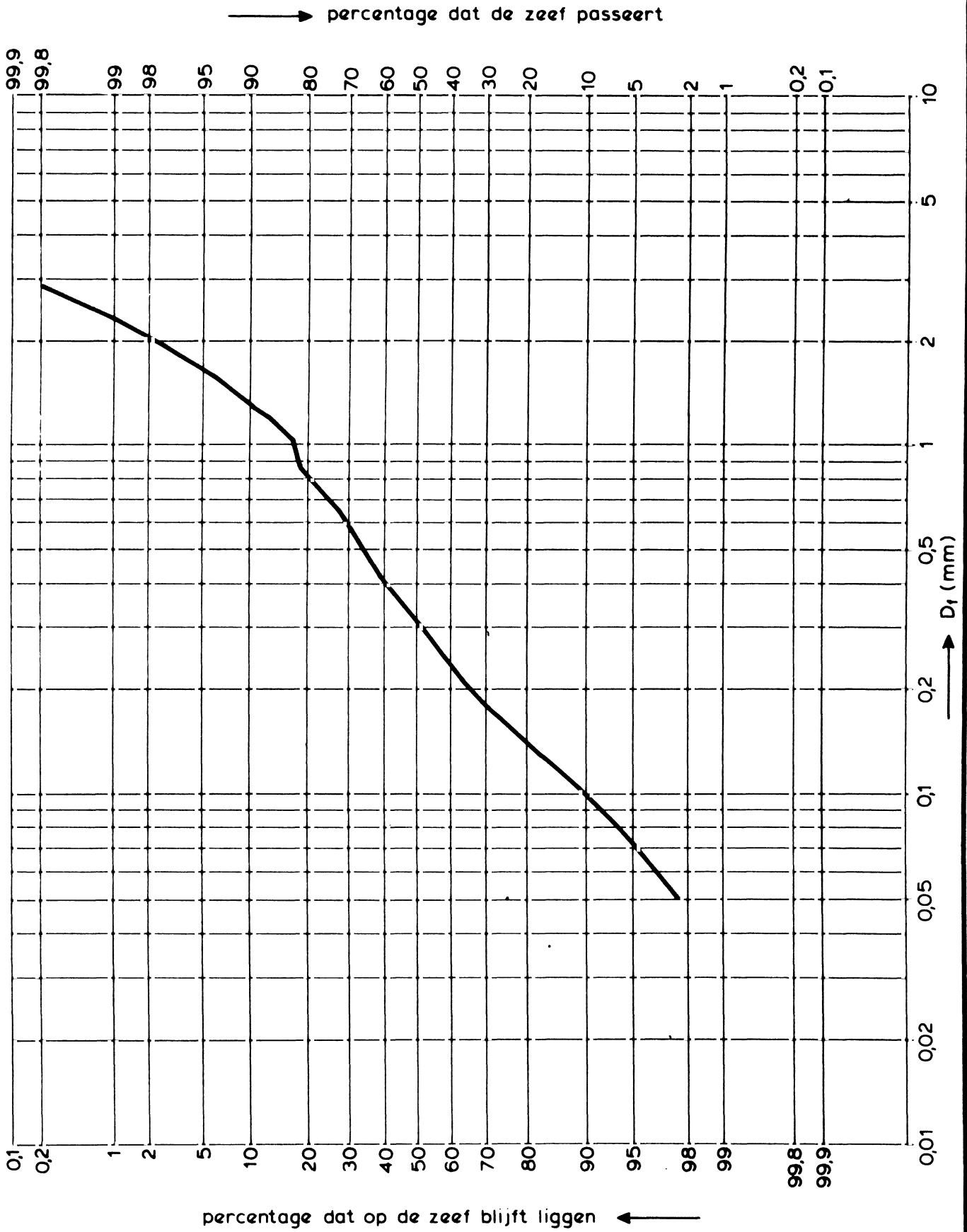
MATERIAALTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN VERHANG

T 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 39



GETRANSPORTEERD TIJDENS T5, STAP 8

$V_f = 4,8 \text{ mm/s}$ $i = 0,52$

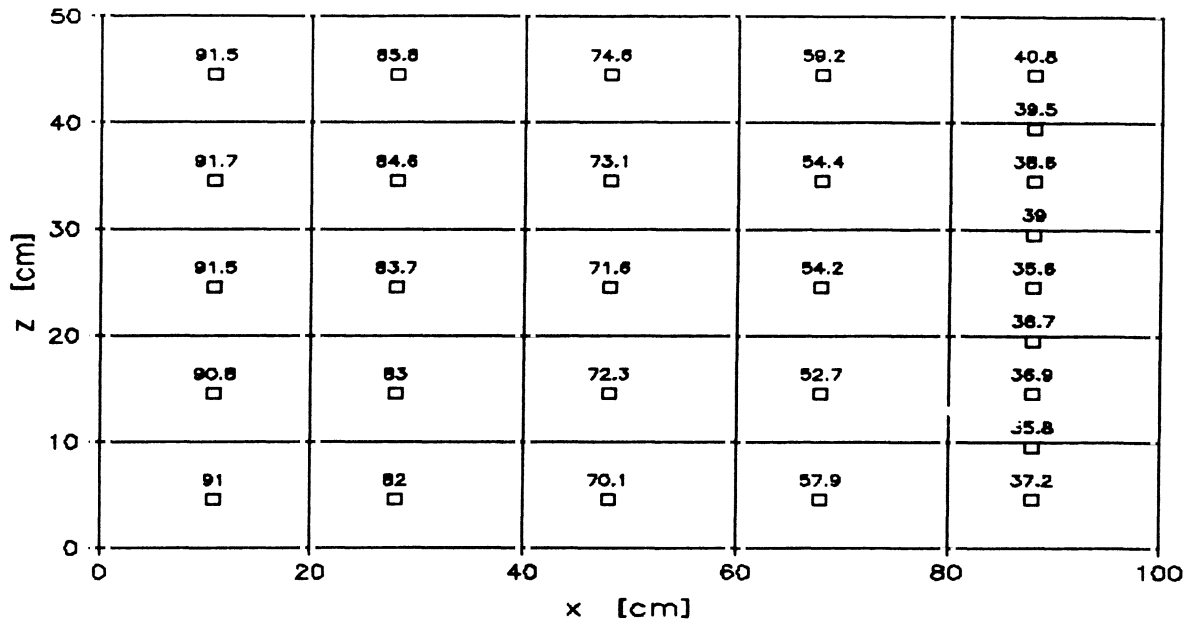
$s = 0,35 \text{ gr/s/m}^2$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

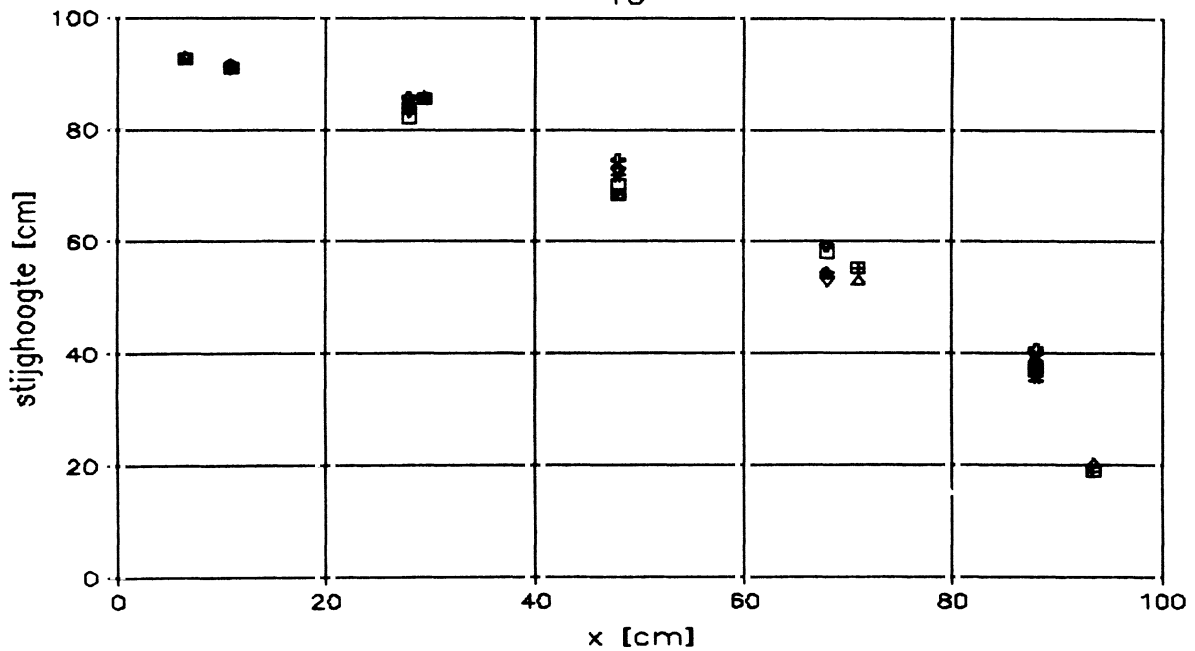
H. 502

FIG. 40

GEMETEN STIJGHOOGTE T6 [cm] in wandvlak



STIJGHOOGTE a.f.v. plaats in stroomrichting T6



Δ \boxtimes = middenvlak
 overige symbolen : wandvlak

GEMETEN STIJGHOOGTE T6, STAP 6

$v_f = 5,5 \text{ mm/s}$

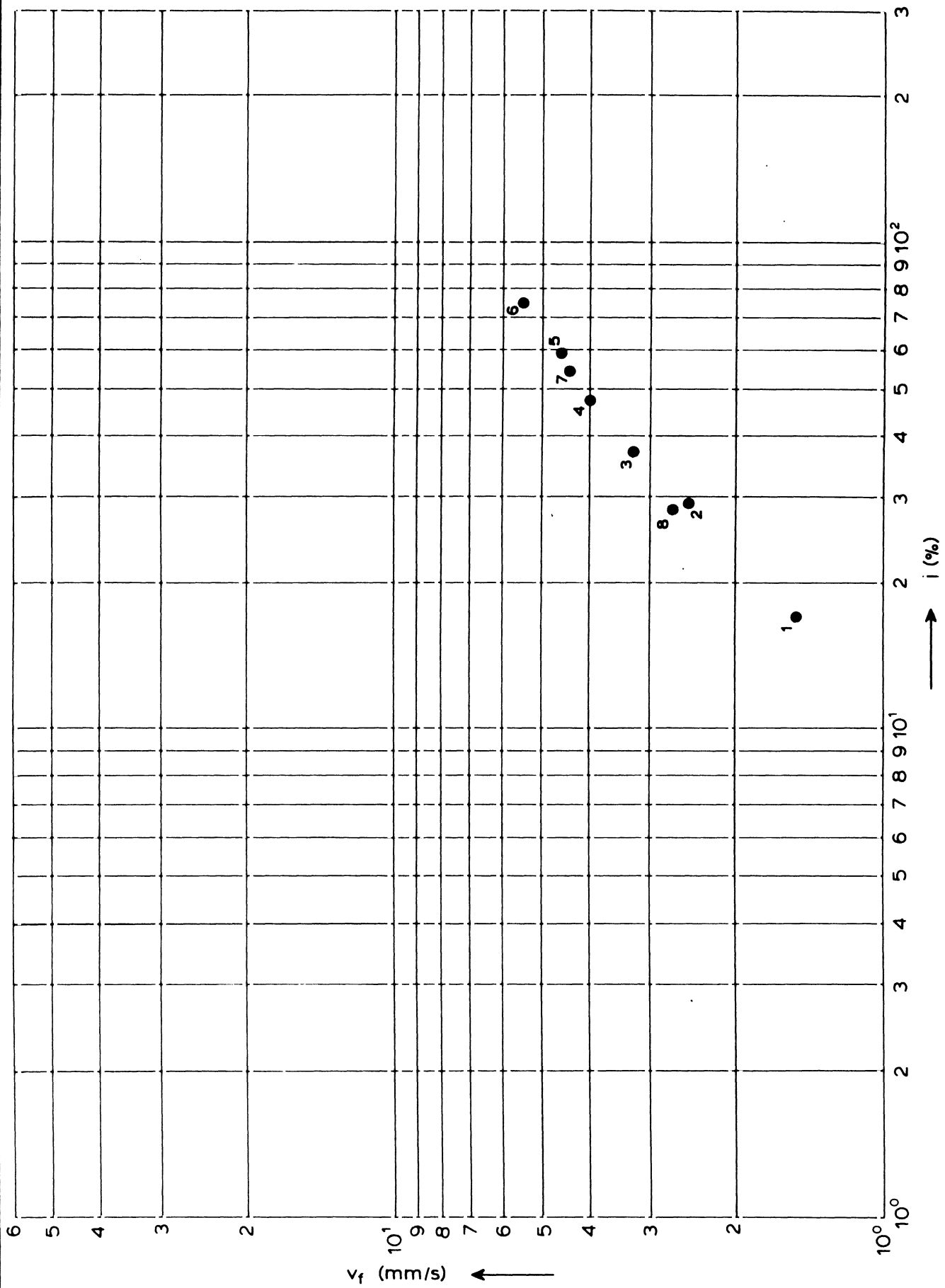
$i = 0,75$

$s = 0,23 \text{ gr/s/m}^2$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG 41



DOORLATENDHEID

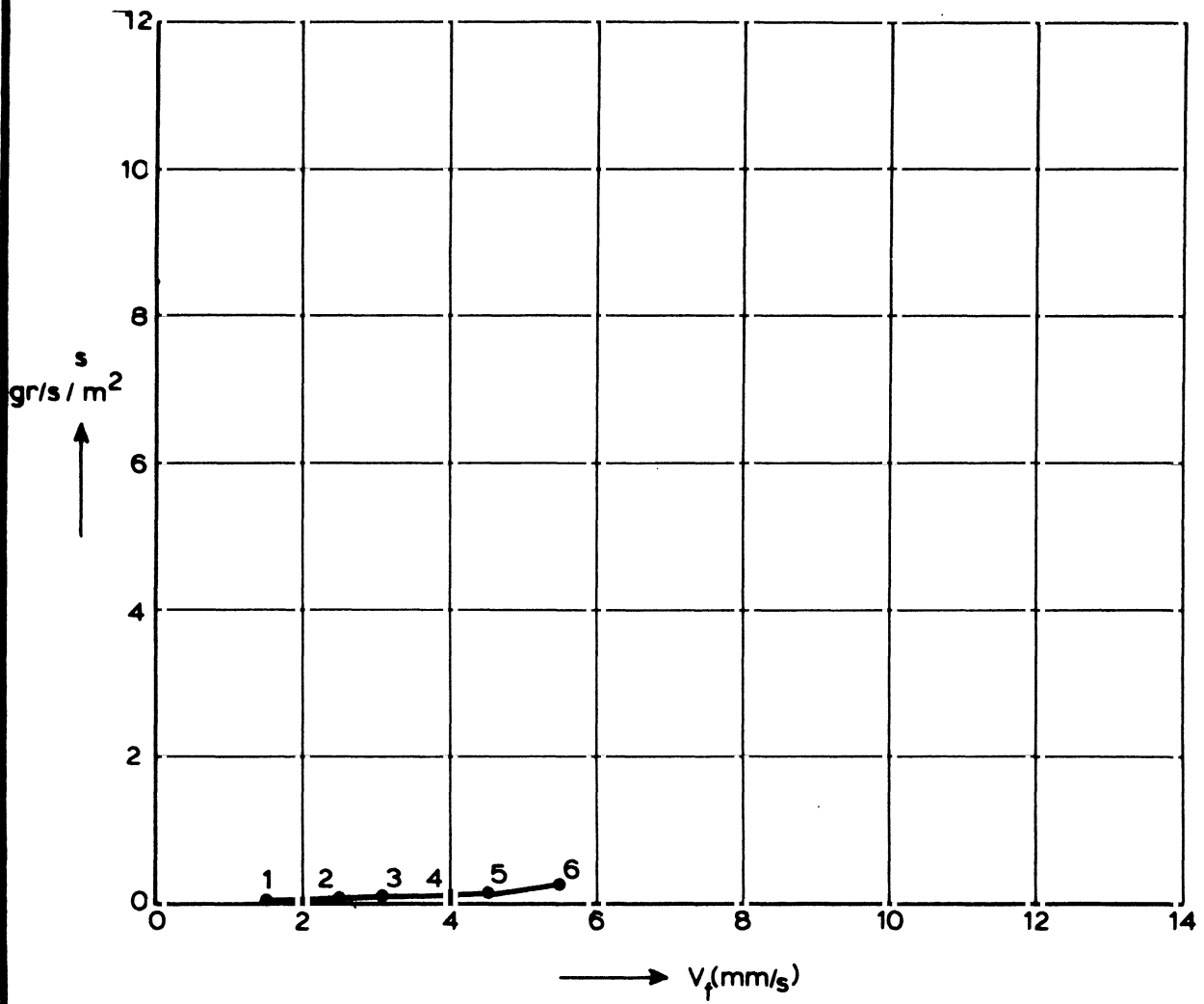
T6

POROSITEIT $n = 21\%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 42



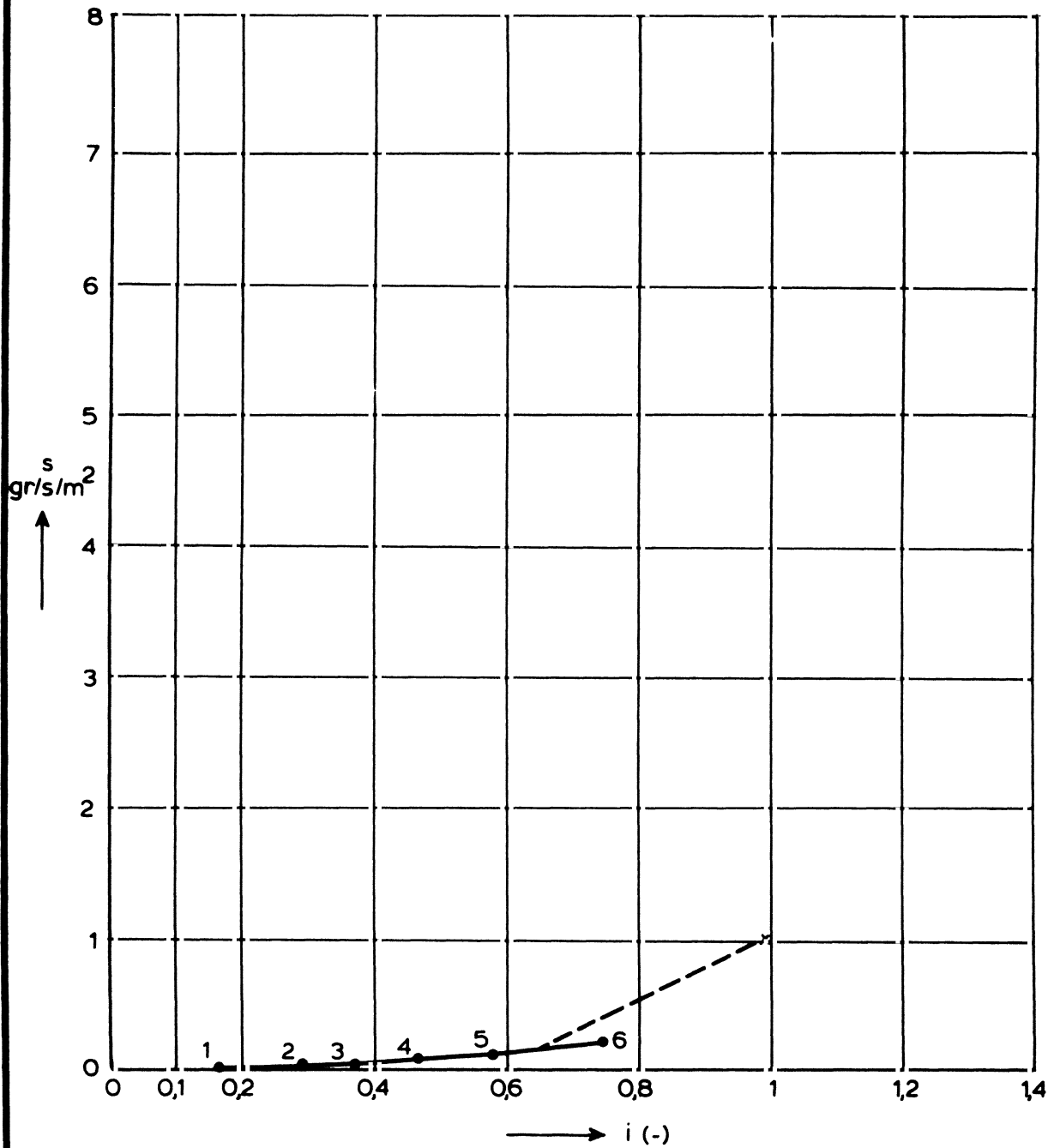
ZANDTRANSPORT

T 6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 43



x = kritiek verhang ($s = 1 \text{ gr/s/m}^2$)

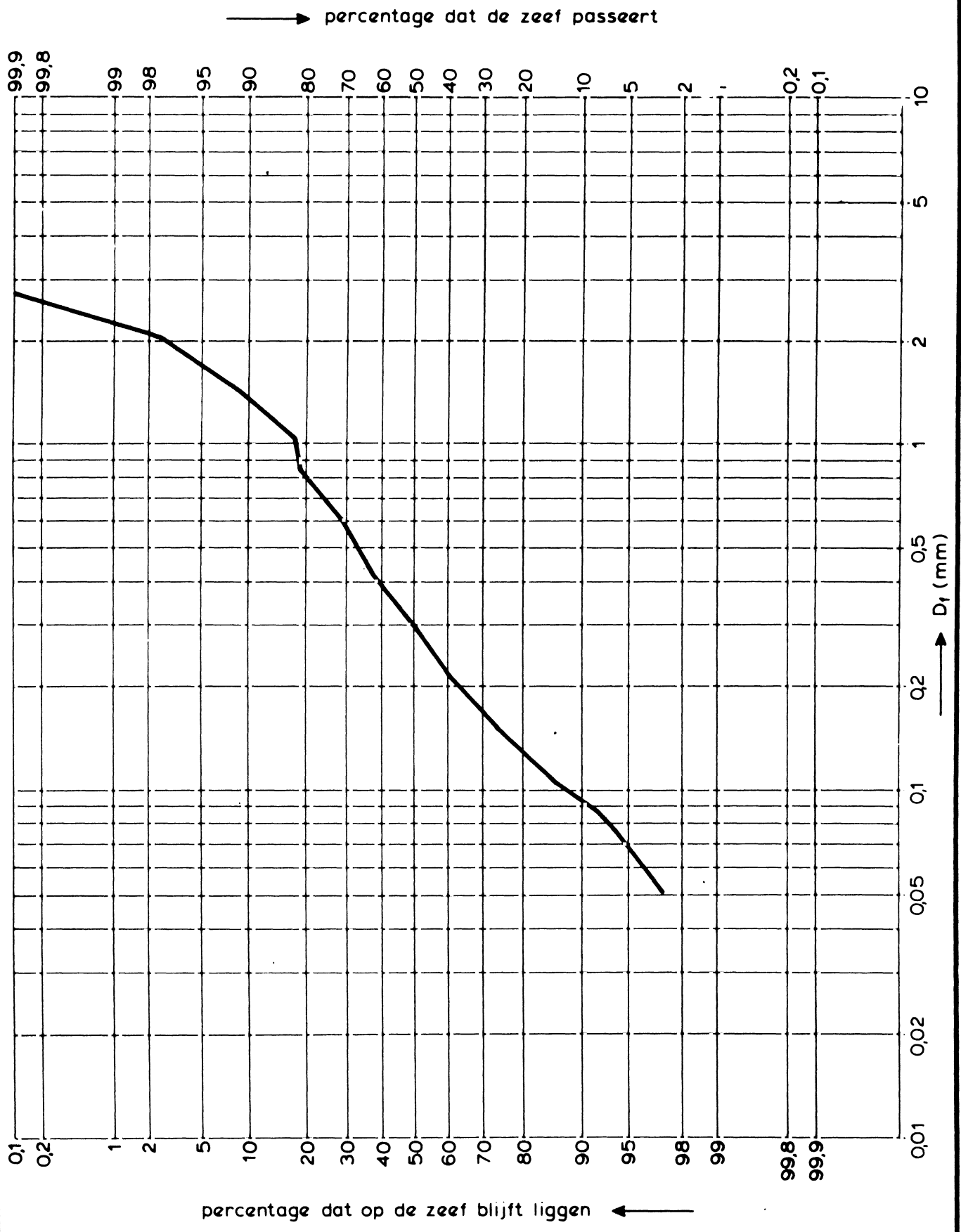
MATERIAALTRANSPORT ALS FUNKTIE VAN VERHANG

T6

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 502

FIG. 44



GETRANSPORTEERD TIJDENS T6, STAP 6

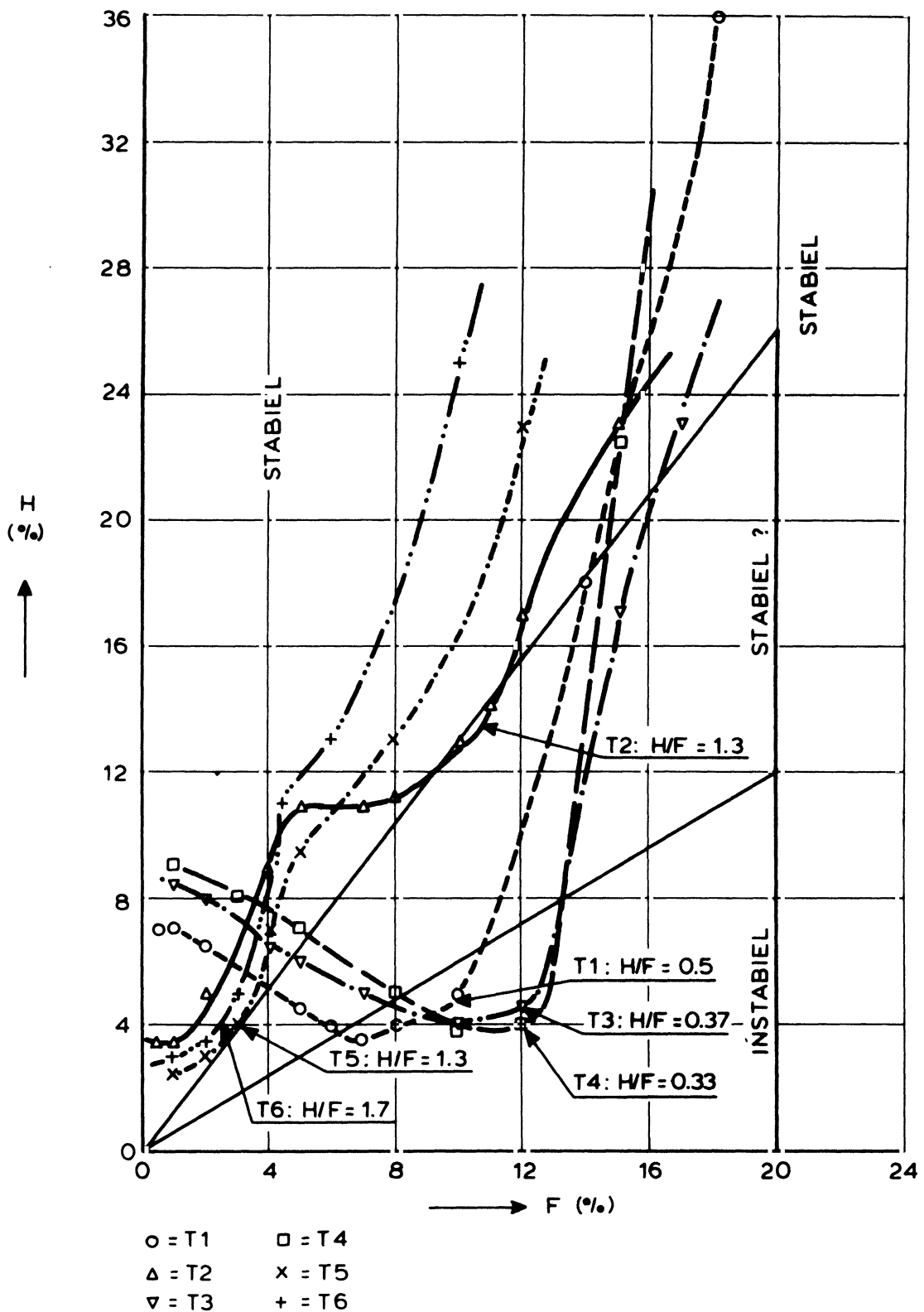
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

$V_f = 5,5 \text{ mm/s}$ $i = 0,75$

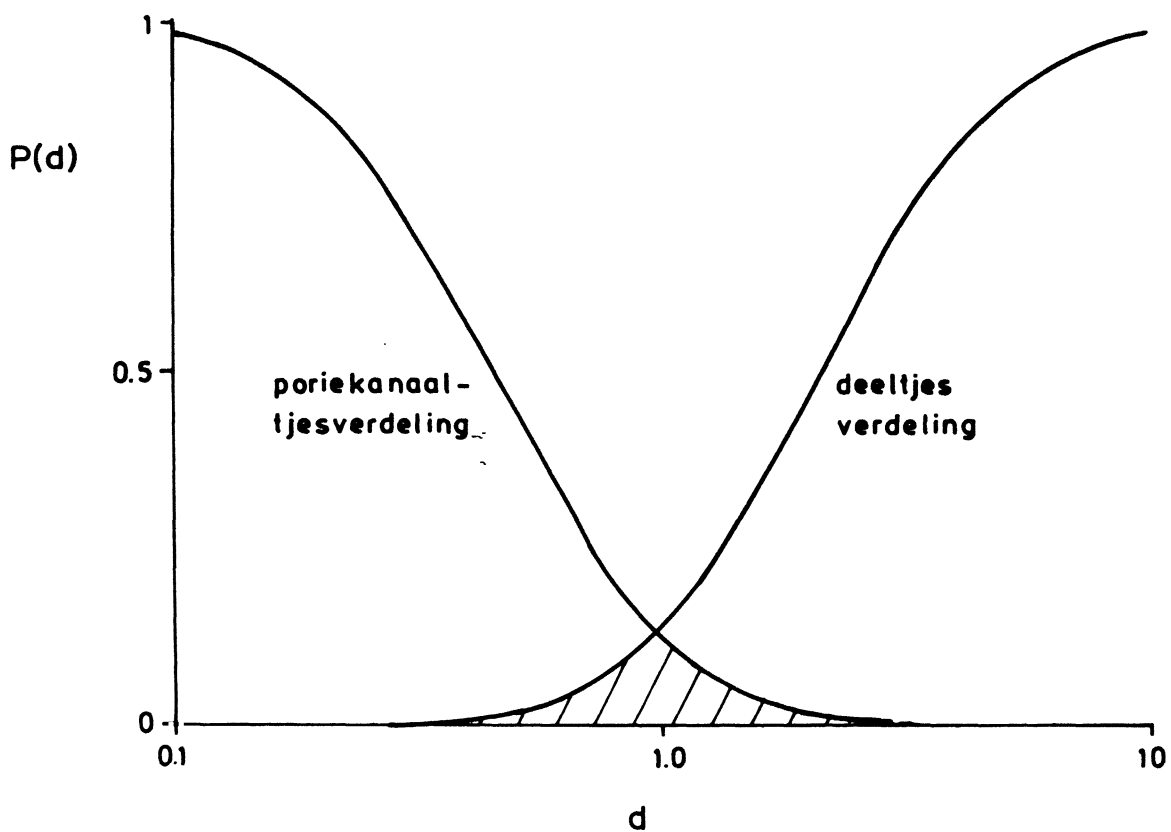
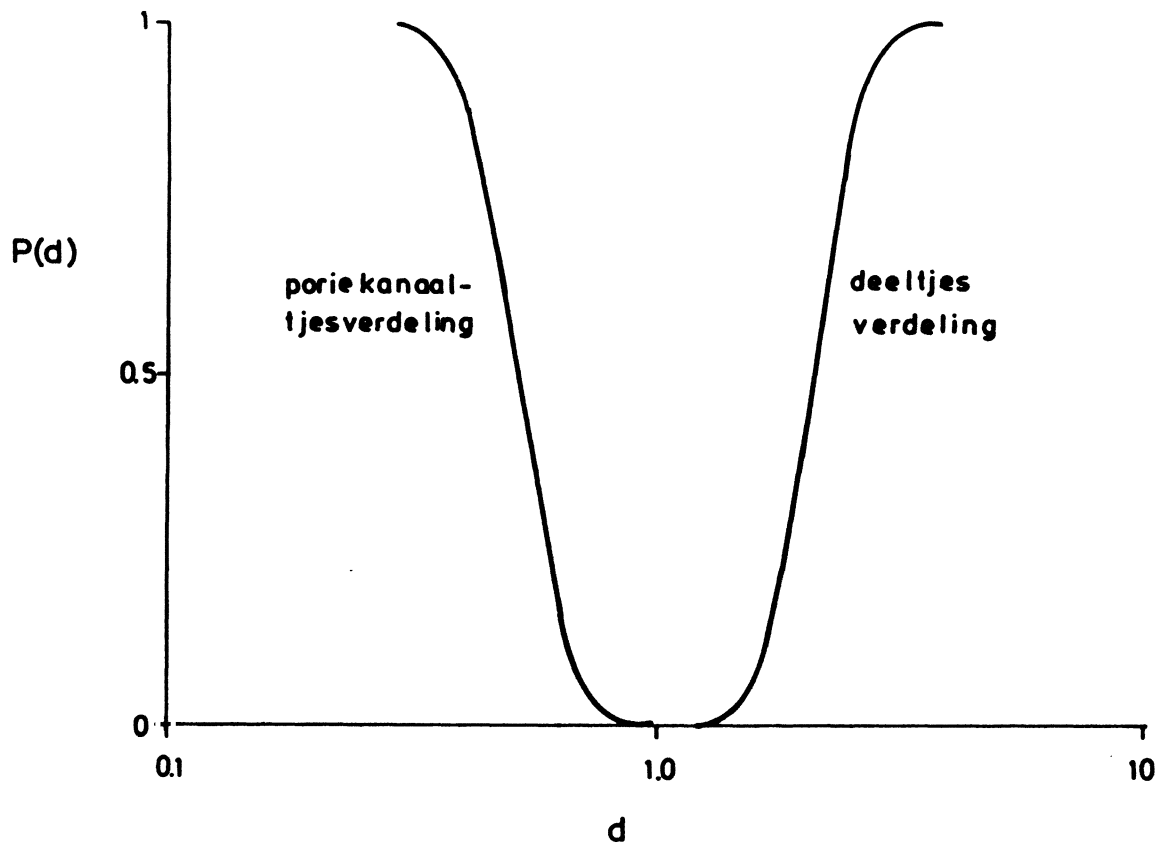
$s = 0,23 \text{ gr/s/m}^2$

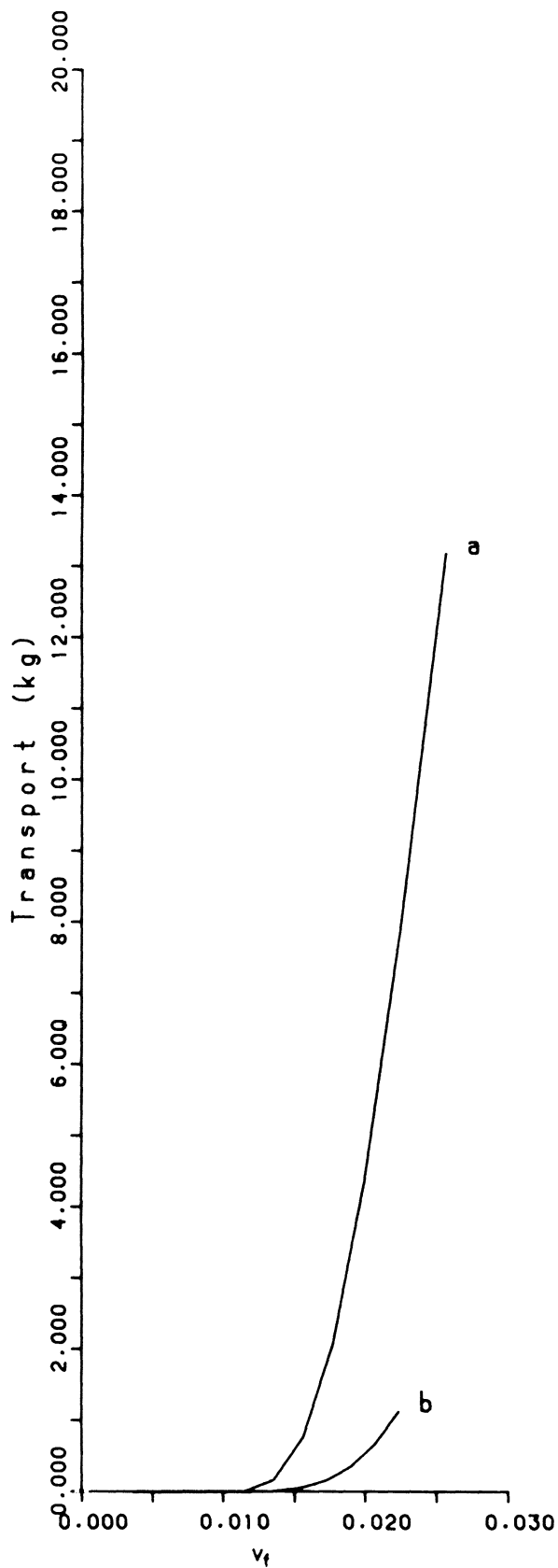
H 502

FIG. 45



GEBRUIKTE MATERIALEN IN F-H DIAGRAM





**GRONDMECHANICA
DELFT**

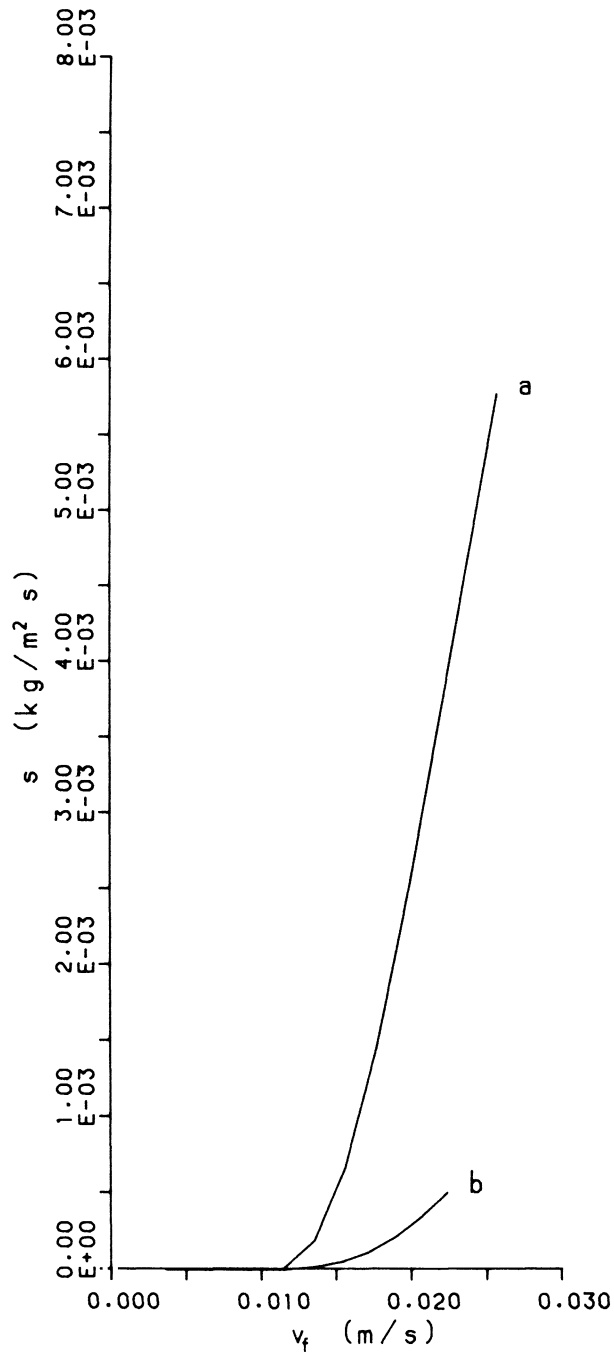
Postbus 69, 2600 AB Delft Telefax (015) 61 08 21
Telefoon (015) 69 35 00 Telex 38234 dell nl

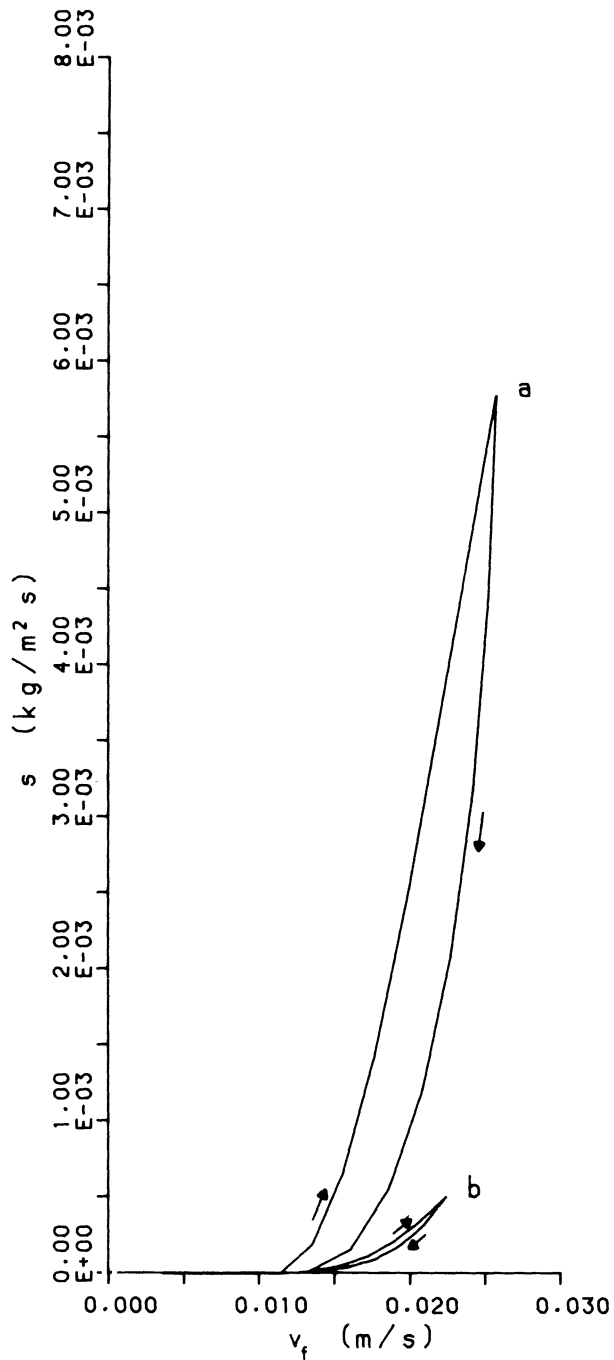
88-05-26

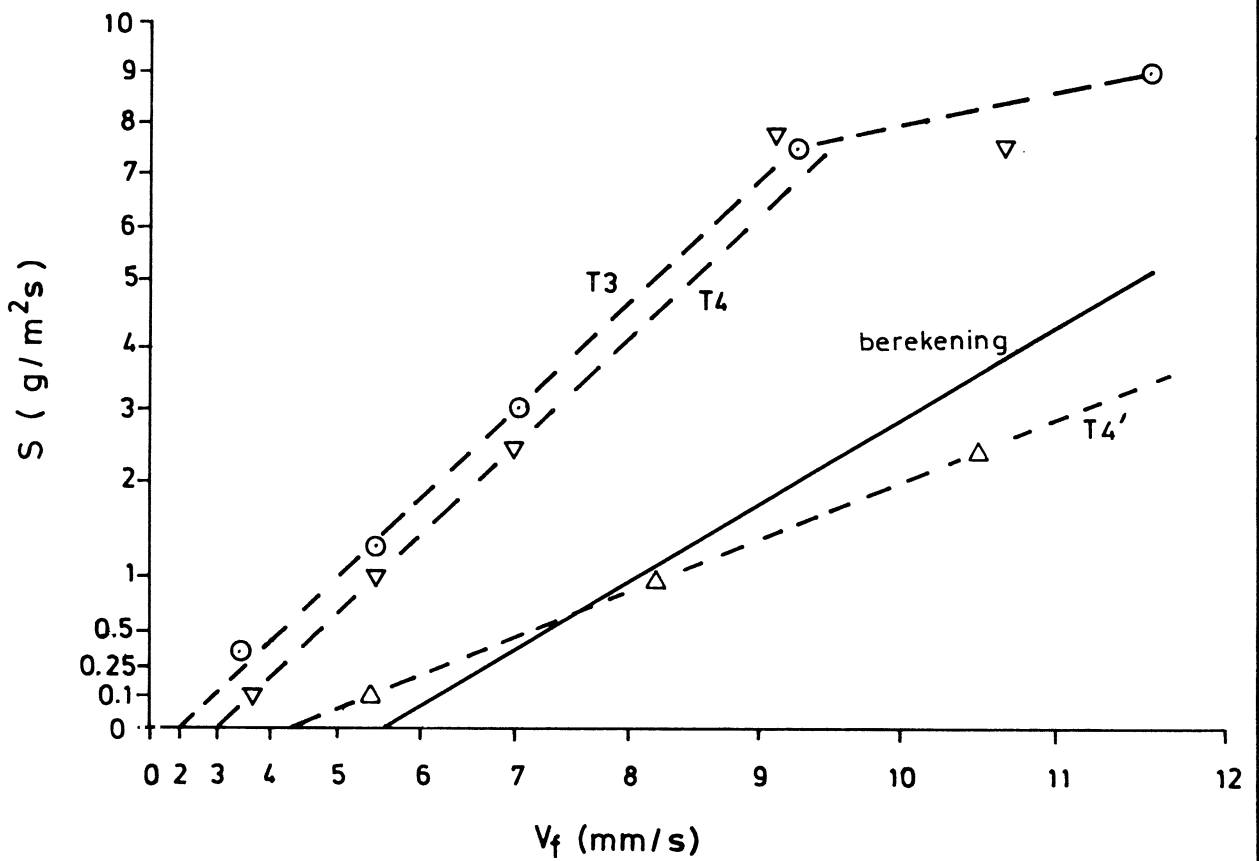
Geaccumuleerd transport in kg materiaal
na perioden van 30 min. constant verhang

CO-287270 AdI

FIG. 48







GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69 2600 AB Delft

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

3 d

88-02-24

gat
G

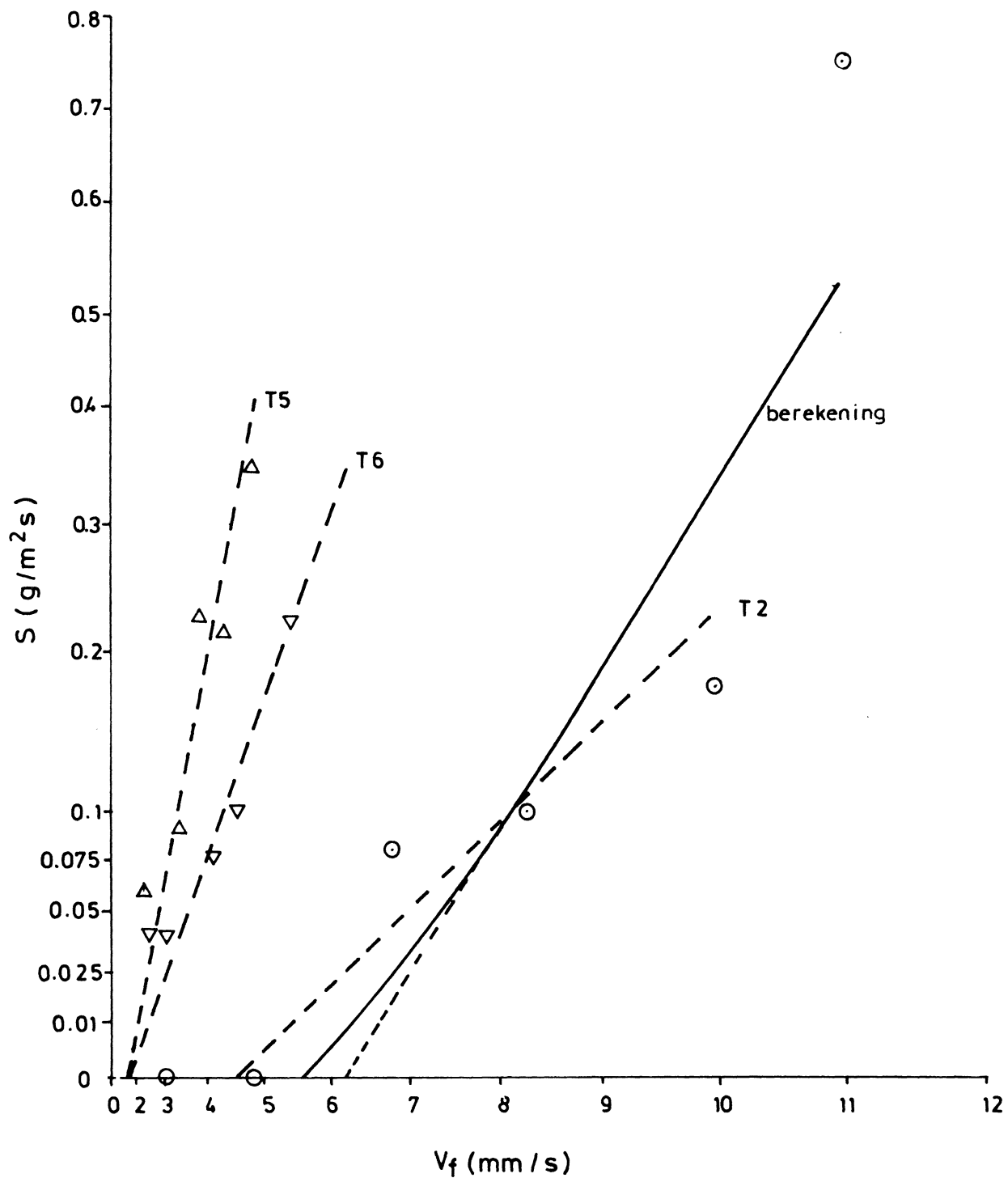
GEMETEN EN BEREKEND TRANSPORT VAN
TYPE 'A' MATERIALEN

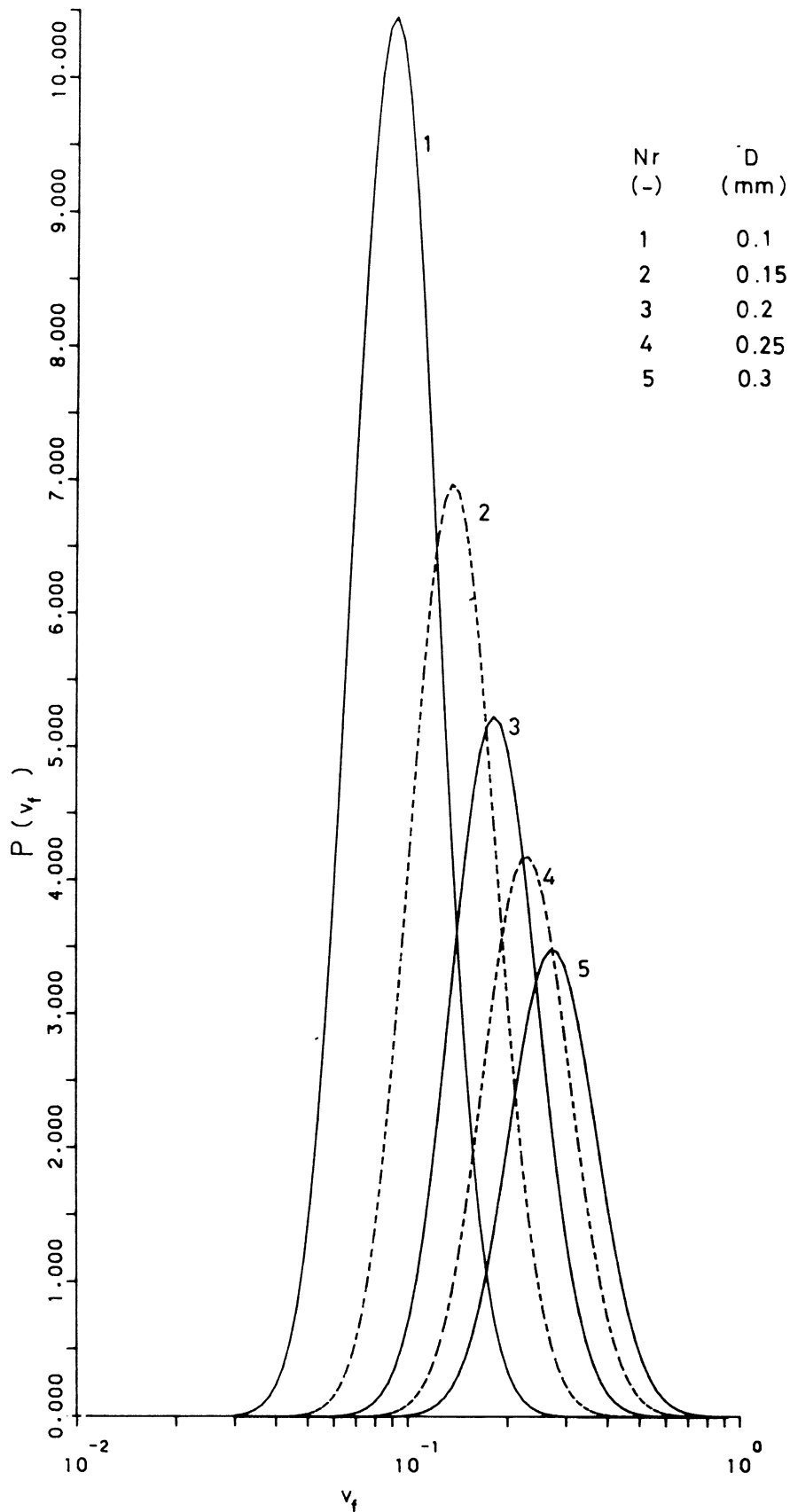
CO-287270

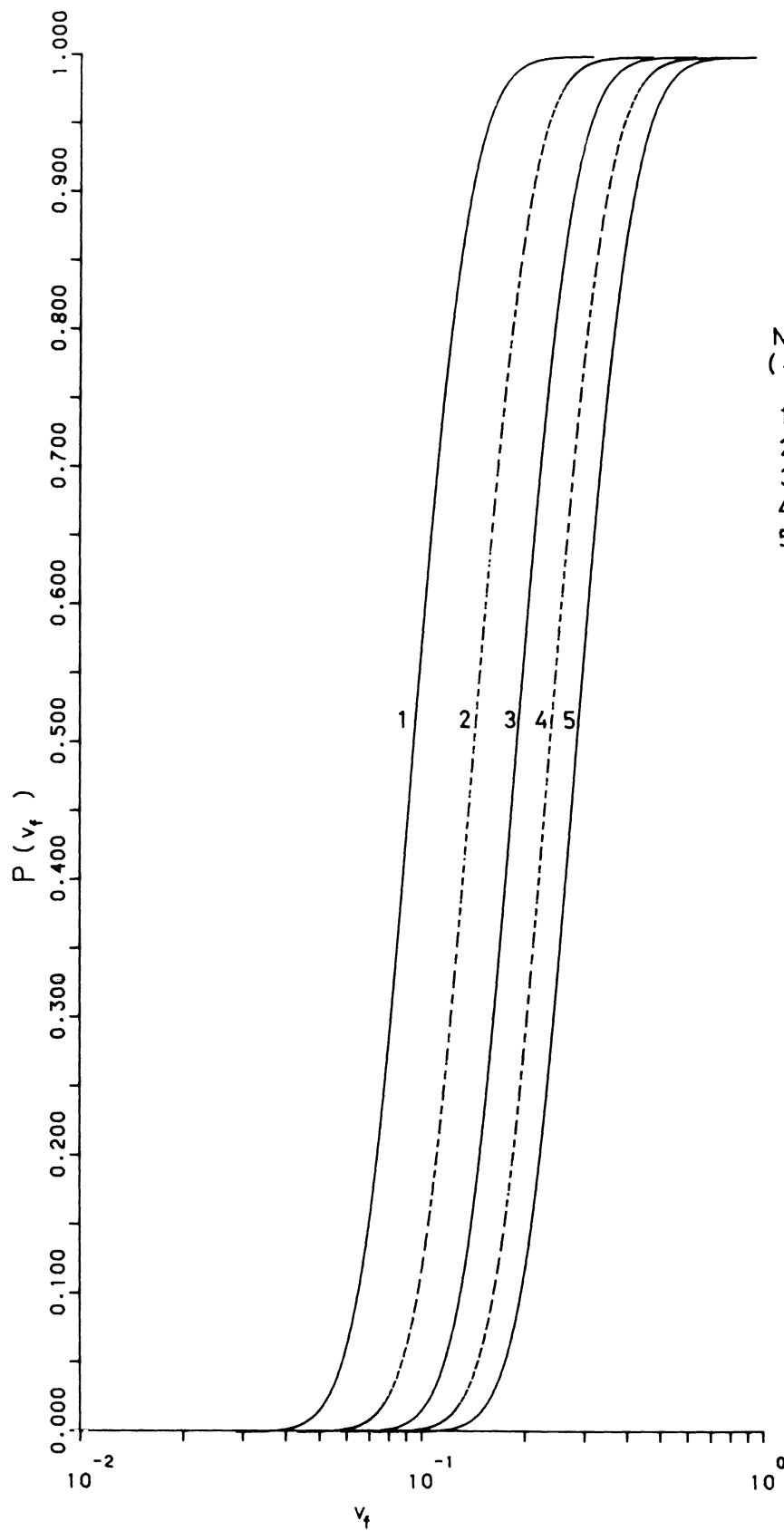
gez

FIG. 51

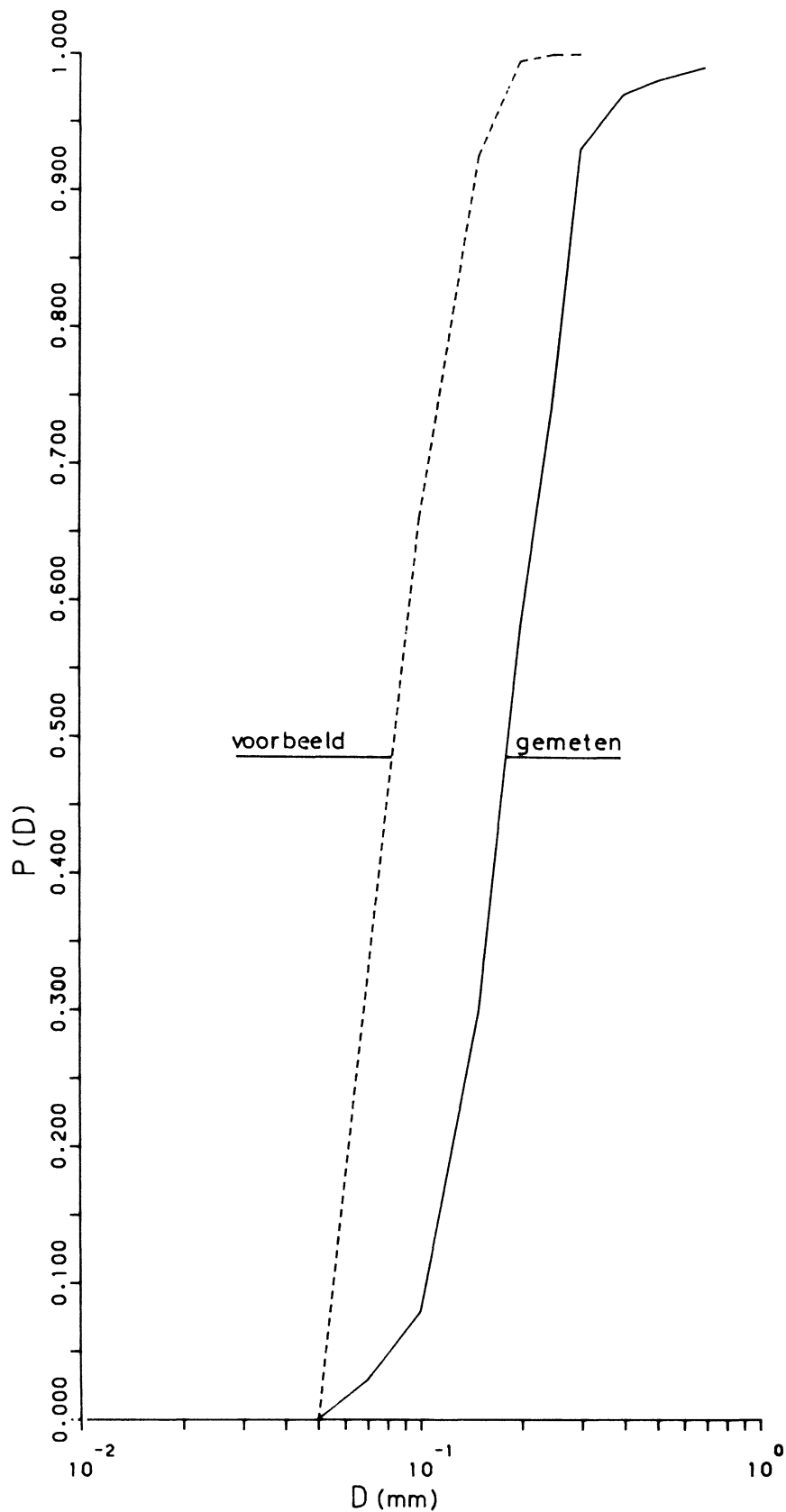
form.
A4







Nr (-)	D (mm)
1	0.1
2	0.15
3	0.2
4	0.25
5	0.3



APPENDIX A

Zandtransport volgens Meyer - Peter Müller

ZANDTRANSPORT VOLGENS MEYER - PETER MÜLLER

In hoofdstuk 4 is een transportformule gebruikt, die het verband aangeeft tussen verhang en materiaaltransport. Deze formule is gebaseerd op die door Meyer-Peter Müller is opgesteld voor beginnend (bodem-) transport in een open waterloop:

$$\phi = 8 (\mu \psi - 0.047)^{3/2} \quad (A1)$$

met:

$$\psi = \frac{\tau}{\rho g \Delta D} = \text{belastingparameter (-)}$$

$$\phi = \frac{s}{\rho_s \sqrt{g \Delta D^3}} = \text{transportparameter (-)}$$

s = transport per meter breedte (kg/m/s)

ρ = soortelijke massa van water (kg/m³)

ρ_s = soortelijke massa van zand (kg/m³)

Δ = $\rho_s / \rho - 1$ = relatieve dichtheid (-)

D = korrelgrootte (m)

g = zwaartekrachtsversnelling (m/s²)

μ = ribbelfactor (-)

τ = schuifspanning (Pa)

Bij afwezigheid van ribbels kan deze formule als volgt herschreven worden:

$$s = p (\tau / \tau_{cr} - 1)^{1.5} \quad (A2)$$

met p = evenredigheidscoëff. afhankelijk van water- en korreleigenschappen (kg/m/s)

Aannemende dat er een konstant deel van het verhang in het filter bijdraagt aan de schuifspanning op de korrels, geldt:

$$\frac{\tau}{\tau_{cr}} = \frac{i}{i_{cr}} \quad (A3)$$

Met turbulente stroming in het filter geldt verder:

$$\frac{\tau}{\tau_{cr}} = \frac{i}{i_{cr}} = \left(\frac{v_f}{v_{fcr}} \right)^2 \quad (A4)$$

met: v_f = filtersnelheid (m/s)

Ingevuld in de transportformule levert:

$$s = p \left(\left(\frac{v_f}{v_{fcr}} \right)^2 - 1 \right)^{1.5} \quad (A5)$$

Voor het volume-transport T geldt het volgende:

$$T = p \cdot \rho \left(\left(\frac{v_f}{v_{fcr}} \right)^2 - 1 \right)^{1.5} \quad (A6)$$

APPENDIX B

Resultaten van proeven in zeeflab met mijnsteen

RESULTATEN VAN PROEVEN IN ZEEFLAB MET MIJNSTEEN

Aannemende dat er geen vocht door de mijnsteen kan worden geabsorbeerd, kan het volgende gekonkludeerd worden:

Soortelijke massa vochtige mijnsteenkorrels: 2350 kg/m³

Soortelijke massa droge mijnsteenkorrels: 2540 kg/m³

Vochtgehalte geleverde mijnsteen: 8 à 9%

Porositeit weinig verdichte mijnsteen:

	berekend op basis van soortelijke massa		berekend op basis van toevoegbaar watervolume
	droog	vochtig	vochtig
test: 1	n = .480	n = .401	n = .396
2	n = .466	n = .386	n = .378
3	n = .451	n = .371	n = .373
4	n = .454	n = .374	n = .373

Porositeit meer verdichte mijnsteen:

	berekend op basis van soortelijke massa		berekend op basis van toevoegbaar watervolume tov vochtige toestand
	droog	nat	nat
test: 1	n = .434	n = .348	n = .322
2	n = .419	n = .332	n = .305
3	n = .397	n = .309	n = .294
4	n = .407	n = .321	n = .304

Luchtinsluiting tov totale volume na vullen met water:

	weinig verdicht vochtig	meer verdicht nat
test: 1	0.5%	2.6%
2	0.8%	2.6%
3	0.2%	1.9%
4	0.1%	1.6%

SECTIE 7

Zanddichtheid van geotextielen als functie van de hydraulische belasting

INHOUD

Symbolenlijst

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
2. <u>Samenvatting en konklusies</u>	3
3. <u>Theorie</u>	6
3.1 Belasting.....	6
3.2 Sterkte.....	9
4. <u>Modelopstelling en resultaten</u>	12
4.1 Modelopstelling.....	12
4.2 Modeloptimalisatie.....	13
4.3 Resultaten.....	15
5. <u>Analyse van resultaten</u>	17
6. <u>Aanbevelingen voor verder onderzoek</u>	20
7. <u>Ontwerprichtlijn</u>	23

REFERENTIES

TABELLEN

FIGUREN

SYMBOLENLIJST

a_f	= lineaire weerstandskoefficiënt van filter	(s/m)
b_f	= kwadratische weerstandskoefficiënt van filter	(s ² /m ²)
b	= dikte filterlaag	(m)
D	= dikte toplaag	(m)
D_{bx}	= korrelgrootte van basis die door x gewichtsprocenten wordt onderschreden	(m)
D_{fx}	= korrelgrootte van filter die door x gewichtsprocenten wordt onderschreden	(m)
e	= koefficiënt (v_f/v_*)	(-)
$f(\dots)$	= funktie van ...	
g	= zwaartekrachtsversnelling	(m/s ²)
i	= verhang	(-)
k_g	= doorlatendheid geotextiel ($v = k_g \cdot i^m$)	(m/s)
k	= doorlatendheid filter ($v = k \cdot i$)	(m/s)
k'	= doorlatendheid toplaag ($v = k' \cdot i$)	(m/s)
m	= macht in doorlatendheidsrelatie van geotextiel ($v = k_g \cdot i^m$)	(-)
n	= porositeit van filter	
O_{q0}	= karakteristieke openingengrootte van geotextiel	(m)
O_x	= gemiddelde zanddiameter van een zandfractie waarvan x% op het geotextiel blijft na een standaard zeeftest	(m)
Re	= Reynoldsgetal	(-)
T_g	= dikte van geotextiel	(m)
v	= watersnelheid	(m/s)
v_f	= filtersnelheid	(m/s)
v_f	= filtersnelheid bij begin van beweging	(m/s)
v_{*cr}	= schuifspanningssnelheid bij begin van beweging zonder geotextiel	(m/s)
w	= valsnelheid van korrel in water	(m/s)
y	= plaatskoördinaat langs talud	(m)
z	= verticale plaatskoördinaat	(m)
z_1	= nivo freatische lijn in filter	(m)
α	= taludhelling	(°)
β	= hoek van golffront	(°)
Δ	= relatieve soortelijke massa zandkorrels (= $\rho_s/\rho-1$)	(-)
λ	= lekhoogte	(m)

SYMBOLENLIJST (vervolg)

ν	= viscositeit van water	(m ² /s)
ρ	= soortelijke massa van water	(kg/m ³)
ρ_s	= soortelijke massa van zandkorrels	(kg/m ³)
ϕ_b	= stijghoogte op talud onder golftop van brekende golf	(m)
ψ_s	= Shields parameter	(-)

Zanddichtheid van geotextielen als functie van hydraulische belasting

1. Inleiding

Een zetsteenverdedigingskonstructie bestaat traditioneel uit een toplaag van gezette steen, gefundeerd op (een of meer) lagen granulair materiaal.

Zolang het granulaire materiaal voldoet aan bepaalde eisen (zie [1]), kan dit materiaal direkt op de kern van de dijk aansluiten. Wordt uit oogpunt van kosten, beschikbaarheid etc. granulair materiaal gekozen, dat niet aan de eisen aanzien van verhindering van erosie voldoet, dan is een geotextiel noodzakelijk. Het geotextiel neemt de taak van het verhinderen van erosie over van het granulaire filter. Doorgaans zal het granulaire filter toch nog zo fijn zijn, dat de hydraulische belasting bij het geotextiel beperkt blijft, waardoor de bescherming van het zand door het geotextiel slechts beperkt hoeft te zijn. Zo'n beperkte erosiebestendigheid wordt reeds verkregen door toepassing van een geotextiel met grotere openingen dan de karakteristieke korrelgrootte van het onderliggende zand.

Het bovenstaande is ook toepasbaar op bodemverdedigingen. Zelfs als direkt op het geotextiel stortsteen met een steengewicht van enkele kilo's wordt aangebracht. De gedachtengang is niet toepasbaar voor taluds, die door brekende golven worden belast, met een relatief dunne toplaag direkt op het geotextiel (dat aansluit op de basis van zand). De hydraulische belasting bij het geotextiel kan in die gevallen zo hoog zijn dat een geometrisch zanddicht geotextiel vereist is. Dit betekent dat de openingen in het geotextiel kleiner moeten zijn dan de karakteristieke korrelgrootte van de basis.

Enkele voorbeelden van konstrukties waarin een geometrisch dicht geotextiel noodzakelijk zou kunnen zijn, zijn gegeven in figuur 1. Voorbeelden van konstrukties waar niet-geometrisch zanddichte geotextielen kunnen worden toegepast, zijn gegeven in figuur 2.

Van belang is echter niet zozeer het type konstruktie, als wel de optredende hydraulische belasting bij het geotextiel.

Het onderzoek heeft zich gericht op de erosie-bestendigheid van niet geometrisch dichte geotextielen met geweven structuur op een horizontale basis van zand. De hydraulische belasting bestaat uit een stationaire stroming door grof grind op het geotextiel. Het bezwijkmechanisme dat hiermee bestudeerd wordt, is transport van zandkorrels door het geotextiel (eventueel voorafgegaan door transport over korte afstand onder het geotextiel).

Het onderzoek is uitgevoerd onder leiding van ir. M. Klein Breteler die tevens dit verslag heeft samengesteld. Het is in 1985 opgestart als speurwerk van het Waterloopkundig Laboratorium en in 1986 afgerond in het kader van het onderzoek naar de stabiliteit van talusbekledingen van gezette steen dat in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat wordt uitgevoerd.

2. Samenvatting en konklusies

In bodem- en taludverdedigingskonstrukties zoals getekend in figuur 2 blijkt de optredende hydraulische belasting vaak zo klein te zijn dat erosie reeds verhinderd kan worden met een geotextiel met grotere openingen dan de korrelgrootte van de basis. Er is dan sprake van een niet-geometrisch dicht geotextiel, in tegenstelling tot een geometrisch dicht geotextiel dat openingen heeft die zo klein zijn dat het fysich niet meer mogelijk is dat zandkorrels door het geotextiel uitspoelen.

Met modelonderzoek is aangetoond dat begin van beweging van zand door een geotextiel optreedt bij een zekere kritieke filtersnelheid in het granulaire materiaal op het geotextiel. De grootte van het hiermee samenhangende verhang bleek onbelangrijk te zijn.

Op deze konstatering is de hypothese gebaseerd dat er een overeenkomst is tussen de fysische processen die een belangrijke rol spelen bij begin van beweging in open waterlopen, onder granulaire filters en door geotextielen. Dit heeft geleid tot het gebruik van de kritieke schuifspanningssnelheid ten aanzien van begin van beweging in open waterlopen (zoals gebruikt door Shields) als beschrijvende parameter voor de kritieke filtersnelheid bij geotextielen.

Met behulp van modelonderzoek in de Filterbak (zie figuur 5 tot en met 7) is een empirische relatie opgesteld voor de kritieke filtersnelheid:

$$v_{f_{cr}} = \left(12 \left(\frac{D_{b90}}{0.90}\right)^4 \frac{T_g}{D_{b90}} \left(\frac{w}{k_g}\right)^{\frac{1}{2m}} + \frac{n}{e}\right) \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (1)$$

met

v_f = filtersnelheid bij begin van beweging (m/3)

D_{b90}^{cr} = korrelgrootte van basis die door 90% op basis van gewicht wordt onderschreden (m)

D_{b50} = korrelgrootte van basis die door 50% op basis van gewicht wordt onderschreden (m)

0.90 = karakteristieke openingengrootte van geotextiel (m)

T_g = dikte geotextiel (m)

ψ_s	= Shields-parameter (zie tabel 3)	
w	= valsnelheid van maatgevende korrels	(m/s)
Δ	= relatieve soortelijke massa zand ($= \rho_s / \rho - 1$)	
g	= zwaartekrachtsversnelling	(m/s ²)
k_g	= doorlatendheid geotextiel ($v = k_g i^m$)	(m/s)
m	= macht in doorlatendheidsrelatie geotextiel ($v = k_g i^m$)	
n	= porositeit filter	(-)
e	= $c \cdot Re^{-m}$ (zie tabel 3)	(-)
Re	= Reynoldsgetal ($= v_f D_{f15} / \nu$)	(-)
ν	= viscositeit van water	(m ² /s)
D_{f15}	= karakteristieke korrelgrootte filter	(m)

Deze formule is geldig voor de onderzochte omstandigheden, te weten:

- stationaire stroming door granulair materiaal op een horizontaal geotextiel
- een basis van fijn zand ($D_{b50} = 100 \text{ à } 150 \mu\text{m}$)
- geweven geotextielen die goed aansluiten op de basis

De formule die in [6] is gepubliceerd wijkt hiervan af, omdat die op een veel kleiner aantal proeven was gebaseerd, die tevens allemaal waren uitgevoerd met zand met $D_{b50} = 150 \mu\text{m}$.

Uit de proefresultaten en formule (1) kan gekonkludeerd worden dat een zeker gaas erosie verhinderd tot dezelfde kritieke filtersnelheid als een bandjesweefsel met orde 20 tot 40% grotere openingen (als ze een gelijke dikte hebben) (zie figuur 20).

Een zandtransport van 0,2 gr/s per strekkende meter is begin van beweging genoemd. Met de ontwikkelde modelopstelling (figuur 6) bleek zowel begin van beweging als het erosieproces (tegen de stroming in uitgroeiende erosie-kanaltjes) goed te onderzoeken te zijn. Randeffekten speelden pas ver voorbij begin van beweging een rol.

Aan de hand van de zandtransportmetingen is gekonkludeerd dat er twee elkaar tegenwerkende processen een rol spelen:

- 1) Bij verhoging van de filtersnelheid neemt ook het zandtransport toe zoals dit ook gebeurt in een open waterloop.

2) Op den duur remt de vorming van erosie-kanaaltjes en -kuilen het zandtransport.

Verwacht mag worden dat bij een zekere mate van overbelasting het tweede proces leidt tot een evenwichtsituatie waarbij het zandtransport klein of zelfs verwaarloosbaar zou kunnen zijn.

Tot slot is vervolgonderzoek aanbevolen dat gericht is op de volgende punten:

- het vergroten van het inzicht in de belangrijkste fysische processen die bij erosie een rol spelen (theorie-vorming)
- modelonderzoek bij andere belastingssituaties zoals een taludhelling, cyclische belasting en/of gekombineerd met verticale verhangkomponent
- non-wovens en andere bezwijkmechanismen.

$$\text{gebied 1: } i = \frac{A \sin \alpha}{\lambda} e^{y \cdot \sin \alpha / \lambda} \quad (2)$$

$$\text{gebied 2: } i = \frac{C \sin \alpha}{\lambda} e^{y \cdot \sin \alpha / \lambda} - \frac{E \sin \alpha}{\lambda} e^{-y \cdot \sin \alpha / \lambda} - \frac{\cos \alpha}{\text{tg} \beta} \quad (3)$$

$$\text{gebied 3: } i = - \frac{F \sin \alpha}{\lambda} (e^{(-2z_1 + y \cdot \sin \alpha) / \lambda} + e^{-y \cdot \sin \alpha / \lambda}) + \sin \alpha \quad (4)$$

De begrensing van elk gebied is als volgt:

$$\text{gebied 1: } y < - \text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta \cdot \phi_b / \sin \alpha$$

$$\text{gebied 2: } - \text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta \cdot \phi_b / \sin \alpha < y < 0$$

$$\text{gebied 3: } 0 < y < z_1 / \sin \alpha$$

k	= doorlatendheid filter	(m/s)
y	= coördinaat langs talud	(m)
α	= taludhelling	(°)
β	= hoek van golffront	(°)
ϕ_b	= stijghoogte op talud als $y \ll 0$	(m)
i	= verhang in filter	(-)
λ	= lekhoogte (m) = $\sin \alpha \sqrt{k b D / k'}$	
D	= dikte toplaag	(m)
z_1	= hoogte freatische lijn	(m)
k'	= doorlatendheid toplaag	(m/s)

$$E = \frac{-\lambda}{2 \text{tg} \alpha \text{tg} \beta} e^{-\text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta \cdot \phi_b / \lambda} \quad (5)$$

$$F = \frac{\lambda}{2 \text{tg} \alpha \text{tg} \beta} (-e^{-\text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta \cdot \phi_b / \lambda} + 1) + \frac{1}{2} \lambda \quad (6)$$

$$C = - E + F (-e^{-2z_1 / \lambda} + 1) \quad (7)$$

$$A = C + E e^{2 \text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta \cdot \phi_b / \lambda} \quad (8)$$

Met formule (2) tot en met (8) is voor twee konkrete gevallen het verhang in het filter berekend. Het resultaat van de berekeningen is grafisch weergegeven in figuur 3.

Uit deze figuur blijkt dat het grootste neerwaarts gerichte verhang vlak onder

de freatische lijn in het filter te vinden is. Met formule (4) is in te zien dat dit verhang niet groter dan $\sin\alpha$ kan worden.

Het grootste opwaartsgerichte verhang ontstaat onder het golffront. Gezien het feit dat de eerste twee termen uit formule (3) altijd positief zijn (want $C > 0$ en $E < 0$), kan het grootste opwaarts gerichte verhang nooit groter dan $\cos\alpha/\text{tg}\beta$ worden. Meestal is dit aanzienlijk groter dan $\sin\alpha$, echter meestal kleiner dan 1.

Bij de afleiding van de formules is aangenomen dat de stroming in het filter één dimensionaal is. Hierdoor wordt voorbij gegaan aan het feit dat de verhangen wat dieper in het talud kleiner zullen zijn dan vlak onder de toplaag. Bij het geotextiel is daarom het verhang kleiner dan berekend wordt met deze formules. Dit geldt vooral voor het opwaarts gerichte verhang, omdat dit vrij plaatselijk optreedt.

Verondersteld wordt dat de gegeven bovengrenzen voor het optredende verhang ook gelden bij een stortsteen talud zoals getekend in figuur 2.

Met het bekend zijn van de optredende verhangen in het filter kan de filtersnelheid eenvoudig berekend worden met een doorlatendheidsrelatie voor granulaair materiaal (Forchheimer [3]):

$$i = a_f v_f + b_f v_f^2 \tag{9}$$

$$a_f = \frac{190 \nu (1-n)^2}{g n^3 D_{f15}^2} \tag{10}$$

$$b_f = \frac{0,13}{n^5 \cdot g D_{f15}} \tag{11}$$

- a_f = lineaire weerstandcoëfficiënt filter (s/m)
- b_f = kwadratische weerstandcoëfficiënt filter (s^2/m^2)
- ν = viscositeit van water (m^2/s)
- g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
- n = porositeit filter (-)
- D_{f15} = karakteristieke korrelgrootte filter (m)

Het verhang in een verdedigingskonstruktie die uitsluitend door stroming wordt belast kan afgeschat worden door te veronderstellen dat bij het geotextiel het verhang gelijk is aan het (lokale) verhang van de waterspiegel in de rivier of het kanaal. De filtersnelheid kan dan bepaald worden met formule (9) tot en met (11).

3.2 Sterkte

Traditionele ontwerpregels voor geotextielen gaan uit van de eis dat de openingen in het geotextiel zodanig klein moeten zijn dat het onderliggende zand niet door het geotextiel kan; zelfs niet bij een extreem hoge belasting (drukgradient loodrecht op het geotextiel vele malen groter dan 1). Ogink [4] heeft na vele modelproeven de volgende ontwerpcriteria opgesteld:

- stationaire belasting

$$O_{90}/D_{b90} < 1,0 \text{ (woven geotextiles)}$$

$$O_{90}/D_{b90} < 1,8 \text{ (non woven geotextiles)}$$

- dynamische belasting:

$$O_{98}/D_{b15} < 1,0 \text{ (geen filteropbouw)}$$

$$O_{98}/D_{b85} < 1,0 \text{ (wel filteropbouw)}$$

O_{90} , O_{98} = karakteristieke openingen grootte (mm) = gemiddelde diameter van de zandfractie van welke resp. 90% of 98% van het gewicht op het geotextiel blijft liggen na een standaard zeeftest.

D_{b90} = korrelgrootte van de basis (zand) die door 90% van het gewicht wordt onderschreden (m)

Bovenstaande regels komen neer op een geometrische eis die alleen afhankelijk is van de aard van de belasting en niet van de grootte ervan. Dit is uitstekend voor de konstrukties zoals getekend in figuur 1, maar leidt tot overdimensionering voor konstrukties in figuur 2.

Het K & O [5] heeft aangetoond dat in de praktijk al jaren gewerkt wordt met niet-geometrisch zanddichte geotextielen. Het in dit verslag gerapporteerde onderzoek toont aan dat dit terecht is, mits de hydraulische belasting niet te groot wordt. De maximaal toelaatbare belasting is onderwerp van deze paragraaf.

In [1] is voor granulaire filters de volgende ontwerpregel afgeleid:

$$v_{f_{cr}} = \frac{n}{e} \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (12)$$

$v_{f_{cr}}$ = filtersnelheid bij begin van beweging van zand (m/s)

e = koëfficiënt (-)

ψ_s = Shields-parameter (-)

Δ = relatieve soortelijke massa zandkorrels ($\rho_s / \rho - 1$) (-)

Deze formule geeft aan bij welke filtersnelheid de korrels basismateriaal (zonder geotextiel) in beweging zullen komen. De formule is afgeleid op basis van de formule van Shields voor open waterlopen. De twee belangrijkste verschillen tussen filters en open waterlopen zijn in rekening gebracht, namelijk dat het doorstroomprofiel in het filter n maal kleiner is en dat de schuifspanningssnelheid in een filter bij de basis veel groter is dan bij de bodem in een open waterloop. Dit laatste is vervat in de koëfficiënt e .

Nu een geotextiel tussen granulair materiaal en de basis wordt gelegd, ligt het voor de hand de parallellen te onderzoeken tussen het zandtransportmechanisme bij granulaire filters en geotextielen.

In figuur 4 zijn beide konstrukties getekend. Het valt op dat bij een granulair filter de stroming in de poriën en de daarmee samenhangende schuifspanning direkt op het zand kan inwerken. Bij een geotextiel zal eerst de lokale snelheid door het geotextiel worden afgeremd en is het dan toch in staat om de zandkorrel mee te nemen dan ondervindt vervolgens de zandkorrel het geotextiel als hindernis. In een formule voor $v_{f_{cr}}$ voor de situatie met een geotextiel zou zowel deze demping van de lokale belasting, als de geometrische hindering die een bewegende zandkorrel ondervindt, tot uiting moeten komen. Hiermee wordt aannemelijk dat de volgende paramters een rol spelen:

- $0_{90}/D_{90b}$ verhouding
- de dikte van het geotextiel T_g
- doorlatendheid van geotextiel k_g
- erosie-gevoeligheid van het zand.

Bij granulaire filters is gebleken dat de erosie-gevoeligheid van het zand goed beschreven kan worden met de kritieke schuifspanningssnelheid volgens Shields:

$$v_{*cr} = \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (13)$$

Daarnaast kan de valsnelheid van de korrels een rol spelen:

$$w = \frac{\Delta g}{18\nu} D_b^2 \quad \text{mits} \quad \frac{D_b w}{\nu} < 1 \quad (\text{Stokes, zie o.a. [7]})$$

De karakteristieke korreldiameter is doorgaans kleiner dan D_{b50} , vooral bij weinig transport [7]. Aangenomen wordt dat D_{b15} een redelijke maat is. Dit komt ongeveer overeen met de gemiddelde diameter.

Het in het volgende hoofdstuk omschreven modelonderzoek heeft als doel het verband tussen $v_{f_{cr}}$ en de genoemde parameters langs empirische weg te bepalen.

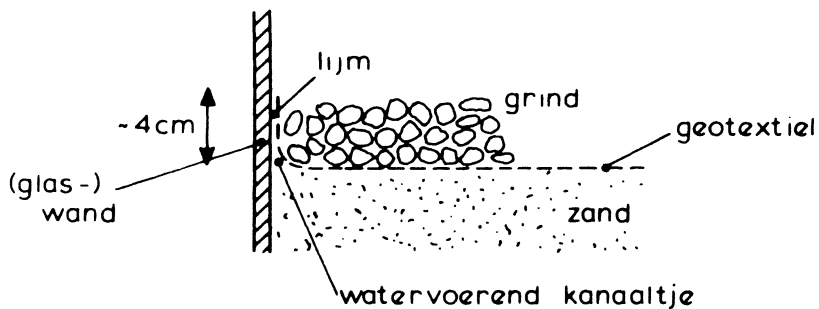
4. Modelopstelling en resultaten

4.1 Modelopstelling

De serie proeven is gestart met een modelopstelling zoals getekend in figuur 5. Vanaf T5 is de opstelling iets gewijzigd (zie figuur 6 en 7).

Met de regelbare overstort was het mogelijk om stapsgewijs het verhang over de meetsectie te vergroten. Het bijbehorende debiet is gemeten met de Rehbock-overlaat en door middel van het meten van de vultijd van een bak van 420 l. Bij elke proef is uitgegaan van een volkomen vlak en horizontaal zandbed dat aan boven- en benedenstroomse zijde was ingepakt in een zanddicht geotextiel (zie figuur 6). Dit garandeerde een doorstroming van het zandpakket met horizontale stroomlijnen.

Op het zandpakket is het te onderzoeken geotextiel aangebracht. Het geotextiel is steeds ongeveer 5 à 10 cm breder gemaakt dan de breedte van de bak (loodrecht op de stroomrichting), zodat het mogelijk was een opstaand randje geotextiel van enkele centimeters aan de glaswand en aan de achterwand vast te plakken. In de praktijk kwam het er vaak op neer dat er een klein watervoerend kanaaltje tussen de (glas-)wand, het zand en het geotextiel ontstond:



Bijna altijd heeft dit randeffekt geen invloed gehad op het begin van beweging. Dit kan gekonkludeerd worden uit het feit dat de erosie-kanaaltjes onder het geotextiel (zie figuur 8) zelden aan de rand beginnen. Na verloop van tijd heeft het kanaaltje echter wel duidelijk de voorkeur om de randen op te zoeken, zodat ruim voorbij begin van beweging de grootte van het zandtransport wel door de randen beïnvloed zou kunnen zijn.

Het verhang is in elke proef stap voor stap verhoogd, totdat een zandtransport van 1 à 2 gr/s werd gemeten. Tijdens elke stap, die 30 à 40 minuten duurde, is

het verhang konstant gehouden. Na afloop van elke stap is het gemiddelde zandtransport gemeten door het benedenstrooms gesedimenteerde zand, afkomstig uit de modelsektie, op te zuigen en na droging te wegen.

Als criterium voor begin van beweging is een zandtransport van 0,2 gr/s gekozen.

Voor enkele proeven (T14, T15 en T18) was de verhouding tussen watersnelheid in de bezinkbak en bezinksnelheid van zand zodanig dat bovenstaande methode te lage zandtransporten zou opleveren. Tijdens die proeven is daarom gedurende ongeveer 20 min. op drie tot vier nivo's ten opzichte van het geotextiel net benedenstrooms van de modelsektie elk 10 l water met sediment afgezogen (zie figuur 7). De afzuigpunten zijn op een kar geplaatst die gedurende het afzuigen heen en weer bewoog, zodat een over de breedte gemiddeld zandtransport is gemeten.

Hiermee zijn gegevens verkregen over de zand-koncentratie-verdeling die, geïntegreerd en vermenigvuldigd met de filtersnelheid, het zandtransport oplevert.

In de achterwand van de modelsektie waren aansluitingen voor stijgbuisjes aanwezig, waarmee de stijghoogte verdeling in het grind en in het zand zijn gemeten. In figuur 6 zijn de aansluitingen met een sterretje gemarkeerd.

Tijdens de proeven T5 tot en met T18 was het verval in het eerste deel van de modelsektie aanzienlijk kleiner dan in de tweede (prismatische) helft. In de tweede helft was het verval bijna plaatsonafhankelijk ($\pm 10\%$ relatief t.o.v. het gemiddelde verhang) en waren verhangen loodrecht op het grensvlak doorgaans verwaarloosbaar (orde 0,10 vertikaal omhoog in het zand bij groot horizontaal verhang).

Op het grind is een waterdicht dak geplaatst, van onder naar boven bestaande uit waterdicht plastic, schuimrubber en triplex. Het dak was tegen oplichten beschermd door middel van ballast.

4.2 Modeloptimalisatie

De eerste drie proeven zijn uitgevoerd met de opstelling van figuur 5. Hierbij ving de erosie aan bij de instroomrand van het model en werd al snel een vrij diepe kuil gevormd. Om de invloed van de modelrand zo veel mogelijk te beperken, is voor de andere proeven een gewijzigde modelopstelling gekozen (zie figuur 6). Door de vernauwing van het doorstroomprofiel (grind) is een situatie gekreëerd waarbij in het bovenstroomse deel van de meetsektie de filtersnelheid onder de kritieke waarde voor begin van beweging bleef.

Het karakteristieke beeld van de erosie-kanaaltjes is zichtbaar in figuur 8. Soms was een kanaaltje reeds tijdens de proef door de glaswand zichtbaar (figuur 9).

In tegenstelling tot de andere proeven bleek na T14 het patroon met kanaaltjes in benedenstroomse richting verschoven te zijn ten opzichte van de andere proeven (figuur 9).

Na proef T16 bleken er geen kanaaltjes gevormd te zijn. Er waren slechts enkele erosiekuilen zichtbaar.

In T7 is met zand met afwijkende kleur (gelijk soortelijk gewicht en korrelgrootte) aangetoond dat begin van beweging het eerst halverwege het model plaatsvindt. Vervolgens ontstaan er meanderende kanaaltjes onder het geotextiel, die vooral tegengesteld aan de stroomrichting groeien. Op den duur worden er diepere kuilen gevormd die tenderen naar een zekere evenwichtsdiepte.

Dit laatste is duidelijk af te leiden uit de resultaten die weergegeven zijn in figuur 10 en 11. Er valt daarin op dat bij gelijkblijvende filtersnelheid, het zandtransport sterk afneemt. Zodra de filtersnelheid weer wordt verhoogd, neemt ook het zandtransport meestal weer toe. Wanneer er met enkele grote stappen een bepaalde filtersnelheid wordt ingesteld, dan wordt het zandtransport volgens figuur 10 en 11 duidelijk groter dan wanneer die filtersnelheid pas na vele kleine stapjes bereikt wordt.

Het bovenstaande kan verklaard worden door aan te nemen dat er twee elkaar tegenwerkende processen van invloed zijn, te weten:

- 1) Verhoging van de filtersnelheid verhoogt het zandtransport zoals dit ook gebeurt in een open waterloop.
- 2) De vorming van een erosie-kuil remt het zandtransport

Kort na het begin van beweging is er nog geen erosie-kuil en domineert proces 1 het beeld (T5). Na lange tijd stromen (met niet te verwaarlozen zandtransport) wordt proces 2 belangrijk en kan het een kleine verhoging van de filtersnelheid zelfs volledig overschaduwen (T3).

Om boven omschreven processen zo goed mogelijk gescheiden in de resultaten naar voren te laten komen, is gestreefd naar een uitvoering van de proeven met zo groot mogelijke stappen in de filtersnelheid (gericht op proces 1), zonder het gevaar te lopen de v_{fcr} onnauwkeurig te meten. Aan het eind van de meeste

stappen-series zijn drie stappen met gelijke filtersnelheid uitgevoerd die inzicht moeten verschaffen in proces 2.

Met de modelopstelling zoals getekend in figuur 6 vond begin van beweging (en dus ook de kuilvorming) halverwege het model plaats, zodat de invloed van de modelranden op de kuilvorming verwaarloosbaar was.

4.3 Resultaten

De resultaten van het modelonderzoek zijn weergegeven in tabel 1 en figuur 10 tot en met 13. In tabel 2 zijn de resultaten nog eens samengevat en geplaatst naast de relevante karakteristieken van de geotextielen.

De gegeven v_{*cr} is als volgt berekend:

$$v_{*cr} = \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}}$$

met: $\psi_s = 0,11$ als $D_{b50} = 96 \mu\text{m}$
 $\psi_s = 0,07$ als $D_{b50} = 150 \mu\text{m}$

zodat: $v_{*cr} = 13 \text{ mm/s}$ als $D_{b50} = 96 \mu\text{m}$
 $v_{*cr} = 13 \text{ mm/s}$ als $D_{b50} = 150 \mu\text{m}$

De zeefkrommen van het gebruikte zand, grind en stortsteen zijn gegeven in figuur 14 en 15. Opgemerkt moet worden dat van grind 17-35 en grind 50-100 slechts twee punten van de zeefkromme zijn vastgesteld. De gestreepte lijn in figuur 15 korrespondeert met het grind dat gebruikt is in T16.

De porositeit van het grind en de stortsteen is steeds ongeveer 42 à 43% geweest. Het verband tussen verhang en filtersnelheid is grafisch weergegeven in figuur 17.

Tijdens T18 bleek de modelfaciliteit onvoldoende debiet te kunnen leveren om een zandtransport van 0,2 gr/s te halen. De meetpunten zijn ten behoeve van een extrapolatie in figuur 18 op dubbel logaritmisch papier uitgezet. Zoals blijkt uit de getekende punten uit T13, is op deze wijze een redelijk betrouwbare extrapolatie mogelijk.

Het afgezogen zand van T1 is nader onderzocht. De zeefkromme van het getransporteerde zand is weergegeven in figuur 16. Het blijkt dat van de fraktie die grover is dan ongeveer 250 à 300 μm slechts weinig door het geotextiel getransporteerd wordt. De karakteristieke openingengrootte van het geotextiel (O_{90}) is 0,4 mm geweest. Ook de fijne fraktie (onder ongeveer 90 μm) is in het afgezogen zand ondervertegenwoordigd. Dit is waarschijnlijk een gevolg van het feit dat dit fijne zand nauwelijks sedimenteert in de bezinkbak.

Aan de hand van de gemeten watertemperatuur kan gekonkludeerd worden dat de viscositeit van het water varieerde tussen $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (12°C) en $\nu = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (7°C).

5. Analyse van resultaten

Een nadere analyse van de proefresultaten wordt in dit hoofdstuk uitgevoerd aan de hand van tabel 2 en de theorie uit paragraaf 3.2.

In de theoretische beschouwing is aangenomen dat erosie hoofdzakelijk een gevolg is van de filtersnelheid (en niet het verhang) in het granulaire materiaal op het geotextiel en in het geotextiel zelf. Deze aanname is gebaseerd op de hypothese van de overeenkomst tussen erosie in open waterlopen, onder granulaire filters en onder geotextielen.

De juistheid van deze aanname is onderzocht met T5, T8 en T11. Al deze proeven zijn uitgevoerd met hetzelfde zand en hetzelfde geotextiel. T11 is echter uitgevoerd met veel fijner filtermateriaal. Het resultaat van de proef is dat de kritieke filtersnelheid slechts varieert in de marge van de nauwkeurigheid van de proef (resp. 51, 53 en 49 mm/s), terwijl het kritieke verhang sterk verschilt (respektievelijk 23%, 24% en 46%).

Gekonkludeerd kan worden dat begin van beweging inderdaad optreedt bij een zekere kritieke filtersnelheid, onafhankelijk van de grootte van het verhang.

Ten behoeve van een goede vergelijking tussen de resultaten met en zonder geotextiel is in proef T12 en T15 de kritieke filtersnelheid bij respektievelijk ijsselmeerzand en asserzand zonder geotextiel gemeten. Volgens [1] kan v_{fcr} voorspeld worden met de volgende formules:

$$v_{fcr} = \frac{n}{e} \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (14)$$

$$e \approx 0,78 \cdot Re^{-0,2} \text{ als } D_{b50} = 0,15 \text{ mm} \quad (15)$$

$$e \approx 1,18 \cdot Re^{-0,25} \text{ als } D_{b50} = 0,10 \text{ mm}$$

$$Re = \frac{v_{fcr} \cdot D_{f15}}{\nu} \quad (16)$$

met

- Re = Reynoldsgetal (-)
- n = porositeit filter (-)
- ν = viscositeit water (m^2/s)
- D_{f15} = karakteristieke korrelgrootte filter (m)

- ψ_s = Shieldsparameter: $\psi_s = 0,11$ als $D_{b50} = 96 \mu\text{m}$
 $\psi_s = 0,07$ als $D_{b50} = 150 \mu\text{m}$
- Δ = relatieve soortelijke massa zandkorrels (-)
- D_{b50} = karakteristieke korrelgrootte zand (m)
- g = zwaartekrachtsversnelling (m/s)

Enig rekenwerk met bovenstaande formules leidt tot de volgende resultaten:

T12: $v_{fcr} = 21,7 \text{ mm/s}$ (berekend)

Ter vergelijking:

T12: $v_{fcr} = 22 \text{ mm/s}$ (gemeten)

De overeenkomst tussen gemeten en berekende resultaten is zeer goed te noemen. Gekonkludeerd kan worden dat de modelopstelling geen invloed op v_{fcr} heeft gehad.

In paragraaf 3.2 is gekonkludeerd dat de volgende parameters van invloed zouden kunnen zijn op v_{fcr} :

- $0_{90}/D_{b90}$ verhouding
- geotextiel-dikte (T_g)
- doorlatendheid geotextiel ($v = k_g i^m$)
- kritieke schuifspanningssnelheid ($v_{*cr} = \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}}$)
- valsnelheid van korrels (w)

Er wordt nu een formule gekozen voor v_{fcr} die aansluit bij die voor granulaire filters en die de dimensieloze parameters bevat:

$$v_{fcr} = \left(f\left(\frac{0_{90}}{D_{b90}}, \frac{T_g}{D_{b90}}, \left(\frac{w}{k_g}\right)^{1/m}\right) + \frac{n}{e} \right) \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (17)$$

$f(\dots)$ = funktie van ...

Deze formule heeft dezelfde vorm als formule (14), echter met een additionele term met geotextielkarakteristieken. Het feit dat het voor de hand ligt de term met geotextielparameters nul te kiezen als het geotextiel geen bijdrage levert (bv. wegens $0_{90} \rightarrow \infty$ of $T_g \rightarrow 0$), leidt tot de keuze deze term additioneel aan formule (14) toe te voegen. De doorlatendheid van het geotextiel is in deze term vertegenwoordigd door het verhang in het geotextiel dat optreedt bij $v = w$ (loodrecht erdoor). Op deze wijze is zowel k_g als m zo logisch mogelijk in de formule verwerkt.

Uitgaande van formule (17) is een zuiver empirische uitdrukking voor de functie f opgesteld. Wordt deze functie in formule (17) ingevuld, dan wordt een empirische formule voor de kritieke filtersnelheid verkregen:

$$v_{fcr} = \left(12 \cdot \left(\frac{D_{b90}}{O_{90}}\right)^4 \cdot \frac{T_g}{D_{b90}} \cdot \sqrt{\left(\frac{w}{k_g}\right)^{1/m} + \frac{n}{e}}\right) \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (18)$$

$$\text{met } w = \frac{\Delta g}{18\nu} \cdot D_{b15}^2 \quad \text{mits } D_{b15} \cdot w/\nu < 1 \quad [9] \quad (19)$$

In figuur 19 zijn de meetpunten tezamen met een met formule (18) berekende lijn uitgezet. De relatieve afwijking tussen meetpunten en berekende lijn geeft een indruk van de nauwkeurigheid van formule (18).

Uit formule (18) kan gekonkludeerd worden dat de kritieke filtersnelheid vooral afhankelijk is van de O_{90}/D_{b90} verhouding. Daarnaast is de structuur van het geotextiel (gaas of bandjesweefsel etc.) van groot belang. Dit wordt in de formule vertegenwoordigd door de doorlatendheid van het geotextiel. Een bandjesweefsel blijkt erosie nog bij een veel hogere hydraulische belasting te voorkómen dan een gaas met gelijke O_{90} . In figuur 20 komt dit duidelijk tot uiting. Er is de kritieke filtersnelheid uitgezet tegen de O_{90} . Geheel rechts in de figuur zijn de openingen zo groot dat het geotextiel nog maar weinig invloed heeft op v_{fcr} . De korrels op het geotextiel zijn dan belangrijker.

6. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Het in dit verslag beschreven onderzoek heeft voornamelijk een verkennende taak gehad en heeft daarnaast kunnen leiden tot een empirische relatie tussen de kritieke belasting en karakteristieken van geotextiel en ondergrond.

De belangrijkste invloeden (geometrische hindering en hydraulische demping) zijn herkend en op praktisch bruikbare wijze gekwantificeerd. Het ontbreekt echter nog aan inzicht in de fundamentele fysische processen die erosie veroorzaken. Het is daardoor nog ondoenlijk om de waargenomen tendensen te extrapoleren naar gebieden waarin nog geen onderzoek is gedaan, zoals bij een ander type stroming of een ander type geotextiel.

Gezien het bovenstaande wordt het volgende vervolgonderzoek aanbevolen:

- onderzoek gericht op het begrijpen van de belangrijke fysische processen die bij erosie een rol spelen (theorie-vorming).
- modelonderzoek gericht op het meten van de kritieke filtersnelheid bij de volgende belastinggevallen:
 - stationaire stroming langs hellend grensvlak
 - cyclische stroming langs horizontaal grensvlak
 - gekombineerde horizontale en verticale stroming door een horizontaal grensvlak
- modelonderzoek gericht op het meten van de kritieke filtersnelheid bij non-wovens op zeer fijn zand (50 à 100 μm)
- onderzoek gericht op andere bezwijkmechanismen dan zandtransport door het geotextiel, zoals korreltransport onder het geotextiel, piping en vorming van S-profielen op een talud.

De onderlinge samenhang van deze punten wordt in het onderstaande nader toege-licht.

Het onderzoek gericht op theorie-vorming kan op verschillende manieren worden opgezet. Allereerst is het mogelijk om langs theoretische weg de waterbeweging in en onder een geotextiel te onderzoeken en dit te koppelen aan kennis om-trent transport van zandkorrels. Hierbij spelen invloeden zoals de gemiddelde ligging van de korrels en turbulentie van het water ongetwijfeld een belang-rijke rol. Een belangrijk aandachtspunt kan de kritieke schuifspanningssnel-heid in formule (18) zijn. Wellicht is het zinnig dit ook in de term met geotextiel-karakteristieken te plaatsen.

Anderzijds kan veel inzicht verkregen worden door middel van modelonderzoek met andere belastinggevallen. Als bijvoorbeeld de kritieke filtersnelheid bij een steil talud (1:2) gelijk is aan die bij een horizontaal grensvlak, dan kan er gekonkludeerd worden dat het geotextiel voornamelijk een geometrische hindering veroorzaakt en niet de belasting dempt. De kritieke schuifspanningssnelheid is immers lager, hetgeen met dezelfde dempingsfaktor een lagere v_{fcr} zou veroorzaken.

Modelonderzoek met vrij grof basismateriaal ($D_{b50} \sim 300 \mu\text{m}$) kan uitsluitend over de invloed van de kritieke schuifspanningssnelheid geven, omdat de kritieke schuifspanningssnelheid ten opzichte van $D_{b50} = 150 \mu\text{m}$ dan duidelijk is vergroot, in tegenstelling tot de reeds uitgevoerde proeven.

Een bandjesweefsel bevat relatief weinig openingen. Dit heeft invloed op de doorlatendheid, maar vooral ook op kontraktie van stroomlijnen bij een verticale verhangkomponent. Onderzoek naar de kritieke filtersnelheid bij stroming langs een geotextiel met een verticale verhangkomponent kan uitsluitend geven over de vraag of de doorlatendheid van het geotextiel belangrijk is, of dat het relatieve gatoppervlak (of aantal gaten per m^2) van belang is. Als de verticale verhangkomponent geen invloed zou blijken te hebben op v_{fcr} , dan kan weer gekonkludeerd worden dat geometrische hindering belangrijker is dan demping.

De invloed van demping van de belasting kan ook onderzocht worden door de groei van een erosie-kanaaltje onder een zanddicht doek te onderzoeken. Erosie kan gefitieerd worden door een lokale beschadiging aan te brengen. Tevens levert een dergelijk onderzoek informatie met betrekking tot de konsekventies van een beschadigd geotextiel. Dit kan belangrijk zijn als tijdens de uitvoering van een projekt blijkt dat de wijze van uitvoering leidt tot incidentele beschadigingen aan het geotextiel. Als de konsekventies hiervan beoordeeld kunnen worden, kan dit veel problemen voorkomen.

Tot nu toe is steeds onderzoek gedaan naar de v_{fcr} bij een goed op de ondergrond aansluitend geotextiel. Het wordt aanbevolen ook proeven te doen met een geotextiel dat als gevolg van vouwen niet goed aansluit. Samen met een onderzoek naar het gekonstateerde in de tijd afnemende zandtransport bij een konstante overbelasting kan ook dit inzicht geven in de maatgevende fysische processen.

Ten aanzien van het betrekken van andere bezwijkmechanismen in het onderzoek is het van belang een gedegen literatuuronderzoek uit te voeren. Vooral de duitse literatuur (zie [11] t/m [14]) is relevant, omdat zij een voorkeur hebben voor relatief dikke geotextielen ($T_g > 5 \text{ mm}$), juist met het oog op andere bezwijkmechanismen dan erosie door het geotextiel. Daarnaast zijn [7], [8] en [10] van belang.

7. Ontwerprichtlijn

Als praktische ontwerprichtlijnen voor het dimensioneren van een geotextiel in konstrukties zoals getekend in figuur 2 kan de volgende formule gehanteerd worden:

$$v_{fcr} = \left(10 \cdot \left(\frac{D_{b90}}{0,90} \right)^4 \cdot \frac{T_g}{D_{b90}} \cdot \left(\frac{w}{k_g} \right)^{\frac{1}{2m}} + \frac{n}{e} \right) \sqrt{\psi_s \Delta g D_{b50}} \quad (20)$$

met $w = \Delta g D_{b15}^2 / (18 \nu)$

v_{fcr} = filtersnelheid bij begin van beweging (m/s)

D_{b90} = korrelgrootte van basis die door 90% op basis van gewicht wordt onderschreden (m)

D_{b50} = korrelgrootte van basis die door 50% op basis van gewicht wordt onderschreden (m)

O_{90} = karakteristieke openingengrootte van geotextiel (m)

T_g = dikte geotextiel (m)

ψ_s = Shields-parameter (0,11 als $D_{b50} = 0,1$ mm;
0,07 als $D_{b50} = 0,15$ mm)

Δ = relatieve soortelijke massa zand (= $\rho_s / \rho - 1$)

g = zwaartekrachtsversnelling (m/s²)

k_g = doorlatendheid geotextiel ($v = k_g i^m$) (m/s)

m = macht in doorlatendheidsrelatie van het geotextiel ($v = k_g i^m$)

n = porositeit filter (-)

e = $c \cdot Re^{-m}$ (zie tabel 3) (-)

Re = Reynoldsgetal (= $v_{fcr} D_{f15} / \nu$) (-)

w = valsnelheid van korrels (m/s)

ν = viscositeit van water (m²/s)

Bovenstaande formule geeft voor bodembeschermingskonstrukties een veilige waarde, in tegenstelling tot formule (18) die het beste bij de meetpunten aansluit.

De ervaring bij granulaire filters leert dat de kritieke filtersnelheid voor een filter op een talud 10 tot 40% lager kan zijn. Daarom wordt voor taludverdedigingskonstrukties die belast worden door golven, wegens gebrek aan resultaten van modelonderzoek, voorlopig aanbevolen de met formule (20) berekende waarde te halveren.

De optredende ontwerpbelasting kan berekend worden met de daarvoor ontwikkelde komputerprogramma's, of met de stelregel dat het verhang in een bodemverdediging gelijk is aan die in het open water erboven, en in een taludverdedigingskonstruktie maximaal ongeveer gelijk is aan $\sin(\alpha)$ (α = taludhelling).

REFERENTIES

1. M. Klein Breteler
Taludbekleding van gezette steen
Ontwerpregels voor granulaire filters
Sectie 2 van dit verslag
2. J.W. van der Meer e.a.
Taludbekleding van gezette steen
Bezwijken van zettingen; overzicht en bundeling van bestaande kennis
WL/LGM; M1795/M1881 deel XI; C0258902; juni '85
3. H. den Adel
Heranalyse doorlatendheidsmetingen d.m.v. de Forchheimer relatie
Lab. v. Grondmechanica; CO-272550/56, mei '86
4. H.J.M. Ogink
Investigations on the hydraulic characteristics of synthetic fabrics
Delft Hydraulics Laboratory, publ. 146, may '75
5. Kunststoffilters in Kust- en Oeverwerken
Nederlandse vereniging van kust- en oeverwerken (K&O)
Rotterdam.
6. F.C.M. van der Knaap, M. Klein Breteler en T. van der Meulen
Design criteria for geotextiles beyond the sandtightness requirement
Delft Hydraulics Communications no. 358; May 1986
7. H. Derks
Gedrag van ACZ-mat onder invloed van stroom
Waterloopkundig Laboratorium; verslag modelonderzoek; R460 deel X;
aug. 1973
8. H. Derks
Zanddichtheid en stabiliteit van gobi-matten
Waterloopkundig Laboratorium; verslag modelonderzoek; R460 deel IX;
okt. 1972

REFERENTIES (vervolg)

9. L.C. van Rijn
Sediment transport
Delft Hydraulics Laboratory, Publication 334, febr. '85

10. D.G. Markle
Wave and seepage-flow effects on sand streambanks and their protective cover layers
Hydraulics Laboratory U.S. Army Corps of Engineers, paper HL83-3
Vicksburg, may 1983

11. G. Heerten
Modern technique in bank protection
Polders of the World, Vol. III, p. 22-33

12. H. Schulz, H.J. Köhler
Use of geotextiles in hydraulic constructions in the design of revetments
Third International Conference on Geotextiles, Vienna 1986, Austria,
p. 1185-1196

13. H. Schulz
Use of geotextiles on slopes
Nationales Symposium Geotextilien im Erd- und Grundbau Mainz, m arz 1984
Forschungsgezellshaft f ur Strassen- und Verkehrswesen, Köln 1984

14. G. Heerten and L. Wittman
Filtration properties of geotextiles and miniral filters demonstrated by
the example of bank protection
23rd Int. Man-Made Fibres Congress, Dornbirn, Austria 1984

proefnummer	geotextiel			filter D _{fmin} - D _{fmax}	zand D _{b50}	watertemp. °C	i %	V _i mm/s	s gr/s/m
	nr.	type	O ₉₀ /D _{b90}						
T1	N66339	G	1,82	17-35	0,15			24,4	0,013
								38,0	0,028
								46,7	0,012
								53,0	0,034
								57,3	0,061
								57,3	0,034
								60,3	0,06
								60,3	0,11
								66,0	0,18
								74,7	0,44
								82,7	0,68
								27,3	0,015
								41,0	0,015
								52,0	0,054
T2	N66336	G	1,68	17-35	0,15			60,7	0,20
								60,7	0,14
								65,7	0,31
								69,3	0,43
								76,7	0,67
								86,0	0,73
								86,0	0,32
								45,0	0,025
								52,7	0,05
								59,3	0,18
T3	N66339	G	1,82	17-35	0,15	12		68,0	0,63
								68,0	0,44
								75,3	0,73
								82,7	0,68
								82,7	0,35
								82,7	0,23
								86,7	0,34
								52	0,33
								68	4,93
								36	0,020
T5	N66373	G	2,36	17-35	0,15	12	23	26	0,071
								42	0,27
								53	0,75
								65	1,62
								65	0,86
T6	N66336	G	1,68	17-35	0,15	11		65	0,69
								65	0,86
								65	0,69
								12	35
								24	54
								37	67
								50	75
								57	85
								57	85
								57	85
T7	N66339	G	1,82	17-35	0,15	11		57	0,63
								7	24
								13	37
								20	46
								24	53
								29	57
								32	62
								32	62
								32	62
								32	62
T8	N66373	G	2,36	17-35	0,15	10		65	0,90
								71	96
								79	102
								88	108
								65	0,02
								71	96
								79	102
								88	108
								71	96
								79	102
88	108								
T9	R425	B	2,00	17-35	0,15	9½		65	0,02
								71	96
								79	102
								88	108
								65	0,02
								71	96
								79	102
								88	108
								65	0,02
								71	96
79	102								

proefnummer	geotextiel			filter D _{fmin} - D _{fmax}	zand D _{b50}	watertemp. °C	i %	V _i mm/s	s gr/s/m
	nr.	type	O ₉₀ /D _{b90}						
T10	N66373	G	2,36	8-20	0,15	9		20	36
								24	40
								29	44
								32	48
								36	52
								42	55
								52	62
								52	62
								52	62
								52	62
								40	73
								53	84
								69	97
								80	105
T11	G8147	M	3,00	17-35	0,15	8½		52	62
								52	62
								40	73
								62	84
								69	97
								80	105
								87	110
T12	-	-	-	17-35	0,15	7½		4,2	16
								5,2	20
								7,5	23
								8,2	27
								8,2	27
								8,2	27
								8,2	27
								39	134
								51	152
								63	170
T13	R425	B	2,00	50-100	0,15	7		75	183
								86	195
								100	212
								12	38
								23	54
								29	62
								36	70
								43	76
								49	82
								60	90
T14	R425	B	3,38	17-35	0,096	7		2,0	13
								3,5	16
								4,25	19
								5,5	22
								6,5	25
								3,5	17
								6	23
								8	28
								11	33
								14	37
T15	-	-	-	17-35	0,096	7		18	40
								18	40
								36	105
								45	124
								57	138
								69	150
								80	160
								85	165
								36	105
								45	124
T16	N66373	G	4,00	17-35	0,096	10		36	105
								45	124
								57	138
								69	150
								80	160
								85	165
								36	105
								45	124
								57	138
								69	150
T17	P6066	B	2,38	45-70	0,096	12		36	105
								45	124
								57	138
								69	150
								80	160
								85	165
								36	105
								45	124
								57	138
								69	150

G = gaas
B = bandjesweefsel
M = mat
- = geen geotextiel

Tabel 1 Proefresultaten

proef	geotextiel							zand		grind	resultaat		parameters		
	nummer	type	O ₉₀ mm	O ₉₈ mm	T _g mm	k _n mm/s	m -	D _{b50} mm	D _{b90} mm	D _{f15} mm	v _{fcr} mm/s	$\frac{v_{fcr}}{v_{*cr}}$	$\frac{O_{90}}{D_{b90}}$	$\frac{T_g}{D_{b90}}$	$\left(\frac{w}{k_n}\right)$ l/m
T1	N66339	G	0,40	0,42	0,72	6,0	1,0	0,15	0,22	20	67	5,2	1,8	3,3	1,5
T2	N66336	G	0,37	0,39	0,45	6,8	1,0	0,15	0,22	20	61	4,7	1,7	2,1	1,3
T3	N66339	G	0,40	0,42	0,72	6,0	1,0	0,15	0,22	20	62	4,8	1,8	3,3	1,5
T5	N66373	G	0,52	0,55	0,68	5,0	1,0	0,15	0,22	20	~51	3,9	2,4	3,1	1,8
T6	N66336	G	0,37	0,39	0,45	6,8	1,0	0,15	0,22	20	62	4,8	1,7	2,1	1,3
T7	N66339	G	0,40	0,42	0,72	6,0	1,0	0,15	0,22	20	67	5,2	1,8	3,3	1,5
T8	N66373	G	0,52	0,55	0,68	5,0	1,0	0,15	0,22	20	53	4,1	2,4	3,1	1,8
T10	N66373	G	0,52	0,55	0,68	5,0	1,0	0,15	0,22	11	49	3,8	2,4	3,1	1,8
T11	G8147	M	0,71	0,89	2,0	2,1	0,73	0,15	0,22	20	78	6,0	3,2	9,1	7,3
T12	-	-	-	-	-	-	-	0,15	0,22	20	22	1,7	-	-	-
T13	R425	B	0,44	0,53	1,2	1,6	0,70	0,15	0,22	60	205	15,8	2,0	5,5	11,8
T14	R425	B	0,44	0,53	1,2	1,6	0,70	0,096	0,13	20	45	3,4	3,4	9,2	5,4
T15	-	-	-	-	-	-	-	0,096	0,13	20	17	1,3	-	-	-
T16	N66373	G	0,52	0,55	0,68	5,0	1,0	0,096	0,13	20	35	2,7	4,0	5,2	1,0
T18	P6066	B	0,31	0,37	1,6	1,1	0,78	0,096	0,13	50	210	16,0	2,4	12,3	7,3

doorlatendheid geotextiel: $v = k_n i^m$ G = gaas als $D_{b50} = 0,096$ mm: $v_{*cr} = 13$ mm/s; $w = 5$ mm/s
B = bandjesweefsel als $D_{b50} = 0,15$ mm: $v_{*cr} = 13$ mm/s; $w = 9$ mm/s
M = mat

Tabel 2, Overzicht proevenprogramma en resultaten

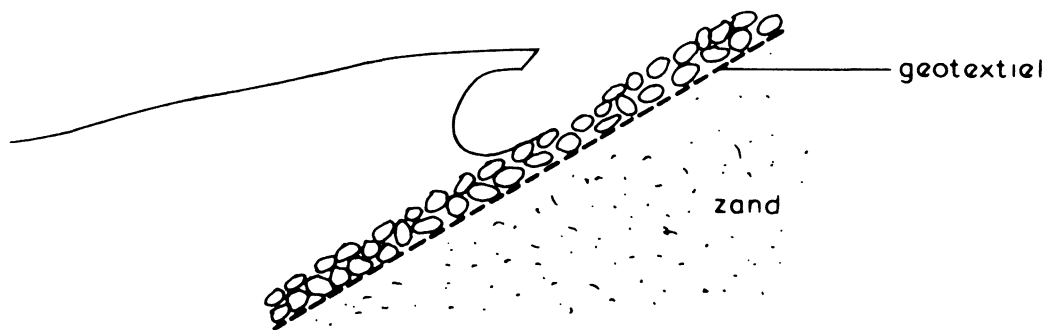
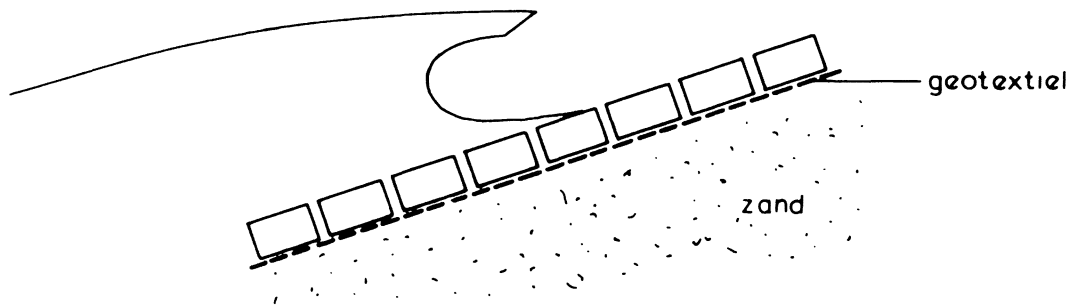
D_{b50} mm	c	m	ψ_s
0,1	1,18	0,25	0,11
0,15	0,78	0,20	0,073
0,2	0,71	0,18	0,055
0,3	0,56	0,15	0,044
0,4	0,45	0,11	0,038
0,5	0,35	0,07	0,036
0,6	0,29	0,04	0,035
0,7	0,22	0	0,034
0,8	0,22	0	0,034
1,0	0,22	0	0,035

(als $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\Delta = 1,65$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$)

$$e = c \cdot \text{Re}^{-m}$$

$$\text{Re} = \frac{v_{fcr} \cdot D_{f15}}{\nu}$$

Tabel 3, Koëfficiënten c, m en ψ_s .

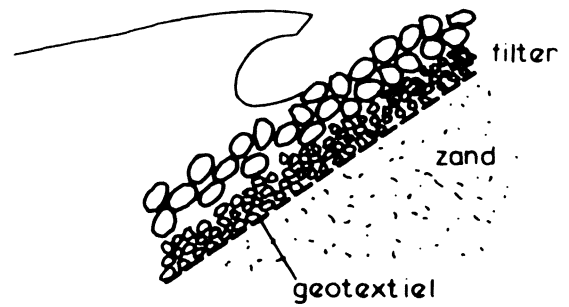
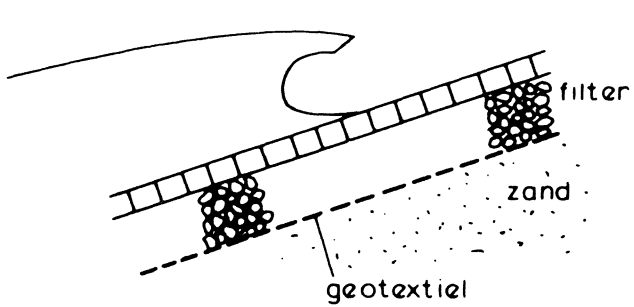


KONSTRUKTIETYPE 1:
MEESTAL GEOMETRISCH ZANDDICHT NOODZAKELIJK

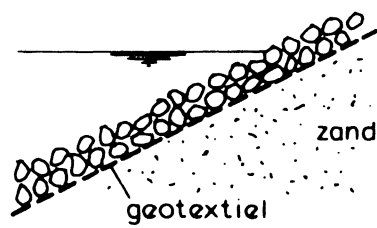
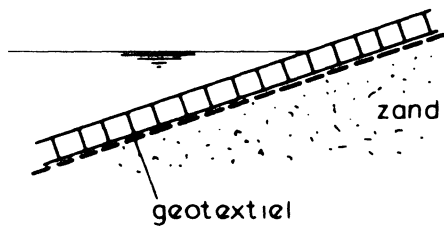
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

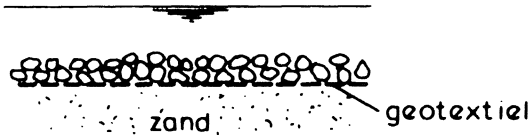
FIG. 1



GOLFBELASTING



UITSLUITEND STROMING



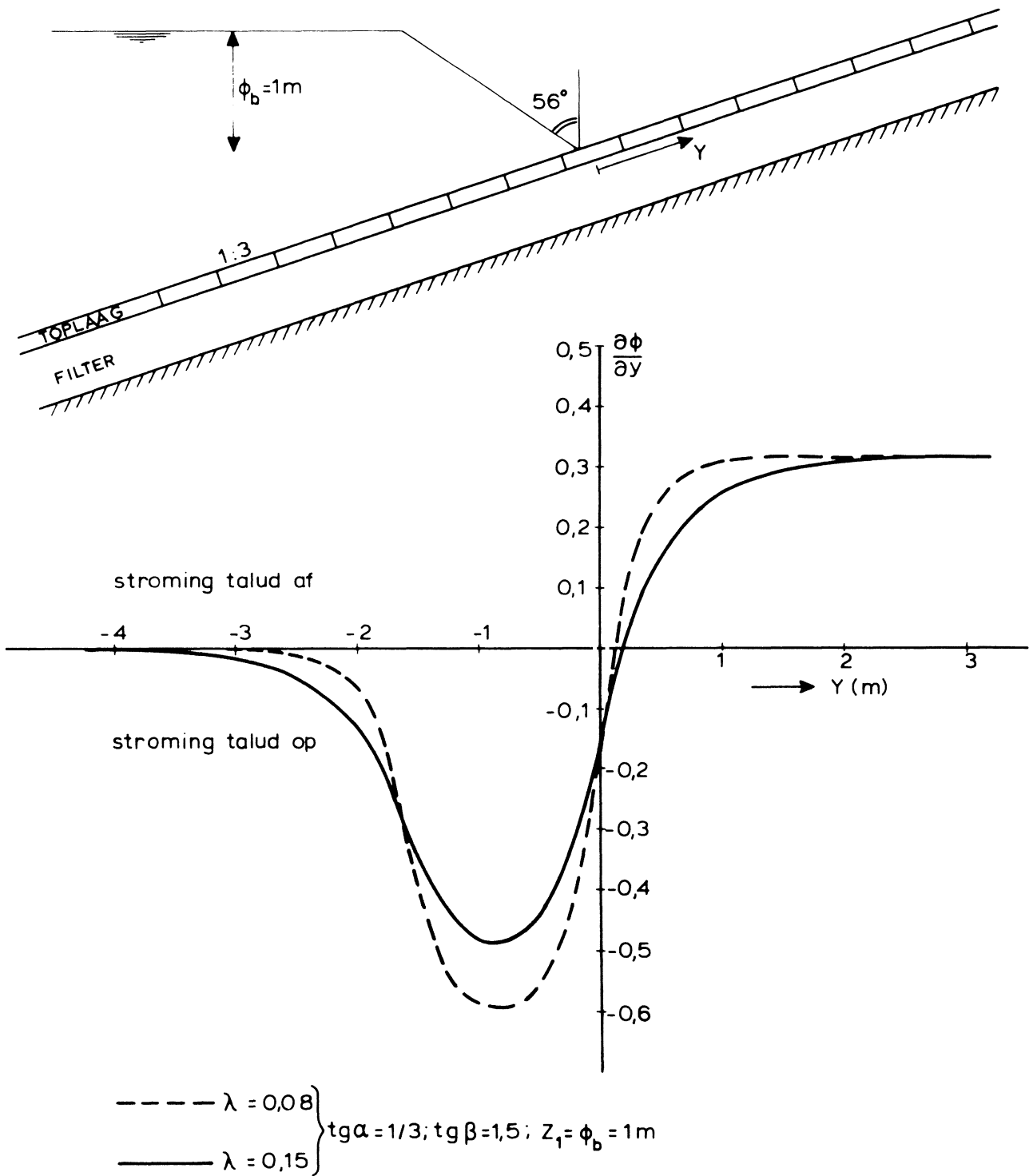
KONSTRUKTIETYPE 2 :

MEESTAL NIET GEOMETRISCH ZANDDICHT TOEPASBAAR

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

FIG. 2

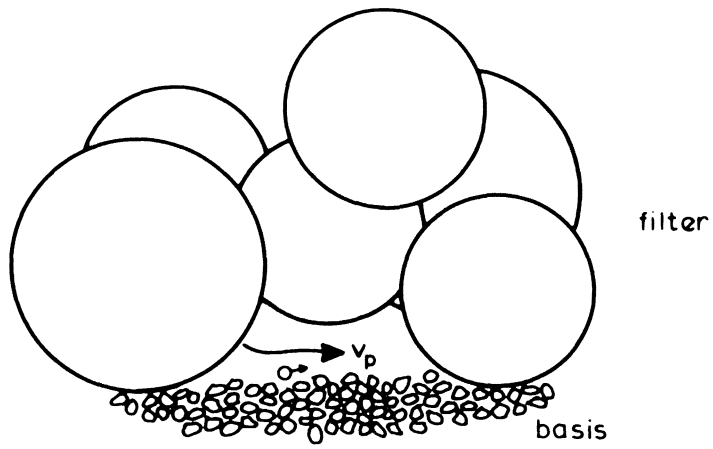


VERHANG EVENWIJDIG AAN TALUD

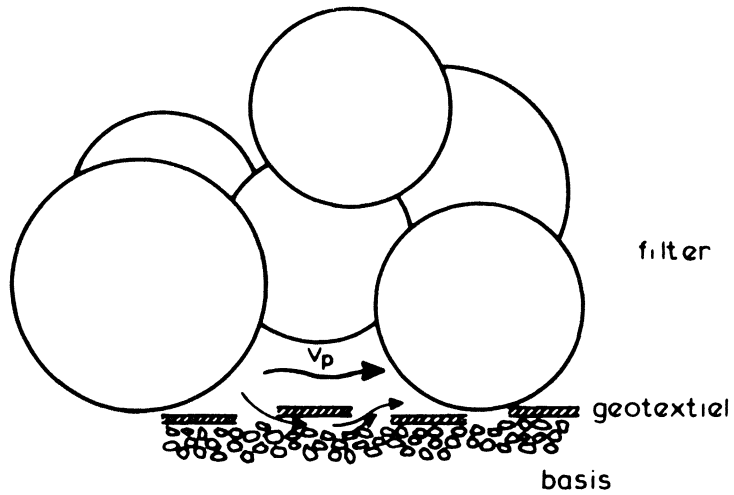
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195

FIG. 3



GRANULAIR FILTER



GEOTEXTIEL

v_p = snelheid in poriën (m/s)

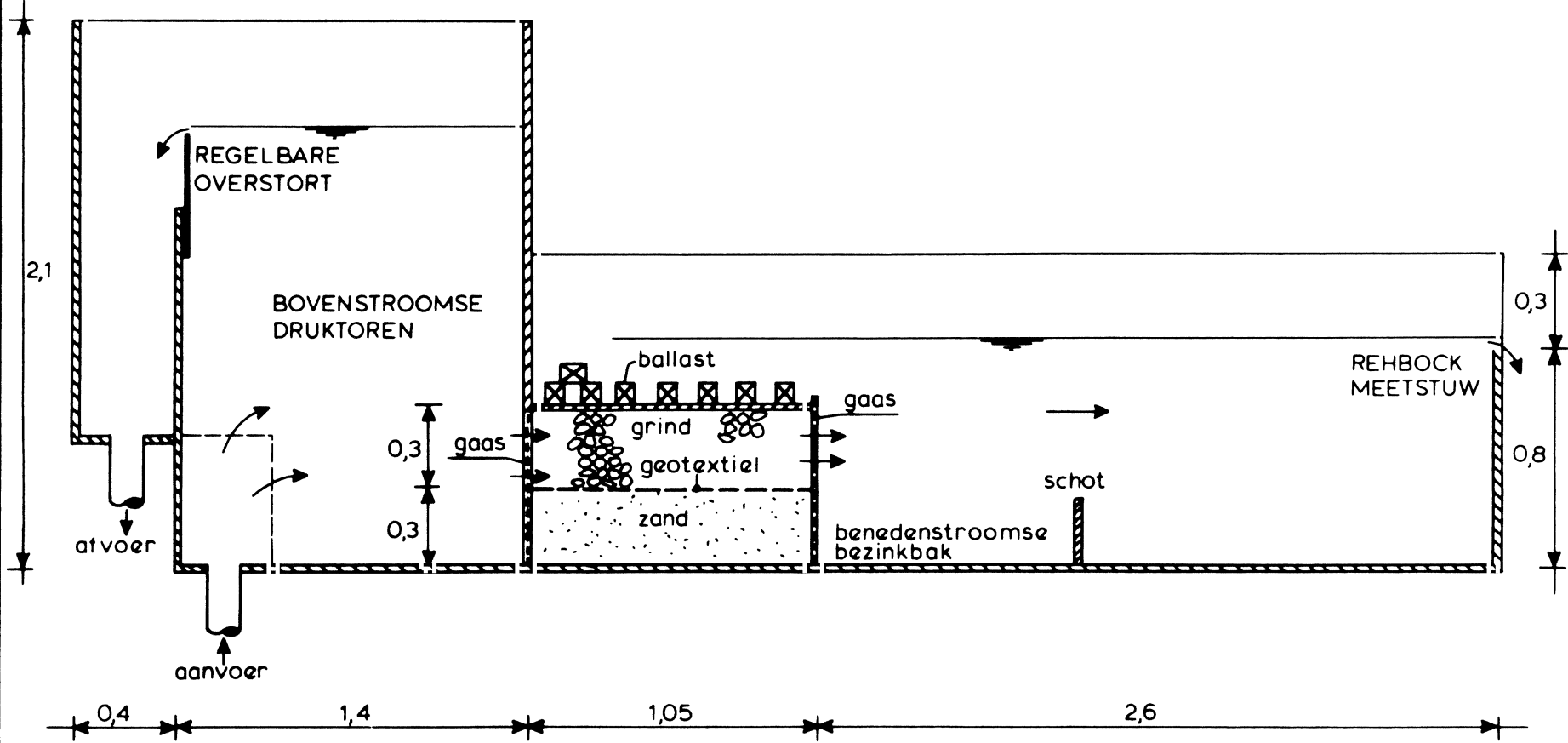
EROSIE PRINCIPE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

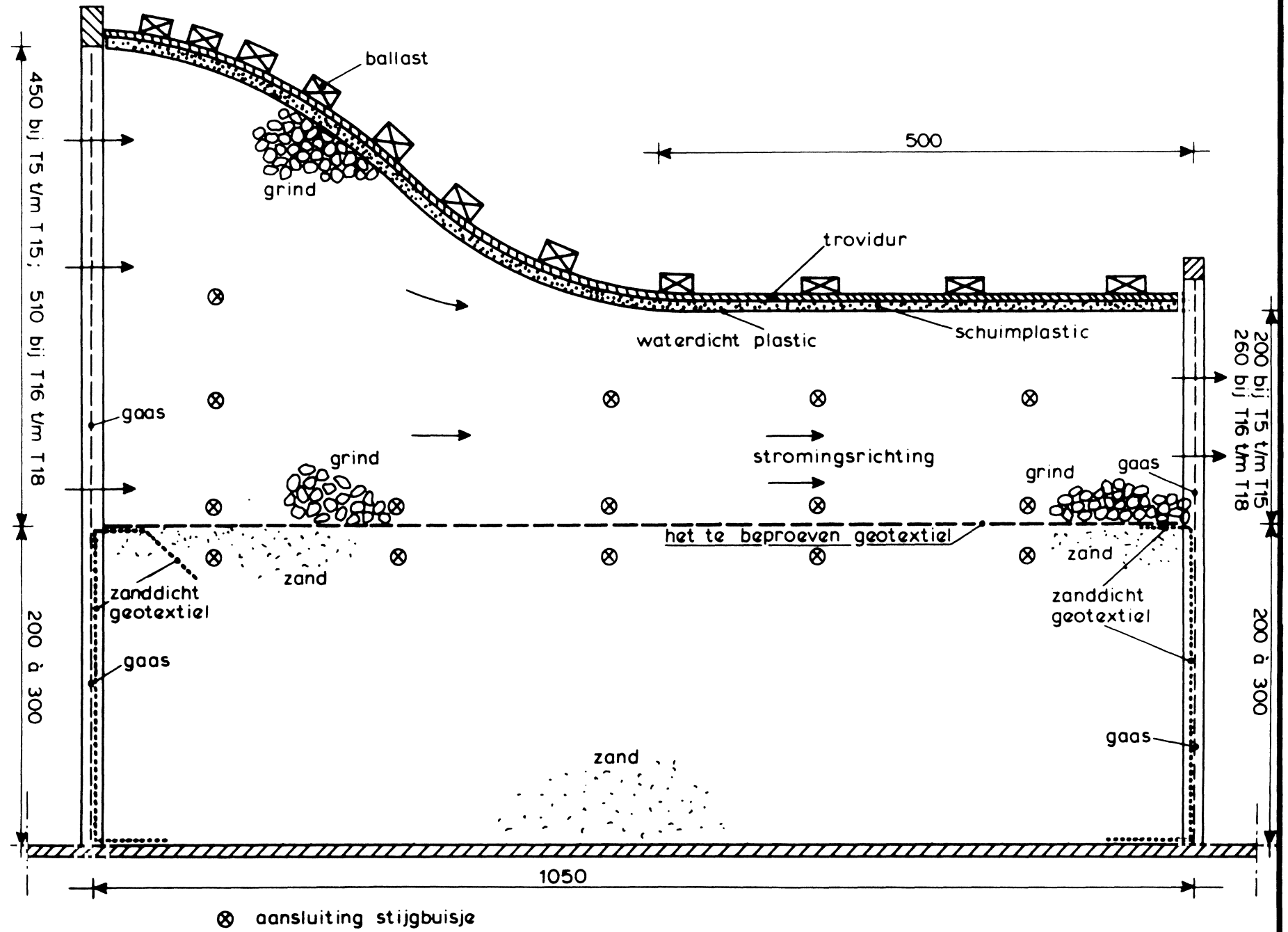
FIG. 4

MODELOPSTELLING FILTERBAK
MEETSEKTIE ZOALS BIJ PROEF T1 T/M T3

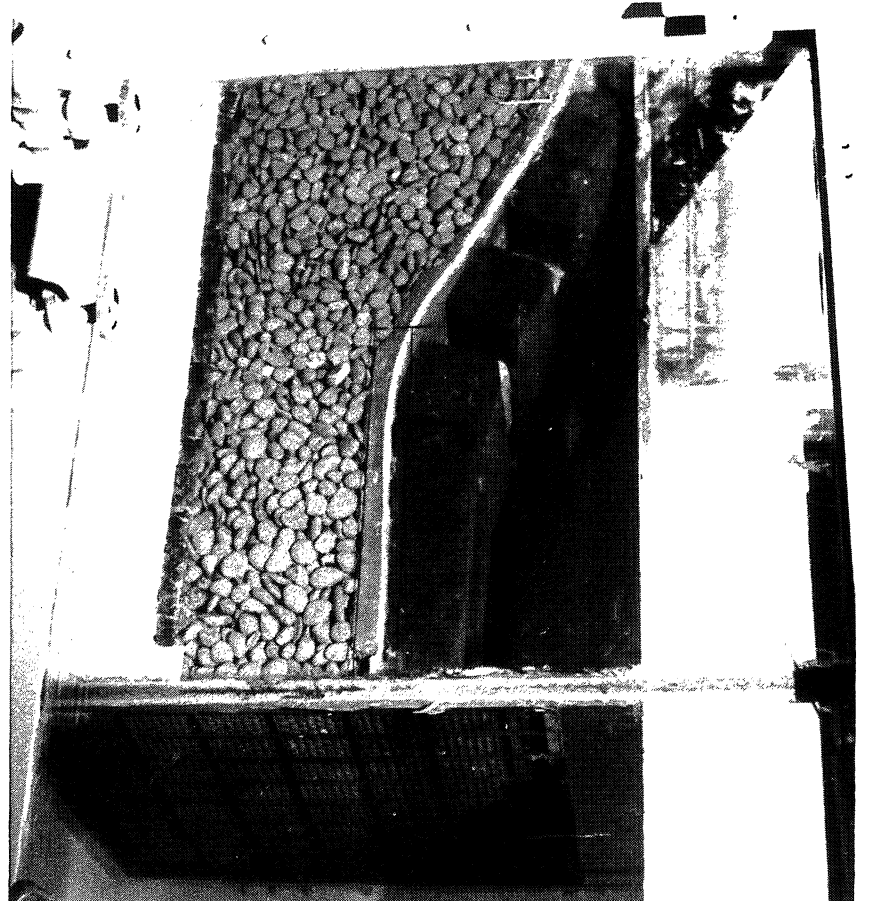
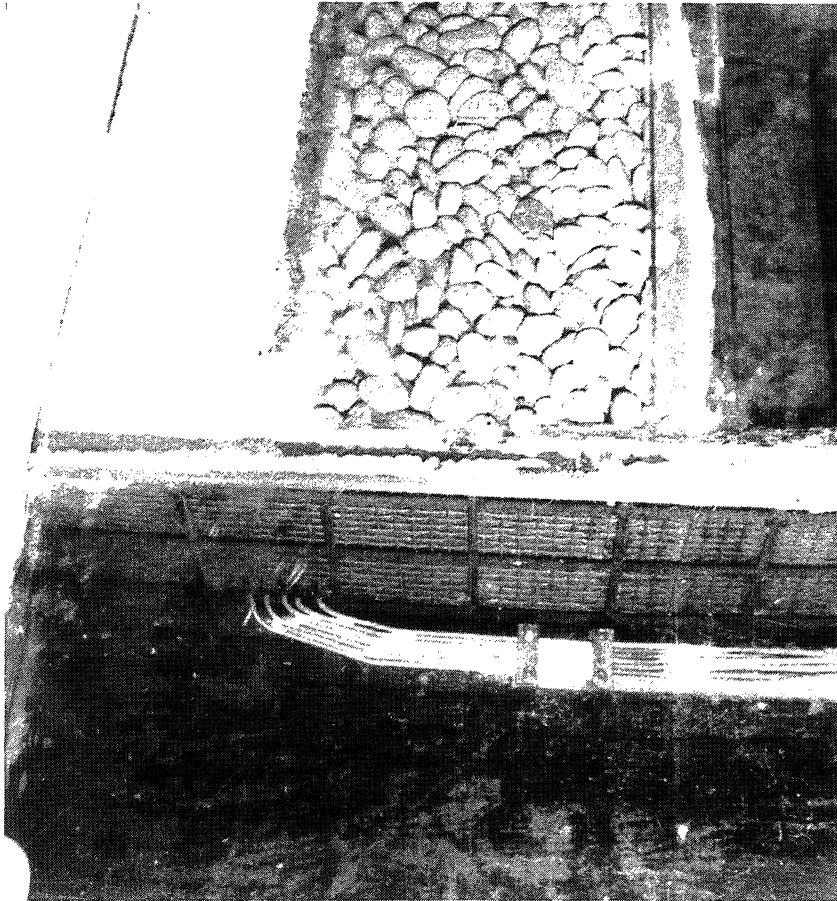


DWARSDOORSNEDE

DWARSDOORSNEDENDE MEETSEKTIE (PROEF 5 T/M 18)



BOVENSTROOMS



BENEDENSTROOMS

MODELOPSTELLING (T16)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

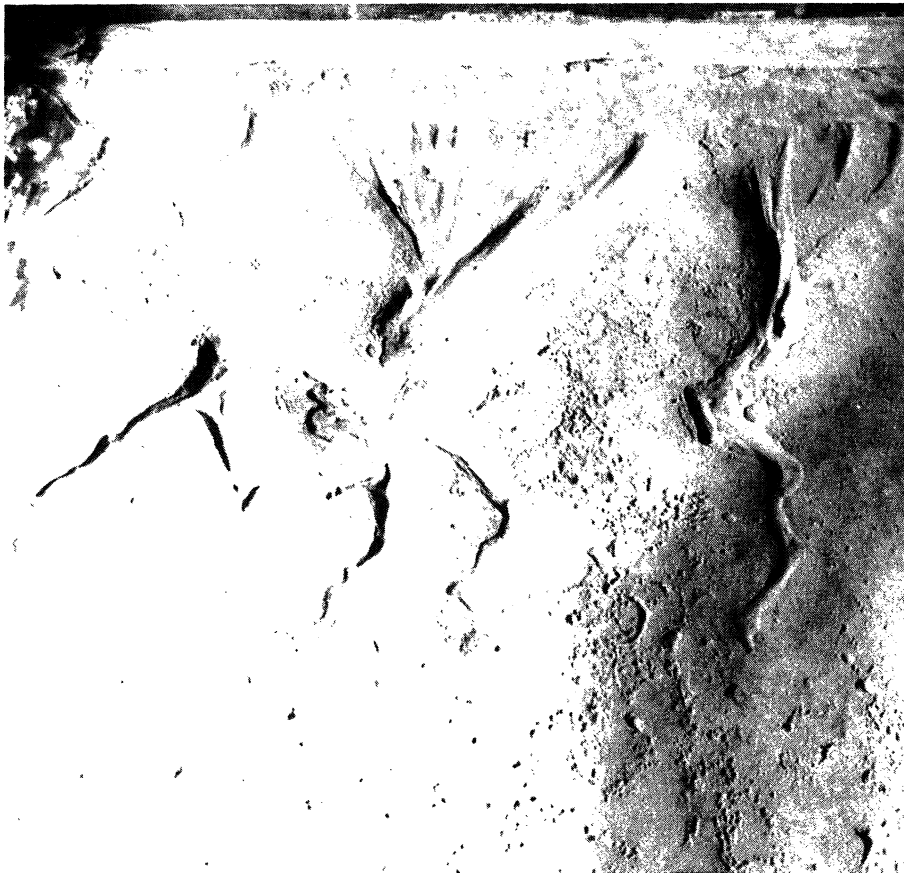
H 195.13

FIG. 7

T 6



T 7



← STROMINGSRICHTING ←

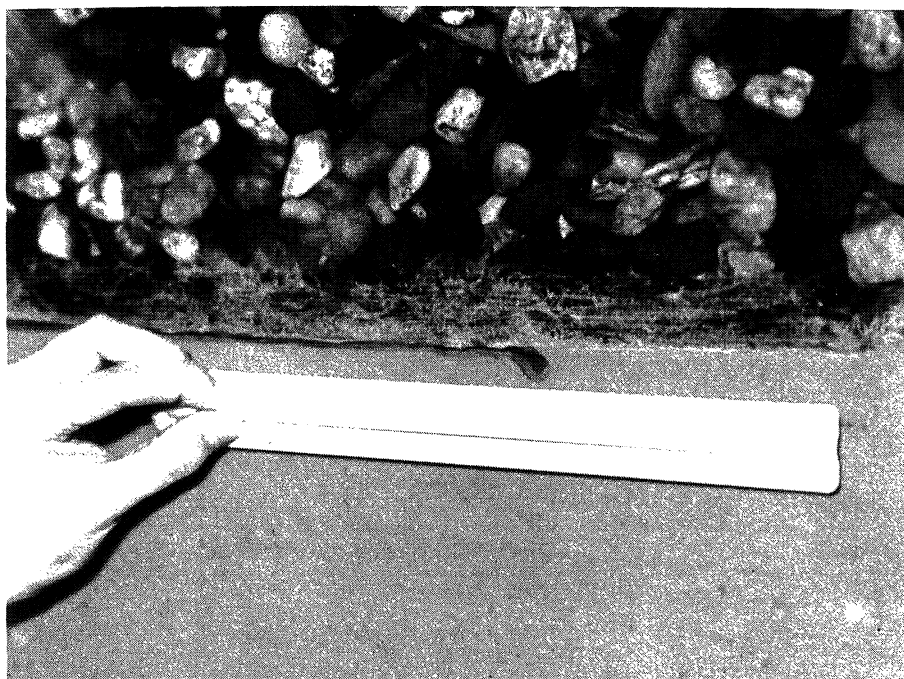
KARAKTERISTIEK EROSIE-PATROON NA DE PROEF

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

FIG. 8

→ STROMINGSRICHTING →



Erosiekanaal bij glaswand



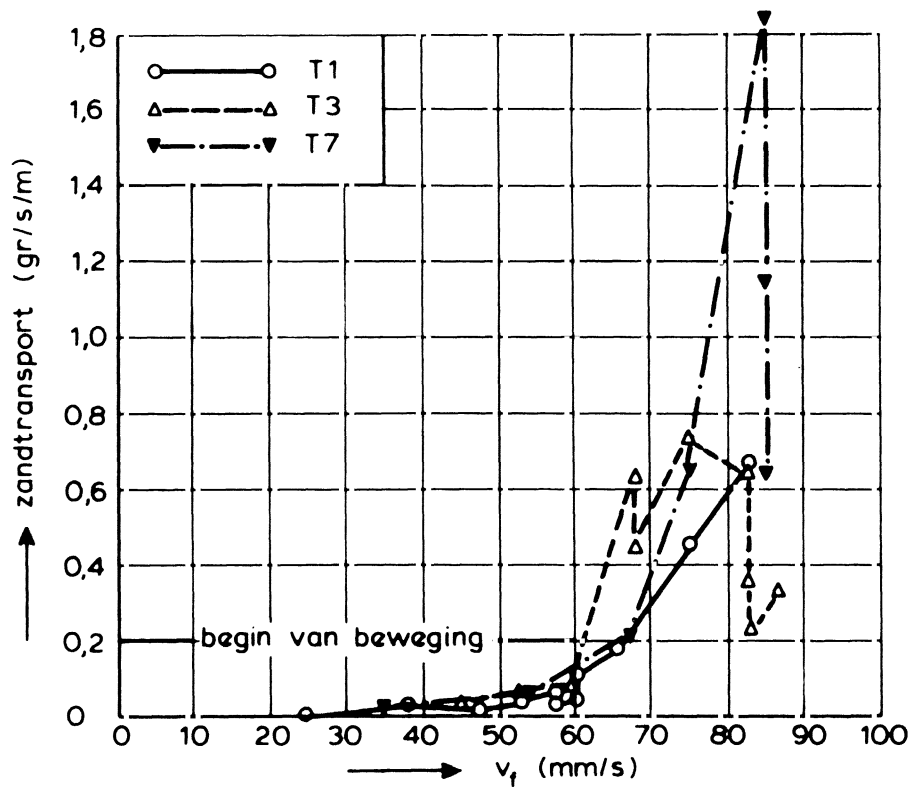
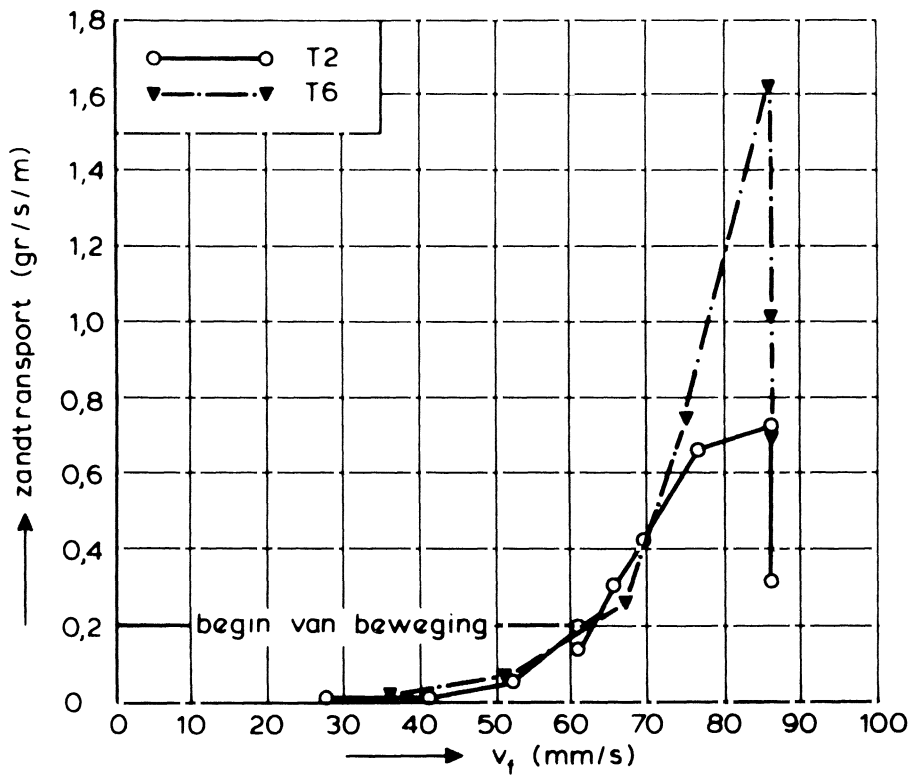
Na de proef

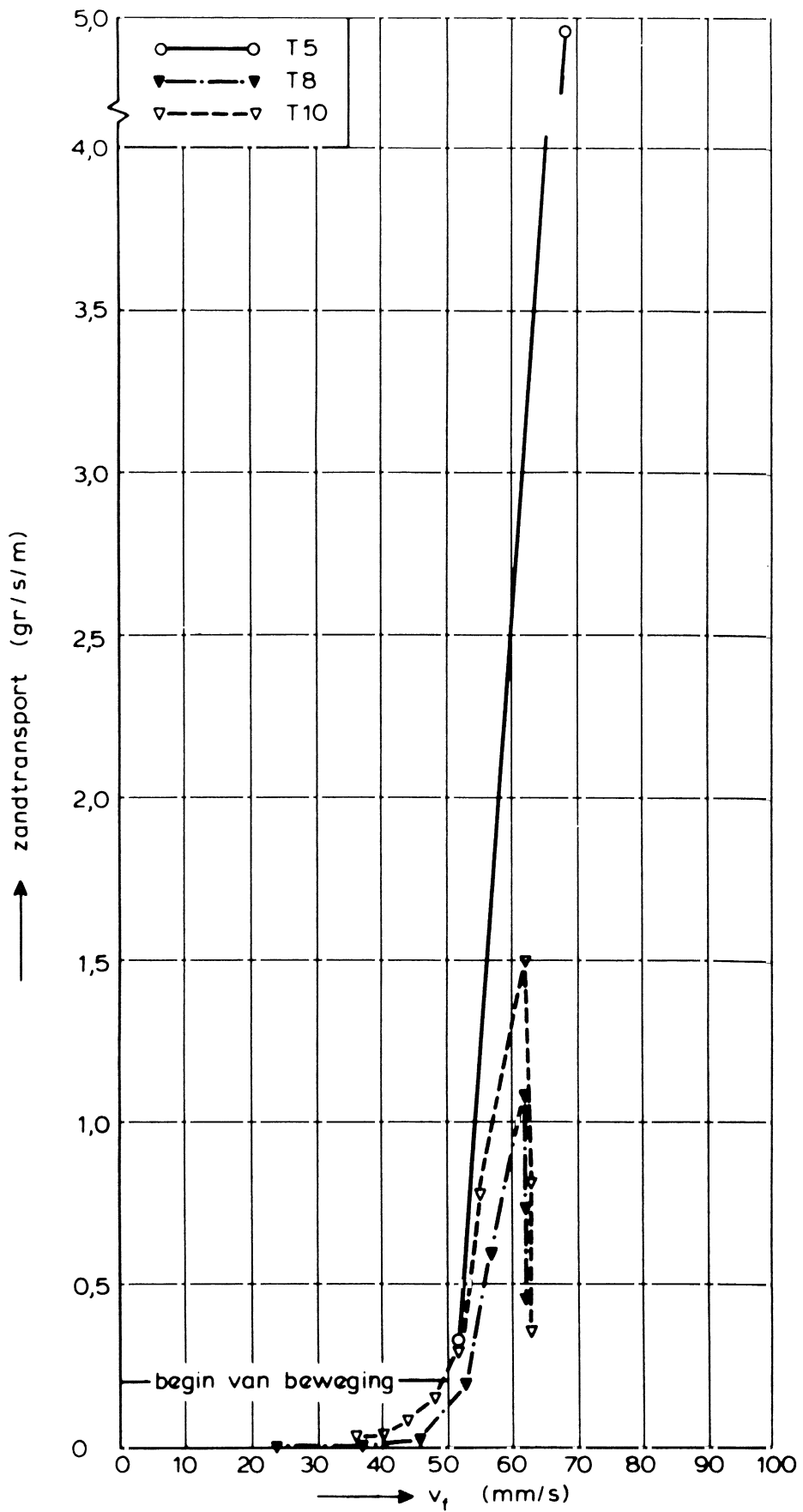
EROSIE-ONTWIKKELING T14

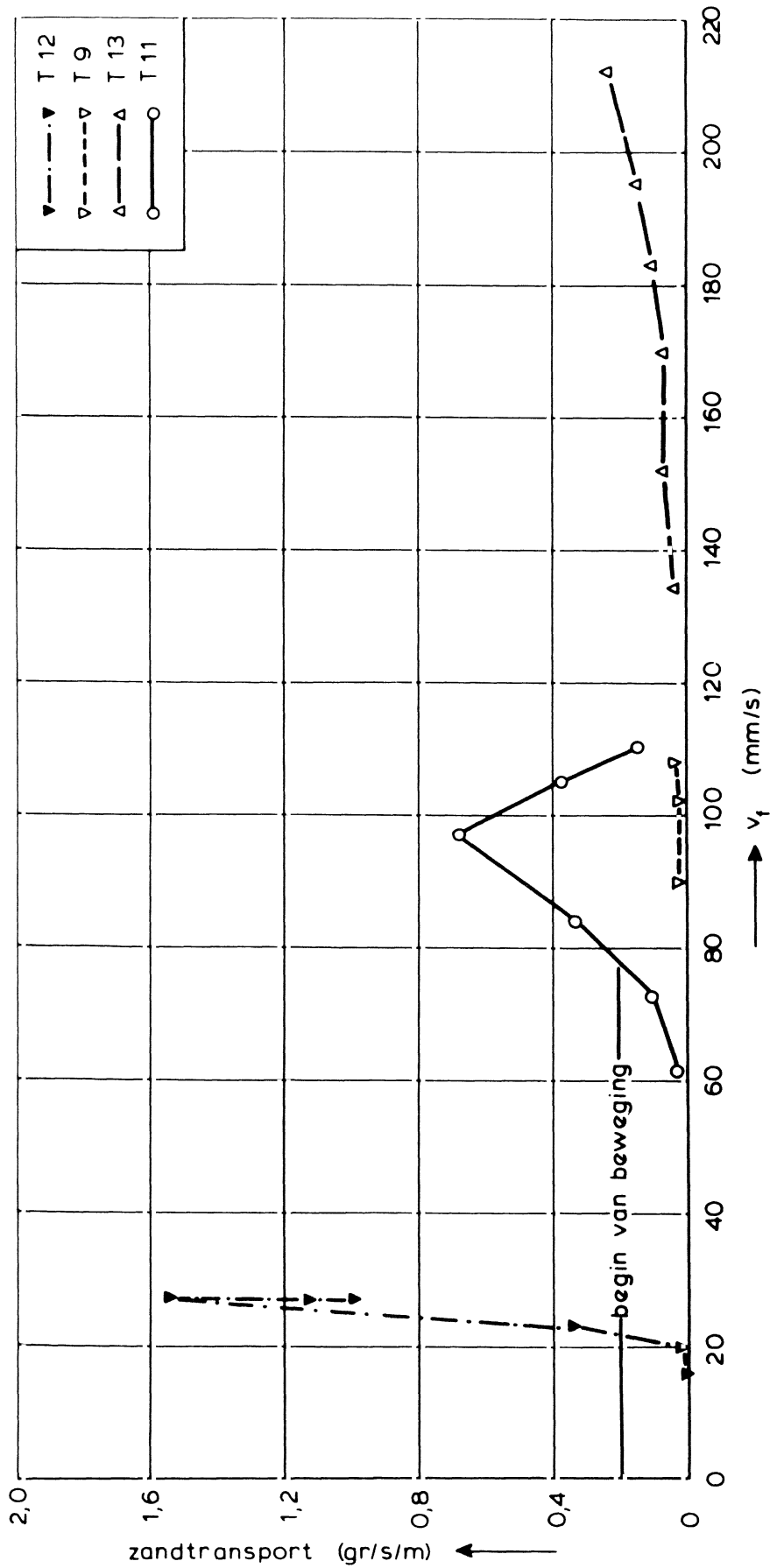
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

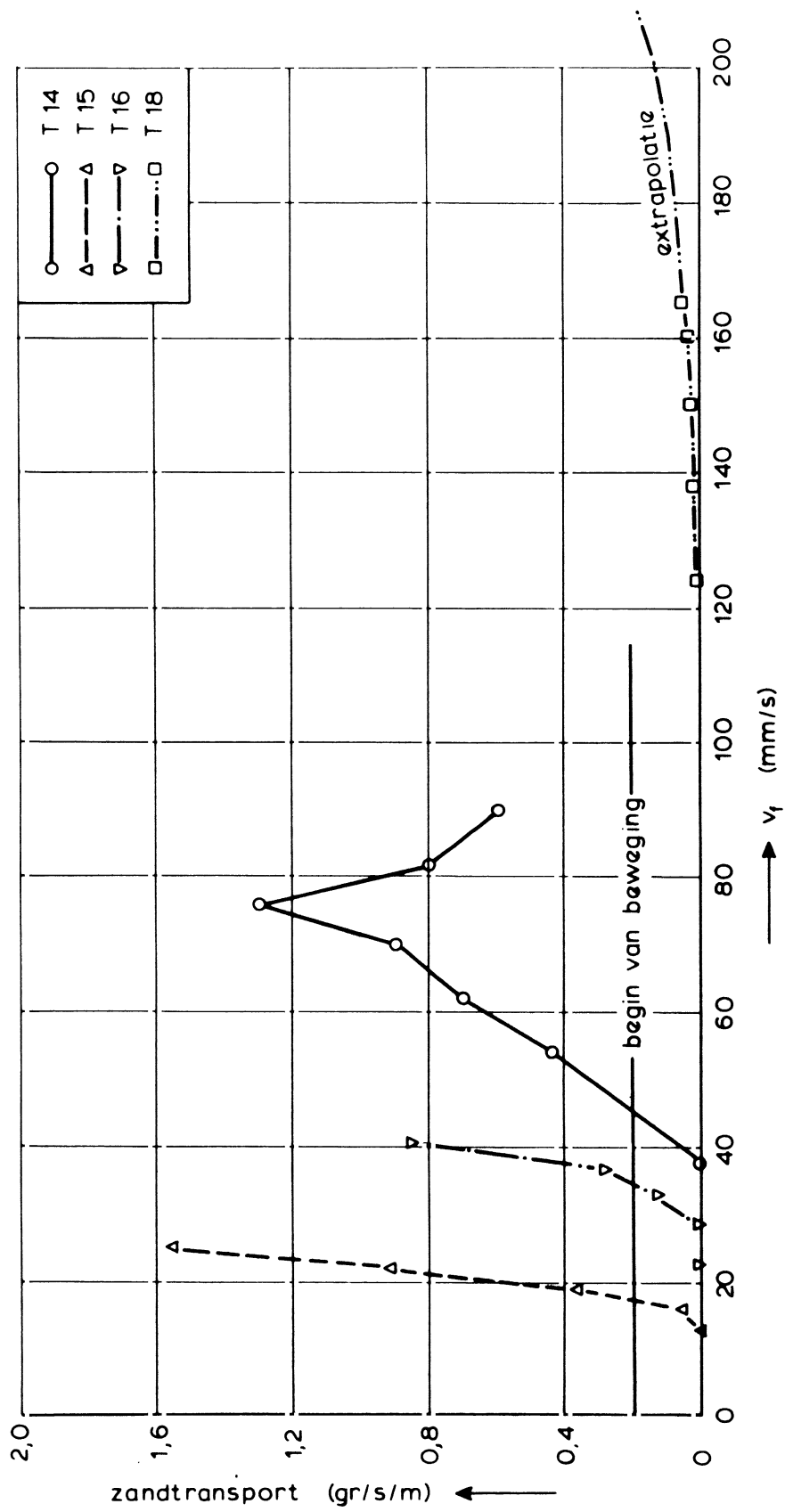
FIG. 9







GEOTEXTIEL OP ZAND ; $D_{b50} = 150 \mu\text{m}$

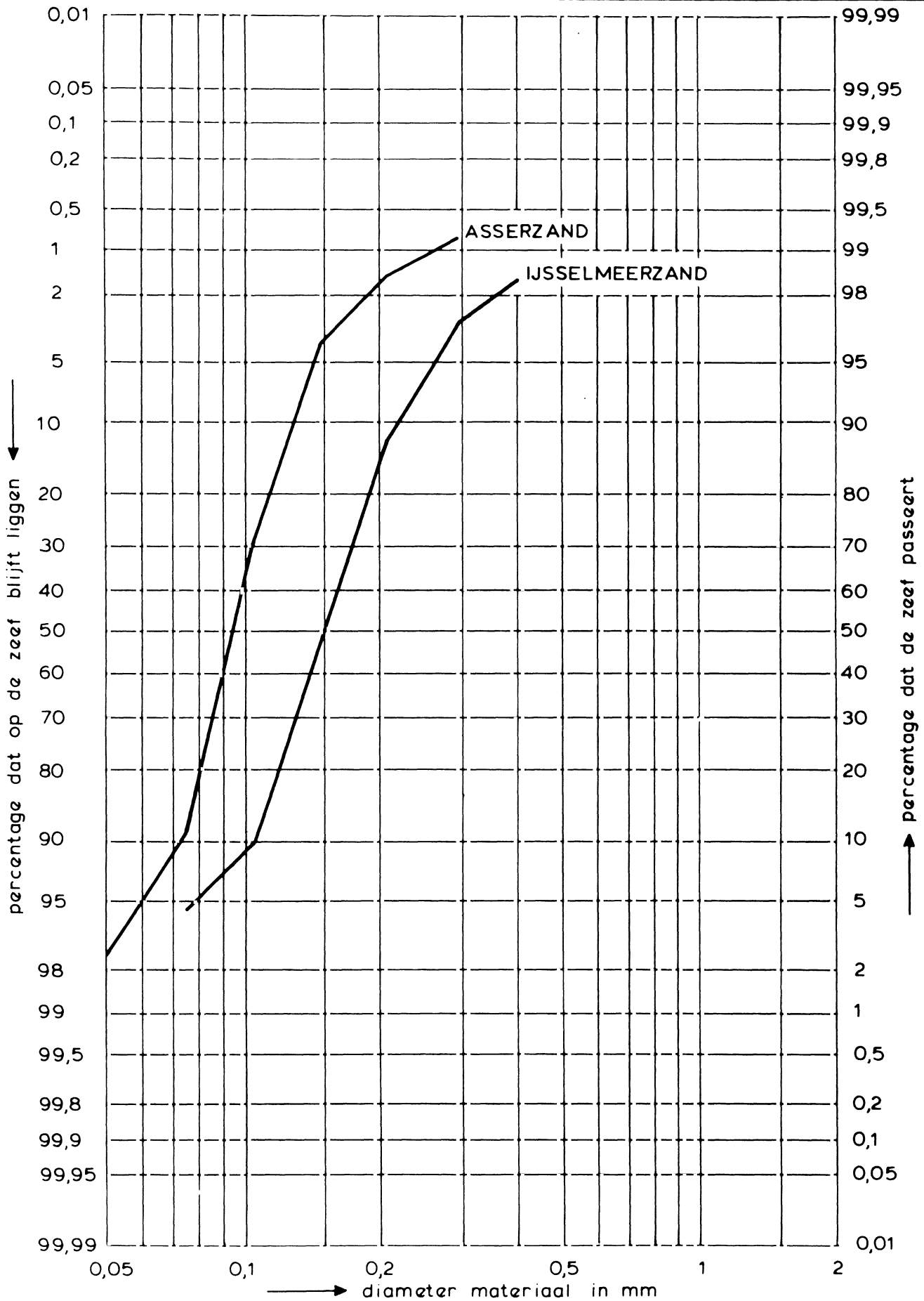


GEOTEXTIEL OP ZAND; $D_{b50} = 96 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

FIG. 13

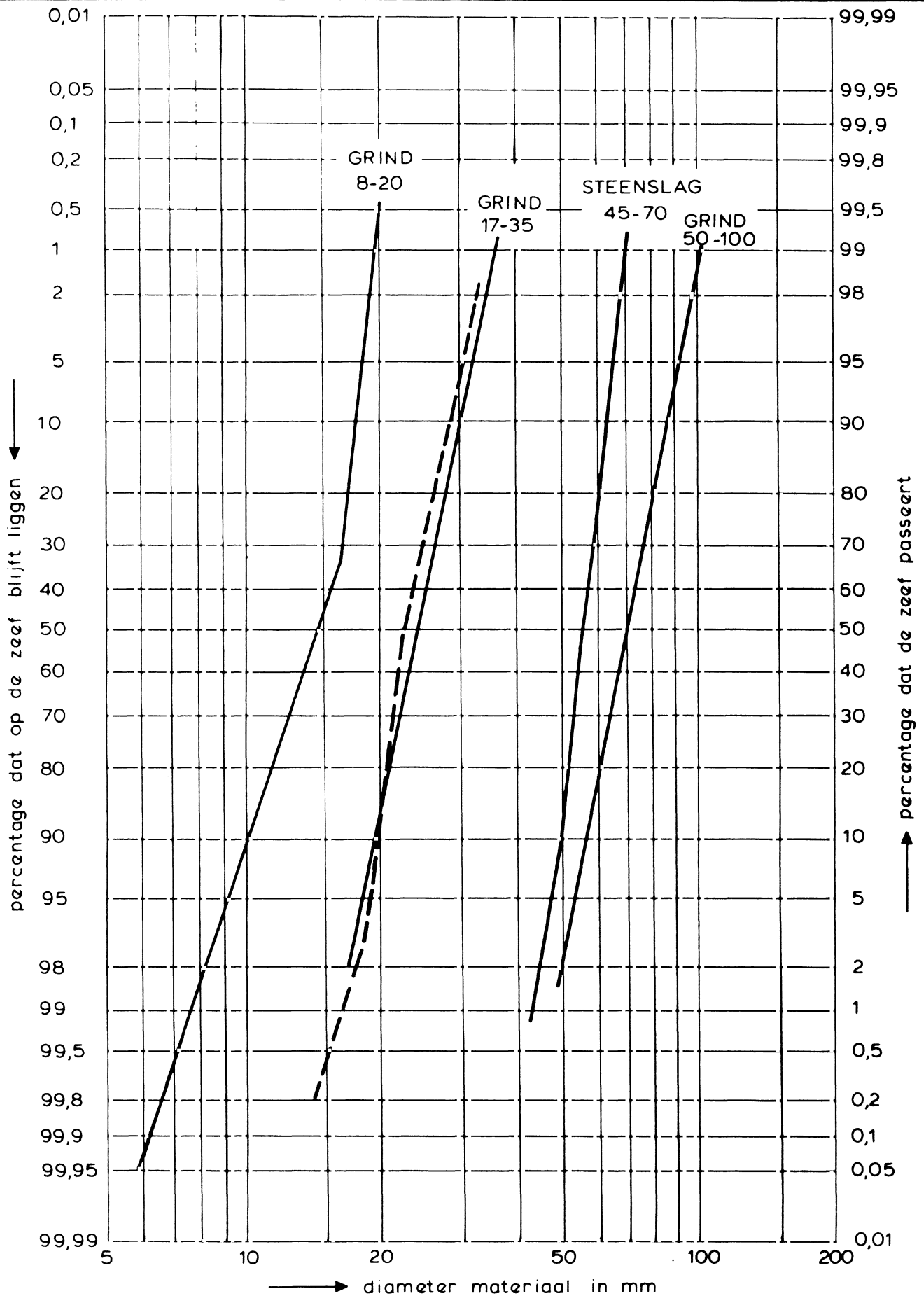


ZEEFKROMMEN VAN ZAND

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

FIG. 14

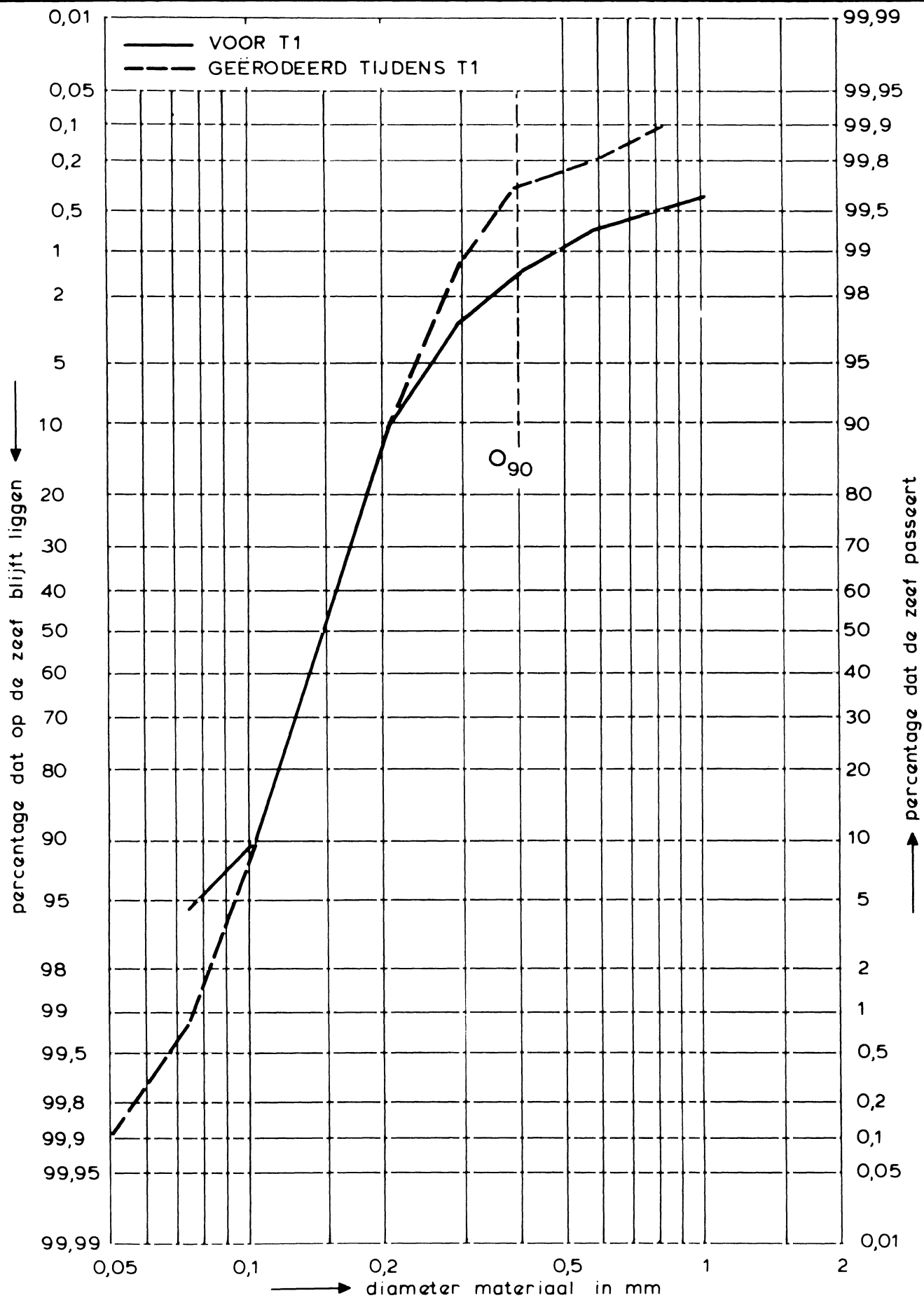


ZEEFKROMMEN VAN GRANULAIR MATERIAAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

FIG. 15

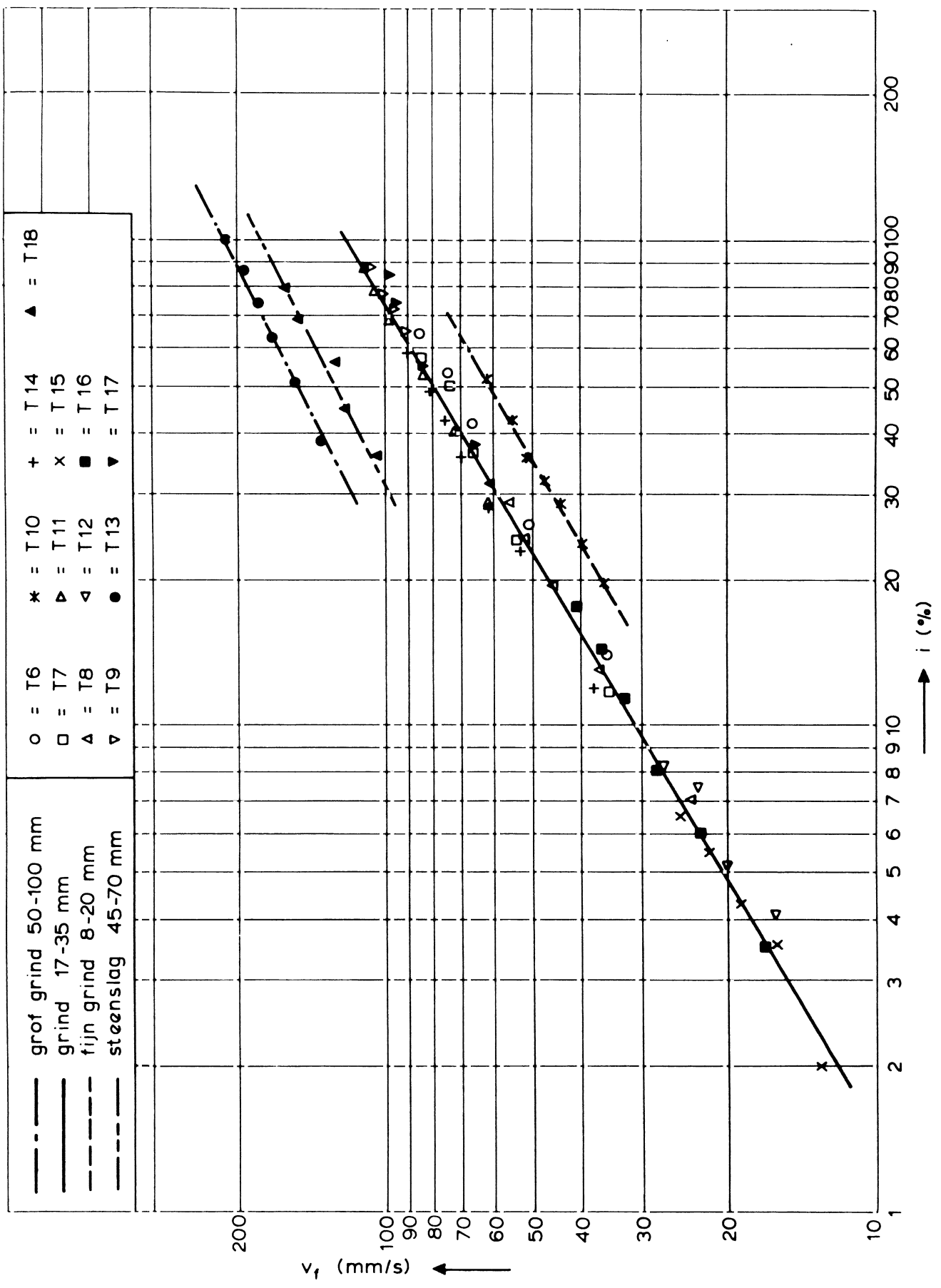


ZEEFKROMME GEËRODEERD ZAND

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

FIG. 16

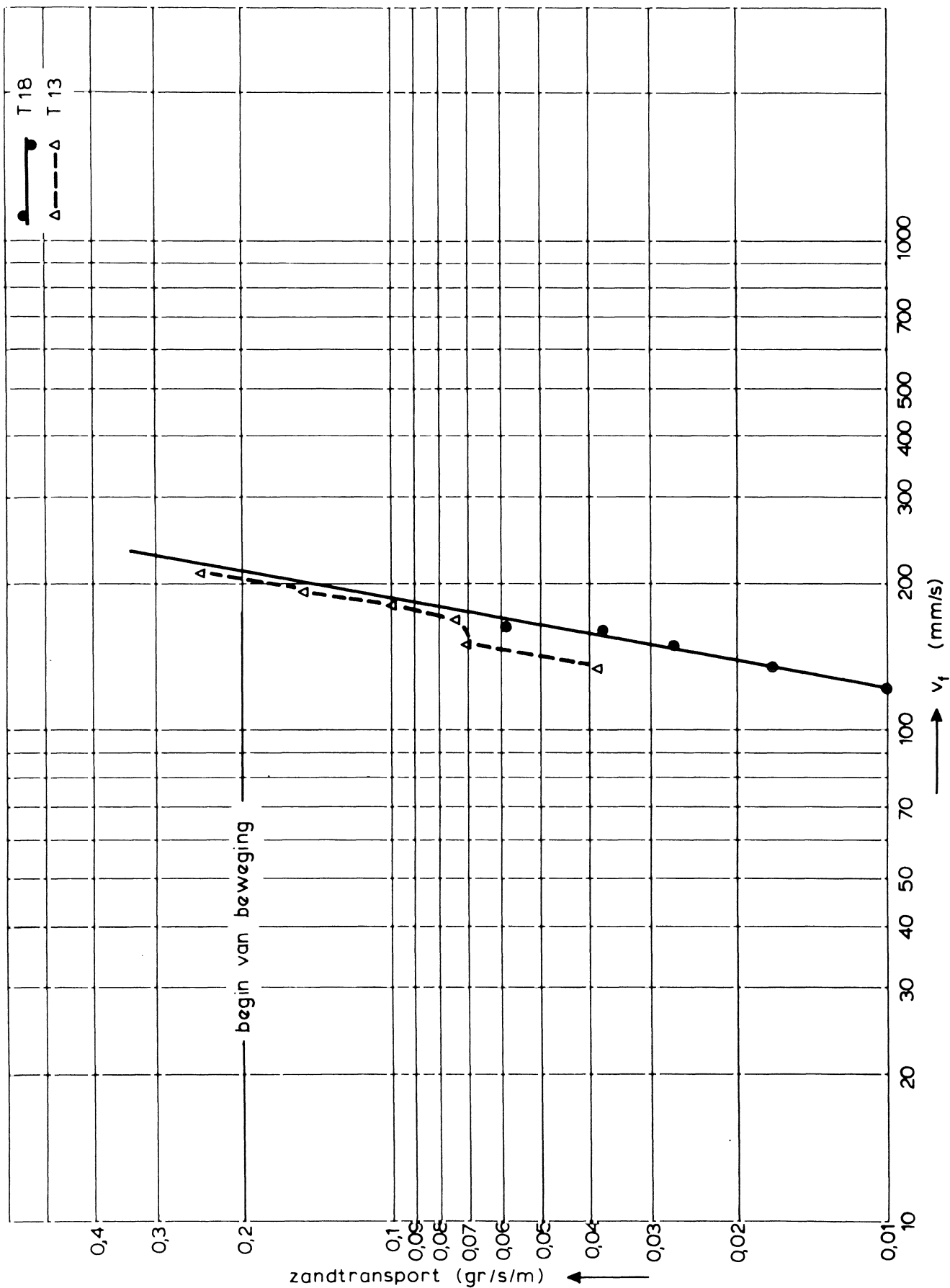


DOORLATENDHEID FILTERMATERIAAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

FIG. 17

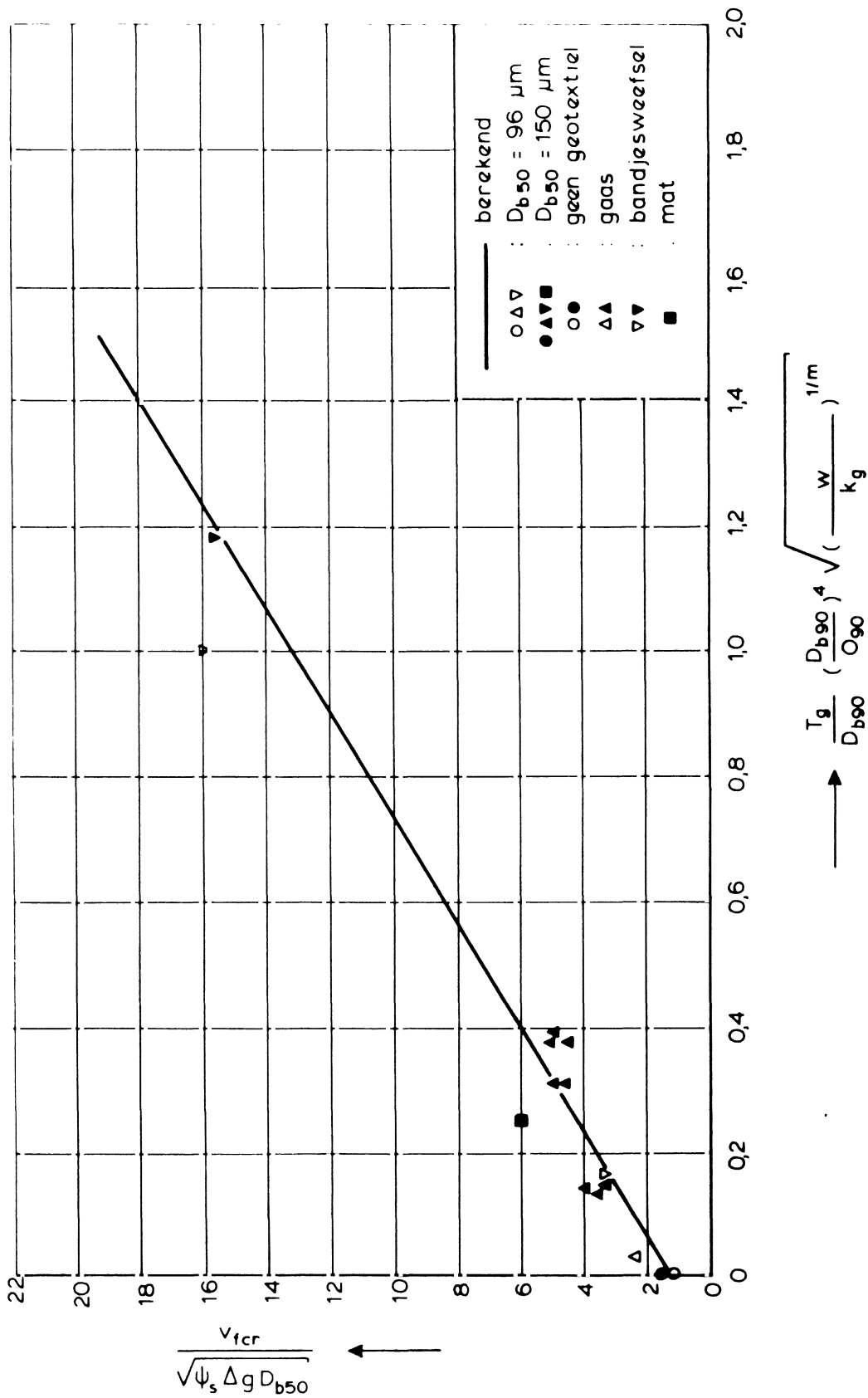


EXTRAPOLATIE ZANDTRANSPORT BIJ T 18

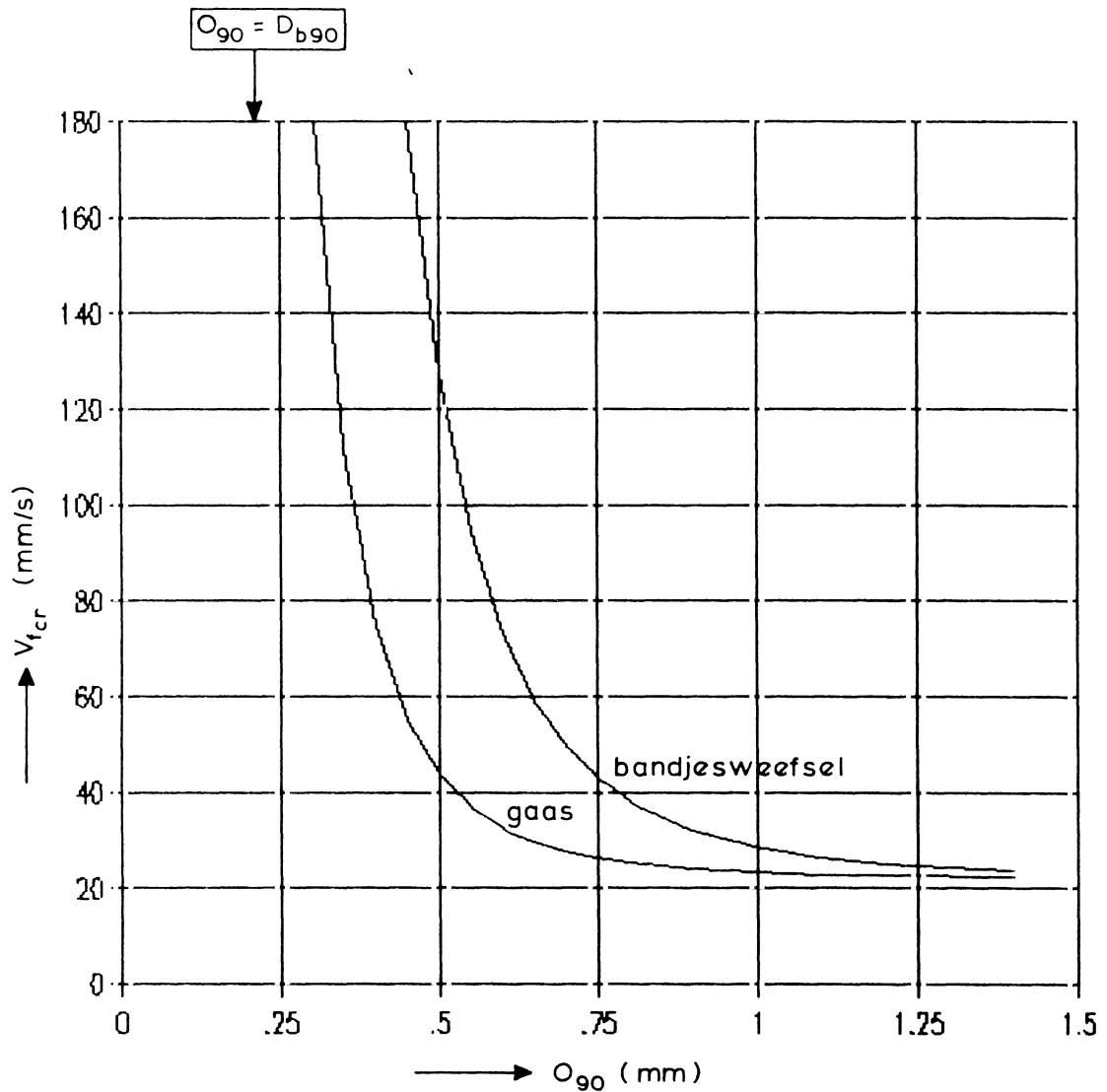
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 195.13

FIG. 18



VERGELIJKING BEREKENDE EN GEMETEN WAARDEN



$D_{b90} = 220 \mu\text{m}$

$D_{b50} = 150 \mu\text{m}$

$w = 9 \text{ mm/s}$

als $O_{90} \rightarrow \infty$ dan : $V_{tcr} = 22 \text{ mm/s}$

gaas : $T_g / D_{b90} = 3$; $(w/k_g)^{1/m} = 1,5$

bandjeswaafer : $T_g / D_{b90} = 6$; $(w/k_g)^{1/m} = 9$

VOORBEELD VAN INVLOED O_{90} EN TYPE OP V_{tcr}