waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen

aanval van haalgolf op taludbekleding van stortsteen en zetsteen

verslag modelonderzoek

M 1115 deel Xc

086

Rijkswaterstaat
Adviesdienst Verkeer en Vervoer
Bureau Dokumentatie
Postbus 1031
3000 BA Rotterdam

C 1059

R. 5649 | DATUM 06-02-'07
SIGN. C 5255 | PRIJS FL 00,00
Bibliotheek
Hoofdkantoor v.d. Waterstaat
Koningskade 4
2596 AA 's-Gravenhage

aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen

aanval van haalgolf op taludbekleding van stortsteen en zetsteen

verslag modelonderzoek

M 1115 deel Xc

oktober 1986

INHOUD

		blz.
1.	Inleiding	1
1.1	Opdracht en probleemstelling	1
1.2	Doelstellingen	2
1.3	Het onderzoek	2
1.4	Samenvatting	4
2.	Metingen	6
2.1	Algemeen	6
2.2	Oeververdedigingskonstrukties	7
2.3	Meetinstrumenten	9
2.4	Proevenserie	10
3.	Snelheden in de haalgolf	11
3.1	Algemeen	11
3.2	Snelheidsverdelingen in de haalgolf	11
3.3	Invloed van diverse parameters op de stroomsnelheid in de haalgolf	12
3.3.1	De scheepssnelheid	12
3.3.2	Het toerental van de schroef	12
3.3.3	De taludbekleding	13
3.3.4	Diepgang van de bakken	14
3.4	Samenvatting	14
4.	Stortsteen onder aanval van de haalgolf	16
4.1	Algemeen	16
4.2	Grootte, plaats en breedte van de opgetreden schade	16
4.3	Globale relaties tussen de scheepsbeweging en de schade	17
4.3.1	Begin van verplaatsing en begin van doorgaand transport	17
4.3.2	Plaats en breedte van de opgetreden schade	19
4.3.3	De haalgolfhoogte	20
4.4	Het ontwerp van een stortsteen taludbekleding	21
4.5	Wiskundige beschouwing van het transport door de haalgolf	22
4.5.1	De bodemschuifspanning	23
4.5.2	Het transport	27
4.5.3	Berekeningen	29

INHOUD (vervolg)

4.6 Toetsing van het berekende transport aan het gemeten transport.. 30
4.7 De schuifspanningscoëfficiënt c_f..... 31
4.8 Samenvatting..... 32

5. Stabiliteit van zetsteen..... 34
5.1 Algemeen..... 34
5.2 Rekenmodel voor de waterbeweging in een filterlaag..... 35
5.3 Toetsing van het rekenmodel..... 41
5.4 Maximale opwaartse drukken..... 46
5.5 Stabiliteitsaspekten..... 51
5.6 Samenvatting..... 55

6. Aanbevelingen voor verder onderzoek..... 59

LITERATUUR

TABELLEN

FIGUREN

FOTO'S

APPENDIX 1 Drukveranderingen in een filterconstructie onder invloed van een langskomende scheepsgolf

TABELLEN

1 Overzicht van de uitgevoerde proeven

2 Schade aan stortsteen

3 Toetsing van de berekende transporten

4 Maximale stijghoogteverschillen

FIGUREN

1 Lijnenplan van de duwboot "Kristian"
2 Europa-I duwbak
3 Zeefkromme van het fijne stortsteen (D_{50} = 9,5 mm)
4 Zeefkromme van het grove stortsteen (D_{50} = 19,5 mm)
5 Overzicht van de proefvakken
6 Zeefkromme van het grind in de vlijlaag (D_{50} = 4,4 mm)
7 Dwarsdoorsneden van de proefvakken
8 Definitieschets van de haalgolf
9 Positie meetinstrumenten (stortsteen)
10 Positie meetinstrumenten (zetsteen)
11 Snelheden in de haalgolf boven de verschillende taludbekledingen (T1807)
12 Snelheden in de haalgolf boven de verschillende taludbekledingen (T1808)
13 Verdeling van de maximale snelheid; $\bar{V}$ = 0,9 V_{grens}
14 Verdeling van de maximale snelheid; $\bar{V}$ = 0,95 V_{grens}
15 Maximum snelheid in de haalgolf als funktie van scheepssnelheid in bodemruwheid
16 Maximum snelheid in de haalgolf als funktie van toerental en bodfemruwheid
17 Invloed diepgang op snelheid in de haalgolf (V = 0,9 V_{grens}); zetsteen)
18 Invloed diepgang op snelheid in de haalgolf (V = 0,95 V_{grens}); zetsteen)
19 Invloed diepgang op snelheid in de haalgolf (V = 0,9 V_{grens}); stortsteen D_{50} = 9,5 mm)
20 Invloed diepgang op snelheid in de haalgolf (V = 0,95 V_{grens}); stortsteen D_{50} = 9,5 mm)
21 Invloed diepgang op snelheid in de haalgolf (V = 0,9 V_{grens}); stortsteen D_{50} = 19,5 mm)
22 Invloed diepgang op snelheid in de haalgolf (V = 0,95 V_{grens}); stortsteen D_{50} = 19,5 mm)
23 Gemeten tgransport op het talud
24 Vergelijking gemeten transport met berekend transport volgens de gekorrigeerde relatie van Paintal
25 Positie onderkant van de schade ten opzichte van de waterspiegel
26 Transportbreedte op het talud
27 Haalgolfhoogte dichtbij de oever
28 Vergelijking drukregistraties met golfhoogtemeter registraties (T1807)

FIGUREN (vervolg)

29 Vergelijking drukregistraties met golfhoogtemeter registraties (T1808)

30 Maximum snelheid in de haalgolf als funktie van maximale spiegeldaling, bodemmateriaal en scheepssnelheid

31 Haalgolf boven stortsteen (D_{50} = 9,5 mm)

32 Stroom- en transportparameter

33 Maximale schuifspanningen en posities van de transporten voor stortsteen met D_{50} = 9,5 mm

34 Toetsing van de berekende transporten; b_g = gemeten transportbreedte

35 Toetsing van de berekende transporten; b_a = genormeerde transportbreedte

36 Absolute drukken en verschildrukken bij zetsteen op vlijlaag van split

37 Gemeten en berekende modelresultaten T 1807

38 Gemeten en berekende modelresultaten T 1807

39 Gemeten en berekende modelresultaten T 1807

40 Gemeten en berekende modelresultaten T 1807

41 Gemeten en berekende modelresultaten T 1502

42 Gemeten en berekende modelresultaten T 1504

43 Gemeten en berekende modelresultaten T 1506

44 Gemeten en berekende modelresultaten T 1508

45 Maximale verschildrukken

46 Verschildrukken in splitvak (DRO 12 - DRO 11)

47 Verschildrukken in splitvak (DRO 14 - DRO 13)

48 Verschildrukken in splitvak (DRO 16 - DRO 15)

49 Verschildrukken in het vak op houten plaat
(DRO 20 - DRO 19; DRO 22 - DRO 21; DRO 24 - DRO 23)

50 Verschildrukken in het vak op roosterwerk
(DRO 4 - DRO 3; DRO 6 - DRO; DRO 8 - DRO 7)

51 Absolute drukken en verschildrukken bij zetsteen op ondoorlatende ondergrond (houten plaat)

FOTO'S

1 De duwformatie

2 Overzicht van de proefvakken

3 Meetopstelling boven zetsteen

4 Schade aan stortsteen D_{50} = 9,5 mm (T1807; T1808)

5 Schade aan zetsteen op het roosterwerk (T1808)

SYMBOLEN

A	coëfficiënt	(-)
A_o	doorsnede van buis	(m^2)
b	transportbreedte op talud	(m)
b	dikte van de filterlaag	(m)
b'	vertikale projektie van b	(m)
b_a	genormeerde transportbreedte	(m)
b_g	gemeten transportbreedte	(m)
D	diameter van buis	(m)
D_{50}	korreldiameter, die door 50% van het materiaalwordt overschreden	(m)
D_f	karakteristieke korreldiameter van filtermateriaal	(m)
d	dikte van de zetsteen toplaag	(m)
D_n	nominale korreldiameter	(m)
G_{50}	korrelgewicht, dat door 50% van het totaal materiaal-gewicht wordt onderschreden	(kg)
g	versnelling van de zwaartekracht	($m.s^{-2}$)
h	waterdiepte	(m)
k	doorlatendheid van de filterlaag	($m.s^{-1}$)
k_b	doorlatendheid van één opening	($m.s^{-1}$)
k'	doorlatenheid van de toplaag	($m.s^{-1}$)
L	afstand waarover bodemschuifspanning werkt	(m)
ℓ	lengte van buis	(m)
n	aantal korrels dat een grens passeert	(-)
p	druk	($N.m^{-2}$)
p_b	druk op bovenkant van de toplaag	($N.m^{-2}$)
p_o	druk op onderkant van de toplaag	($N.m^{-2}$)
q	debiet per eenheid van breedte in de filterlaag	($m^2.s^{-1}$)
q_s	transport per eenheid van breedte	($m^2.s^{-1}$)
R	weerstand	(s/m^2)
r	zijde van zetsteen	(m)
s	zijde van opening	(m)
S	coëfficiënt voor elastische berging	(-)
t	tijd	(s)
u	snelheid in x-richting	($m.s^{-1}$)
$\bar{u}$	over de vertikaal gemiddelde snelheid in x-richting	($m.s^{-1}$)

SYMBOLEN (vervolg)

u_{max}	maximaal optredende snelheid in de haalgolf	$(m.s^{-1})$
u_s	snelheid in x-richting aan wateroppervlak	$(m.s^{-1})$
u_t	filtersnelheid door toplaag	$(m.s^{-1})$
V	vaarsnelheid	$(m.s^{-1})$
V_{grens}	grenssnelheid volgens Schijf	$(m.s^{-1})$
w	snelheid in z-richting	$(m.s^{-1})$
w_s	snelheid in z-richting aan wateroppervlak	$(m.s^{-1})$
x	horizontale lengtekoördinaat	(m)
y	horizontale lengtekoördinaat	(m)
y_f	positie van de waterspiegel in de filterlaag	(m)
y_w	positie van de waterspiegel in het kanaal	(m)
Y_{schade}	afstand van waterlijn tot onderkant van de schade langs het talud	(m)
Y'_{schade}	vertikale projektie van Y_{schade}	(m)
Y'	vertikale afstand van een punt op het talud tot de ongestoorde waterspiegel	(m)
z	vertikale lengtekoördinaat	(m)
z_{max}	maximale spiegeldaling/haalgolfhoogte	(m)
z_{Schijf}	spiegeldaling volgens Schijf	(m)
α	coëfficiënt; taludhelling	(-);(°)
β	vergrotingsfaktor voor opwaartse drukkracht	(-)
Δ	relatieve dichtheid $\frac{\rho_s-\rho}{\rho}$	(-)
$\Delta\phi$	stijghoogteverschil	$(N.m^{-2})$
ε	porositeit	(-)
λ	leklengte	(m)
η	viscositeit	$(kg.m^{-1}.s^{-1})$
ϕ	transportparameter	(-)
$\bar{\phi}$	gemiddelde transportparameter	(-)
ϕ_b	stijghoogte aan bovenkant van de toplaag	(m)
ϕ_f	stijghoogte in filterlaag	(m)
ψ	schuifspanningsparameter	(-)
$\bar{\psi}$	gemiddelde schuifspanningsparameter	(-)
ρ	dichtheid van water	$(kg.m^{-3})$
ρ_b	dichtheid van betonnen blokjes	$(kg.m^{-3})$
ρ_s	dichtheid van stortsteen	$(kg.m^{-3})$

SYMBOLEN (vervolg)

ρ_t	dichtheid van trovidur	$(kg.m^{-3})$
τ	schuifspanning	$(N.m^{-2})$
τ_b	bodemschuifspanning	$(N.m^{-2})$

AANTASTING VAN DWARSPROFIELEN IN VAARWEGEN

Aanval van haalgolf op taludbekleding van stortsteen en zetsteen

1. Inleiding

1.1 Opdracht en probleemstelling

Voor een verantwoorde berekening van de stabiliteit van oever- en bodemverdedigingen ontbreekt een voldoende kennis van de waterbeweging door scheepvaart en de daaraan gekoppelde eroderende werking van die waterbeweging. Mede in verband met deze gekonstateerde leemte in de vereiste kennis werd door de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst, Rijkswaterstaat, besloten het Waterloopkundig Laboratorium een systematisch onderzoek naar de aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen op te dragen.

Voor de motivering van de opdracht tot het systematisch onderzoek wordt verwezen naar verslag M 1115, deel I [1]. In dat verslag is tevens het onderzoek naar de oeververdediging in de Schelde-Rijnverbinding beschreven. De opdracht tot het uitvoeren van een systematisch onderzoek is nader uitgewerkt tijdens een bespreking op 13 juli 1972 in het Laboratorium de Voorst, naar aanleiding van een door het Waterloopkundig Laboratorium op 14 februari 1972 toegezonden programma. Dat programma is sindsdien regelmatig in overleg met de opdrachtgever geaktualiseerd.
Het onderzoek kan globaal in de volgende onderwerpen worden onderverdeeld:

- Algemene beschrijving van de primaire waterbeweging, die door een schip op beperkt vaarwater wordt veroorzaakt, met één, twee en wellicht met driedimensionale mathematische modellen. Deze mathematische modellen worden getoetst aan uitvoerige metingen, die in fysisch modelonderzoek worden verricht.
- Afzonderlijke aspekten van deze waterbeweging, die in detail worden bestudeerd, zoals haalgolf en volgstroom, schroefstraal, retourstroom en secundaire scheepsgolven.
- Erosie en stabiliteit in het algemeen en van verschillende typen oeververdedigingskonstrukties.
- Diverse aspecten, zoals bijvoorbeeld vermogen-snelheidsrelaties, ontmoeten en oplopen van schepen.

Tenslotte worden op grond van het inzicht in bovengenoemde onderwerpen aanbevelingen gedaan voor ontwerpregels van oever- en bodemverdedigingskonstrukties.
In het onderhavige verslag wordt het deelonderzoek behandeld, dat in juni en juli 1981 is verricht ter verkrijging van meer inzicht in de aantasting en stabiliteit zowel van zetsteen als van stortsteen oeververdedigingskonstrukties onder aanval van de haalgolf en de volgstroom. De haalgolf vormt de achterste begrenzing van het waterspiegeldalingsgebied boven het talud die door een volgstroom wordt gevolgd.
Dit deelonderzoek is opgezet, voorbereid en uitgevoerd door ir. F.C.M. van der Knaap, die tevens dit verslag samenstelde. De analyse van de druksignalen ter plaatse van de zetsteenkonstrukties werd verricht in samenwerking met ir. M.T. de Groot van het Laboratorium van Grondmechanica. De algehele leiding van het onderzoek "Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen" wordt verzorgd door ir. F.C.M. van der Knaap.

1.2 Doelstellingen

De doelstellingen van het huidige deelonderzoek zijn als volgt geformuleerd:

1. Het opstellen van ontwerpregels, die minstens toepasbaar zijn onder vergelijkbare kondities als die van de modelproeven.
2. Het toetsen van een wiskundig model ter bepaling van de stabiliteit en/of aantasting van stortsteen oeverbekledingen aan de uit de proeven verkregen meetgegevens.
3. het verwerven van inzicht in het optredende schademechanisme in geval van een zetsteen oeverbekleding.
4. Het verwerven van inzicht in de invloed van de aanwezigheid van een doorlatende vlijlaag op de stabiliteit van de zetsteen toplaag.

1.3 Het onderzoek

Het fysisch modelonderzoek is verricht in de bestaande scheepvaartfaciliteit van het Laboratorium de Voorst met het model van de Schelde-Rijnverbinding als vaarweg. (voor details wordt verwezen naar verslag deel I). De lengteschaal van dit niet samengetrokken model is 1:25. De doelstellingen van het huidige onderzoek hebben echter geleid tot het gebruik van een grotere lengteschaal. De redenen hiervoor zijn:

- de wens om bij het gebruik van stortsteen de verplaatsing van individuele korrels op foto en film te kunnen onderscheiden,
- het elimineren van de viscositeitsinvloed op het begin van verplaatsing van stortsteen. Deze eis leidt tot $Re_* > 600$ ofwel $D_{model} > 7$ à 10 mm,
- de mogelijkheid tot registratie van drukken aan onder- en bovenkant van zetstenen. Voor een minimale dimensionering van de in het model te gebruiken zetsteen diende uitgegaan te worden van de afmetingen van de speciaal aangeschafte drukopnemers (15x15x15 mm^3). Een lengteschaal van 1:25 zou een zetsteendikte van ca. 0,4 m in prototype betekenen, hetgeen in de praktijk onrealistisch groot is. Een grotere lengteschaal is dus vereist.
- de mogelijkheid tot goede snelheidsregistraties in de haalgolf op het talud. De minimale haalgolfhoogte op het talud dient hiertoe van dezelfde orde van grootte te zijn als de diameter van de micromolen (beugeldiameter van 30 mm).

Daar het Laboratorium schaalmodellen van Europa-I bakken en bijbehorende duwboot met schaalfaktor 1:10,5 in voorraad heeft, werd besloten deze lengteschaal voor het voorliggende onderzoek te hanteren. Hierbij dient men zich echter te realiseren,dat er aan deze lengteschaal in het huidige model enkele bezwaren kleven. Met name worden hier genoemd de grotere aanlooplengte en de grotere voortplantingssnelheid van de opgewekte translatiegolf, die niet volledig wordt gedempt aan het eind van de goot en bijgevolg voor een groot gedeelte wordt teruggekaatst. Beide effekten hebben tot gevolg een kleinere lengte van de meetsektie, waarin de waterbeweging rondom het schip representatief voor het prototype is.

In hoofdstuk 2 wordt een gedetailleerde beschrijving gegeven van de in het model aangebrachte oeververdedigingskonstrukties en de positie van de meetinstrumenten. In dit hoofdstuk wordt tevens ingegaan op de geplande proevenserie. In hoofdstuk 3 wordt een analyse gegeven van de in de haalgolf optredende stroomsnelheden. Voorts worden in hoofdstuk 4 met behulp van dimensie analyse enkele praktische ontwerpregels voor een stortsteen oeverbekleding in de zone van de haalgolf opgesteld. Tevens wordt in dit hoofdstuk een wiskundige beschouwing gegeven van de stabiliteit en/of aantasting van de stortsteen oeverbescherming, indien de dimensies van de optredende haalgolf bekend zijn. De betrouwbaarheid van dit wiskundige model wordt getoetst aan de meetgegevens. In hoofdstuk 5 wordt een analyse gegeven van de drukmetingen en de opgetreden

schade ter plaatse van de verschillende zetsteen oeverkonstrukties. Tevens zullen de opwaarts gerichte verschildrukken over de toplaag worden getoetst aan een rekenmodel. In hoofdstuk 6 worden tenslotte enkele aanbevelingen voor eventueel voort te zetten onderzoek gedaan.

1.4 Samenvatting

Met behulp van modelproeven is een onderzoek verricht naar het schade veroorzakende mechanisme van de haalgolf op verschillende typen oeververdedigingskonstrukties. In het model werden 5 proefvakken aangelegd, waarvan 2 proefvakken een toplaag van stortsteen en 3 proefvakken een toplaag van zetsteen hadden. Tijdens de proeven werd met een brede formatie duweenheid (2 europa-I bakken) dicht langs het talud gevaren. Gedurende een scheepspassage werden de watersnelheden in - en de dimensies van de opgewekte haalgolf geregistreerd boven de verschillende typen konstrukties. Tevens werden de drukken op en onder de toplaag bepaald. Voor deze registraties werd gebruik gemaakt van micromoles, golfhoogtemeters en drukopnemers. Ten behoeve van simultane registraties van de drukopbouw boven en onder een zetsteen werden in enkele geselekteerde zetstenen aan de onder- en bovenkant drukopnemers ingebouwd. De geregistreerde signalen zijn vervolgens geanalyseerd.

De analyse heeft geleid tot ontwerpcriteria van een oeverbestorting voor zowel de grootte van het toe te passen stortsteen als de onderste begrenzing hiervan op het talud. Bovendien is uit de gemeten signalen en de kontinuïteitsvergelijking voor het water in de haalgolf een relatie afgeleid tussen enerzijds de maximaal optredende snelheid in het water en anderzijds de scheepssnelheid, de haalgolfhoogte en het stortsteenmateriaal.

In dit verslag is tevens een toetsing uitgevoerd van een wiskundig model ter voorspelling van het materiaal transport door de haalgolf aan de hand van de gemeten haalgolfdimensies. De indruk bestaat, dat een koppeling van dit model aan een model, ter berekening van de haalgolfdimensies op het talud, een gedetailleerde dimensionering van een stortsteenbekleding mogelijk maakt.

Ten aanzien van de zetsteen verdedigingen wordt een wiskundig model gepresenteerd ter berekening van de opwaartse druk op de toplaag. Dit model lijkt voor een groot gedeelte van het talud een veilige waarde voor de opwaartse druk te

kunnen voorspellen. Echter rondom de waterlijn werden in één proefvak (trovidur op split) plaatselijk zeer hoge drukpieken (tot ca. 500% groter dan berekend) gemeten. In appendix 1 is getracht dit verschijnsel fysisch te verklaren met een geschematiseerde, wiskundige aanpak. Deze aanpak heeft echter niet tot een oplossing van het probleem geleid. Anderzijds is de mogelijke invloed van schaaleffekten, zoals het ontbreken van een doorlatende ondergrond en de beperkte lengte van de drie proefvakken, onderzocht. Hoewel de indruk bestaat, dat modeleffekten een invloed hebben gehad op het komplete karakter van de drukopbouw onder de zetstenen, wordt aanbevolen het verschijnsel van de hoge gekonstateerde drukpieken vanuit dimensioneringsoogpunt nader te onderzoeken.

2. Metingen

2.1 Algemeen

De proeven werden uitgevoerd met een niet-vrij varende duweenheid die beschikte over eigen voortstuwing in het model van de Schelde-Rijn verbinding. Voor een gedetailleerde geometriebeschrijving van het model wordt verwezen naar verslag deel I. Voor de verwerking van de meetresultaten worden in dit verslag de modelmaten gehanteerd.
In de figuren 1 en 2 zijn de lijnenplannen van respektievelijk de duwboot (Kristian) en de duwbak (Europa I-bak) gegeven. De maten hierbij zijn in prototypematen vermeld. Foto 1 geeft een indruk van de duwformatie in het model. In onderstaande tabel wordt een overzicht van kanaal- en scheepsgeometrieën in zowel modelmaten als prototypematen (schaal 1:10,5) gegeven.

kanaal en scheepsgeometrieën	model	prototype
bodembreedte kanaal	4,80 m	50,40 m
lengte kanaal	76,00 m	n.v.t.
maximale waterdiepte	0,40 m	4,20 m
taludhelling	1:4	1:4
breedte Europa I-bak	0,90 m	9,45 m
lengte Europa I-bak	6,67 m	70,00 m
maximale diepgang Europa I-bak	0,30 m	3,20 m
breedte duwboot	0,95 m	10,00 m
lengte duwboot	3,62 m	38,00 m
diepgang duwboot	0,17 m	1,80 m

De relatief grote modelafmetingen van zowel de duwbakken als de duwboot ten opzichte van de faciliteitslengte beperkten de duwformatie tot maximaal 1 duwbaklengte. Voor de proeven is een brede formatie van 2x1 gehanteerd. Dit betekende voor de meetsektie, dat er slechts een lengte van ca. 25 m maximaal beschikbaar was. Deze lengte wordt bepaald door de zogenaamde aanlooplengte (ca. 3x de scheepslengte) vóór de meetsektie en de uitlooplengte (ca. 2x de scheepslengte) na de meetsektie. Bij deze indeling ligt tevens het ontmoetingspunt van de teruggekaatste translatiegolf en de duweenheid in het gebied van de uitlooplengte.

2.2 Oeververdedigingskonstrukties

Zoals vermeld in de inleiding, staat bij het huidige onderzoek centraal het schade-veroorzakende mechanisme in de haalgolf/taludvolgstroom op de verschillende typen oeververdedigingskonstrukties.
Een groot deel van de in Nederland voorkomende typen oeververdedigingskonstrukties heeft een toplaag van stortsteen of zetsteen.
De onder de toplaag voorkomende konstrukties zijn veelvuldig; hiervan zijn de filterlagen (bij stortsteen) en de vlijlaag (bij gezette steen) de belangrijkste. Bovendien kan de ondergrond van de oeververdedigingskonstrukties bestaan uit doorlatend (zand) of nagenoeg ondoorlatend materiaal (klei). Vanwege de beperkte lengte van de meetsektie in het model is besloten een tweetal stortsteen konstrukties en een drietal zetsteen konstrukties te onderzoeken, waarbij de ondergrond werd gevormd door het betonnen talud en hierdoor te beschouwen is als ondoorlatend.

De stortsteen konstrukties in het model worden gerepresenteerd door 2 proefvakken van elk 4 m lengte en een laagdikte van 3,5 cm op het betonnen talud. De samenstelling van het korrelmateriaal was voor beide proefvakken verschillend met het doel, het effekt van de ruwheid op de waterbeweging en op de vorm van de haalgolf te kunnen vastleggen. De dimensionering van het materiaal geschiedde op basis van de eis, dat zowel begin van verplaatsing als begin van doorgaand transport zou optreden, teneinde het berekende transport te toetsen aan het gemeten transport. Met behulp van een aantal principe-proeven is de mediane diameter D_{50} voor beide proefvakken bepaald. Hierbij wordt opgemerkt, dat in de praktijk gebruik gemaakt wordt van de nominale diameter D_n $[=(^{6}/_{\pi} \cdot {}^{G_{50}}/_{\rho_s})^{1/3}]$ In verslag M 1115-X-B [2] wordt uitvoerig ingegaan op de relatie tussen D_{50} en D_n. In de figuren 3 en 4 zijn de zeefkrommen van de gebruikte materialen gegeven. Voor het proefvak met het "grove" stortsteen bedraagt de D_{50} 19,5 mm, terwijl de D_{50} van het "fijne" stortsteen een grootte heeft van 9,5 mm. De volgorde in ligging van de proefvakken op het talud word bepaald door de ruwheid van de toplaag. Er werd vanuit gegaan, dat de waterbeweging zich sneller aanpast aan de veranderde omstandigheden bij een geleidelijke overgang van glad naar ruw materiaal.
Dit betekende, dat in de vaarrichting het proefvak met het fijne stortsteen vóór het proefvak met het grove stortsteen werd geplaatst. De proefvakken werden elk nog eens onderverdeeld in sekties van 2 m lengte. De eerste sektie (in

vaarrichting) diende als aanpassingslengte voor de haalgolf. De tweede sektie wordt bestemd voor transportwaarnemingen. Hiertoe werden in deze sektie 5 dwarsbanen met een breedte van 40 cm in verschillende kleuren aangelegd, met het doel na elke vaart visueel (foto's) te bepalen:

- het aantal verplaatste steentjes vanuit het ene naar het andere vak;
- de richting van de verplaatsingen;
- de plaats en de breedte van het transport op het talud.

Foto 2 geeft een overzichtsbeeld van de op het talud aangebrachte oeververdedigingen. Op de achtergrond zijn duidelijk de 2 proefvakken met stortsteen zichtbaar. Als ondersteuning voor foto 2 zijn in figuur 5 de relevante gegevens ten aanzien van de proefvakken in kaart gebracht.

De zetsteen konstrukties in het model werden verdeeld over 3 proefvakken met elk een lengte van 3 m. De toplagen van deze 3 konstrukties werden opgebouwd uit identieke blokjes met afmetingen van 30x30x15 mm^3, die gezaagd werden uit platen trovidur. Het materiaal trovidur werd gekozen vanwege de gemakkelijke verwerkbaarheid en het feit, dat bij de lage soortelijke massa van trovidur (ρ_t = 1380 kg/m^3) schade zou optreden bij de geplande proeven in tegenstelling tot de hoge soortelijke massa van betonnen blokjes (ρ_b = 2650 kg/m^3). Bovendien werd verondersteld, dat het karakter van het schade-veroorzakende mechanisme onafhankelijk is van het soort (dichtheid) zetsteenmateriaal. De verschillen in de typen konstruktie werden gevormd door de "vlijlaag", liggend tussen de toplaag en het betonnen talud (dikte 20 mm). Ter verkrijging van enig inzicht in de invloed van de doorlatendheid van een dergelijke laag op het schde-veroorzakende mechanisme werden in de achtereenvolgende proefvakken lagen aangebracht, bestaande uit:

- ondoorlatend materiaal; in het model werd hiertoe in dit proefvak een houten plaat van 20 mm dikte op het talud bevestigd;
- doorlatend materiaal; hiervoor werd fijn grind genomen met een karakteristieke korreldiameter (D_{50}) van 4,4 mm (de zeefkromme is weergegeven in figuur 6) en een laagdikte van 20 mm;
- "oneindig doorlatend materiaal", in dit geval werd de toplaag op een grofmazig roosterwerk gelegd zódanig, dat er een vrije ruimte overbleef tussen toplaag en betonnen talud. Deze konstruktie moet beschouwd worden als een extreem in de doorlatendheid en is daarom slechts van theoretische waarde.

De ligging van de proefvakken in het model werd bepaald door de doorlatendheid van de zogenaamde "vlijlaag" en wel zodanig, dat in de vaarrichting de door-

latendheid afneemt. De reden hiervoor is, dat een zich onder de toplaag voortplantende drukgolf zich zo geleidelijk mogelijk kan aanpassen aan de in het betreffende proefvak heersende omstandigheden.
Aan het begin van de proefvakken werd een plaat trovidur van 2 m lengte gelegd, met de bovenkant hiervan aansluitend bij de bovenkant van de zetsteen konstrukties. Deze plaat diende als aanlooplengte tot het eerste zetsteen proefvak, daar er een zekere lengte nodig is voor de haalgolf om zich aan een plotselinge verhoging van het talud aan te passen. Overzichtsfoto 2 geeft een totaalbeeld van de zetsteen konstrukties in het model. Ter oriëntatie wordt vermeld, dat de lengte van het proefvak met de doorlatende laag (D_{50} = 4,4 mm) geheel bepaald wordt door de lengte van het grijze vlak. Als ondersteuning voor foto 2 wordt verwezen naar figuur 5 met alle relevante gegevens ten aanzien van de zetsteen konstrukties.
In figuur 7 worden de stortsteen en zetsteen konstrukties in beeld gebracht door middel van een doorsnede loodrecht op de as van het kanaal.

2.3 Meetinstrumenten

Gezien de doelstelling van het huidige onderzoek (zie hoofdstuk 1) was er een drietal typen meetinstrumenten nodig, te weten:

1. micromolens voor de registratie van de snelheden in de haalgolf op het talud,
2. golfhoogtemeters om de vorm van de haalgolf vast te leggen, en
3. drukopnemers ter registratie van drukken aan onder- en bovenkant van individuele zetstenen.

De plaats van de meetinstrumenten werd bepaald door de breedte van de haalgolf op het talud en de afmetingen van de instrumenten zelf. Uit enkele metingen van stroomsnelheden in de haalgolf is gebleken, dat de breedte van de haalgolf op het talud zich uitstrekt van de waterlijn tot een punt, overeenkomend met ca. 2x de waterspiegeldaling (zie figuur 8). Bij hoge vaarsnelheden (ca. 95% van de grenssnelheid volgens Schijf) liep deze breedte op tot 0,40 à 0,50 m bij een waterspiegeldaling van 5 à 6 cm. De afmetingen van de micromolens (beugeldiameter van 3 cm) maakten het niet mogelijk om metingen tot op de waterlijn te verrichten. Daarnaast moesten de micromolens steeds onder water zitten. Door de afmetingen van de golfhoogtemeters en de beperkte ruimte onder de meetwagen konden er slechts golfhoogtemeters buiten de "breedte van de haalgolf" geplaatst worden. Echter de geringe afmetingen van de drukopnemers

maakten het mogelijk om zeer hoog op het talud de bodemdrukken onder de haalgolf te registreren.
Uit principe-proeven was gebleken, dat in de haalgolf het signaal van een golfhoogtemeter (d.w.z. waterspiegelhoogte) goed overeenkwam met dat van een drukopnemer (d.w.z. druk aan bovenzijde talud). Hierdoor kon de vorm van de haalgolf gedetailleerd worden vastgelegd.
In figuur 9 zijn de posities van de meetinstrumenten ter plaatse van één stortsteen proefvak aangegeven (voor beide vakken gold dezelfde opstelling). Voor de zetsteen proefvakken is in figuur 10 een overzicht van de posities van de meetinstrumenten aan de hand van één proefvak aangegeven. De micromolens komen hier alleen voor boven het zetsteen vak op de ondoorlatende laag. Foto 2 geeft een overzicht van de plaats van de micromolens en golfhoogtemeters op het talud. Foto 3 is een detailopname van de meetopstelling ter plaatse van het zetsteen proefvak op de ondoorlatende laag.
In totaal werd gebruik gemaakt van:

- 10 micromolens,
- 4 golfhoogtemeters, en
- 30 drukopnemers.

De signalen van alle meetinstrumenten werden gedurende één vaart tegelijkertijd bemonsterd met een frekwentie van 25 Hz per signaal. De opgeslagen meetgegevens werden met behulp van speciaal geschreven programmatuur omgewerkt van tijdsbasis naar plaatsbasis (scheepsvast). Dit heeft het voordeel, dat alle signalen direkt met elkaar vergelijkbaar zijn.

2.4 Proevenserie

In het model is gevaren met een duwformatie van 2 bakken naast elkaar, zódanig dat de stuurboordzijde recht boven de teen van het talud voer. In de proevenserie werden de waterdiepte, diepgang van de bakken en de scheepssnelheid gevariëerd. De positie van de formatie in de vaarweg is vooralsnog niet gevarieerd. Gekozen is voor 3 verschillende waterdiepten. Per waterdiepte werden 3 diepgangen van de bakken ingesteld en werd achtereenvolgens met een scheepssnelheid van 75, 85, 90 en 95% van de grenssnelheid volgens Schijf [3] gevaren.
Hierbij dient opgemerkt te worden, dat elke vaart herhaald werd om een indruk te hebben van de reproduceerbaarheid. In tabel 1 zijn alle relevante gegevens ten aanzien van de metingen (in totaal 76 vaarten) opgenomen.

3. Snelheden in de haalgolf

3.1 Algemeen

Met behulp van enkele principe-proeven, voorafgaand aan de definitieve proevenserie, is de positie van de micromolens bepaald. De figuren 9 en 10 laten zien, dat de micromolens dichtbij de bodem geplaatst zijn. De afstand tot de bodem is voor alle micromolens hetzelfde en wel 15 mm (de helft van de beugeldiameter). Deze positie is gekozen, omdat gebleken is, dat de grootste snelheden in de haalgolf optraden vlakbij de bodem. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de verdeling van de snelheden in de haalgolf en de invloed van diverse parameters op de maximaal optredende snelheid in de haalgolf.

3.2 Snelheidsverdelingen in de haalgolf

In de figuren 11 en 12 zijn registraties van de snelheden ter plaatse van beide stortsteenvakken en het zetsteenvak weergegeven. Hiervoor zijn de vaarten T1807 ($V = 0{,}90\ V_{grens}$) en T1808 ($V = 0{,}95\ V_{grens}$) gekozen.
Beide figuren geven een indruk van de snelheidsverdelingen in axiale en laterale richting in een haalgolf op het talud. Per grafiek zijn drie snelheidsregistraties, behorend bij één proefvak, opgenomen. Uit de grafieken valt te bespeuren, dat elke snelheidsverdeling een maximum heeft. Ter verkrijging van een indruk van de verdeling van de maximale snelheden op het talud in een richting, loodrecht op de as van het kanaal, wordt verwezen naar de figuren 13 en 14. In deze figuren zijn de uitgezette waarden de gemiddelden van de vaarten met een scheepssnelheid van respektievelijk ca. 90% en 95% van de grenssnelheid volgens Schijf [3] (zie paragraaf 2.4). Tevens is in de figuren 13 en 14 ter oriëntatie de gemiddlede maximale spiegeldaling aangegeven. Bij de vaarten met een scheepssnelheid van ca. 90% van de grenssnelheid volgens Schijf (zie figuur 13) vertonen de snelheidsverdelingen over het algemeen een maximum nabij de lijn van de maximale spiegeldaling (deze lijn is de waterlijn door het diepste punt van de achterste begrenzing van de spiegeldalingskuil; zie figuur 8). Een relatief sterke daling in de snelheden treedt op onder de lijn van de maximale spiegeldaling in de richting naar de kanaalas toe. Bij de vaarten met een scheepssnelheid van ca. 95% van de grenssnelheid volgens Schijf [3] hebben de twee bovenste micromolens op het talud (onderlinge afstand is 1,5 à 2 maal de haalgolfhoogte) over het algemeen een snelheid van

dezelfde ordegrootte geregistreerd (zie figuur 14). In de meeste gevallen trad de maximum spiegeldaling bij deze vaarten op tussen de twee bovenste micromolens. Over het algemeen treedt een (lichte) daling op in de snelheidsverdeling tussen de middelste en de onderste micromolen (figuur 14).
Uit de snelheidsregistraties kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. de maximale snelheden in de haalgolf treden op dichtbij de bodem rondom de lijn van de maximale spiegeldaling,
2. bij hoge vaarsnelheden ($V > 0,9\ V_{grens}$) hebben de snelheden in de haalgolf dezelfde orde grootte rondom de lijn van de maximale spiegeldaling over een afstand van ca. 1,5 à 2 maal de haalgolfhoogte in de richting loodrecht op de kanaalas; de waterbeweging in de haalgolf op het talud lijkt axiaal gericht te zijn,
3. de breedte van de haalgolf op het talud neemt toe bij groter wordende scheepssnelheden.

3.3 Invloed van diverse parameters op de stroomsnelheid in de haalgolf

3.3.1 De scheepssnelheid

In de grafiek van figuur 15 is van elke vaart de maximaal in een dwarsraai geregistreerde snelheid achter het hek van de bakken uitgezet tegen de scheepssnelheid. Beide grootheden zijn dimensieloos gemaakt door te delen door respektievelijk de scheepssnelheid en de grenssnelheid volgens Schijf.
Duidelijk blijkt, dat zowel de spreiding als de grootte van de stroomsnelheid sterk afhankelijk is van de scheepssnelheid. Bij een vaarsnelheid van 75% van de grenssnelheid treden snelheden in de haalgolf op met een grootte van 10 tot 40% van de scheepssnelheid. Bij vaarsnelheden van ca. 95% van de grenssnelheid zijn snelheden in de haalgolf geregistreerd met een grootte van 40 tot 150% van de scheepssnelheid. Door de groote van de spreiding wordt duidelijk geïllustreerd, dat de stroomsnelheid in de haalgolf niet alleen afhankelijk is van de scheepssnelheid. In paragraaf 4.5 wordt hierop uitgebreid teruggekomen.

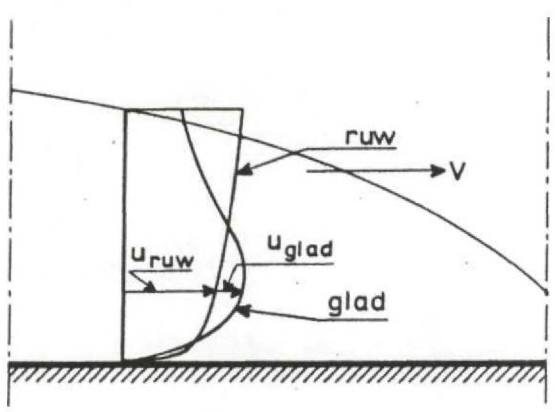
3.3.2 Het toerental van de schroef

In figuur 16 is een grafiek opgenomen, waarin voor alle waarnemingen de maximale snelheid in de haalgolf dimensieloos (gedeeld door de vaarsnelheid) is

uitgezet tegen het toerental van de schroef. De conclusies ten aanzien van de scheepssnelheid (par. 3.3.1) gelden evenzeer ten aanzien van het toerental, daar er een direkt verband bestaat tussen beide parameters.

3.3.3 De taludbekleding

Eveneens is uit figuur 15 de invloed van de ruwheid van de taludbekleding op de maximaal optredende snelheid in de haalgolf te bepalen. Met behulp van verschillende coderingen is een onderscheid gemaakt in waarnemingen boven de zetsteenbekleding (trovidur) en de stortsteenbekledingen (respektievelijk met een D_{50} van 9,5 en 19,5 mm). Bij de hogere vaarsnelheden (90 à 95% van de grenssnelheid) treden er boven de stortsteenbekledingen maxima op tot 1 à 1,2 maal de scheepssnelheid, terwijl de maxima boven de zetsteenbekleding bij dergelijke hoge vaarsnelheden kunnen oplopen tot ver boven de scheepssnelheid (er zijn snelheden tot 1,5 à 1,6 maal de scheepssnelheid gemeten).
De conclusie is, dat bij hoge vaarsnelheden (> 85% van de grenssnelheid) de maximale snelheid in de haalgolf sterk beïnvloed wordt door de ruwheid van het talud, zódanig, dat bij toenemende ruwheid en dezelfde vaarsnelheid de maximale snelheid in de haalgolf afneemt. Dit effekt kan veroorzaakt worden door een verschil in de vorm van het snelheidsprofiel als gevolg van de ontwikkeling van de grenslaag, zoals in onderstaande schets is weergegeven.



principeschets van snelheidsprofielen in de haalgolf

Uit de principeschets volgt, dat de snelheid op korte afstand van de bodem boven een gladde wand groter is dan boven een ruwe wand.

3.3.4 Diepgang van de bakken

Ter bepaling van de invloed van de diepgang van de bakken op de stroomsnelheden in de haalgolven, opgewekt door zowel de bakken als de duwboot, zijn in de grafieken van de figuren 17 t/m 22 op de vertikale assen de maximaal geregistreerde snelheden in de haalgolven dimensieloos uitgezet (de snelheden zijn gedeeld door de scheepssnelheid), terwijl op de horizontale as de diepgang van de bakken gedeeld door de diepgang van de duwboot (0,17 m) is uitgezet.
Uit de snelheidsregistraties werden de maxima tussen het hek van de bakken en de duwboot (haalgolf, opgewekt door de bakken) èn achter de duwboot (haalgolf, opgewekt door de duwboot) bepaald en uitgezet in de grafieken (figuren 17 t/m 22). Van alle toestanden (zie tabel 1) zijn de resultaten van de twee hoogste vaarsnelheden (ca. 90% en 95% van de grenssnelheid) gebruikt, omdat hierbij grote snelheden in de haalgolven optraden. Per grafiek is een onderscheid gemaakt in de vaarsnelheid en de taludbekleding. Geconcludeerd wordt, dat voor alle situaties geldt, dat:

- bij toenemende diepgang de maximale snelheid in de haalgolf van de bakken relatief toeneemt ten opzichte van de scheepssnelheid,
- bij toenemende diepgang de maximale snelheid in de haalgolf van de duwboot relatief afneemt ten opzichte van de scheepssnelheid,
- indien de diepgang van de bakken kleiner is dan de diepgang van de duwboot (bijvoorbeeld ongeladen bakken,) de grootste snelheden in de haalgolf van de duwboot optreden,
- bij grote diepgangen van de duwbakken ($T_{bak} > T_{boot}$) de snelheden in de haalgolf van de bakken het grootst zijn, en
- bij een ongeveer gelijke diepgang van de bakken en de duwboot de snelheden in beide haalgolven van dezelfde ordegrootte zijn.

3.4 Samenvatting

Uit de stroomsnelheidsmetingen in de haalgolf zijn de volgende conclusies getrokken:

- de maximale snelheden in de haalgolf treden op dichtbij de bodem rondom de lijn van de maximale spiegeldaling, boven het talud;
- de snelheden in de haalgolf bij vaarsnelheden groter dan 0,9 V_{grens} hebben dezelfde orde van grootte over een breedte van 1,5 à 2 maal de haalgolfhoogte rondom de lijn van de maximale spiegeldaling op het talud;

- de breedte van de haalgolf op het talud neemt toe bij groter wordende scheepsnelheden;
- de grootte van de snelheid in de haalgolf en de spreiding hierin nemen toe bij het opvoeren van de scheepssnelheid; bij een vaarsnelheid van 75% van de grenssnelheid volgens Schijf [3] zijn er snelheden tussen 10 en 40% van de vaarsnelheid geregistreerd, terwijl bij een vaarsnelheid van 95% van de grenssnelheid de snelheden in de haalgolf kunnen oplopen van 40 tot 150% van de vaarsnelheid;
- bij hoge vaarsnelheden (85% van de grenssnelheid) treden er grotere snelheden in de haalgolf op boven een "glad" talud dan boven een "ruw" talud; boven de zetsteenbekleding (glad) zijn snelheden in de haalgolf gemeten tot 1,5 à 1,6 maal de scheepssnelheid, terwijl tijdens dezelfde vaarten boven de stortsteenbekledingen (met respektievelijk een D_{50} van 9,5 en 19,5 mm) maxima zijn opgetreden van 1 à 1,2 maal de scheepssnelheid;
- bij toenemende diepgang van de bakken neemt de maximale snelheid in de haalgolf, veroorzaakt door de bakken, relatief toe ten opzichte van de scheepssnelheid, terwijl de maximale snelheid in de haalgolf, opgewekt door de duwboot, afneemt;
- bij gelijke diepgang van de bakken en de duwboot zijn de snelheden in beide haalgolven van dezelfde ordegrootte; dit houdt in, dat bij kleine diepgang (ongeladen bakken) de snelheden in de haalgolf van de duwboot het grootst zijn, terwijl bij grote diepgang (geladen bakken) de haalgolf achter de bakken bepalend is;
- uit de behandelde parameter analyse kon geen eenduidige relatie voor de maximale stroomsnelheid in de haalgolf worden bepaald. Dit vormt de aanleiding tot een fundamentale beschouwing van de waterbeweging in de haalgolf (zie paragraaf 4.5).

4. Stortsteen onder aanval van de haalgolf

4.1 Algemeen

Tijdens de proeven werd per toestand (= bepaalde waterdiepte en diepgang van de bakken) de snelheid van de duwformatie in stappen verhoogd van 75 tot 95% van de grenssnelheid. Tijdens de vaarten, waarbij schade optrad aan de stortsteen met een karakteristieke diameter (D_{50}) van 9,5 mm, werden filmopnamen gemaakt van de schade. Na elke vaart werd de schade tevens vastgelegd d.m.v. foto's. Aan de hand van de gemaakte foto's zijn de grootte, de plaats en de breedte van de opgetreden schade gekwantificeerd; in paragraaf 4.2 wordt uitgebreid hierop ingegaan. In paragraaf 4.3 worden enkele globale relaties tussen de opgetreden schade en de scheepsbeweging opgesteld. Met behulp van de afgeleide relaties wordt in paragraaf 4.4 als voorbeeld het ontwerp van een stortsteen oeververdediging gegeven. In paragraaf 4.5 wordt een wiskundig model ter berekening van de erosie door de haalgolf behandeld. Dit model wordt getoetst aan de gemeten schade; de resultaten hiervan worden in paragraaf 4.6 behandeld. In paragraaf 4.7 wordt aangetoond, dat de schuifspanningscoëfficiënt c_f in de haalgolf afhankelijk is van de stortsteen diameter en de scheepssnelheid. In paragraaf 4.8 zijn de conclusies samengevat.

4.2 Grootte, plaats en breedte van de opgetreden schade

Bij de vaarten met relatief lage vaarsnelheden (75 à 85% van de grenssnelheid) trad over het algemeen geen schade op. Bij de hogere vaarsnelheden (90 à 95% van de grenssnelheid) werd vrij aanzienlijke schade veroorzaakt aan de proefvakken met een karakteristieke diameter (D_{50}) van 9,5 mm. Het proefvak met de grove stortsteen (D_{50} = 19,5 mm) bleek zelfs bij deze hoge vaarsnelheden zeer stabiel te zijn (in sommige gevallen werden verplaatsingen van enkele steentjes waargenomen). In deze paragraaf wordt daarom de aandacht hoofdzakelijk geconcentreerd op de gemeten schade aan het relatief fijne stortsteen (D_{50} = 9,5 mm).

Foto 4 geeft een indruk van de opgetreden schade bij een vaarsnelheid van respektievelijk 0,9 V_{grens} en 0,95 V_{grens} (T1807 en T1808). De aangebrachte stroken gekleurde stortsteen op het talud zijn elk 40 cm breed. Door de laatst verrichte vaart (bijvoorbeeld T1808) te vergelijken met de daaraan voorafgaande (bijvoorbeeld T1807) wordt het aantal axiaal verplaatste steentjes, dat

tijdens één vaart een grens tussen 2 stroken is gepasseerd, duidelijk waarneembaar. Dit aantal is een maat voor het transport, dat door de haalgolf is veroorzaakt. Bovendien zijn zowel de plaats van de schade ten opzichte van de bovenkant van het talud als de breedte, waarbinnen het transport heeft plaatsgevonden, goed waarneembaar. Per gekleurde strook (totaal 5 stroken met een aanstroomsectie van 2 m) zijn het aantal verplaatste steentjes, de onderste begrenzing van de schade ten opzichte van de bovenkant van het talud, en de breedte van de opgetreden schade bepaald en daarna gemiddeld over het aantal stroken. Laatstgenoemde waarden zijn opgenomen in tabel 2; tevens zijn in deze tabel de maximale gemeten speigeldaling boven het fijne stortsteen en de vaarsnelheden zowel absoluut als relatief ten opzichte van de grenssnelheid opgenomen. Voor overige relevante gegevens ten aanzien van de vaarten wordt verwezen naar tabel 1. Ter vergelijking zijn in tabel 2 de gemeten transporten van het grove stortsteen (D_{50} = 19,5 mm) opgenomen. Er dient evenwel vermeld te worden, dat de transportgegevens van meetserie T12 niet zijn opgenomen in tabel 2, omdat deze serie de eerste proeven bevatte nadat de stortebedden waren aangelegd. Er bleek nog zóveel lucht tussen de steentjes te zitten, dat er bij deze proeven zéér grote transporten ontstonden en dáárdoor een niet-representatief beeld van de verplaatste steentjes werd veroorzaakt.

4.3 Globale relaties tussen de scheepsbeweging en de schade

In deze paragraaf worden de uit de meetseries (T13 t/m T20) verkregen transportgegevens (zie tabel 2) bewerkt met behulp van dimensie-analyse met het doel een globaal verband te leggen tussen enerzijds de door de duweenheid veroorzaakte waterbeweging en anderzijds:

- het begin van verplaatsing, en
- de grootte, breedte en plaats van het transport op het talud.

4.3.1 Begin van verplaatsing en begin van doorgaand transport

Uitgaande van de veronderstelling, dat de grootte van het transport afhankelijk is van de dimensies van de haalgolf, de stortsteendiameter en de soortelijke massa van het stortsteen op het talud, is in figuur 23 het aantal verplaatste steentjes uitgezet tegen de parameter $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$, waarin:

z_{max} = gemeten maximale spiegeldaling aan het begin van de haalgolf boven het talud (m)

D_{50} = karakteristieke korreldiameter (m)

Δ = relatieve massa van het materiaal (-)

In de grafiek is een onderscheid gemaakt in de waarnemingen ter plaatse van het grove stortsteen (D_{50} = 19,5 mm) en het fijne stortsteen (D_{50} = 9,5 mm). Duidelijk blijkt, dat bij waarden van

$$\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}} < 2,3 \qquad (1)$$

het aantal steentjes, dat door de haalgolf in beweging gebracht wordt, kleiner is dan 1. Gesteld dat er een relatie bestaat tussen de haalgolfhoogte (z_{max}) en de scheepsbeweging, dan wordt met behulp van vergelijking (1) een praktische eis ten aanzien van de te dimensioneren stortsteen op het talud aangedragen. Deze praktische eis wordt ondersteund door de meetgegevens van Van de Kaa [4].

Laatstgenoemde heeft bij een schaal 1:25 proeven verricht met een duweenheid (4-baks), een R.H.K.-schip en een onderzoekingsvaartuig. Opvallend is dat bij de kleinere schepen de haalgolf top boven de waterspiegel uitkomt in tegenstelling tot de haalgolf bij een duweenheid. Indien in alle gevallen voor z_{max} de totale gemeten haalgolfhoogte genomen wordt, blijken er waarden te zijn opgetreden tussen 1 en 1,5 m. De grootte van de karakteristieke korreldiameter D_{50} was 0,38 m. Dit betekent, dat de waarden van de parameter $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$ hebben gelegen tussen 1,6 en 2,4. In alle gevallen zijn er gemiddelde transporten opgetreden met $n < 1$ verplaatste steen.

Voor waarden van $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}} > 2,3$ blijkt uit figuur 23, dat er een relatief grote toename van het transport plaatsvindt bij een kleine toename van $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$. Ditzelfde effekt bevat de transportrelatie van Paintal [5]. Wordt er namelijk gesteld, dat het aantal (=n) verplaatste korrels evenredig is met een gemiddelde transportparameter $\bar{\phi}$ en dat de parameter $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$ evenredig is met een gemiddelde stroomparameter $\bar{\psi}$, dan volgt uit de gecorrigeerde relatie van Paintal (zie [2]:

$$\bar{\phi} = 1,64.10^{10}\ \bar{\psi}^{10,86} \qquad (2)$$

dat

$$n = A \cdot \left(\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}\right)^{10,86} \qquad (3)$$

Indien voor A een waarde van $1{,}15.10^{-5}$ wordt gekozen, blijkt voor de transporten met $n \leq 20$ per vaart een goede overeenkomst te bestaan tussen de theoretische relatie (3) en de meetpunten; dit verband is visueel gemaakt in figuur 24.

In sectie 4.3.3 wordt ingegaan op de relatie tussen de haalgolfhoogte (z_{max}) en de scheepsbeweging.

4.3.2 Plaats en breedte van de opgetreden schade

Om een antwoord te kunnen geven op de vraag "tot hoever moet het talud onder de waterlijn verdedigd worden tegen de aanval van de haalgolf" is met behulp van fotomateriaal de onderkant van de schade ten opzichte van de ongestoorde waterspiegel vastgelegd. De afstand langs het talud van de ongestoorde waterspiegel tot aan de onderkant van de schade wordt aangeduid met het symbool Y_{schade}; de vertikale projectie hiervan wordt aangegeven van Y'_{schade}. In figuur 25 zijn de dimensieloze parameters

$$\frac{Y'_{schade}}{D_{50}} \text{ en } \frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$$

tegen elkaar uitgezet. Uit de grafiek blijkt, dat er een vrijwel lineair verband bestaat tussen beide parameters en dat de grootte van de spreiding in $\frac{Y'_{schade}}{D_{50}}$ konstant (ca. 4) en onafhankelijk van de parameter $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$ is. Bij begin van verplaatsing ($\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}} = 2{,}3$) volgt uit figuur 25, dat voor het niveau wáárboven nog juist verplaatsing kan optreden, geldt:

$$\frac{Y'}{D_{50}} = 5 \qquad (4)$$

Dit betekent de onderste begrenzing van het stortsteen, dat bestand is tegen de aanval van de haalgolf, dieper dan 5 D_{50} onder de ongestoorde waterspiegel moet liggen. In paragraaf 4.4 wordt uitvoerig ingegaan op een gedetailleerd ontwerp van een taludverdediging met behulp van de uit het modelonderzoek verkregen relaties.

Ter verkrijging van inzicht in de afhankelijkheid van de breedte, waarbinnen het transport op het talud plaats vindt, ten opzichte van de haalgolfhoogte z_{max} op het talud, zijn in figuur 26 de parameters

$$\frac{b'}{D_{50}} \text{ en } \frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$$

tegen elkaar uitgezet. Met b' wordt hier de vertikale projectie van de breedte b op het talud bedoeld. Uit de grafiek volgt, dat na het begin van verplaatsing de "transportbreedte" sterk toeneemt bij een kleine verhoging van de parameter $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$. Door de meetpunten op dubbel-logarithmisch papier uit te zetten, blijkt de vergelijking

$$\frac{b'}{D_{50}} = 0{,}125 \left(\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}\right)^{2{,}5} \qquad \left(2 < \frac{z_{max}}{\Delta D_{50}} < 5\right) \tag{5}$$

zeer goed aan te sluiten bij de meetpunten. In figuur 26 is tevens vergelijking (5) ingetekend.

4.3.3 De haalgolfhoogte

Uit de vorige secties is gebleken, dat er relaties bestaan tussen enerzijds het transport (n), de plaats (Y_{schade}) en de breedte (b) van de schade op het talud en anderzijds de haalgolfhoogte (z_{max}). Deze relaties krijgen een voorspellend karakter, indien de haalgolfhoogte voorspeld kan worden. Uitgaande van de redenering, dat er een verband bestaat tussen de haalgolfhoogte (z_{max}) op het talud en de gemiddelde spiegeldaling volgens Schijf (z_{Schijf}), is de verhouding van beide grootheden uitgezet tegen de relatieve scheepssnelheid (V/V_{grens}) in figuur 27. In deze figuur is een onderscheid gemaakt tussen de meetgegevens boven het zetsteen-talud en beide stortsteen-taluds. Uit de grafiek volgt, dat bij scheepssnelheden groter dan 85% van de grenssnelheid volgens Schijf [3] de verhouding

$$\frac{z_{max}}{z_{Schijf}} = 2 \text{ à } 3 \tag{6}$$

en bovendien onafhankelijk van de soort oeverbekleding. Dit houdt in, dat voor duweenheden varend langs de teen van het talud een schatting van de haalgolfhoogte kan worden gemaakt met behulp van vergelijking (6). Hierna zijn dan de relaties tussen de eventuele schade en de optredende haalgolfhoogte (zie secties 4.3.1 en 4.3.2) op eenvoudige wijze toe te passen.

4.4 Het ontwerp van een stortsteen taludbekleding

In de praktijk bestaat een taludbekleding onder water vanaf het ongestoord waterniveau in het algemeen uit stortsteen. Het bovenste deel wordt voornamelijk belast door de haalgolf en taludvolgstroom, terwijl de belasting van het onderste deel hoofdzakelijk uit de retourstroom bestaat. De dimensionering van de gewenste stortsteendiameter voor beide delen van de bekleding geschiedt op basis van stabiliteitskriteria, die zowel voor de retourstroom [6] als voor de haalgolf (paragraaf 4.3) met behulp van meetgegevens zijn opgesteld.
Voor vergelijkbare situaties als die van de modelproeven kan vervolgens aan de hand van figuur 25 de plaats van de scheiding tussen het bovenste en onderste deel van de taludbekleding worden berekend.

De hierboven geschetste ontwerpprocedure zal aan de hand van een rekenvoorbeeld toegelicht worden. Uitgegaan wordt van proef 2008 ($V \approx 0{,}95\ V_{grens}$) welke overeenkomt met T21,22 van de retourstroomproeven [6]. Er is gemeten, dat $z_{max} = 0{,}078$ m (zie tabel 2). Dit betekent voor dimensionering van D_{50} voor het bovenste deel van de bekleding (zie vergelijking 1), dat

$$D_{50} > 0{,}021 \text{ m}$$

Het boveste deel van de bekleding is dus bestand tegen de aanval van de haalgolf bij een minimale $D_{50} = 21$ mm. Uit de vergelijkbare situatie van de retourstroomproeven T21,22 [6] volgt, dat er een $D_{50} = 6{,}2$ mm nodig is voor het onderste deel van de taludbekleding.

De plaats van de scheidingslijn tussen het bovenste en onderste deel van de taludbekleding volgt uit de eis, dat het onderste deel buiten de invloedsfeer van de haalgolf valt. Met behulp van figuur 25 is te bepalen, dat voor een situatie met $z_{max} = 0{,}078$ m en $D_{50} = 6{,}2$ mm ($\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}} = 7{,}62$) geen transport optreedt onder het niveau, dat gekarakteriseerd wordt door:

$$\frac{Y'}{D_{50}} = 28{,}5$$

In dit geval moet de scheiding tussen het bovenste en onderste deel van de bekleding aangebracht worden op een niveau van 0,18 m ($= 28{,}5\ D_{50}$) onder de ongestoorde waterspiegel. Ter controle wordt tevens het niveau berekend, tot

waar een eventuele verplaatsing van het stortsteen (D_{50} = 0,021 m) in het bovenste deel kan plaats vinden. Dit niveau wordt gekarakteriseerd door het kriterium van begin van verplaatsing (zie figuur 25):

$$\frac{Y'}{D_{50}} = 5$$

Hieruit volgt, dat een eventuele verplaatsing van een stortsteen in het bovenste deel kan optreden op een maximale afstand Y' = 0,11 m (= $5.D_{50}$) onder de ongestoorde waterspiegel. Dit betekent, dat de eerder berekende scheidingslijn tussen het bovenste en onderste deel voldoende diep onder de ongestoorde waterspiegel ligt (Y' = 0,18 m).

Uit bovenstaande berekening volgt, dat het overgangsgebied tussen haalgolf en retourstroom in dit geval ligt tussen 0,11 en 0,18 m onder de ongestoorde waterspiegel. Dit resultaat wordt bevestigd door de verdelingen van de maximaal opgetreden retourstroomsnelheden en stroomsnelheden in de haalgolf in een richting loodrecht op de kanaalas naast het schip. Voor laatstgenoemde meetgegevens wordt verwezen naar [6]. Het snijpunt van deze verdelingen ligt namelijk op een afstand van ca. 0,15 m onder de ongestoorde waterspiegel en ligt bijgevolg volledig binnen het overgangsgebied van 0,11 tot 0,18 m onder de ongestoorde waterspiegel.

4.5 Wiskundige beschouwing van het transport door de haalgolf

Gezien de conclusies ten aanzien van de stroomsnelheden in de haalgolf (zie paragraaf 3.4) lijkt het gerechtvaardigd te veronderstellen, dat de waterbeweging in de haalgolf over een bepaalde breedte 2-dimensionaal is in het vertikale vlak (er is geen uitwisseling van water in lateale richting). Uitgaande van deze veronderstelling wordt in dit hoofdstuk een verband gelegd tussen de optredende bodemschuifspanning enerzijds en de vorm en dimensies van de haalgolf anderzijds. Vervolgens wordt met behulp van de gecorrigeerde transportformule van Paintal (zie [5]) een relatie gelegd tussen de opgetreden bodemschuifspanningen en het aantal door de haalgolf verplaatste korrels op het talud.

4.5.1 De bodemschuifspanning

Met behulp van de vereenvoudigde bewegingsvergelijking

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z}, \qquad (7)$$

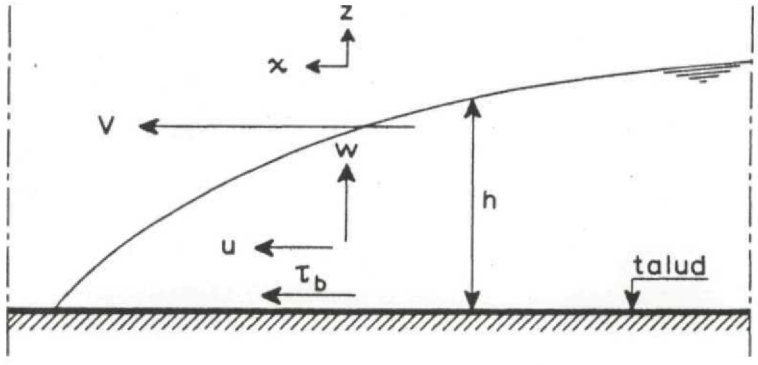
de aanname dat de druk hydrostatisch is, ofwel

$$p = \rho g (h-z) \qquad (8)$$

en de continuiteitsvergelijking

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (9)$$

ligt de waterbeweging in de haalgolf vast. In onderstaande schets en bijbehorende verklaring van de gebruikte symbolen wordt één en ander ten aanzien van de gebruikte vergelijkingen verduidelijkt. De aanname, dat de druk in de haalgolf hydrostatisch is, wordt ondersteund door bodemdruk- en golfhoogtemeterregistraties. In de figuren 28 en 29 zijn de registraties (T1807 en T1808; zie tabel 1) van een golfhoogtemeter en van een drukopnemer weergegeven. De meetinstrumenten waren dichtbij elkaar geplaatst, zodat onderlinge vergelijking mogelijk is. Beide registraties blijken goed met elkaar overeen te komen.



principe schets van de haalgolf op het talud

Verklaring van de gebruikte symbolen:

t	=	tijd	(s)
x,z	=	coördinaten	(m)
u,w	=	snelheden in respektievelijk x- en z-richting	($m.s^{-1}$)
p	=	druk	($N.m^{-2}$)
τ	=	schuifspanning	($N.m^{-2}$)
τ_b	=	bodemschuifspanning	($N.m^{-2}$)
h	=	waterdiepte	(m)
g	=	versnelling van de zwaartekracht	($m.s^{-2}$)

Substitutie van vergelijking (8) in vergelijking (7) en integratie over de vertikaal leveren tenslotte:

$$\frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u^2}h)}{\partial x} + u_s(w_s - u_s)\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial t} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho}\tau_b \qquad (10)$$

waarin u_s en w_s de snelheden in x- en z-richting aan het oppervlak voorstellen. Het streepje boven de symbolen dient ter aanduiding van de over de vertikaal gemiddelde waarde.

Gebruik makend van de kinematische randvoorwaarden:

$$w_s = \frac{\partial h}{\partial t} + u_s\frac{\partial h}{\partial x} \qquad (11)$$

en de veronderstelling, dat

$$\overline{u^2} = \bar{u}^2 \qquad (12)$$

wordt vergelijking (10) vereenvoudigd tot:

$$\frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}^2h)}{\partial x} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho}\tau_b \qquad (13)$$

Integratie van de continuiteitsvergelijking (9) over de waterdiepte levert:

$$\frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} - u_s\frac{\partial h}{\partial x} + w_s = 0 \qquad (14)$$

Substitutie van vergelijking (11) in vergelijking (14) leidt tot:

$$\frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \qquad (15)$$

De vergelijkingen (13 en 15) vormen de basisvergelijkingen voor de berekening van de bodemschuifspanning in de haalgolf. Vanwege de constante voortplantingsnelheid V (=scheepssnelheid) van de verstoringen geldt bovendien:

$$\frac{1}{\partial t} = - V \frac{1}{\partial x} \qquad (16)$$

Door vergelijking (16) op de vergelijkingen (13) en (15) toe te passen, worden laatstgenoemde vergelijkingen herleid tot:

$$(\bar{u}-V) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = - g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\tau_b}{h} \text{ (beweging)} \qquad (17)$$

en

$$(\bar{u}-V) \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0 \text{ (continuïteit)} \qquad (18)$$

Na enige herleiding van de vergelijkingen (17) en (18) wordt tenslotte gevonden, dat

$$\tau_b = \rho \{(\bar{u} - V)^2 - gh\} \frac{\partial h}{\partial x} \qquad (19)$$

en

$$(\bar{u} - V) h = \text{konstant} \qquad (20)$$

Vergelijking (20) impliceert, dat tijdens een vaart met konstante scheepssnelheid V de over de vertikaal gemiddelde snelheid $\bar{u}(x)$ een funktie is van de lokale haalgolfhoogte h(x). Voor de oplossing van vergelijking (20) wordt de ruwheidsterm h_o (naar analogie van de Nikuradse-ruwheid y_o in snelheidsvertikalen) aangebracht, zodat vergelijking (20) overgaat in:

$$\bar{u} = V \left(1 - \frac{h_o}{h}\right) \qquad (21)$$

Uit snelheidsregistraties is gebleken, dat de snelheid in de haalgolf afhankelijk is van het aanwezige bodemmateriaal (zie paragraaf 3.4). Uitgaande van deze conclusie kan verondersteld worden, dat

$$\bar{u} = V \left(1 - \alpha \frac{\Delta D_{50}}{h}\right) \qquad (22)$$

Tevens hebben de registraties van de haalgolfprofielen en de bijbehorende snelheidsregistraties aangetoond, dat over het algemeen de maximale snelheden optraden op de plaats, waar de lokale haalgolfhoogte $h \approx 0{,}5\ z_{max}$. Met de veronderstelling, dat de geregistreerde snelheid u overéénkomt met de gemiddelde snelheid $\bar{u}$ in de vertikaal, kan uit de meetgegevens een indruk van α verkregen worden. Immers bij substitutie van de veronderstelling $\bar{u} = u_{max}$ bij $h = z_{max}$ gaat vergelijking (22) over in:

$$1 - \frac{u_{max}}{V} = 2\alpha \cdot \frac{\Delta D_{50}}{z_{max}} \qquad (23)$$

In figuur 30 zijn voor het fijne en grove stortsteen de geregistreerde waarden van $1 - \frac{u_{max}}{V}$ uitgezet tegen de waarden van $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$. Uit het verloop van de verzamelde meetpunten kan geconcludeerd worden, dat het lineaire verband tussen de beide parameters volgens vergelijking (23) redelijk gevolgd wordt bij een waarde van

$$\alpha = 0{,}5 \qquad (24)$$

Door substitutie van vergelijking (24) in vergelijking (22) wordt voor de over de vertikaal gemiddelde snelheden in de haalgolf de volgende relatie met de scheepssnelheid, het stortsteen en de haalgolfhoogte afgeleid:

$$\bar{u} = V \left(1 - 0{,}5 \frac{\Delta D_{50}}{h}\right) \qquad (25)$$

Met behulp van vergelijking (25) is een schatting te maken van de verhouding tussen de termen $(\bar{u} - V)^2$ en gh uit vergelijking (19) voor de bodemschuifspanning. Er wordt verondersteld, dat de maximale bodemschuifspanningen maatgevend zijn en optreden tegelijkertijd met de maximale snelheden in de haalgolf bij een haalgolfhoogte $h = 0{,}5\ z_{max}$. Met behulp van vergelijking (25) is na enige bewerking af te leiden, dat de verhouding

$$\frac{(\bar{u} - V)^2}{gh} = 2 \left(\frac{\Delta D_{50}}{z_{max}}\right)^2 \frac{V^2}{g\, z_{max}} \qquad (26)$$

maatgevend is. Voor het fijne stortsteen (D_{50} = 9,5 mm) traden er doorgaande transporten op voor waarden van $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$ van 4 à 5 (zie figuur 24). Bij een scheepssnelheid V = 0,8 m/s (gemiddelde bovengrens; zie tabel 2) betekent dit, dat voor de beschouwde gevallen

$$\frac{(\bar{u} - V)^2}{gh} = 0{,}07 \text{ à } 0{,}13$$

Deze waarden zijn zó klein, dat voor het fijne stortsteen de term $(\bar{u} - V)^2$ verwaarloosd wordt ten opzichte van de term gh. Op grond van deze verwaarlozing is vergelijking (19) voor de berekening van de bodemschuifspanning op het fijne stortsteen (D_{50} = 9,5 mm) gereduceerd tot:

$$\tau_b = - \rho\, gh \frac{\partial h}{\partial x} \qquad (27)$$

Het is duidelijk, dat bij berekening van de bodemschuifspanning op andere typen taludbekleding onderzocht moet worden of de verwaarlozing van de term $(\bar{u} - V)^2$ gerechtvaardigd is. In het geval, dat uitgegaan moet worden van vergelijking (19) kan gebruik worden gemaakt van vergelijking (25) om een rechtstreeks verband te leggen tussen de bodemschuifspanning en de haalgolf afmetingen.

Geconcludeerd wordt, dat uit meetgegevens van de haalgolfafmetingen de lokale bodemschuifspanningen rechtstreeks berekend kunnen worden.

4.5.2 Het transport

In een bepaald punt op het talud, dat gedurende een scheepspassage aangevallen wordt door de haalgolf, is met behulp van vergelijking (27) op elk tijdstip de optredende bodemschuifspanning uit te rekenen. Aan de hand van de vorm van de haalgolf is in te zien, dat er een schuifspanningscurve ontstaat met een waarde gelijk aan 0 in de voorste begrenzing en een maximum waarde op enige afstand hiervan. Indien er nu een rechtstreeks verband gelegd kan worden tussen het momentane transport en de berekende momentane bodemschuifspanning, is het mogelijk uit te rekenen hoe groot het aantal korrels is, dat onder aanval van de haalgolf een grens passeert. Uitgaande van de veronderstelling, dat de ge

corrigeerde transportfunktie van Paintal (zie [2]) ook geldig is onder de niet-stationaire omstandigheden in de haalgolf, wordt hiermee de koppeling gelegd tussen transport en bodemschuifspanning. Hierbij wordt de invloed van de flauwe taludhelling (1:4) op het begin van beweging en het transport verwaarloosd. De formules luiden:

$$\phi = 1{,}64.10^{10}\ \psi^{10{,}48} \qquad \text{(gekorrigeerde relatie van Paintal)} \qquad (28)$$

$$\phi = \frac{q_s}{(g\Delta D_{50}^3)^{0{,}5}} \qquad (29)$$

$$\psi = \frac{\tau_b}{\rho g \Delta D_{50}} \qquad (30)$$

De verklaring van de symbolen is:

ϕ	= transportparameter	(-)
ψ	= stroomparameter	(-)
q_s	= transport per eenheid van breedte	($m^2.s^{-1}$)
D_{50}	= karakteristieke korreldiameter	(m)
Δ	= relatieve dichtheid ($\frac{\rho_s-\rho}{\rho}$)	(-)
ρ	= soortelijke massa van water	($kg.m^{-3}$)
ρ_s	= soortelijke massa van stortsteen	($kg.m^{-3}$)

Het aantal korrels (n), dat een grens passeert is nu eenvoudig te berekenen. Er geldt immers bij benadering:

$$\frac{n}{b} \cdot \frac{1}{6}\pi D_{50}^3 = \int_o^T q_s(t)\,dt \qquad (31)$$

hierin is b een nog nader te specifieren breedte, waarbinnen het transport plaatsvindt. Omgewerkt naar een scheepsvast assenstelsel gaat vergelijking (31) over in (gesteld dat $\frac{1}{6}\pi \approx \frac{1}{2}$):

$$\frac{n}{b} = \frac{2}{V}\sqrt{\frac{g\Delta}{D_{50}^3}} \int_o^L \phi\,dx \qquad (32)$$

Voor L wordt die afstand gekozen, waarbij de bodemschuifspanning en dus ook de transportparameter ϕ weer naar 0 tenderen. In de figuren 31 en 32 wordt aan de hand van een gemeten haalgolf de berekeningsprocedure duidelijk gemaakt. Met behulp van een digitiser is het gemeten signaal "glad" gemaakt. Hiervoor kun-

nen geen filtertechnieken worden gebruikt, omdat dan de maximale spiegeldaling in een registratie weggefilterd zou worden, terwijl deze juist de haalgolfhoogte vertegenwoordigd. In figuur 31 zijn voor T1807 (zie tabel 1) zowel de registratie van de gehele spiegeldalingskuil boven het stortsteen met D_{50} van 9,5 mm als het uitvergrootte signaal van de haalgolf gegeven. In het uitvergrootte signaal is tevens de vorm van de "glad" gemaakte haalgolf aangegeven. In figuur 32 zijn op de in deze paragraaf behandelde wijze berekende verdelingen van ψ en ϕ weergegeven. het uiteindelijke resultaat is, dat het aantal verplaatste korrels per strekkende breedte $(\frac{n}{b})$ bepaald kan worden. Met behulp van de gemeten transporten (n) en transportbreedten (b) (zie sectie 4.3.2) is het gemeten aantal verplaatste korrels per strekkende breedte te bepalen. In paragraaf 4.6 wordt ingegaan op de toetsing van de berekeningen aan de metingen.

4.5.3 Berekeningen

Voor alle vaarten, waarbij de vaarsnelheid V ca. 0,9 of 0,95 V_{grens} was, zijn de registraties van de drukopnemers in beide stortsteenvakken (zie paragraaf 2.3) met de digitiser bewerkt. Uit de bewerkte signalen is de ψ-curve bepaald. De maximale waarden van ψ zijn verzameld en per drukopnemer gemiddeld zowel voor de vaarten met V = 0,9 V_{grens} als voor de vaarten met V = 0,95 V_{grens}. Op deze wijze is een indruk te krijgen van de verhouding tussen de uit verschillende drukregistraties berekende schuifspanningen. In figuur 33 zijn voor alle vaarten met V = 0,9 en 0,95 V_{grens} grafieken gepresenteerd, waarin op de vertikale as $\bar{\psi}_{max}$ is uitgezet en op de horizontale as de positie van de drukopnemers op het talud ten opzichte van de waterlijn. Bovendien is per grafiek de maximale spiegeldaling (haalgolfhoogte) en de breedte van het opgetreden transport aangegeven. Geconcludeerd wordt, dat:

- vanaf de waterlijn tot omstreeks de lijn van de maximale spiegeldaling de schuifspanningen toenemen tot een maximum waarde,
- over het algemeen de tendens bestaat, dat de schuifspanningen, berekend uit de gemeten waterspiegelveranderingen onder de lijn van de maximum spiegeldaling, onderling weinig in grootte verschillen,
- het transport over het algemeen plaats vindt binnen een breedte vanaf de lijn van de maximum spiegeldaling tot enige afstand daaronder,
- het transport in axiale richting plaatsvindt tijdens en rondom τ_{max}.

4.6 Toetsing van het berekende transport aan het gemeten transport

De positie van de twee onderste drukopnemers op het talud bleek in veel gevallen binnen de zône van de optredende schade te zijn. Aan de hand van figuur 33 is duidelijk te zien in welke gevallen beide of slechts één van beide drukopnemers in de zône van het transport hebben (heeft) gelegen. Tussen beide gevallen is een onderscheid gemaakt bij de toetsing van de gemeten transportintensiteit ($\frac{n}{b}$) aan de berekende transportintensiteit. In het geval dat beide drukopnemers in de zône van het transport hebben gelegen, is uit beide registraties de transportintensiteit berekend. Daarentegen is slechts één transportintensiteit berekend, indien één van beide drukopnemers gelegen was in de zône van het transport. De berekeningen zijn opgenomen in tabel 3. De gemeten transportintensiteit van het stortsteen met D_{50} = 9,5 mm is op twee manieren berekend door het aantal verplaatste korrels te delen door:

1. de gemeten transportbreedte (zie tabel 2)
2. de genormeerde transportbreedte (zie vergelijking 5)

De resultaten van vóórnoemde bewerkingen zijn tevens in tabel 3 opgenomen. In de figuren 34 en 35 zijn grafieken gegeven, waarbij op de vertikale as de berekende en op de horizontale as de gemeten transportintensiteit zijn uitgezet. Hierbij is de gemeten transportintensiteit bepaald uit respectievelijk de gemeten en de genormeerde transportbreedte. De verbinding tussen twee punten geeft aan, dat in een dergelijk geval twee drukopnemers in de zône van het transport lagen.

Uit deze figuren wordt geconstateerd, dat:

- 75% van de berekende transporten liggen binnen een nauwkeurigheid van een faktor 2 ten opzichte van de gemeten transporten,
- de genormeerde transportbreedte (vergelijking 5) een goede benadering van de gemeten transportbreedte geeft.

Een groot deel van de spreiding wordt veroorzaakt, doordat de gemeten transporten zijn gemiddeld over de transportbreedte terwijl de berekeningen lokale transportintensiteiten aangeven.

Voorts kan worden gesteld dat, indien er een goed 3-dimensionaal programma ter berekening van de vorm van de haalgolf op het talud voor handen is, met de wiskundige beschouwing van het transport (zie paragraaf 4.5) gedetailleerd een oeverbekleding kan worden gedimensioneerd.

4.7 De schuifspanningscoëfficiënt c_f

Met behulp van vergelijking (23) voor de maximale snelheid in de haalgolf is het mogelijk een indruk van de schuifspanningscoëfficiënt c_f te krijgen. Immers voor de piekwaarde in de schuifspanning geldt:

$$\tau_{max} = \tfrac{1}{2}\rho\, c_f \cdot u^2_{max} \qquad (33)$$

Subsitutie van vergelijking (23) in vergelijking (33) levert na enige bewerking:

$$c_f = \frac{2\psi_{max} \cdot \Delta g D_{50}}{V^2 (1 - \frac{\Delta D_{50}}{z_{max}})^2} \qquad (34)$$

In sectie 4.3.1 is bepaald, dat begin van verplaatsing optreedt bij de waarde 2,3 voor de parameter $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}$. Uit de schuifspanningsberekeningen (zie sectie 4.5.1) is geconstateerd dat bij begin van verplaatsing een piekwaarde van ca. 0,06 (vergelijkbaar met Shields-criterium) voor ψ_{max} werd bereikt. Worden beide karakteristieke waarden voor begin van verplaatsing ingevuld in vergelijking (34), dan is voor de haalgolf op het talud af te leiden dat

$$c_f = 0{,}62 \frac{g D_{50}}{V^2} \qquad (35)$$

Dit resultaat wordt in grote mate bevestigd door de uit de meetresultaten van Naheer (zie [6] en [7]) afgeleide relatie:

$$c_f = 0{,}625 \frac{g D_{50}}{V^2} + 0{,}01 \qquad (36)$$

Relatie (35) wordt eveneens bevestigd door de volgens van de Kaa [4] bepaalde waarde van $c_f = 0{,}15$. De scheepssnelheden tijdens zijn proeven lagen tussen 4 en 5 m/s, terwijl de D_{50} van het stortsteen 0,38 m bedroeg. Substitutie van deze grootheden in vergelijking (35) levert op:

$$c_f = 0{,}09 \text{ à } 0{,}15$$

Geconcludeerd wordt, dat met vergelijking (35) voor de haalgolf op het talud (1:4) een algemeen toepasbare relatie voor c_f is afgeleid.

4.8 Samenvatting

Ten aanzien van de aanval van de haalgolf, veroorzaakt door een dicht bij de oever varende duweenheid op een oeverbekleding van stortsteen wordt geconcludeerd:

- Voor de dimensionering van de karakteristieke diameter D_{50} van het stortsteen materiaal lijkt de eis, dat

  $$\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}} < 2{,}3$$

  goed te voldoen.
- Voor waarden van $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}} > 2{,}3$ wordt een goede voorspelling gekregen van het aantal korrels, dat tijdens één scheepspassage een grens passeert, met de relatie:

  $$n = 1{,}15.10^{-2} \left(\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}\right)^{10{,}86}$$

- de ligging van de scheiding tussen het bovenste deel (haalgolf aanval) en onderste deel (retourstroom aanval) van een stortsteen taludbekleding is met behulp van figuur 25 te bepalen. In ieder geval zal deze scheiding dieper dan 5 D_{50} (karakteristieke diameter van bovenste stortsteen) onder de ongestoorde waterspiegel moeten liggen vanwege het kriterium van begin van verplaatsing (zie figuur 25).
- De vertikale projectie van de breedte, waarbinnen het transport op het talud plaatsvindt, is af te schatten met de relatie:

  $$b' = 0{,}125\ D_{50} \left(\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}}\right)^{2{,}5} \qquad (5)$$

  voor het interval $2 < \frac{z_{max}}{\Delta D_{50}} < 5$
- Het transport wordt over het algemeen aan de bovenkant begrensd door de lijn van de maximale spiegeldaling (aan het begin van de haalgolf) op het talud.
- Bij vaarsnelheden $> 0{,}85\ V_{grens}$ is de verhouding

  $$\frac{z_{max}}{z_{Schijf}} = 2 \text{ à } 3 \qquad (6)$$

  en bovendien onafhankelijk van de soort oeverbekleding.

- De maximaal optredende snelheid in de haalgolf lijkt een funktie te zijn van de scheepssnelheid, de maximale spiegeldaling en het stortsteenmateriaal. Deze funktie luidt voor een 2-baks brede duweenheid langs de teen van het talud:

$$u_{max} = V \left(1 - \frac{\Delta D_{50}}{z_{max}}\right) \qquad (37)$$

voor waarden van $\frac{z_{max}}{\Delta D_{50}} > 1$

- Indien de dimensies van de haalgolf bekend zijn, kan met het gedetailleerde wiskundige model (paragraaf 4.5) een goede voorspelling van het op te treden transport worden gemaakt.
- De schuifspanningscoëfficiënt in de haalgolf blijkt geen konstante waarde te bezitten, maar is afhankelijk van de stortsteendiameter en de scheepsnelheid.

  De funktie

$$c_f = 0{,}62 \frac{gD_{50}}{V^2} \qquad (35)$$

  geeft een goede voorspelling.

Met behulp van de experimenteel bepaalde vergelijking (37) en de continuïteitsvergelijking is afgeleid, dat de over de vertikaal gemiddelde snelheden $\bar{u}$ in de haalgolf mogelijk bepaald kunnen worden met de relatie:

$$\bar{u} = V \left(1-0{,}5 \frac{\Delta D_{50}}{h}\right) \qquad (25)$$

Aanbevolen wordt om met behulp van aanwezige, gedetailleerde meetgegevens, vergelijking (25) op zijn betrouwbaarheid te toetsen in een nader onderzoek.

5. Stabiliteit van zetsteen

5.1 Algemeen

Om de stabiliteit van een zetsteen toplaag in een oeverbescherming te onderzoeken zijn drie proefvakken in het model voorzien van trovidur-blokjes van 30x30x15 mm^3 elk. De invloed van de waterdoorlatendheid in de vlijlaag op de stabiliteit is onderzocht door de blokjes achtereenvolgens aan te brengen op een roosterwerk (met daaronder vrij water), op split en op een houten plaat, aldus een zeer grote, een gematigde en een zeer kleine doorlatendheid simulerend.
Anders dan in prototype-omstandigheden is de invloed van grondwaterstroming op de zetsteen toplaag hier niet aanwezig. De ondergrond in het model bestaat immers uit beton. Hier ligt een fundamenteel onderscheid tussen model en prototype, zoals uit het volgende mag blijken.
Daar de interne stabiliteit van beton onder invloed van hydraulische verhangen buiten beschouwing kan blijven, richt de analyse van drukmetingen zich op het schade-mechanisme van de trovidur blokjes. Schade hieraan kan slechts dan optreden als de drukopbouw onder het blokje (of onder meerdere blokjes) de som van zwaarte- en wrijvingskrachten heeft gecompenseerd. In dit verband zou uit trekproefjes, loodrecht op het talud uitgevoerd, blijken, dat de benodigde bezwijkkracht soms een faktor tien maal de gewichtskracht kan bedragen. Vanwege de onzekerheden in de uitvoering van deze trekproefjes mag hieraan echter niet al te veel gewicht worden toegekend.

Drukopbouw onder de blokjes kan ontstaan door:
- na/voor-lopen van de waterdrukrespons onder het blokje ten opzichte van de waterbeweging in het kanaal,
- demping van het druksignaal,
- uitstromend water uit het talud tijdens de spiegeldaling in het kanaal,
- dynamica-effecten bij golfklappen.

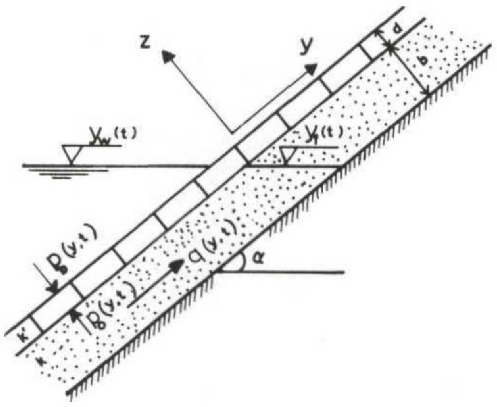
Wegens het relatief trage verschijnsel van de scheepsgolf lijkt het dynamica-effect geen rol van betekenis te spelen.

De overige verschijnselen vormen bij scheepsgolven de belangrijkste bron voor het ontstaan van opwaartse drukken op de zetsteen toplaag. Op grond van een

theoretische beschouwing van de waterbeweging in een enkele filterlaag onder een zetsteen toplaag wordt in het navolgende een rekenmodel gepresenteerd, waarmee de verhangen (dus stromingen) en de drukken aan de onderzijde van de toplaag kunnen worden berekend. Dit model wordt getoetst op geregistreerde druksignalen. Vervolgens zal een zo compleet mogelijk overzicht van gemeten verschildrukken worden gepresenteerd.

5.2 Rekenmodel voor de waterbeweging in een filterlaag

Als eerste aanzet is uitgegaan van de 1-dimensionale aanpak. (zie ook [9]). Dit houdt in, dat over de dikte van de filterlaag de filtersnelheid konstant wordt verondersteld en slechts een funktie is van de plaats y langs het talud en de tijd t.



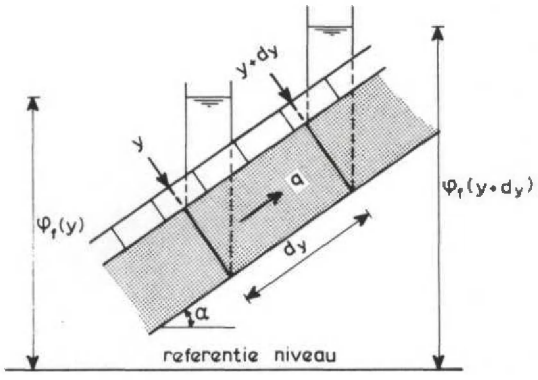
In de definitieschets zijn alle belangrijke symbolen voor de oplossing van het probleem opgenomen. Het assenstelsel is zodanig geplaatst dat de oorsprong samenvalt met het snijpunt van ongestoorde waterspiegel en talud. Aangenomen wordt dat de waterspiegel in het filter vlak en horizontaal is.
De verklaring van de symbolen luidt:

b	= dikte van de filterlaag	(m)
d	= dikte van de zetsteen toplaag	(m)
k	= doorlatendheid van de filterlaag	$(m.s^{-1})$
k'	= doorlatendheid van de zetsteen toplaag	$(m.s^{-1})$
p_b, p_o	= druk respektievelijk op boven en onderkant van de toplaag	$(N.m^{-2})$
y_f, y_w	= waterspiegel in respektievelijk de filterlaag en het kanaal	(m)

De toplaag is geschematiseerd als een poreuze laag, waarin de waterstroming alleen in z-richting kan plaatsvinden.

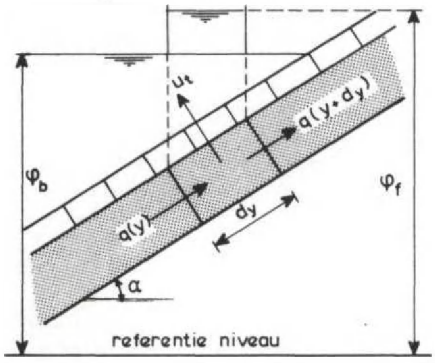
Indien verondersteld wordt, dat de stijghoogte ϕ_f konstant is over de dikte van de filterlaag (zie bijgaande principeschets) geldt volgens Darcy:

$$q = -kb \frac{\phi_f(y+dy) - \phi_f(y)}{dy} = -kb \frac{\partial \phi_f}{\partial y} \qquad (38)$$



De stroming door de toplaag wordt veroorzaakt door het verschil van stijghoogten aan boven- en onderkant van de toplaag (zie schets). Volgens Darcy geldt voor deze stroming:

$$u_t = k' \frac{\phi_f - \phi_b}{d} \qquad (39)$$



Vervolgens geldt met betrekking tot continuiteit:

$$q(y) = q(y+dy) + u_t \cdot dy + S \frac{\partial \phi_f}{\partial t} \cdot dy \qquad (40)$$

waarin S een coëfficiënt is, die de grootte van de elastische berging weergeeft. In het volgende wordt deze invloed verwaarloosd (S = 0). Uit deze continuiteitsbeschouwing volgt:

$$\frac{\partial q}{\partial y} = \frac{k'}{d} (\phi_b - \phi_f) \qquad (41)$$

Differentiatie van vergelijking (38) naar y levert de volgende vergelijking op:

$$\frac{\partial q}{\partial y} = -k \; b \frac{\partial^2 \phi_f}{\partial y^2} \qquad (42)$$

Uit de vergelijkingen (41) en (42) volgt tenslotte de stromingsvergelijking, waaraan de stijghoogte ϕ_f in het filter moet voldoen. Uit de gelijkstelling van deze vergelijkingen volgt:

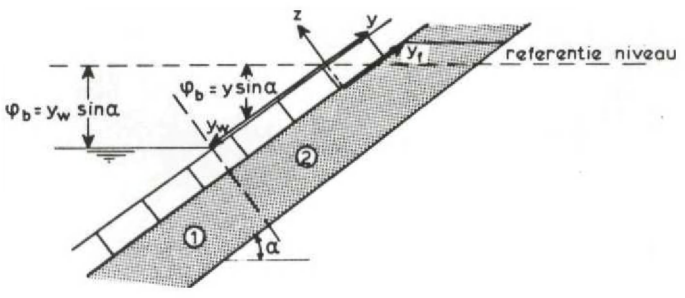
$$\frac{\partial^2 \phi_f}{\partial y^2} = \frac{\sin^2 \alpha}{\lambda^2} (\phi_f - \phi_b) \qquad (43)$$

In vergelijking (43) is de parameter λ ingevoerd en wordt de leklengte genoemd. De leklengte bevat alle kenmerkende grootheden van de oeverconstructie:

$$\lambda = \sin \alpha \left(\frac{k}{k'} bd \right)^{0,5} \qquad (44)$$

Daar ϕ_b bij scheepvaartgolven geschematiseerd kan worden als een plaats onafhankelijke grootheid in gebied (1) en een lineair van de plaats afhankelijke grootheid in gebied (2) (zie bijgaande principe schets), luidt de algemene oplossing van vergelijking (43):

$$\phi_f = \phi_b + A(t) \cdot e^{\frac{\sin\alpha}{\lambda} \cdot y} + B(t) \cdot e^{-\frac{\sin\alpha}{\lambda} \cdot y} \qquad (45)$$



gebied (1) $\phi_b = y_w \sin\alpha$ (plaats onafhankelijk)
gebied (2) $\phi_b = y \sin\alpha$ (lineair plaats afhankelijk)
Opgemerkt wordt hierbij dat y_w tijdafhankelijk is.

De tijd afhankelijke funkties A_1 (t) en B_1 (t) in gebied (1) en A_2 (t) en B_2 (t) in gebied (2) worden bepaald door de volgende randvoorwaarden:

1. Op $y = -\infty$ is er geen stroming in de filterlaag en dus ook geen uitwisseling tussen kanaalwater en water in het filter. Dit betekent, dat $\phi_f = \phi_b$

2. Op $y = y_w$ geldt voor de stijghoogte in het filter $\phi_{f,1} = \phi_{f,2}$

3. Op $y = y_w$ geldt vanwege de continuiteit in het filter, dat

$$\frac{\partial\phi_{f,1}}{\partial y} = \frac{\partial\phi_{f,2}}{\partial y}$$

4. Op $y = y_f - {}^{d}/_{tg\alpha}$ geldt, dat het stijghoogteniveau in het filter samenvalt met de waterspiegel in het filter, ofwel:

$$\phi_{f,2} = (y_f - d/tg\alpha)\sin\alpha$$

Uit deze 4 randvoorwaarden volgt de oplossing voor de 4 onbekende funkties A_1, A_2, B_1 en B_2. Deze oplossingen zijn:

$$A_1(t) = \tfrac{1}{2}\lambda e^{-\frac{\sin\alpha}{\lambda} y_w} - \tfrac{1}{2}\lambda e^{\frac{\sin\alpha}{\lambda}(y_w - 2y_f - 2d/tg\alpha)} \qquad (46)$$

$$B_1(t) = 0 \qquad (47)$$

$$A_2(t) = -\tfrac{1}{2}\lambda e^{\frac{\sin\alpha}{\lambda}(y_w - 2y_f + 2d/tg\alpha)} \qquad (48)$$

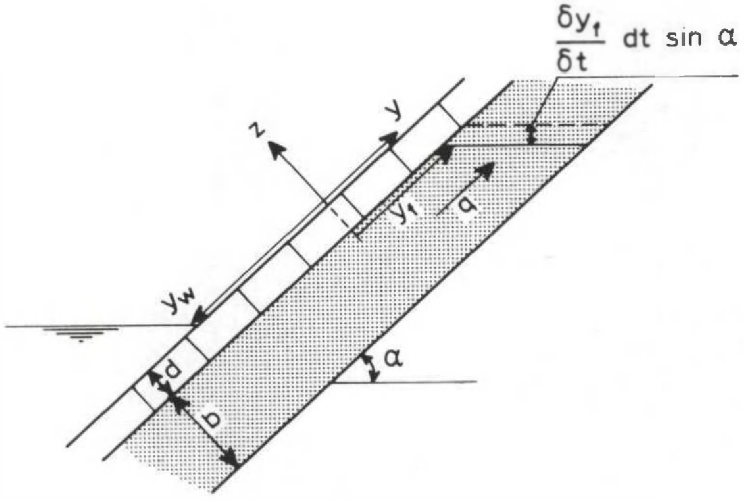
$$B_2(t) = \tfrac{1}{2}\lambda e^{\frac{\sin\alpha}{\lambda} y_w} \qquad (49)$$

De tijd afhankelijkheid in de vergelijkingen (46)....(49) wordt bepaald door

de variabele waterstanden y_w in het kanaal en y_f in het filter. Hierbij wordt opgemerkt, dat y_w de invoer van het rekenproces is en y_f onbekend is. Dit betekent, dat er nog extra randvoorwaarden nodig zijn om het gedrag van y_f te kunnen berekenen als respons op de verandering van de waterspiegel in het kanaal. Bij het opstellen van deze randvoorwaarden zijn 2 situaties te onderscheiden en wel:

1. waterstand in het filter is hoger dan waterstand in het kanaal,
2. waterstand in het filter is lager dan waterstand in het kanaal.

ad1)



De filtersnelheid op de rand $y = y_f - d/tg\alpha$ is een maat voor de daling van de waterspiegel in het filter. Indien de porositeit van het filter wordt voorgesteld door het symbool ε , dan wordt met behulp van de continuiteitswet afgeleid, dat:

$$q(y_f - d/tg\alpha) \cdot dt = \varepsilon.b. \frac{\partial y_f}{\partial t} \cdot dt \qquad (50)$$

Uit de definities voor het debiet volgens vergelijking (38) en die voor de stijghoogte in het filter volgens vergeijking (45) volgt na substitutie in vergelijking (50):

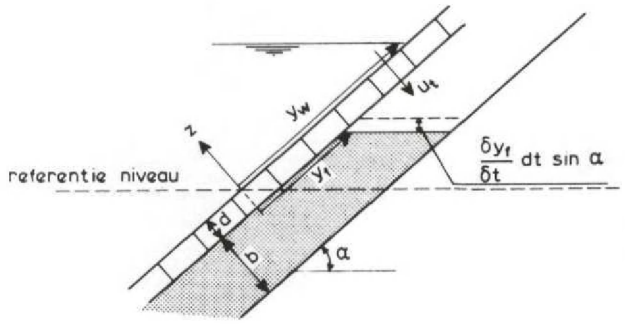
$$\sin\alpha + A.\frac{\sin\alpha}{\lambda}. e^{\frac{\sin\alpha}{\lambda}. (y_f - {}^{d}/_{tg\alpha})} - B.\frac{\sin\alpha}{\lambda}. e^{-\frac{\sin\alpha}{\lambda}. (y_f - {}^{d}/_{tg\alpha})} = -\frac{\varepsilon}{k}. \frac{\partial y_f}{\partial t} \qquad (51)$$

Voor A en B gelden de oplossingen volgens de vergelijkingen (48) en (49), waarmee vergelijking (51) omgewerkt wordt tot de volgende differentiaal-vergelijking voor y_f:

$$\frac{\partial y_f}{\partial t} = \frac{k.\sin\alpha}{\varepsilon} \cdot e^{\frac{\sin\alpha}{\lambda}(y_w - y_f + d/tg\alpha)} - \frac{k.\sin\alpha}{\varepsilon} \qquad (52)$$

De oplossing van vergelijking (52) geschiedt numeriek en wordt ten behoeve van de overzichtelijkheid hier niet behandeld.

ad 2)



In deze situatie wordt verondersteld, dat de stijging van de waterstand in het filter het gevolg is van de filtersnelheid op de plaats $y = y_f$ en van het door de toplaag heen lekkende water tussen de randen $y = y_f$ en $y = y_w$. Met behulp van de continuïteitswet wordt afgeleid:

$$\varepsilon.b.\frac{\partial y_f}{\partial t} \cdot dt = q(y_f).dt + \int_{y_f}^{y_w} u_t\,dy.dt \qquad (53)$$

Voor de stijghoogte in het filter geldt vergelijking (45). De onbekenden A en B in deze vergelijking (45) zijn bepaald door de randvoorwaarden van deze situatie, te weten:

- op $y = -\infty$ geldt $\phi_f = \phi_b = y_w \sin\alpha$
- op $y = y_f$ geldt $\phi_f = (y_f - d/tg\alpha)\sin\alpha$

Uit deze randvoorwaarden volgt voor de stijghoogte in het filter:

$$\phi_f = y_w \sin\alpha + (y_f - y_w - d/tg\alpha)\ \sin\alpha . e^{\frac{\sin\alpha}{\lambda}(y-y_f)} \qquad (54)$$

Met behulp van vergelijking (38) kan uit vergelijking (54) worden afgeleid op de rand $y = y_f$:

$$q(y_f) = -k.b.\ \frac{\sin^2\alpha}{\lambda}\ (y_f - y_w - d/tg\alpha) \qquad (55)$$

De 'filtersnelheid' u_t van het door de toplaag heen lekkende water is afhankelijk van de doorlatendheid k, en dikte d van de toplaag en van het stijghoogteverschil over de toplaag. In formulevorm is de relatie als volgt:

$$u_t = \frac{\phi_b - \phi_f}{d}\ k' = \frac{(y_w - y)\ \sin\alpha + d\ \cos\alpha}{d}\ k' \qquad (56)$$

Substitutie van de vergelijkingen (55) en (56) in vergelijking (53) levert na enige omwerking de volgende differentiaalvergelijking voor y_f.

$$\frac{\partial y_f}{\partial t} = \frac{k'\sin\alpha}{2b.d.\varepsilon}\ (y_w - y_f)^2 + \left(\frac{k'\cos\alpha}{\varepsilon.b} + \frac{k\ \sin^2\alpha}{\varepsilon.\lambda}\right)\ (y_w - y_f) + \frac{k.d.\sin^2\alpha}{\varepsilon.\lambda.tg\alpha} \qquad (57)$$

Voor de oplossing van vergelijking (57) is een numeriek schema opgesteld. Dit schema is opgenomen in het rekenproces.

5.3 Toetsing van het rekenmodel

In paragraaf 2.2 is uitvoerig de samenstelling van de zetsteen konstrukties behandeld. De positie van de meetinstrumenten in de verschillende zetsteen proefvakken is belicht in paragraaf 2.3 (zie tevens figuur 10). De geplaatste drukopnemers registreren een signaal aan boven en onderkant van de zetsteen. Het geregistreerde signaal aan de bovenkant van de zetsteen wordt gebruikt als invoersignaal voor het in 5.2 beschreven rekenmodel. Als voorbeeld wordt verwezen naar figuur 36. In de verklarende schets zijn de posities van de drukopnemers aangegeven. Hierbij dient men zicht te realiseren, dat op elke positie 2 drukopnemers respektievelijk aan de bovenkant en aan de onderkant van een zetsteen aanwezig zijn. Tijdens de metingen heeft elke drukopnemer zijn eigen nummer gekregen. Enige verklaring hierover is nodig, omdat in het volgende naar computerplots wordt verwezen, waarin deze nummering is aangehouden.
In hoofdstuk 2 is aangegeven, dat er 3 proefvakken van zetsteen waren aangebracht. In elk proefvak waren op identieke wijze 4 posities voor de drukopne-

mers gekozen (zie figuur 10). Dit betekent, dat er een totaal van 3 (vakken) x 4 (posities) x 2 (onder en boven) = 24 drukopnemers in de zetsteen-proefvakken zijn gebruikt. De nummering van de drukopnemers neemt toe met de vaarrichting en de richting omhoog langs het talud. De oneven nummers zijn gebruikt om de drukopnemer aan de bovenzijde van een zetsteen te karakteriseren, terwijl de even nummers op overeenkomstige wijze de onderzijde aangeven. Gaande in de vaarrichting langs het talud betekent dit, dat in het eerste proefvak (blokjes op roosterwerk) de nummers 1 (bovenzijde, rechts) tot en met 8 (onderzijde, links bovenaan op talud) voorkomen. Op overeenkomstige wijze zijn de nummers 9 tot en met 16 voor het tweede proefvak (blokjes op split) en 17 tot en met 24 voor het derde proefvak (blokjes op houten plaat) gebruikt. Voor de toetsing van het rekenmodel is gebruik gemaakt van de meetgegevens uit het tweede proefvak (blokjes op split). Dit omdat de opbouw (toplaag op gegradeerd materiaal) van deze verdediging de grootste gelijkenis vertoont met de opbouw van in de praktijk voorkomende verdedigingen. Hierbij wordt tevens vermeld, dat de twee andere proefvakken een meer theoretische waarde hebben met als achtergrond het verkrijgen van inzicht in de relatie tussen doorlatendheid van ondergrond en opwaartse druk. Daarom is gekozen voor twee extrema naast het proefvak met split, te weten: roosterwerk ($k_{ondergrond}=\infty$) en houten plaat ($k_{ondergrond}= 0$). In paragraaf 5.4 zal nader worden ingegaan op de meetresultaten van de proefvakken op het roosterwerk en op de houten plaat.

Bij gebruik van het in 5.2 gepresenteerde rekenmodel worden de volgende invoergrootheden gevraagd:

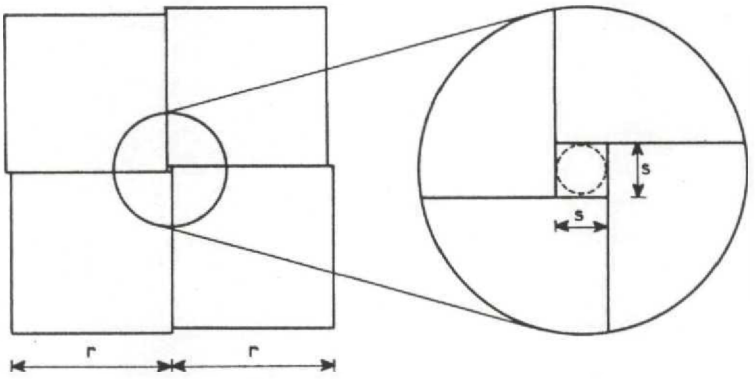
1. waterspiegelregistratie boven het talud
2. taludhelling α
3. dikte d van de zetsteen toplaag
4. dikte b van de filterlaag
5. doorlatendheid k' van de zetsteen toplaag
6. doorlatendheid k van de filterlaag

ad 1) Voor het in te voeren signaal betreffende waterspiegelvariatie wordt het geregistreerde druksignaal aan de bovenkant van de toplaag in het te beschouwen punt genomen. Indien het te beschouwen punt zó hoog op het talud ligt dat het droogvalt tijdens een vaart, wordt het geregistreerde druksignaal van een positie lager gebruikt.

ad2,3,4) De invoer van de grootheden α ,d en b levert geen probleem. Voor de modelproeven geldt:

$tg\alpha = 0{,}25$; $d = 0{,}15m$; $b = 0{,}020m$

ad 5) De doorlatendheid k' van de toplaag is niet bekend. Hiervoor moest een schatting worden gemaakt. Hierbij is uitgegaan van het idee, dat de stroming door de toplaag hoofdzakelijk plaatsvindt door openingen veroorzaakt door ongelijkmatige zetting (zie schets).



De weerstand van een dergelijke opening over de dikte van de toplaag kan worden benaderd met de formule van Hagen - Poiseulle voor laminaire stroming in een buis:

$$R = \frac{128\ \ell\ \eta}{\rho g \pi D^4} \qquad (58)$$

Waarin: ℓ = lengte van de buis (m)
D = diameter van de buis (m)
η = viscositeit $\approx 10^{-3}$ (kg/ms)
R = weerstand (s/m^2)

Voor de doorlatendheid van een dergelijke buis geldt de relatie:

$$k = \frac{\ell}{R \cdot A_o} = \frac{\ell}{R \cdot \frac{1}{4}\pi D^2} \qquad (59)$$

Hierin is : A_o = doorsnede van de buis

Uit de formules (58) en (59) kan de doorlatendheid van een opening in de toplaag worden benaderd met:

$$k_b = \frac{d}{R.\frac{1}{4}\pi.s^2} = \frac{4d.\rho g\pi s^4}{128d\eta\pi s^2} = 0{,}031\ \frac{\rho g}{\eta}\ s^2 \approx 3.10^5 s^2 \qquad (60)$$

De doorlatendheid k' van de toplaag kan vervolgens worden benaderd door de doorlatendheid k_b van één opening uit te middelen over het oppervlak van één zetsteen. In formulevorm leidt dit tot:

$$k' = k_b \cdot \frac{s^2}{r^2} \approx 3.10^5\ \frac{s^4}{r^2} \qquad (61)$$

met s en r respektievelijk de zijde van de opening en de zijde van een zetsteen (zie schets). Met r = 0.03m kan uit (61) worden afgeleid voor verschillende waarden van s:

$$\begin{aligned} s &= 0{,}001m \qquad k' \approx 0{,}3.10^{-3} m/s \\ s &= 0{,}0015m \qquad k' \approx 1{,}7.10^{-3} m/s \end{aligned} \qquad (62)$$

Hieruit volgt dat k' orde 10^{-3} m/s is.

ad 6) De doorlatendheid k van de filterlaag is niet bekend. Met behulp van de formule van Cohen de Lara (zie [8]) kan hiervoor een schatting worden gemaakt:

$$k = \sqrt{4g\varepsilon^5 D_f} \qquad (63)$$

waarin ε = porositeit en D_f = karakteristieke korreldiameter van het filtermateriaal (hiervoor wordt gewoonlijk D_{10} genomen). Uit figuur 6 blijkt, dat D_f = 3,70mm. Als voor de porositeit ε een waarde van 0,4 wordt aangehouden volgt uit (62), dat:

$$k \approx 0{,}06\ m/s \qquad (64)$$

Uit de beschrijving van de invoergrootheden blijkt, dat er met name omtrent de waarde van k' onzekerheid betreft. Alvorens het rekenmodel te kunnen toetsen zijn enkele ijkberekeningen uitgevoerd om een definitieve waarde van k' vast te stellen. Als ijksituatie is T1807 (zie tabel 1) gekozen. Deze situatie komt tevens overeen met de situatie in figuur 36. Als invoersignaal is het door drukopnemer 11 (DR011, positie 1 in figuur 36) geregistreerde signaal aan bovenzijde van het blokje gebruikt. Voorts zijn de waarden α,d,b en k gebruikt

zoals hiervóór aangegeven. Voor k' zijn achtereenvolgens de waarden 0,0005; 0,0010 en 0,0020 m/s ingevoerd. De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven in respektievelijk de figuren 37, 38 en 39. Zowel de druk aan de onderkant van het blokje als de verschildruk over het blokje worden met behulp van het rekenmodel berekend. Met name de verschildrukken beschouwend wordt geconcludeerd, dat met k' = 0,0005 m/s (fig. 37) gemiddeld te hoge waarden worden berekend. Met k' = 0,0020 m/s (fig. 39) worden gemiddeld te lage waarden voorspeld. Met k' = 0,0010 m/s (fig. 38) wordt gemiddeld een goede overeenkomst tussen berekening en meting geconstateerd. Weliswaar worden de gemeten opwaartse drukpieken niet door het rekenmodel weergegeven. Deze drukpieken kunnen mogelijk het gevolg zijn van modeleffekten. In appendix 1 zal hierop nader worden ingegaan. Voor het rekenmodel wordt in ieder geval de waarde k' 0,0010 m/s aangehouden. De eerste toetsberekening vond plaats voor dezelfde situatie T1807. Echter de plaats op het talud is hoger en komt overeen met positie 2 zoals weergegeven in figuur 36. Het door DR013 geregistreerde signaal is gebruikt als invoer. In figuur 40 is het resultaat van de berekeningen en metingen weergegeven. De overeenkomst tussen berekening en meting is goed te noemen, terwijl in het gemeten signaal nauwelijks sprake is van drukpieken. Om enige invloed van de scheepssnelheid op het (verschil) druksignaal te kunnen vaststellen is vervolgens een systematische serie toestanden doorgerekend. Als representatieve toestanden zijn gekozen T1502, T1504, T1506, T1508. De scheepssnelheden zijn respektievelijk: 0,67; 0,74; 0,79; 0,83 m/s (zie tabel 1). In de figuren 41 t/m 44 zijn zowel de meet- als de rekenresultaten opgenomen. Duidelijk is te zien, dat ter plaatse van de golfdalen van de door het schip opgewekte golven de maximale opwaartse drukken optreden. Over de lengte van de duwbak zijn deze maximale opwaartse drukken van dezelfde grootte, terwijl de achterste optreedt ter plaatse van het begin van de haalgolf. Uit de figuren 41 t/m 44 is waarneembaar, dat de maximale opwaartse druk toeneemt bij verhoging van de scheepssnelheid. In de volgende paragraaf zal hierop worden teruggekomen door op éénvoudige wijze een verband te leggen tussen Δp_{max} (= maximale opwaartse druk) en ^{z}max (= spiegeldaling aan het begin van de haalgolf).

Als voorbeeld van de mogelijke output van het rekenmodel is figuur 45 opgenomen. In de bovenste grafiek zijn opgenomen:

1. het geregistreerde golfsignaal door een drukopnemer aan de bovenzijde van een blokje. Dit signaal is tevens de input voor het rekenmodel.

2. het berekende waterspiegel-verloop in het granulaire filter onder de toplaag (zie de verklarende schets aan het begin van paragraaf 5.2).

In de onderste grafiek worden de maximale verschildrukken gepresenteerd, die optreden tijdens de passage van de duweenheid. Deze maximale drukken treden op in het snijpunt van buiten waterstand met het talud. Bovendien wordt opgemerkt, dat in figuur 45 de absolute verschildrukken zijn gepresenteerd. Ter vergelijking met de figuren 37 t/m 44 dient dan ongeveer de dikte van het blokje te worden afgetrokken (ca. 0,015m). Dit effekt wordt veroorzaakt door het verschil tussen boven- en onderwater gewicht van een blokje.

5.4 Maximale opwaartse drukken

In deze paragraaf zal getracht worden een relatie te leggen tussen de maximaal opgetreden verschillen (Δp_{max}) over de toplaag en de waterspiegeldaling (z_{max}) aan het begin van de haalgolf. Hierbij wordt uitgegaan van het in paragraaf 5.2 gepresenteerde rekenmodel. Indien nu de waterstand in het filter verondersteld wordt konstant te zijn, kan een eenvoudige relatie voor het maximale stijghoogteverschil ($\Delta\phi_{max}$) over de toplaag worden afgeleid. Voor deze afleiding wordt verwezen naar appendix 1 van verslag M1115-XIV [10]. Het resultaat luidt:

$$\frac{\Delta\phi_{max}}{z_{max}} = \tfrac{1}{2}\,\frac{\lambda}{z_{max}}\,(1-e^{-2z_{max}/\lambda}) \qquad (65)$$

In tabel 4 zijn de gemeten stijghoogteverschillen op de posities 1,2 en 3 volgens figuur 36 opgenomen voor elk van de drie proefvakken, te weten:

1. trovidur op split,
2. trovidur op houten plaat,
3. trovidur op roosterwerk.

Trovidur op split

In de figuren 46, 47 en 48 zijn de gemeten stijghoogteverschillen in het vak met split grafisch weergegeven voor de posities 1,2 en 3 (zie figuur 36; hier aangeduid met respektievelijk $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$ en $\Delta\phi_3$. Op de vertikale as is de dimensieloze parameter $\Delta\phi/z_{max}$ uitgezet. Op de horizontale as is de parameter z_{max}/λ uitgezet. Ter vergelijking is tevens de uitdrukking volgens vergelijking (65) grafisch weergegeven, waarbij opgemerkt wordt, dat $\Delta\phi_{max}$ de optre-

dende maximale waarde van het stijghoogteverschil is ter plaatse van de waterlijn op het talud.

Volgens de theorie (zie appendix 1 van verslag M1115 deel XIV [10]) zal het stijghoogteverschil ter plaatse van drukopnemers 1 en 3 (zie figuur 36) lager zijn dan $\Delta\phi_{max}$, zolang de waterspiegel niet samenvalt met de positie van de drukopnemer. Indien y de positie is van de drukopnemer ten opzichte van de stilwaterspiegel gemeten langs het talud (zie definitieschets in paragraaf 5.2), kan worden afgeleid, dat:

$$\frac{\Delta\phi}{z_{max}} = \frac{\Delta\phi_{max}}{z_{max}} \cdot e^{\frac{y \sin\alpha}{\lambda}} \cdot e^{\frac{z_{max}}{\lambda}} \qquad (y < -\frac{z_{max}}{\sin\alpha}) \qquad (66)$$

en

$$\frac{\Delta\phi}{z_{max}} = \frac{\Delta\phi_{max}}{z_{max}} \cdot \left(e^{\frac{-y \sin\alpha}{\lambda}} - e^{\frac{y \sin\alpha}{\lambda}}\right) \cdot \frac{e^{\frac{-z_{max}}{\lambda}}}{1-e^{\frac{-2z_{max}}{\lambda}}} \qquad (y > -\frac{z_{max}}{\sin\alpha}) \qquad (67)$$

Voor de posities van drukopnemers 1,2 en 3 geldt (zie figuur 36) gemiddeld voor alle toestanden:

$y = y_1 \approx -0{,}34m$,$y = y_2 \approx -0{,}22m$

en

$y = y_3 \approx -0{,}10m$

terwijl voor de leklengte in het vak met het split als filterlaag wordt aangehouden op grond van de gegevens in paragraaf 5.3:

$$\lambda = \sin\alpha \left(\frac{k}{k'} \cdot b \cdot d\right)^{0{,}5} = 32{,}54 \text{ mm} \qquad (68)$$

In figuur 46 is duidelijk te zien, dat praktisch alle meetpunten lager liggen dan de berekende curve voor $\Delta\phi_{max}/z_{max}$. Daartegen lijkt de berekende curve ϕ_1/z_{max} meer een ondergrens te zijn dan een gemiddelde voorspelling. Redenen hiervoor kunnen gezocht worden in de betrekkelijke eenvoud van het rekenmodel, zoals:

- aanname van horizontale, in de tijd fluctuerende waterspiegel in plaats van een voorbijtrekkende scheepsgolf,
- aanname van een vaste filterwaterstand in tegenstelling tot de vrije filter waterspiegel in werkelijkheid.

Tevens is in de figuur een curve getekend, die het kritieke stijghoogteverschil $\Delta\phi_c$ aangeeft. Deze kritieke waarde $\Delta\phi_c$ geeft de grenstoestand aan, waarbij het onderwater gewicht van 1 blokje wordt gecompenseerd. Bij een soortelijke massa van 1380 kg/m^3 voor trovidur bedraagt $\Delta\phi_c$ = 5,53 mm (overeenkomend met een opwaartse gerichte druk onder een blokje van 54,25 N/m^2 ter compensatie van de gewichtskracht onder water). In de volgende paragraaf wordt teruggekomen op de stabiliteitsaspekten per proefvak.

In figuur 47 is duidelijk waarneembaar, dat de meetpunten meer in de richting van de curve voor $\Delta\phi_{max}/z_{max}$ zijn geschoven. Echter zeer opmerkelijk is de concentratie van zeer hoge gemeten drukpieken rondom de lijn ($z_{max} = -y_2\sin\alpha$), die aangeeft, dat de drukopnemer aan de bovenkant juist droogvalt. Moeilijk is het hiervoor de juiste verklaring te geven. In appendix 1 wordt meer in detail op dit verschijnsel ingegaan.
In deze appendix wordt een rekenmodel behandeld met als doel na te gaan:
- wat de invloed is van een faseverschuiving tussen het druksignaal aan de bovenkant van de zetsteen en het druksignaal aan de onderkant,
- of er sprake kan zijn van een drukgolf in de filterlaag, die vóór de haalgolf uitloopt.

Bovendien worden in deze appendix de modelresultaten vergeleken met meetresultaten in het prototype. De conclusie is echter, dat de gemeten drukpieken in het model mogelijk onrealistisch hoog zijn. Hierbij wordt opgemerkt, dat het niet eenduidig is komen vast te staan in hoeverre deze drukpieken een gevolg zijn van schaaleffekten en/of storingen. Meer fundamenteel onderzoek zal dan ook noodzakelijk zijn ter verklaring aan deze hoge drukpieken.

In figuur 48 zijn evenals in de figuren 46 en 47 de metingen weergegeven voor de hoogst op het talud gelegen drukopnemers (positie 3 volgens figuur 36). Tevens zijn de theoretische curves voor het maximale stijghoogte verschil ($\Delta\phi_{max}$), voor het stijghoogteverschil ($\Delta\phi_3$) ter plaatse van positie 3 op het talud, en voor het stabiliteitscriterium ($\Delta\phi_c$ = 5,53 mm) gegeven. Ook nu is weer te zien, dat voor een groot deel van de metingen de berekende waarde $\Delta\phi_{max}$ een bovengrens vormt. Ook nu valt er weer een concentratie van drukpieken waar te nemen rondom de lijn ($z_{max} = -y_3\sin\alpha$) die aangeeft, dat de drukopnemer aan de bovenkant van de zetsteen juist droogvalt.
Evenals in de figuren 47 en 48 is ook in figuur 49 goed waarneembaar, dat het stabiliteitscriterium (compensatie van het onderwatergewicht van 1 blokje door

het stijghoogteverschil) in praktisch alle toestanden wordt overschreden. In paragraaf 5.5 zal hierop worden teruggekomen.

Concluderend wordt gesteld, dat voor het grootste deel van het talud de berekende waarde van $\Delta\phi_{max}$ een veilige bovengrens oplevert. Echter ter plaatse van de maximale spiegeldaling op het talud kunnen grote drukpieken optreden. De gemeten drukpieken kunnen vele malen groter zijn dan de berekende maximale druk. Het onderzoek (beschreven in appendix 1) heeft geen uitsluitsel kunnen geven over de invloed van mogelijke schaaleffekten en/of storingen op de grootte van de drukpieken. Vanuit dimensioneringsoogpunt wordt het aanbevolen om meer fundamenteel onderzoek te verrichten ter verklaring van de hoge waargenomen drukpieken.

Trovidur op houten plaat

Zoals vermeld in paragraaf 5.2 heeft dit proefvak een meer theoretische waarde vanwege de schematisatie van de ondergrond (nl. de houten plaat). In praktijk zou dit proefvak vergeleken kunnen worden met de situatie, dat een toplaag van gezette steen rechtstreeks geplaatst is op een ondergrond van 'goede' en geëgaliseerde klei. Dit vak is in het model aangebracht om een indruk te kunnen krijgen van de invloed van de struktuur van de ondergrond (zoals doorlatendheid, dikte filterlaag) op de grootte van de opwaartse drukken. Het in deze paragraaf gepresenteerde, vereenvoudige rekenmodel is in principe niet geschikt om toegepast te worden voor de situatie van het onderhavige proefvak. Het rekenmodel is namelijk gebaseerd op de aanwezigheid van een toplaag op een filterlaag van bepaalde dikte en met een bepaalde doorlatendheid. In het onderhavige proefvak is er geen sprake van een filterlaag. Indien echter wordt verondersteld, dat er tussen houten plaat en toplaag een dunne laag aanwezig is, waardoor water kan stromen, is het mogelijk een indruk te krijgen van de leklengte λ . In figuur 49 zijn alle verschildrukmetingen (zie tabel 4) voor de drie verschillende posities op het talud weergegeven. Voor verschillende waarden van λ (respectievelijk 10,30 en 50mm) is de parameter $\Delta\phi/z_{max}$ uitgezet tegen z_{max}/λ. In aanmerking nemend, dat de theoretische curve $\Delta\phi_{max}/z_{max}$ een bovengrens dient te zijn voor de meetpunten, kan uit figuur 49 voorzichtig worden afgeleid, dat een waarde van $\lambda \approx 50$mm een redelijke schatting is voor het onderhavige proefvak. De orde grootte van deze schatting wordt onderbouwd door de doorlatendheidsberekening van de spleten van een steenzetting (zie samenvattend verslag M1795/M1881 deel XV, [11]), te weten:

$$k_w = 18 \log \left(\frac{6s}{k_{nik}}\right) (\tfrac{1}{2}s)^{0,5} \qquad (69)$$

waarin:

k_w	=	de doorlatendheid t.g.v. de wrijvingsweerstand in de spleet	$(m.s^{-1})$
18	=	coëfficiënt	$(m^{0,5}.s^{-1}$
k_{nik}	=	de nikuradse ruwheid	(m)
s	=	de spleetbreedte	(m)

Indien nu wordt verondersteld, dat vergelijking (69) een indicatie geeft voor de aangenomen spleet tussen houten plaat en toplaag, kan een schatting van de leklengte λ als volgt worden gemaakt:

$$\lambda = \sin\alpha \left(\frac{k_w}{k'} s.d\right)^{0,5} \qquad (70)$$

Met de veronderstelling, dat s = 1 à 2 mm en $k_{nik} \approx 0{,}1$mm (lijkt redelijk voor het relatief gladde trovidur en het gebruikte multiplex), volgt uit de vergelijkingen (69) en (70):

λ = 25 à 46 mm

hetgeen in orde grootte overeenkomt met de schatting (λ = 50mm) op grond van figuur 49.

Opgemerkt wordt, dat er geen karakteristieke drukpieken optreden (zie figuur 49) zoals dit is waargenomen bij het trovidur op split (zie bijvoorbeeld figuur 47). Mogelijk kan dit veroorzaakt worden door het verschijnsel, dat er nauwelijks water beschikbaar is om een mogelijke holle ruimte onder een omhoog bewegend blokje op te vullen. De invloed van toestromend water onder een blok op de opwaartse druk wordt op dit ogenblik onderzocht in het kader van het steenzettingen-onderzoek (M1885). Eventuele ontwikkelingen in dit kader zouden kunnen leiden tot de oplossing van het probleem betreffende de geconstateerde drukpieken.

Trovidur op roosterwerk

Dit proefvak heeft nog duidelijker dan het proefvak 'Trovidur op houten plaat' een theoretische waarde ten aanzien van de schematisatie van de ondergrond.

Dit vak is zódanig gedimensioneerd, dat de filterlaag onder de toplaag een holle ruimte is, waarin het water ongestoord kan toestromen. Het doel van deze dimensionering is het verkrijgen van meer inzicht in de invloed van de doorlatendheid van de filterlaag op de grootte van opwaarts gerichte drukken. In dit geval is gekozen voor een extreme situatie met een zeer grote doorlatendheid voor de filterlaag. Uit de proeven is echter gebleken, dat er in dit geval heel duidelijk sprake was van onderdimensionering, omdat bij praktisch alle vaarsnelheden (uitgezonderd lage vaarsnelheden van ca. 0,75 V_{grens}) instabiliteit optrad. Hierbij was sprake van uitlichting van individuele stenen tot het afglijden in rijen bij de hoge vaarsnelheden. Het drukbeeld werd door deze grote mate van instabiliteit zodanig verstoord, dat ten aanzien van de gemeten drukken geen conclusies zijn te trekken. De opgenomen drukpieken voor dit proefvak in tabel 4 en in figuur 50 hebben dan ook geen fysische betekenis. Uit het oogpunt van documentatie zijn zij echter toch weergegeven.

5.5 Stabiliteitsaspekten

De gewichtskracht onder water van een trovidurblokje, waarvan de soortelijke massa 1380 kg/m^3 bedraagt, is 0,05 N. De component hiervan loodrecht op het talud (1:4) is dus 0,0488 N, zodat een opwaarts gerichte druk onder een blokje van 54.25 N/m^2 voldoende is om de gewichtskracht onder water te compenseren. De bij grotere opwaartse druk in werking tredende wrijvingskracht over een oppervlak van ten hoogste viermaal 30x15 mm^2 laat zich moeilijk kwantificeren. De zettingswijze van de toplaag is hierop van grote invloed. Bovendien kan verwacht worden, dat een gemeten opwaarts gerichte druk onder één trovidurblokje ook bij naburige blokjes zal optreden. Opstulping van een groep blokjes kan dan voorkomen zonder dat de onderlinge wrijvingskracht van enige betekenis is geweest. De modelproefmetingen bevestigen dit groepsgewijs bezwijken. De uitgevoerde trekproefjes op trovidurblokjes zijn ook hierom niet erg representatief voor de stabiliteit in de praktijk.

Het lijkt verstandig bij de formulering van een ontwerpkriterium alleen de gewichtskracht van een steen in rekening te brengen, omdat er in de toplaag altijd wel een slecht aansluitend blokje voorkomt. Uitdrukking van zo'n element heeft tot gevolg, dat stroomkrachten als extra belasting op de toplaag gaan werken, waardoor voortschrijdende erosie - in prototype omstandigheden ook van korrelmateriaal - kan optreden.

Een ontwerpkriterium voor een zetsteen toplaagbescherming dient dus te bevatten een lengte (= breedte) - hoogte verhouding van de stenen. Vergroting van de lengte (= breedte) per steen - interessant uit economisch oogpunt - met een faktor β ($\beta > 1$) geeft een vergroting van de opwaartse drukkracht met β^2 en tegelijkertijd (bij gelijk gewicht: per steen) een verkleining van het maximaal wrijvingsoppervlak met $1/\beta$. Beide hebben vanzelfsprekend een negatieve invloed op de stabiliteit. Afhankelijk van de verwachte drukopbouw zal de optimale dimensie van de steen worden gekozen.
In het volgende wordt nader ingegaan op de stabiliteitsaspekten per proefvak.

Trovidur op het grofmazig roosterwerk

Bij alle uitgevoerde vaarten zijn opwaartse drukken gemeten, die groter zijn dan 54,25 N/m^2 (komt overeen met stijghoogteverschil $\Delta\phi_c$ = 5,5 mm). Op grond van de veronderstelling, dat er altijd wel een steentje met minimale wrijving aanwezig is, zou het trovidur op het grofmazig roosterwerk derhalve bij alle vaarten instabiel moeten zijn geweest. Inderdaad tonen foto's behoudens bij vaarten met lage scheepssnelheid (ca. 0,75 V_{grens}), hetzij uitlichting, hetzij oplichting van individuele stenen in dit proefvak. Zodra ten gevolge van drukopbouw een aanzienlijk aantal blokjes wordt uitgelicht, is het drukbeeld hierdoor zodanig verstoord, dat het verdere drukverloop niet meer representatief is voor een taludbekleding. In verband met de geringe wrijving van de blokjes op het roosterwerk glijden ze in rijen af naar teen talud, zoals op foto's goed is te zien (zie foto 5). Benadrukt moet worden, dat de kwestie stabiliteit dan al lang niet meer aan de orde is:
Stroomdrukken geven deze vorm van schade en niet langer waterdrukverschillen.

T.a.v. de drukopbouw onder het grofmazig roosterwerk zijn de volgende opmerkingen te maken:

- Al bij lage scheepssnelheid (laag toerental) c.q. lage blockage faktor wordt de kritieke opwaartse druk van onder de blokjes van 54,25 N/m^2 overschreden.
- Hoewel plaatselijk de onderlinge wrijvingskracht tussen de blokjes schade verhindert (zelfs bij grote waterspiegelfluktuaties), bezwijkt het talud door de opwaartse drukopbouw.
- De drukopnemers het dichtst bij de ongestoorde waterspiegel geven consequent een hogere piekwaarde voor de opwaartse druk dan de lager geplaatste (zie figuur 50) opnemers.

Het droogvallen van eerst de bovenkant en daarna de onderzijde van het blokje tijdens de waterspiegeldaling is hiervoor een verklaring.

- In het algemeen treedt de piekwaarde van de opwaartse druk op in de haalgolf. De druk aan de onderzijde van de steen loopt blijkbaar in de haalgolf voor op het kanaalsignaal.
- Het proefvak was te zwaar ondergedimensioneerd. Alleen in het bezwijkgebied zijn meetpunten verkregen. Hoewel de onderdimensionering met opzet is gekozen, zouden bij vervolgonderzoek meetpunten in het stabiele gebied ook wenselijk zijn.

Trovidur op split

Evenals bij het roosterwerk zijn hier opwaartse drukken geregistreerd, die in veel gevallen de kritieke druk van 54,25 N/m^2 (= 5,5 mm stijghoogteverschil) te boven gaan (zie figuren 46, 47 en 48). Echter in vergelijking met het roosterwerkvak is het responsiesignaal veel onrustiger. Er treden hele duidelijke piekwaarden op, die 4 tot 5 keer zo groot kunnen zijn als de opwaartse druk op de overige blokjes. Zoals reeds in paragraaf 5.4 is geconstateerd lijken de piekwaarden gebonden te zijn aan de plaats op het talud (zie met name figuren 47 en 48). De tendens valt te bespeuren, dat de piekwaarden optreden in de omgeving van de waterlijn. Om dit verschijnsel fysisch te kunnen verklaren is getracht met behulp van een geschematiseerde aanpak (zie appendix 1) hiervoor een wiskundige relatie af te leiden. Helaas is dit niet gelukt. Een meer fundamentele benadering van dit probleem wordt dan ook aanbevolen.
In appendix 1 is eveneens een vergelijking met beschikbare signalen uit het prototype gemaakt. Op grond van deze vergelijking zou verondersteld kunnen worden, dat de gemeten drukpieken onrealistisch hoog kunnen zijn. Dit in ogenschouw nemende worden in het volgende mogelijke modeleffekten belicht, die van invloed kunnen zijn op de gemeten hoge drukpieken.

Het proefvak met de vlijlaag van split heeft als enige van de drie vakken een granulair karakter, en is in het model na het proefvak met het roosterwerk geplaatst. Het split-vak wordt door de ongestoorde waterbeweging uit het roosterwerk-vak (onder de trovidurblokjes) aangestroomd. Bij een plotselinge overgang in doorlatendheid leidt dit tot een diskontinuïteit in de hydraulische gradient ter plaatse. Het drukverloop aan de onderzijde van de blokjes in het split-vak kan niet als respons op het kanaalsignaal alléén worden gezien. Ook de stroming onder de blokjes uit het roosterwerk-vak, verstoord door de schade

aldaar, fungeert als stroomdruk en als aandrijvend signaal voor de drukfluktuaties in het split-vak. Afhankelijk van de verstoring in het roosterwerk-vak kunnen piekwaarden in de opwaartse druk in het split-vak optreden. Deze verklaringswijze wordt ondersteund door de meetsignalen waarbij het trovidurblokje dichtbij het roosterwerk-vak in het algemeen de hoogste piek-waarden geeft. Feitelijk leidt de modelaanpak voor het ondergrond signaal tot vermenging van invloeden, voornamelijk door de aanwezigheid van het roosterwerk-vak.

Als verdere verklaring voor het voorkomen van piekwaarden in het split-vak kan gelden, dat aangestroomd granulair materiaal als split plaatselijk micro-kanaalvorming en micro-kanaalvernauwing met zich meebrengt, waardoor lokale drukopbouw mogelijk is.

Ondanks de hoge piekwaarden is in het split-vak minder schade opgetreden dan in het roosterwerk-vak. De verklaring hiervoor is:

1. Gemiddeld zijn de gemeten opwaartse verschildrukken lager dan in het roosterwerk-vak.
2. Gemeten piekwaarden zullen plaatselijk tot uitlichting leiden en niet, zoals in het roosterwerk-vak tot opstulping van een groot aantal blokjes tegelijk.
3. Dankzij het granulaire karakter van het split is een volkomen vlakke zetting van de trovidurblokjes onuitvoerbaar. hierdoor wordt het onderlinge wrijvingsoppenvlak weliswaar verkleind, maar de oplichtingsvrijheid beperkt.
4. De traagheid van het torvidurblokje wordt van belang indien de opwaartse drukpiek slechts gedurende zeer korte tijd werkt. Mogelijk heeft dit facet een rol gespeeld.

Trovidur op houten plaat

Net als bij de andere vakken zijn ook hier opwaartse drukken groter dan 54,25 N gemeten bij alle vaarten. De grootte komt ongeveer onvereen met die uit het split-vak. Ook de piekwaarden komen in het vak op de houten plaat voor. Deze liggen iets lager dan die in het splitvak. Kortom er bestaat weinig verschil tussen de gemeten opwaartse verschildrukken in het split-vak en in het vak op de houten plaat. Dit zou erop wijzen, dat die erosie in beide vakken weinig anders zou moeten zijn. Inderdaad wijzen foto's in die richting. De vraag blijft echter hoe deze onderlinge overeenkomst tussen in aard verschillende vakken kan bestaan. Nadere bestudering van de metingen leert het volgende.

Pieken in de opwaartse druk in het split-vak zijn merendeels het gevolg van een "onrustig" signaal aan de onderkant van de steen. Dit is niet het geval in het vak op de houten plaat. Het laat zich aanzien, dat er in het vak op de houten plaat sprake is van een voorlopen van het druksignaal onder de steen ten opzichte van de kanaalwaterbeweging. Met name naast het schip en in de haalgolf leidt dit tot de pieken in opwaartse druk. Op zich is het drukverloop in het vak op de houten plaat rustiger van vorm dan in het splitvak, maar een faseverschuiving van ongeveer één seconde veroorzaakt opwaartse verschildrukken. In tegenstelling tot het split-vak zijn in het vak op de houten plaat geen verstoringen uit het roosterwer-vak merkbaar.

In figuur 51 zijn de druksignalen aan onder- en bovenkant van een zetsteen op de onderlatende ondergornd (houten plaat) opgenomen. Tevens is in deze figuren het hieruit afgeleide verschildruksignaal weergegeven.

5.6 Samenvatting

De opwaartse druk, nodig om het eigen gewicht van een trovidurblokje onder water te compenseren bedraagt 54,25 N/m^2. Bij de meeste uitgevoerde proefvaarten zijn overschrijdingen van deze kritieke opwaartse verschildruk geregistreerd. Dit geldt voor elk van de drie zetsteenvakken (grofmazig roosterwerk, split, ondoorlatend).

Opwaartse verschildrukken zijn groter in de buurt van de waterlijn dan ter plaatse van de dieper gelegen delen op het talud. Dit geldt ook voor de visuele schade.

Overschrijding van de kritieke opwaartse druk onder de trovidurblokjes leidt in het vak met het grofmazig roosterwerk vrijwel direkt tot schade. Doordat deze overschrijding niet slechts lokaal voorkomt, of althans tenminste onder meerdere aansluitende blokjes tegelijkertijd, bezwijkt een deel van het talud groepsgewijs (opstulping), waarij de onderlinge wrijvingskracht van geen betekenis is geweest (zie foto 5).
Het in aanzienlijke mate bezwijken van de taludbekleding, zoals dat bij vaarten met hogere snelheden in het vak met het grofmazig roosterwerk is voorgekomen, heeft mogelijk een niet te verwaarlozen invloed gehad op het waterdrukverloop onder de trovidurblokjes in het aangrenzende vak met split. Dit model-

effekt is een mogelijke oorzaak voor het feit, dat de drukregistraties in het vak met split een samengesteld karakter hadden. Naarmate er met lagere snelheid werd gevaren was dit modeleffekt geringer. Ook ondervonden de drukregistraties achter in het splitvak minder invloed van dit "aanstroom"-effekt dan de drukopnemer aan het begin van het vak. Blijkbaar laat de aanpassing van een druksignaal aan de gewijzigde grondparameters zich niet zonder meer naar modelomstandigheden verschalen.

Piekwaarden in de opwaartse verschildruk in het split-vak liepen op tot ± 500% van de gemiddelde maxima in de haalgolf. Zij zijn het gevolg van een onrustige respons van het druksignaal aan de onderzijde van de trovidurblokjes.

Piekwaarden in de opwaartse verschildruk in het trovidurvak op zeer ondoorlatende ondergrond zijn het gevolg van het voorlopen van het rustige druksignaal aan de onderzijde van de blokjes t.o.v. de bovenzijde. Deze negatieve faseverschuiving bedraagt ca. 1 s.

Op grond van het vorige kan gesteld worden, dat het vak met trovidurblokjes op zeer ondoorlatende ondergrond kwalitatief de beste meetresultaten te zien heeft gegeven. Verwacht wordt, dat deze metingen inzicht geven in de invloed van een zeer ondoorlatende ondergrond op drukfluktuaties aan de onderzijde van een zetsteenoplaag in prototype-omstandigheden. Het gebruikte materiaal in het model heeft evenwel een beduidend hogere stijfheid dan bij ondoorlatende lagen als klei in prototypeomstandigheden verwacht kan worden. Kwalitatief parameterisch onderzoek met TLGOLF wijst uit, dat de verhouding van stijfheidsmoduli van grond en water het verloop van overdrukken in sterke mate bepaald. De modelbenadering is dus wel geschikt de drukrespons aan de onderzijde van de zetsteen te onderzoeken, maar minder als middel om golfindringing in de ondergrond te bekijken.

Het schademechanisme kan als volgt worden omschreven:

1. trovidur op grofmazig roosterwerk:
   Overschrijding van de kritieke druk van 54,25 N/m^2 (equivalent met het eigen gewicht van een blokje onder water) leidt tot oplichting van een blokje. Daar deze overschrijding niet slechts lokaal optreedt volgt opstulping van een groep blokjes bij toename van de opwaartse druk, waarbij de onderlinge wrijving van geen betekenis is. Wel van belang is hierbij nog de toestroming naar een opening.

2. trovidur op split

Overschrijding van de kritieke druk leidt niet onmiddellijk tot schade. De onderlinge wrijving tussen de trovidurblokjes en de onregelmatige zetting zijn hierop een behoorlijke rem. Sterk lokaal optredende piekwaarden in de opwaartse druk zorgen voor op- of uitlichting van individuele blokjes.
Hierna kan de dan in werking tredende stroomdruk tot verdere schade aanleiding geven.

3. trovidur op sterk ondoorlatende ondergrond

Ook hier vormt de onderlinge wrijving tussen de trovidurblokjes een behoorlijke veiligheid tegen schade. Minder lokaal optredende piekwaarden in de opwaartse druk onder de blokjes zorgen voor op- of uitlichten van individuele blokjes, waarbij bedacht moet worden dat de maximaal mogelijke wrijvingskracht per blokje varieert. Slecht aansluitende blokjes zullen altijd wel voorkomen. De mate van aansluiting bepaalt in dit vak de volgorde van bezwijken van de blokjes. De stroomdruk kan na opgetreden schade nog tot extra schade leiden.

Een veilig ontwerpkriterium voor een zetsteen taludbekleding zou uit moeten gaan van de eigen gewichtkracht van de stenen onder water. Slecht aansluitende stenen komen altijd wel voor, zodat het in rekening brengen van een wrijvingskracht tussen stenen onderling een dubieuze stap is. Na uitlichting van een individuele steen werkt immers de stroomkracht van het kanaalwater in op de bescherming.

De (gedwongen) afwezigheid van een echte ondergrond in het model (in model: beton) heeft naar verwachting grote invloed gehad op de druk opbouw onder de trovidurlaag. Als gevolg van de onmogelijkheid van waterberging in beton geeft het model bij een kanaalspiegeldaling te lage en bij een stijging mogelijk te hoge opwaartse drukken.
Koppeling naar prototypemeetresultaten is hierbij van groot belang.
Ten aanzien van het paragraaf 5.2 beschreven rekenmodel wordt geconcludeerd, dat de schematisatie in feite slechts toepasbaar is voor het splitvak. Voor dit vak levert het rekenmodel ten aanzien van de opwaartse druk een veilige voorspelling voor het grootste deel van het talud. Echter ter plaatse van de maximale spiegeldaling op het talud kunnen grote drukpieken optreden, die vele

malen groter zijn dan de voorspelde. Schaaleffekten kunnen een mogelijke oorzaak zijn voor deze drukpieken. Echter vanwege de konsekwente lokatie van deze drukpieken rondom de waterlijn wordt het vanuit dimensioneringsoogpunt aanbevolen om meer fundamenteel onderzoek te verrichten ter verklaring van de hoge waargenomen drukpieken.

Voor het vak op de ondoorlatende ondergrond (houten plaat) lijkt het rekenmodel bij een goede schatting van de leklengte λ een goede bovengrens voor de opwaartse druk te kunnen voorspellen. In dit proefvak werden geen extra hoge drukpieken rondom de waterlijn waargenomen.

6. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Aangetoond is, dat de optredende snelheden in de haalgolf een belangrijke faktor vormen voor het transport van stortsteen. Op basis van theorie werd afgeleid, dat bij een constante scheepssnelheid de lokale, over de vertikaal gemiddelde snelheid een funktie is van de lokale golfhoogte. Op summiere wijze (dus niet tijdrovend) werd een waarde geschat voor een nog onbekende coëfficiënt in de genoemde funktie (zie vergelijking (25)). Daar er echter een uitgebreid bestand aan simultane snelheid- en golfregistraties voor handen is, lijkt het zinvol in een vervolgonderzoek de afgeleide funktie hieraan te toetsen en zonodig de waarde van de geschatte coëfficiënt bij te stellen.

Met behulp van voortgezet modelonderzoek kunnen de bepaalde ontwerpkriteria worden getoetst op een eventuele toepasbaarheid. Tevens kan de afgeleide funktie voor het transport uitgebreider worden getoetst. Bij dit voortgezette modelonderzoek kan dezelfde opzet van de in dit verslag behandelde onderzoek worden gehanteerd. Als extra variabelen dienen echter de positie van het schip in de vaarweg en het type schip te worden meegenomen. Een nader onderzoek naar de invloed van de taludhelling op de diverse grootheden is eveneens zeer gewenst.

Ten aanzien van de zetsteen constructies wordt opgemerkt, dat het gewenst is te beschikken over meetresultaten in geheel stabiele omstandigheden. Met dergelijke meetresultaten kunnen betrouwbaarder extrapolaties naar prototype omstandigheden worden gemaakt. Een zwaardere dimensionering van de blokjes zal leiden tot meetresultaten beneden, bij en boven de kritieke opwaartse druk. Tevens dient met langere proefvakken te worden gewerkt, opdat aanloopeffekten tot een minimum worden gereduceerd.

De konsekwente lokatie van de hoge drukpieken (tot 5 keer groter dan berekend) in het splitvak rondom de waterlijn geeft aanleiding tot het doen van meer fundamenteel onderzoek ter verklaring van dit verschijnsel. In appendix 1 wordt hiertoe reeds een aanzet gegeven. De aangenomen schematisatie van het probleem bleek echter onvoldoende en leidde niet tot een oplossing.

Een modelfaciliteit, waarbij de invloed van de ondergrond op drukfluktuaties t.g.v. scheepsgolven kan worden onderzocht, betekent een welkome aanvulling op de onderzoeksmogelijkheden. Te denken valt hierbij aan de geplande nieuwe scheepvaartfaciliteit.

LITERATUUR

1. Waterloopkundig Laboratorium
   Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen,
   Schelde-Rijn verbinding,
   verslag M 1115, deel I, Delft, 1974

2. Waterloopkundig Laboratorium
   Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen
   Erosie door retourstroom,
   verslag M 1115, deel Xb, Delft, 1986

3. SCHIJF, J.B.,
   XVIIth International Navigation Congress,
   Section 1, Communication 2, Lisbon, 1949

4. KAA, E.J. van de,
   Waterloopkundige aantasting aan oeververbindingen,
   Symp. Kust- en Oeverwerken in praktijk en theorie,
   Ned. Vereniging van Kust- en Oeverwerken, 1979

5. PAINTAL, A.S.,
   Concept of critical shear stress in loose boundary open channels,
   Journal of Hydraulic Research (1971) 1, pp. 91-113

6. Waterloopkundig Laboratorium
   Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen
   Erosie en stabiliteit van bodem en oevers, inleiding tot relevante verschijnselen
   verslag M 1115, deel VIII, Delft, 1982

7. NAHEER, E.
   The damping of solitary waves
   Journal of Hydraulic Research, Vol. 16, no. 3, 1978

LITERATUUR (vervolg)

8. De Lara, G.C.
Coefficient de perte de charge en milieux paveux basé à équilibre hydridynamique d'un massif
La Houille Blanche, vol. 2, 1955

9. Waterloopkundig Laboratorium
Taludbekleding van gezette steen,
Oriënterende grondmechanische studies
M 1795-WL deel IV, CO255780/45 - LGM, Delft, 1982

10. Waterloopkundig Laboratorium
Taludbekleding van gezette steen
Belasting en sterkte van zetsteenverdedigingsconstructies op oevers en dijken,
M 1115 deel XIV-WL, M 1795/M 1881 deel XVI-WL, CO416409/4 - LGM, Delft, 1984

11. Waterloopkundig Laboratorium
Taludbekleding van gezette steen,
Overzicht onderzoek 1980-1984,
M 1795/M 1881 deel XV-WL, CO272500/7 - LGM, Delft, 1984

DUWFORMATIE VAN 1 * 2 E-I BAKKEN MET STUURBOORDZIJDE BOVEN TEEN VAN HET TALUD						
Toestand nummer	Waterdiepte (m)	Diepgang bakken (m)	Blockage-factor $\frac{A_m}{A_c}$ (-)	Vaartnummer	Scheepssnelheid (m/s)	Toerental schroef
12	0,26	0,09	0,107	01	0,663	395
				02	0,678	395
				03	0,767	525
				04	0,773	525
				05	0,809	600
				06	0,807	600
				07	0,843	850
				08	0,845	850
13	0,26	0,12	0,142	01	0,610	400
				02	0,613	400
				03	0,686	510
				04	0,698	510
				05	0,737	595
				06	0,731	595
				07	0,770	750
				08	0,769	750
14	0,26	0,16	0,190	01	0,536	450
				02	0,545	450
				03	0,611	565
				04	0,605	565
				05	0,652	640
				06	0,655	640
				07	0,692	785
				08	0,686	785
15	0,32	0,16	0,148	01	0,678	450
				02	0,666	450
				03	0,759	570
				04	0,741	570
				05	0,786	665
				06	0,792	665
				07	0,790	665
				08	0,830	770
				09	0,836	770
16	0,32	0,12	0,111	01	0,731	435
				02	0,746	435
				03	0,843	565
				04	0,833	565
				05	0,868	640
				06	0,878	640
				07	0,872	640
				08	0,918	775
				09	0,921	775
17	0,32	0,20	0,185	01	0,596	495
				02	0,603	495
				03	0,686	625
				04	0,675	625
				05	0,713	710
				06	0,719	710
				07	0,746	835
				08	0,749	835
18	0,38	0,20	0,150	01	0,659	535
				02	0,717	535
				03	0,701	535
				04	0,804	605
				05	0,804	605
				06	0,842	685
				07	0,855	685
				08	0,882	830
				09	0,894	830
19	0,38	0,15	0,112	01	0,784	465
				02	0,785	465
				03	0,890	575
				04	0,874	575
				05	0,939	665
				06	0,933	665
				07	0,985	825
				08	0,977	825
20	0,38	0,27	0,203	01	0,599	565
				02	0,626	565
				03	0,709	700
				04	0,700	700
				05	0,742	800
				06	0,742	800
				07	0,728	800
				08	0,763	970
				09	0,769	990

Tabel 1 Overzicht van de uitgevoerde proeven

				D_{50} = 9,5 mm			D_{50}=19,5mm
Vaart	V (m/s)	V/V_{grens} (-)	z_{max} (cm)	n (-)	b (cm)	Y_{schade} (cm)	n (-)
1307	0,770	0,946	5,5	10,4	13,0	39,4	0,2
1308	0,769	0,945	5,8	12,2	15,1	40,1	-
1407	0,692	0,965	7,5	15,4	23,5	60,4	0,2
1408	0,686	0,957	7,5	8,6	16,6	58,9	-
1505	0,786	0,896	5,5	9,0	9,7	30,7	-
1506	0,792	0,903	5,5	11,4	13,0	35,4	-
1507	0,790	0,901	5,5	8,6	13,7	33,8	-
1508	0,830	0,947	8,0	29,0	20,2	55,0	1,2
1509	0,836	0,953	8,0	36,2	24,5	58,0	-
1605	0,868	0,893	4,8	4,0	9,2	24,4	-
1606	0,878	0,903	4,8	7,4	10,9	26,3	-
1607	0,872	0,897	4,8	7,0	12,9	27,9	-
1608	0,918	0,944	7,3	33,0	25,7	47,4	-
1609	0,921	0,948	7,5	34,8	28,0	50,7	0,2
1705	0,713	0,897	6,0	7,4	9,9	35,0	-
1706	0,719	0,904	6,5	9,0	21,0	48,3	-
1707	0,746	0,938	8,0	30,4	28,7	63,5	-
1708	0,749	0,942	8,0	25,2	28,5	66,9	0,8
1804	0,804	0,856	4,8	1,8	6,7	24,9	-
1805	0,804	0,856	4,8	3,2	7,5	24,0	-
1806	0,842	0,897	5,5	9,2	14,4	35,1	-
1807	0,855	0,910	6,0	15,4	18,1	42,3	-
1808	0,882	0,939	7,0	29,6	23,8	49,4	0,4
1809	0,894	0,952	7,1	21,4	21,8	51,0	-
1903	0,890	0,854	3,8	1,8	4,0	16,2	-
1904	0,874	0,839	4,0	1,8	5,0	16,6	-
1905	0,939	0,901	5,0	3,8	8,2	22,2	-
1906	0,933	0,895	5,0	2,8	8,5	24,2	-
1907	0,985	0,945	5,8	1,4	7,9	24,9	-
1908	0,977	0,938	5,8	1,0	7,9	24,9	-
2005	0,742	0,908	6,0	14,0	13,4	40,7	-
2006	0,742	0,908	6,0	8,6	13,2	40,2	-
2007	0,728	0,891	6,0	3,6	12,4	39,9	-
2008	0,763	0,934	7,8	34,6	24,5	58,6	-
2009	0,769	0,941	7,9	22,0	26,0	61,0	-

VERKLARING:
z_{max} = maximale spiegeldaling
n = aantal verplaatste steentjes (gemiddeld over 5 grenzen)
b = breedte van de schade
Y_{schade} = positie aan de onderkant van de schade ten opzichte van de waterlijn op het talud

Tabel 2 Schade aan stortsteen

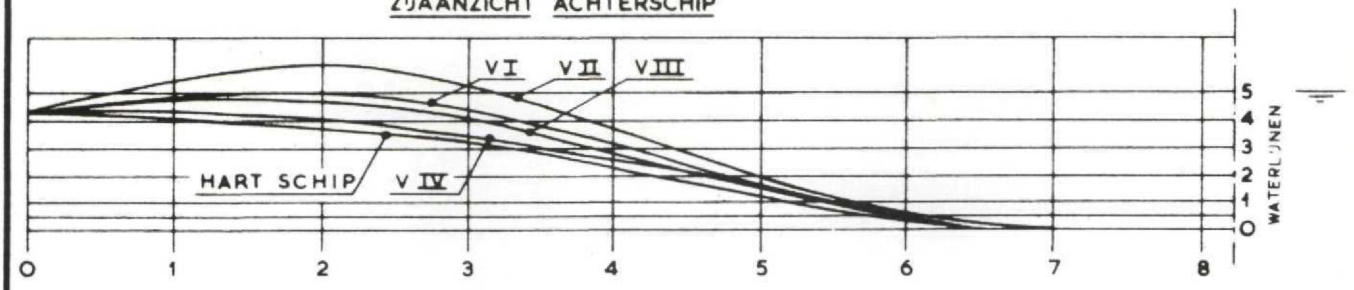
	D_{50} = 9,5 mm				D_{50} = 19,5 mm	
	$(\frac{n}{b})$ berekend		$(\frac{n}{b})$ gemeten		$(\frac{n}{b})$ berekend	$(\frac{n}{b})$ gemeten
vaart	drukop-nemer	drukop-nemer	$b=b_{gemeten}$	$b=f(z_{max},D_{50})$	drukop-nemer	$b=f(z_{max},D_{50})$
	1	2	1	2	1	2
1307	72,1	63,8	80,0	92,7	1,2	4,2
1308	90,5	86,2	80,8	94,6	-	-
1407	27,4	-	65,5	62,3	0,0	2,4
1408	30,0	-	51,8	34,8	-	-
1505	76,9	163,8	92,8	80,2	-	-
1506	79,7	198,7	87,7	101,6	-	-
1507	147,7	194,7	62,8	76,6	-	-
1508	290,7	-	143,6	100,8	11,3	12,2
1509	252,5	-	147,8	125,9	-	-
1605	-	32,2	43,5	48,3	-	-
1606	-	79,0	67,9	89,3	-	-
1607	-	41,6	54,3	84,5	-	-
1608	329,5	257,8	128,4	140,7	-	-
1609	429,5	372,7	121,7	140,8	4,9	2,4
1705	99,2	-	74,7	53,7	-	-
1706	119,1	-	42,9	50,9	-	-
1707	131,8	-	105,9	105,7	-	-
1708	99,8	-	88,4	87,6	0,0	8,2
1805	68,5	153,5	42,7	38,6	-	-
1806	41,4	55,3	63,9	82,0	-	-
1807	72,0	82,5	85,1	111,7	-	-
1808	167,0	-	124,4	140,7	10,6	5,7
1809	170,1	-	98,2	101,8	-	-
1905	-	39,8	46,3	42,4	-	-
1906	-	40,3	32,9	31,2	-	-
1907	-	79,8	17,7	10,9	-	-
1908	-	70,4	12,7	7,8	-	-
2005	53,8	52,4	104,5	101,6	-	-
2006	51,5	57,9	65,2	62,4	-	-
2007	66,8	62,6	29,0	26,1	-	-
2008	57,4	-	141,2	126,4	-	-
2009	58,4	-	84,6	80,4	-	-

Tabel 3 Toetsing van de berekende transporten

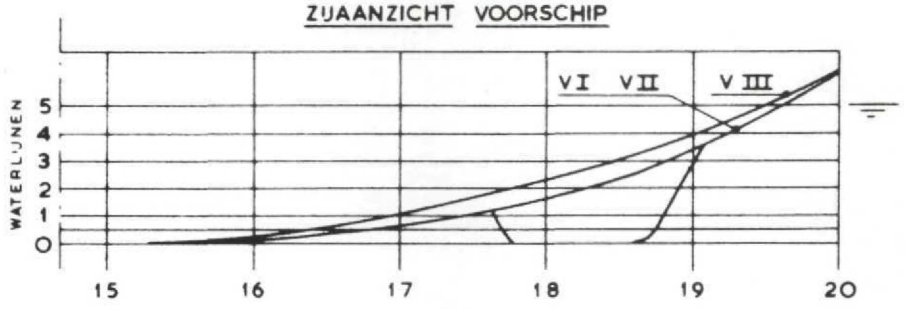
Toestand	Z_{max} (mm)	Trovidur op roosterwerk			Trovidur op split			Trovidur op houten plaat		
		$\Delta\phi_1$ (mm)	$\Delta\phi_2$ (mm)	$\Delta\phi_3$ (mm)	$\Delta\phi_1$ (mm)	$\Delta\phi_2$ (mm)	$\Delta\phi_3$ (mm)	$\Delta\phi_1$ (mm)	$\Delta\phi_2$ (mm)	$\Delta\phi_3$ (mm)
1201	15	2,63	2,63	5,63	2,63	6,38	5,63	9,75	6,38	4,13
1202	18	9,38	5,63	4,88	3,38	7,13	7,50	9,00	5,25	4,88
1203	43	6,38	6,38	6,38	3,75	7,13	8,63	10,88	7,13	5,63
1204	43	3,75	6,00	7,50	3,75	26,63	7,50	11,25	7,50	7,13
1205	50	-	4,50	9,38	3,75	22,50	9,38	12,75	6,75	7,13
1206	50	3,00	3,38	6,00	3,75	15,75	9,75	8,25	6,00	7,13
1207	58	-	6,00	4,50	4,50	42,00	8,63	13,50	8,25	6,75
1208	60	4,50	3,38	4,88	4,50	39,00	9,00	13,50	9,00	7,13
1301	15	3,38	4,50	4,50	2,25	6,00	7,50	11,25	8,25	6,00
1302	18	3,38	3,38	4,50	1,50	6,00	7,13	10,50	8,25	5,25
1303	30	6,00	9,00	1,50	4,50	24,75	7,13	12,00	9,38	6,00
1304	30	7,88	12,00	1,50	4,50	33,00	6,38	12,38	9,75	6,38
1305	38	6,00	3,00	-	6,00	75,75	7,50	13,50	11,25	6,00
1306	35	6,75	4,50	-	6,00	45,75	7,13	13,50	9,38	5,25
1307	55	10,50	10,13	-	8,25	70,50	8,25	10,88	10,50	5,63
1308	58	10,50	9,00	-	7,50	62,25	9,75	17,75	9,38	6,00
1401	20	7,13	4,50	5,63	2,25	6,00	5,63	10,50	8,25	6,00
1402	20	7,88	5,25	7,50	3,00	7,13	3,75	10,50	8,25	6,00
1403	33	5,25	10,88	-	4,50	37,50	4,13	12,00	9,00	5,63
1404	30	7,50	9,75	-	5,25	35,63	3,75	10,88	9,00	5,25
1405	47	7,50	13,50	-	3,75	45.00	9,75	10,13	6,75	6,00
1406	50	6,00	12,00	-	4,50	47,63	9,00	11,63	9,00	6,38
1407	75	0,38	1,50	-	11,63	36,00	7,88	12,00	9,38	7,13
1408	75	0,38	2,25	-	10,13	34,88	6,75	9,00	7,88	6,00
1501	20	9,00	11,25	15,75	4,13	6,00	8,63	11,25	9,00	10,88
1502	20	9,75	11,25	15,75	3,75	5,63	7,50	9,75	8,63	10,50
1503	43	12,38	12,00	10,88	7,50	37,50	10,13	23,25	12,75	10,13
1504	35	14,63	8,25	1,50	6,38	41,63	9,75	18,75	10,50	10,50
1505	55	17,63	27,00	1,50	9,38	21,00	10,50	23,25	9,00	9,38
1506	55	20,25	19,00	-	12,00	10,13	9,38	24,75	9,38	10,50
1507	55	21,00	18,00	3,38	11,25	36,75	11,25	26,63	10,50	11,25
1508	80	1,88	1,50	-	9,00	11,25	10,50	23,25	8,63	11,63
1509	80	3,00	0,75	-	9,75	12,00	-	22,50	8,63	-
1601	18	5,63	6,38	10,13	6,00	7,13	9,00	9,75	8,25	9,00
1602	15	7,50	7,50	9,75	4,50	7,13	9,00	9,38	7,88	10,13
1603	38	10,50	12,75	4,50	7,50	12,75	10,50	23,63	12,00	10,50
1604	38	10,13	11,25	5,25	7,50	18,00	12,75	24,75	12,00	9,75
1605	48	16,50	19,50	0,75	9,75	31,50	10,13	24,00	12,38	9,75
1606	48	1,88	6,00	-	10,88	48,00	10,50	23,25	11,25	10,50
1607	48	1,88	18,38	-	10,13	9,75	9,38	25,13	11,63	10,50
1608	73	-	4,50	-	10,13	8,25	11,25	24,75	10,50	11,25
1609	75	-	4,13	-	10,50	21,00	7,88	20,25	13,50	13,50
1701	20	10,50	10,50	9,00	4,50	9,00	6,75	11,63	7,88	10,88
1702	25	10,88	8,63	7,88	4,13	9,75	7,13	11,63	7,88	12,00
1703	43	15,00	13,50	-	6,38	30,00	9,00	23,25	11,63	12,38
1704	40	16,50	12,00	2,25	5,25	6,38	8,63	16,50	7,13	12,00
1705	60	9,00	18,00	-	8,25	11,25	8,25	22,50	8,63	12,75
1706	65	5,63	11,63	-	7,88	14,25	8,63	22,50	9,00	11,63
1707	80	4,50	1,50	-	9,75	36,75	7,50	21,38	8,25	12,38
1708	80	3,75	0,75	-	10,88	9,00	10,13	26,25	9,00	12,38
1801	15	7,50	6,75	8,63	3,00	3,38	11,25	13,50	10,50	9,38
1802	28	5,25	5,25	6,00	3,38	4,50	17,25	15,75	10,88	12,75
1803	25	7,88	4,88	6,75	3,75	4,13	15,00	15,38	13,50	11,25
1804	48	15,38	14,63	12,75	6,38	8,25	11,25	23,63	15,75	12,00
1805	48	3,00	10,50	12,75	6,00	7,50	12,38	23,63	15,75	11,62
1806	55	6,75	3,75	-	25,50	12,38	10,50	24,00	6,75	13,13
1807	60	4,50	0,75	-	22,88	13,50	16,88	19,50	18,75	13,88
1808	70	3,75	2,25	-	18,75	13,88	18,75	15,75	13,50	11,25
1809	71	1,50	2,25	-	9,00	8,63	11,25	6,75	13,13	14,25
1901	20	3,75	2,63	-	3,75	5,25	14,25	6,00	10,50	12,75
1902	18	4,88	2,63	-	3,00	5,25	24,00	9,00	17,25	13,88
1903	38	4,50	9,00	24,75	4,50	9,75	31,88	1,88	30,75	13,50
1904	40	3,38	6,75	25,50	3,75	6,38	28,50	20,25	11,25	12,75
1905	50	5,25	5,63	24,75	6,00	15,00	20,25	20,25	15,00	12,75
1906	50	6,75	3,75	24,75	7,50	15,00	15,00	20,25	14,25	13,13
1907	58	-	2,25	24,75	8,25	13,50	13,50	11,63	-	13,50
1908	58	0,75	2,25	24,75	9,00	12,75	9,75	9,00	14,25	10,50
2001	25	5,25	6,00	22,50	3,75	3,75	16,88	9,00	10,50	7,50
2002	25	8,25	7,50	24,00	3,00	3,75	17,25	9,75	14,63	9,75
2003	50	5,63	12,00	24,00	9,00	7,50	16,50	19,50	18,00	10,50
2004	45	6,00	10,50	24,00	9,00	8,25	15,00	11,25	16,88	9,75
2005	60	6,75	13,13	24,00	13,50	9,75	14,25	20,25	17,25	11,25
2006	60	7,13	14,25	24,00	9,00	9,75	13,13	20,63	-	11,25
2007	60	7,88	12,75	24,00	9,75	8,63	12,38	21,38	14,63	11,25
2008	78	4,13	-	24,00	10,50	8,25	5,25	16,50	16,50	12,75
2009	79	0,75	-	24,00	9,75	6,75	14,63	18,00	18,75	12,00

Tabel 4 Maximale stijghoogteverschillen

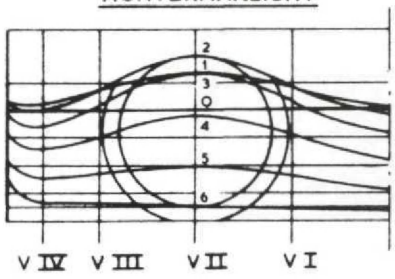
ZIJAANZICHT ACHTERSCHIP



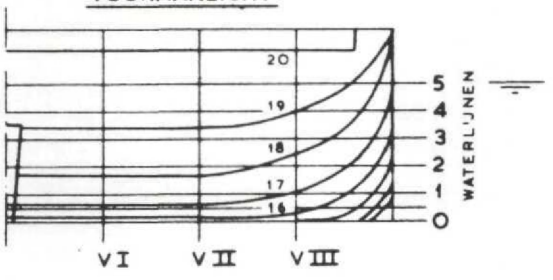
ZIJAANZICHT VOORSCHIP

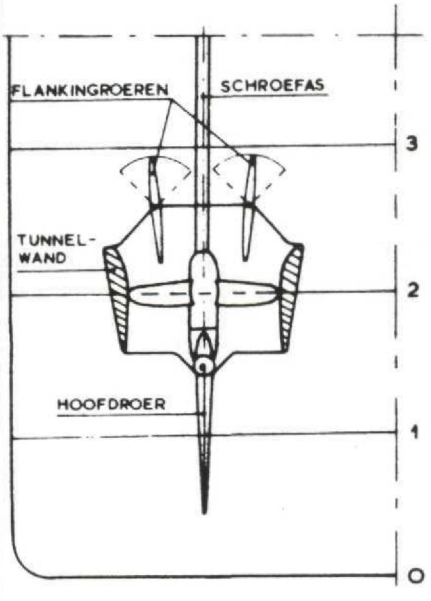


ACHTERAANZICHT



VOORAANZICHT





OPSTELLING ROEREN EN SCHROEVEN

HOOFDAFMETINGEN

lengte tussen spt 0–20	38,00 m
breedte op bkt spanten	10,00 m
diepgang	1,80 m
waterverplaatsing	468 m^3

LIJNENPLAN VAN DE DUWBOOT „ KRISTIAN "		
	SCHAAL 1:100	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

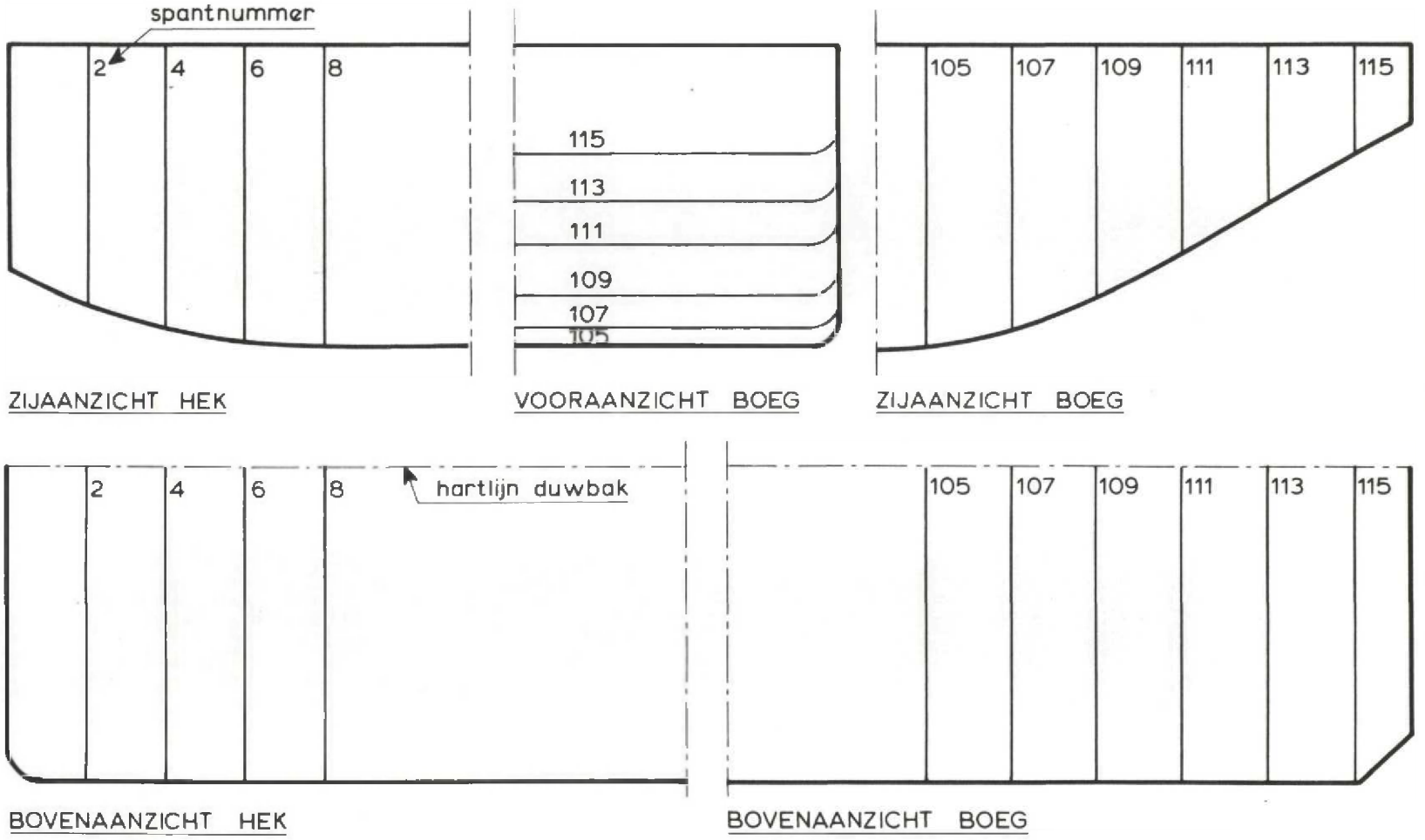
EUROPA I DUWBAK

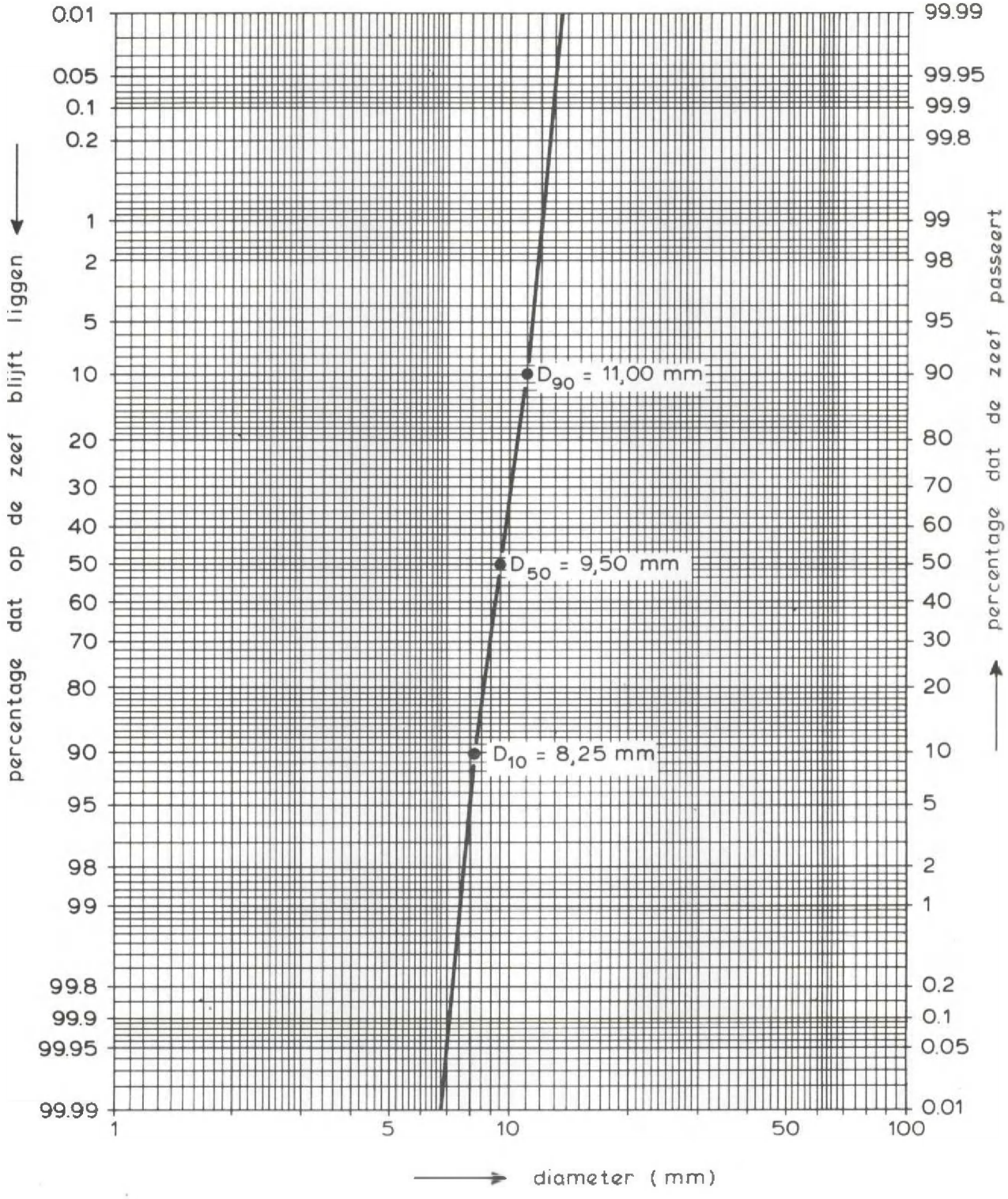
M 1115

FIG. 2

lengte over alles 70.0 m
breedte 9.45 m
maximum diepgang 3.20 m
maximum verplaatsing ± 1960 m²

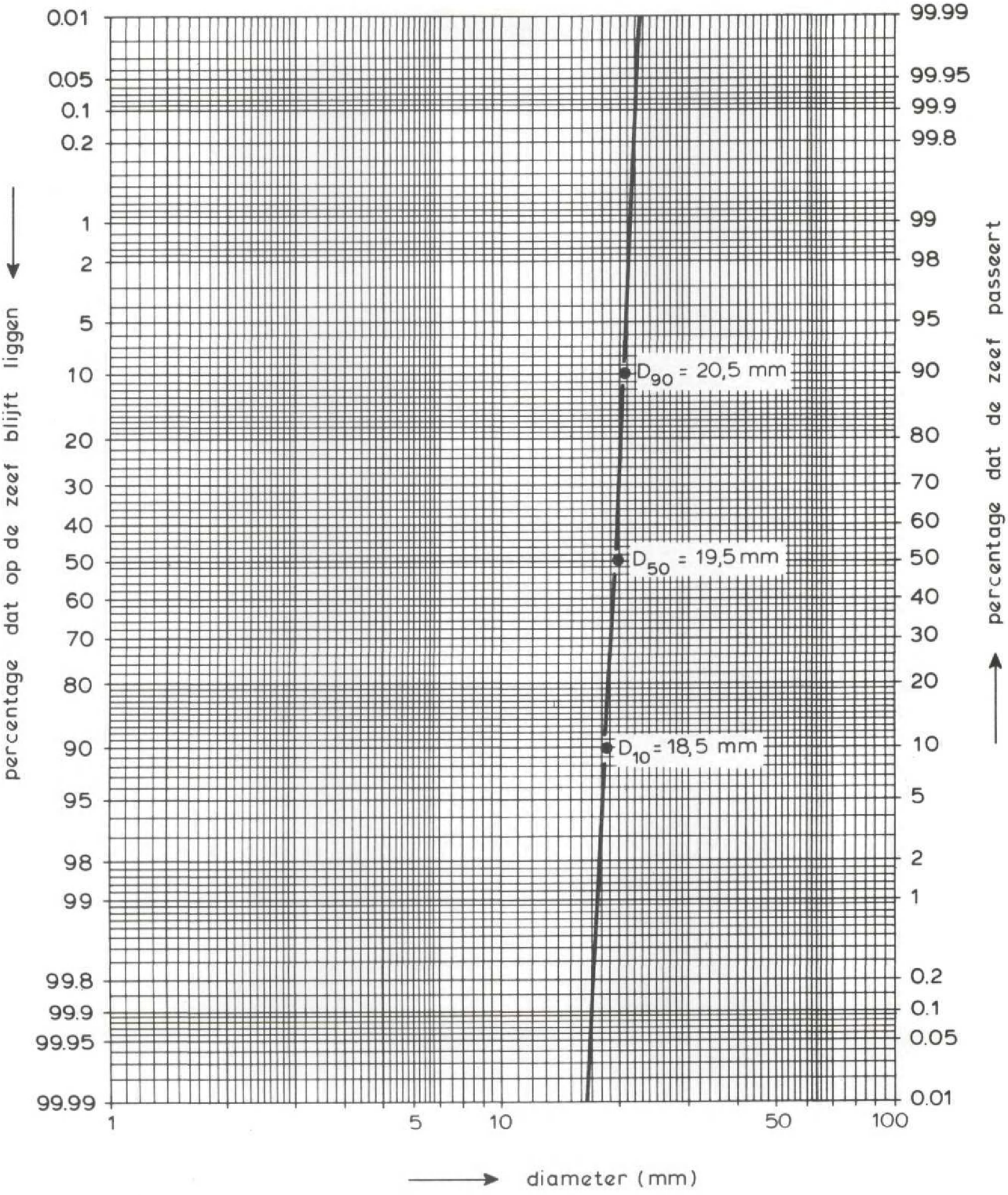
prototypematen



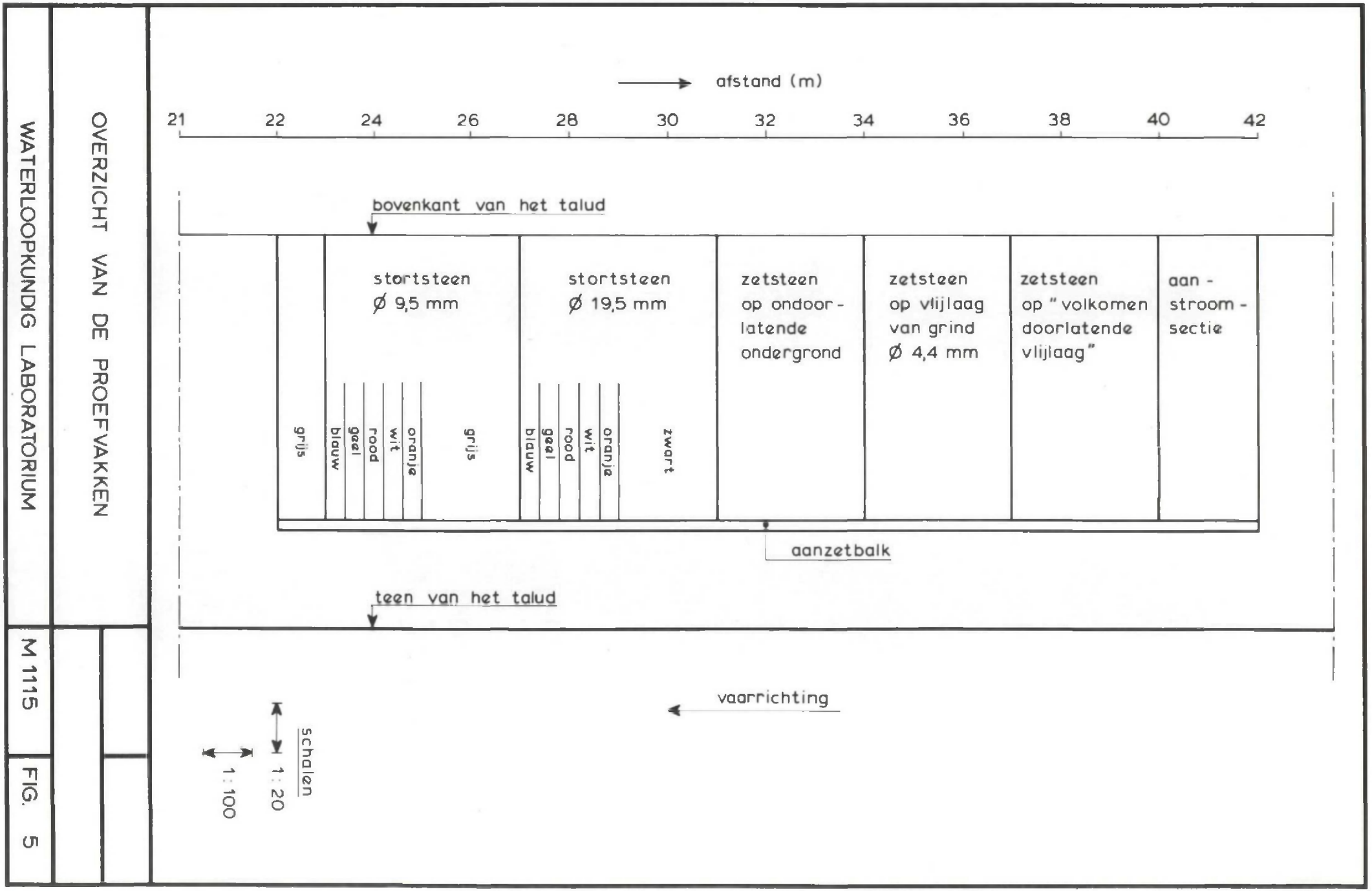


ZEEFKROMME VAN HET FIJNE STORTSTEEN
(D_{50} = 9,5 mm)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 3



ZEEFKROMME VAN HET GROVE STORTSTEEN (D_{50} = 19,5 mm)		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 4

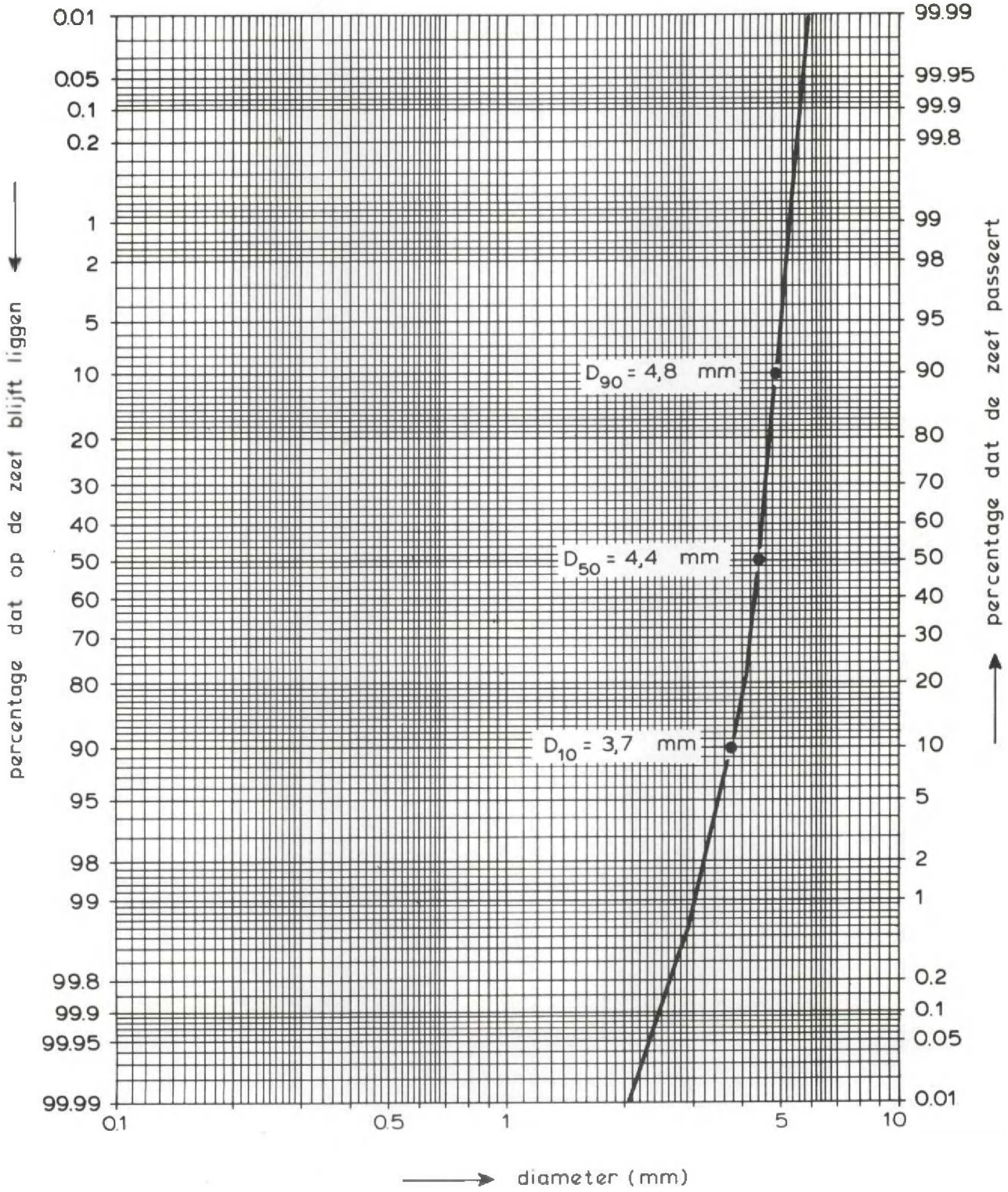


WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

OVERZICHT VAN DE PROEFVAKKEN

M 1115

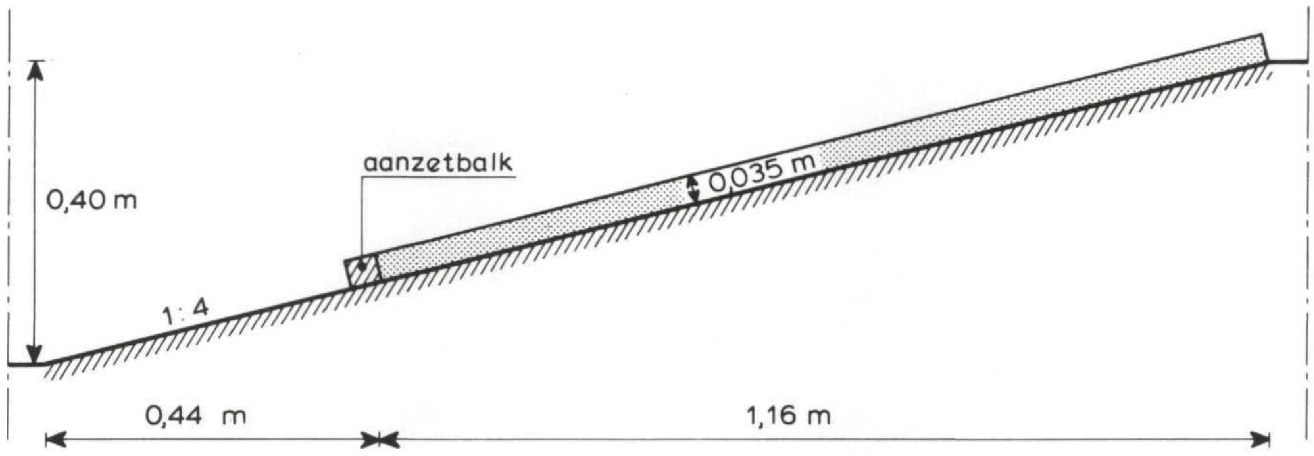
FIG. 5



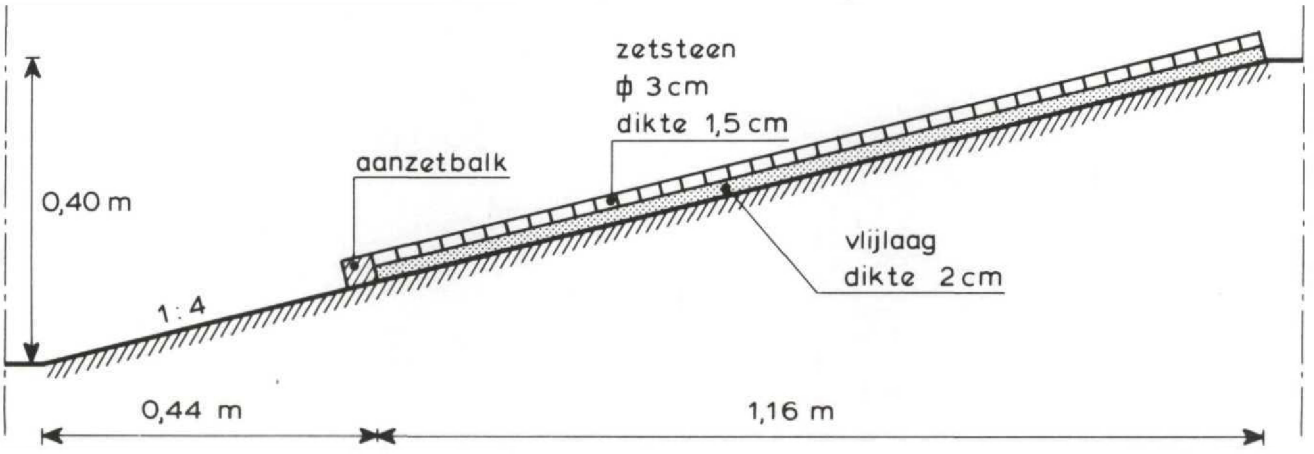
ZEEFKROMME VAN HET GRIND IN DE VLIJLAAG

(D_{50} = 4,4 mm)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 6



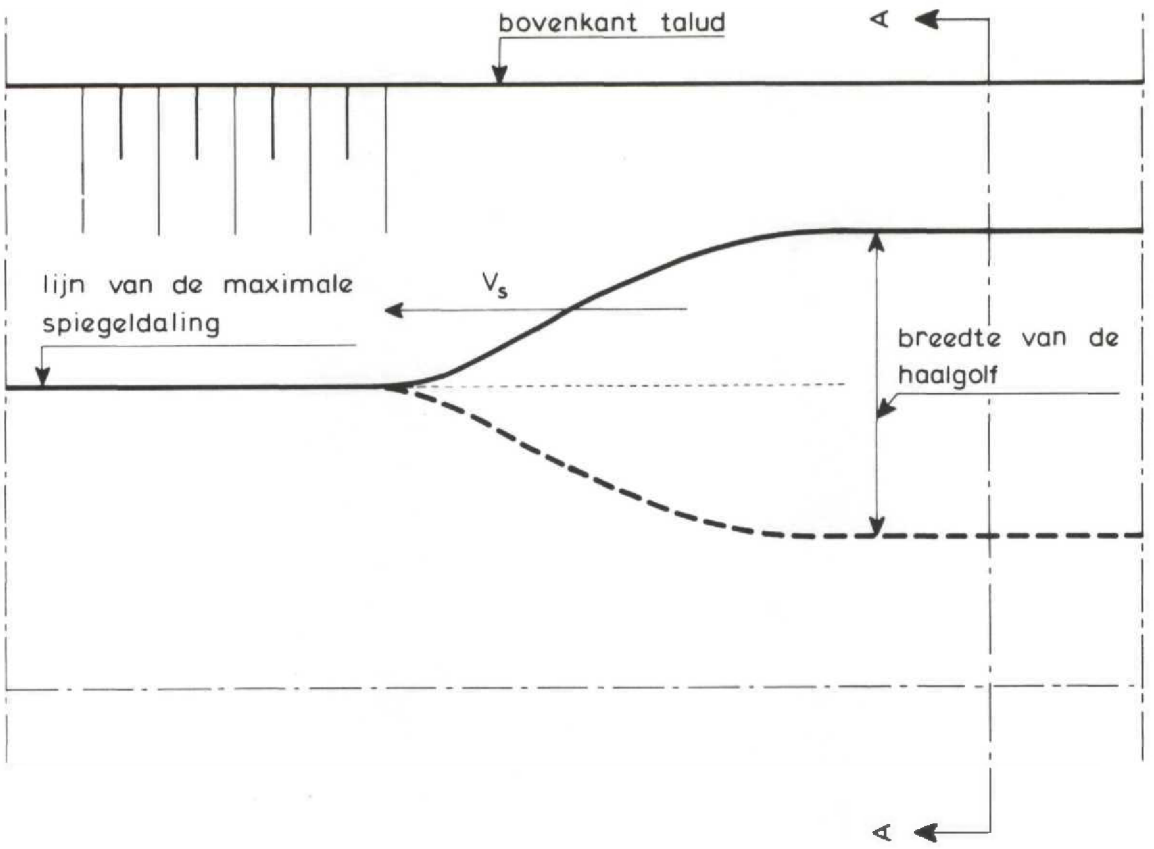
DWARSDOORSNEDE STORTSTEEN PROEFVAK

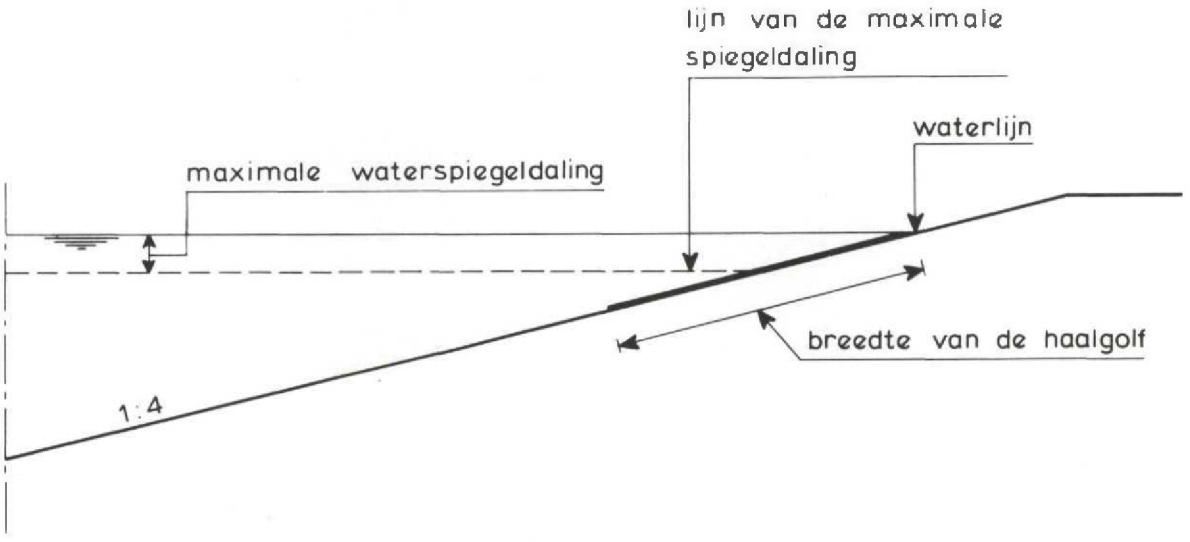


DWARSDOORSNEDE ZETSTEEN PROEFVAK

modelmaten

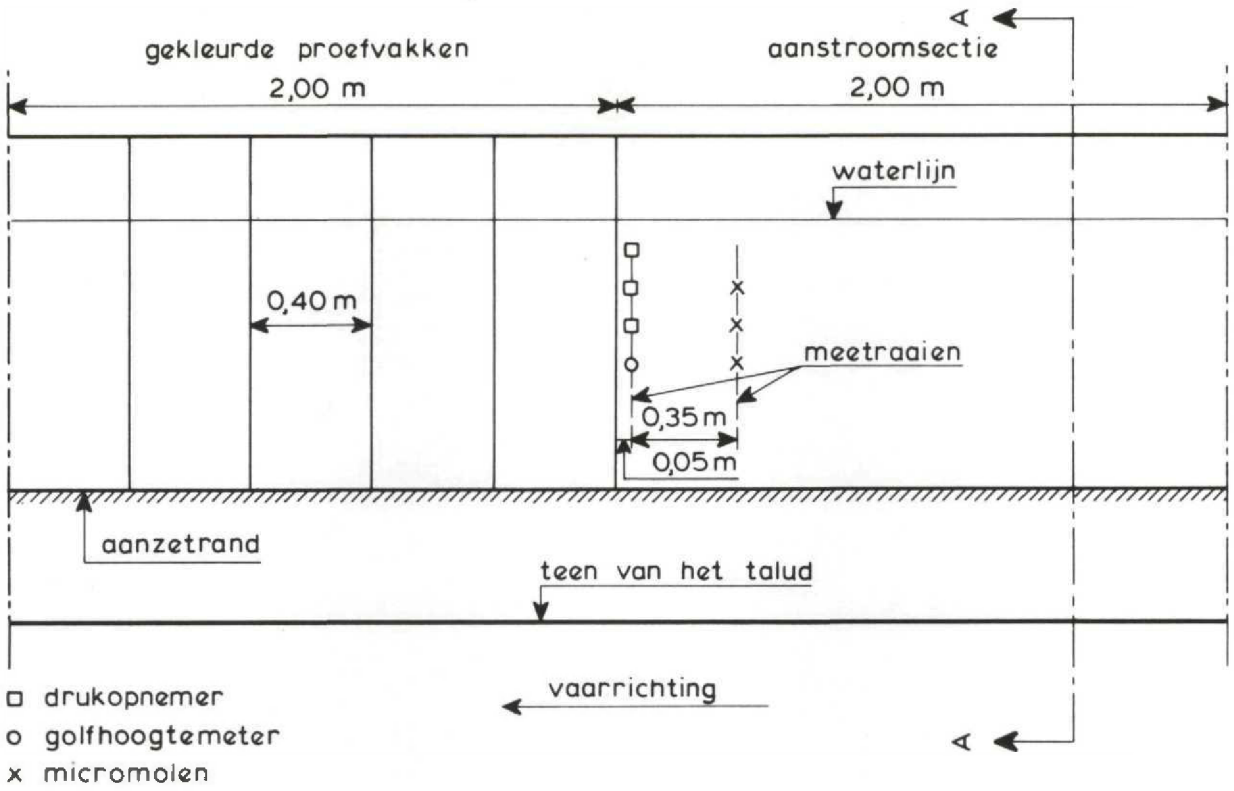
DWARSDOORSNEDEN VAN DE PROEFVAKKEN		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 7





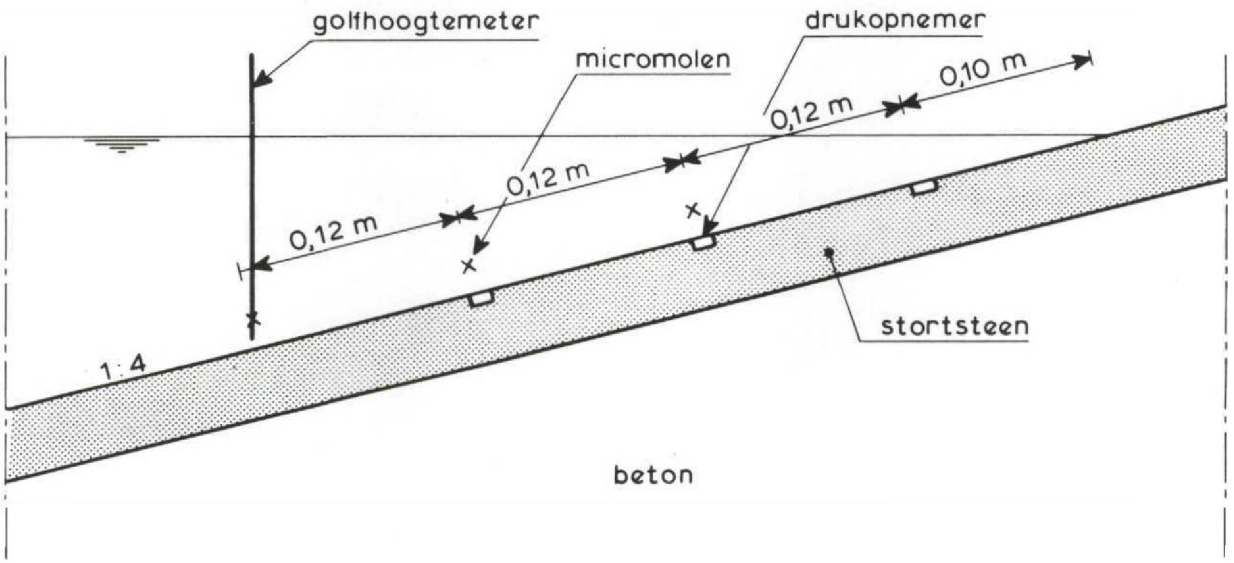
DOORSNEDE A - A

DEFINITIESCHETS VAN DE HAALGOLF		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 8



BOVENAANZICHT STORTSTEENPROEFVAK

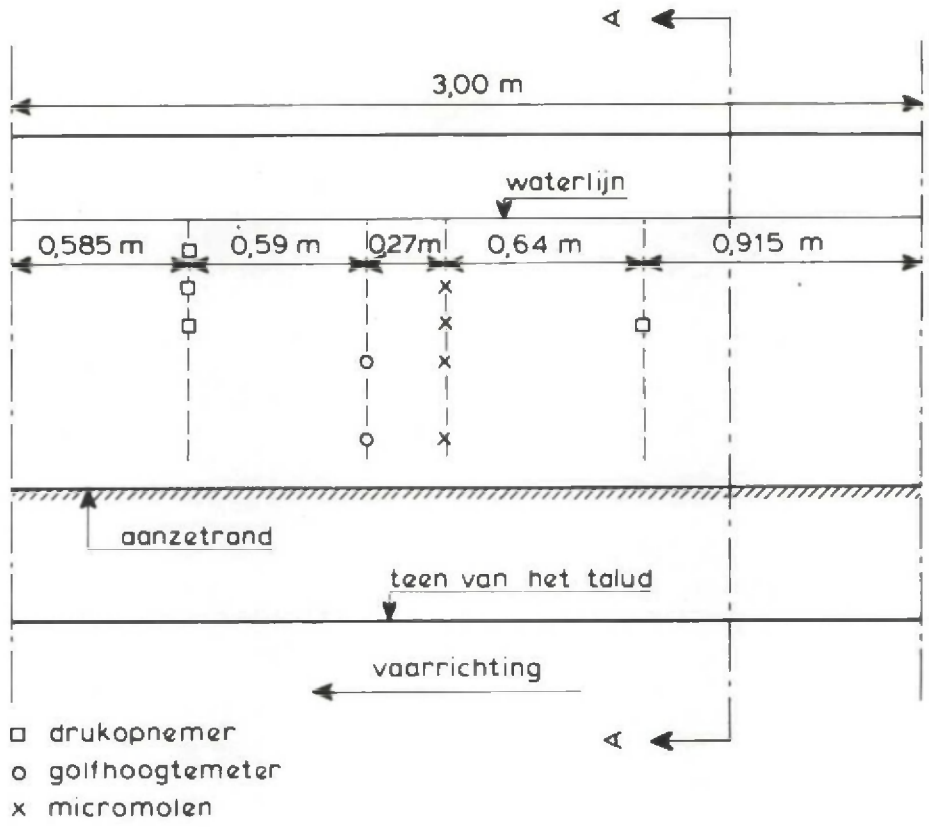
(schaal 1:25)



DOORSNEDE A-A

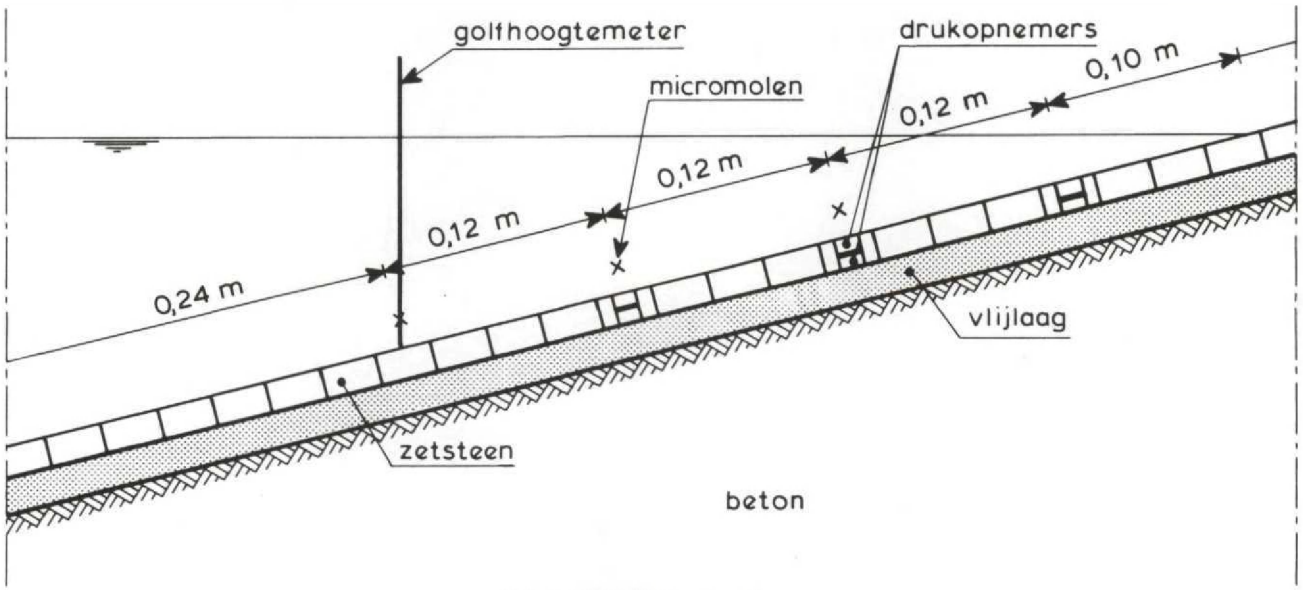
(schaal 1:4)

POSITIE MEETINSTRUMENTEN (STORTSTEEN)		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 9



BOVENAANZICHT ZETSTEENPROEFVAK

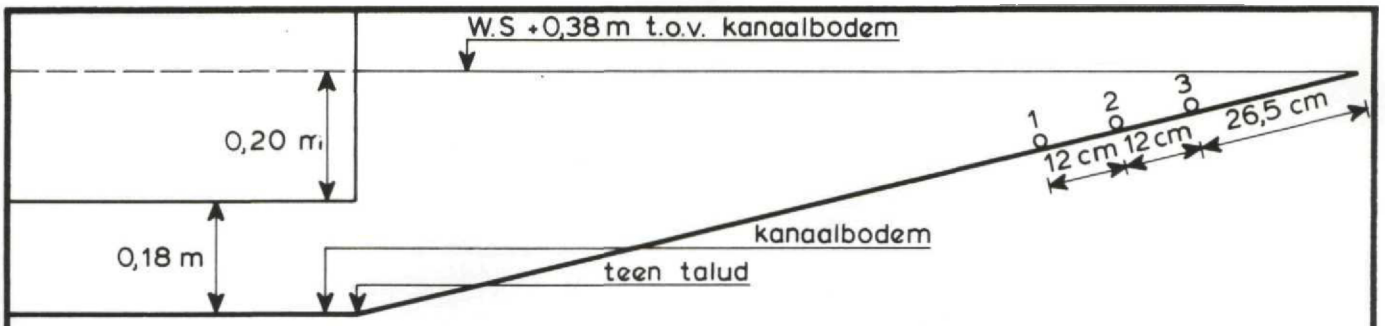
(schaal 1:25)

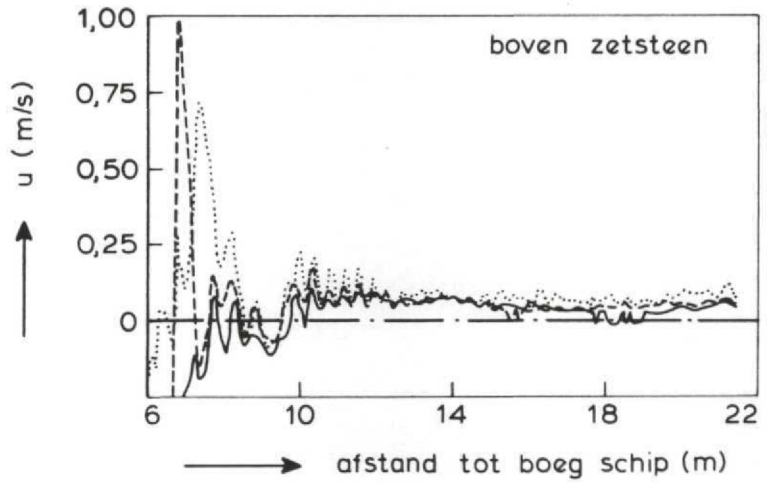


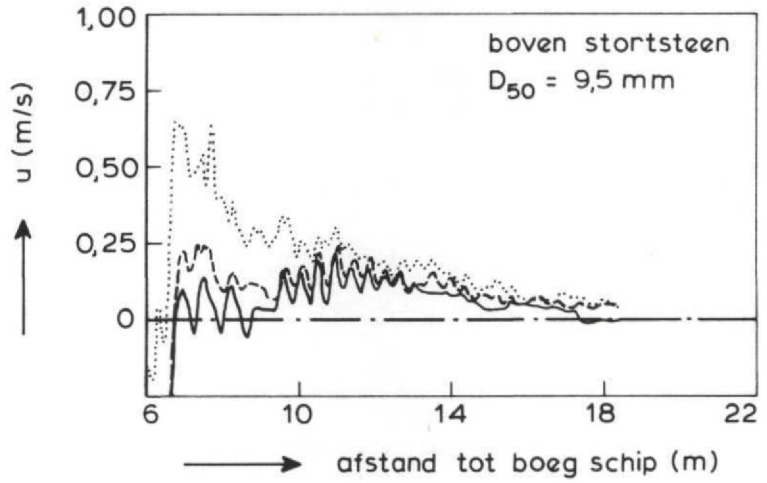
DOORSNEDE A-A

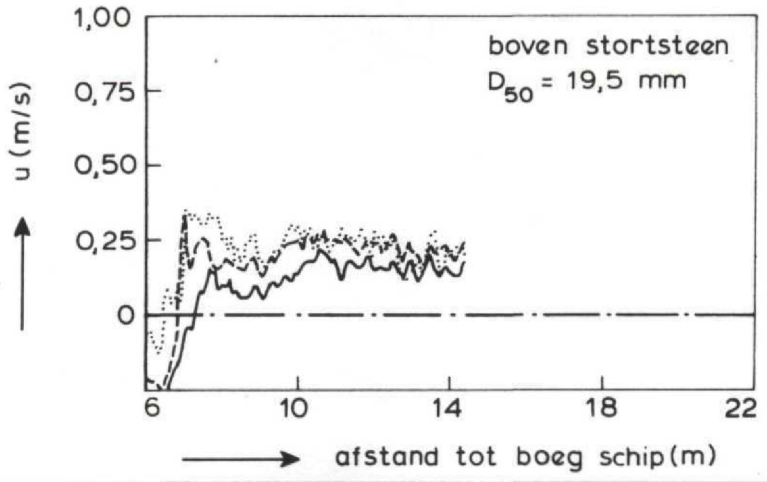
(schaal 1:4)

POSITIE MEETINSTRUMENTEN (ZETSTEEN)		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 10







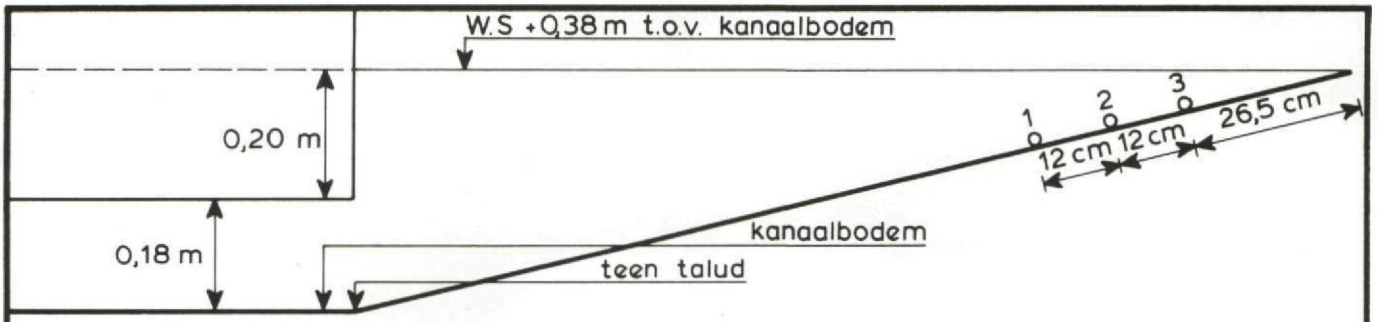


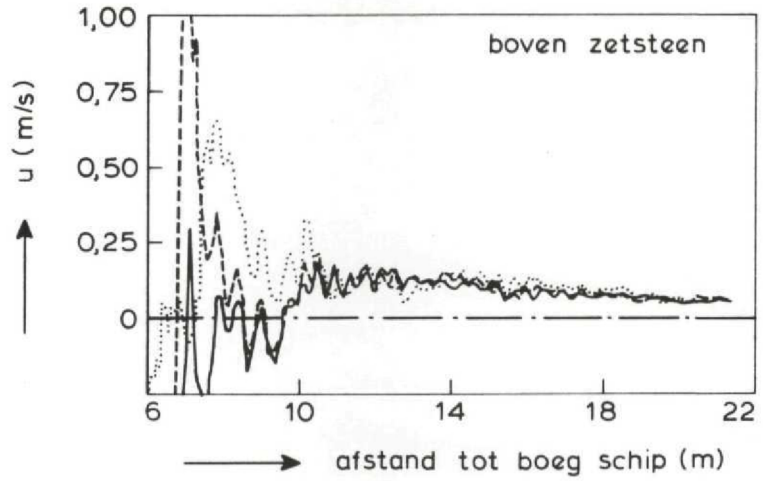
V = 0,855 m/s
n = 685 omw/min.

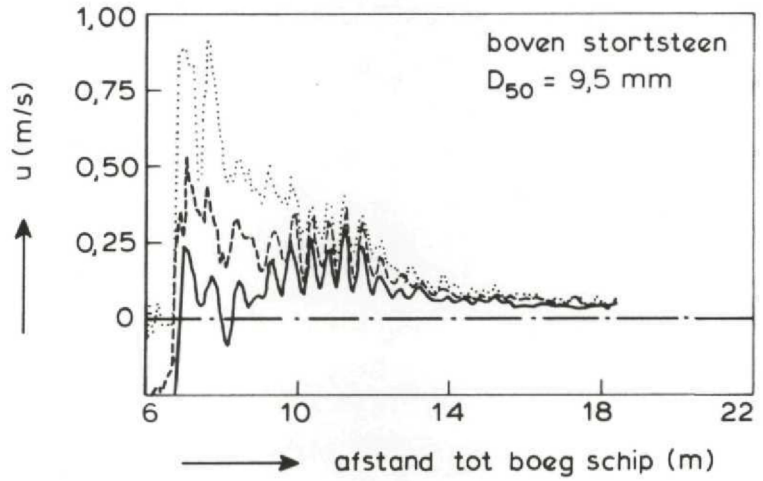
registraties micromolens :

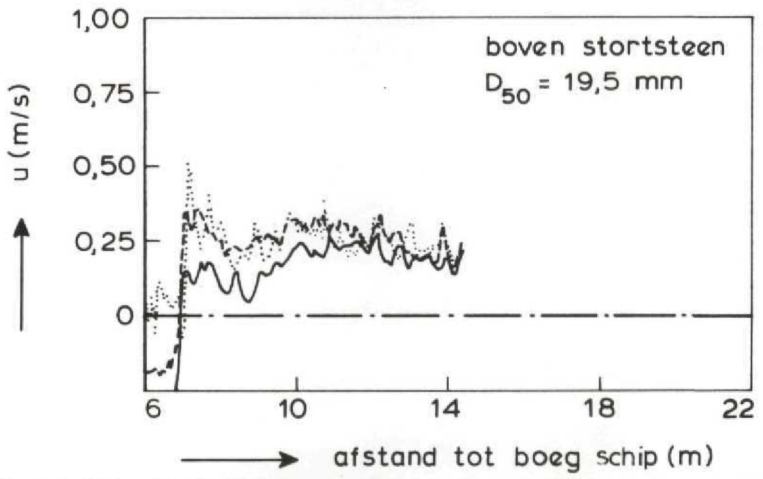
——— 1
--------- 2
..... 3

SNELHEDEN IN DE HAALGOLF BOVEN DE VERSCHILLENDE TALUDBEKLEDINGEN	T 1807	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 11







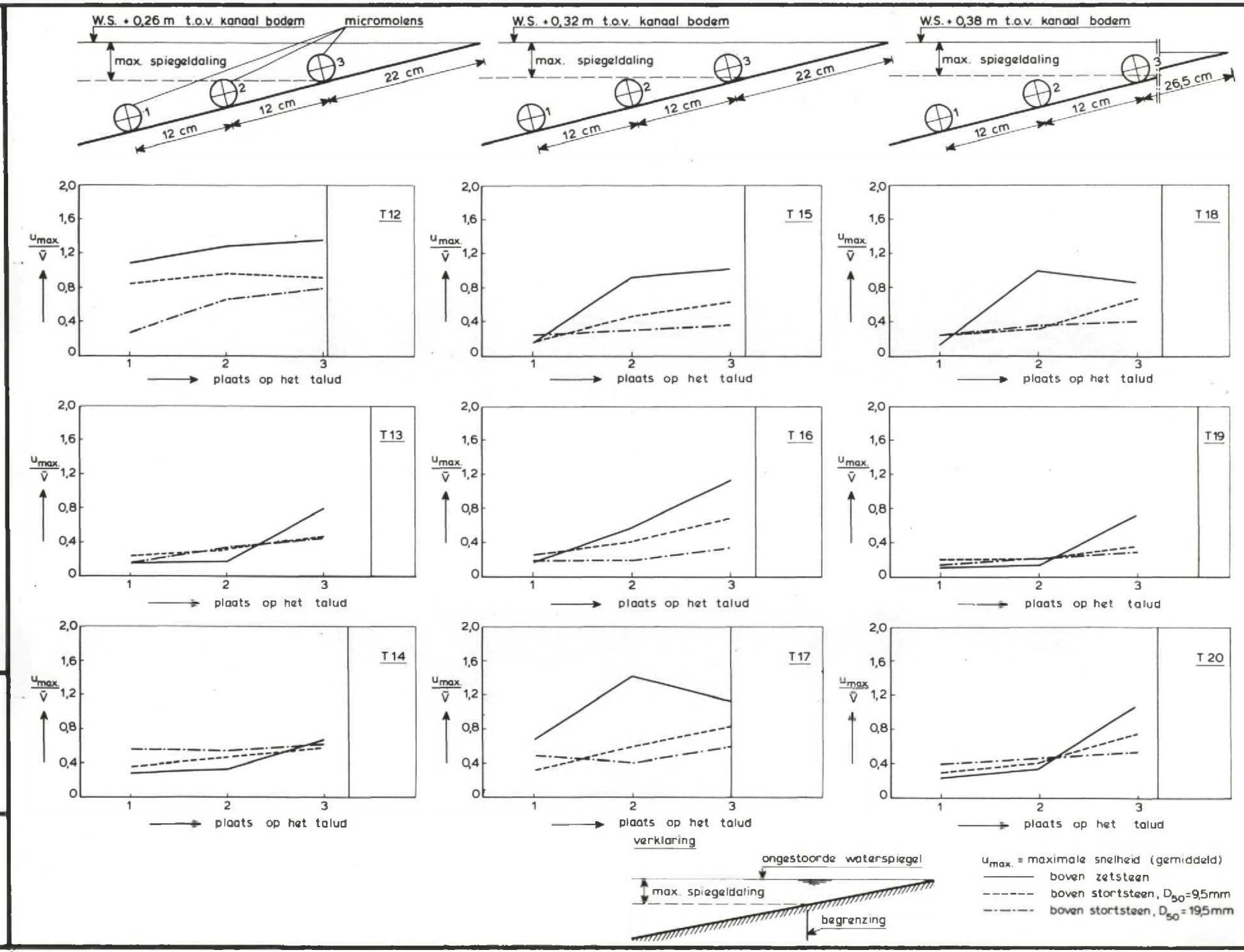


V = 0,882 m/s
n = 830 omw/min.

registraties micromolens :

——— 1
- - - - - - - - 2
..... 3

SNELHEDEN IN DE HAALGOLF BOVEN DE VERSCHILLENDE TALUDBEKLEDINGEN	T 1808	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 12



VERDELING VAN DE MAXIMALE SNELHEID ;
$\bar{V} = 0{,}9\ V_{grens}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

SCHAAL 1:4 (MODEL)

M 1115

FIG. 13

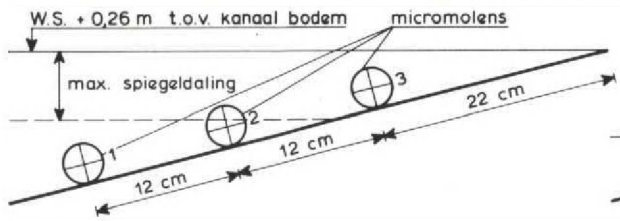
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

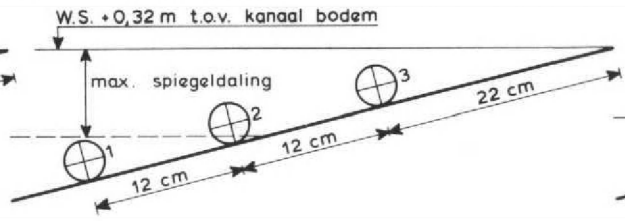
VERDELING VAN DE MAXIMALE SNELHEID ;
$\bar{V} = 0{,}95\ V_{grens}$

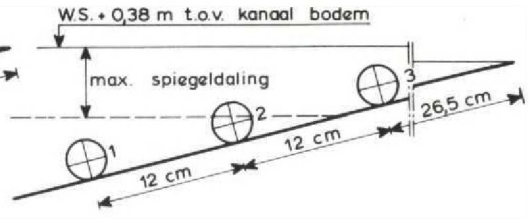
SCHAAL 1:4 (MODEL)

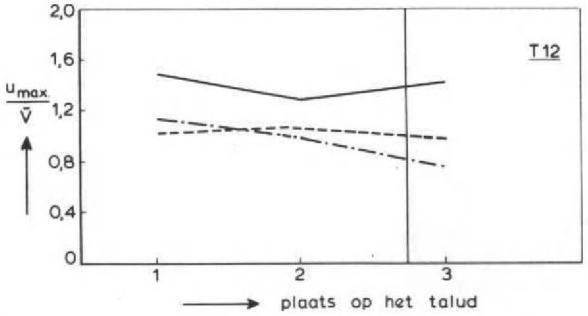
M 1115

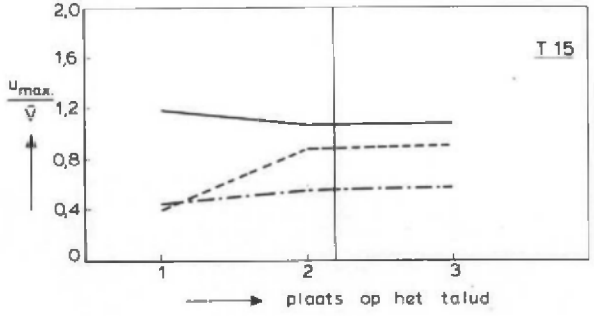
FIG. 14

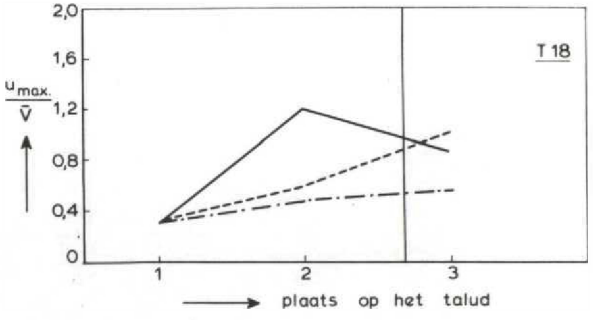


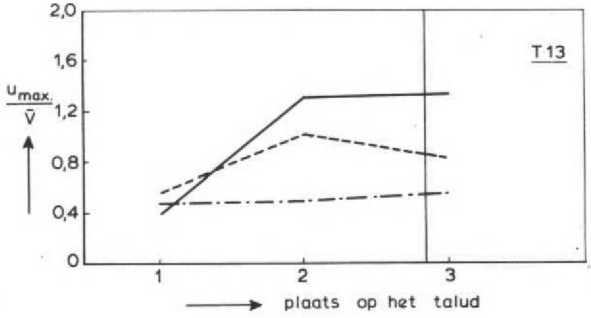


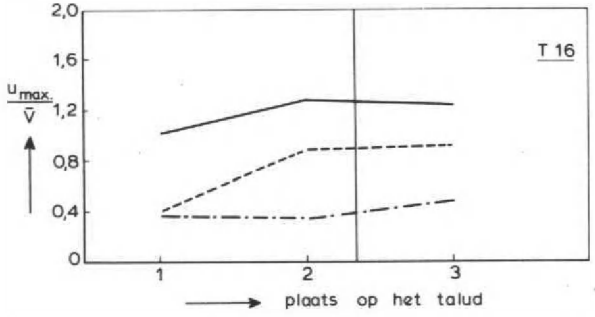


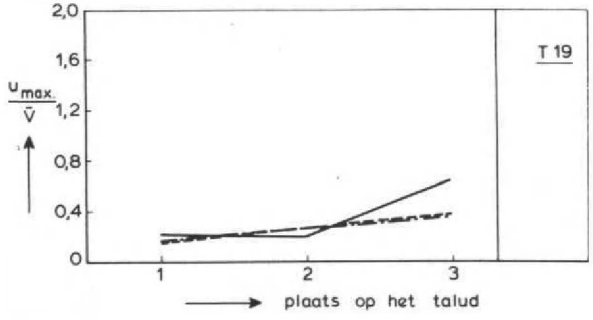


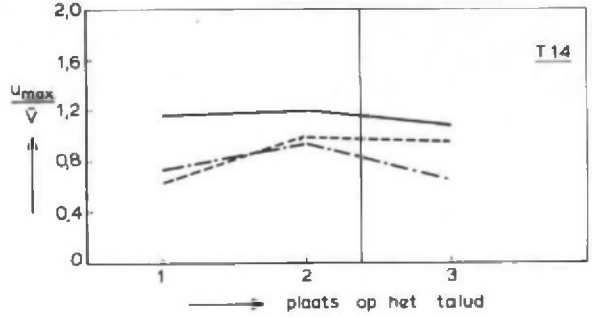


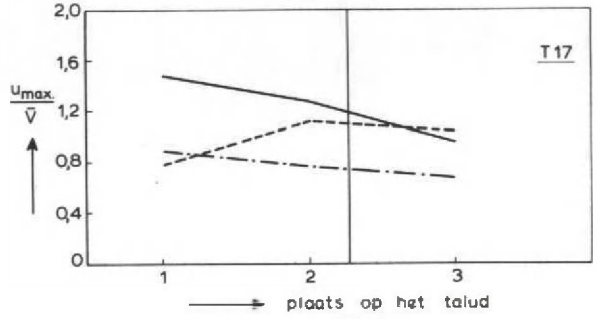


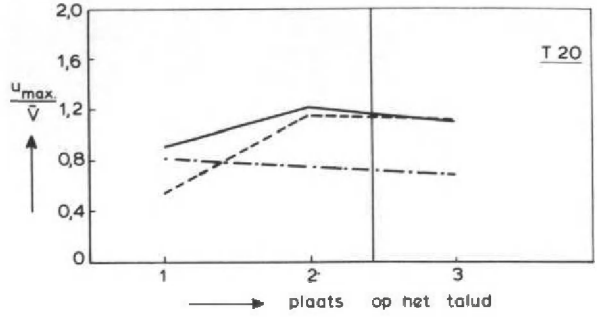




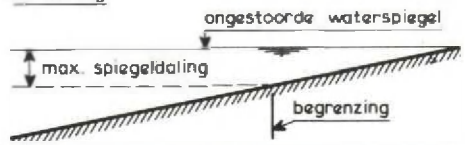




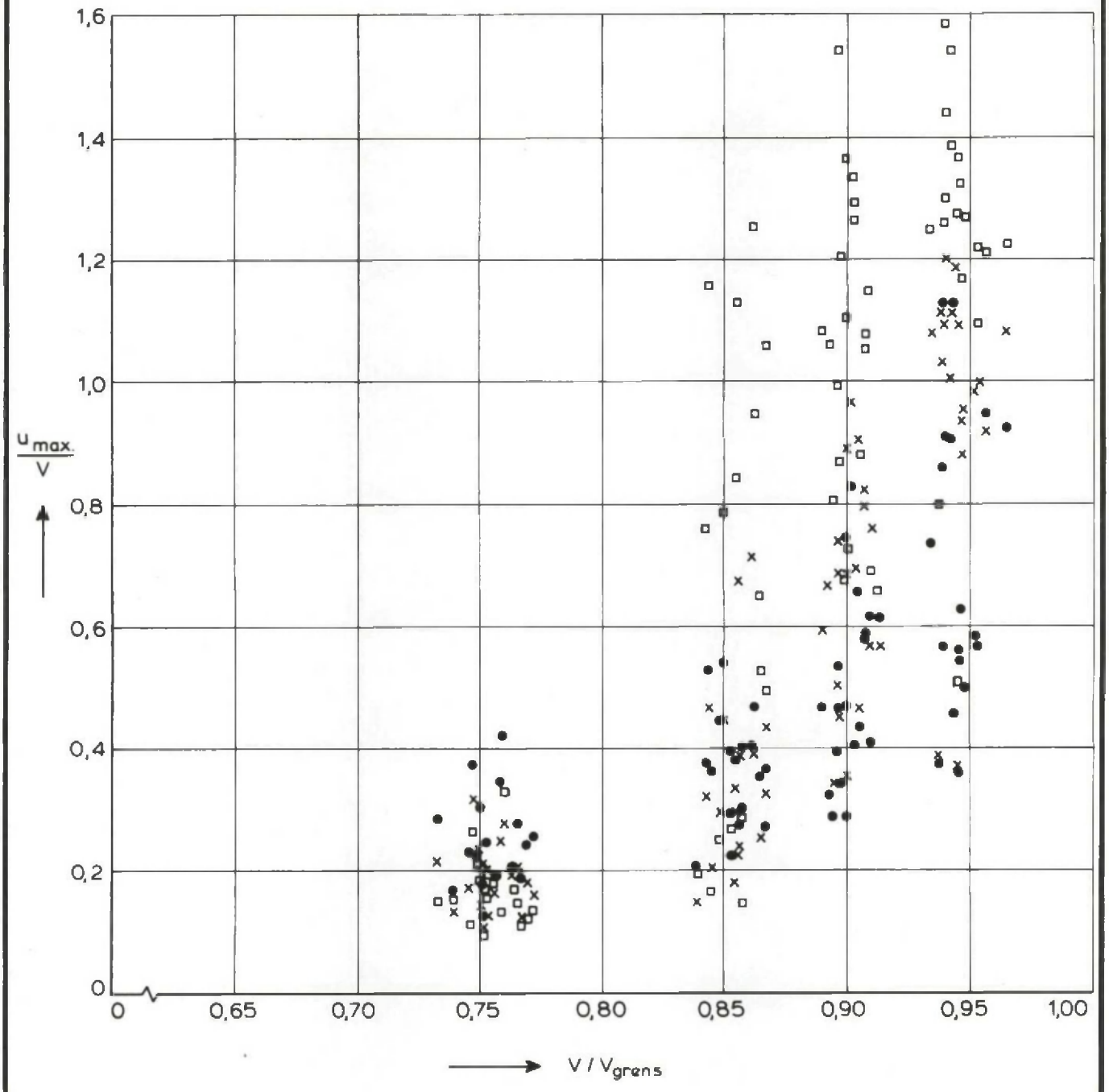




verklaring



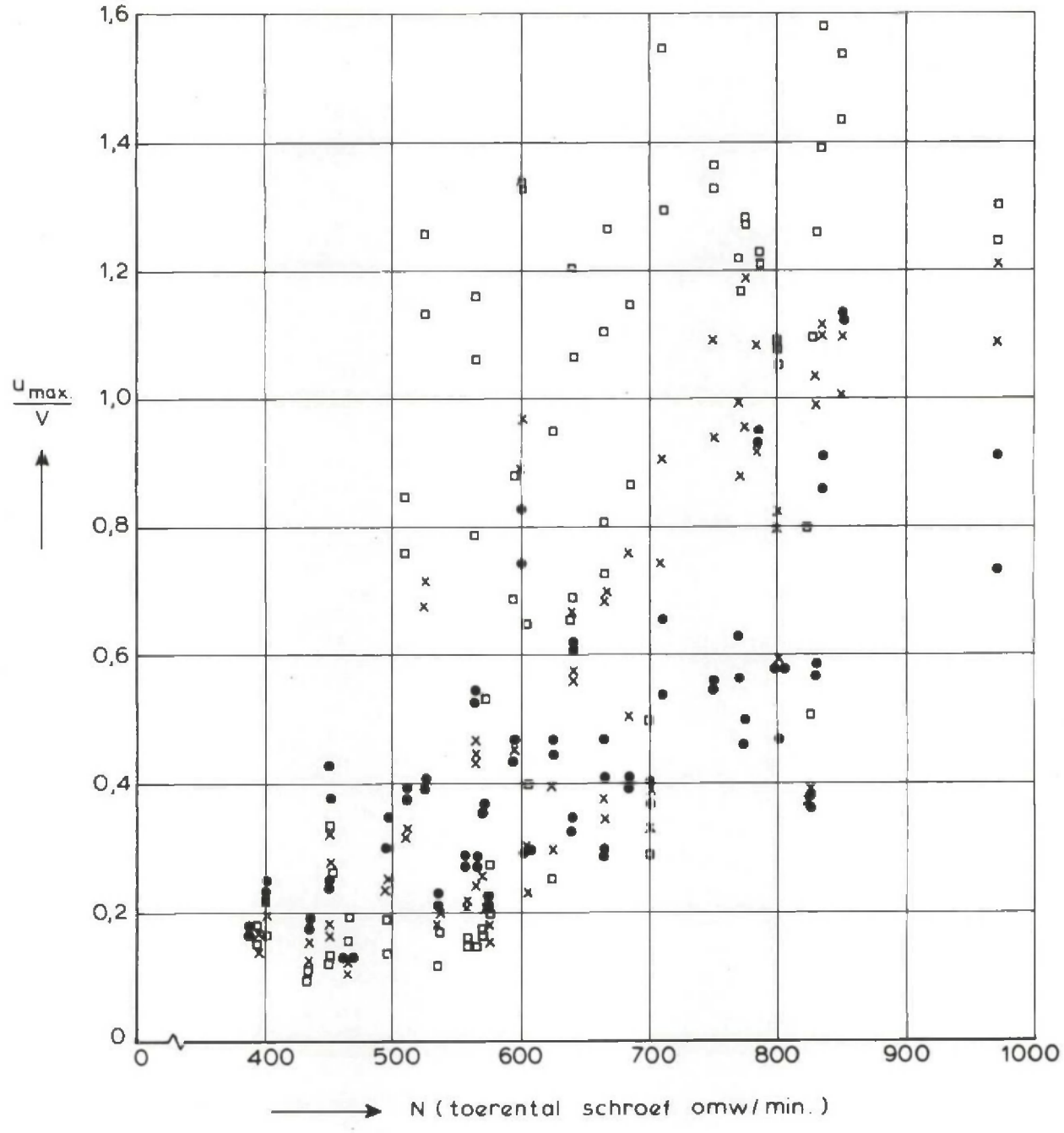
$u_{max.}$ = maximale snelheid (gemiddeld)
boven zetsteen
boven stortsteen, D_{50}=9,5mm
boven stortsteen, D_{50}=19,5mm



gemeten boven

- ▫ zetsteen (trovidur)
- × stortsteen (D_{50} = 9,5 mm)
- • stortsteen (D_{50} = 19,5 mm)

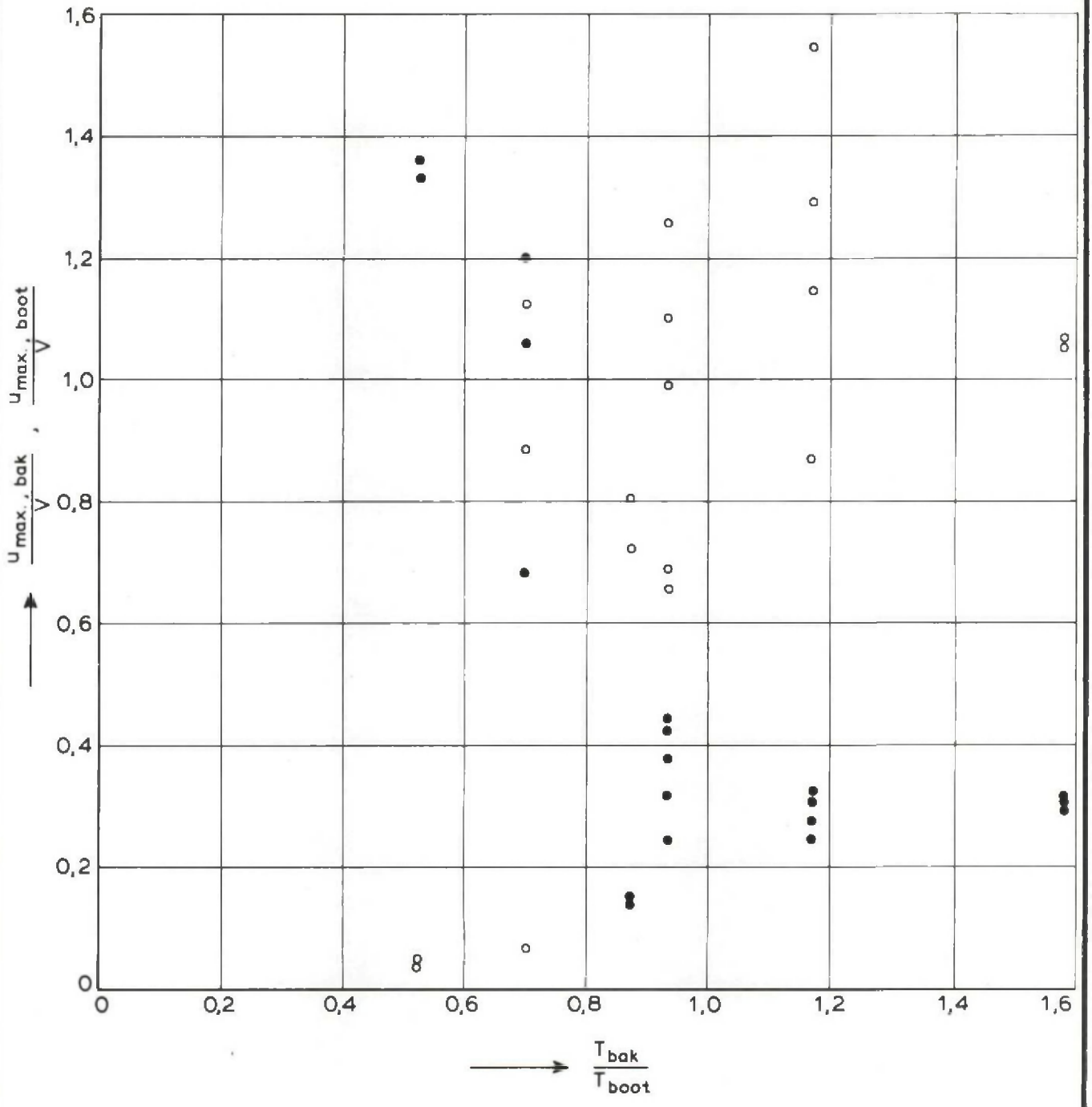
MAXIMUM SNELHEID IN DE HAALGOLF ALS FUNKTIE VAN SCHEEPSSNELHEID EN BODEMRUWHEID		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 15



gemeten boven

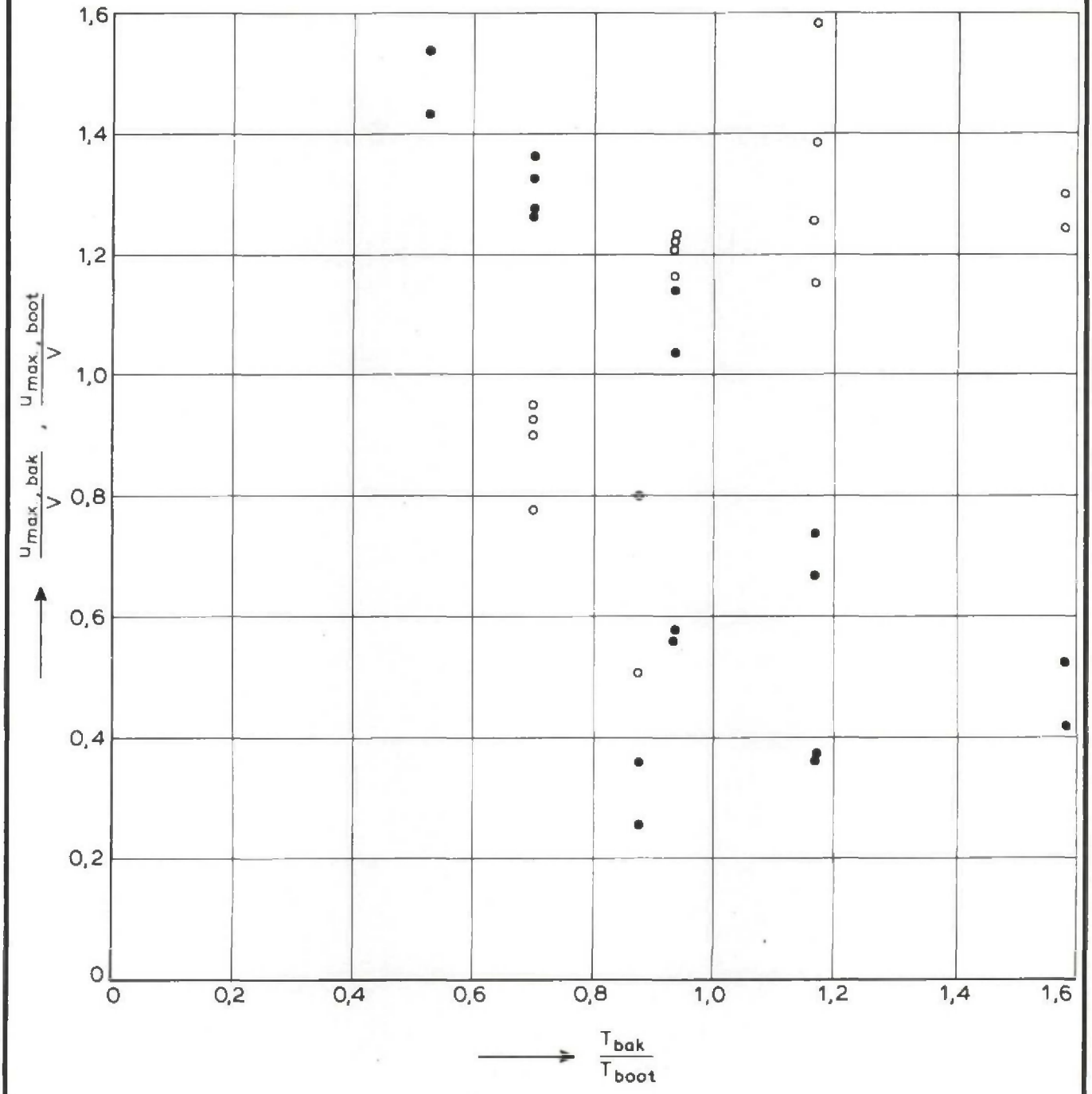
- ▫ zetsteen (trovidur)
- × stortsteen (D_{50} = 9,5 mm)
- • stortsteen (D_{50} = 19,5 mm)

MAXIMUM SNELHEID IN DE HAALGOLF ALS FUNKTIE VAN TOERENTAL EN BODEMRUWHEID		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 16

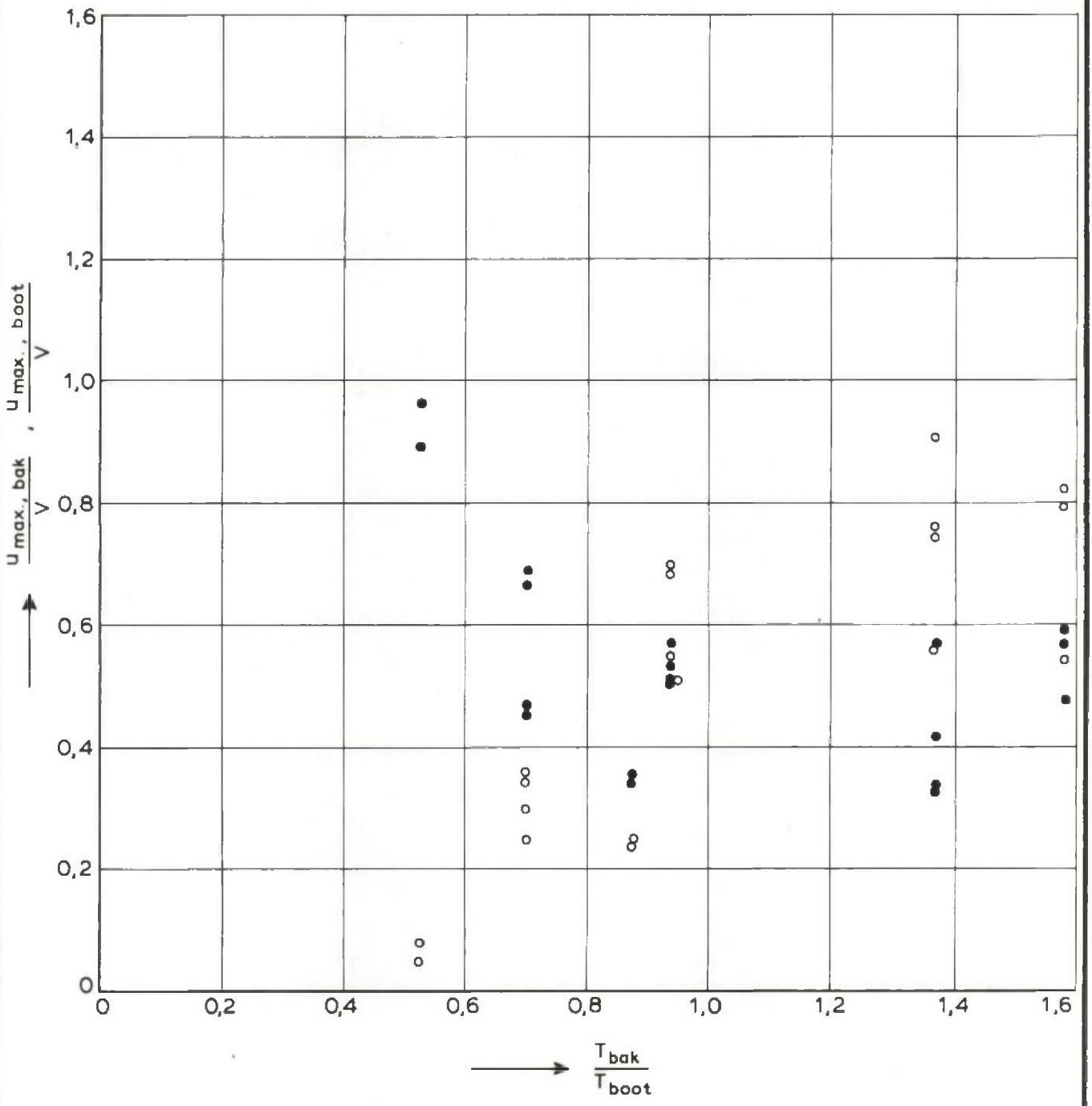


INVLOED DIEPGANG OP SNELHEID IN DE HAALGOLF
($V = 0{,}9\ V_{grens}$; ZETSTEEN)

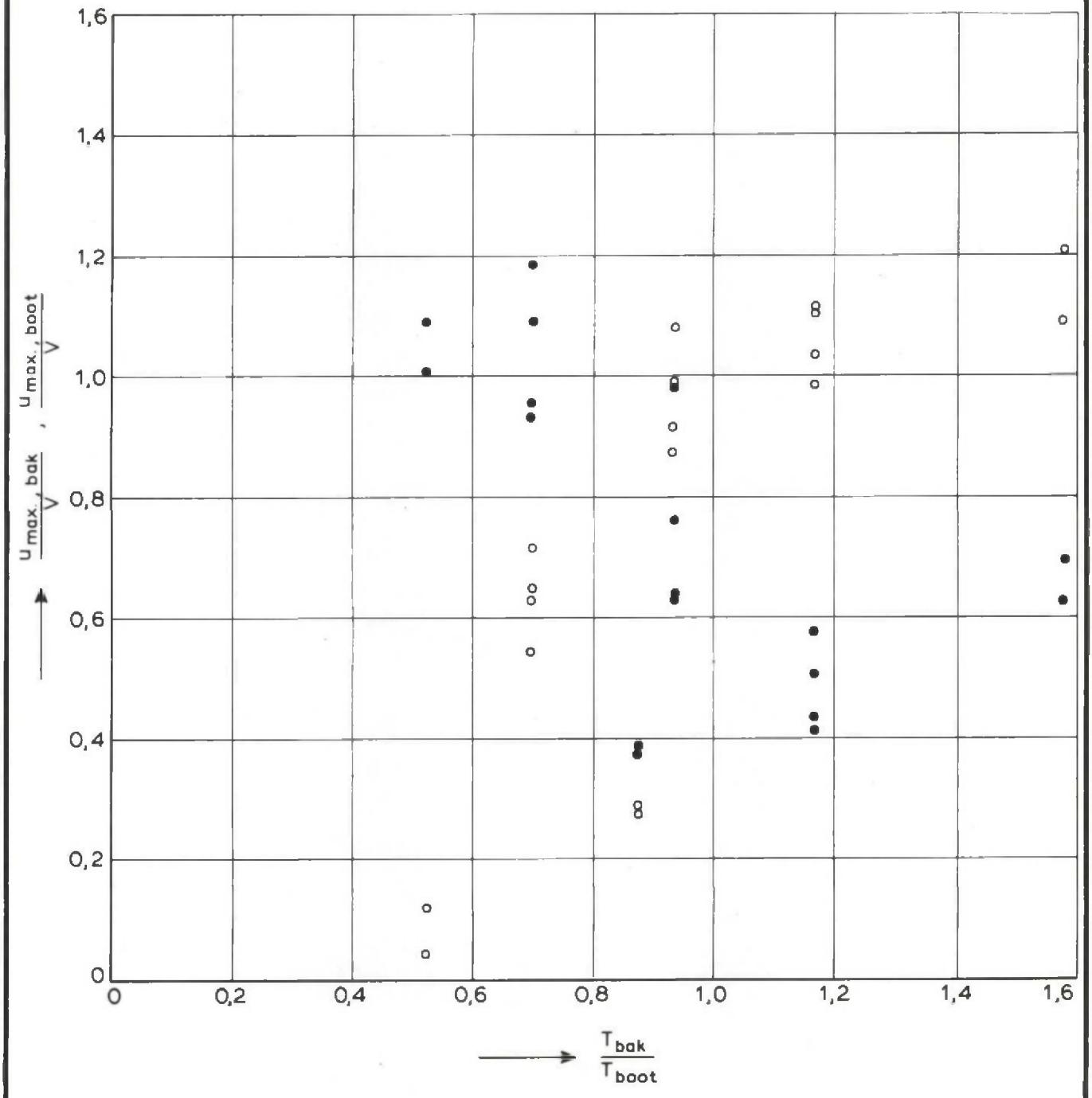
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 17



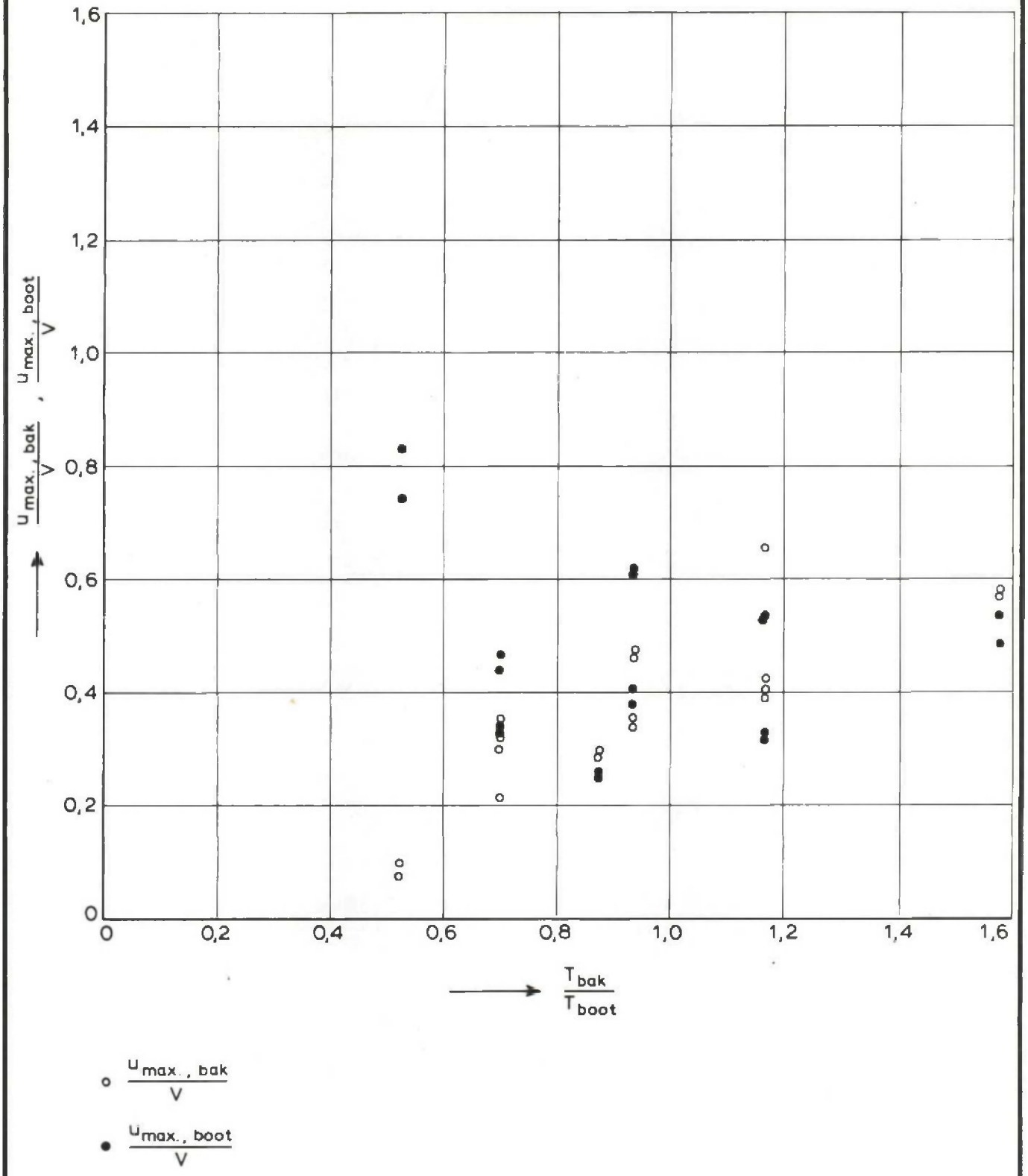
INVLOED DIEPGANG OP SNELHEID IN DE HAALGOLF (V = 0,95 V_{grens} ; ZETSTEEN)		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 18



INVLOED DIEPGANG OP SNELHEID IN DE HAALGOLF ($V = 0{,}9\ V_{grens}$; STORTSTEEN $D_{50} = 9{,}5$ mm)		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 19



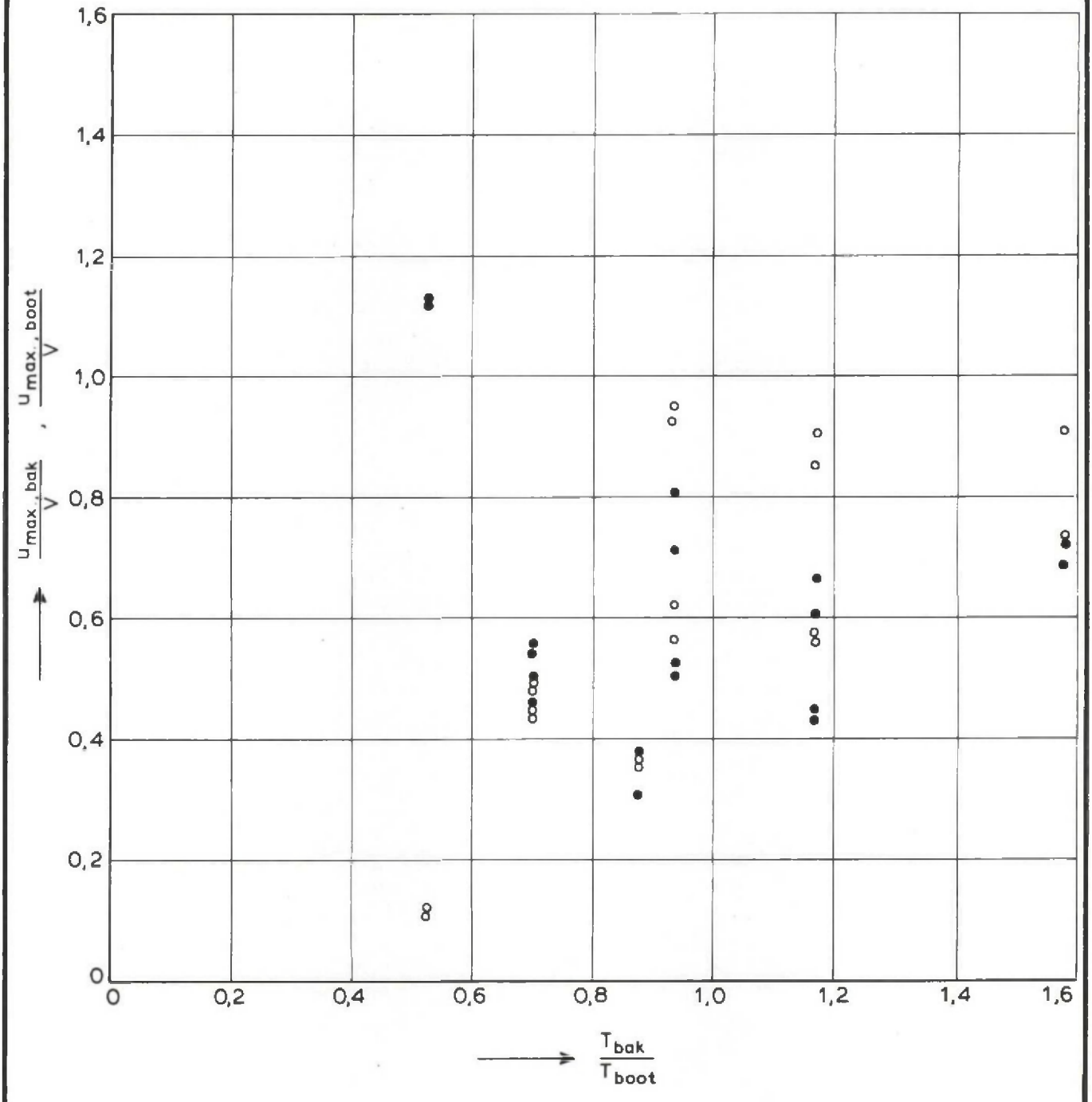
INVLOED DIEPGANG OP SNELHEID IN DE HAALGOLF (V = 0,95 V_{grens} ; STORTSTEEN D_{50} = 19,5 mm)		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 20



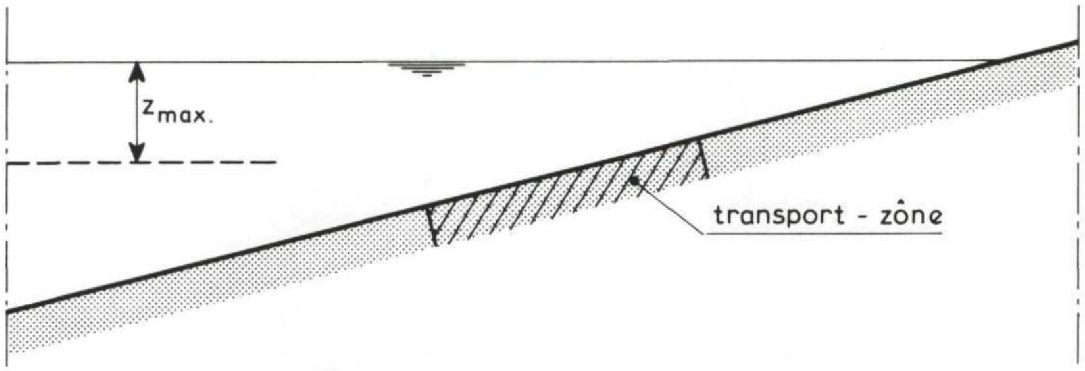
INVLOED DIEPGANG OP SNELHEID IN DE HAALGOLF

(V = 0,9 V_{grens} ; STORTSTEEN D_{50} = 19,5 mm)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 21

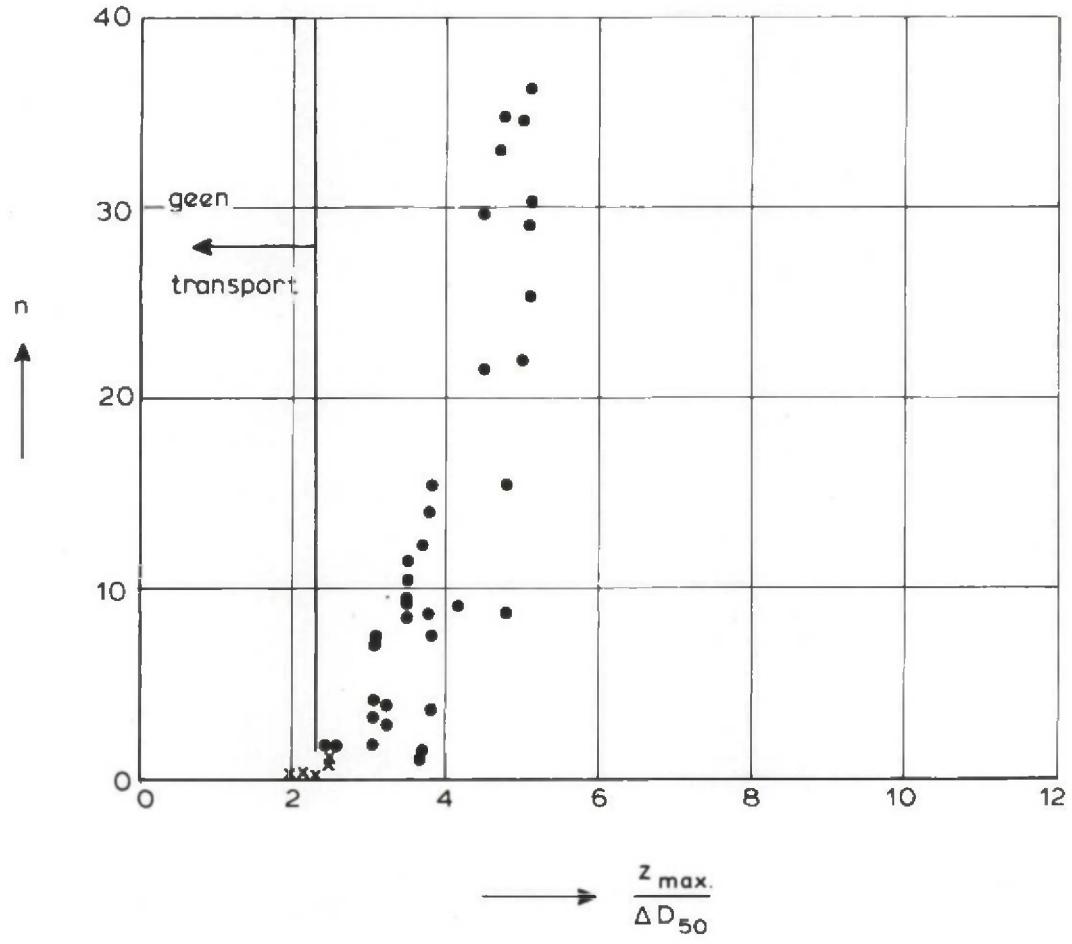


INVLOED DIEPGANG OP SNELHEID IN DE HAALGOLF ($V = 0{,}95\ V_{grens}$; STORTSTEEN $D_{50} = 19{,}5$ mm)		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 22



n = aantal korrels dat een grens passeert, tijdens 1 vaart (gemiddeld over 5 grenzen)

$z_{max.}$ = maximale waterspiegeldaling

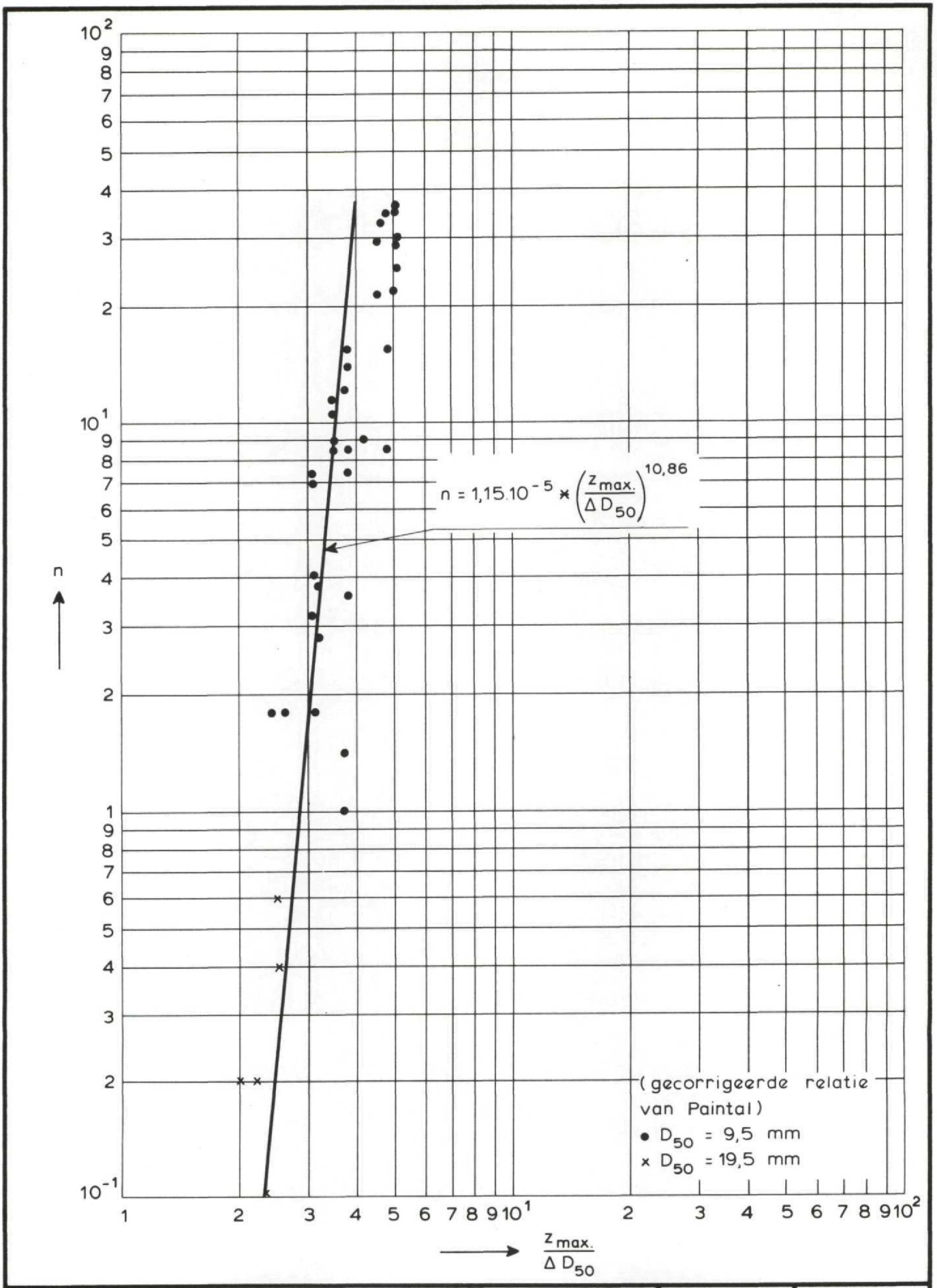


• D_{50} = 9,5 mm

x D_{50} = 19,5 mm

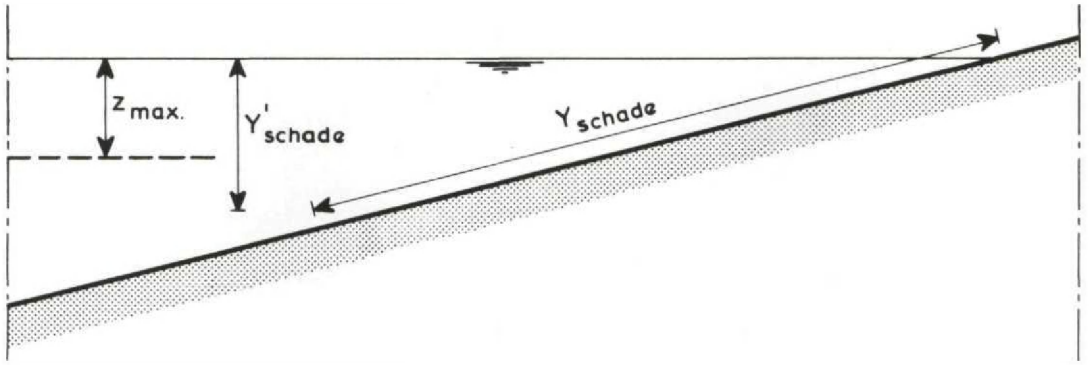
GEMETEN TRANSPORTEN OP HET TALUD

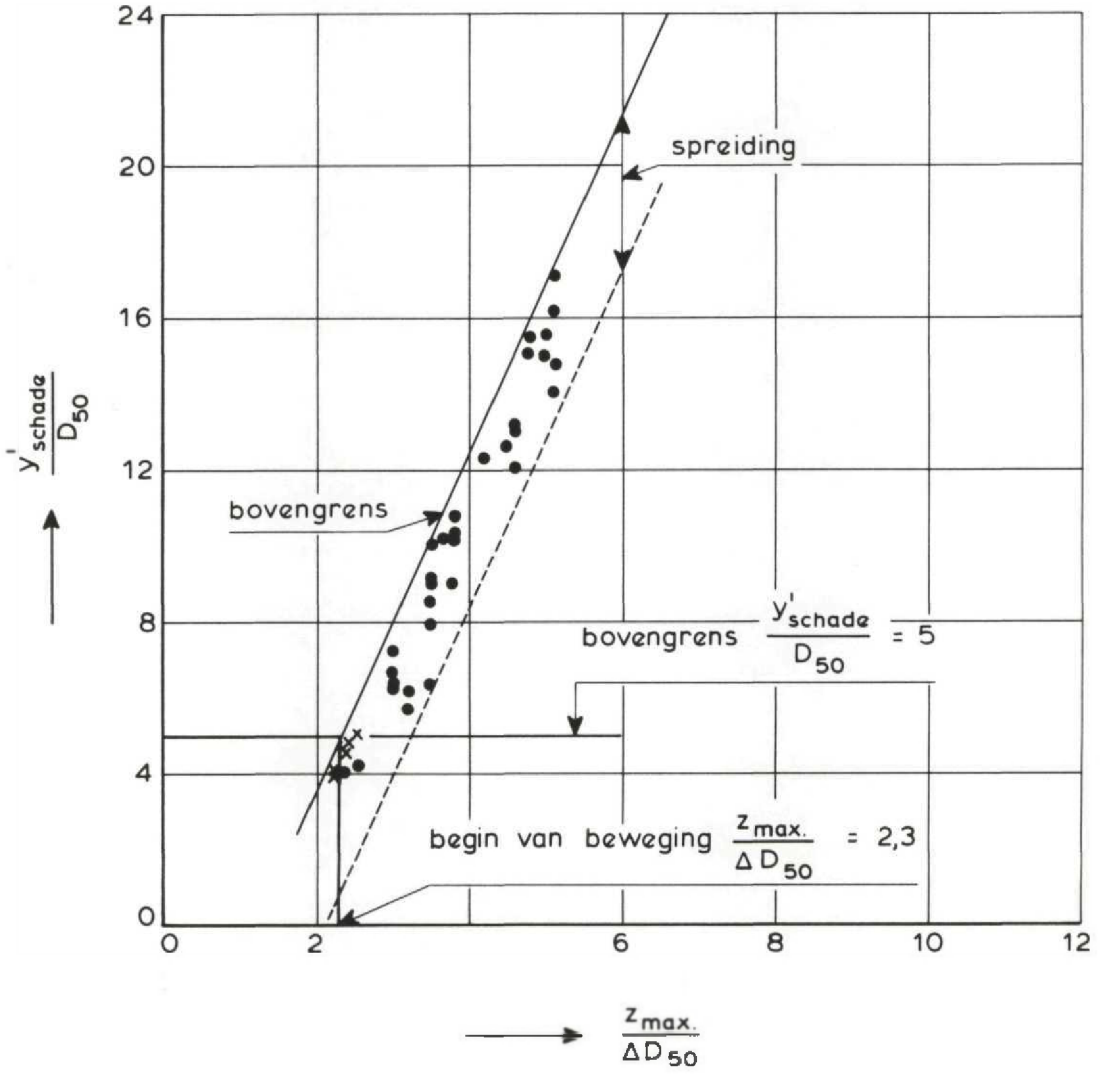
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 23



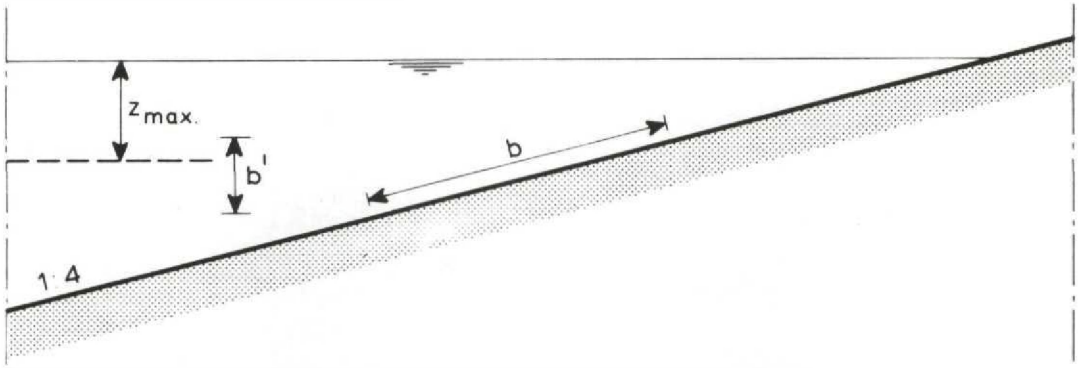
VERGELIJKING GEMETEN TRANSPORT MET BEREKEND TRANSPORT VOLGENS DE GECORRIGEERDE RELATIE VAN PAINTAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 24





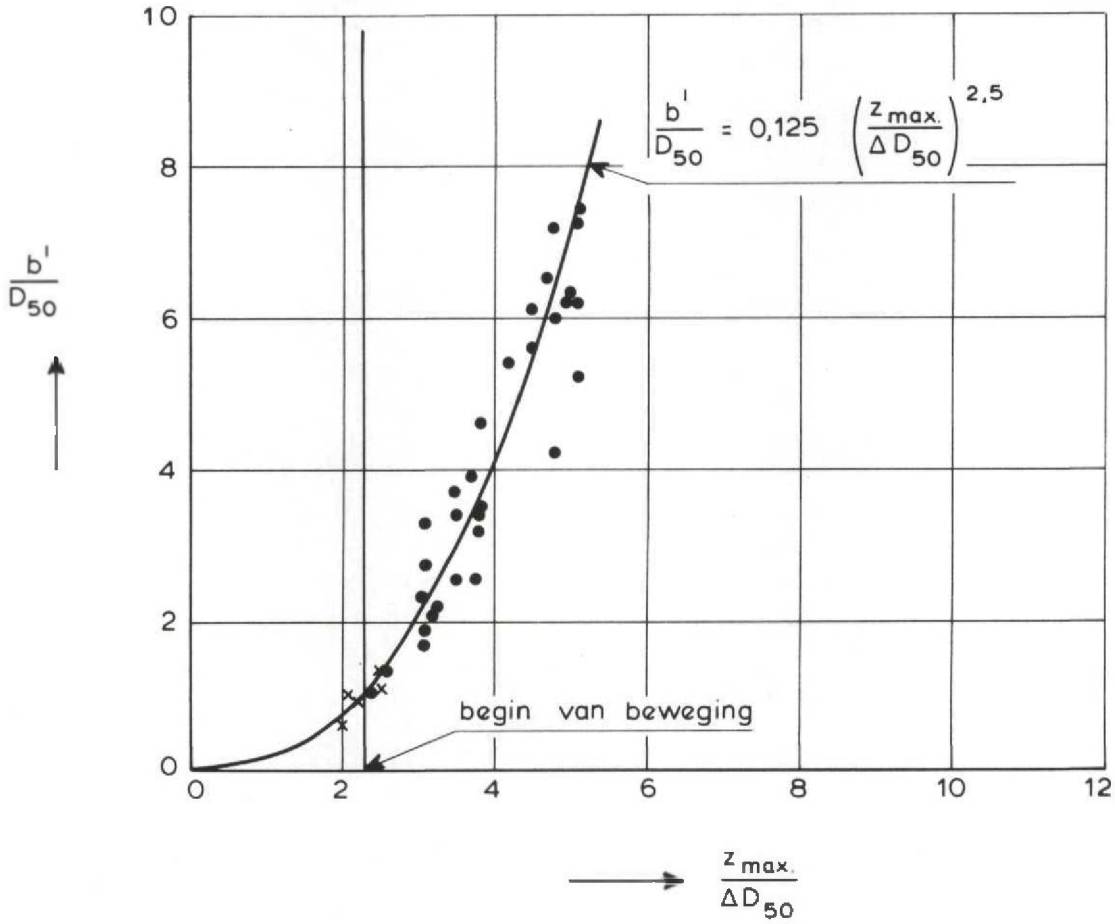
POSITIE ONDERKANT VAN DE SCHADE TEN OPZICHTE VAN DE WATERSPIEGEL		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 25



b = breedte op het talud, waarbinnen het transport in de haalgolf plaats vindt

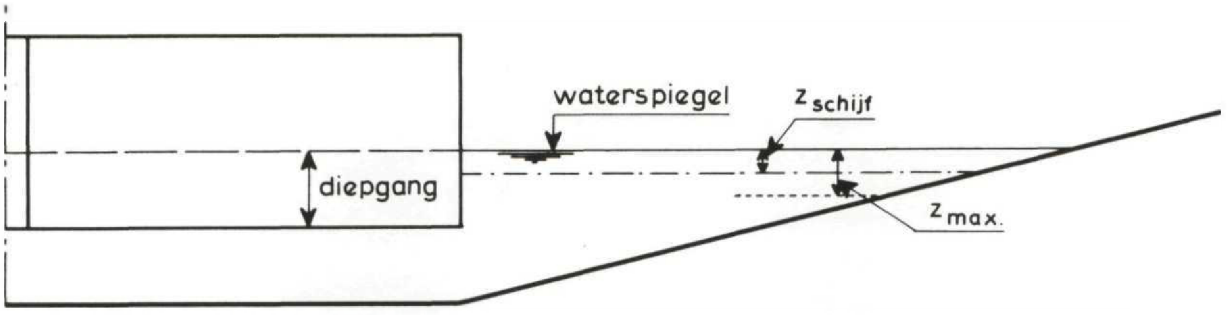
b' = vertikale projectie van b $\left(= \frac{1}{\sqrt{17}}\ b \right)$

$z_{max.}$ = maximale waterspiegeldaling boven het talud (haalgolfhoogte)



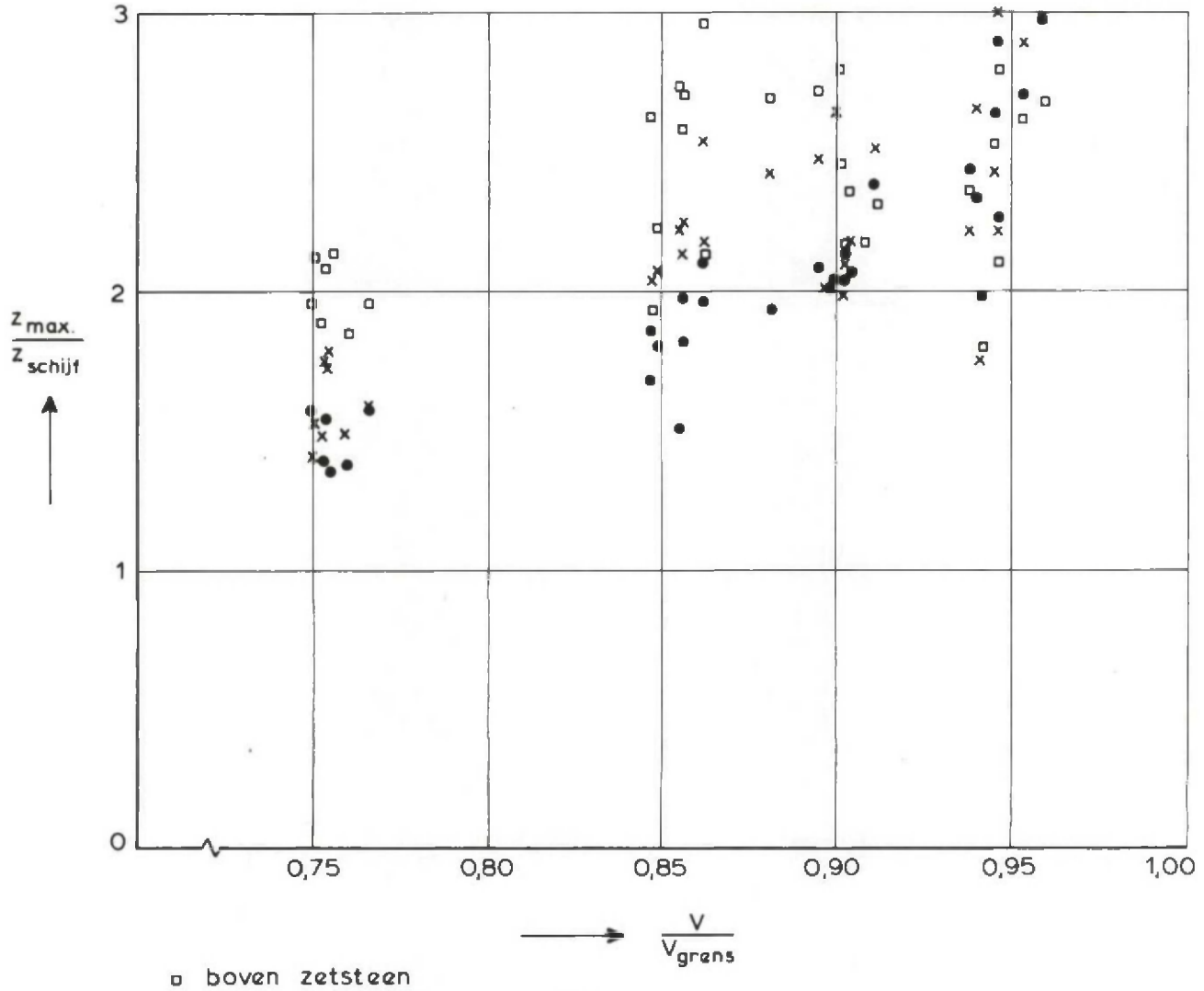
• D_{50} = 9,5 mm
× D_{50} = 19,5 mm

TRANSPORTBREEDTE OP HET TALUD		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 26



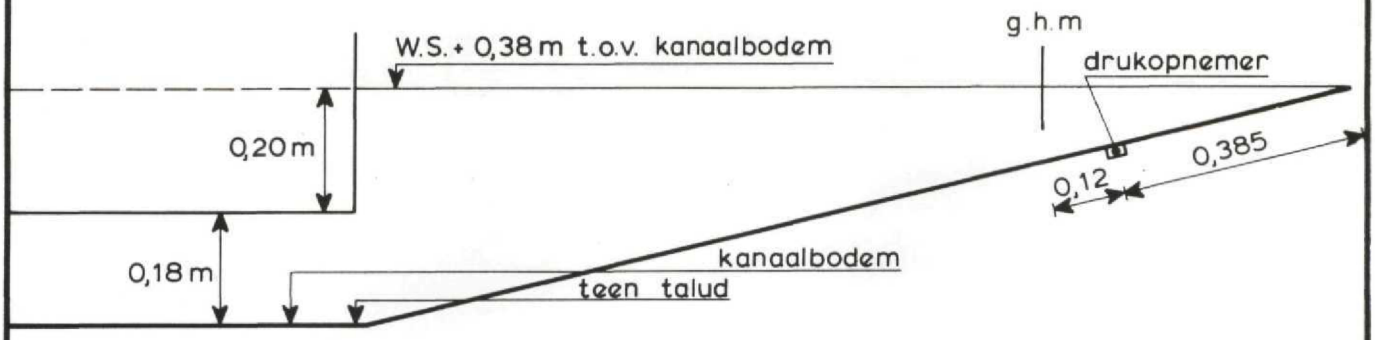
verklaring: z_{schijf} = gemiddelde spiegeldaling volgens schijf

$z_{max.}$ = maximale spiegeldaling nabij oever (haalgolfhoogte)

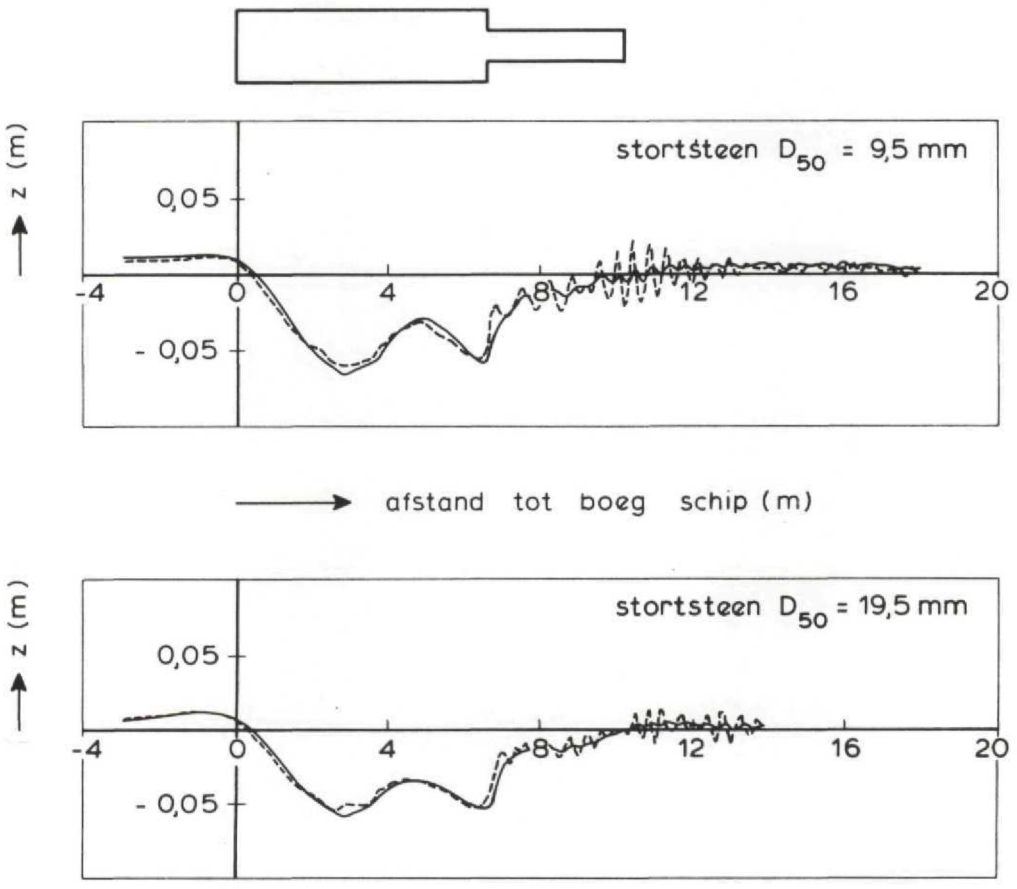


- ▫ boven zetsteen
- × boven stortsteen (D_{50} = 9,5 mm)
- • boven stortsteen (D_{50} = 19,5 mm)

HAALGOLFHOOGTE DICHTBIJ DE OEVER		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 27

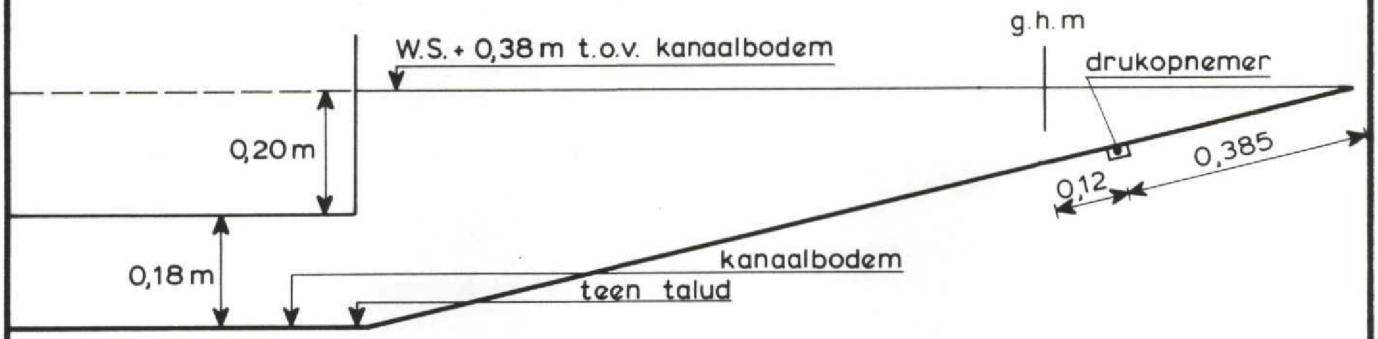


v = 0,855 m/s
toerental = 685 omw/min.

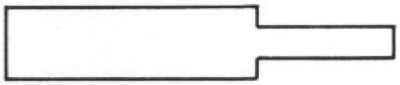


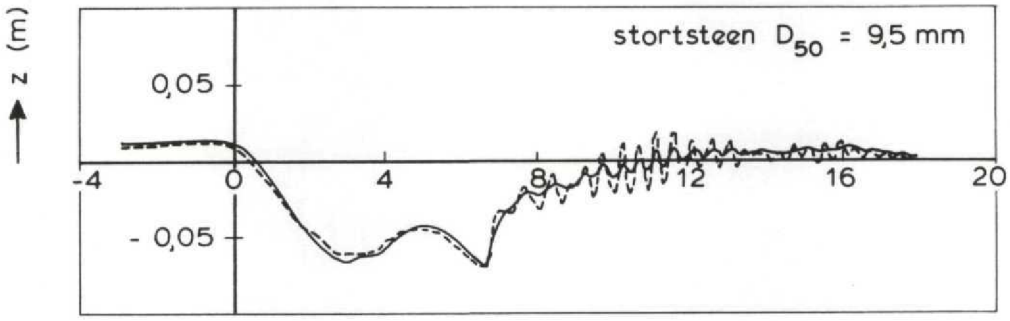
——— registratie drukopnemer
--------- registratie golfhoogtemeter

VERGELIJKING DRUKREGISTRATIES MET GOLFHOOGTEMETER REGISTRATIES	T 1807	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 28

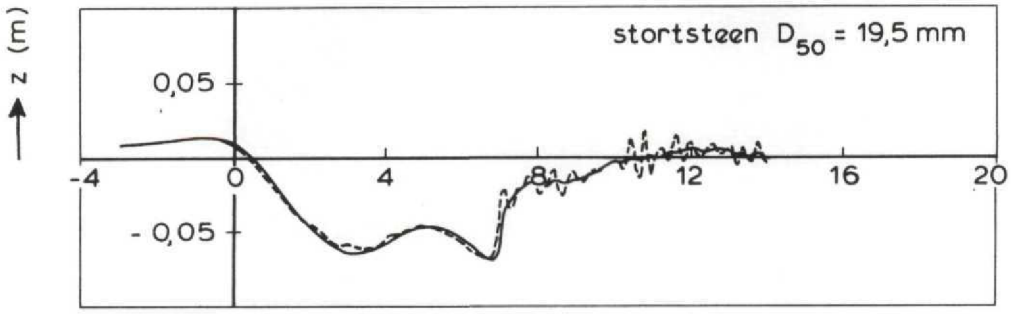


v = 0,882 m/s
toerental = 825 omw/min.



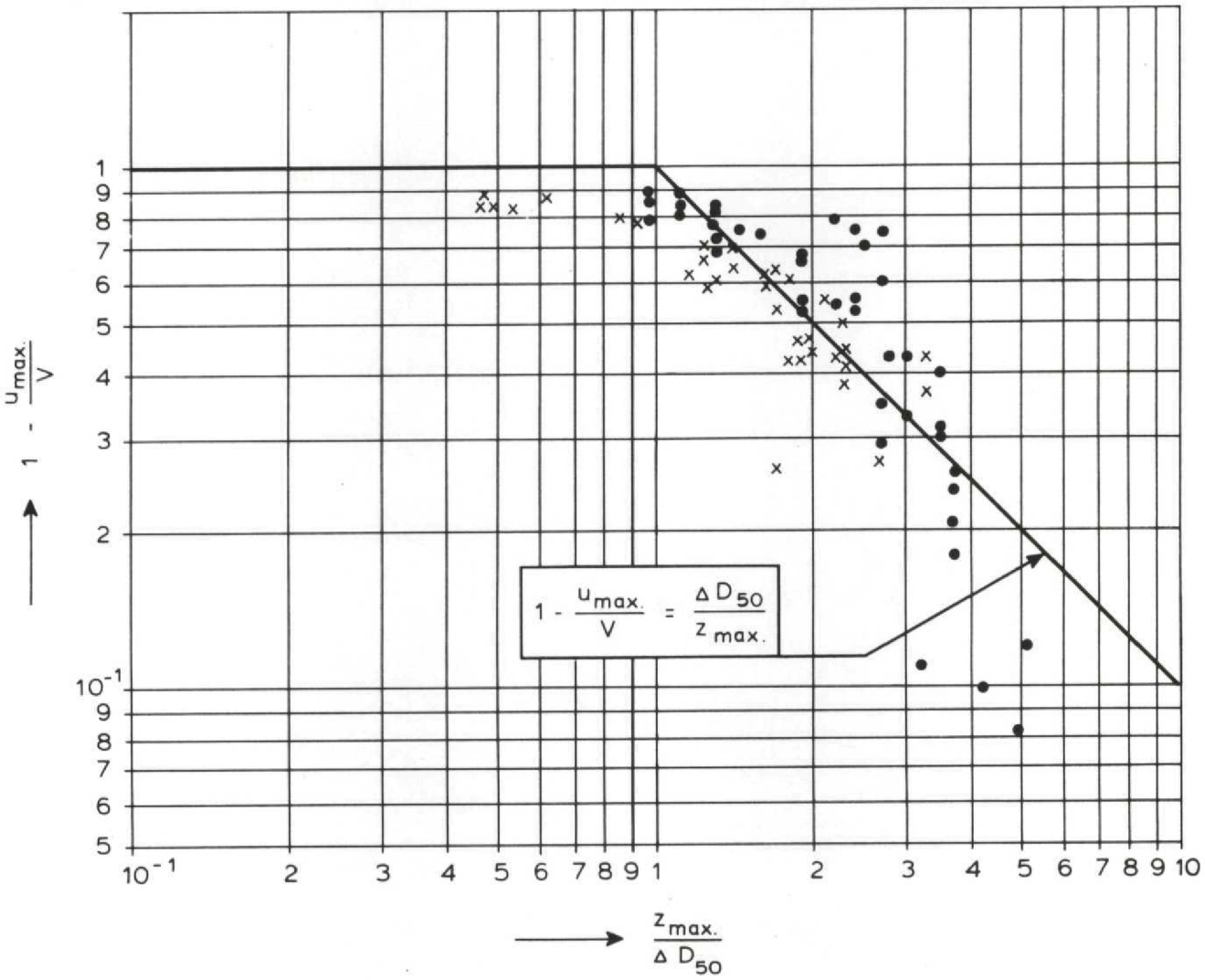


afstand tot boeg schip (m)



——— registratie drukopnemer
--------- registratie golfhoogtemeter

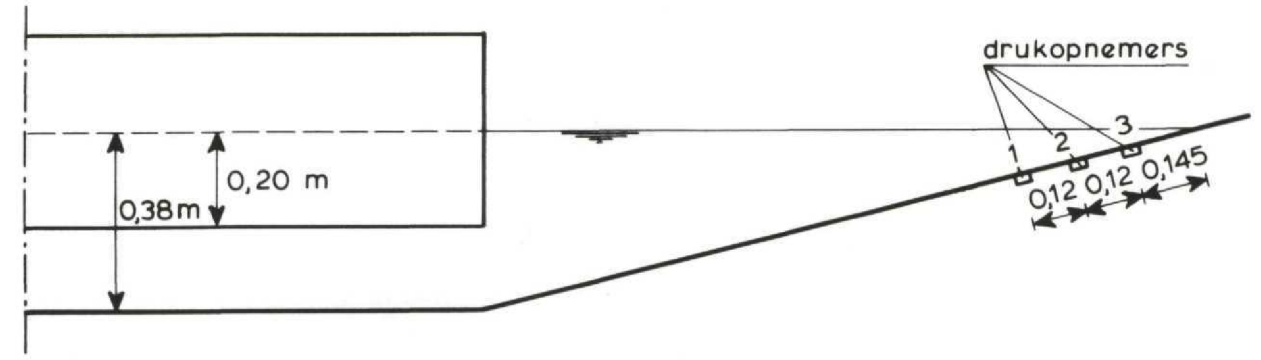
VERGELIJKING DRUKREGISTRATIES MET GOLFHOOGTEMETER REGISTRATIES	T 1808	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 29



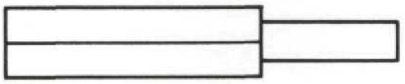
• D_{50} = 9,5 mm
× D_{50} = 19,5 mm

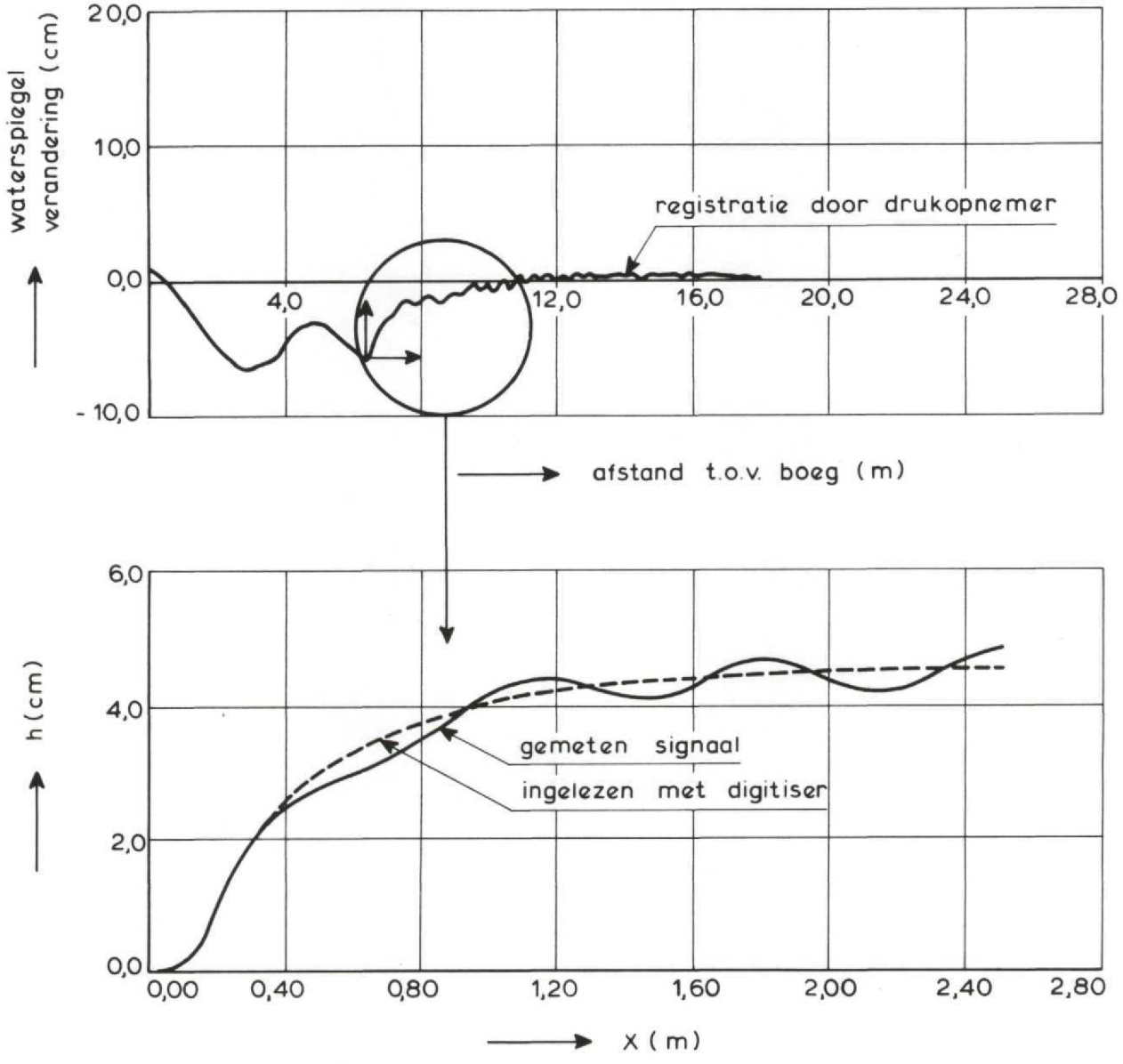
MAXIMUM SNELHEID IN DE HAALGOLF ALS FUNKTIE VAN MAXIMALE SPIEGELDALING , BODEMMATERIAAL EN SCHEEPSSNELHEID

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 30

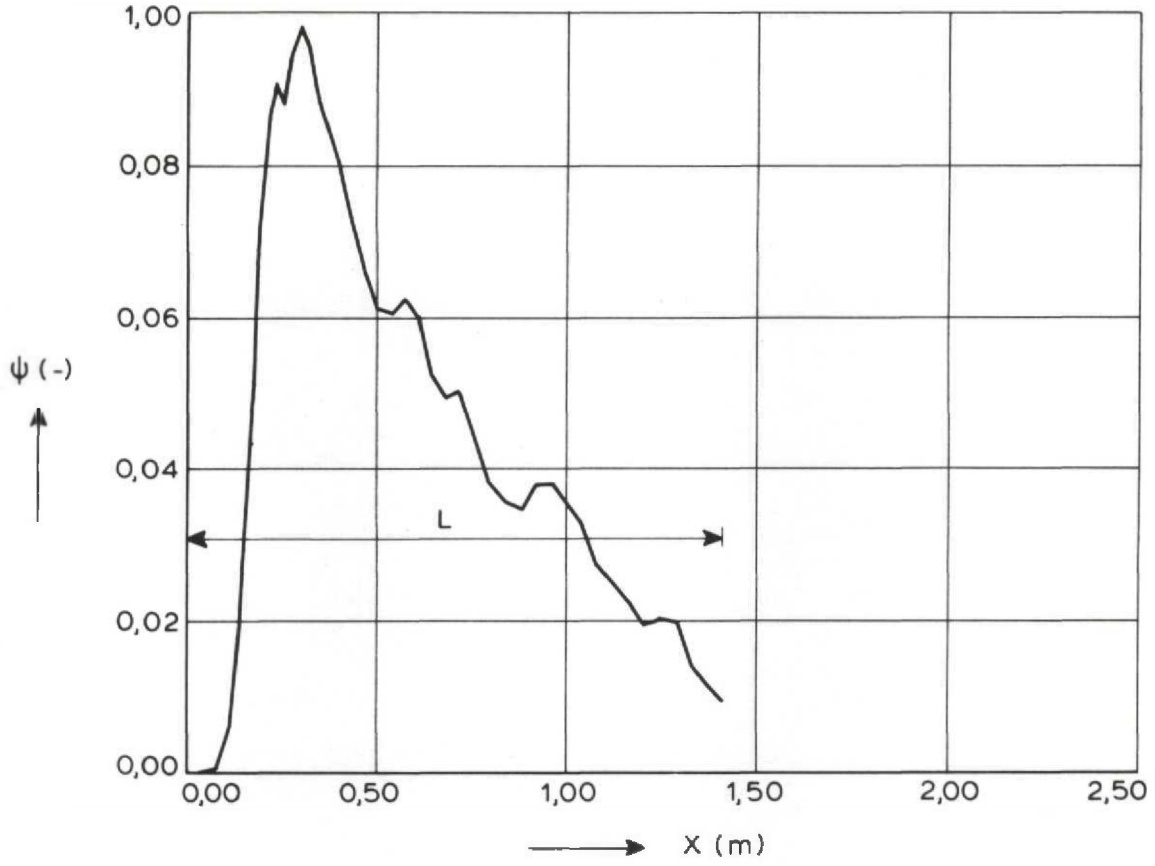


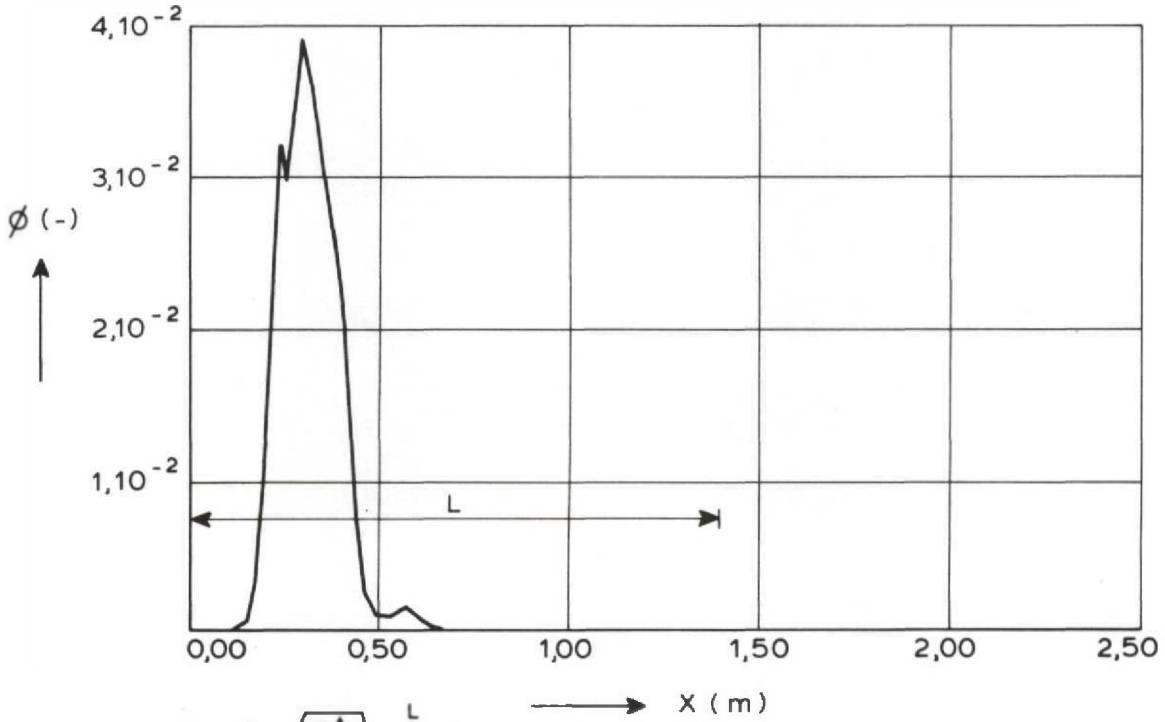
V = 0,855 m/s
toerental = 685 omw/min





HAALGOLF BOVEN STORTSTEEN (D_{50} = 9,5 mm)	T 1807	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 31





$$\frac{n}{b} = \frac{2}{V}\sqrt{\frac{g\Delta}{D_{50}^3}} \int_0^L \phi \, dX = 72$$

$V = 0{,}855$ m/s

$D_{50} = 9{,}5$ mm

STROOM - EN TRANSPORTPARAMETER	T 1807	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 32

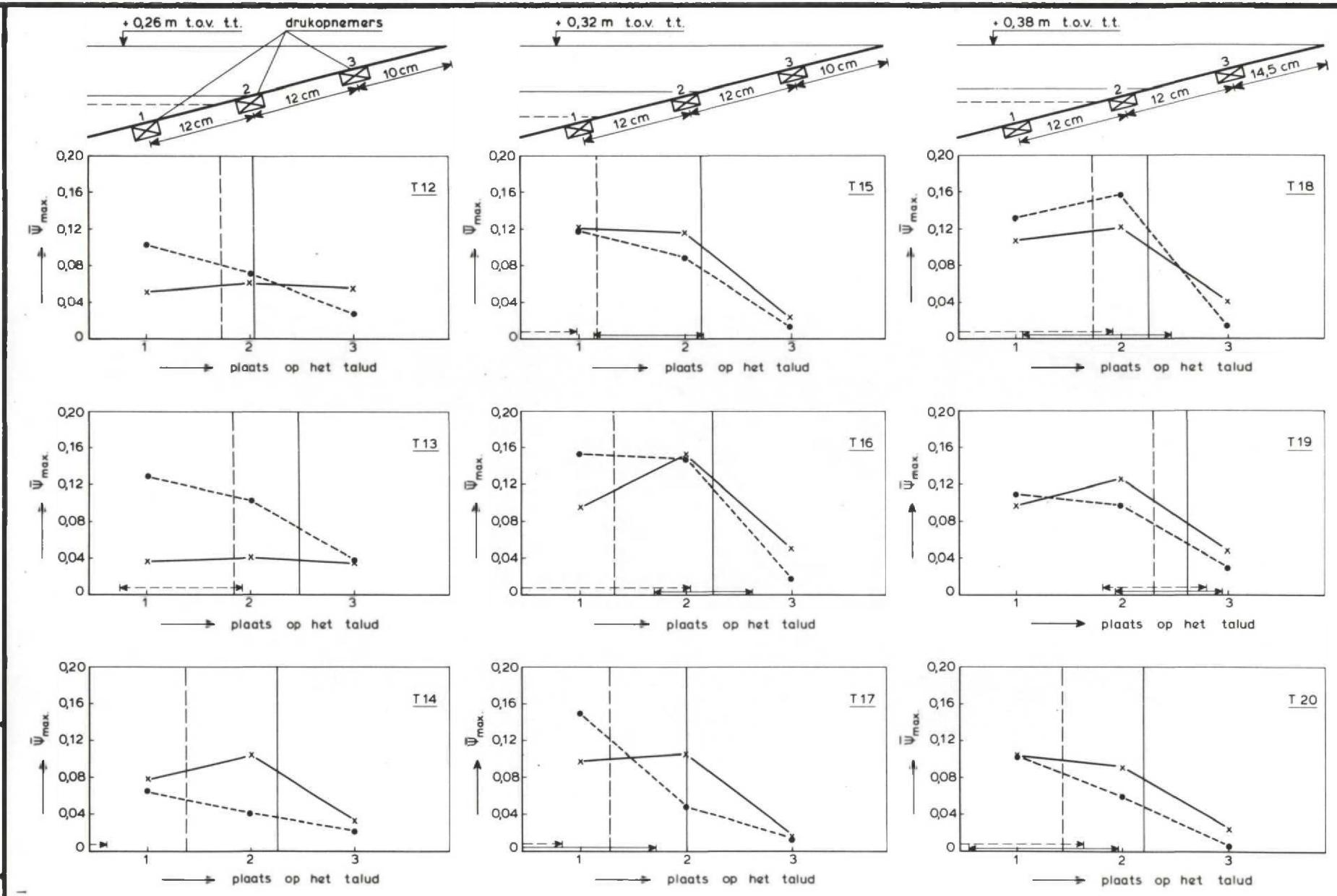
MAXIMALE SCHUIFSPANNINGEN EN POSITIES VAN DE TRANSPORTEN VOOR STORTSTEEN MET D_{50} = 9,5 mm

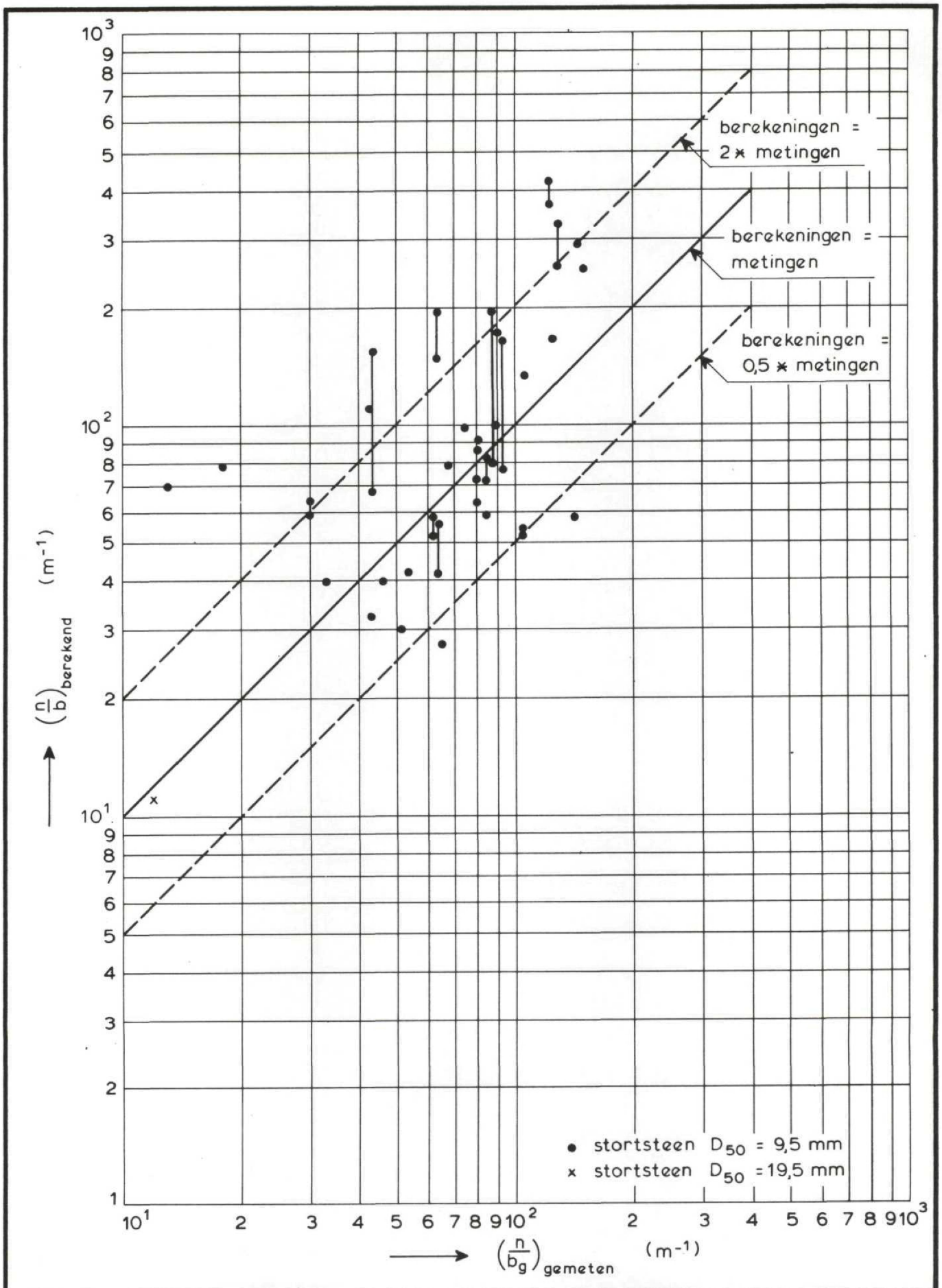
SCHAAL 1:4 (MODEL)

M 1115

FIG. 33

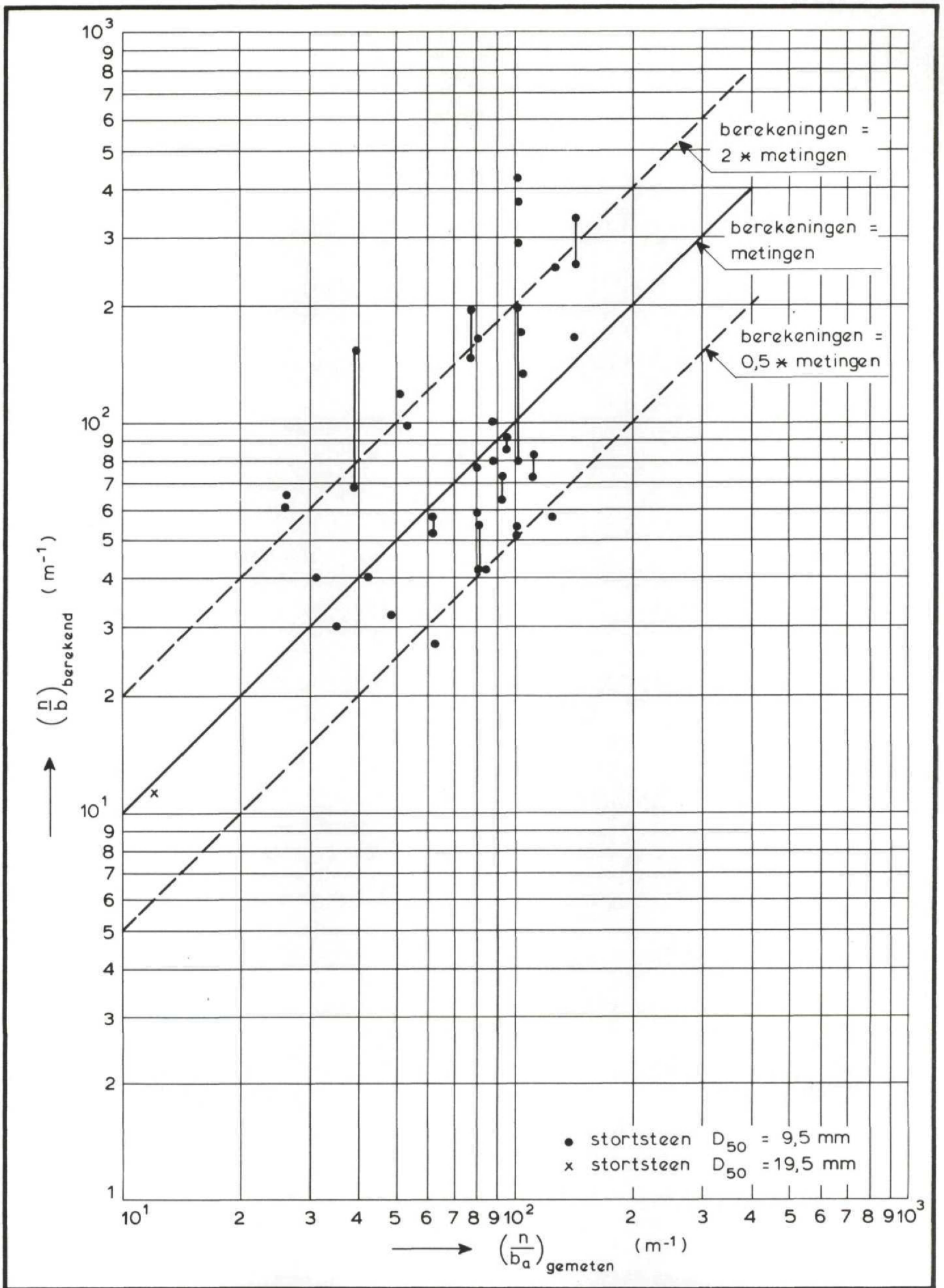
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM



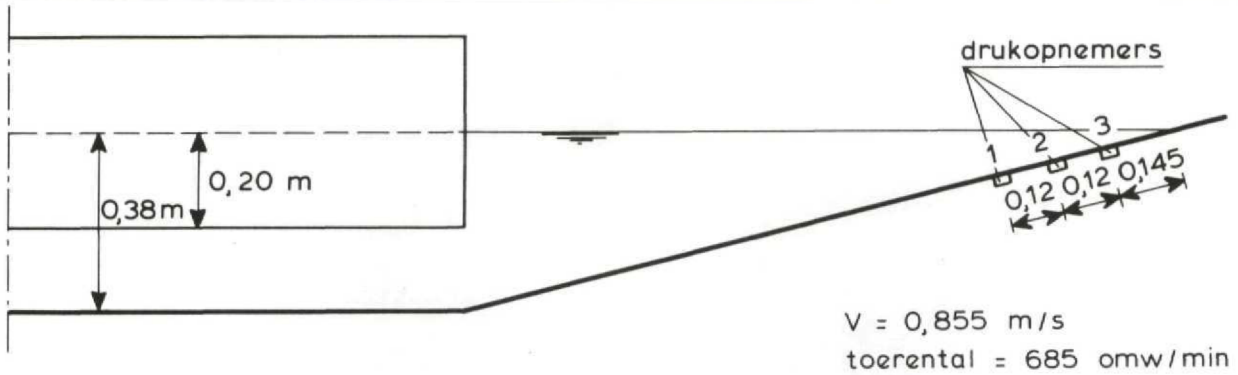


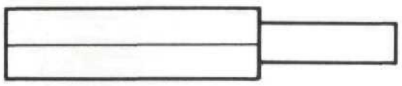
TOETSING VAN DE BEREKENDE TRANSPORTEN ;
b_g = GEMETEN TRANSPORTBREEDTE

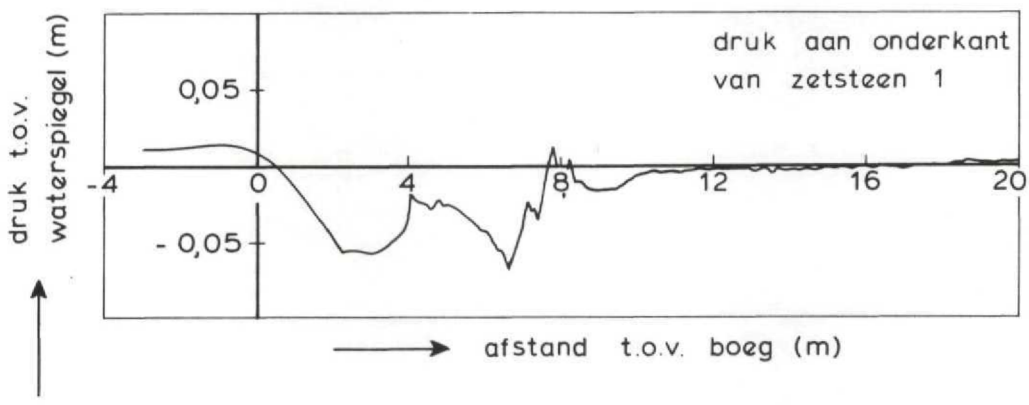
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 34

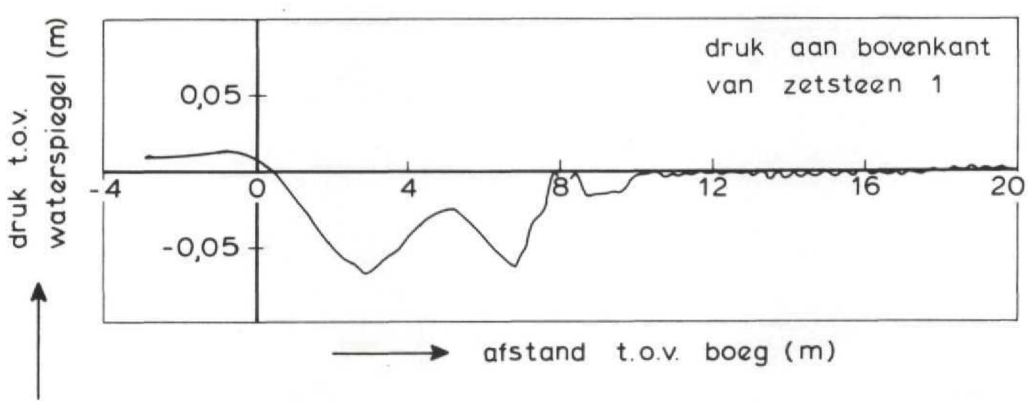


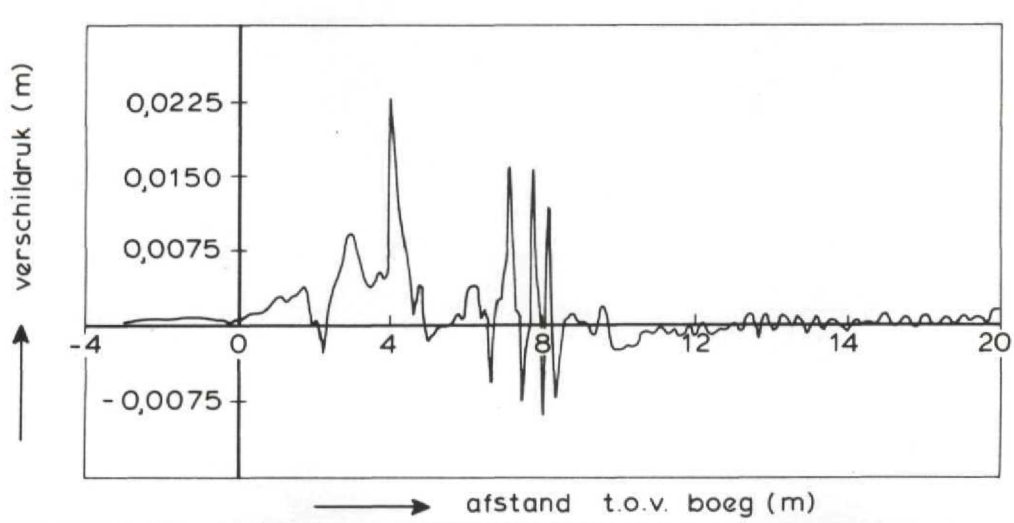
TOETSING VAN DE BEREKENDE TRANSPORTEN ; b_a = GENORMEERDE TRANSPORTBREEDTE		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 35





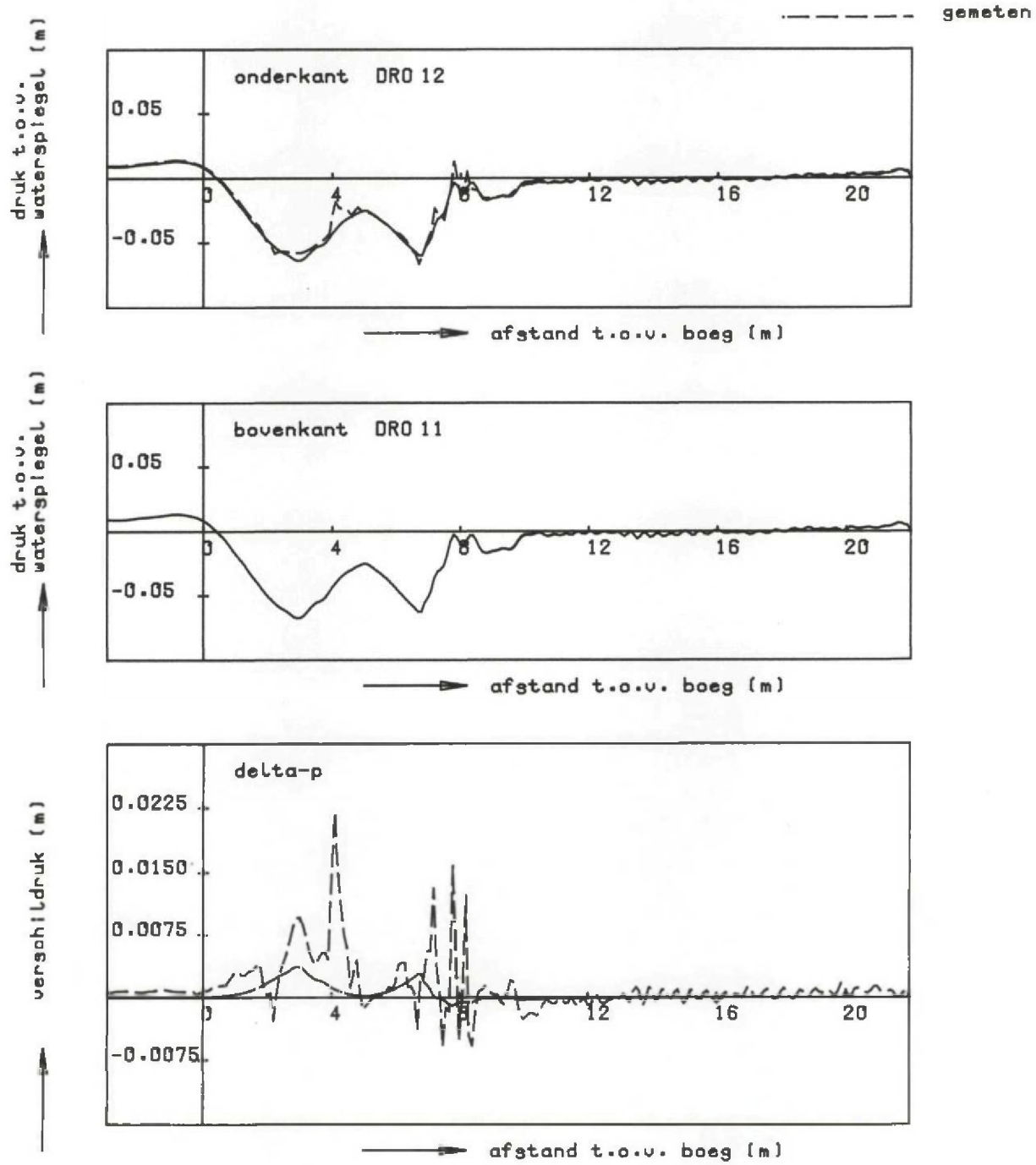






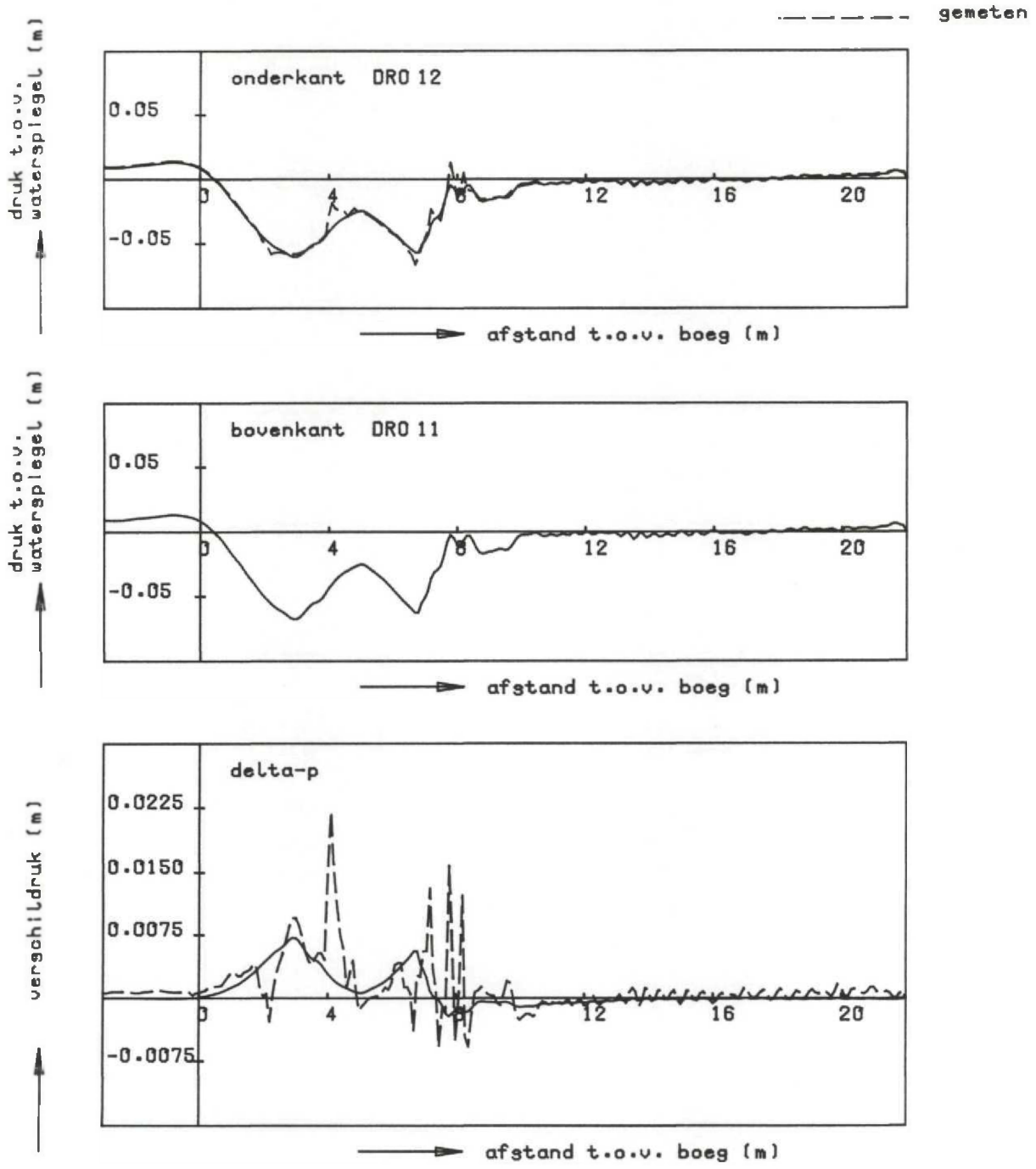
ABSOLUTE DRUKKEN EN VERSCHILDRUKKEN BIJ ZETSTEEN OP VLIJLAAG VAN SPLIT	T 1807	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 36

	STEENLAAG	FILTER
dikte (m):	0.015	0.020
k (m/s):	0.0020	0.0600



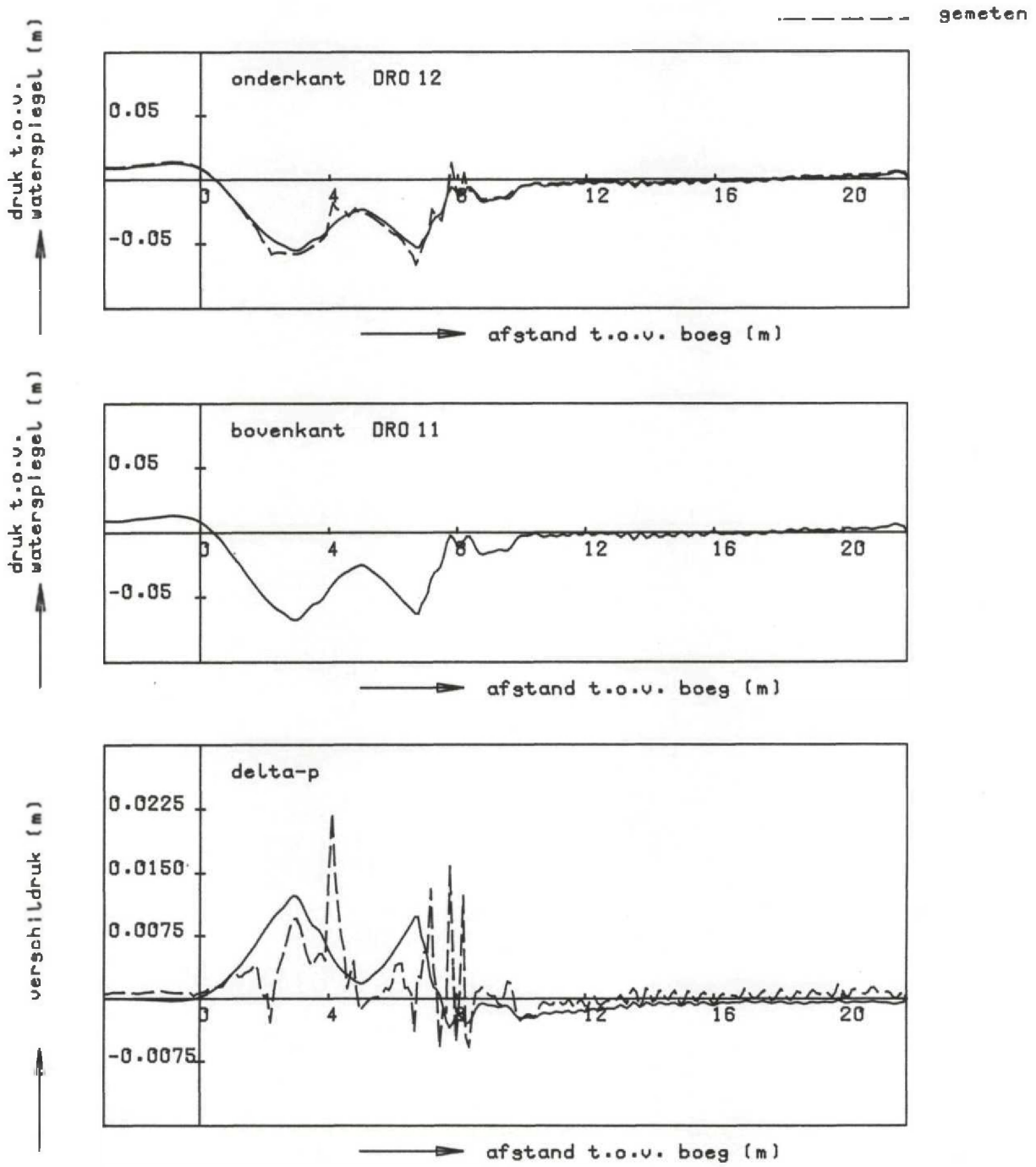
GEMETEN EN BEREKENDE MODELRESULTATEN	T 1807	
	VS: 0.855 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 37

	STEENLAAG	FILTER
dikte (m):	0.015	0.020
k (m/s):	0.0010	0.0600



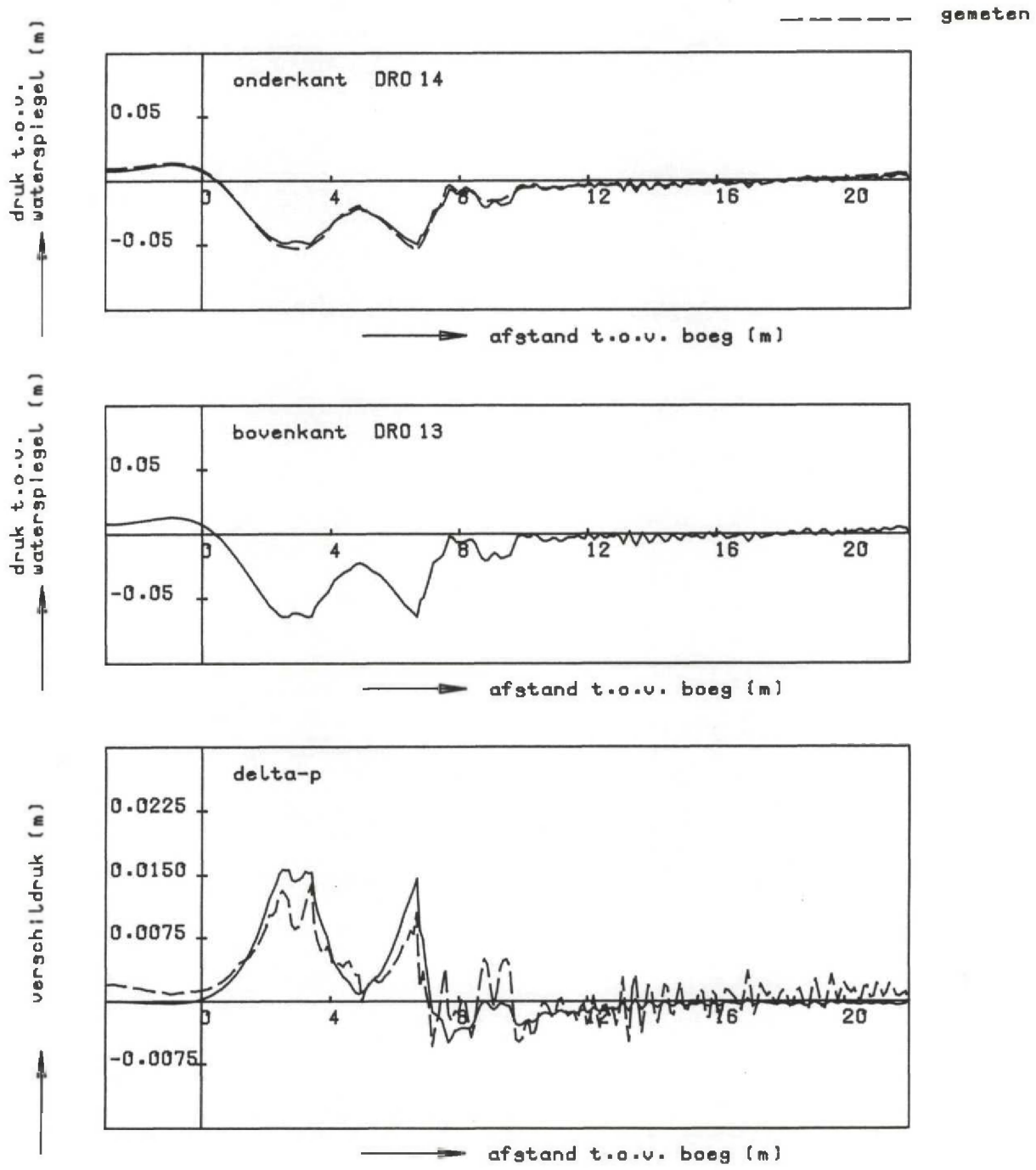
GEMETEN EN BEREKENDE MODELRESULTATEN	T 1807	
	VS: 0.855 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 38

	STEENLAAG	FILTER
dikte (m):	0.015	0.020
k (m/s):	0.0005	0.0600



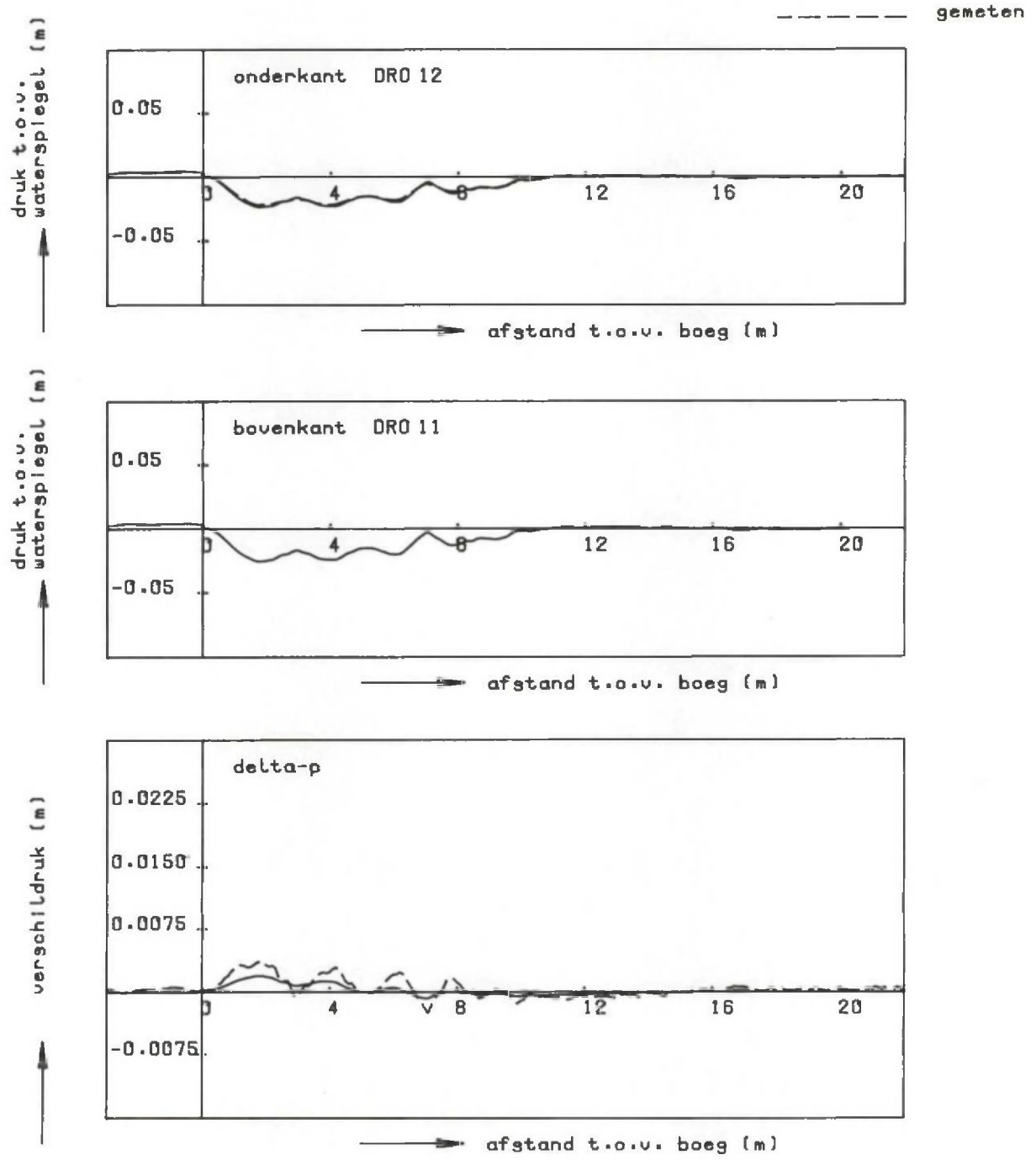
GEMETEN EN BEREKENDE MODELRESULTATEN	T 1807	
	VS: 0.855 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 39

	STEENLAAG	FILTER
dikte (m):	0.015	0.020
k (m/s):	0.0010	0.0600



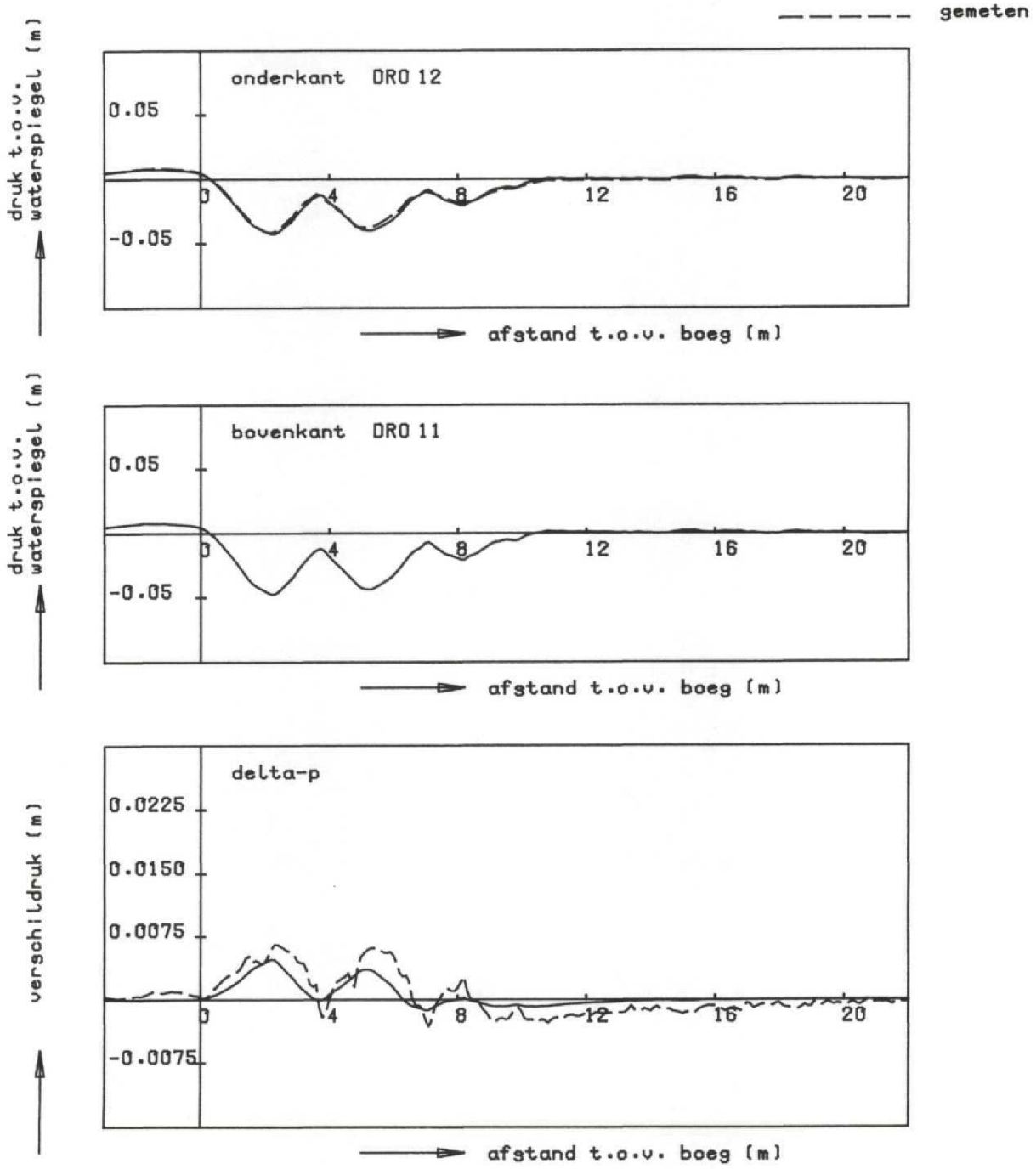
GEMETEN EN BEREKENDE MODELRESULTATEN	T 1807	
	VS: 0.855 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 40

	STEENLAAG	FILTER
dikte (m):	0.015	0.020
k (m/s):	0.0010	0.0600



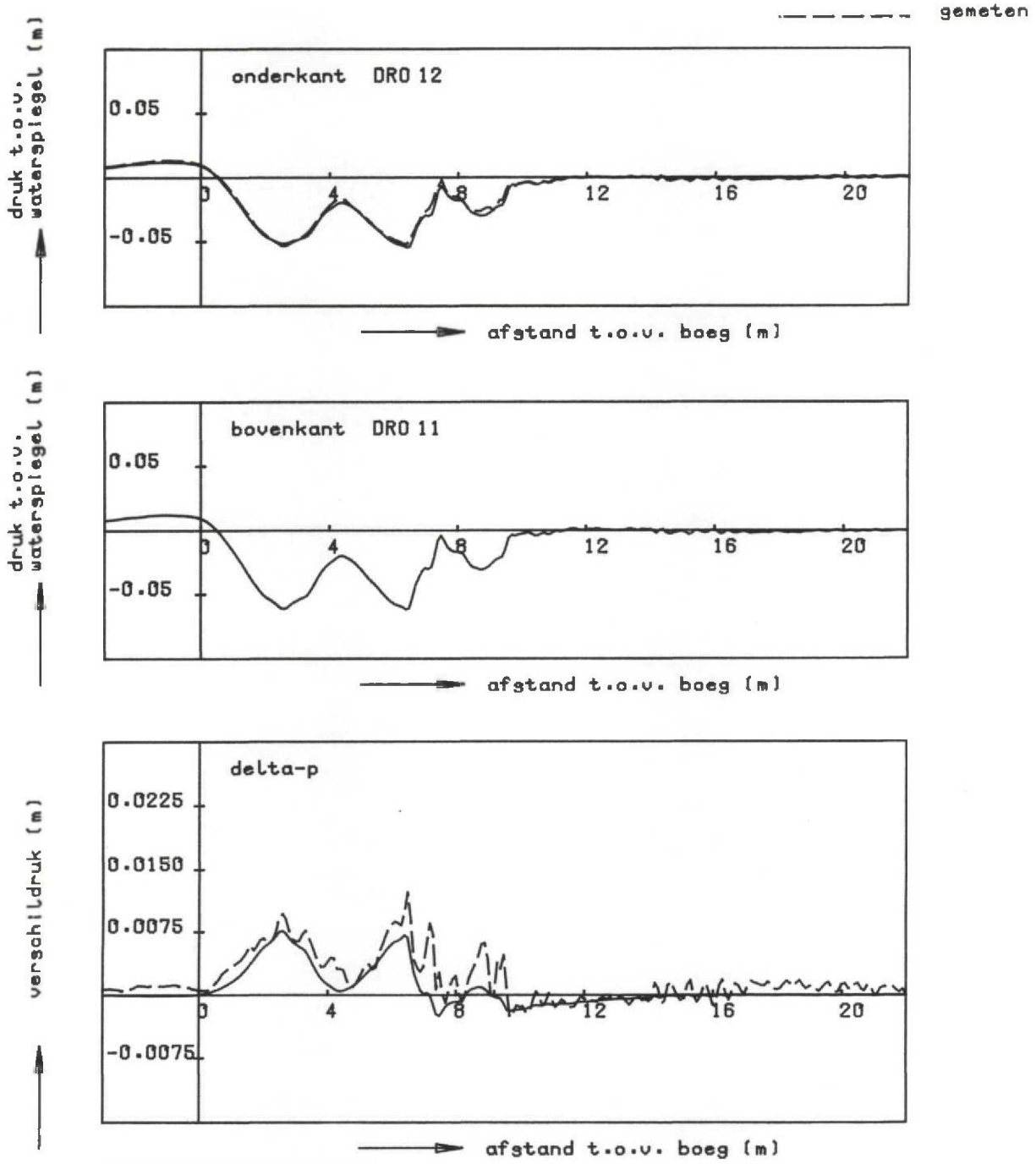
GEMETEN EN BEREKENDE MODELRESULTATEN	T 1502	
	VS: 0.666 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 41

	STEENLAAG	FILTER
dikte (m):	0.015	0.020
k (m/s):	0.0010	0.0600



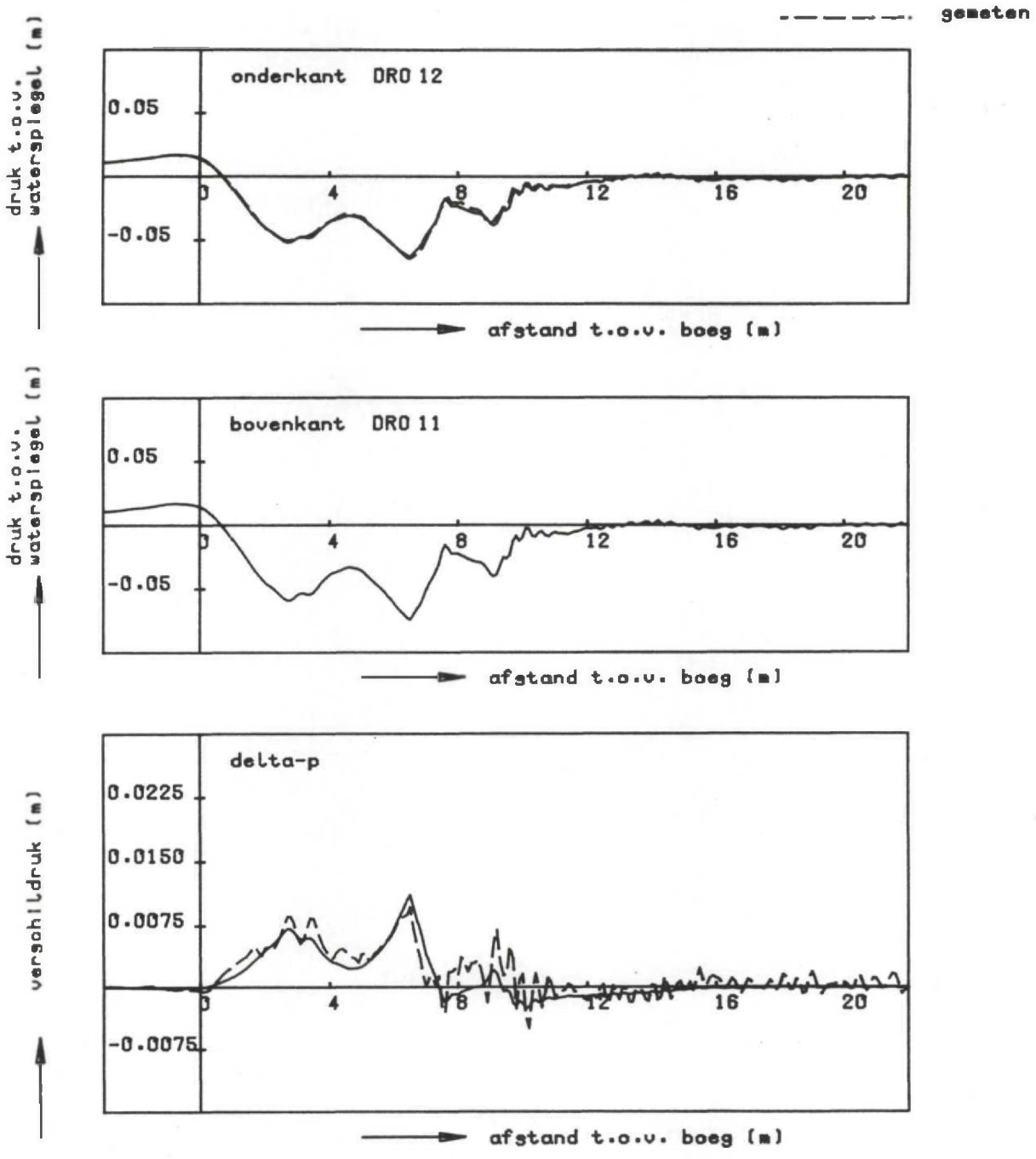
GEMETEN EN BEREKENDE MODELRESULTATEN	T 1504	
	VS: 0.741 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 42

	STEENLAAG	FILTER
dikte (m):	0.015	0.020
k (m/s):	0.0010	0.0600



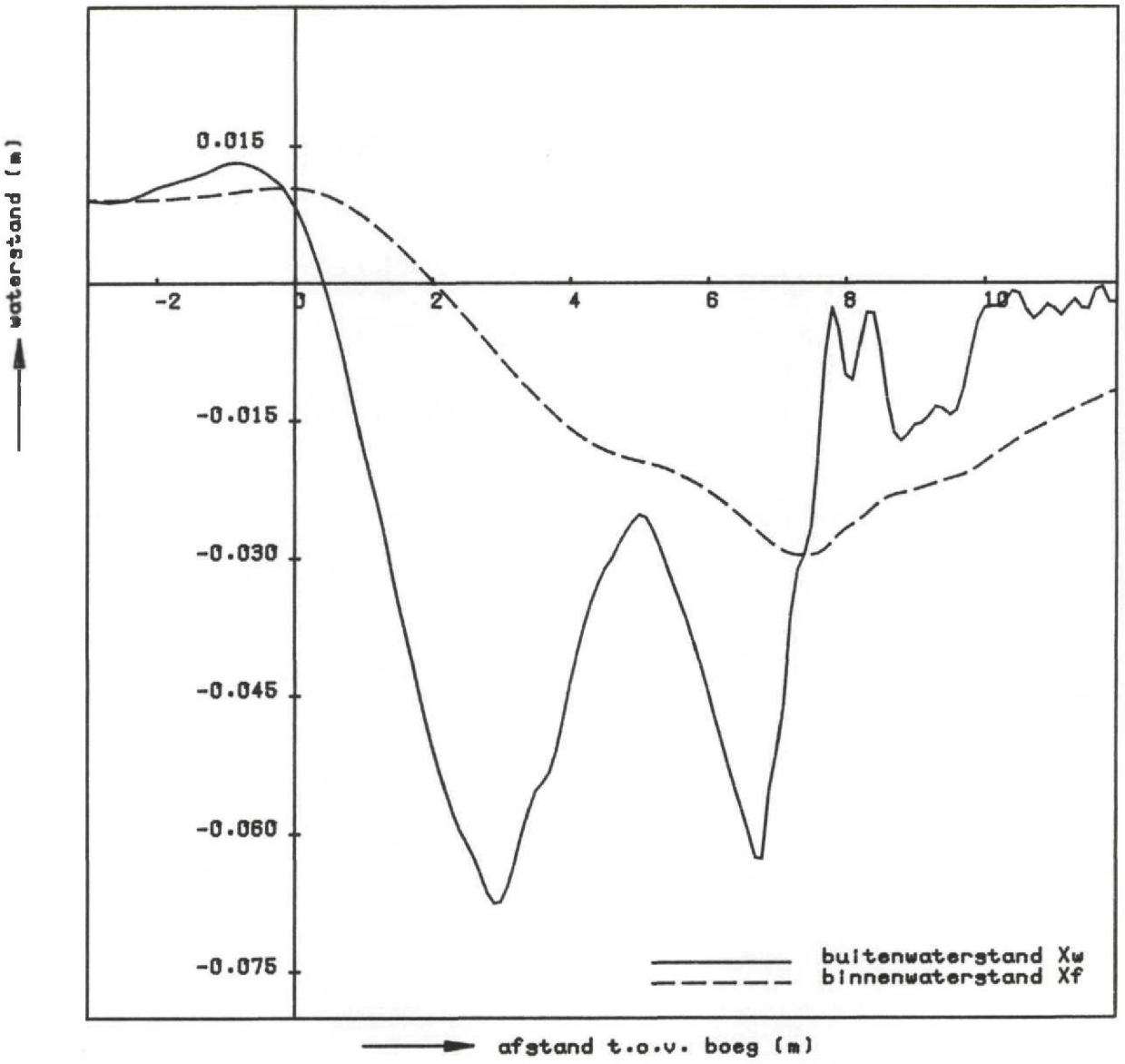
GEMETEN EN BEREKENDE MODELRESULTATEN	T 1506	
	VS: 0.792 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 43

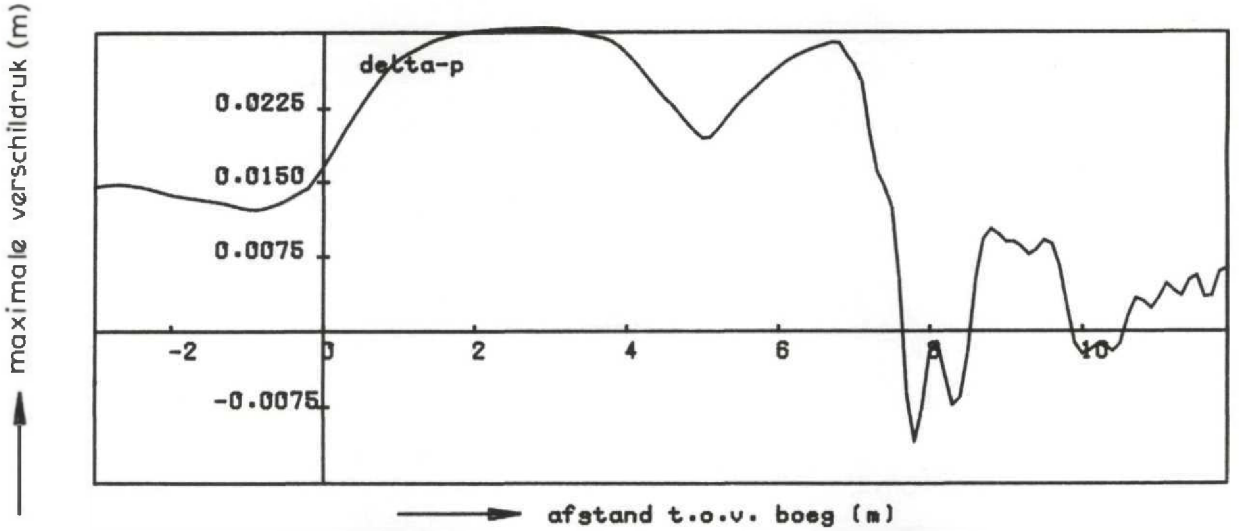
	STEENLAAG	FILTER
dikte (m):	0.015	0.020
k (m/s):	0.0010	0.0600



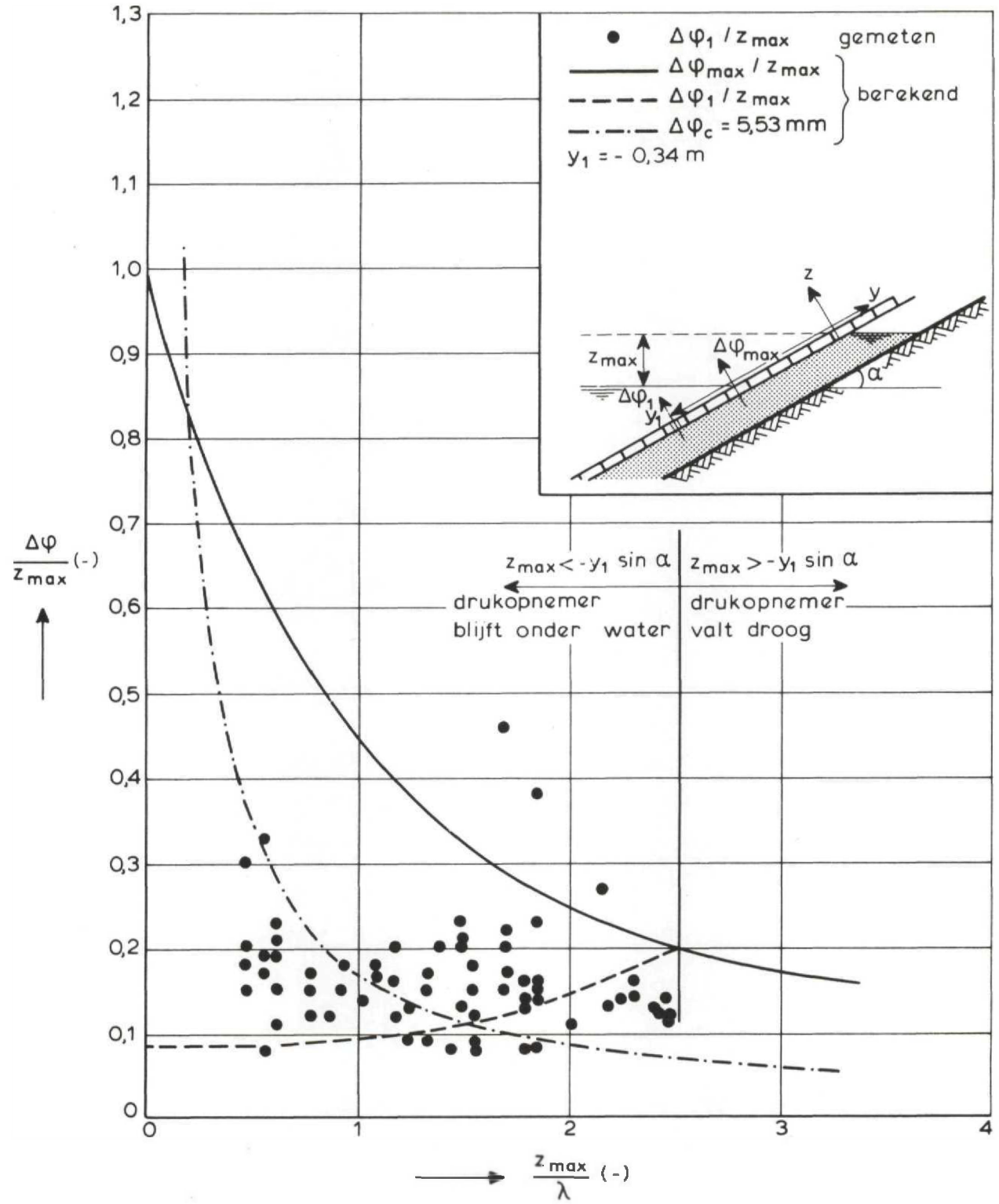
GEMETEN EN BEREKENDE MODELRESULTATEN	T 1508	
	VS : 0.830 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 44

	STEENLAAG	0.400 FILTER
dikte (m):	0.015	0.020
k (m/s):	0.0010	0.0600
e (-):		

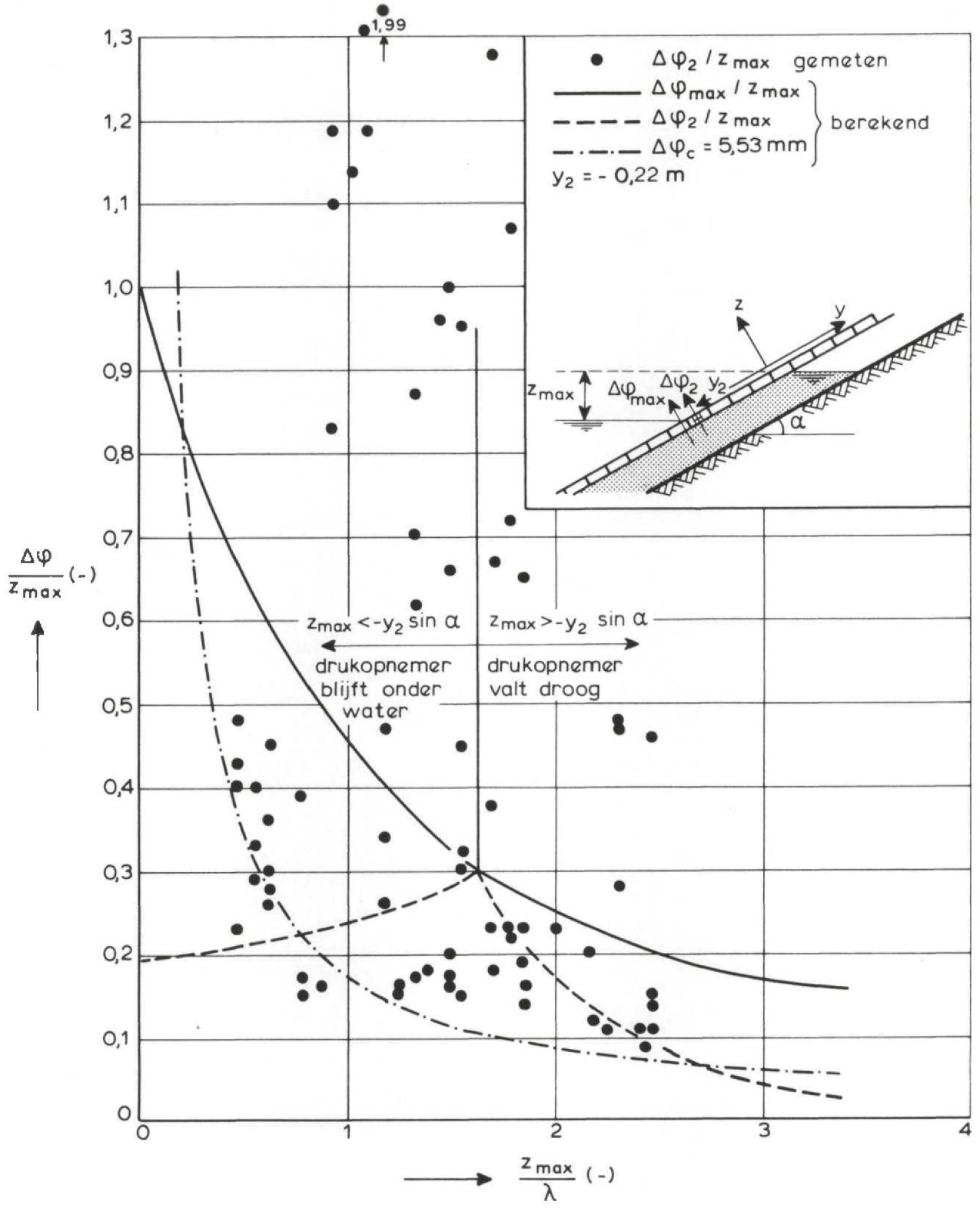




MAXIMALE VERSCHILDRUKKEN	T 1807	-0.385
	VS: 0.855 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 45

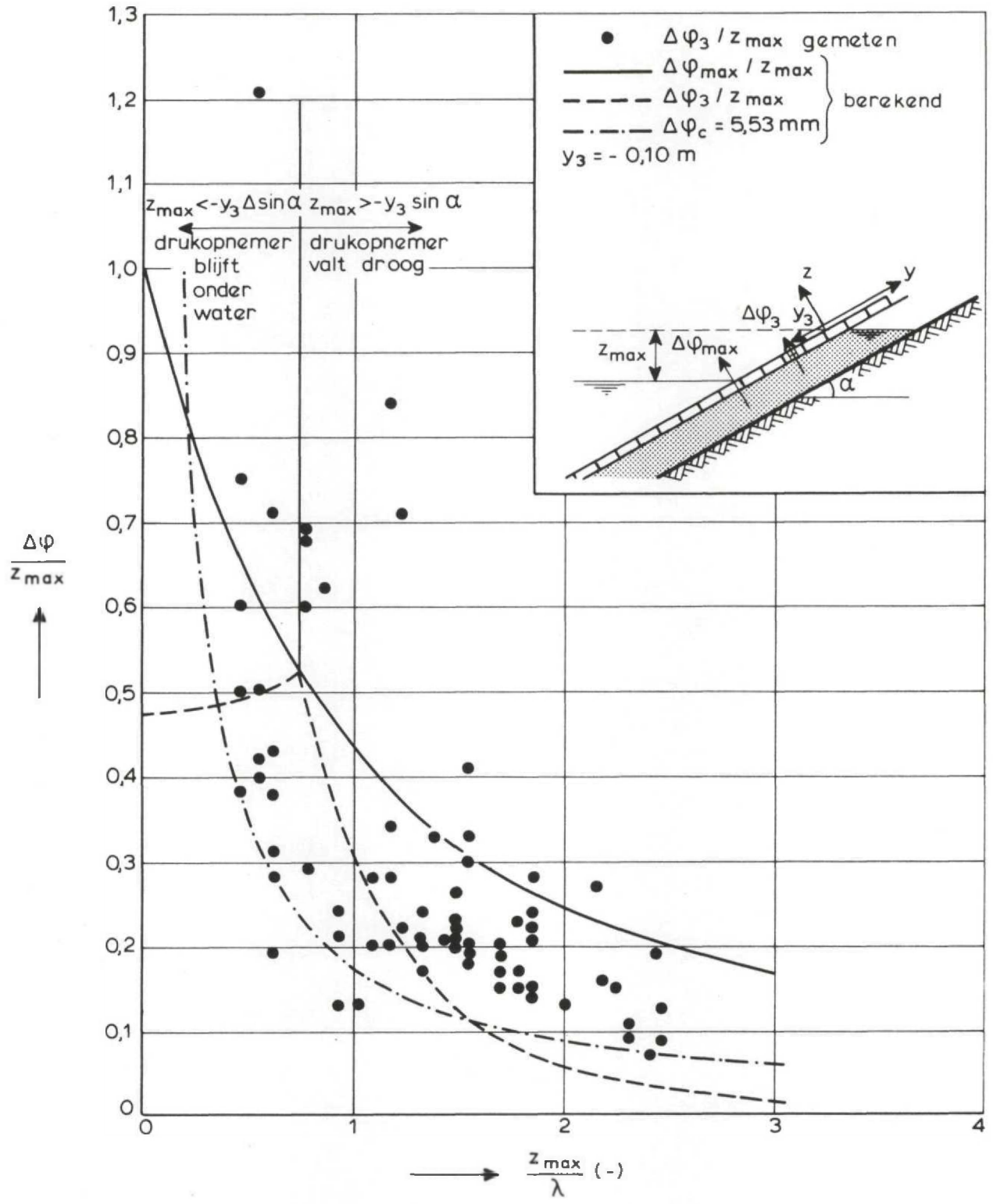


VERSCHILDRUKKEN IN SPLITVAK (DRO 12 - DRO 11)		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 46



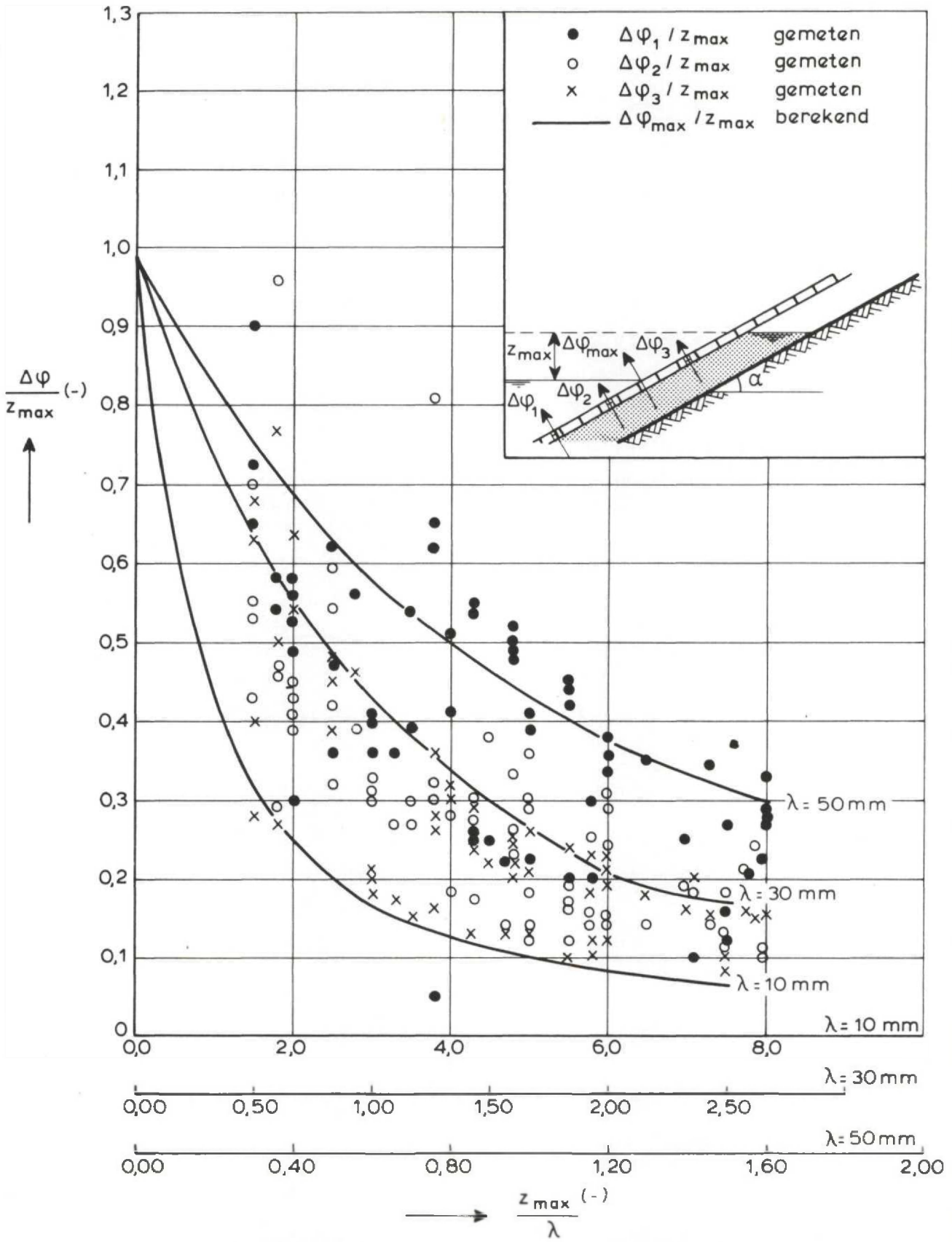
VERSCHILDRUKKEN IN SPLITVAK (DRO 14 - DRO 13)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 47



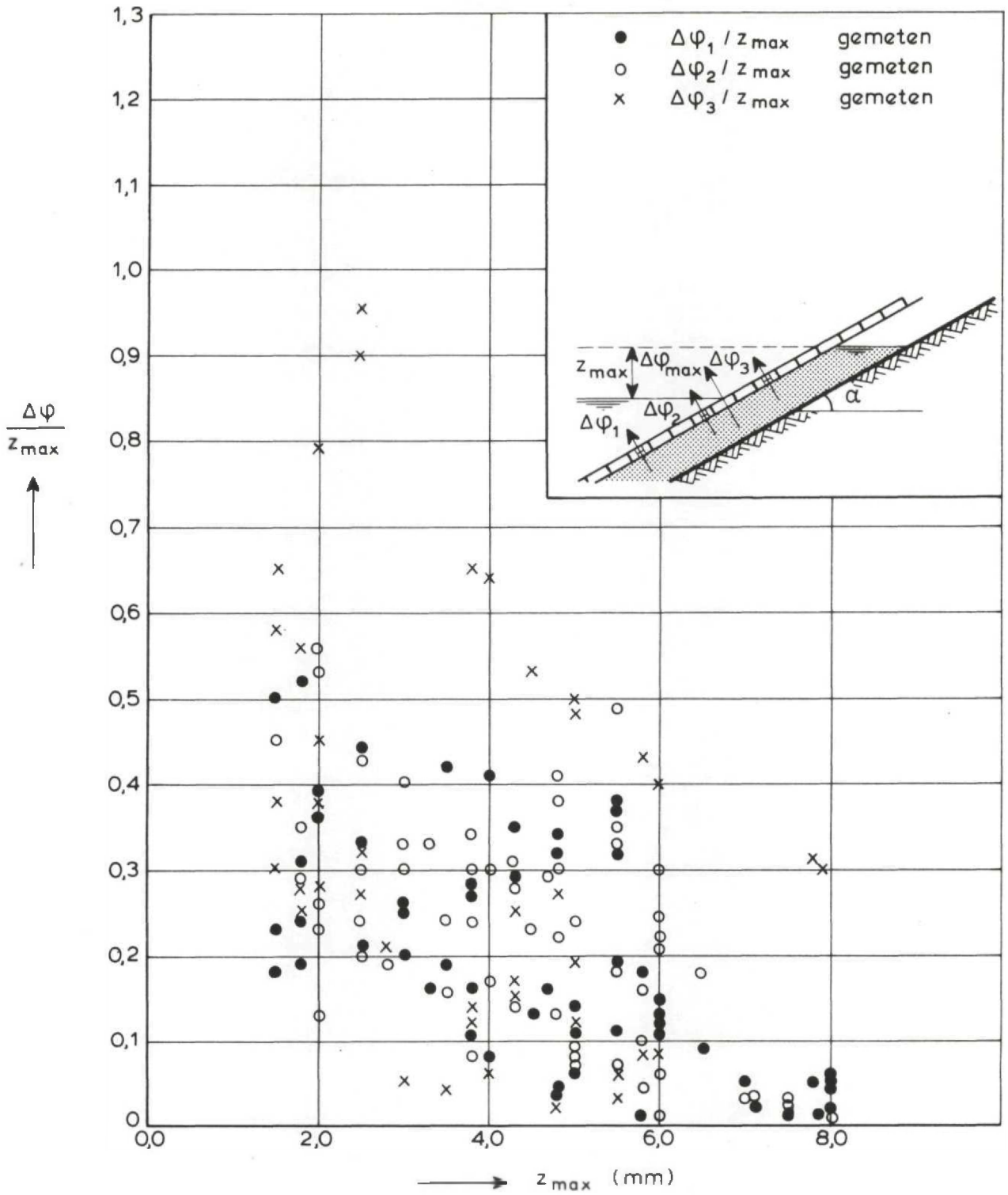
VERSCHILDRUKKEN IN SPLITVAK (DRO 16 - DRO 15)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 48



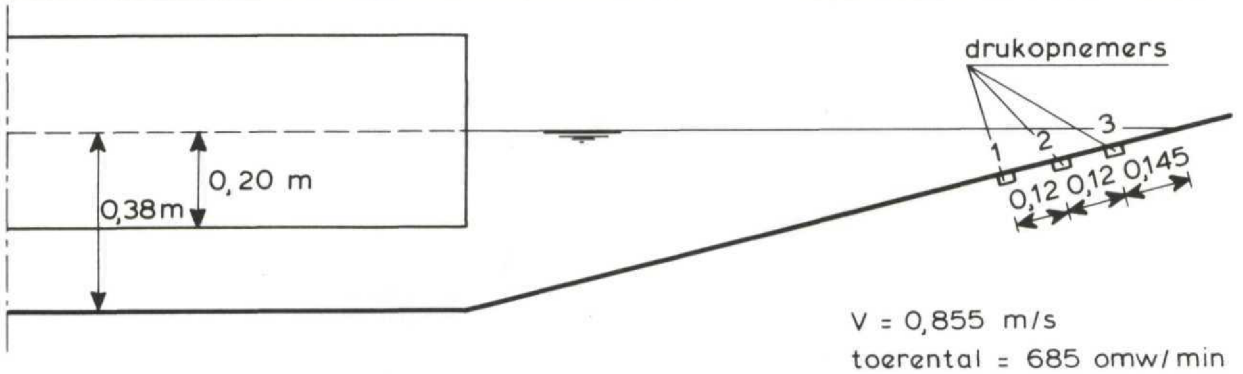
VERSCHILDRUKKEN IN HET VAK OP HOUTEN PLAAT
(DRO 20 - DRO 19 ; DRO 22 - DRO 21 ; DRO 24 - DRO 23)

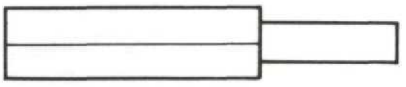
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 49

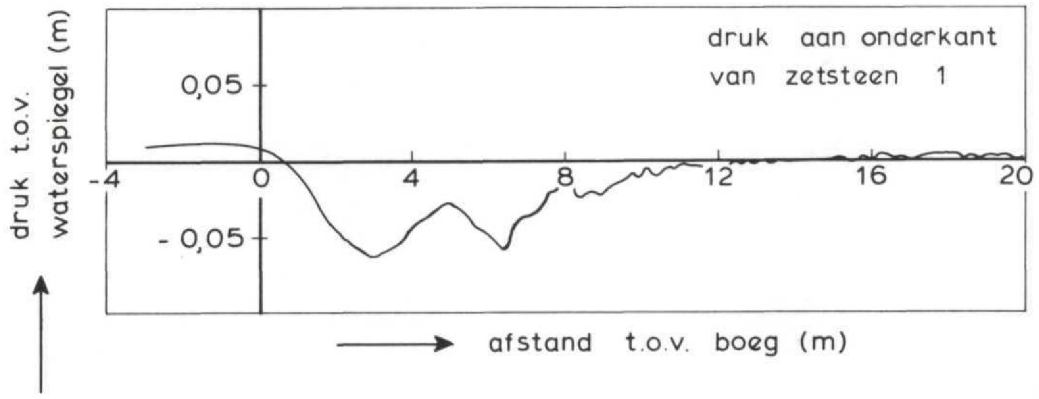


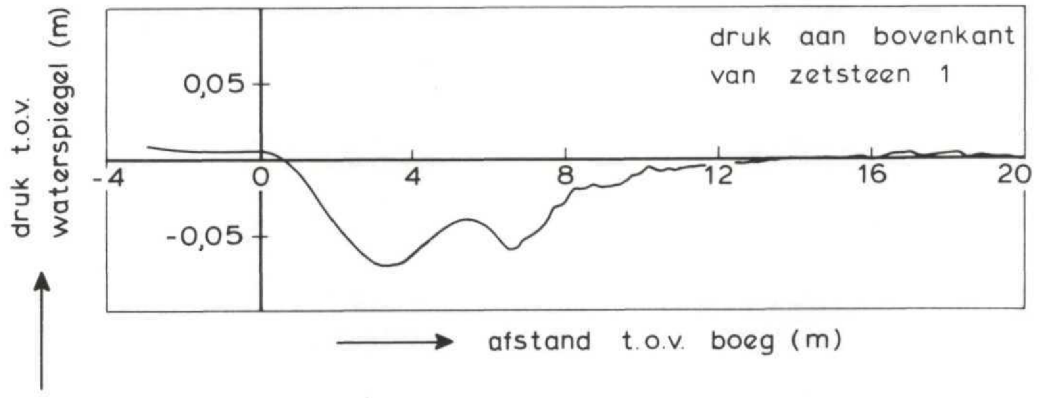
VERSCHILDRUKKEN IN HET VAK OP ROOSTERWERK
(DRO 4 - DRO 3 ; DRO 6 - DRO ; DRO 8 - DRO 7)

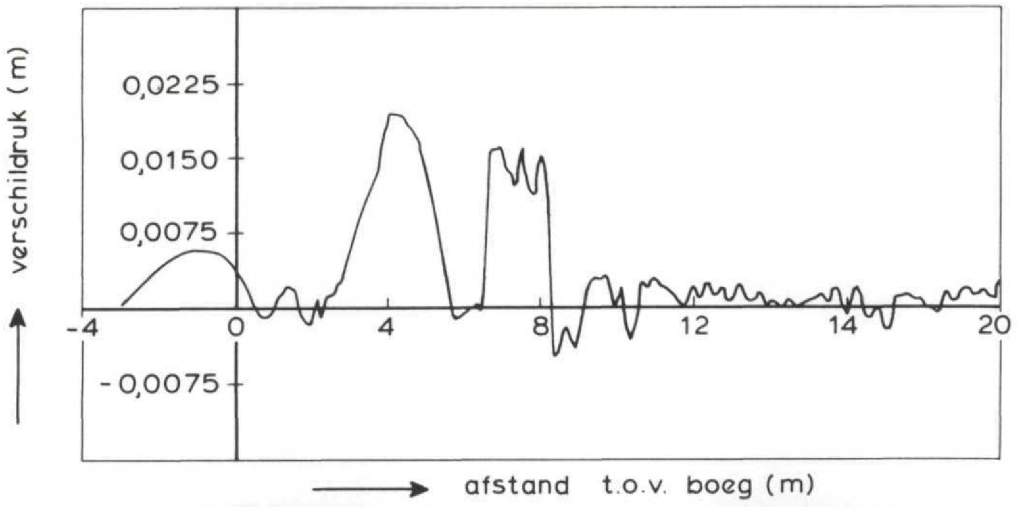
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 50



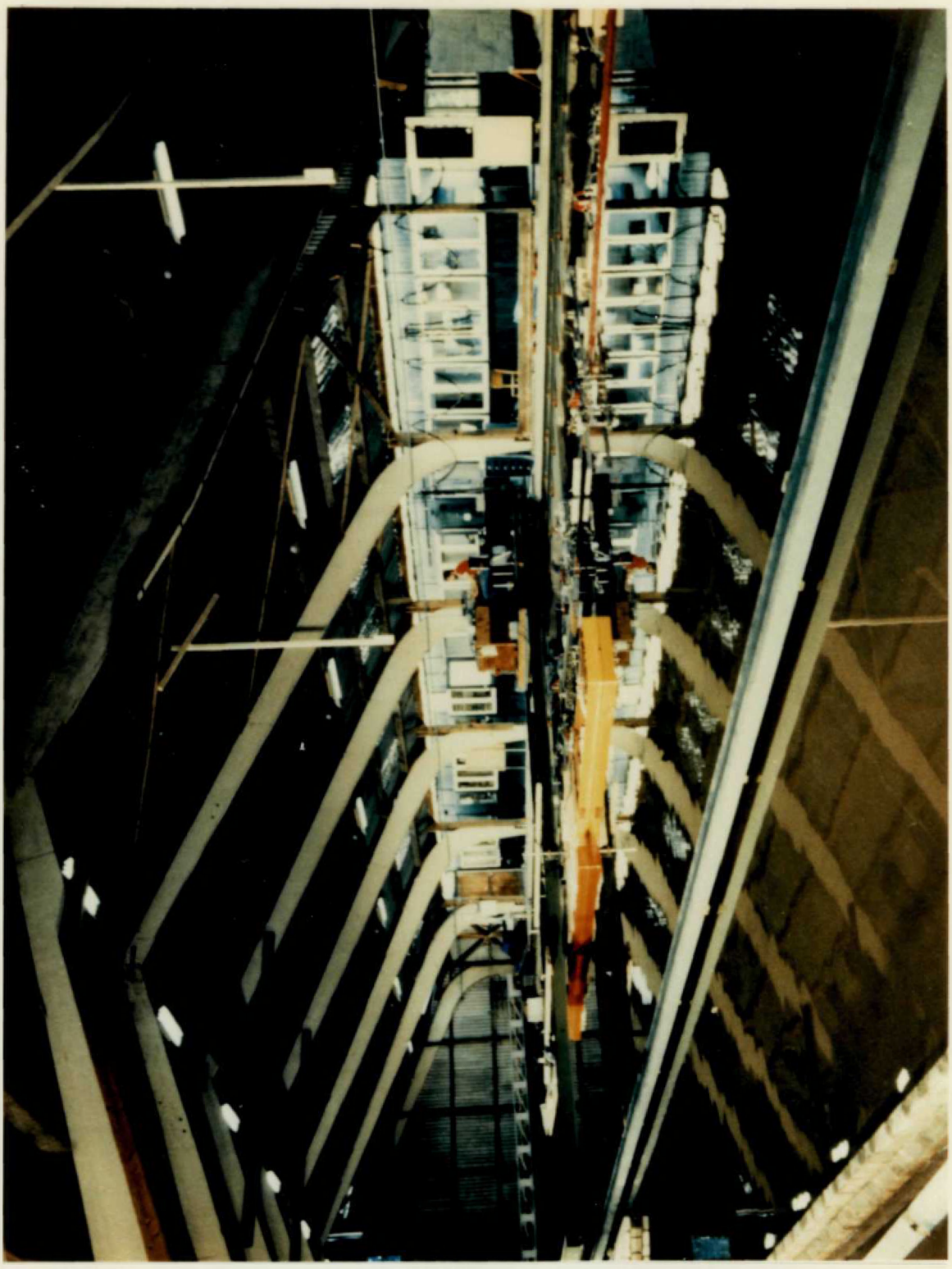








ABSOLUTE DRUKKEN EN VERSCHILDRUKKEN BIJ ZETSTEEN OP ONDOORLATENDE ONDERGROND (HOUTEN PLAAT)	T 1807	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 51

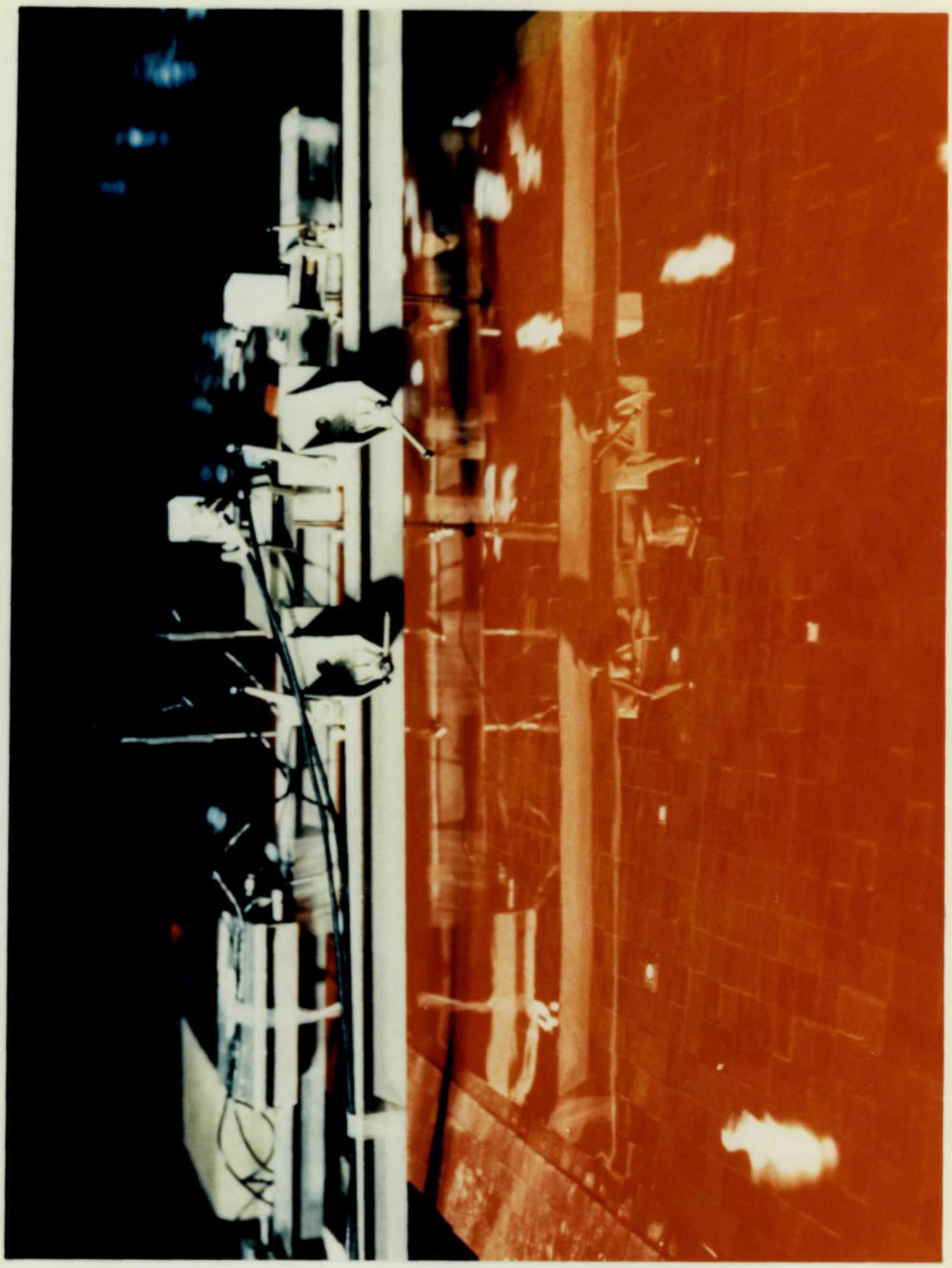


DE DUWFORMATIE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FOTO 1

OVERZICHT VAN DE PROEFVAKKEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FOTO 2



MEETOPSTELLING BOVEN ZETSTEEN

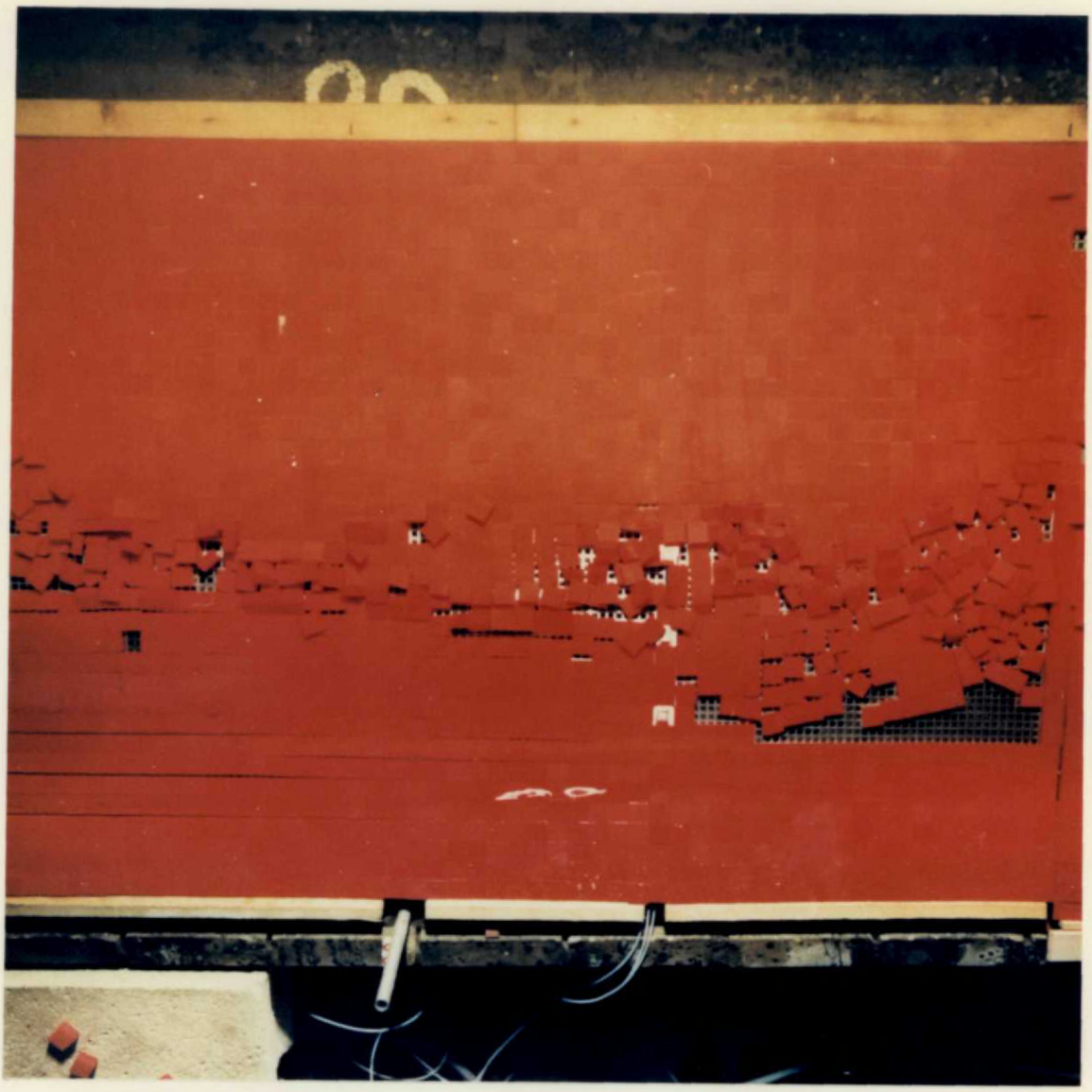
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FOTO 3

T 1807

T 1808

SCHADE AAN STORTSTEEN MET D_{50} = 9,5 mm

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FOTO 4



SCHADE AAN ZETSTEEN		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FOTO 5

Appendix 1

Drukveranderingen in een filterconstructie onder invloed van een langskomende scheepsgolf

DRUKVERANDERINGEN IN EEN FILTERCONSTRUCTIE ONDER INVLOED VAN EEN LANGSKOMENDE SCHEEPSGOLF

1. Inleiding

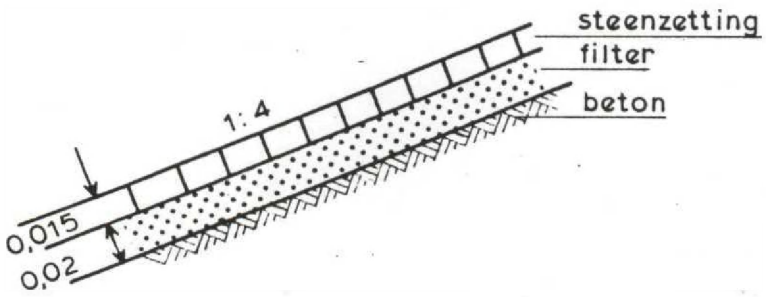
De drukveranderingen in een filterconstructie van een taludverdediging als gevolg van een wisselende waterstand zijn vele malen onderzocht. Bij het merendeel van deze studies is uitgegaan van of een langdurige verandering van de waterstand in het bekken (denk aan getij of bemaling) of een kort durende beweging (golfaanval). In het laatste geval is veelal een loodrecht op het talud inkomende golfbeweging in beschouwing genomen of anders gezegd, de hoogte van de waterspiegel is onafhankelijk van de plaats in lengterichting langs het talud. Tijdens het onderzoek naar haalgolfverschijnselen en tijdens de prototype-metingen in het Hartelkanaal in 1974, 1981 en 1983 is onder andere de drukverandering in een filterconstructie gemeten. Bij deze metingen is echter sprake van een langskomende waterbeweging, dat wil zeggen de waterbeweging op een zeker tijdstip is in sterke mate afhankelijk van de plaats in lengterichting langs het talud. Gebruik makend van theoriën ontwikkeld ten behoeve van de eerst genoemde categorie studies wordt in deze notitie getracht de drukverandering in een filtercontructie als gevolg van een langskomende scheepsgolf te berekenen.

2. Probleemstelling

Met name tijdens het onderzoek naar haalgolfverschijnselen is bij een aantal metingen een kortdurende overdruk in (drukpiek) de filterconstructie waargenomen. Indien de druk in een filterconstructie groter is dan de druk op de taludverdediging op dezelfde plaats is er sprake van overdruk.
Grootte van de geregistreerde overdruk was soms toereikend om schade aan de taludbekleding te kunnen veroorzaken, derhalve interessant in verband met de stabiliteit van de taludverdediging. Bij voldoende overdruk ontstaat de kans dat het eigen gewicht van een element van de steenzetting en de wrijving tussen de elementen wordt overschreden, waarna het element uit de taludbekleding wordt geperst. Waarschijnlijk wordt deze schadekans echter niet enkel bepaald door de grootte doch ook door de duur van de optredende overdruk.
Uit de metingen ten behoeve van het onderzoek naar haalgolfverschijnselen zijn de volgende karakteristieken ten aanzien van drukpieken bepaald (modelmaten)

grootte: 0,01...0,05 meter waterkolom
duur: 0,4...1,2 seconden
plaats: 6,4...7,5 m na de boeg.

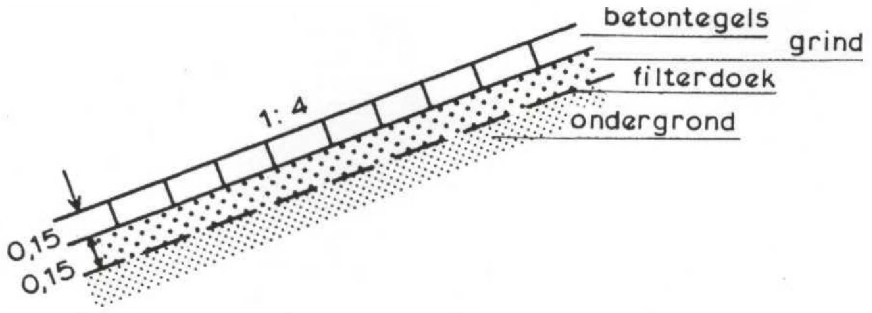
Deze metingen zijn verricht bij de volgende taludverdediging:



Het onderzoek is uitgevoerd met een duweenheid bestaande uit de duwboot "Kristian" met 1 Europa II bak, diepgang 3.0 m

De horizontale schaal bedraagt 10,5

Ook tijdens de prototype-metingen in het Hartelkanaal in 1981 en 1983 zijn drukken boven en onder een taludverdediging van gezette steen op een filter constructie gemeten (proefvak 3)



Uit de metingen verricht in 1983 zijn de volgende karakteristieken ten aanzien van drukpieken bepaald:

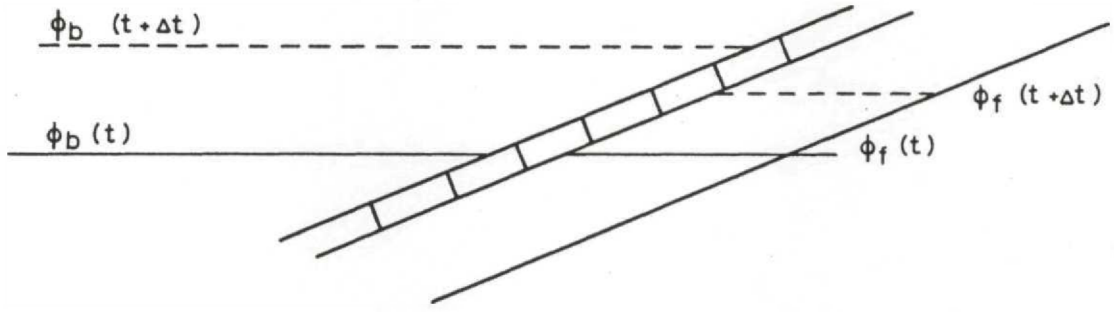
grootte: 0,02...0,14 meter waterkolom
duur: 0,9...1,8 seconden
plaats: 85 meter na de boeg

Beschouwde metingen zijn uitgevoerd met een duweenheid, bestaande uit de duwboot "Mannesmann V" met 2 * 2 Europa II bakken, diepgang 3,0 m.

Het hier beschreven drukonderzoek is gericht op het berekenen van de drukverandering in een filter, uitgaande van de beschikbare meetresultaten.

3. Opzet van het onderzoek

Tijdens de eerste fase van het onderzoek is de richting van de golf ten opzichte van het talud buiten beschouwing gelaten. Drukveranderingen in het filter zijn berekend door een variatie van de waterstand overeenkomstig de gemeten waarden aan te nemen:

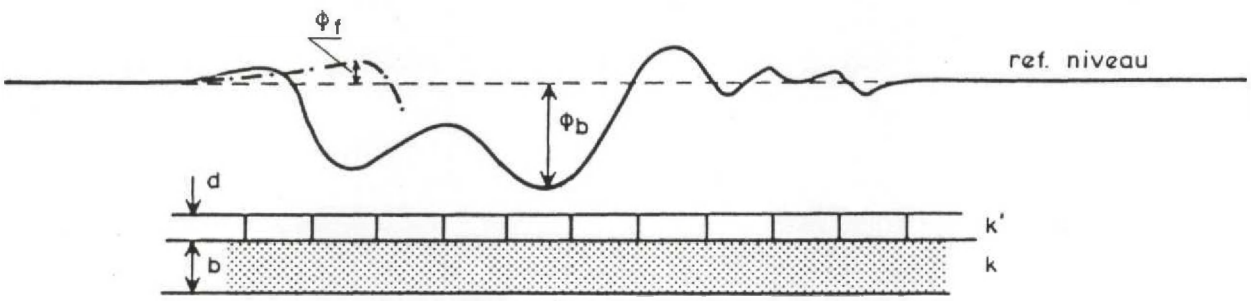


De verandering van de buitenwaterstand per tijdseenheid ($\Delta \phi_b / \Delta t$) is gelijk aan het verschil tussen twee opeenvolgende bemonsteringen gedeeld door het bemonsteringsinterval. In feite houdt dit in dat wordt verondersteld dat de waterspiegel in langsrichting vlak is, een wezenlijk verschil ten aanzien van een scheepsgolf. Desondanks zijn de resultaten hoopgevend (zie figuur 1) Weliswaar wordt geen echte drukpiek gegenereerd, doch het drukverloop onder de steenzetting (DR014) uitgaande van de waterstand boven de steenzetting (DR013) vertoont globaal een goede overeenkomst met de gemeten waarde.
Een voortzetting waarin het twee-dimensionale karakter (in langs (x)- en dwars (y)-richting) van de waterbeweging in beschouwing wordt genomen, lijkt derhalve verantwoord. Opgemerkt wordt dat geen effekten in vertikale (z)-richting in beschouwing worden genomen. Het verloop van de druk in vertikale zin in een filterconstructie op de ondergrond ligt specifiek op het gebied van het Laboratorium voor Grondmechanica (LGM)
Bij de voortzetting is in eerste benadering de invloed van versnellingen/vertragingen verwaarloosd, niet omdat dynamische effekten geen rol zouden spelen, doch meer om na te gaan in hoeverre het mogelijk is met een sterk vereenvoudige schematisatie het drukverloop onder een steenzetting verantwoord te benaderen. Aan de hand van de resultaten van deze schematisatie moet worden beoordeeld in hoeverre verwaarlozing van dynamische aspecten acceptabel is.

4. Theorie

In de stapsgewijze oplossingsmethode is eerst uitgegaan van:

- een horizontaal liggend filter
- een verwaarloosbare elastische berging



De relatie tussen de buitenwaterstand ϕ_b en de druk in het filter ϕ_f wordt weergegeven door:

de bewegings-vergelijking (Darcy)

$$q\ (x) = -\ kb\ \frac{\partial \phi_f}{\partial x} \qquad (1)$$

en de continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{k'}{d}\ (\phi_f - \phi_b) = 0 \qquad (2)$$

Uit samenvoeging van (1) en (2) volgt de D.V:

$$\frac{\partial^2 \phi_f}{\partial x^2} - \frac{k'}{kbd}\ (\phi_f - \phi_b) = 0 \qquad (3)$$

waarin	b	= dikte van de filterlaag	(m)
	d	= dikte van de toplaag	(m)
	k	= doorlatendheid filterlaag	($m.s^{-1}$)
	k'	= doorlatendheid toplaag	($m.s^{-1}$)
	ϕ_b	= buitenwachtstand	(m)
	ϕ_f	= stijghoogte in het filter	(m)

Na invoering van de leklengte $\lambda = (kbd/k)^{0,5}$ (een bekende grootheid in de grondwaterstromingstheorie) volgt:

$$\frac{\partial^2 \phi_f}{\partial x^2} - \left(\frac{\phi_f - \phi_b}{\lambda^2}\right) = 0 \qquad (3^a)$$

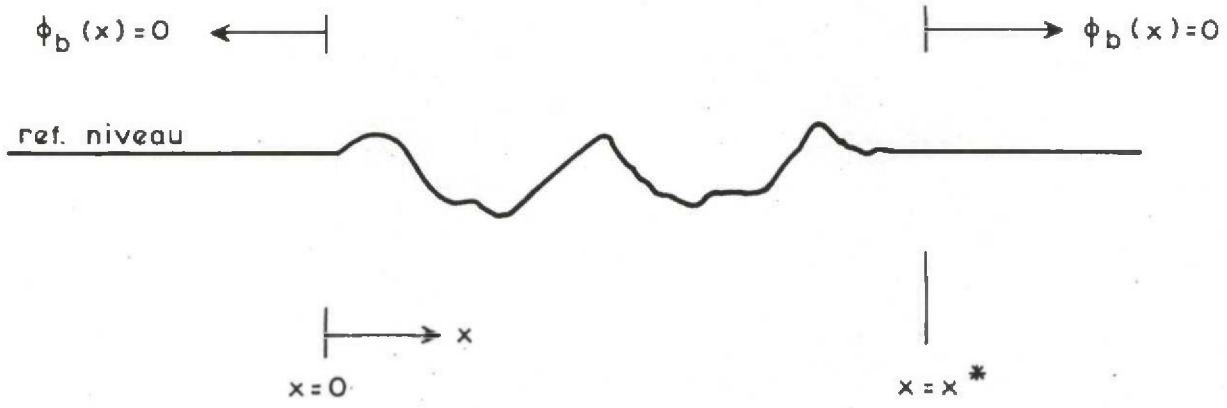
Het karakter van deze differentiaal-vergelijking is afhankelijk van het karakter van ϕ_b . Tijdens de eerste benadering is verondersteld dat ϕ_b constant is (dus onafhankelijk van x), hetgeen leidt tot de oplossing:

$$\phi_f(x) = \phi_b + A\, e^{x/\lambda} + B\, e^{-x/\lambda} \qquad (4)$$

Door invulling van de randvoorwaarden kunnen de waarden voor A en B worden bepaald

Thans wordt uitgegaan van ϕ_b afhankelijk van x:

$\phi_b(x) = 0$ $\phi_b(x) = 0$



Randvoorwaarden:

$x < 0$ $\phi_b(x) = 0$

$x > x^*$ $\phi_b(x) = 0$

Oplossing:

$$\text{voor } x < 0\text{: } \phi_f(x) = \frac{e^{x/\lambda}}{2\lambda} \int_o^{x^*} \phi_b(p)\, e^{-p/\lambda} dp \qquad (4^a)$$

$$\text{voor } x > x_*\text{: } \phi_f(x) = \frac{e^{-x/\lambda}}{2\lambda} \int_o^{x^*} \phi_b(p)\, e^{p/\lambda}\, dp \qquad (4^b)$$

voor $0 \leq x \leq x^*$:

$$\phi_f(x) = \frac{e^{-x/\lambda}}{2\lambda} \int_o^{x} \phi_b(p)\, e^{p/\lambda} dp + \frac{e^{x/\lambda}}{2\lambda} \int_x^{x^*} \phi_b(p)\, e^{-p/\lambda} dp \qquad (4^c)$$

waarin p = integratie -variabele

Daar de variabele $\phi_b(p)$ niet analytisch kan worden omschreven, kunnen de integralen enkel numeriek worden opgelost:

$$\int_o^{x} \phi_b(p)\, e^{p/\lambda} dp = \Delta x \sum_{i=0}^{n} w_i\, \phi_b(p_i)\, e^{p_i/\lambda} \qquad (5)$$

waarin $p_i = i \cdot \Delta x$

$x = n \cdot \Delta x = P_n$

en W_i een "gewichtsfaktor" is, afhankelijk van de te kiezen integratie-regel, bijvoorbeeld voor de Simpson-regel:

$$\int_{x_o}^{x_2} y\, dx = (y_o + 4\, y_1 + y_2)\ /3 * \Delta x \qquad (6)$$

Tot zover is een theoretische benadering gegeven, aannemende dat de elastische berging verwaarloosbaar is.
Wanneer de elastische berging ook in beschouwing wordt genomen, verandert vergelijking (3) in

$$\frac{\partial^2 \phi_f}{\partial x^2} - \frac{(\phi_f - \phi_b)}{\lambda^2} + \alpha \frac{\partial \phi_f}{\partial x} = o \qquad (7)$$

waarin: $\alpha = (S.V_s)/(kb)$ (-)

met: S = bergingscoëfficiënt (m^{-1})

V_s = vaarsnelheid schip ($m.s^{-1}$)

De volgende randvoorwaarden zijn weer van kracht:

$x < o \qquad \phi_b\ (x) = 0$

$x > x^* \qquad \phi_f\ (x) = 0$

De oplossing van bovenstaande differentiaal-vergelijking luidt:

$$\text{voor } x < 0: \quad \phi_f(x) = \frac{1}{\lambda^2(V_1 - V_2)}\ e^{V_2 x} \int_0^{x^*} \phi_b(p)\ e^{-V_2 p}\, dp \qquad (8^a)$$

$$\text{voor } x > x^*: \quad \phi_f(x) = \frac{1}{\lambda^2(V_1 - V_2)}\ e^{V_1 x} \int_0^{x^*} \phi_b(p)\ e^{-V_1 p}\, dp \qquad (8^b)$$

en

$$\text{voor } o < x < x^*: \quad \phi_f(x) = \frac{1}{\lambda_1^2(V_1 - V_2)} \left\{ e^{V_2 x} \int_x^{x^*} \phi_b(p)\ e^{-V_2 p}\, dp \right.$$

$$\left. + e^{V_1 x} \int_x^{x^*} \phi_b(p)\ e^{-V_1 p} dp \right\} \qquad (8^c)$$

waarin: $V_1 = \dfrac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4/\lambda^2}}{2}$

$$V_2 = \frac{-\alpha - \sqrt{\alpha^2 + 4/\lambda^2}}{2}$$

Analoog aan formule (4) moeten de integralen numeriek worden opgelost, daar ϕ_b (p) niet analytisch kan worden beschreven.

5. Uitgevoerde berekeningen

Na de ontwikkeling van een eenvoudige wiskundig model op basis van de in het voortgaande hoofdstuk afgeleide formules zijn een aantal oriënterende berekeningen uitgevoerd met als doel:

a) het testen van de nauwkeurigheid van het programma;

b) het onderzoeken van de invloed van de beschouwde golflengte

Daarbij is voor de waarde van de variabelen dezelfde waarde als tijdens het haalgolfonderzoek toegepast:

	toplaag	filters
dikte (m)	0,015	0,020
k-waarde (m/s)	0,001	0,060

Hieruit volgt een lekweglengte $\lambda = 0{,}1342$ m. De oriënterende berekeningen zijn uitgevoerd onder verwaarlozing van de elastische berging.

Als scheepsgolf is een blokvormige golf aangenomen, die ook analytisch is te formuleren. Het verschil tussen de analytische en de numerieke oplossing is dermate klein dat het moeilijk grafisch weer te geven valt. De berekeningsresultaten zijn in de figuren 2 en 3 weergegeven.
Teneinde na te kunnen gaan in hoeverre de hier geschetste berekenings-methode een betere benadering van de gemeten drukken in een filter zou kunnen vormen, zijn enkele vaarten van het haalgolf-onderzoek gesimuleerd. Vrij snel bleek al, dat de keuze van begin en einde van de golf nu wel van invloed was door de aanwezigheid van storingen -d.w.z. afwijkingen van de ongestoorde waterspiegel- buiten de primaire scheepsgolf. En met name achter het schip is moelijk te definieren waar de scheepsgolf beëindigd dient te worden. Daarnaast blijken deze storingen de instabiliteit van de berekeningsmethode te vergroten, hetgeen de interpretatie van de berekeningsresultaten bemoeilijkte. In figuur 5 is dezelfde toestand als in figuur 1 nagerekend. Uit deze figuur blijkt dat er in het geheel geen betere benadering van het gemeten signaal is bereikt en drukpieken niet worden gesimuleerd.

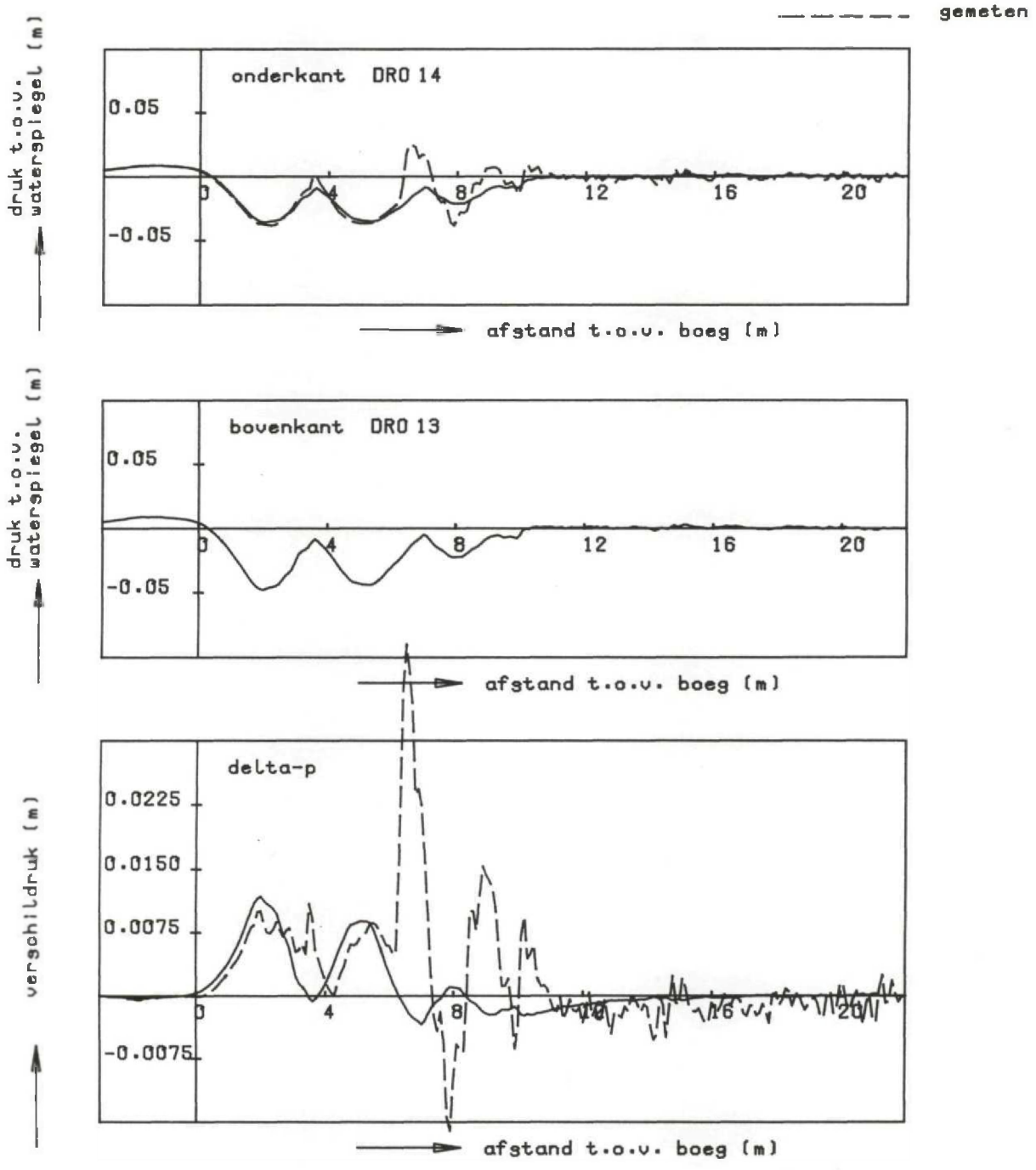
6. Discussie

Het moge duidelijk zijn dat deze berekeningsmethode uitgaande van een zich in langs (x) -richting voortplantende golf geen hoopvolle resultaten biedt.
Niet enkel worden geen drukpieken berekend, ook de overeenkomst met de gemeten drukken in filterlaag zijn slecht. De eerste benadering, uitgaande van een waterspiegelverandering onafhankelijk van de plaats in x-richting vertoont betere resultaten t.a.v. het algemene drukverloop in het filter (zie figuur 1). Overigens worden ook hierbij geen drukpieken berekend.
Betwijfeld kan worden of de gemeten drukpieken tijdens de modelproeven een werkelijk optredend fysisch verschijnsel zijn dan wel het gevolg zijn van schaaleffecten en/of storingen. Tijdens de Oebes metingen in 1983 zijn slechts bij enkele vaarten met een 4 baks duweenheid drukpieken geconstateerd met een veel kleinere amplitude dan uit de modelproeven is gebleken (zie par.2) De meer doorlatende ondergrond bij de prototype-metingen kon hieraan debet zijn. Daarnaast zou door deze dempende invloed het aantal drukpieken kunnen zijn gereduceerd. Het aantal metingen met drukpieken - zowel in model als in prototype - is echter te gering om zelfs een tendens te onderkennen. Bovendien is het beeld niet consistent: niet bij alle vaarten met een vaarsnelheid groter dan een zekere waarde zijn drukpieken waargenomen. De duur van de wel geregistreerde drukpieken is aanzienlijk groter dan het gekozen bemonsteringsinterval (meestal 0,1 s), zodat ook korter durende drukpieken zouden zijn waargenomen. Dit geldt zowel voor de prototype- als de modelmetingen. Samenvattend moet worden gesteld dat op grond van de beschikbare meetresultaten niet met zekerheid kan worden gesteld dat onder bepaalde omstandigheden drukpieken in een filterconstructie zullen optreden.

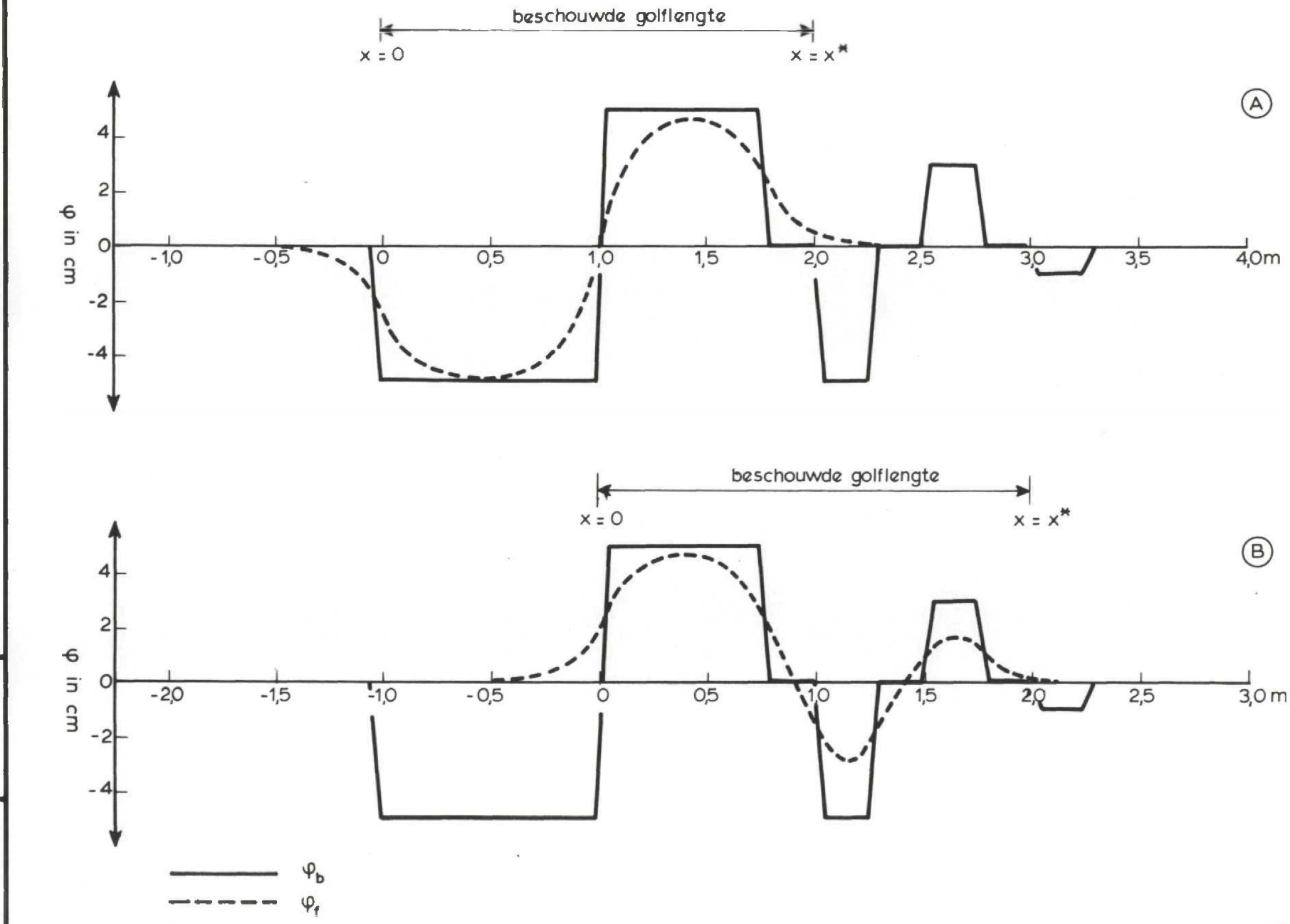
Desalniettemin moet het mogelijk zijn de druk in een filter constructie tengevolge van een langskomende scheepsgolf te berekenen. Duidelijk is dat de hier beschreven berekeningsmethode niet tot aanvaardbare resultaten leidt.
De veronderstelling dat de invloed van de optredende versnellingen en vertragingen niet mag worden verwaarloosd, lijkt gerechtvaardigd. Het feit dat een drukverandering in een filterconstructie zich voortplant met een snelheid nagenoeg gelijk aan de vaarsnelheid van het passerende schip wijst in die richting.

Teneinde zekerheid te kunnen krijgen inzake het mogelijk schade-mechanisme is het noodzakelijk na te gaan of drukpieken in een filterconstructie onder een steenzetting systematisch optreden bij bepaalde omstandigheden. Vervolgens kan dan een berekenings-methode worden ontwikkeld waarbij dynamische aspecten dienen te worden meegenomen.

	STEENLAAG	FILTER
dikte [m]:	0.015	0.020
k [m/s]:	0.0010	0.0600



GEMETEN EN BEREKENDE MODELRESULTATEN	T 1504	
	VS : 0.741 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 1.1

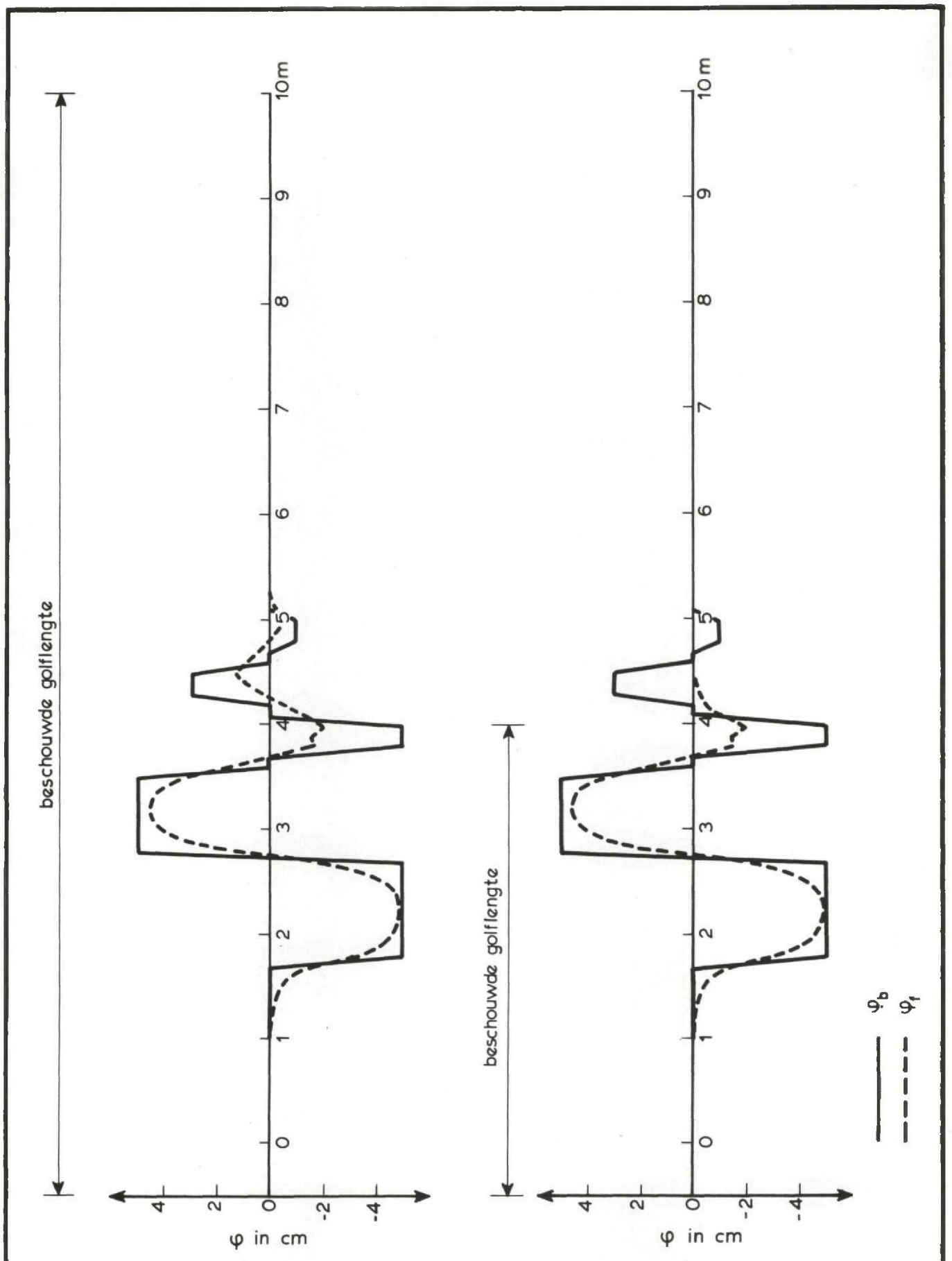


BEREKENDE DRUK IN FILTER BIJ VARIERENDE GOLFLENGTE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

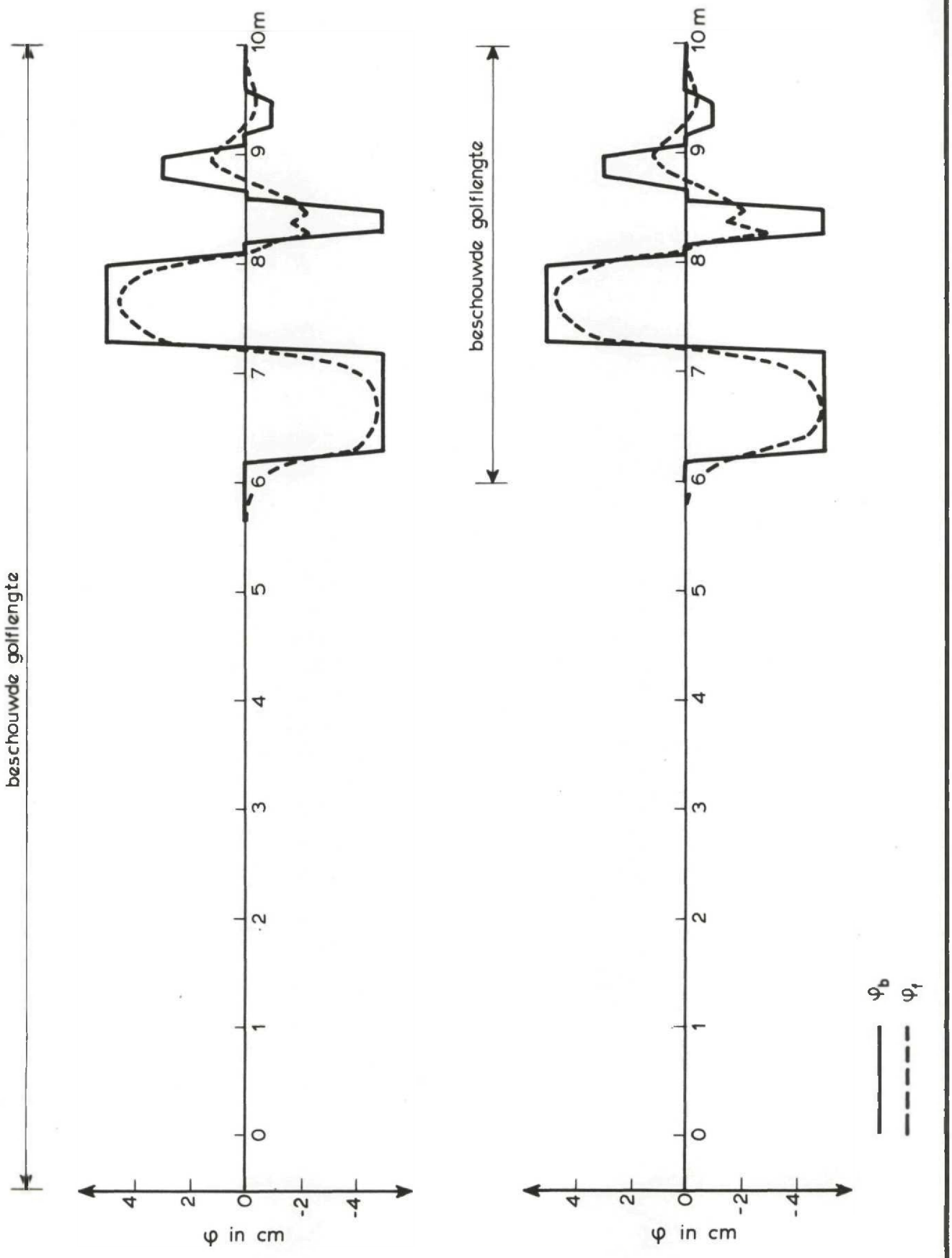
M 1115

FIG. 1.2



BEREKENDE DRUK IN FILTER BIJ VARIERENDE GOLFLENGTE

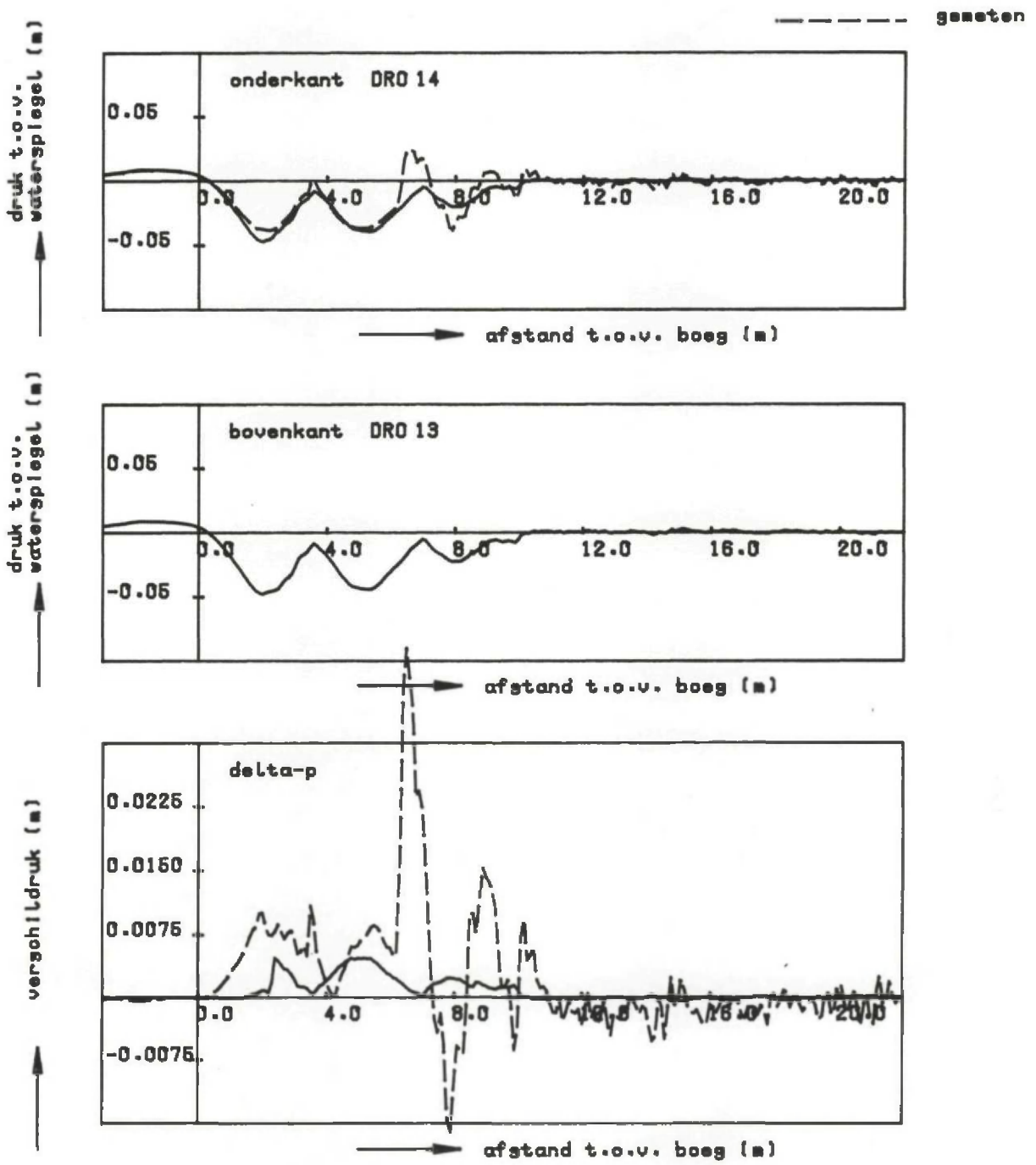
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 1.3



BEREKENDE DRUK IN FILTER BIJ VARIERENDE GOLFLENGTE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1115 | FIG. 1.4

	STEENLAAG	FILTER
dikte (m):	0.015	0.020
k (m/s):	0.0010	0.0600
e (-):		0.400



GEMETEN EN BEREKEND DRUKVERLOOP IN EEN FILTERCONSTRUCTIE	T 1504	y=0.230
	VS : 0.741 (m/s)	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1115	FIG. 1.5

p.o. box 177 2600 mh delft the netherlands