

opdrachtgever:

Rijkswaterstaat

Dienst Weg- en Waterbouwkunde

erosie door open taludbekledingen

samenvattend verslag

juli 1989

erosie door open taludbekledingen

H.J. Verheij



waterloopkundig laboratorium | WL

INHOUD

	blz.
1. Inleiding.....	1
1.1 Opdracht en verantwoording.....	1
1.2 Probleemstelling.....	2
1.3 Opzet van het onderzoek.....	4
2. Samenvatting, conclusies en aanbevelingen.....	7
3. Literatuurstudie en aanbevelingen voor praktijkgericht onderzoek.....	11
3.1 Probleembeschrijving en doelstelling.....	11
3.2 Open taludbekledingen op oevers.....	12
3.3 Open taludbekledingen op dijken.....	13
3.4 Conclusies en aanbevelingen.....	15
4. Praktijkgericht onderzoek oevers.....	17
4.1 Probleembeschrijving en doelstelling.....	17
4.2 Uitgevoerd modelonderzoek.....	18
4.3 Conclusies en aanbevelingen.....	19
5. Praktijkgericht onderzoek dijken.....	22
5.1 Probleembeschrijving en doelstelling.....	22
5.2 Uitgevoerd modelonderzoek.....	22
5.3 Conclusies en aanbevelingen.....	23
6. Hydraulische ruwheid van een Armorflex-blokkenmat.....	26
6.1 Probleembeschrijving en doelstelling.....	26
6.2 Uitgevoerd onderzoek.....	26
6.3 Conclusies en aanbevelingen.....	27

INHOUD

	blz.
7. Stroomsnelheidsberekeningen in een gat.....	29
7.1 Probleemverkenning en doelstelling.....	29
7.2 Uitgevoerde berekeningen.....	29
7.3 Conclusies en aanbevelingen	30
8. Snelheden op talud door brekende golven.....	31
8.1 Probleembeschrijving en doelstelling.....	31
8.2 Uitgevoerd onderzoek.....	31
8.3 Conclusies en aanbevelingen.....	32

LITERATUUR

FIGUREN

FIGUREN

- 1 Open bekledingsblok en faalmechanismen
- 2 Schematisch overzicht van het onderzoek met betrekking tot oevers
- 3 Onderzoekskader met betrekking tot dijken
- 4 Overzicht modelfaciliteit
- 5 Doorsnede talud ter plaatse van meetsectie met bloknummering
- 6 Open bekledingsblok
- 7 Erosie als functie van golfhoogte en aantal golven
- 8 Invloed gatvulling
- 9 Verband tussen z_{\max} en v_s
- 10 Verband tussen z_{\max} en u_{\max}
- 11 Lokatie gevulde gaten en bloknummers
- 12 Erosiediepte als functie van plaats ten opzichte van SWL
- 13 Grootste waarde van erosiediepte als functie van golfhoogte
- 14 Grootste waarde van erosiediepte als functie van golfhoogte
- 15 Grootste waarde van erosiediepte als functie van golfhoogte
- 16 Grootste waarde van erosiediepte als functie van golfhoogte
- 17 Maximale erosiediepte voor gehele talud
- 18 Maximale erosiediepte voor gehele talud
- 19 Stromingsomstandigheden bij kunstmatige ruwheid
- 20 Armorflex-blokken en -blokkenmat
- 21 Stroomgoot met proefopstelling
- 22 Snelheidsverdelingen in een dwarsdoorsnede, proeven 20 en 21
- 23 Snelheidsverdelingen in de verticaal, proeven 4 en 14
- 24 Verband tussen k_s/Y en $W+G/Y$ voor kunstmatige ruwheidselementen
- 25 Results of model tests of Führböter
- 26 Detailed current field and streamline pattern
- 27 Shear stress velocity distribution
- 28 Experimental and computational results
- 29 Distribution of horizontal velocity in square cavity (after Rodi)
- 30 Snelheid op talud zonder correctie
- 31 Berekende en gemeten neerwaartse snelheid
- 32 Berekende en gemeten opwaartse snelheid

SYMBOLLEN

A_g	gatoppervlak	m^2
B'	hart-op-hart afstand tussen de gaten (loodrecht op dijkas)	m
b_w	breedte vaarweg op de waterspiegel	m
C	coëfficiënt van Chézy	$m^{0.5} \cdot s^{-1}$
D	blokdikte	m
D_f	korreldiameter filtermateriaal	m
D_{50}	karakteristieke korreldiameter onderschreden door 50%	m
D_{50f}	karakteristieke korreldiameter van het filtermateriaal onderschreden door 50%	m
G	gatgrootte	m
g	versnelling zwaartekracht	$m \cdot s^{-2}$
H	golfhoogte	m
h	waterdiepte	m
k_s	hydraulische ruwheid volgens Nikuradse	m
L_o	golflengte op diep water, $L_o = gT^2/2\pi$	m
L'	hart-op-hart afstand tussen de gaten (evenwijdig aan de dijkas)	m
l	verhouding oppervlak steenzetting - gatoppervlak, $l = n_o^{-1}$	
N	aantal golven of langsvarende schepen	-
n_l	lengteschaal	-
n_o	verhouding gatoppervlak - oppervlak steenzetting, $n_o = A_g/B'L'$	-
T	golfperiode	s
u	gemiddelde stroomsnelheid	$m \cdot s^{-1}$
u_{max}	stroomsnelheid in de haalgolf	$m \cdot s^{-1}$
u_w	snelheid in de neer in een gat	$m \cdot s^{-1}$
u_2	snelheid in centrum van de neer in een gat	$m \cdot s^{-1}$
u_*	schuifspanningssnelheid	$m \cdot s^{-1}$
v_{max}	grootste waarde van v_{op} en v_{neer}	$m \cdot s^{-1}$
v_{neer}	maximale langs het talud omlaag gerichte snelheid tijdens golfneerloop	$m \cdot s^{-1}$
v_{op}	maximale langs het talud omhoog gerichte snelheid tijdens golfoploop	$m \cdot s^{-1}$
v_s	scheepssnelheid	$m \cdot s^{-1}$
W	blokbreedte in stroomrichting	m
x	coördinaat in stroomrichting	m

SYMBOLLEN

Y	erosiediepte	m
Y _e	evenwichtserosiediepte	m
y	coördinaat loodrecht op stroomrichting	m
y _s	afstand scheepas-vaarwegas	m
z	verticale coördinaat	m
z _{max}	haalgolfhoogte	m
α	taludhelling	o
Δ	relatieve dichtheid, $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$	-
ρ	dichtheid water	kg.m ⁻³
ρ _s	dichtheid materiaal	kg.m ⁻³
ξ _o	brekerparameter, $\xi_o = \tan \alpha (H/L_o)^{-0.5}$	-

1. Inleiding

1.1 Opdracht en verantwoording

Open taludbekledingen die bestaan uit in verband geplaatste betonblokken met gaten, bieden de mogelijkheid vegetatie te doen groeien, waardoor mogelijk een milieuvriendelijke oever kan worden verkregen. In het pioniersstadium van de vegetatie is het evenwel ongewenst dat de gatvulling uitspoelt. Teneinde de relatie tussen waterbeweging en erosie van de gatvulling vast te stellen, is door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat per brief d.d. 16 maart 1987 (kenmerk WB 570), opdracht verleend aan het Waterloopkundig Laboratorium tot het uitvoeren van onderzoek naar de erosie door open taludbekledingen.

Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van ontwerprichtlijnen voor taludbekledingen met gaten die groter zijn dan de zand- of filterkorrels eronder. Hiertoe dient de kritieke waterbeweging bij een oever- of dijkbekleding te worden vastgesteld, waarbij nog toelaatbare erosie is te verwachten. De toelaatbare erosie mag daarbij maximaal gelijk zijn aan de hoeveelheid sediment in de gaten. Filter- of basismateriaal gelegen onder de elementen mag dus niet uitspoelen. Bij oeverbekledingen waar vegetatie een rol moet gaan spelen, is de toelaatbare erosie kleiner, dat wil zeggen in de gaten dient sediment achter te blijven.

Het onderzoek is uitgevoerd van april 1987 tot medio 1989 en stond onder leiding van de irs. M. Klein Breteler en H.J. Verhey van het WL. De laatste stelde tevens dit verslag samen. Van de zijde van de opdrachtgever is het onderzoek begeleid door ir. R.E.A.M. Boeters van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde.

Het onderhavige verslag bevat een samenvatting van de resultaten, die zijn gerapporteerd in de volgende afzonderlijke delen:

- H657 bijlage A : Literatuurstudie en aanbevelingen voor praktijkgericht onderzoek (verslag bureaustudie, november 1988)
- H657 bijlage B : Praktijkgericht onderzoek oevers (verslag modelonderzoek, november 1988)

- H657 bijlage C : Praktijkgericht onderzoek dijken (verslag modelonderzoek Deltagoot, juli 1989)
- Q439/H657 bijlage D : Hydraulische ruwheid van een Armorflex-blokkenmat (speurwerkverslag, juli 1988)
- H657 bijlage E : Simulation of recirculation flow in a rectangular cavity (verslag ODYSSEE berekeningen, juli 1989).
- H657 bijlage F : Snelheden op talud door brekende golven (verslag modelonderzoek, juli 1989)

Teneinde de toepassingsmogelijkheden van de onderzoeksresultaten met betrekking tot het onderdeel oevers te verbreden, is inmiddels vervolg onderzoek gestart. De resultaten hiervan zullen worden gerapporteerd in het verslag "Praktijkgericht onderzoek milieuvriendelijke oevers (Q913)" [5].

1.2 Probleemstelling

Open taludbekledingen, dat wil zeggen, in verband geplaatste betonblokken of blokkenmatten met gaten die over de gehele blokdikte doorlopen, verenigen in zich de voordelen van een gesloten bekleding en een bekleding van losgestorte materialen (figuur 1). De blokken zijn in vergelijking tot een gesloten bekleding voldoende doorlatend om te voorkomen dat er grote verschildrukken ontstaan, terwijl de blokken in vergelijking tot een losgestorte bekleding elkaar steun verlenen, waardoor de stabiliteit bij zware golfaanval toeneemt. Een open taludbekleding kan dan ook beschouwd worden als een compromis tussen losgestorte en gesloten bekledingen.

De gaten in de blokken reduceren daarnaast het blokgewicht. Dit maakt niet alleen het verwerken van de blokken eenvoudiger, maar biedt tevens planten de mogelijkheid door de bekleding heen te groeien. De constructie als geheel verkrijgt hierdoor een milieuvriendelijker aanzicht, maar bovendien neemt de stabiliteit toe door de belastingdempende werking van de vegetatie en de sterkte verhogende invloed van het wortelstelsel op de erosiebestendigheid van het materiaal in de gaten.

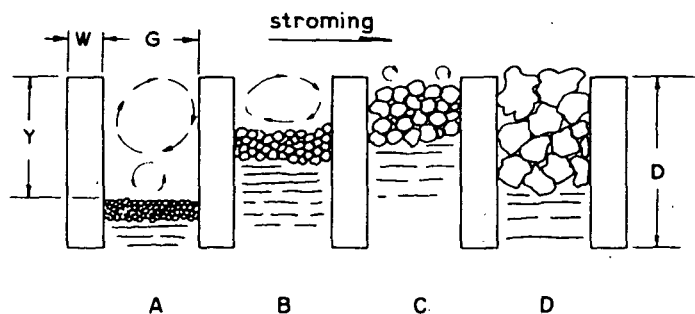
Voor de stabiliteit van de bekleding en de kwaliteit van een vegetatie is het echter een voorwaarde dat het materiaal in de gaten niet voortijdig geheel erodeert.

Ten aanzien van de belasting op de open bekleding moet er onderscheid worden gemaakt in oeverbekledingen en dijkbekledingen (of golfbrekers). Bij oevers langs kanalen, meren en rivieren is er sprake van een waterbeweging bij de konstruktie als gevolg van scheepspassages, en natuurlijke omstandigheden. Wat betreft de natuurlijke omstandigheden moet worden gedacht aan stroming door afvoer en windgolven. De belangrijkste sloopgeïnduceerde belastingen zijn haalgolf en sekundaire sloopgolven (voor het bovenste deel van de bekleding gelegen in een strook van 2 m breedte boven en onder de ongestoorde waterspiegel) en retourstroom (voor delen van de bekleding gelegen beneden circa 1,0 m onder de ongestoorde waterspiegel).

Bij dijken bestaat de belasting uit windgolven, waarbij gedacht moet worden aan:

1. uittredend debiet (verhang) tijdens maximale golfsterugloop.
2. stroming over het talud tijdens golfoploop en -terugloop.
3. golfklap.

Aan de hand van de onderstaande figuur kan de werking van de open bekleding worden verklaard [1]:



Stabiliteitsprocessen in gaten van open bekledingen [1]

De volgende twee invloeden zijn te onderscheiden:

1. De stenen worden op hun plaats gehouden door de wanden van de gaten. De sterkte is dus vergroot ten opzichte van een onverdedigd talud.
2. De schuifspanning op het erodeerbare oppervlak wordt door de gaten gereduceerd. De belasting is dus kleiner.

Voor situatie A is de tweede invloed dominant, terwijl voor D de eerste het belangrijkste is. Situatie D is in dit onderzoek niet onderzocht.

Hierbij is sprake van een overgang naar een steenzetting. Onderwerp van studie vormen de situaties A t/m C.

Het erosie-mechanisme als gevolg van de stroming over het talud komt bij oevers en dijken in principe overeen. In beide gevallen is er een stroming over het talud die de gatvulling wegspoelt, totdat er een gat ontstaat met een neer met voldoende lage snelheid. Het is hierbij denkbaar dat er zelfs twee neren boven elkaar nodig zijn voordat een evenwicht is bereikt (situatie A in bovenstaande figuur). Wat 'voldoende laag' is voor de snelheid in de neer wordt bepaald door de korrelgrootte van de gatvulling en het uittredende debiet door de toplaag. Voor kleine diepe gaten (gatdiepte veel groter dan de gatbreedte) is het uittredende debiet maatgevend voor eventuele erosie. De overtrekkende waterstroom is dan niet in staat om onder in het gat enige waterbeweging van betekenis te veroorzaken.

Onderwerp van dit onderzoek is de optredende erosie van een gatvulling als functie van belasting, gatdimensies en karakteristieken van gatvulling voor de situatie zonder vegetatie (of een vegetatie in het pioniersstadium). Doel daarbij is het ontwikkelen van ontwerprichtlijnen.

1.3 Opzet van het onderzoek

Het totale onderzoek kan worden opgesplitst in twee delen: onderzoek naar open bekledingen op oevers en onderzoek naar open bekledingen op dijken. De reden van dit onderscheid is het verschil in hydraulische belasting en de voortplantingsrichting daarvan ten opzichte van de normaal op oever of dijk.

Bij het onderdeel dijken zijn windgolven maatgevend. Impliciet zijn daarbij de secundaire scheepsgolven meegenomen, welke een analoog gedrag vertonen. Zij kunnen beschouwd worden als scheefinvallende windgolven.

Bij het onderdeel oevers zijn haalgolf en retourstroom onderwerp van onderzoek geweest. Beide belastingen kennen een voortplantingsrichting evenwijdig aan de oever.

Tijdens de uitvoering van het onderzoek zijn twee fasen onderscheiden:

- fase 1: inventarisatie van bestaande kennis (bureaustudie)
- fase 2: praktijkgericht modelonderzoek en uitwerking van enkele fundamentele aspecten.

fase 1: inventarisatie van bestaande kennis

Voorafgaand aan het modelonderzoek is een bureaustudie uitgevoerd (bijlage A). Centraal daarbij stond een inventarisatie van de bestaande kennis.

Voor het op oevers gerichte onderzoek is als uitgangspunt de waterbeweging op enige afstand van de oever gekozen. Deze afstand is zodanig dat de ruwheid van

het talud de waterbeweging nog niet beïnvloedt, maar de daar optredende watersnelheid en golfhoogte bepalend is voor de snelheid op zeer kleine afstand van de top laag en de snelheid in de gaten.

De grootte van de waterbeweging op enige afstand viel buiten het kader van deze studie. Hiervoor wordt verwezen naar het onderzoek "Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen" [2].

In figuur 2 is een overzicht van het onderzoek in de vorm van een schema gegeven. Het vangt aan met de waterbeweging op enige afstand van het talud.

Samen met informatie over de geometrie moet vervolgens de snelheid vlak boven de blokken berekend kunnen worden. De volgende stap in het schema leidt tot de snelheid in het gat, waarmee vastgesteld moet kunnen worden of er erosie optreedt.

Als alternatief voor de hiervoor geschetste lijn, welke een meer fundamenteel karakter heeft, is een "black-box" benadering in het schema opgenomen. De invoer hiervoor is de snelheid op enige afstand, waarna de vraag of er erosie optreedt, op basis van resultaten van (fysisch model) onderzoek direct wordt beantwoord.

Voor dijken geldt een soortgelijke opzet (zie figuur 3). De overdrachtsfunctie van de golfrandvoorwaarde naar de snelheid op het talud valt hier wel binnen het kader van het onderzoek. Met de snelheid op het talud en het eventuele verhang over de top laag moet vervolgens de snelheid in het gat bepaald kunnen worden, zodat beoordeeld kan worden of er erosie is te verwachten. Er is daarbij onderscheid gemaakt tussen bekledingen met grote en met kleine gaten. Ook bij dijken is er een "black-box"-lijn mogelijk.

Hoewel ook in de bureau studie de oevers en dijken gescheiden behandeld zijn, is er duidelijk sprake van een overlap. De stappen in de fundamentele lijn in het onderzoek tussen "de snelheid op enige afstand van de taludbekleding" en "de mate van erosie" zijn in beide gevallen identiek. Dit onderwerp wordt in detail behandeld bij oevers en slechts kort bij dijken bekeken.

fase 2a: praktijk gericht modelonderzoek

De bureaustudie resulteerde uiteindelijk in aanbevelingen voor verder onderzoek teneinde de kennis uit te breiden. Enerzijds betrof dit fundamenteel onderzoek, anderzijds praktijk gericht onderzoek. Het zwaartepunt lag bij het laatste aspect.

Het praktijkgericht onderzoek naar oevers (bijlage B) is uitgevoerd in een golfgoet, waarbij de scheepsgeïnduceerde belasting werd gesimuleerd. Door mid-

del van een black-box aanpak kon een formule worden afgeleid, waarmee de erosiediepte in gaten kan worden voorspeld.

Het praktijkgericht onderzoek naar dijken (bijlage C) is uitgevoerd in de Deltagoot. Gatvulling en onderlaag bestonden daarbij uit filtermateriaal, omdat de grootte van de belastingen in tegenstelling tot bij oevers dermate veel hoger is, dat een toplaag direct op zand of teelaarde buiten beschouwing kan blijven. Ook voor dit onderdeel konden empirische relaties worden bepaald.

fase 2b: uitwerking van enkele fundamentele aspecten

Onderzoek in de fundamentele lijn heeft plaatsgevonden naar de hydraulische ruwheid van open taludbekledingen. Beschikbare meetresultaten van eerder uitgevoerd fysisch onderzoek naar de ruwheid van Armorflex-blokkenmatten zijn geanalyseerd (bijlage D). Dit resulteerde in een voorspellings-methode voor de hydraulische ruwheid, wat het mogelijk maakt de stroomsnelheden juist boven de blokken te bepalen.

Daarnaast zijn met het programma ODYSSEE stroomsnelheden berekend in een gat en vergeleken met meetresultaten uit de literatuur (bijlage E). Bij een goede overeenstemming tussen berekende en gemeten stroomsnelheden biedt een dergelijke aanpak interessante mogelijkheden. Helaas is het uitgevoerde aantal toetsingen te gering om hieraan vergaande conclusies te verbinden.

Tenslotte zijn de stroomsnelheden op het talud door brekende golven geanalyseerd (bijlage F), welke zijn geregistreerd tijdens het praktijkgericht onderzoek dijken. Deze stroomsnelheden vormen de overgang van golfparameters naar snelheden in een gat. Op basis van de resultaten zijn formules gepresenteerd waarmee de maximale stroomsnelheid kan worden berekend.

Met het bovenbeschreven uitgevoerde onderzoek is deels uitvoering gegeven aan de aanbevelingen voor verder onderzoek, zoals geformuleerd in de bureaustudie (bijlage A). Dit heeft geresulteerd in enkele empirische formules, waarmee het mogelijk is de erosie te voorspellen van gatvullingen in open taludbekledingen. Het toepassingsgebied is evenwel beperkt. Uitbreiding ervan is dan ook gewenst, mede vanwege de toenemende waardering voor verdedigingen met vegetatie.

2. Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

Onderzoek is uitgevoerd naar de invloed van de sloopgeïnduceerde waterbewegingscomponenten haalgolf en secundaire sloopgolven en de invloed van windgolven op de erosie van gatvullingen in open taludbekledingen langs oevers en dijken. Het onderzoek had ten doel praktische ontwerpgerichte aanbevelingen op te leveren. Naast dit fysische modelonderzoek is meer fundamenteel onderzoek uitgevoerd, teneinde inzicht te krijgen in de fysische processen.

Het onderhavige verslag bevat een samenvatting van de verschillende uitgevoerde onderzoeken, welke in afzonderlijke delen zijn gerapporteerd. In hoofdstuk 3 van dit samenvattend verslag worden opzet, behandelde aspecten en resultaten van de bureaustudie besproken. In hoofdstuk 4 wordt het praktijkgerichte modelonderzoek oevers samengevat. Behandeld worden opzet, uitvoering en resultaten van de proeven. Geheel analoog wordt in hoofdstuk 5 het praktijkgerichte modelonderzoek dijken behandeld. In hoofdstuk 6 wordt ingegaan op de hydraulische ruwheid van een open taludbekleding aan de hand van daartoe in het verleden uitgevoerde metingen. In hoofdstuk 7 worden de resultaten van stroomsnelheidsberekeningen in een gat met het programma ODYSSEE samengevat. In hoofdstuk 8 tenslotte worden de snelheden op het talud als gevolg van brekende golven behandeld.

Op basis van de onderzoeksresultaten kunnen de volgende algemene conclusies worden getrokken:

- Toepassing van open taludbekledingen lijkt mogelijk, mits geen extreme belastingen optreden.
- Empirische formules voor zowel oevers als dijken konden worden afgeleid om het erosieproces te voorspellen.
- Een relatie kon worden bepaald om de hydraulische ruwheid van open taludbekledingen te voorspellen.
- Een wiskundige berekening van de stroomsnelheden in een gat lijkt goede mogelijkheden te bieden.
- Relaties konden worden bepaald voor de maximale stroomsnelheden op het talud als gevolg van brekende golven.

Meer specifiek konden voor ontwerpdoeleinden de volgende relaties worden afgeleid:

open taludbekledingen op oevers

$$\frac{Y}{\bar{G}} = 0,7 (z_{\max})^{0,5} \log (N+1) \text{ voor zand}$$

$$\frac{Y}{\bar{G}} = 0,5 (z_{\max})^{0,5} \log (N+1) \text{ voor grond}$$

met als ontwerpcriterium: $Y_e < D$.

Hierbij is:

- Y = erosiediepte (m)
- G = gatgrootte (m)
- z_{\max} = haalgolfhoogte (m)
- N = aantal langsvarende schepen (-)
- Y_e = evenwichtserosiediepte (m)
- D = blokdikte (m)

Aan het ontwerpcriterium zal in het algemeen voldaan zijn als $G \leq 0,5 \cdot D$, $z_{\max} \leq 0,35$ m en de gatvulling cohesief van aard is.

De hydraulische ruwheid van een open taludbekleding kon worden bepaald met (voorwaarde: $Y \approx W$):

$$k_s/Y = 0,08 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{2,685} \quad \text{voor } \frac{W+G}{Y} < 5$$

$$k_s/Y + 400 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{-1,295} \quad \text{voor } \frac{W+G}{Y} > 15$$

$$\text{figuur 24} \quad \text{voor } 5 < \frac{W+G}{Y} < 15$$

waarin:

- W = blokbreedte in stroomrichting (m)
- G = gatgrootte (m)
- Y = erosiediepte (m)
- k_s = hydraulische ruwheid volgens Nikuradse (m)

open taludbekledingen op dijken

maximale erosiediepte ongeacht plaats op talud:

$$G > 0,1 \text{ m} : \frac{Y}{G} = 0,23 (H/D_{50})^{0,33}$$

$$G < 0,1 \text{ m} : \frac{Y}{G} = 0,04 (H/D_{50})^{0,50} \cdot n_o^{-0,75}$$

maximale erosiediepte boven SWL + 0,2 m:

$$\frac{Y}{G} = 0,18 (H/D_{50})^{0,33}$$

Hierbij is:

Y = erosiediepte (m)

G = gatgrootte (m)

H = golfhoogte (m)

D_{50} = karakteristieke korreldiameter onderschreden door 50% (m)

n_o = verhouding gatoppervlak - oppervlak steenzetting (-), $n_o = A_g/B'L'$

A_g = gatoppervlak (m²)

B' = hart-op-hart afstand gaten (loodrecht op dijkas) (m)

L' = hart-op-hart afstand gaten (evenwijdig aan dijkas) (m)

Als ontwerpcriterium kan worden aangehouden, dat de erosiediepte Y kleiner of gelijk dient te zijn aan de blokdikte D.

De grootste snelheden v_{max} op het talud als gevolg van brekende golven kunnen worden berekend met de in onderstaande tabel vermelde relaties voor $v_{max} / (gH)^{0,5}$:

	$H/L_o \geq 0,028$	$H/L_o < 0,028$	
		$\xi_o < 2,5$	$\xi_o \geq 2,5$
$h/L_o > 0,15$	neerwaarts: $2(\xi_o \cdot \tan \alpha)^{0,5}$	opwaarts: $0,8 \cdot \xi_o$	opwaarts: $0,8 \cdot \xi_o$
$h/L_o \leq 0,15$	opwaarts: $4,8 \cdot \tan \alpha$	neerwaarts: $2(\xi_o \cdot \tan \alpha)^{0,5}$	neerwaarts: $3,1 (\tan \alpha)^{0,5}$

Hierin is:

ξ_o = brekerparameter (-), $\xi_o = \tan \alpha \cdot (H/L_o)^{-0,5}$

H = golfhoogte (m)

L_o = golflengte op diep water (m)

α = taludhoek (°)

h = waterdiepte (m)

g = zwaartekrachtversnelling (m/s²)

Gezien de beperkte toepassingsmogelijkheden van bovenstaande onderzoeksresultaten, wordt aanbevolen:

- Aanvullende proeven uit te voeren met betrekking tot oevers aangevallen door de haalgolf, zodat een betrouwbaarder voorspellingsformule wordt verkregen. Gevarieerd zouden dienen te worden enerzijds gatgrootte en blokdikte en anderzijds de gatvulling wat betreft cohesieve eigenschappen van het materiaal en korreldiameter.
- De relatie tussen stroomsnelheden op het talud en de erosiediepte nader te analyseren, teneinde enerzijds een betere vergelijking te kunnen maken met de voorspellingsformule van Brown en anderzijds de invloed van de korreldiameter van de gatvulling te kunnen bepalen.
- Het onderzoek in de fundamentele lijn voort te zetten teneinde het inzicht te vergroten in fysische processen die een rol spelen.

3. Literatuurstudie en aanbevelingen voor praktijkgericht onderzoek

3.1 Probleembeschrijving en doelstelling

Bij een probleemverkenning is vastgesteld dat een open taludbekleding een interessante tussenvorm is tussen een dichte bekleding (zoals een dichte steenzetting of asfalt) en een bekleding van breuksteen (of willekeurig geplaatste golfbrekerelementen). Interessant enerzijds, omdat een dergelijk type bekleding de mogelijkheid biedt voor planten om door de vegetatie te groeien. Dit verhoogt de stabiliteit van de elementen en de erosiebestendigheid van de gatvulling en leidt tevens tot een hogere milieukundige waardering dan een verdediging zonder vegetatie. Interessant anderzijds, omdat gatvulling die niet erodeert, bijdraagt aan de stabiliteit van de gehele verdedigingsconstructie.

Het doel van de literatuurstudie was de bestaande kennis te inventariseren op het gebied van de toelaatbare waterbeweging op een constructie met gaten, waarbij de aandacht was gericht op eventuele erosie van de gatvulling. Erosie kan optreden als gevolg van twee bezwijkmechanismen die elkaar ook kunnen versterken:

- 1^e Door de gaten uittredend water ten tijde van een maximaal teruggetrokken golf of spiegel daling, en
- 2^e over het talud stromend water tijdens golfoploop, golfneerloop en haalgolven.

Parameters die een rol spelen bij deze erosie zijn: hydraulische belasting, gatdimensies en karakteristieken van de gatvulling. Gegeven een hydraulische belasting op enige afstand van een oever of dijk zijn de volgende overdrachtsfuncties via een fundamentele aanpak bestudeerd (zie ook figuren 2 en 3):

- 1^e overdrachtsfunctie van hydraulische belasting op enige afstand naar snelheden juist boven de toplaag en verschildrukken over de toplaag,
- 2^e overdrachtsfunctie van deze snelheden en verschildrukken naar de snelheid in het gat,
- 3^e overdrachtsfunctie tussen snelheid in het gat en erosie van de gatvulling.

Vanwege het verschil in hydraulische belasting is er onderscheid gemaakt tussen oevers (scheepsgeïnduceerde belasting) en dijken (windgolven). Bij de eerste wordt uitsluitend gekeken naar constructies op zand of teelaarde, terwijl bij de laatste alleen constructies op een granulair filter zijn beschouwd. Bij oevers zijn alle genoemde overdrachtsfuncties bestudeerd. Bij dijken hoofdzakelijk de eerste overdrachtsfunctie, omdat de andere identiek

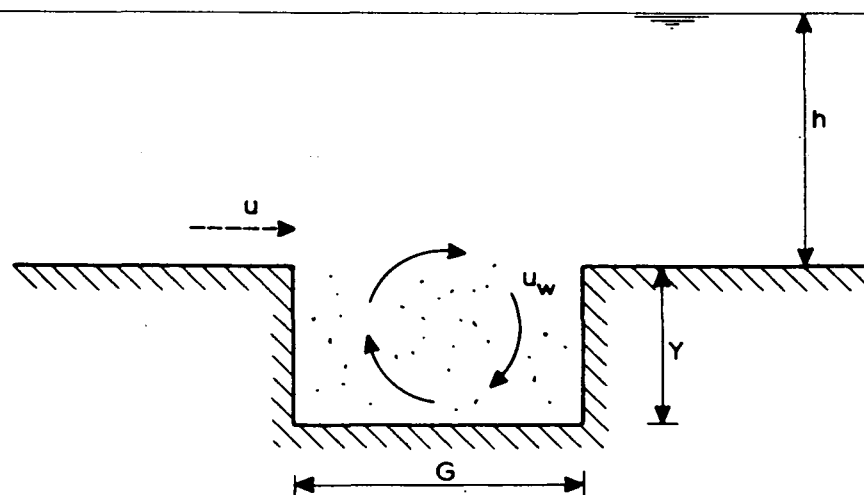
zijn aan die bij oevers. De literatuurstudie diende uit te monden in aanbevelingen voor verder onderzoek.

3.2. Open taludbekledingen op oevers

Het onderzoek heeft zich toegespitst op erosie van materiaal uit doorgroeiconstructies met relatief grote gaten ($0,2 < D/G < 1,0$, D = blokdikte (m), G = gatgrootte (m)). De in beschouwing genomen belastingen zijn die welke worden veroorzaakt door de retourstroom en de haalgolf, beide opgewekt door langsvarende schepen. In [2] zijn relaties gegeven om deze belastingen in een strook van circa 1 m breedte langs het talud te bepalen. Deze waterbeweging wordt als uitgangspunt genomen. Dicht bij de oeverbekleding (orde 0,10 m) is de invloed van de ruwheid van de bekleding van betekenis. Indien deze invloed op het snelheidsprofiel bekend is, kan een relatie worden gelegd tussen genoemde scheepsgeïnduceerde waterbeweging en de lokale stroming boven de toplaag. Voor details hierover wordt verwezen naar hoofdstuk 6.

De lokale stroming boven de toplaag bepaalt de waterbeweging in het gat en de eventueel daardoor optredende erosie van materiaal uit dat gat. Dit laatste zou nog beïnvloed kunnen worden door uittredend debiet, dat een gevolg is van de waterspiegeldaling. Onderzocht is in hoeverre in de literatuur relaties zijn gegeven tussen de snelheid boven de toplaag (u) en de snelheid in het gat (u_w). Hierbij spelen factoren als geometrie van de blokken en het aantal werfels in het gat een rol. Daarnaast heeft de erosie van de gatvulling de nodige aandacht gekregen (mate van erosie en toelaatbare erosie).

De volgende karakteristieke parameters zijn gehanteerd:



waarin:

- G = gatgrootte (m)
- Y = erosiediepte (m)
- h = waterdiepte (m)
- u = gemiddelde stroomsnelheid (m/s)
- u_w = snelheid in de neer (m/s)

Op basis van bedoeld literatuuronderzoek konden de volgende conclusies worden getrokken:

- Ten aanzien van de wervels en de daarmee samenhangende snelheden u_w in de wervel bleek, in geval van ongeveer gelijke gatgrootte en gatdiepte, dat de verhouding u_w/u (u is snelheid boven de gaten) ligt tussen 0,20 en 0,50 en onafhankelijk is van de parameter Y/G in het gebied $0,25 < Y/G < 2,0$. Deze waarden stemmen goed overeen met theoretische bepaalde waarden ($u_w/u = 0,3 \text{ à } 0,4$).
- Voor wat betreft de erosie kon geen eenduidig antwoord worden verkregen. In de literatuur [1] [3] [8] wordt melding gemaakt van erosiediepten variërend van (0,8 à 1,0).G tot waarden groter dan G. De invloed van u en van de verhouding Y/G is evident, terwijl ook het optredend verhang van belang is.

Met een eenvoudig rekenmodel zijn enkele meetresultaten uit de literatuur vervolgens doorgerekend. Hierbij is getracht de erosie van gatmateriaal te voorspellen met het erosie criterium volgens Shields. Daartoe is verondersteld dat in het gat aanwezig was ofwel een logaritmisch snelheidsprofiel ofwel een niet ontwikkeld snelheidsprofiel. Beide benaderingen bleken te resulteren in antwoorden overeenkomstig de meetresultaten, maar harde conclusies kunnen er niet op worden gebaseerd.

3.3 Open taludbekledingen op dijken

De belasting op dijken is doorgaans aanzienlijk zwaarder dan op oevers, zodat uitsluitend erosie van filtermateriaal (grind) in de gaten en onder de bekleding is beschouwd in plaats van zand of teelaarde. Deze erosie kan optreden mits de gatgrootte groter is dan de filterkorrels. In paragraaf 3.1 zijn de twee mogelijke bezwijkmechanismen genoemd. Bij een toplaag met relatief kleine gaten ten opzichte van de toplaagdikte ($D/G > 3$) ontstaat erosie door uittredend water door de toplaag. De verschilddruk over de toplaag veroorzaakt dit uittredende debiet (bezwijkmechanisme 1). Bij relatief grote gaten ($D/G < 1$) is maatgevend het over het talud stromende water tijdens golfoploop of -neerloop en de golfklap (bezwijkmechanisme 2).

Ten aanzien van kleine gaten is een afschatting gemaakt van het optredende verhang onderin een gat, waaruit bleek dat er sprake is van lokale fluidisatie. Daardoor lijkt het niet aannemelijk, dat een golfklap bijdraagt aan de uitspoeling. Uitspoeling dreigt slechts ten tijde van golfterugloop als het uittredende debiet korrels kan meevoeren door het gat.

Op basis van een empirische formule voor de kracht op een bol in een buis met cirkelvormige doorsnede is een formule afgeleid waarmee de kritieke snelheid in het gat berekend kan worden. Getracht is deze formule te toetsen met het onderzoek dat in de literatuur is te vinden. Helaas was hiervoor te weinig geschikt materiaal aanwezig. Uit de literatuur is echter wel gebleken, dat bij een gat, dat orde twee maal dieper is dan breed, niet uitsluitend het uittredende debiet van belang is, maar ook de waterbeweging als gevolg van het over het talud stromende water. Blijkbaar is de overgang van smalle diepe gaten naar brede ondiepe gaten geleidelijk.

Bij relatief grote gaten is de stroming over het talud van belang. Uit literatuuronderzoek bleek, dat bij een verhouding gatbreedte/gatdiepte in de orde van 2 à 3 dit bezwijkmechanisme gaat optreden. Er is dan sprake van één of meer neeren in het gat, die samen met het uit het talud stromende water erosie kunnen veroorzaken. Bij zeer grote gaten (G/D orde 1) zal het uitstromende water zelfs verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de invloed van de neer in het gat.

Aan de hand van beschikbare meetresultaten van Battjes en Roos [7] bleek het mogelijk een goede benadering van de optredende snelheid op het talud tijdens golfoploop en neerloop te geven. De snelheid in een neer in een gat zonder uittredend debiet bedraagt circa 25% hiervan. Verwacht mag echter worden, dat bij dijken ook de invloed van het uittredend debiet (bezwijkmechanisme 1) groot is. Over deze invloed is echter geen literatuur beschikbaar. Op grond van alleen het over het talud stromend water bleek geen betrouwbare voorspelling van de erosie-diepte te kunnen worden gegeven. De conclusie is dan ook, dat de kennis ten aanzien van de stroming in het gat als functie van een debiet door en over het gat, onvoldoende is.

Een directe relatie tussen snelheid op het talud en erosiediepte bij een gatvulling met zand is gegeven door Brown [3]. De betrouwbaarheid van zijn formule moet echter nog geverifieerd worden voor filtermateriaal met $D_f > 2\text{mm}$. Relevant bleek vooral het werk van Markle [4]. Hij heeft onderzoek gedaan naar erosie in cellen en konkludeert dat de bodem van een cel onder invloed van golfaanval maar weinig erodeert; deze zal slechts horizontaal worden. Op basis daarvan beveelt hij het volgende aan:

Celdiepte -gatgrootte verhouding: $D/G > 1,33 \tan(\alpha)$

Minimum celdiepte: $D > 25 \text{ à } 30 \text{ mm}$

Daarentegen kan op basis van ander onderzoek geconcludeerd worden, dat de relatieve erosie-diepte $Y/G = 1,5$ kan worden.

Al met al moet ook ten aanzien van een black-box benadering voor de erosie uit grote gaten worden geconcludeerd, dat er onvoldoende meetgegevens zijn om een bruikbaar model op te zetten.

3.4 Conclusies en aanbevelingen

In de literatuurstudie is het mogelijk gebleken voor open taludbekledingen op oevers een black-box model op te zetten voor de erosie van gatvullingen. Daartoe is uitgegaan van een bekende stroomsnelheid over de blokken, waarna vervolgens via de stroomsnelheid in het gat de critieke schuifspanning kan worden bepaald. De ontbrekende schakel is het snelheidsprofiel boven de blokken met gaten, dat wil zeggen de invloed van de taludruwheid.

Voor dijken bleek het in het geheel niet mogelijk om op basis van literatuurgegevens een black-box model op te zetten.

Wat betreft erosiediepten zijn tijdens het onderzoek resultaten gevonden die onderling moeilijk te vergelijken zijn en daardoor vragen oproepen die in een vervolgonderzoek opgehelderd zouden moeten worden. Bij het bestuderen van erosie uit gaten in een vlakke bodem blijkt dat er betrekkelijk weinig uitspoeling optreedt, namelijk tot maximaal een diepte gelijk aan de gatbreedte (Parsons and Apmann [1]). Iets dergelijks wordt ook door Markle [4] op een door golven belast talud gevonden. Zijn talud was verdedigd door cellen die met stortsteen waren gevuld. Brown beschrijft daarentegen in [3] proeven met een stationaire stroming over een talud, waarbij uitspoeling optreedt, ook al is de gatdiepte veel groter dan de gatbreedte.

Met betrekking tot de volgende onderwerpen is geen informatie in de literatuur gevonden:

- Ruwheid van een talud met gaten (met uitzondering van Armorflex-blokken).
- Resultaten van modelonderzoek over erosie als gevolg van uitstromend water door een toplaag met zeer kleine gaten.
- Stroomsnelheid in een gat als gevolg van een uitstroming door het gat en stroming over de toplaag.
- Erosie bij een combinatie van uitstromend water en een stroming over het talud.

Uit de buro-studie komt naar voren dat de volgende zaken van belang zijn voor de evenwichtsdiepte:

- geometrie: gatafmetingen en taludhelling
- korrelgrootte van gatvulling
- snelheid op het talud (en snelheidsprofiel)
- snelheid uit de filterlaag door de gaten
- verhang langs het talud

Op basis van het bovenstaande is aanbevolen onderzoek uit te voeren enerzijds met een zeer praktijkgericht karakter en anderzijds met een fundamenteel karakter. Het praktijkgerichte onderzoek beoogt te resulteren in direkt bruikbare ontwerpregels. Gedetailleerd is mogelijk onderzoek aangegeven naar zowel erosie van materiaal uit open bekledingen op oevers als op dijken. Bovendien is voorgesteld beschikbare meetresultaten in zake het snelheidsprofiel boven een blokkenmat verder uit te werken. Op basis hiervan kunnen black-box modellen worden opgezet aangevend de relatie tussen stroomsnelheid boven de blokken en mate van erosie.

De fundamentele lijn beoogt inzicht te geven in de tussengelegen schakel, te weten de snelheid in het gat. Met de resultaten van hiertoe uit te voeren mathematische berekeningen met het model ODYSSEE kunnen de black-box modellen een breder toepassingsgebied verkrijgen dan uitsluitend voor de constructies zoals die zijn onderzocht in het praktijkgerichte onderzoek.

4. Praktijkgericht onderzoek oevers

4.1 Probleembeschrijving en doelstelling

De scheepsgeïnduceerde waterbeweging kan op oevers resulteren in belastingen die deze oever doen eroderen. Deze erosie kan onder andere worden tegengegaan door een open taludbekleding toe te passen, waarbij zich in de gaten een vegetatie heeft ontwikkeld. Vanaf de aanleg van de constructie tot enige tijd daarna is de vegetatie echter niet volgroeid en bijgevolg niet in staat voldoende bij te dragen aan de weerstand van de gatvulling tegen belastingen. In die eerste fase kan dus de gatvulling uitspoelen. Voorwaarde voor het zich vestigen van een vegetatie is echter, dat de gatvulling niet volledig uitspoelt.

Het literatuuronderzoek (bijlage A) heeft onder andere geresulteerd in de conclusie, dat de beschikbare literatuur onvoldoende mogelijkheden biedt om de erosie van een gatvulling te voorspellen. Fysisch modelonderzoek moet nu leiden tot ontwerpcriteria ten aanzien van de uitspoeling van een gatvulling. De hoofddoelstelling daarbij is:

- bepalen van de evenwichtsdiepte van de ontgroning in de gaten voor reële scheepsgeïnduceerde belastingen.

Nevendoelstellingen zijn:

- bepalen van het verband tussen enerzijds de stroomsnelheid vlak boven het talud als resultaat van de scheepsgeïnduceerde waterbeweging en anderzijds de mate van erosie voor verschillende verhoudingen tussen gatgrootte en gatdiepte,
- bepalen van het verband tussen het aantal scheepspassages en het erosieproces,
- vaststellen van het verschil in erosiebestendigheid tussen zand en teelaarde of grond als gatvulling.

Het onderzoek heeft zich beperkt tot de scheepsgeïnduceerde waterbewegingscomponenten retourstroom en haalgolf. De belasting door de component secundaire scheepsgolven is impliciet meegenomen in het fysisch modelonderzoek naar de erosie door open taludbekledingen op dijken (bijlage C)

4.2 Uitgevoerd modelonderzoek

Het fysisch onderzoek is uitgevoerd in de Pentagoot van WL in De Voorst op een lengteschaal $n_1=1$. In de goot is daartoe in lengterichting een talud ingebouwd met een helling 1:3 (figuur 4), veronderstellend dat de opgewekte golven een gelijke eroderende werking hebben als retourstroom en haalgolf van langsvarende schepen.

In het talud zijn twee rijen open bekledingsblokken aangebracht (figuur 5) met blokafmetingen van $0,30 \times 0,30 \times 0,15 \text{ m}^3$. De gaten in de blokken waren respectievelijk 0,08 m (7% open ruimte), 0,12 m (16%) en 0,15 m (25%), (zie figuur 6). Als gatvulling is onderzocht zand ($D_{50} = 0,165 \text{ mm}$) en sterk lemig, grind- en kleiarm, matig fijn zand $D_{50} = 0,115 \text{ mm}$, zogenaamde teelaarde). Het laatst genoemde materiaal werd geschikt geacht voor de ontwikkeling van een vegetatie.

De proeven zijn uitgevoerd bij een waterdiepte van 1,0 m voor golfhoogten van 0,06 m, 0,13 m en 0,17 m. Deze golfhoogten komen overeen met stroomsnelheden in de haalgolf en haalgolfhoogten van respectievelijk 0,40 m/s, 0,90 m/s, 2,25 m/s en 0,25m, 0,35m en 1,0 m. Het aantal golven varieerde van 7 tot 1600, wat kan worden beschouwd als een maat voor het aantal scheepspassages. Onafhankelijke variabelen waren dus: gatgrootte, gatvulling, golfhoogte en aantal golven. Afhankelijke variabele was de erosie van de gatvulling.

De procedure tijdens het onderzoek was dat per serie proeven (bijvoorbeeld gaten van 0,15 m gevuld met zand en belast door een golfhoogte van 0,06 m) allereerst de gaten volledig werden gevuld en een nulpeiling werd uitgevoerd. Vervolgens werd stapsgewijs het aantal golven verhoogd, waarbij na elke stap de erosie van de gatvulling werd vastgesteld. Voor een andere gatvulling en/of een andere gatgrootte of een andere golfhoogte werd deze procedure herhaald, maar niet nadat vooraf de gaten opnieuw waren gevuld.

Tijdens de proeven werden golfhoogte en stroomsnelheden geregistreerd. Aanvullend zijn de golfoploop en enkele snelheidsprofielen gemeten. De erosie in de gaten in de blokken is vastgesteld met behulp van een peilnaald door registratie van de bodemligging ten opzichte van een nulpeiling. De nauwkeurigheid bedraagt circa 5 mm.

Op basis van uitsluitend de meetresultaten kan worden geconcludeerd, dat ten eerste uit een vergelijking van gemeten stroomsnelheden en berekende stroomsnelheden in de haalgolf blijkt, dat meetopstelling en proevenprogramma repre-

sentatief zijn voor in werkelijkheid optredende scheepsgeïnduceerde haalgolfbelastingen, en dat ten tweede een analoge vergelijking met betrekking tot de retourstroom niet heeft geresulteerd in een juiste simulatie. De stroomsnelheden in het model waren te laag.

Karakteristieke resultaten van de gemeten erosie zijn ter illustratie gepresenteerd in de figuren 7 en 8.

4.3 Conclusies en aanbevelingen

Het onderzoek heeft geresulteerd in de volgende conclusies:

- Modelopstelling en proevenprogramma maakten een juiste simulatie van de stroomsnelheden in de haalgolf mogelijk, maar niet van de snelheden in de retourstroom.
- De maximale erosie treedt op rond de ongestoorde waterspiegel, terwijl nauwelijks erosie optreedt in de dieper gelegen regionen.
- De erosie neemt toe naarmate de waterbeweging heviger wordt of de gatgrootte toeneemt. In veel gevallen is de uiteindelijke erosiediepte groter dan de gatgrootte. De erosiesnelheid neemt af bij een toenemend aantal golven.
- Grond blijkt voor alle gatgroottes onder alle belastingcondities erosiebestendiger zand.
- Een gatgrootte van 150 mm of een grote haalgolfbelasting ($Z_{\max} = 1,0$ m of $u_{\max} = 2,25$ m/s) resulteren voor zowel zand als grond vrijwel altijd in een kritische erosiediepte gelijk aan de blokdikte.
- Voor zand wordt deze kritische erosiediepte eveneens bereikt bij een gatgrootte van 120 mm. In het geval grond als gatvulling wordt toegepast en de maximale belasting als matig ($u_{\max} = 0,90$ m/s) kan worden gekarakteriseerd, dan blijft de erosie geringer dan de blokdikte.
- Gatgroottes van 80 mm onder matige belastingcondities (u_{\max} kleiner of gelijk aan 0,90 m/s) kunnen met zowel zand als grond als gatvulling veilig worden toegepast. De maximale erosiediepte blijft kleiner dan de blokdikte.
- De meetresultaten stemmen niet overeen met in de literatuur vermelde voorspellingsformules voor de erosie.
- De invloed van een open taludbekleding op de stroomsnelheden in de verticaal kon niet worden getoetst.

Samenvattend: toepassing van open taludbekedingen op oevers met in de open gaten zand of teelaarde lijkt mogelijk, mits geen extreme belastingen ($u_{\max} < 0,9$ m/s of $Z_{\max} < 0,35$ m) optreden en de gatgroottes beperkt blijven tot 80 mm (of ongeveer de halve blokdikte).

Voor ontwerpdoeleinden konden de volgende empirische relaties worden afgeleid:

$$\frac{Y}{G} = 0,7 (z_{\max})^{0,5} \log (N+1) \text{ voor zand}$$

$$\frac{Y}{G} = 0,5 (z_{\max})^{0,5} \log (N+1) \text{ voor grond}$$

waarin:

Y = erosiediepte (m)

G = gatgrootte (m)

z_{\max} = haalgolfhoogte (m)

N = aantal golven of langsvarende schepen (-)

Als ontwerpcriterium dient, teneinde te voorkomen dat de gatvulling volledig uitspoelt, te worden aangehouden:

$$Y_e/D < 1$$

waarin:

Y_e = evenwichtserosiediepte (m)

D = blokdikte (m)

In het algemeen zal aan het ontwerpcriterium voldaan worden, als:

1e De gatgrootte G maximaal 0,5 D is,

2e De belasting op de oever matig is, dat wil zeggen:

$$z_{\max} \leq 0,35 \text{ m of } u_{\max} \leq 0,9 \text{ m/s en}$$

(z_{\max} = haalgolfhoogte (m), u_{\max} = stroomsnelheid in de haalgolf (m/s)).

3e De gatvulling bestaat uit grond met cohesieve eigenschappen, en geschikt is voor vegetatie.

Wordt overwogen een gatgrootte-blokdikte verhouding toe te passen van $G/D=0,75$ met een gatvulling van grond of een constructie waarvoor geldt $G/D = 0,5$ met een gatvulling van zand, dan is dit mogelijk mits de belastingen wederom matig zijn en de verkeersintensiteit gering is (minder dan 5000 schepen per jaar). Verhoudingen groter dan 0,75 in geval van grond en 0,5 in geval van zand worden niet aanbevolen.

Voor extreme belastingcondities zoals die optreden in duwvaartkanalen ($z_{\max} \approx 1,0$ m of $u_{\max} \approx 2,25$ m/s), worden open taludbekledingen niet aanbevolen.

Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat de haalgolfhoogte z_{\max} of de stroomsnelheid u_{\max} kunnen worden bepaald met behulp van [2] of de figuren 9 en 10 (vaarsnelheid schepen varieert van 2,5 m/s voor klasse-II schepen tot 3,0 m/s voor klasse-VI schepen in "normale" vaarwegen).

Bovenstaande ontwerpformules zijn gebaseerd op het uitgevoerde onderzoek en gelden dan ook alleen voor die omstandigheden. Bij afwijkende situaties dienen zij met voorzichtigheid te worden toegepast.

Het onderzoek is aanleiding om aan te bevelen aanvullende proeven uit te voeren, enerzijds met betrekking tot de haalgolf en anderzijds met betrekking tot de retourstroom. Aanvullende haalgolfproeven zouden resulteren in meer gegevens waardoor een betere erosievoorspellingsformule kan worden verkregen. Het is daarbij gewenst om gatgrootte en blokdikte uitgebreider te variëren. Daarnaast zou door variatie in gatvulling, wat betreft cohesie eigenschappen en korreldiameter, de coëfficiënt in de erosievoorspellingsformule kunnen worden bepaald. Bij de proefopzet zal bovendien gestreefd moeten worden naar een uitgestrekter taludgedeelte met open taludbekledingsblokken om een betere aanpassing van de snelheidsverticaal te bewerkstelligen. Ten aanzien van de erosie door retourstroom worden proeven aanbevolen in een stroomgoot.

Onderzoek in bovenstaande zin is inmiddels gestart. De resultaten zullen worden gerapporteerd in het verslag "Praktijkgericht onderzoek milieuvriendelijke oevers (Q913)" [5].

5. Praktijkgericht onderzoek dijken

5.1 Probleembeschrijving en doelstelling

De stabiliteit van een gezette steen constructie onder golfbelastingen is groter als de overdruk onder de zetting gering blijft. Deze overdruk ontstaat doordat bij een zich terugtrekkende golf (vlak voor de golfklap) de druk op het talud snel afneemt, maar onder de zetting niet. Een methode om de overdruk klein te houden is het toepassen van een zeer doorlatende toplaag. Hierdoor wordt echter het probleem geïntroduceerd, dat de gatvulling en/of het onderliggende filtermateriaal dreigt uit te spoelen.

In de literatuurstudie (bijlage A) zijn formules afgeleid of geïnventariseerd voor het berekenen van de stabiliteit van een korrel in een gat. Op basis daarvan bleken de onzekerheden te groot voor het opstellen van ontwerprichtlijnen voor taludbekledingen met gaten op dijken.

Fysisch onderzoek heeft daarom ten doel:

- Bepalen van een empirische relatie tussen de erosiediepte enerzijds en de golfrandvoorwaarden, de geometrie van de dijkbekleding en de gatvulling anderzijds.

Als nevendoelestellingen zijn gehanteerd:

- Toetsen van stabiliteitsformules voor kleine en grote gaten, zoals geïnventariseerd in de literatuurstudie.
- Verkrijgen van een beter begrip in de fysische processen door het meten van de watersnelheid op het talud en de verschildruk over de toplaag.

Bij het onderzoek is onderscheid gemaakt in relatief kleine, diepe gaten en grote, minder diepe gaten, vanwege het verschil in bezwijkmechanisme. In paragraaf 3.3 is een en ander behandeld.

5.2 Uitgevoerd modelonderzoek

Het modelonderzoek is uitgevoerd op prototype schaal in de Deltagoot van WL in De Voorst en was geïntegreerd in het onderzoek "Taludbekledingen van gezette steen; eindverificatie-onderzoek Deltagoot" [6]. De ingebouwde dijksectie (taludhelling 1:3) is gesplitst in twee delen elk 2,5 m breed. In totaal zijn 6 taludhelften onderzocht (figuur 11).

Elke proef is uitgevoerd met een zetting die aan oost-en westzijde een gelijk open oppervlak had. Aan de oostzijde is dit steeds gerealiseerd met één gat per blok en aan de westzijde met 6 gaten per blok. De blokafmetingen in de meetsectie waren $0,50 \times 0,50 \times 0,15 \text{ m}^3$. De gatdiameter is gevarieerd van 51 mm

tot 225 mm, wat overeenkomt met een relatief open oppervlak van 4,9 % tot 15,9 %.

Onder de blokken was filtermateriaal aangebracht met een karakteristieke diameter van $D_{50f} = 8,5$ mm. De gaten in de blokken waren gevuld met grind met diameters variërend van 5 tot 23,5 mm. Indicatief is ook een proef uitgevoerd met een gatvulling van 0,22 mm.

Bij elke opstelling is een reeks proeven uitgevoerd met diverse combinaties van golfhoogte en golfperiode (regelmatige golven). De golfhoogte variërende van 0,2 m tot 1,1 m en de golfperiode van 2,25 s tot 5 s. De duur van elke proef bedroeg ongeveer 100 golven. De waterdiepte was 5 m.

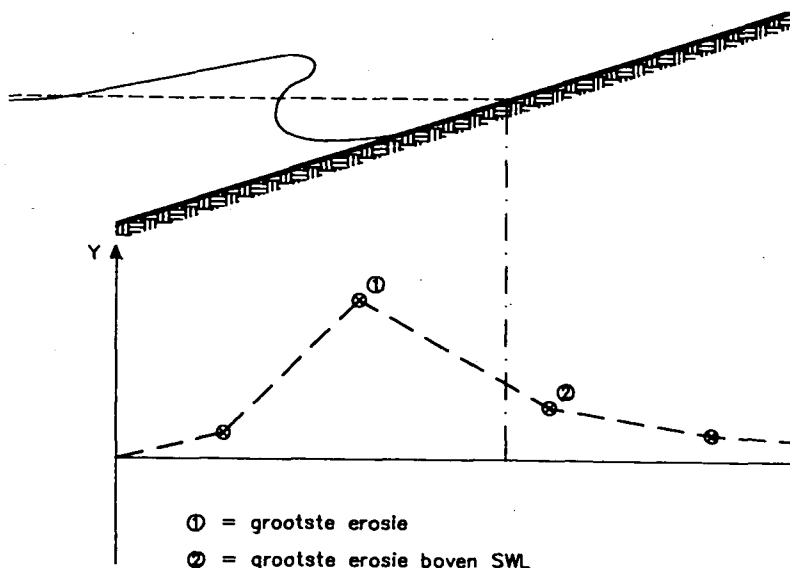
Bij de aanvraag van een proevenserie waren de gaten geheel gevuld. Voor opklimmende golfhoogten werden vervolgens de proeven uitgevoerd zonder tussentijds de gaten bij te vullen. Per toestand werd de erosie in de gaten opgemeten. De maximale erosiediepte is bij de analyse gebruikt.

Tijdens de metingen zijn de stroomsnelheden op het talud en de verschildrukken over enkele blokken geregistreerd. Uitwerking van deze gegevens heeft plaats gevonden in bijlage F (zie hoofdstuk 8).

5.3 Conclusies en aanbevelingen

De analyse van de gemeten erosie Y is beperkt tot de volgende twee gemeten waarden (per gatdiameter, vulmateriaal en golfrandvoorwaarde combinatie):

- de grootste erosie, onafhankelijk van de plaats waar die is gemeten .
- de grootste erosie die is gemeten boven SWL +0.2m.



In de figuren 12 en 13 zijn enkele karakteristieke resultaten gepresenteerd.

Op basis van het onderzoek zijn de volgende conclusies te trekken (zie figuren 14 t/m 16):

- De golfperiode heeft een verwaarloosbare invloed op de erosiediepte.
- Een toename van de golfhoogte en een afname van de diameter van het vulmateriaal leidt tot een toename van de erosiediepte.
- Een toename van de gatdiameter resulteert voor de gaten boven SWL + 0,2 m in een toename van de erosiediepte. Voor het gehele talud geldt dat bij een toename van de gatdiameter de erosiediepte toeneemt als de diameter groter is dan 100 mm en afneemt voor een gatdiameter kleiner dan 100 mm.

De laatste conclusie duidt op de mogelijkheid dat er een gatdiepte/gatbreedte verhouding bestaat, die een maximale stabiliteit van de gatvulling garandeert. Een verklaring kan zijn dat voor kleine gaten de stroomsnelheid over het talud de gaten niet kan leegspoelen, en dat het uittredend water verantwoordelijk is voor de erosie (relatief grote verschildrukken). Bij het groter worden van het gat krijgt echter blijkbaar de stroomsnelheid over het talud nog nauwelijks kans om korrels mee te voeren, terwijl het uittredend debiet al sterk afneemt. Kennelijk bestaat er een optimale gatdiameter van circa 100 mm, waarbij beide bezijkmechanismen moeite hebben om de gatvulling te eroderen.

Op basis van de meetresultaten zijn de volgende empirische formules opgesteld:

- Maximale erosiediepte Y voor gehele talud (boven of onder SWL):

$$G > 0,1 \text{ m:} \quad Y/G = 0,23 (H/D_{50})^{0,33}$$

$$G < 0,1 \text{ m:} \quad Y/G = 0,04 (H/D_{50})^{0,50} n_o^{-0,75}$$

- Grootste erosiediepte die is gemeten boven SWL + 0,2m:

$$Y/G = 0,18 (H/D_{50})^{0,33}$$

waarin:

Y = erosiediepte (m)

G = gatgrootte (m)

H = golfhoogte (m)

D_{50} = karakteristieke korreldiameter onderschreden door 50% (m)

n_o = verhouding gatoppervlak - oppervlak steenzetting (-)

n_o = $A_g/B'L'$

A_g = gatoppervlak (m²)

B' = hart-op-hart afstand tussen de gaten (loodrecht op dijkas) (m)

L' = hart-op-hart afstand tussen de gaten (evenwijdig aan de dijkas) (m)

Opgemerkt wordt, dat n_0 gelijk is aan het relatieve open oppervlak van een steenzetting, daarbij veronderstellend dat de invloed van de spleten tussen de blokken is te verwaarlozen.

In de figuren 17 en 18 zijn de eerste twee formules tezamen met de meetpunten weergegeven.

Als met bovenstaande formules een erosiediepte wordt berekend die groter is dan de blokdikte D , dan is een ondermijning van de blokken zeer waarschijnlijk. De mate van ondermijning is hiermee echter niet te voorspellen.

De metingen zijn vergeleken met een stabiliteitsformule voor kleine gaten die in de bureaustudie (bijlage A) is afgeleid en voor grote gaten met een semi-empirische relatie van Brown [3] in combinatie met de gemeten snelheden op het talud volgens de huidige metingen en die van Battjes en Roos [7]. Wat betreft de kleine gaten moet worden geconcludeerd dat de voorspellingsmethode onveilige resultaten geeft. Voor de grote gaten daarentegen laten de op basis van de modelproeven afgeleide formules een veel kleinere invloed van H/D_{50} zien dan de formule van Brown. Het verschil is mogelijk een gevolg van het feit, dat Brown zijn formule heeft gebaseerd op metingen met zand, terwijl bovenstaande formules zijn opgesteld voor grind.

De verkregen formules hebben een black-box karakter. Een nadere analyse van de relatie tussen stroomsnelheid op het talud en erosiediepte maakt het mogelijk enerzijds een betere vergelijking te maken met de relatie van Brown en anderzijds de invloed van de korreldiameter van het vulmateriaal te bepalen. Daarnaast kan voortzetting van het onderzoek in de fundamentele lijn (bijlage E) inzicht geven in de fysische processen die een rol spelen.

6. Hydraulische ruwheid van een Armorflex-blokkenmat

6.1 Probleembeschrijving en doelstelling

De aanwezigheid van een oever- of dijkbekleding bestaande uit blokken met gaten heeft invloed op het locale snelheidsprofiel bij de bekleding. In vergelijking tot een gesloten constructie (blokken zonder gaten) is de karakteristieke hydraulische ruwheid van blokken met gaten groter. De gaten namelijk veroorzaken bij turbulente stroming extra energieverliezen. Afmetingen, vorm en patroon van de gaten bepalen deze verliezen (figuur 19). Een gebruikelijke maat voor de hydraulische ruwheid is de equivalente ruwheid volgens Nikuradse, hoewel ook andere parameters hiervoor in gebruik zijn (bijvoorbeeld C-waarde van Chézy).

In het kader van WL-speurwerk is de hydraulische ruwheid van Armorflex-blokkenmatten bepaald (figuur 20). Deze zijn te beschouwen als een dicht patroon van kunstmatige ruwheidselementen. In de literatuur worden hiervoor relaties gegeven tussen equivalente ruwheid k_s volgens Nikuradse en karakteristieke geometrische parameters. Doelstelling van het onderzoek met Armorflex-blokkenmatten was danook:

- Bepalen van de equivalente ruwheid volgens Nikuradse (of een daarmee vergelijkbare grootte) voor Armorflex-blokkenmatten onder prototype omstandigheden.

De resultaten van het onderzoek zijn gebruikt bij het bepalen van de mogelijkheden voor het uitvoeren van onderzoek naar de stabiliteit van Armorflex-blokken op schaal of met gereduceerde blokdikte onder stroomaanval. In dit kader zal op dit aspect niet nader worden ingegaan.

6.2 Uitgevoerd onderzoek

In de grote stroomgoot van WL in De Voorst zijn diverse type Armorflex-blokkenmatten als bodemverdediging aangebracht (lengteschaal $n_1 = 1$). De blokkenmatten zijn aangelegd op een geotextiel, terwijl bovenstrooms een aanstroomsektie was aangebracht met een veronderstelde gelijke ruwheid, zodat het snelheidsprofiel in de verticaal zich kon aanpassen (figuur 21).

Proeven zijn uitgevoerd met de bloktypen 215 (gesloten, dikte 0,11 m), 220 (open, dikte 0,15 m), 180 (open, dikte 0,11 m) en 150 (open, dikte 0,085 m). De horizontale afmetingen van alle blokken was 0,30 x 0,34 m² (zie ook figuur 20). De gaten in geval van de open blokken waren niet gevuld.

De waterdiepte bij de proeven varieerde van 0,50 m tot 1,0 m en de stroomsnelheid van 0,50 m/s tot 1,50 m/s. Tijdens de proeven zijn de stroomsnelheden geregistreerd op een aantal hoogten in verschillende verticalen in een dwarsdoorsnede (zie de figuren 22 en 23). Voorts is het verhang bepaald.

De analyse ter bepaling van de ruwheidsparameter k_s was gebaseerd op zowel de gemeten snelheidsprofielen als het verhang. De snelheidsmetingen bleken zich daartoe minder te lenen door de te grote spreiding. Op basis van het verhang kon een equivalente ruwheid voor Armorflex-blokken worden bepaald.

6.3 Conclusies en aanbevelingen

Het fysisch onderzoek naar de hydraulische ruwheid van Armorflex-blokkenmatten heeft geleid tot de volgende conclusie:

- De hydraulische ruwheid k_s van open en gesloten blokken bedraagt gemiddeld 0,02 m, wat overeenkomt met 0,1 à 0,2 keer de blokdikte.
- De invloed van de blokdikte op de ruwheid kon niet worden vastgesteld.
- De snelheidsverdeling in de verticaal heeft een logaritmisch karakter.

Toepassing van bovenstaande resultaten dient zorgvuldig te geschieden. Uitgegaan is namelijk van een vlak liggende blokkenmat. Is dit echter niet het geval, bijvoorbeeld tengevolge van een ongelijke ligging in hoogte van individuele blokken, dan kan lokaal de hydraulische ruwheid aanzienlijk toenemen.

Voorts heeft een literatuurstudie geresulteerd in de volgende set formules voor de voorspelling van de hydraulische ruwheid van een bodem voorzien van ruwheidselementen:

$$\text{a) } k_s/Y = 0,08 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{2,685} \quad \text{voor } \frac{W+G}{Y} < 5$$

$$\text{b) } k_s/Y = 400 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{-1,295} \quad \text{voor } \frac{W+G}{Y} > 15$$

c) overgangskromme volgens figuur 24 voor $5 < (W+G)/Y < 15$

waarin:

W = blokbreedte in stroomrichting (m)

G = gatgrootte (m)

Y = erosiediepte (m)

k_s = hydraulische ruwheid volgens Nikuradse (m)

Een beperkende voorwaarde is dat Y ongeveer gelijk moet zijn aan W.

Afwijkingen in de waarde van de resulterende equivalente ruwheid k_s zijn mogelijk tot ongeveer 25%. Dit is een gevolg van enerzijds de toegepaste procedures (onder andere het bepalen van gemiddelde waarden) en anderzijds de bepaling van de relaties tussen k_s en geometrieparameters uit grafieken.

De hydraulische ruwheid van Armorflex-blokkenmatten is eveneens bepaald met bovenstaande formules en vergeleken met de meetresultaten.

Geconcludeerd kon worden, dat:

- Berekende k_s -waarden en uit de meetresultaten bepaalde k_s -waarden overeenstemmen.

Met dit resultaat is het mogelijk de stroomsnelheid te voorspellen juist boven een bekleding met gaten.

7. Stroomsnelheidsberekeningen in een gat

7.1 Probleembeschrijving en doelstelling

Inzicht in de fysische processen die een rol spelen bij de erosie van materiaal uit de gaten van blokken, kan worden verkregen als de relatie bekend is tussen stroomsnelheden over het talud en de snelheid in het gat. Führböter [8] heeft ter zake proeven uitgevoerd, die in het kader van een meer fundamentele aanpak zijn nagerekend met het rekenpakket ODYSSEE.

Als doelstelling van de proeven was geformuleerd:

- Kunnen met het mathematische model ODYSSEE de stroomsnelheden in een gat en de resulterende schuifspanningen op de wanden voldoende betrouwbaar worden berekend?

7.2 Uitgevoerde berekeningen

ODYSSEE berekeningen zijn uitgevoerd voor twee verschillende stroomsnelheden, te weten $u = 1,85$ m/s (T_0) en $u = 4,17$ m/s (T_1). Dit betreffen twee karakteristieke gemiddelde stroomsnelheden juist boven een gat, welke representatief worden geacht voor de door Führböter uitgevoerde proeven.

Deze zijn uitgevoerd in een cilindervormige buis (diameter 0,20 m) met een gat met de afmetingen $0,05 \times 0,30 \times 0,60$ m³. Benedenstrooms van het gat was een opzetje (0,05 m) aangebracht om stroomcontractie te simuleren. In figuur 25 zijn opzet en proefresultaten samengevat.

Met het programma pakket ODYSSEE zijn enkele berekeningen uitgevoerd. Dit programma lost de tweedimensionale Navier-Stokes vergelijkingen op voor de gemiddelde stroming. De turbulentie wordt daarbij beschreven met een tweedimensionaal model voor het transport van de turbulentie-energie en de mate van dissipatie daarvan (zogenaamd $k-\epsilon$ model).

Karakteristieke resultaten van de berekeningen staan weergegeven in de figuren 26 en 27. Een vergelijking tussen berekeningen en metingen is in figuur 28 gepresenteerd.

Ook is een vergelijking gemaakt met berekeningen vermeld in de literatuur. Een voorbeeld daarvan is gepresenteerd in figuur 29. Hoewel de afmetingen van het gat geheel anders zijn, is de overeenkomst tussen meting en berekening treffend.

7.3 Conclusies en aanbevelingen

De resultaten van de berekeningen hebben geleid tot de volgende conclusies:

- De overeenkomsten tussen berekeningsresultaten met ODYSSEE en meetresultaten van Führböter zijn slecht, in het bijzonder voor de hoge stroomsnelheid.
- Voor vrijwel identieke gevallen valt een vergelijking tussen resultaten van berekeningen met ODYSSEE en resultaten van berekeningen vermeld in de literatuur positief uit.

De slechte overeenkomsten tussen de uitkomsten van de ODYSSEE-berekeningen en de meetresultaten van Führböter kunnen deels worden verklaard uit het feit, dat ODYSSEE rekent met gemiddelde snelheden, terwijl Führböter maximale waarden van snelheden inclusief turbulentie heeft gebruikt (mondeling informatie verkregen van Führböter, zie ook bijlage A). Dit betekent dat de vergelijking tussen gemeten en berekende waarden beter is dan weergegeven in figuur 28.

Op grond hiervan wordt geconcludeerd dat de uitgevoerde berekeningen voldoende betrouwbaar zijn, en dat onduidelijkheden over opzet en uitvoering van de door Führböter uitgevoerde metingen de reden zijn voor de resterende afwijkingen tussen berekeningen en metingen.

In het geval fysisch vervolgonderzoek wordt uitgevoerd, wordt aanbevolen de stroomsnelheden in een gat te meten en een identieke geometrie met ODYSSEE door te rekenen. Verwacht wordt, dat de onvolkomenheden die aan de onderhavige toetsing kleefden, dan kunnen worden ondervangen.

Bedoelde aanvullende toetsing heeft inmiddels plaats gevonden. De resultaten zijn verwerkt in het verslag "Praktijkgericht onderzoek milieuvriendelijke oevers (Q913)" [5].

8. Snelheden op talud door brekende golven

8.1 Probleembeschrijving en doelstelling

Het praktijkgerichte deel van het onderzoek naar de erosie van gatvulling uit een bekleding van blokken met gaten op dijken heeft geresulteerd in een black-box formule. Vergroting van het inzicht wordt verkregen als de overdrachtsfunctie bekend is van hydraulische belasting op enige afstand naar snelheden juist boven de toplaag. Dit onderdeel van een meer fundamentele aanpak is van belang voor zowel loodrechte windgolfaanval op dijken als aanval door schuin invallende scheepsgolven (zie figuren 2 en 3).

Tijdens het praktijkgericht onderzoek dijken zijn daarom stroomsnelheden op het talud gemeten, waarbij de doelstelling van deze metingen was:

- Het vaststellen van de relatie tussen golfparameters en taludhelling enerzijds en stroomsnelheid op een glad talud anderzijds als gevolg van loodrecht invallende brekende golven, die geen overslag veroorzaken.

De analyse van de gemeten snelheden op het talud als gevolg van brekende golven heeft plaats gevonden in het kader van een afzonderlijke opdracht verstrekt door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat aan WL (brief d.d. 13 september 1988, kenmerk WB/BXT 883827).

De aandacht bij de analyse heeft zich daarbij toegespitst op het gebied rond de stilwaterlijn, omdat juist daar de grootste opwaartse en neerwaartse snelheden zijn te verwachten, welke voor de dimensionering van de blokken maatgevend zijn.

8.2 Uitgevoerd onderzoek

Het fysisch onderzoek heeft gelijktijdig plaats gevonden met de erosiemetingen in de Deltagoot van WL in De Voorst (zie paragraaf 5.2) en was geïntegreerd in het onderzoek "Taludbekledingen van gezette steen; eindverificatie-onderzoek Deltagoot" [6]. Een van de onderzochte meetopstellingen is gepresenteerd in figuur 11. De dijkbekleding bestond uit blokken met ronde gaten van diverse afmetingen en in het midden van de ingebouwde meetsectie uit enkele blokken zonder gaten. De stabiliteit van deze laatste blokken, waarboven de stroomsnelheden zijn gemeten, was gegarandeerd door op de blokken geschroefde stalen strips.

De stroomsnelheden zijn gemeten met tweedimensionale snelheidsmeters op enkele centimeters boven het talud. De snelheid op het talud is daarbij gekarakterise-

seerd door de maximale langs het talud omhoog gerichte en de maximale langs het talud omlaag gerichte snelheid. De maximale omhoog gerichte snelheid (tijdens golfoploop) is aangeduid met "opwaartse snelheid" (v_{op}) en de maximale omlaag gerichte snelheid (tijdens golfneerloop) met "neerwaartse snelheid" (v_{neer}). Beide zijn altijd positief en evenwijdig aan het talud gericht.

De proeven zijn uitgevoerd bij een waterdiepte van 5,0 m, een taludhelling 1:3 en regelmatige golven met golfperiodes van 2,25 s, 3s, 4s en 5s. Bij elke periode zijn drie proeven met verschillende golfhoogten uitgevoerd. De golfhoogten zijn zo gekozen dat de golfsteilheid varieerde van 2,5% tot 5%. Bij de proeven met een periode van 5 s bedroeg de golfsteilheid ongeveer 0,8% tot 1,8% omdat deze serie proeven specifiek gericht was op relatief lange golven.

Een voorbeeld van de geregistreerde stroomsnelheden samen met de registratie van één der drukopnemers is gepresenteerd in figuur 30.

8.3 Conclusies en aanbevelingen

De meetresultaten zijn geanalyseerd tegen de achtergrond van theoretisch afgeleide formules voor een bovengrens van de neerwaartse en opwaartse snelheid. Uitgangspunt voor de bovengrens van de neerwaartse snelheid is een wrijvingsloze val van een waterdeeltje vanaf het golfoplooppniveau. Voor de opwaartse snelheid is uitgegaan van de voortplantingssnelheid van de golven. Deze theoretische beschouwingen deden vermoeden dat er overgangen in tendenzen te verwachten waren bij:

- golfneerlooppunt,
- overgang "plunging/collapsing" golven ($\xi_0 \approx 2,5$ à $3,0$)
- overgang diep/ondiep water ($h/L_0 \approx 0,15$)

waarin:

- ξ_0 = brekerparameter (-), $\xi_0 = \tan \alpha \cdot (H/L_0)^{-0,15}$
- H = golfhoogte (m)
- L_0 = golflengte op diep water (m)
- α = taludhelling ($^\circ$)
- h = waterdiepte (m)

De analyse van de meetresultaten heeft deze vermoedens bevestigd. Voor zowel de opwaartse als de neerwaartse snelheid kon mede op basis van [7] een set empirische formules worden afgeleid (bijlage F).

Voor ontwerpdoeleinden zal doorgaans de grootste snelheid het meest relevant zijn. Uit de meetresultaten blijkt dit meestal de neerwaartse snelheid iets boven het golfneerlooppunt te zijn. Voor het bepalen van de grootste snelheid v_{\max} kan gebruik worden gemaakt van de in de tabel vermelde relaties voor $v_{\max}/(gH)^{0,5}$ (zie ook figuren 31 en 32):

	$H/L_0 \geq 0,028$	$H/L_0 < 0,028$	
		$\xi_0 < 2,5$	$\xi_0 \geq 2,5$
$h/L_0 > 0,15$	neerwaarts: $2(\xi_0 \cdot \tan \alpha)^{0,5}$	opwaarts: $0,8 \cdot \xi_0$	opwaarts: $0,8 \cdot \xi_0$
$h/L_0 \leq 0,15$	opwaarts: $4,8 \cdot \tan \alpha$	neerwaarts: $2(\xi_0 \cdot \tan \alpha)^{0,5}$	neerwaarts: $3,1 (\tan \alpha)^{0,5}$

Uit een vergelijking van de meetresultaten met een meetserie van onregelmatige golven (grastalud, helling 1:8), bleek dat de bovenstaande formules veel hogere waarden voor v_{op} en v_{neer} voorspellen dan in bedoeld onderzoek is gemeten. Mede hierdoor en vanwege de grote spreiding in de meetresultaten en het feit dat slechts één meetserie beschikbaar is, kunnen er nog geen harde conclusies worden getrokken ten aanzien van onregelmatige golven.

Het onderzoek heeft geresulteerd in kwalitatief en kwantitatief inzicht in de relatie tussen regelmatige golven en de maximale opwaartse en neerwaartse snelheid op het talud. Op grond van de resultaten wordt danook aanbevolen:

- Modelonderzoek uit te voeren met onregelmatige golven.
- Modelonderzoek uit te voeren met een stortsteen talud, teneinde de invloed van de ruwheid te onderzoeken.
- Meetresultaten van lange golven te vergelijken met resultaten van computerberekeningen.

LITERATUUR

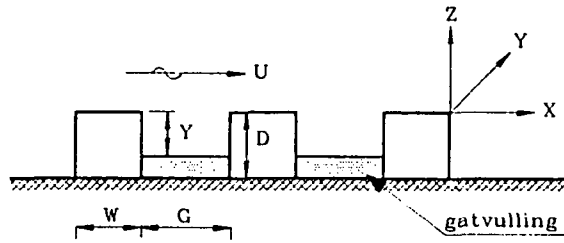
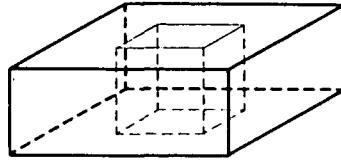
1. Parsons, D.A.; Apmann, R.P.,
Cellular concrete block revetment,
Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 91, WW2 May 1965
2. Waterloopkundig Laboratorium,
Aantasting dwarsprofielen in vaarwegen; Technische aanbevelingen voor
oeververdedigingen van losgestorte en gezette steen,
Waterloopkundig Laboratorium, verslag M1115 deel XIX, 1988.
3. Brown, C.T.,
Flexible revetments, theory and practice,
International Conference on Flexible armoured revetments incorporating
geotextiles, London 1984.
4. Markle, D.G.,
Wave stability study of riprap filled cells,
US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1983.
5. Waterloopkundig Laboratorium,
Praktijkgericht onderzoek milieuvriendelijke oevers,
WL, verslag modelonderzoek Q913, Delft, verschijnt in 1989.
6. Waterloopkundig Laboratorium,
Talubekledingen van gezette steen; meetverslag eindverificatie-onderzoek
Deltagoot (concept),
WL, verslag H195.25, Delft, 1988.
7. Battjes, J.A., Roos, A.,
Characteristics of flow in run-up of periodic waves,
Delft University of Technology, Communications on Hydraulics
report 75-3, Delft, 1975.
8. Führböter, A., Macke, E.,
Modellversuche für die Sohlsicherung des Eider-Sperrwerkes,
Leichtweiss Institut für Wasserbau der Technischen Universität,
Braunschweig, Bericht nr. 440, 1979.

LITERATUUR (vervolg)

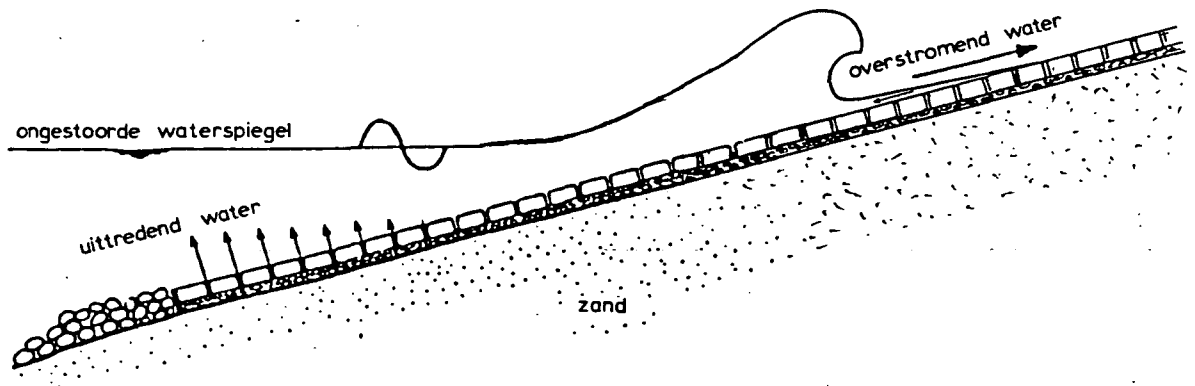
9. Knight, D.W., MacDonald, J.A.,
Hydraulic Resistance of Artificial Strip Roughness,
Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 105, HY 6, June 1979.

10. Rodi, W.,
Turbulence models and their application in hydraulics,
I.A.H.R., June 1980.

OPEN BEKLEDINGSBLOK



FAALMECHANISMEN

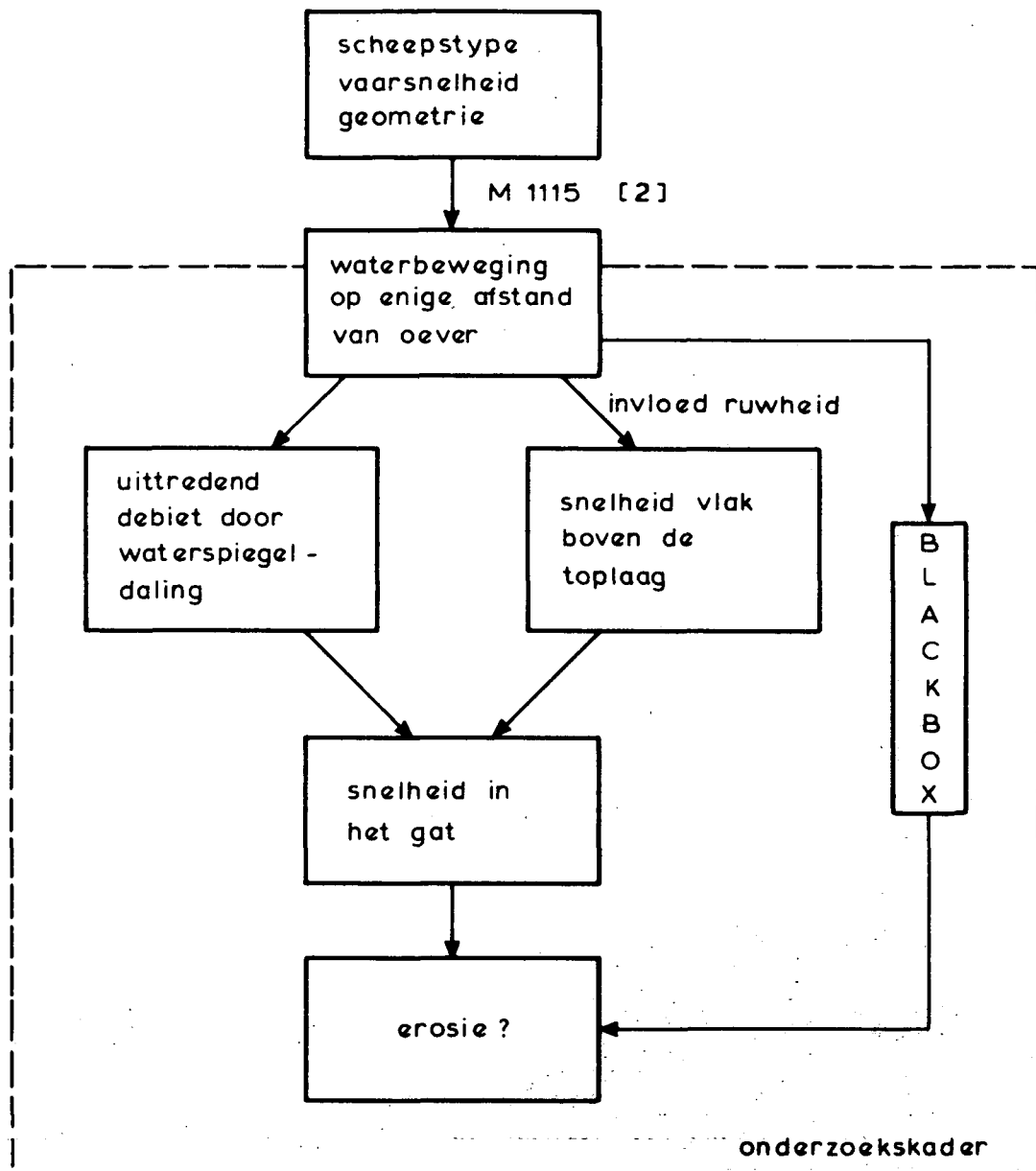


OPEN BEKLEDINGSBLOK EN FAALMECHANISMEN

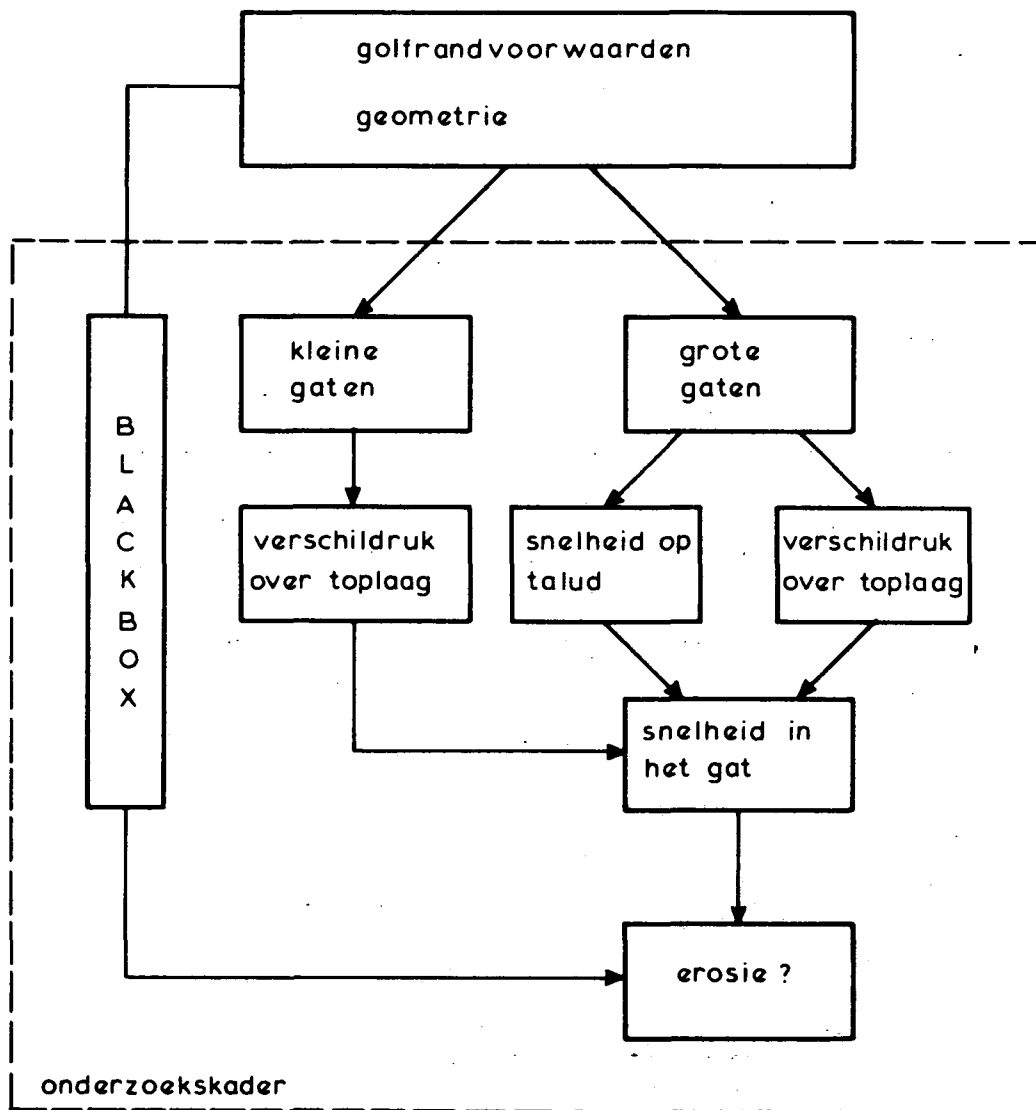
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 1



SCHEMATISCH OVERZICHT VAN HET ONDERZOEK
MET BETREKKING TOT OEVERS

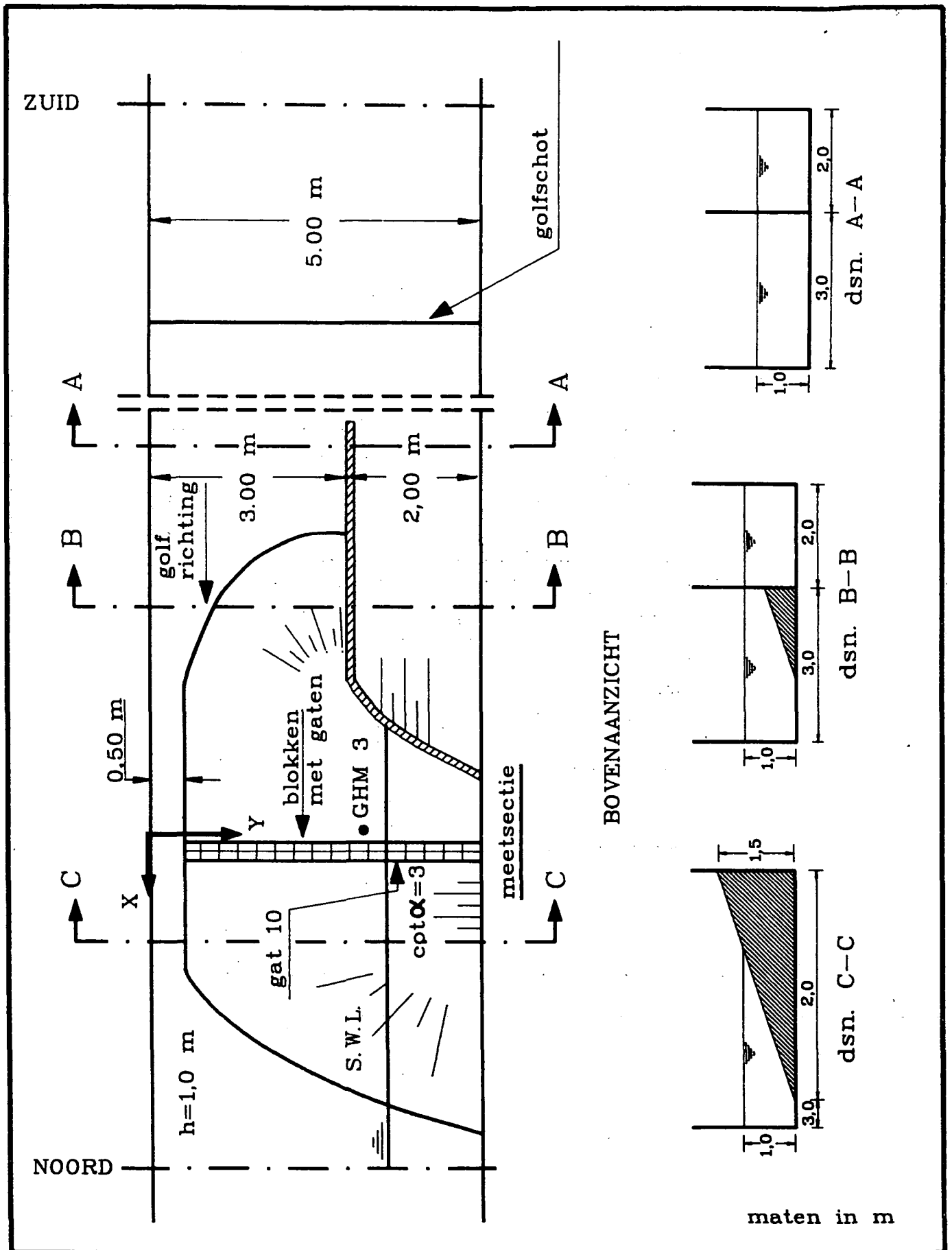


ONDERZOEKSKADER MET BETREKKING
TOT DIJKEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 3

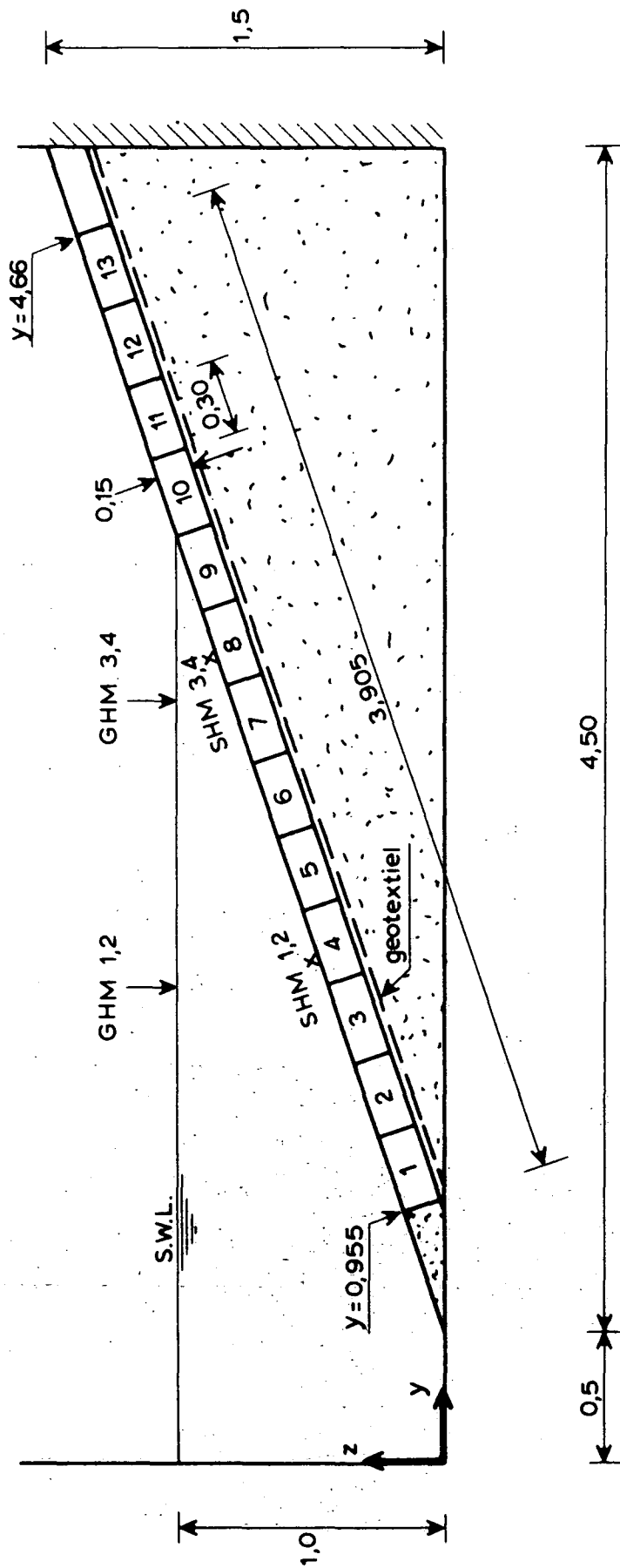


OVERZICHT MODELFACILITEIT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 4



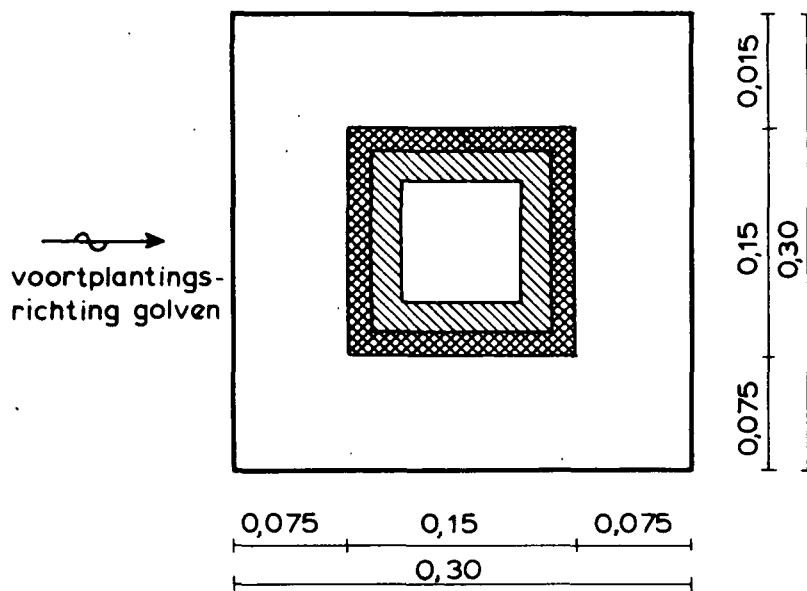
maten in m

DOORSNEDE TALUD TER PLAATSE VAN
MEETSEKTIE MET BLOKNUMMERING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 5



Verklaring:

□ G = 0,08 m

▨ G = 0,12 m

▩ G = 0,15 m

blokdikte 0,15 m

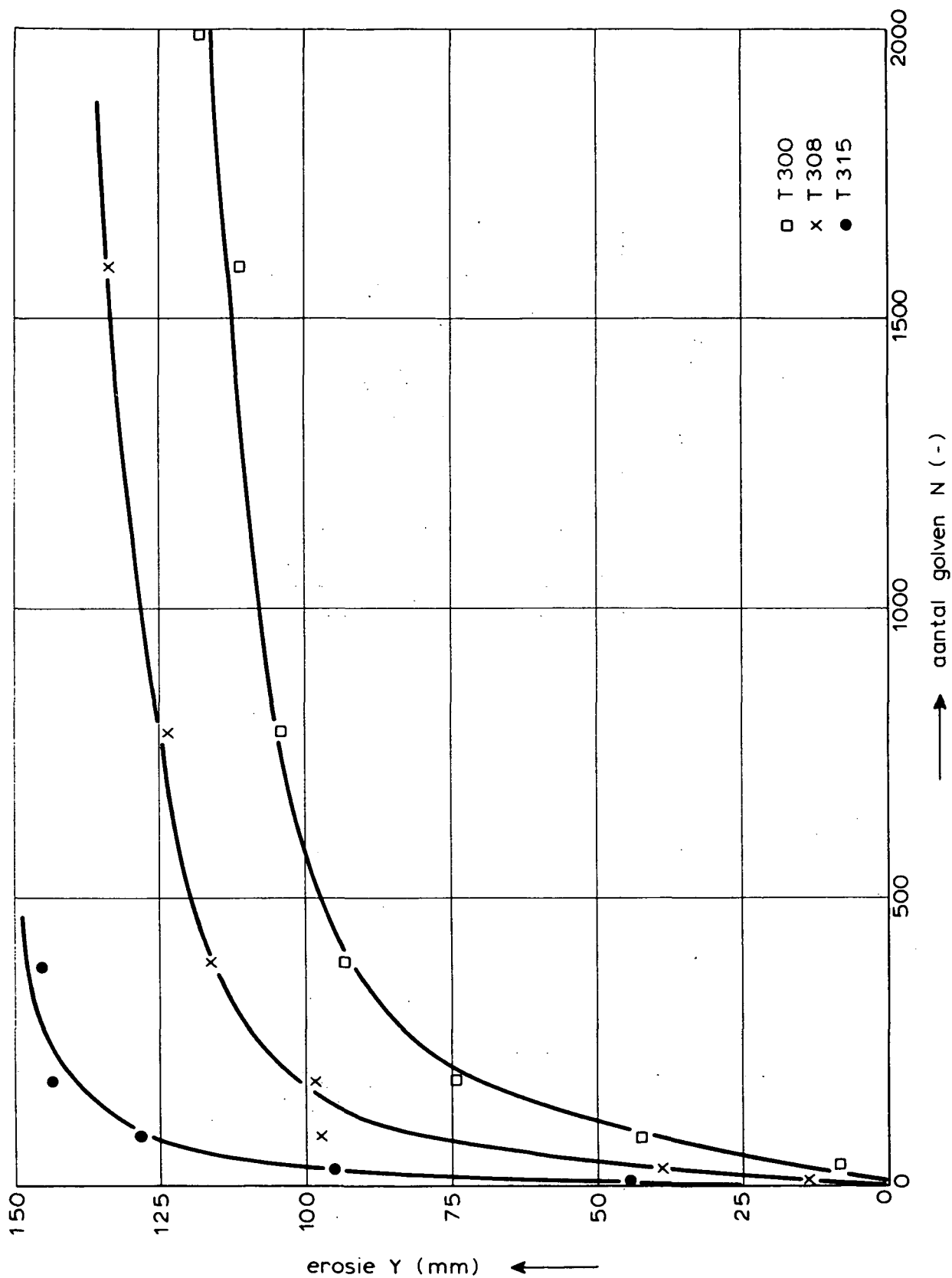
maten in m

OPEN BEKLEDINGSBLOK

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H. 657

FIG. 6



EROSIE ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE
EN AANTAL GOLVEN

GAT 9

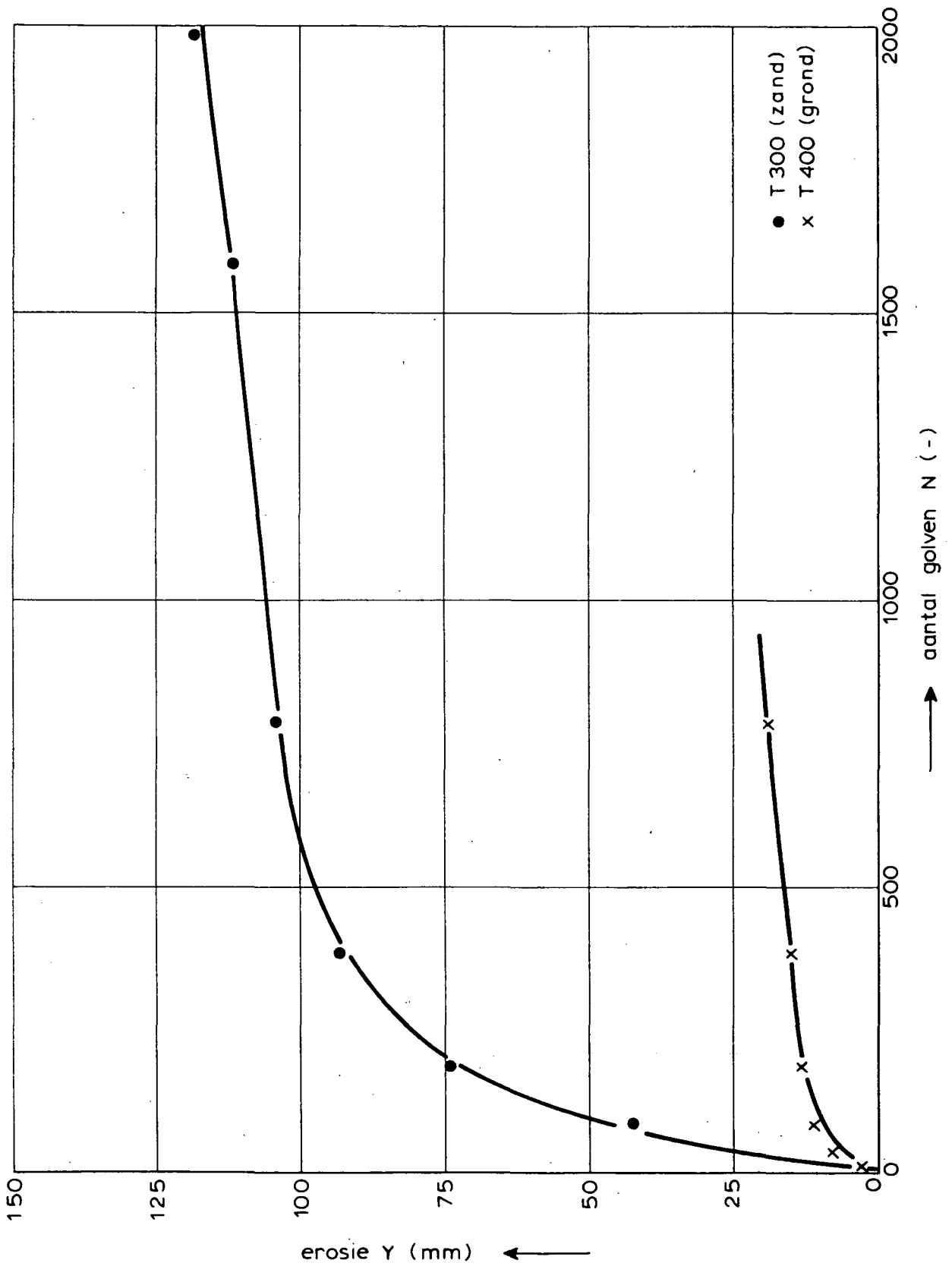
G = 80 mm

T 300 ... T 319

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 7



INVLOED GATVULLING

H=0,06 m

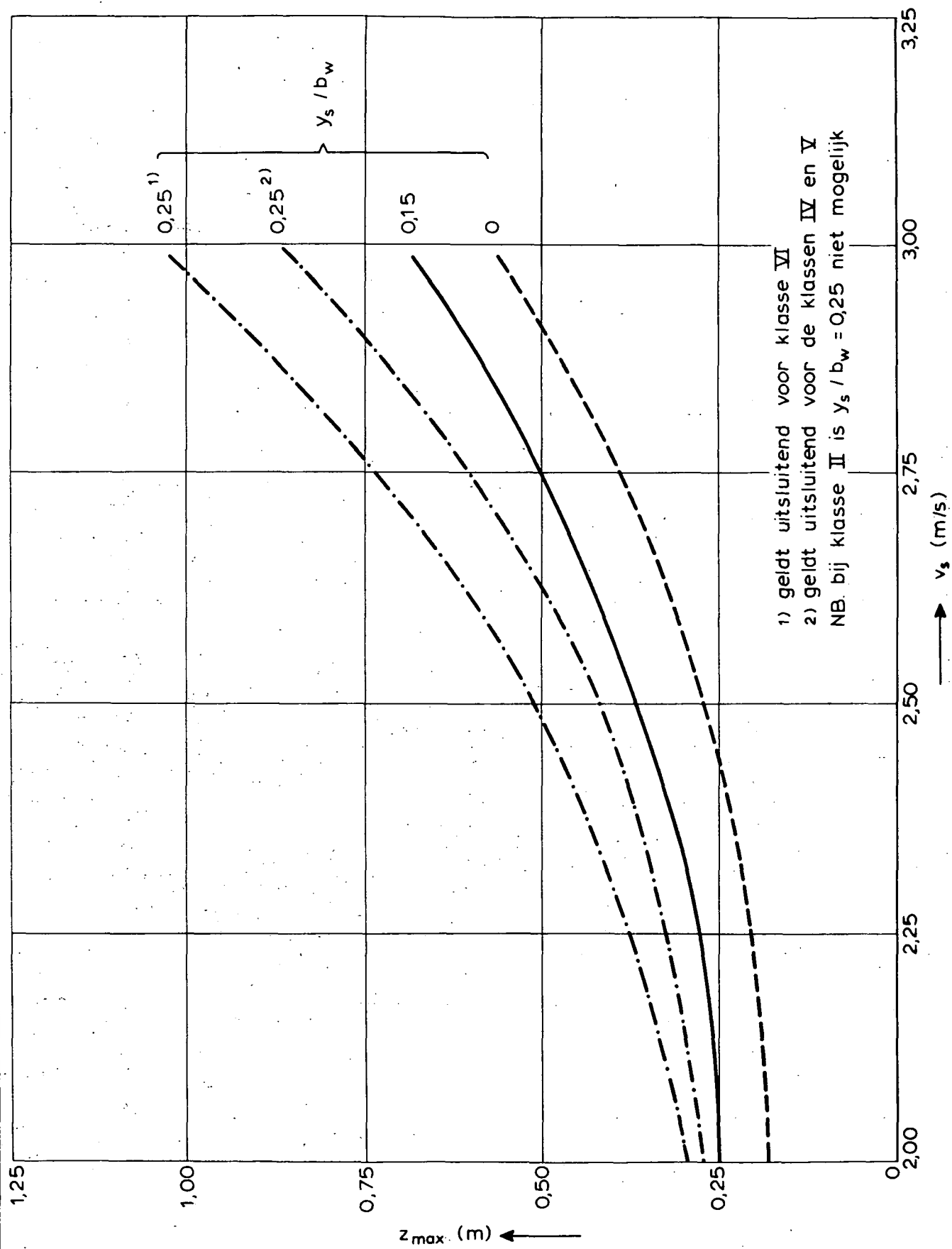
G=80mm

GAT 9

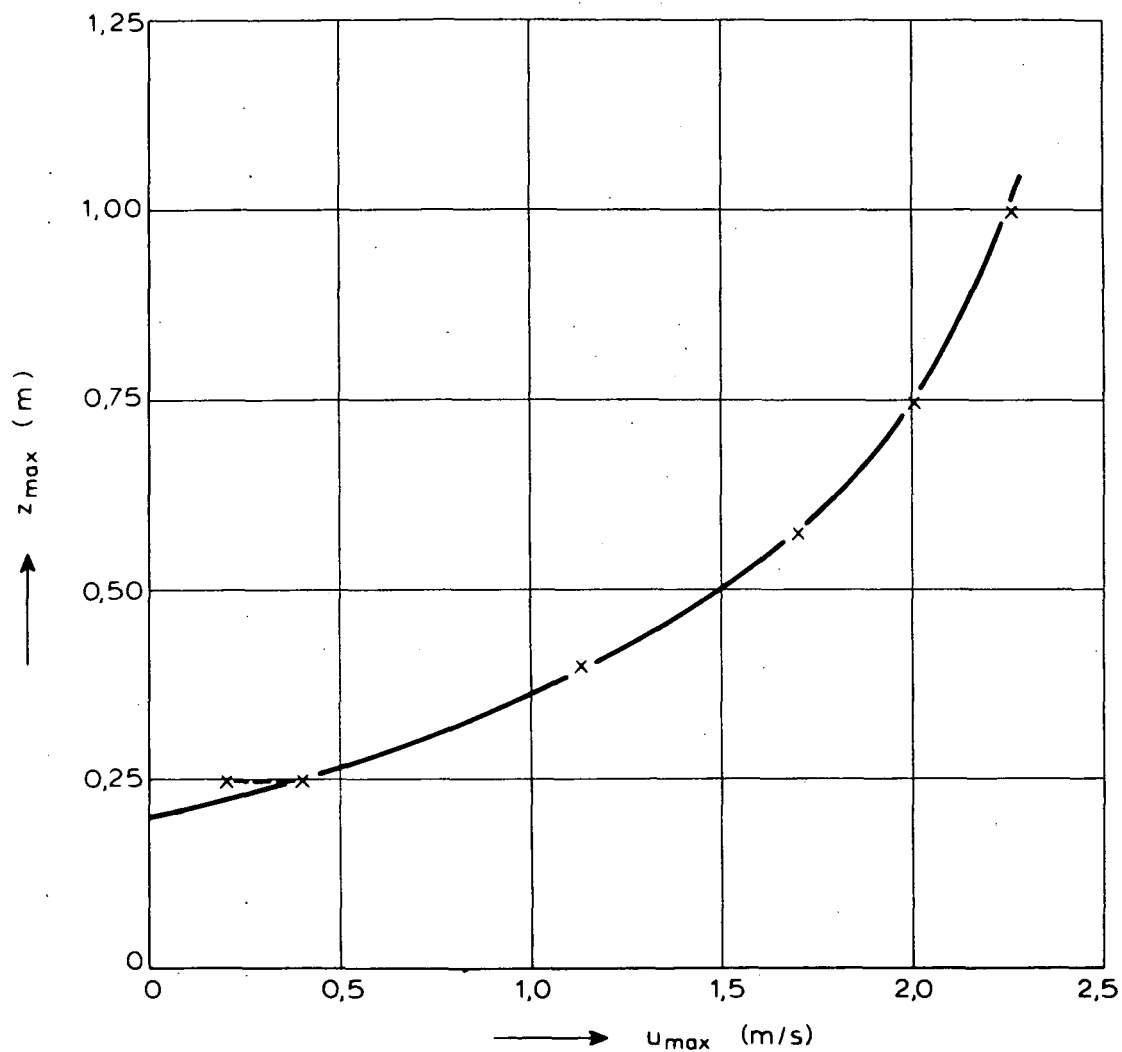
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 8



VERBAND TUSSEN z_{max} EN v_s



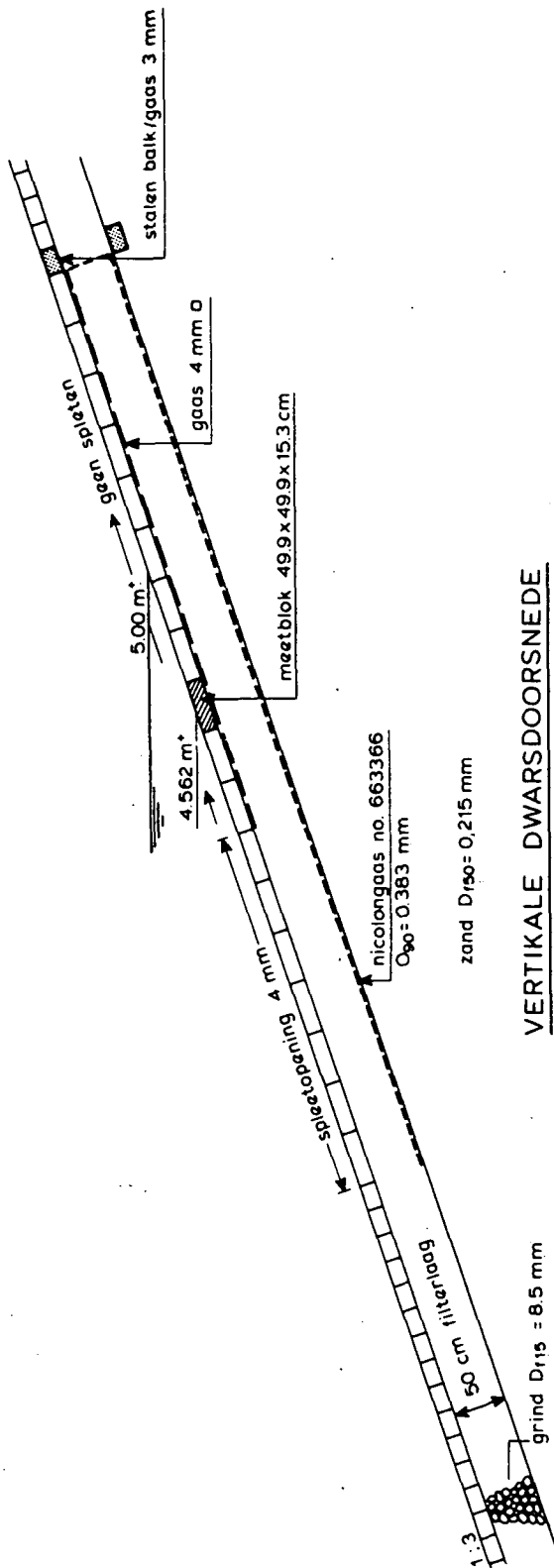
NB: Het gepresenteerde verband is een benadering en is bepaald voor $z_{max} > 0.25m$ met $z_{max} = \Delta \cdot D$ waarbij $\Delta = 1.65$ en $D = 0.15m$

VERBAND TUSSEN z_{max} EN u_{max}

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

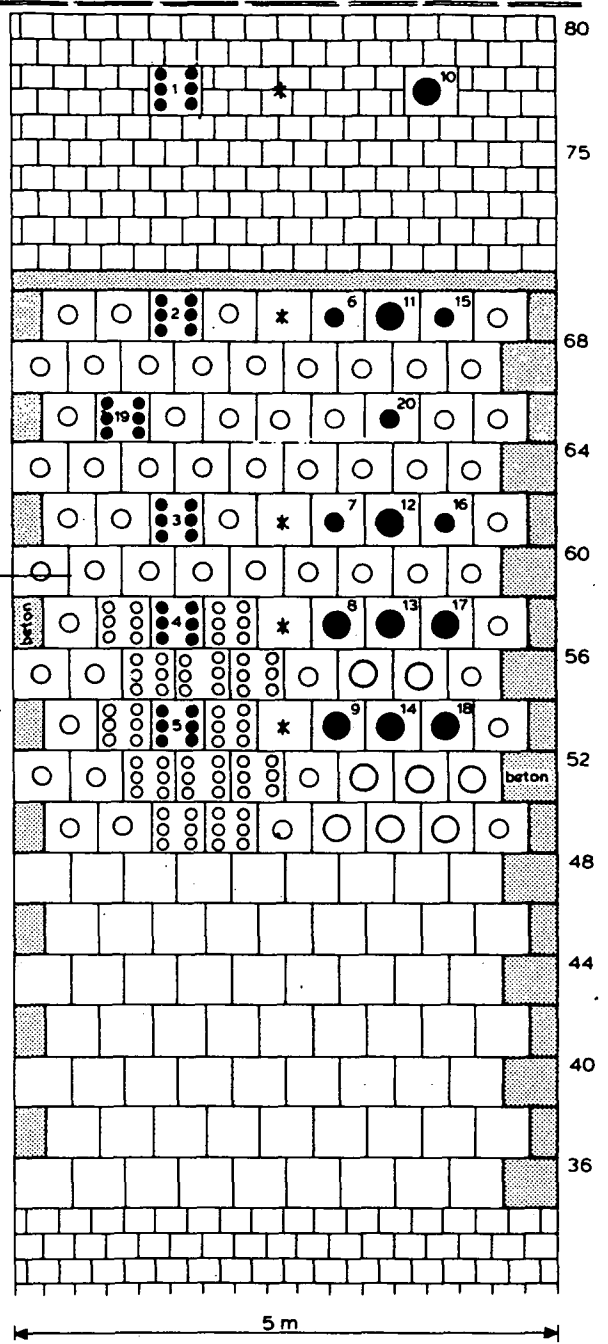
H 657

FIG. 10



VERTIKALE DWARSDOORSNEDE

SWL

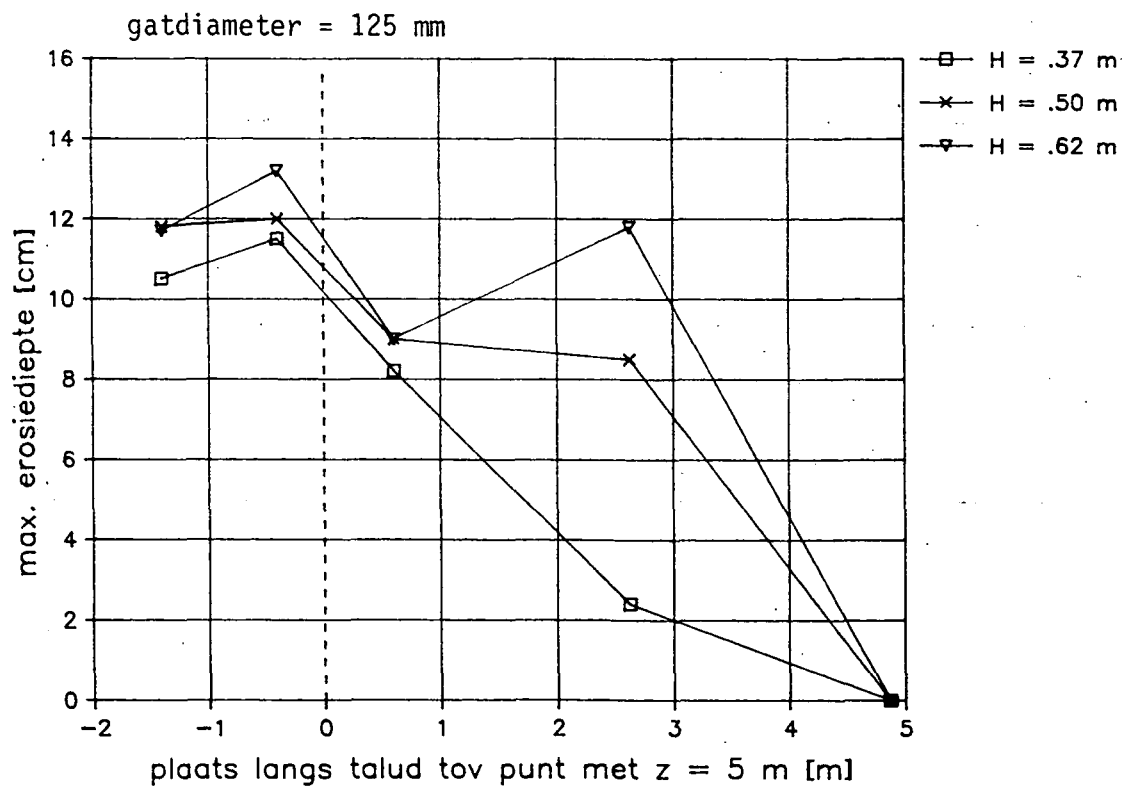
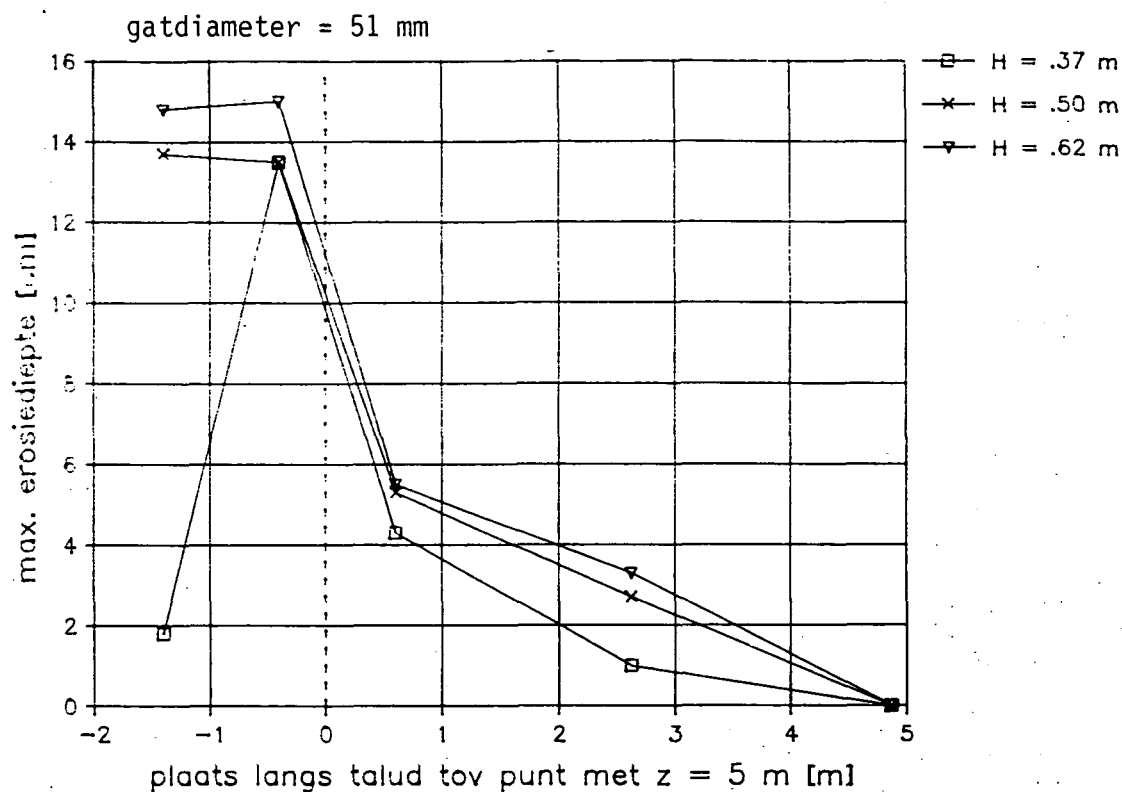


BOVENAANZICHT

- * = snelheidsmeter
- = gevuld gat ○ = ongevuld gat

blok 19 en 20 tijdens serie 3 en 4
alleen één gat van ϕ 125 mm
zonder gatvulling

LOKATIE GEVULDE GATEN EN BLOKNUMMERS



EROSIE - DIEPTE ALS FUNKTIE VAN PLAATS
TEN OPZICHTE VAN SWL

$D_{50} = 5,0$ mm

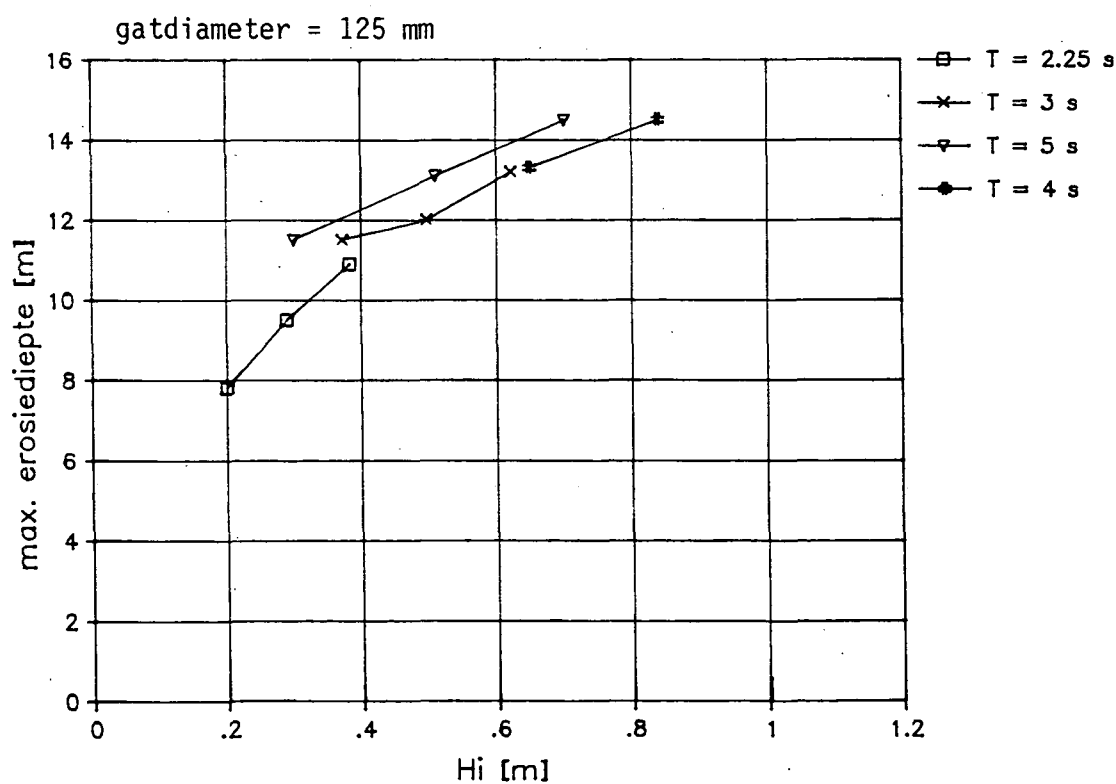
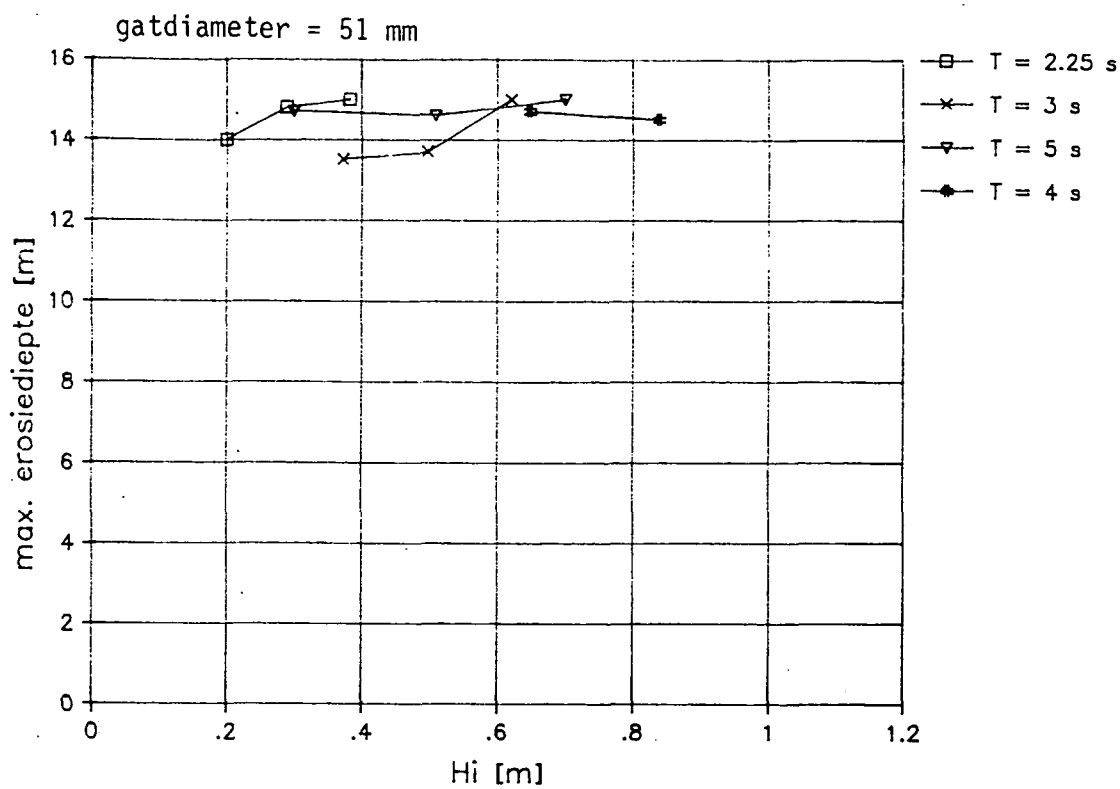
$T = 3$ s

SERIE 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 12



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

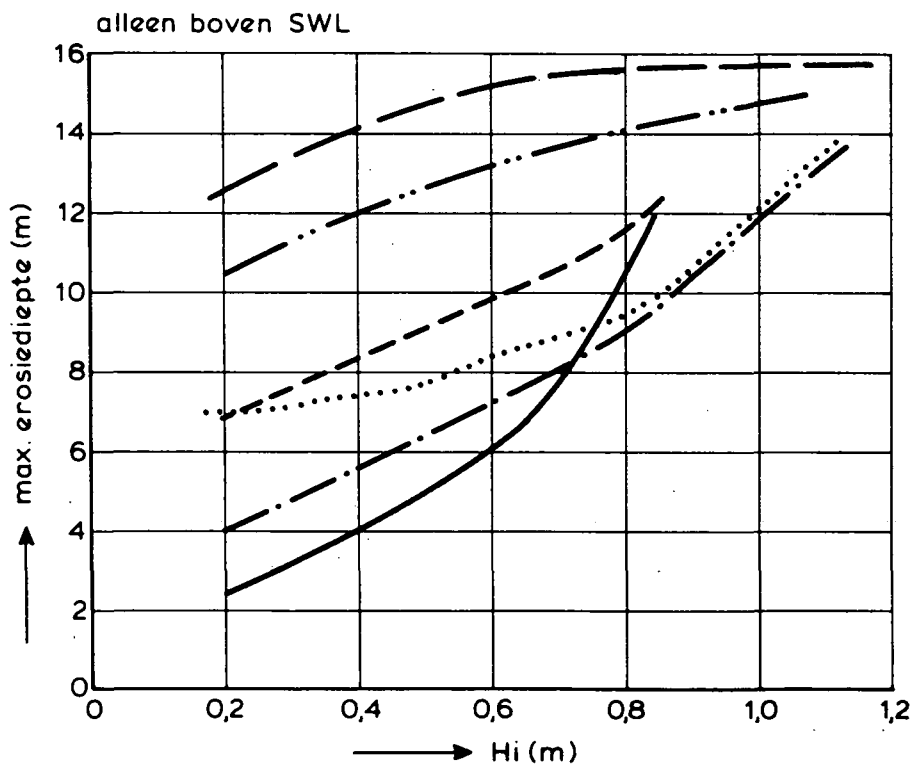
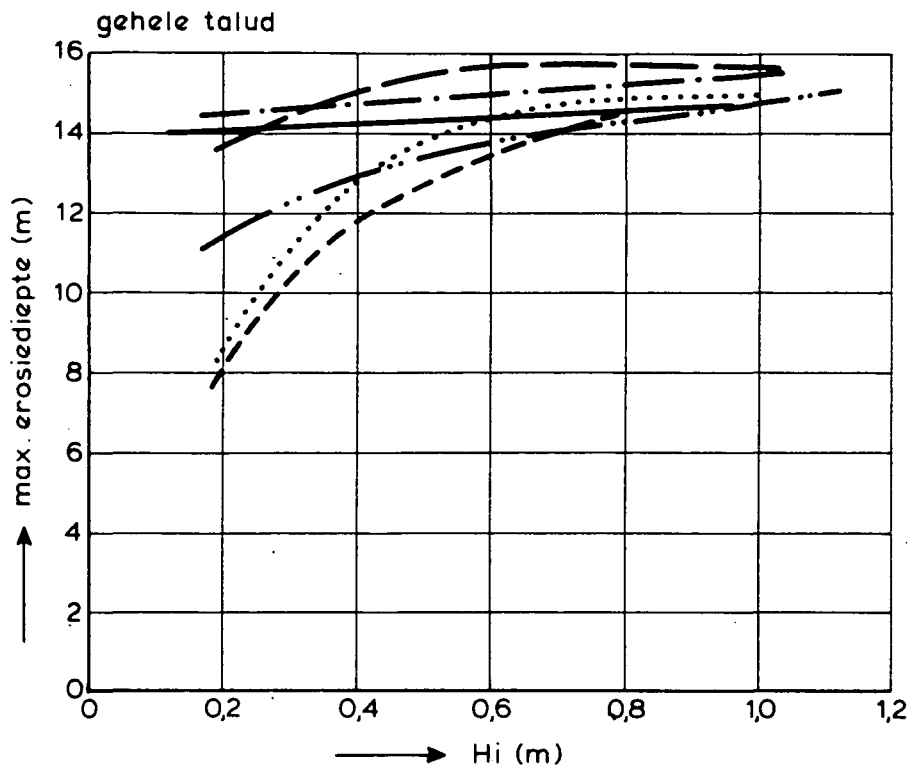
$D_{50} = 5,0 \text{ mm}$

SERIE 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 13



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

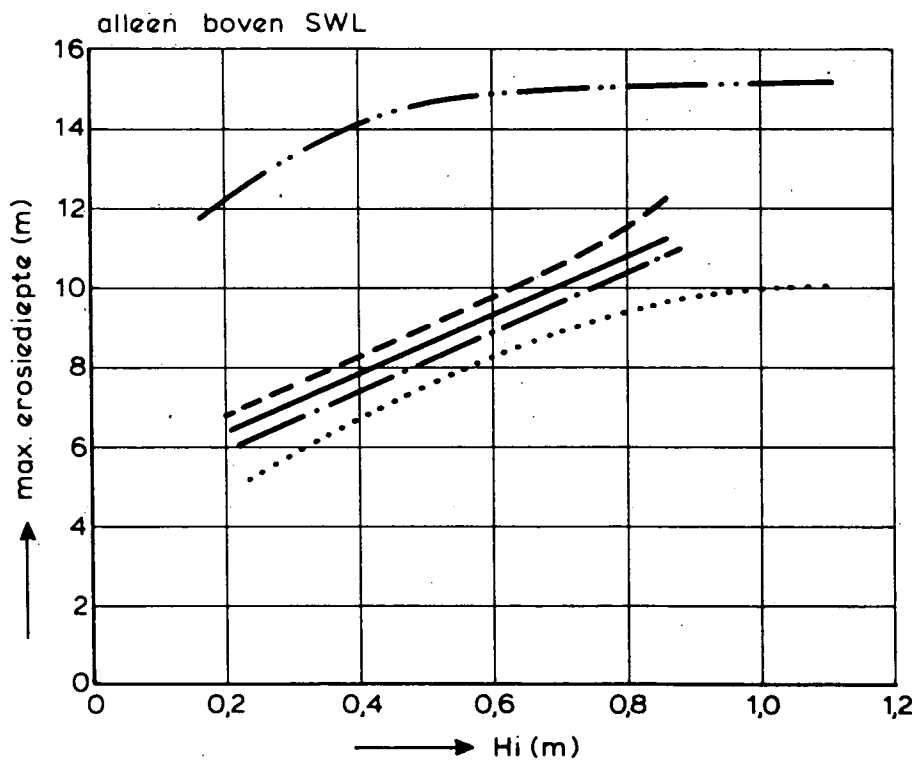
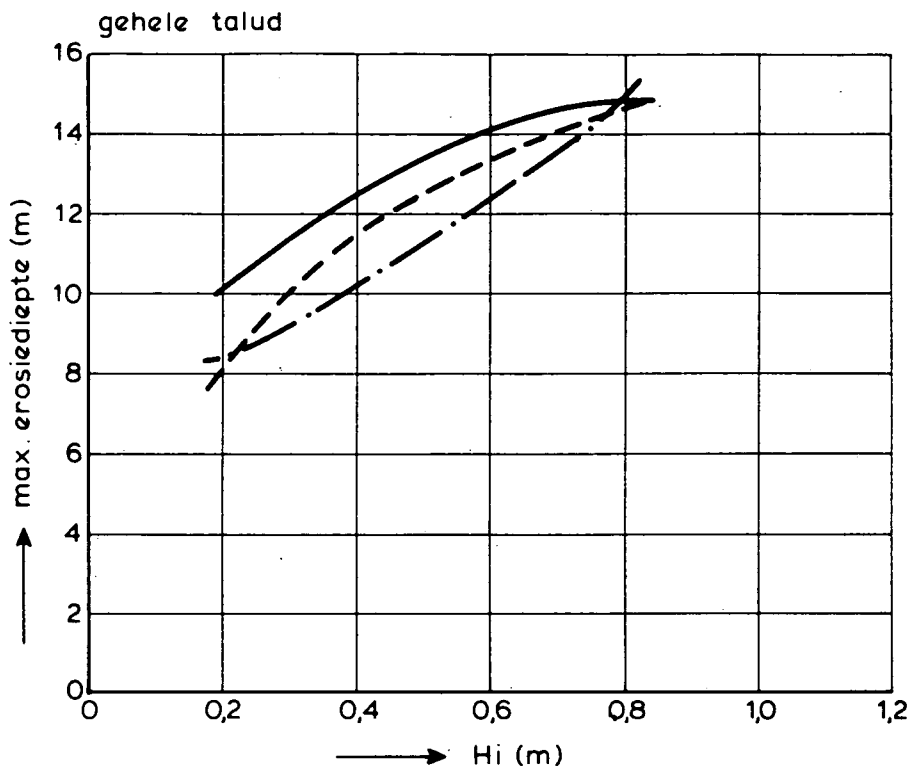
$D_{50}=5,0\text{mm}$

INVLOED G

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 14



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

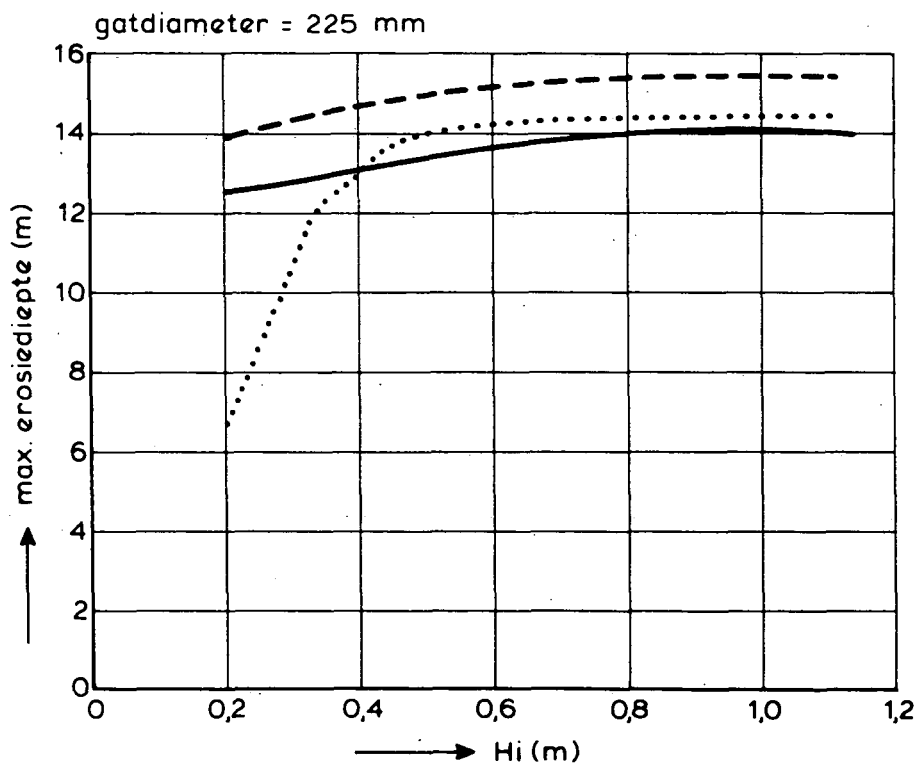
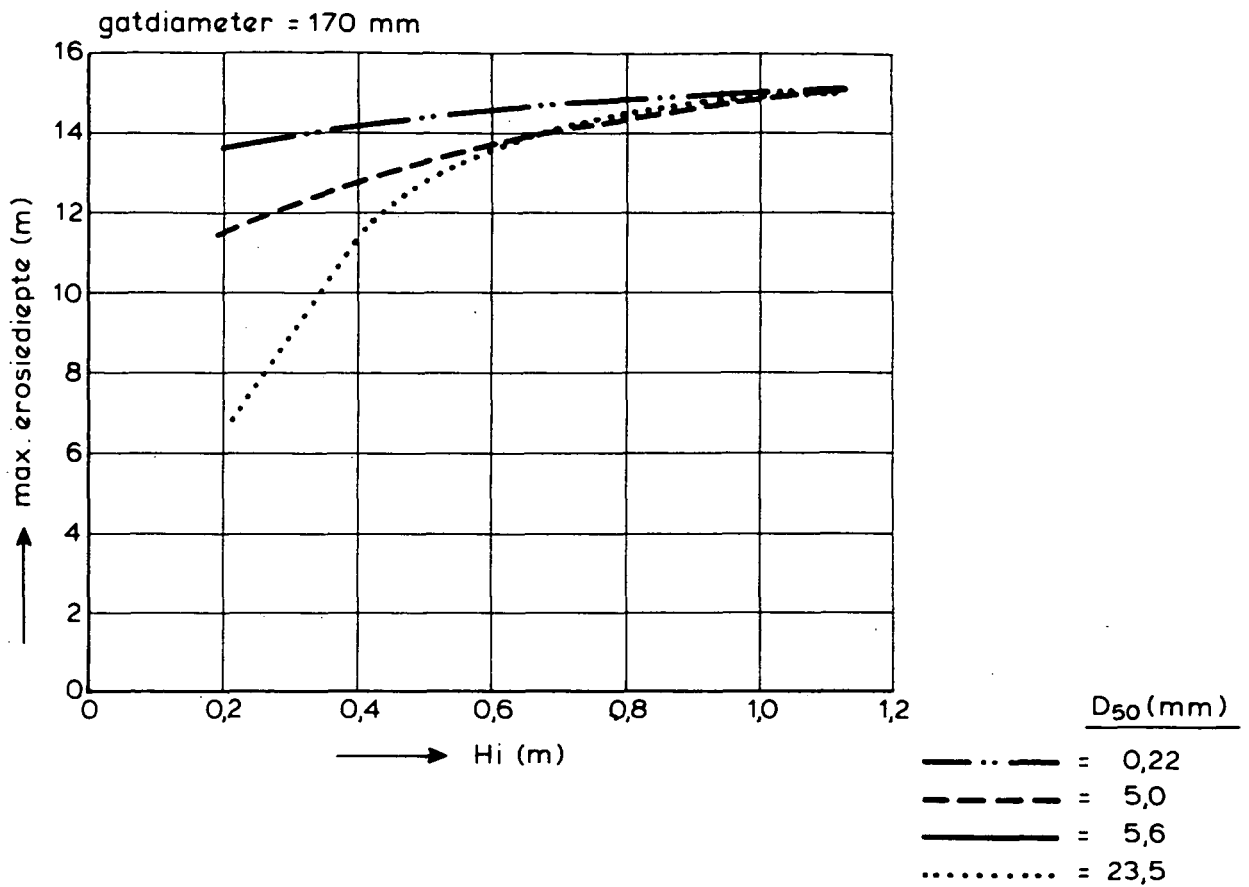
G = 125 mm

INVLOED D_{50}

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 15



(gehele talud)

GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

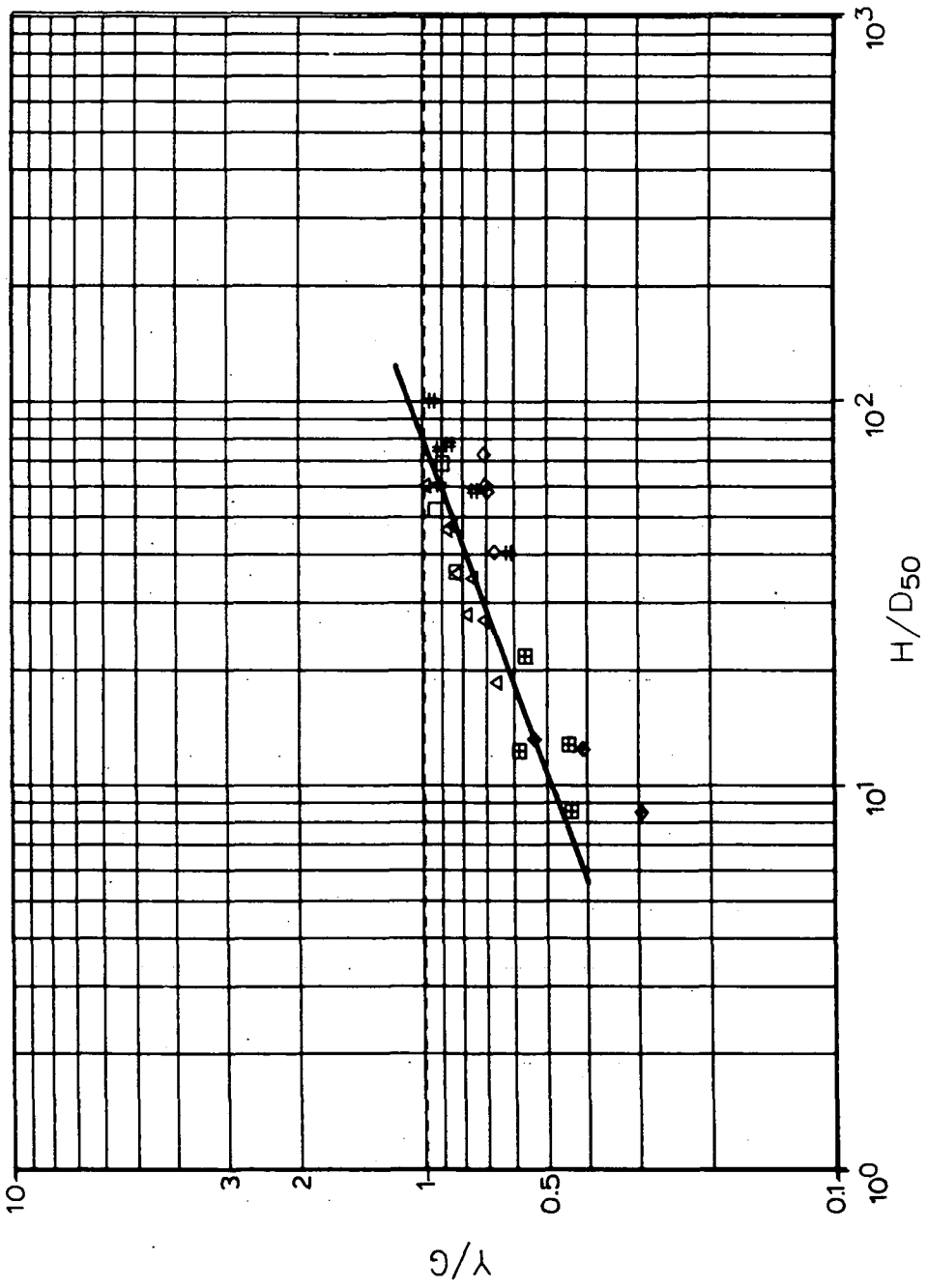
INVLOED D_{50}

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 16

alleen meetpunten met $Y < 12.5$ cm



- serie 3, D50=5.6 mm
 - # serie 3, D50=5.0 mm
 - ◇ serie 4, D50=5.0 mm
 - △ serie 3, D50=10.8 mm
 - ⊠ serie 4, D50=23.5 mm
 - ◆ serie 5, D50=23.5 mm
- : $Y/G = 0,23 \left(\frac{H}{D_{50}} \right)^{0,33}$

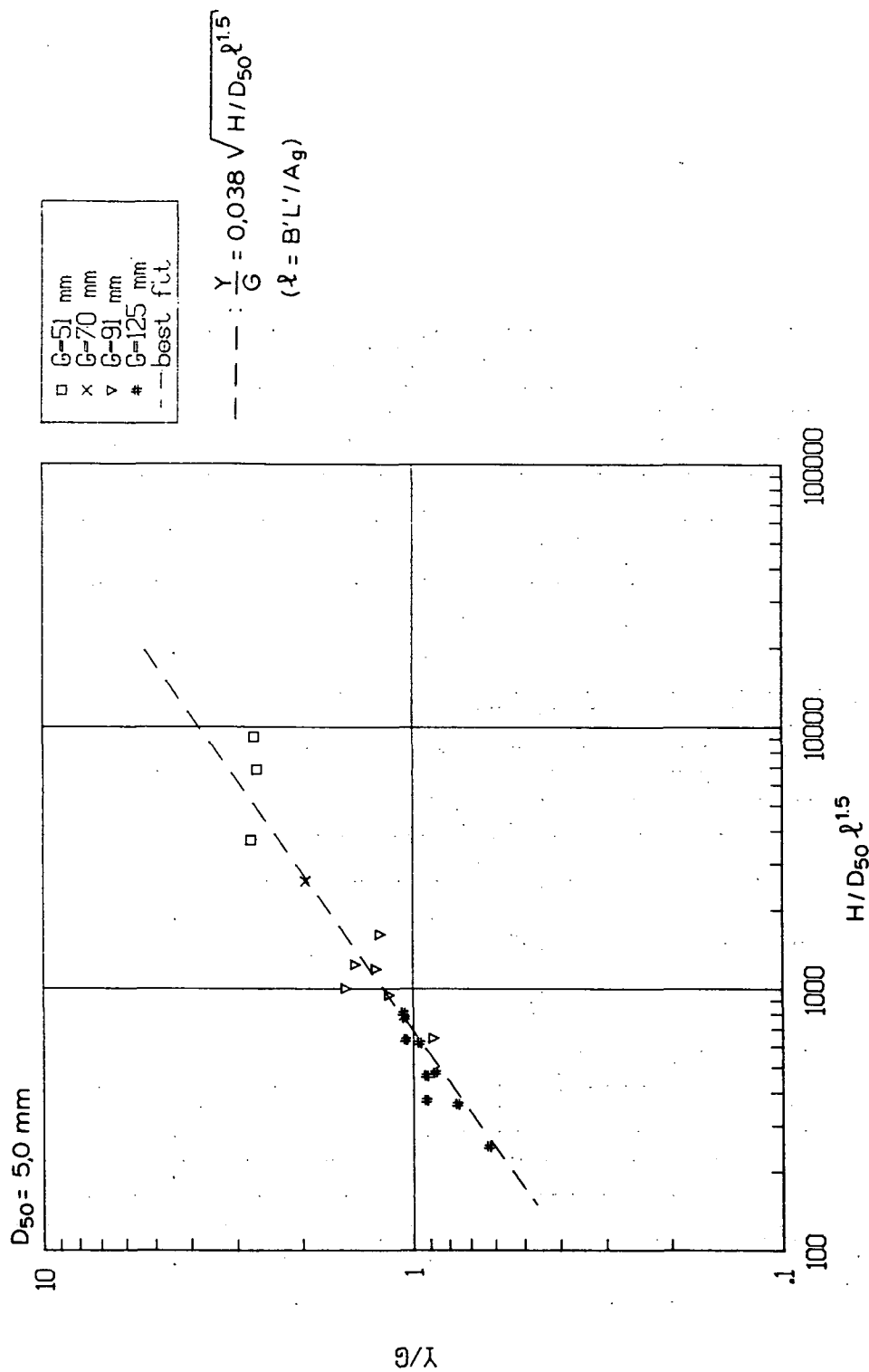
MAXIMALE EROSIE - DIEPTE VOOR
GEHELE TALUD

$G > 0,1$ m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 17



alleen meetpunten met $Y < 14 \text{ cm}$

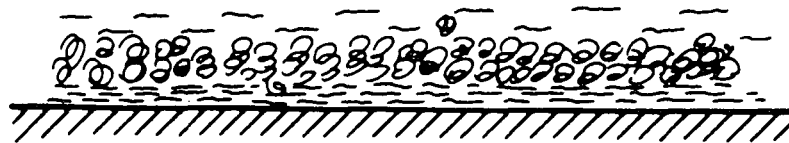
MAXIMALE EROSIE-DIEPTE VOOR
GEHELE TALUD

G < 0,1 m

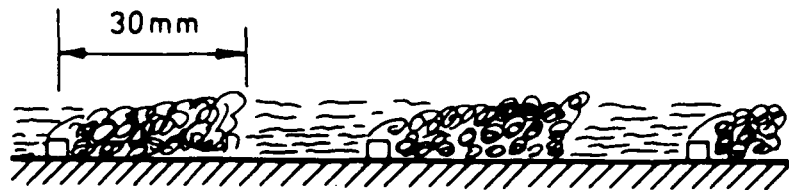
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 18



(a) Smooth Turbulent Flow



(b) Semismooth Turbulent Flow



(c) Nonuniform Hyperturbulent Flow

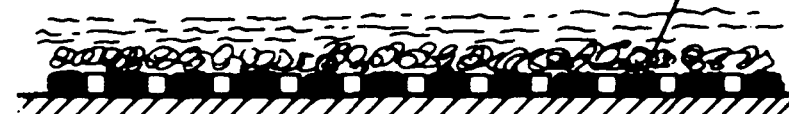


(d) Uniform Hyperturbulent Flow



(e) Semi-Quasi-Smooth Flow

dead water



(f) Quasismooth Flow

bron: Knight/Mac. Donald [9]

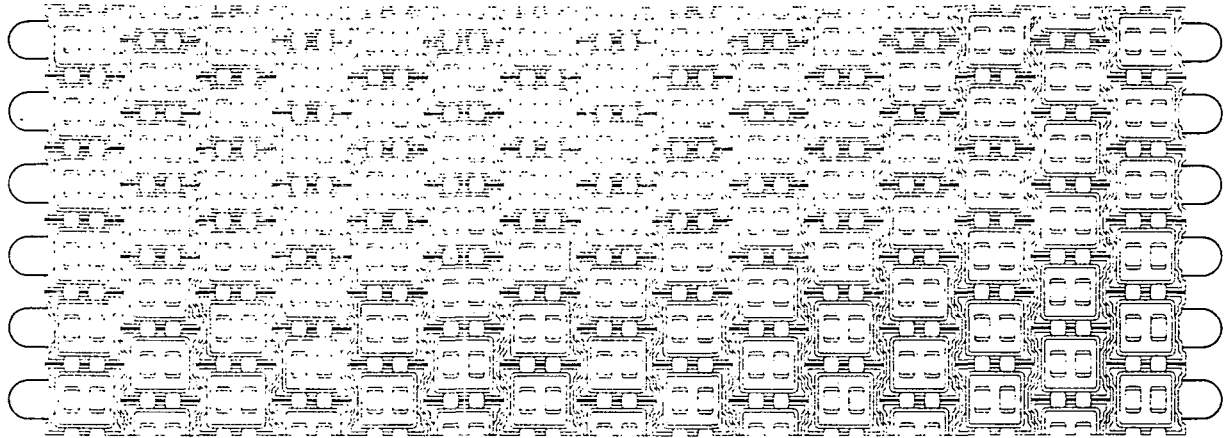
STROMINGSOMSTANDIGHEDEN BIJ
KUNSTMATIGE RUWHEID

DELFT HYDRAULICS LABORATORY

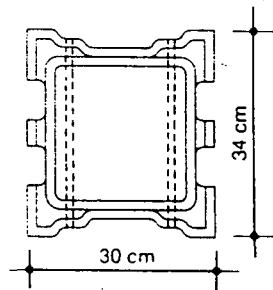
H. 657

FIG. 19

Blokkenmat

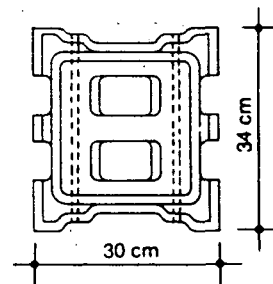


Bloktypen



Dicht blok

215 - gesloten type



Open blok

180 - open type

ARMORFLEX - BLOKKEN EN - BLOKKENMAT

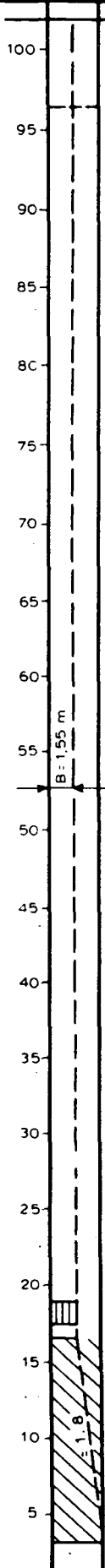
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H. 657

FIG. 20

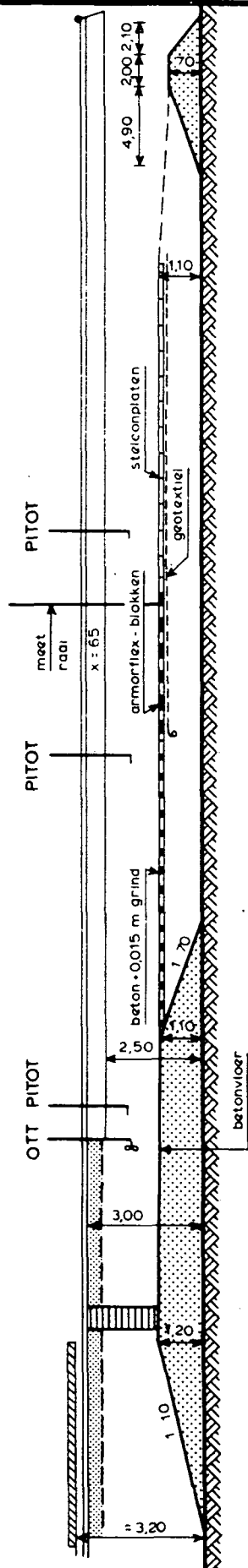
BOVENAANZICHT

afstand x in m tot instroomopening



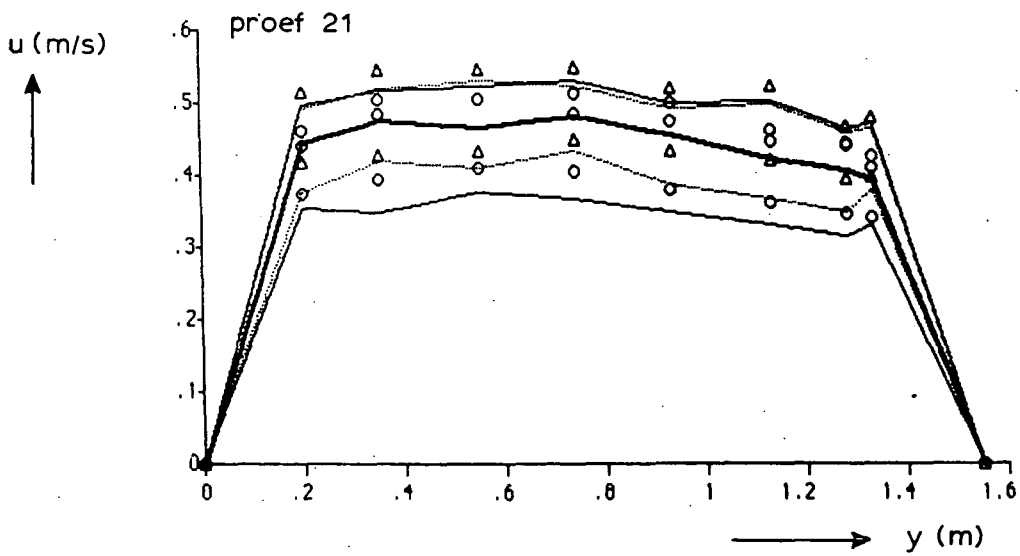
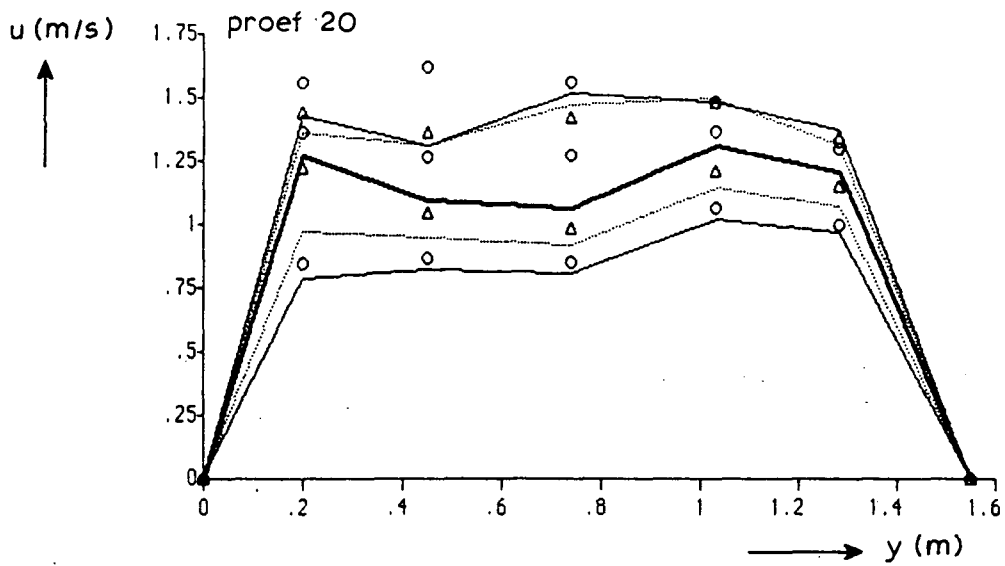
DOORSNEDE

oploop sectie = 12,00
instroomsectie = 40,00
meetsectie = 10,00
uitstroomsectie = 20,00

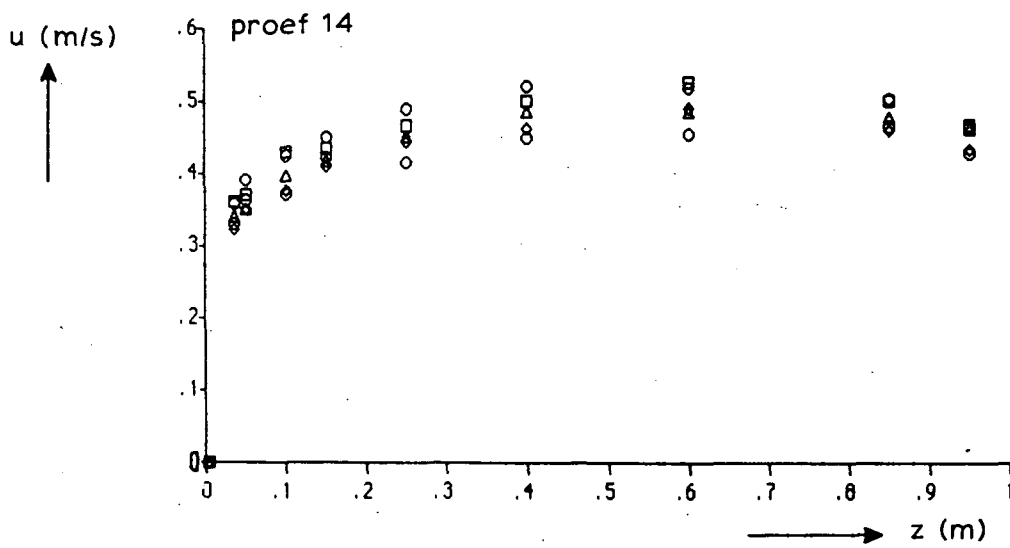
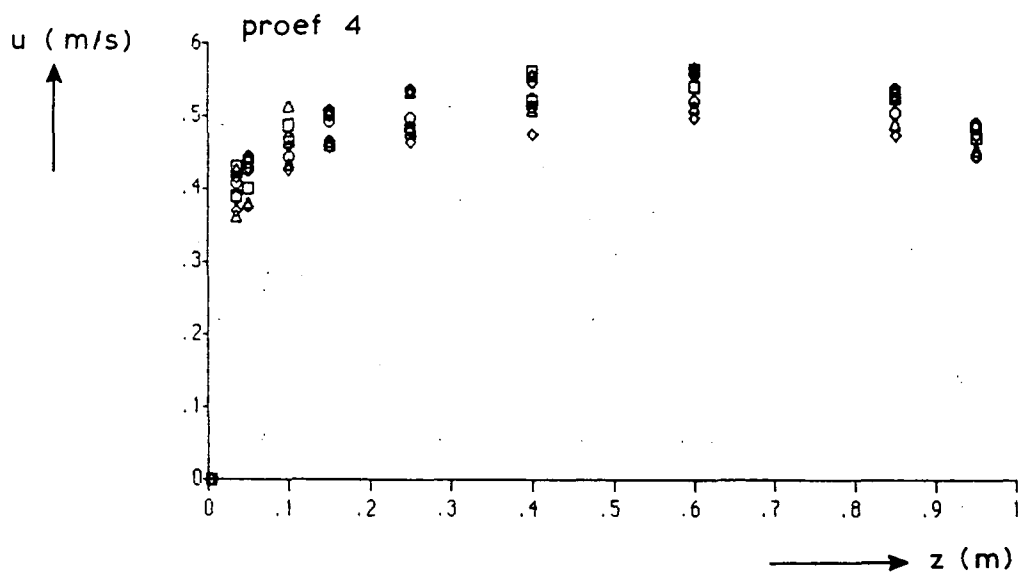


maten in m

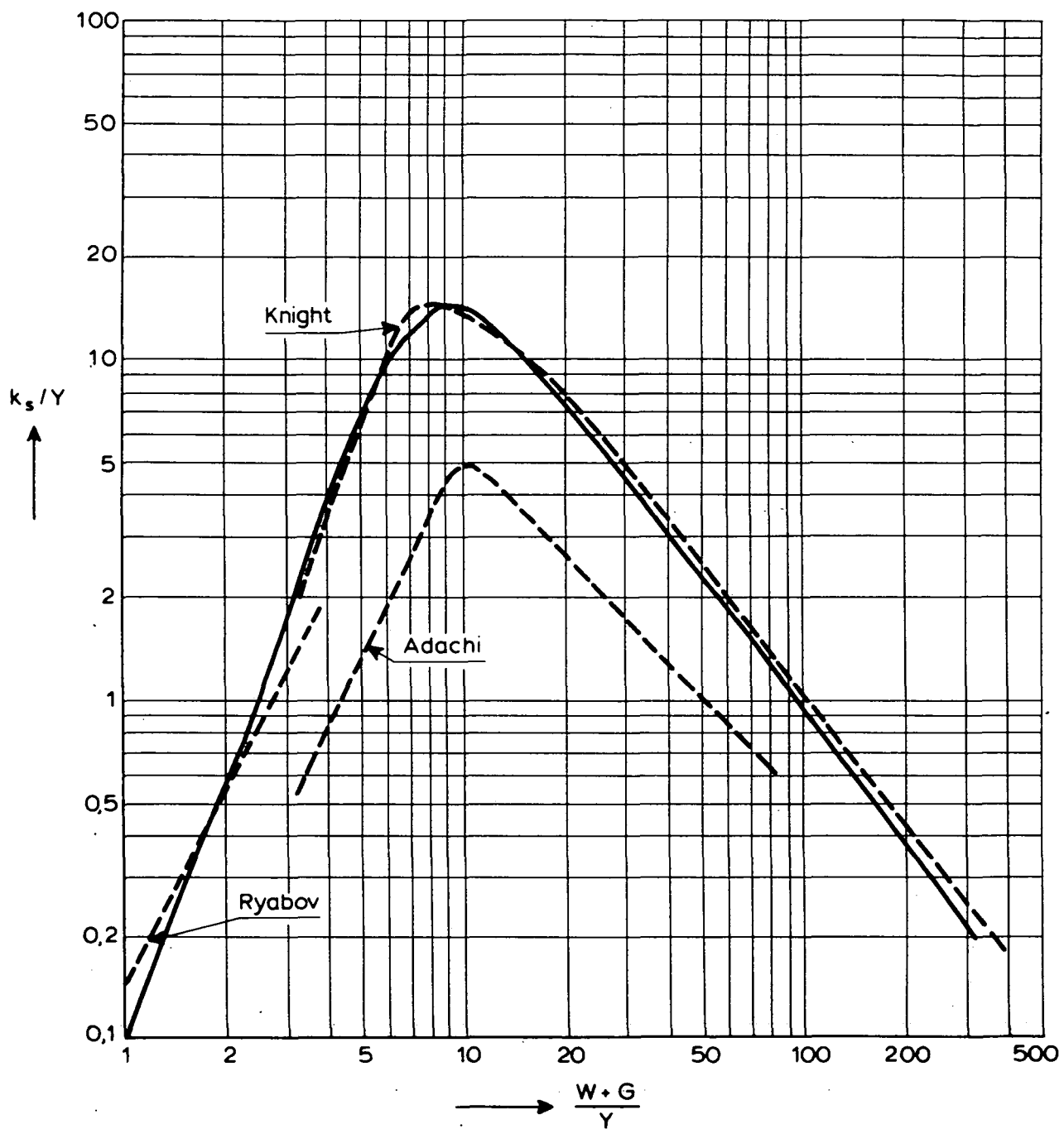
STROOMGOOT MET PROEFOPSTELLING



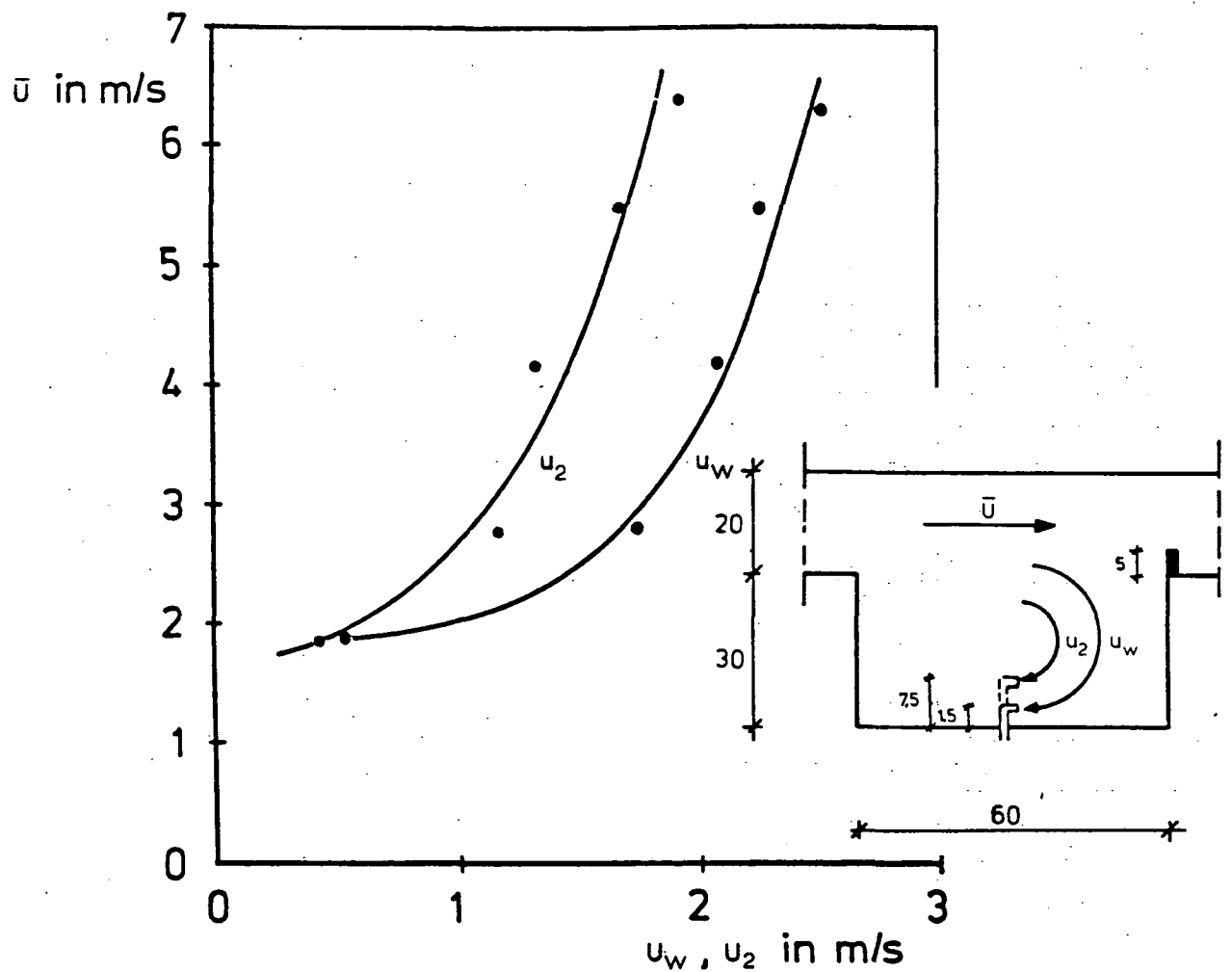
SNELHEIDSVERDELINGEN IN EEN DWARSDOORSNEDE
 PROEVEN 20 EN 21



SNELHEIDSVERDELINGEN IN DE VERTIKAAL,
 PROEVEN 4 EN 14



VERBAND TUSSEN k_s / Y EN $W+G/Y$ VOOR
KUNSTMATIGE RUWHEIDSELEMENTEN



Walzengeschwindigkeiten u_w und u_2 in Abhängigkeit von der Oberströmungsgeschwindigkeit u

opm. De waarden van u_w en u_2 betreffen de maximale geregistreeerde snelheden inclusief turbulentie

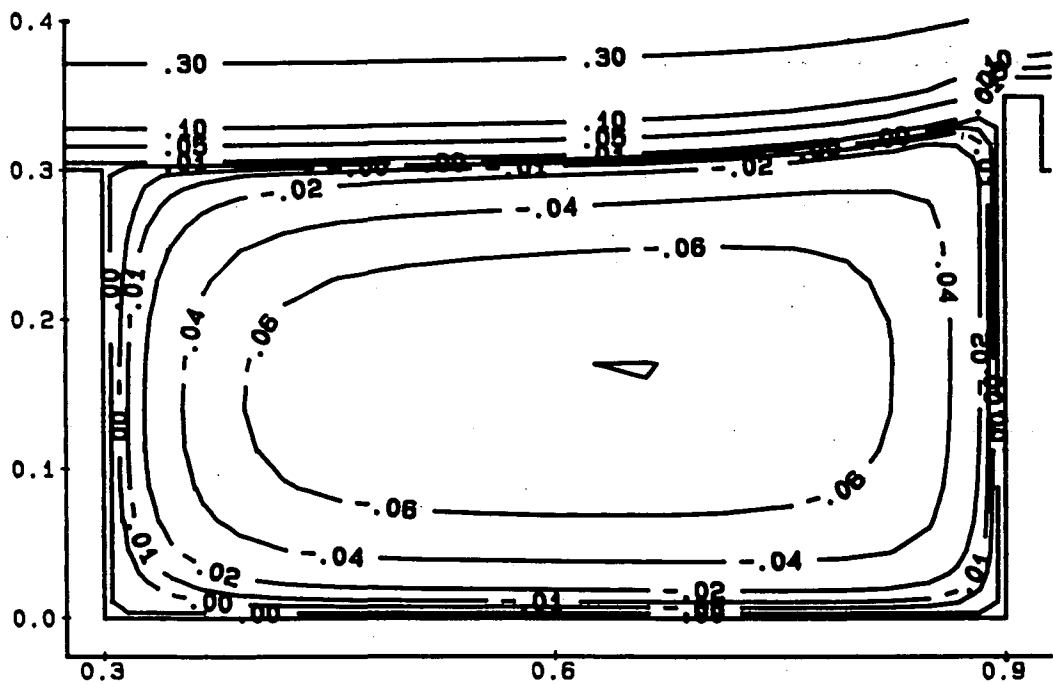
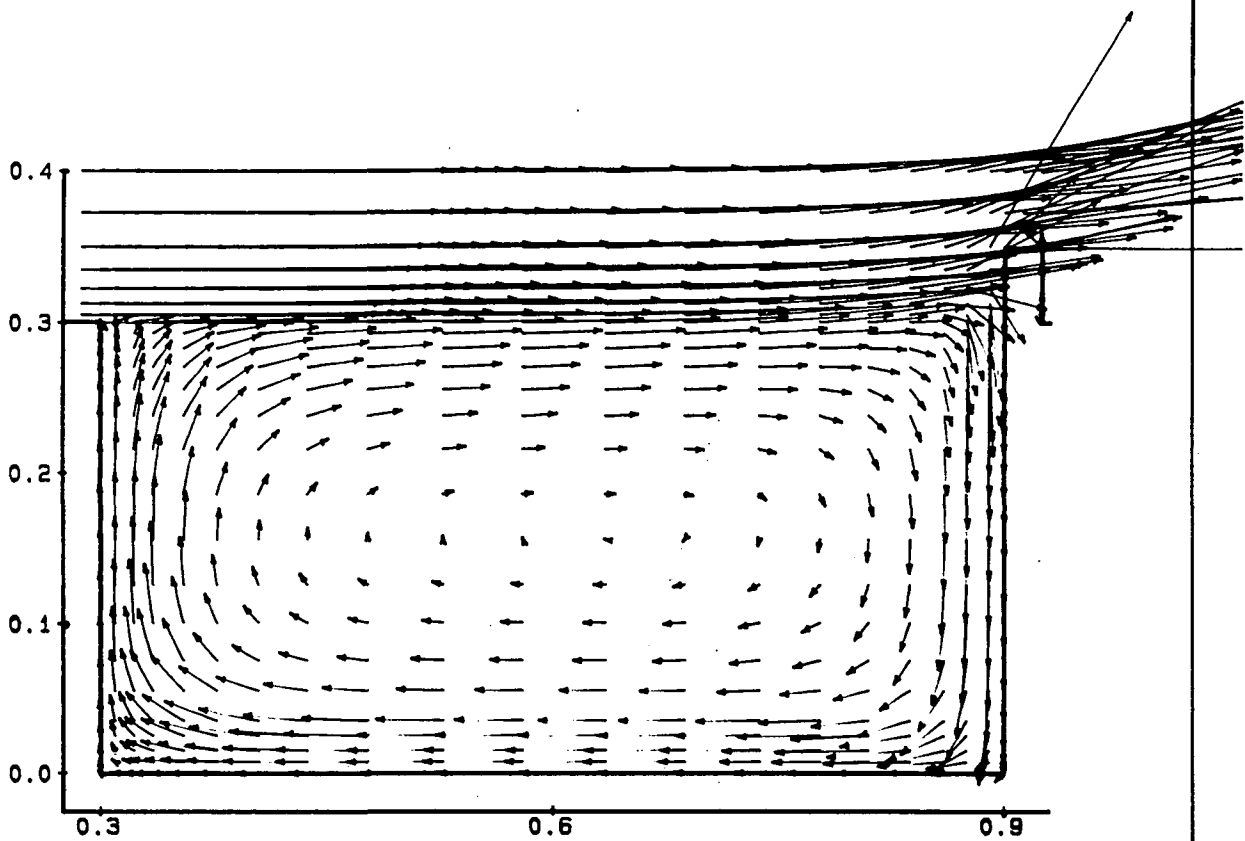
bron: [8]

RESULTS OF MODEL TESTS OF FÜHRBÖTER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H. 657

FIG. 25



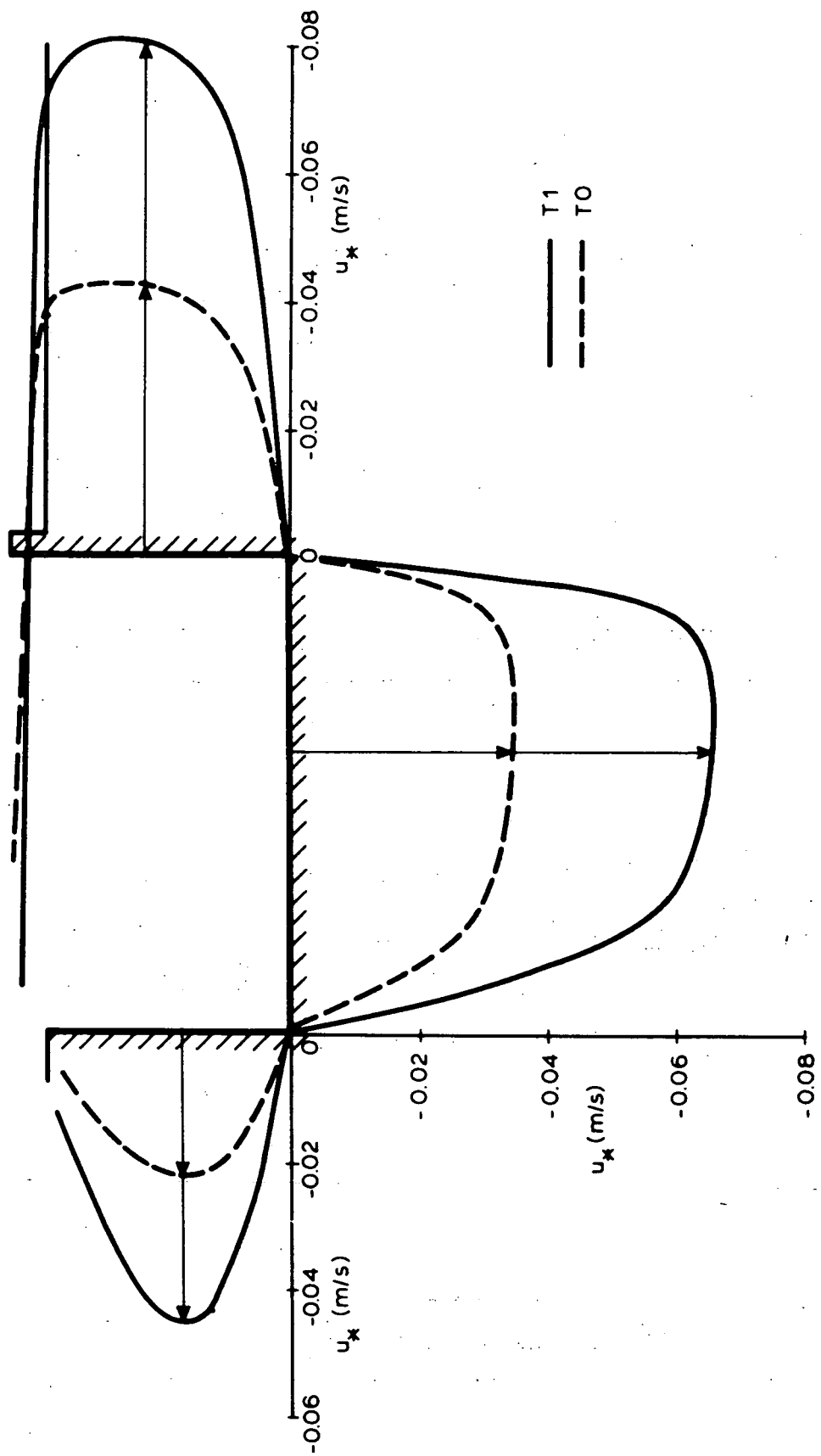
DETAILED CURRENT FIELD AND STREAMLINE
PATTERN

T1-M1

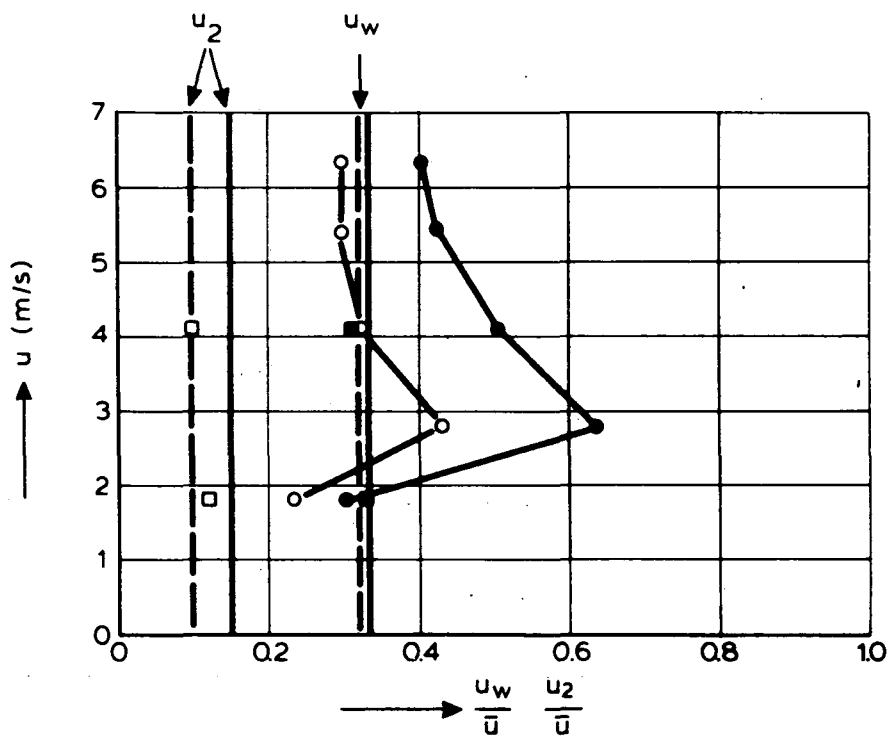
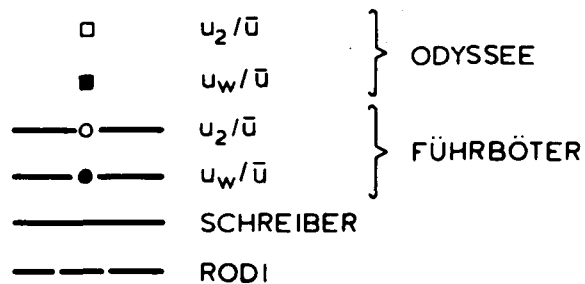
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H. 657

FIG. 26



SHEAR STRESS VELOCITY DISTRIBUTION



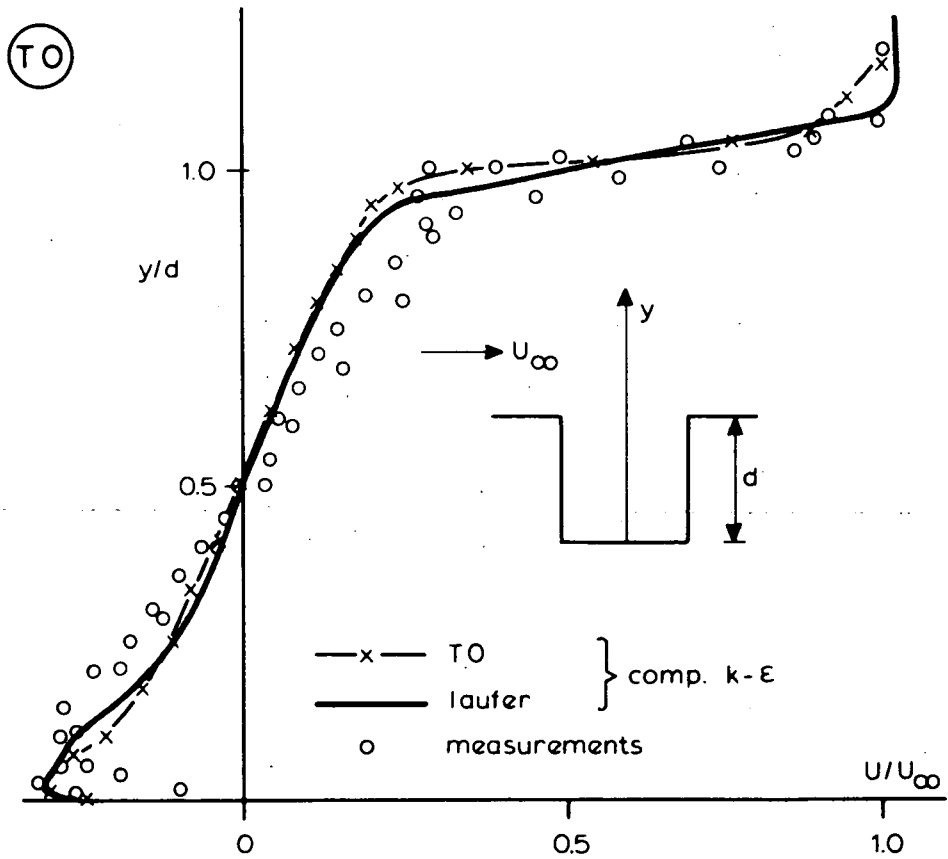
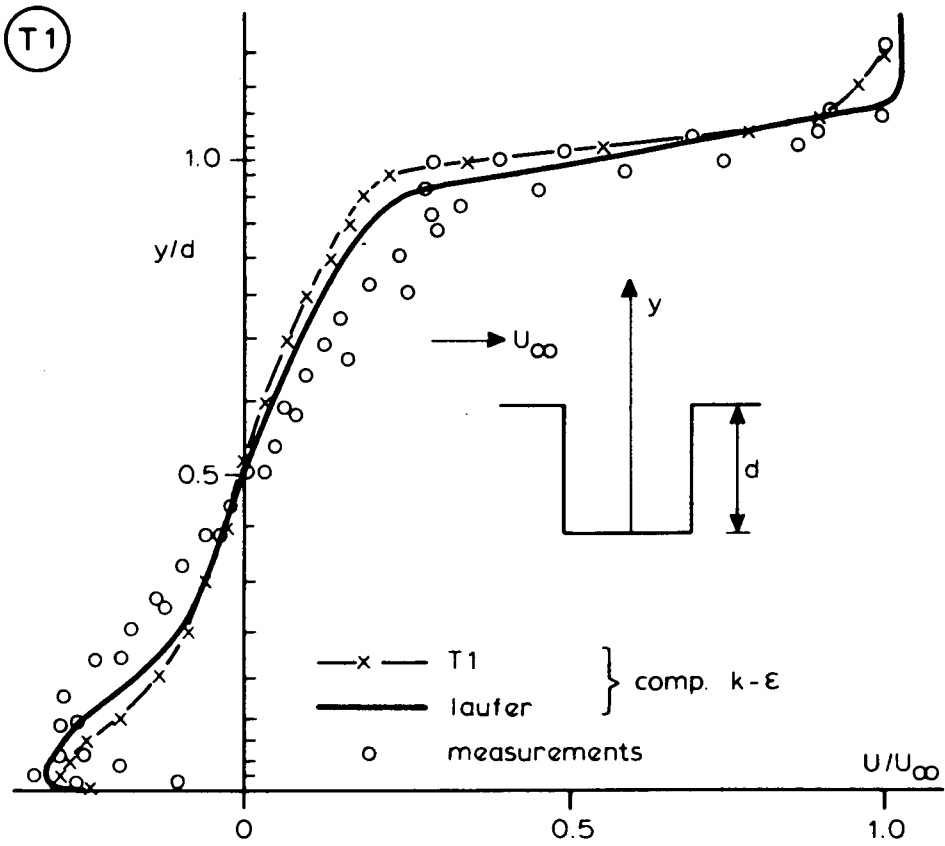
opm. De snelheden u_w en u_2 berekend met ODYSSEE betreffen gemiddelde waarden, die van Führböter maxima inclusief turbulentie

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL RESULTS

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

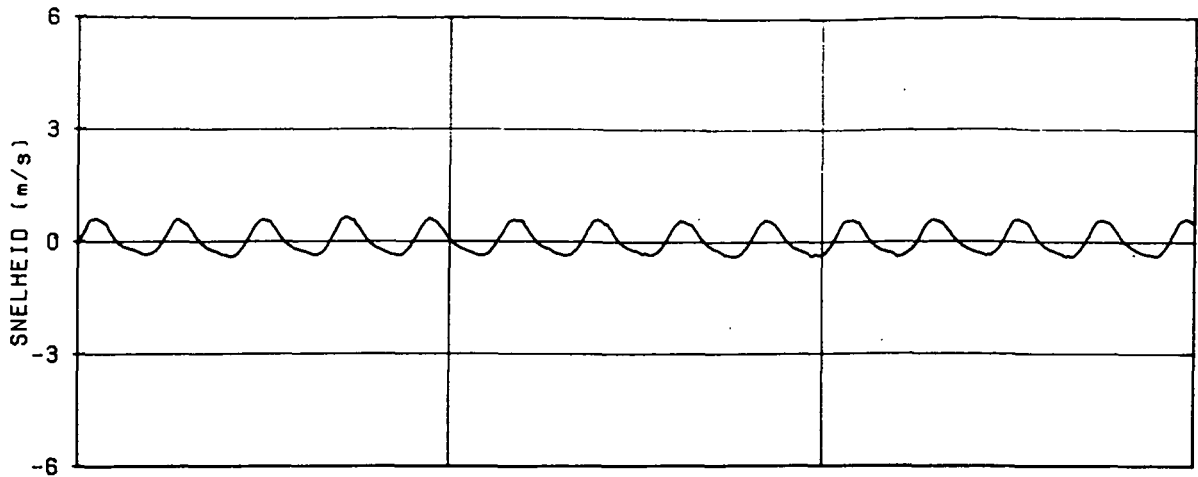
H. 657

FIG. 28

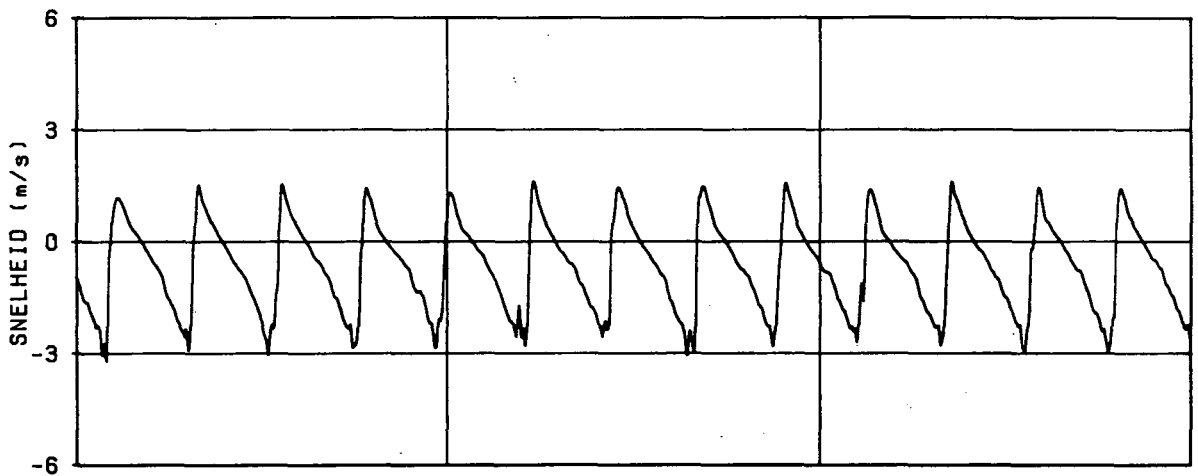


DISTRIBUTION OF HORIZONTAL VELOCITY IN
SQUARE CAVITY (AFTER RODI, [10])

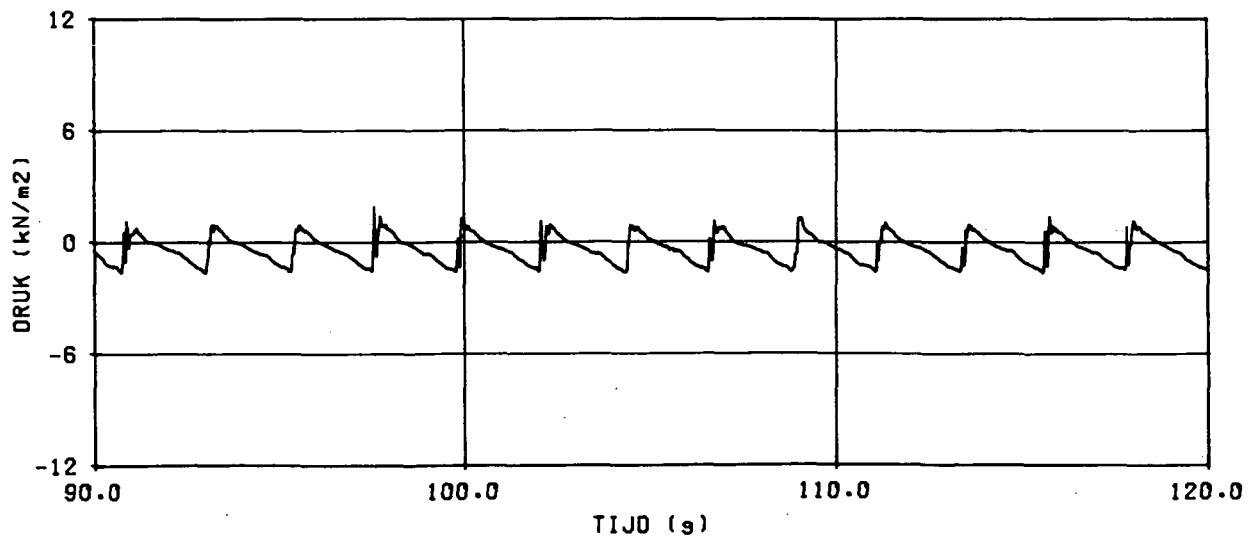
SHM 1



SHM 2



DRO 14



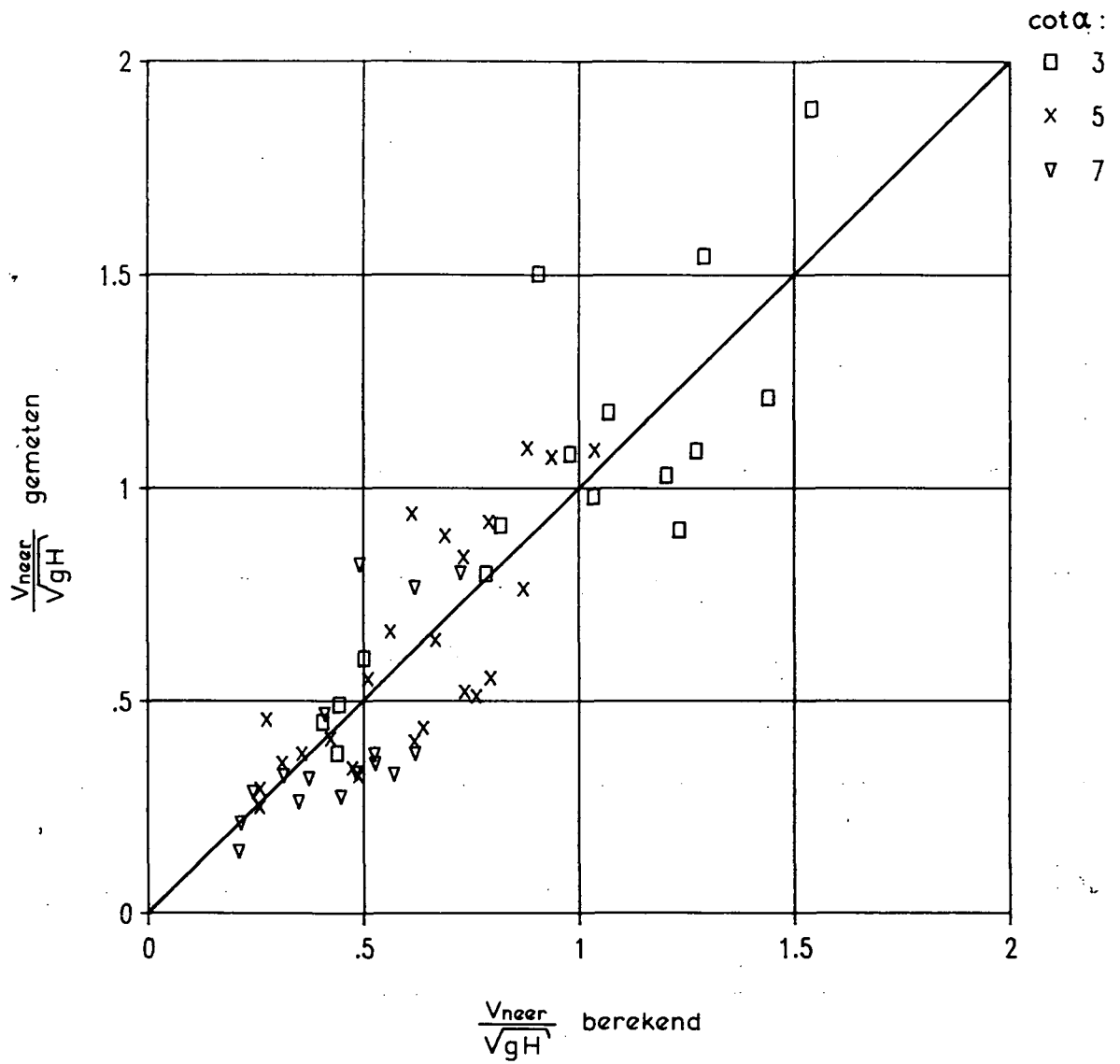
SNELHEID OP TALUD ZONDER KORREKTIE

T 333

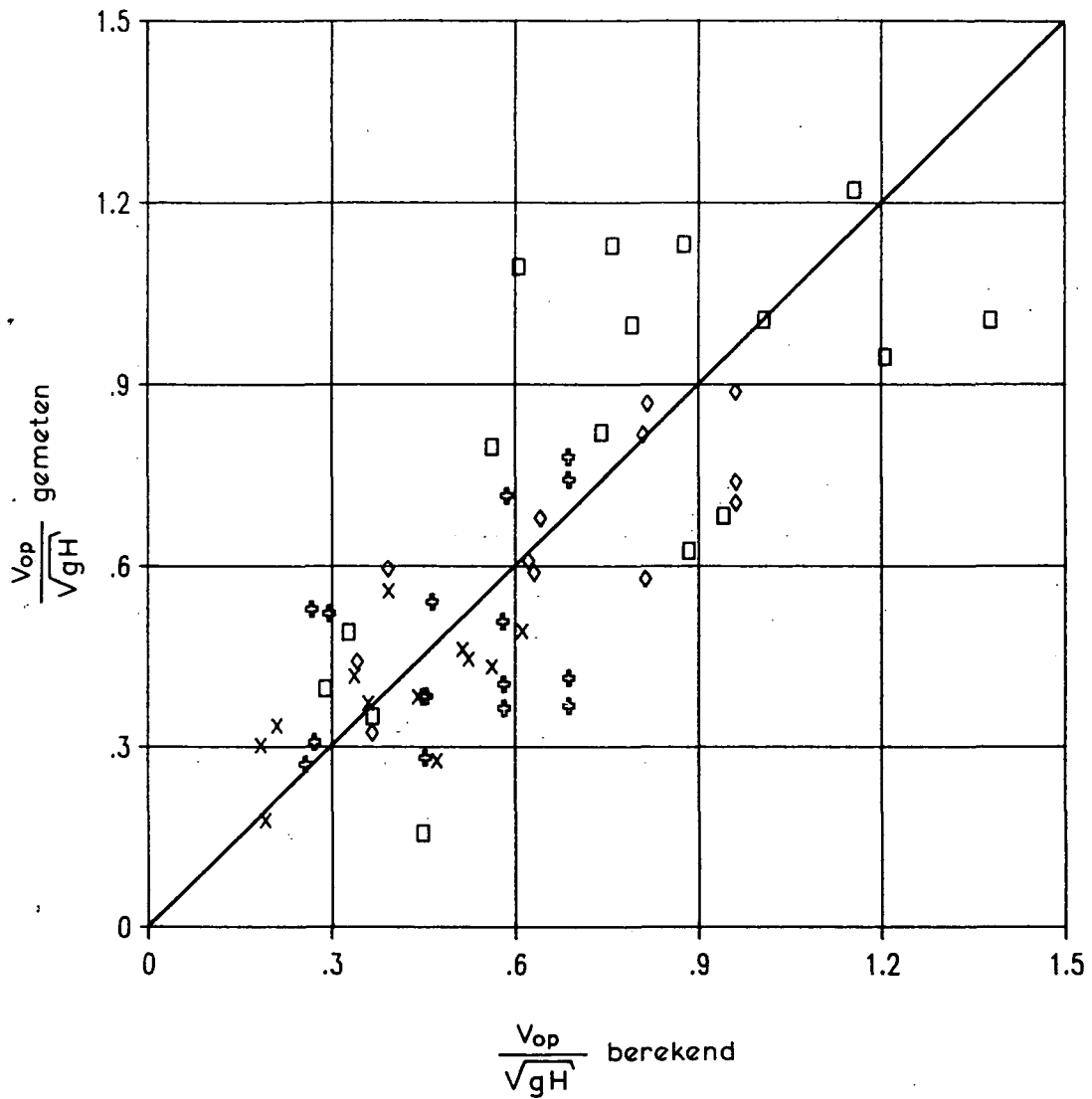
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 30



BEREKENDE EN GEMETEN NEERWAARTSE SNELHEID



cot α :

- | | | |
|---|---|---------------------------|
| □ | 3 | } h/L _o < 0.15 |
| x | 5 | |
| ◇ | 5 | } h/L _o > 0.15 |
| ⊕ | 7 | |

BEREKENDE EN GEMETEN OPWAARTSE SNELHEID

• locatie 'De Voorst'

• hoofdkantoor



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

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

