

Q 439/ H657, bijlage D
juli 1988

hydraulische ruwheid van een Armorflex-blokkenmat

bijlage D van "erosie door open
taludbekledingen"

speurwerkverslag



hydraulische ruwheid van een
Armorflex-blokkenmat

bijlage D van "erosie door open
taludbekledingen"

speurwerkverslag

H.J. Verhey

INHOUD

	blz.
1. Inleiding	1
1.1 Aanleiding voor onderzoek.....	1
1.2 Doelstelling.....	1
1.3 Samenvatting en konklusies.....	2
2. Theoretische beschouwingen	4
2.1 Inleiding.....	4
2.2 Stabiliteitsrelatie.....	4
2.3 Snelheidsprofiel.....	6
2.4 Hydraulische ruwheid.....	8
3. Metingen	13
3.1 Inleiding.....	13
3.2 Proefopstelling.....	13
3.3 Meetprogramma.....	14
3.4 Meetresultaten.....	15
4. Analyse meetresultaten	16
4.1 Inleiding.....	16
4.2 Bepaling ruwheidsparameters.....	16
4.3 Toetsing meetresultaten aan theoretische beschouwingen.....	19
4.4 Konklusies.....	20
5. Evaluatie onderzoek	21
5.1 Bruikbaarheid ruwheidsparameter in stabiliteitsrelatie.....	21
5.2 Bruikbaarheid onderzoeksresultaten bij schaalproeven.....	23

LITERATUUR

TABELLEN

FIGUREN

TABELLEN

- 1 Overzicht uitgevoerde proeven
- 2 Stroom- en ruwheidsparameters

FIGUREN

- 1 Armorflex-blokken en -blokkenmat.
- 2 Definities.
- 3 Moody-diagram.
- 4 Stromingsomstandigheden bij kunstmatige ruwheid.
- 5 Snelheidsverdelingen volgens Knight/MacDonald en Sayre/Albertson.
- 6 Verband tussen ruwheidsparameter en geometrische parameters, Knight/MacDonald en Sayre/Albertson.
- 7 Verband tussen ruwheidsparameter en geometrische parameters, Ryabov [8].
- 8 Verband tussen ruwheidsparameter en geometrische parameters, Adachi [6].
- 9 Krommen van Ryabov en Knight/MacDonald.
- 10 Verband tussen k_s/Y en $W+G/Y$ voor kunstmatige ruwheidselementen.
- 11 Stroomgoot met proefopstelling.
- 12 Meetlokaties in dwarsprofiel.
- 13 Vergelijking \bar{u}_{OTT} en \bar{u} in meetraai.
- 14 Snelheidsverdelingen in een dwarsdoorsnede, proeven 6 en 18.
- 15 Snelheidsverdelingen in een dwarsdoorsnede, proeven 20 en 21.
- 16 Snelheidsverdelingen in de vertikaal, proeven 4 en 14.
- 17 Snelheidsverdelingen in de vertikaal, proeven 24 en 29.
- 18 Logaritmische snelheidsprofielen, proef 6.
- 19 Logaritmische snelheidsprofielen, proef 20.
- 20 Logaritmische snelheidsprofielen, proef 23.
- 21 Logaritmische snelheidsprofielen, proef 34.
- 22 Relatie \bar{u}/u_* versus $12R_b/k_s$, verhang en hydraulische straal.
- 23 Relatie \bar{u}/u_* versus $12R_b/k_s$, logprofielen.
- 24 Invloed blokdikte op k_s -waarde.
- 25 Schematisatie Armorflex-blok.
- 26 Positie proefresultaten in Moody-diagram.
- 27 Vergelijking gemeten en voorspelling ruwheid.

SYMBOLLEN

A	dwarsdoorsnede waterloop	m
B	gootbreedte	m
C	coëfficiënt van Chezy	$m^{1/2} \cdot s^{-1}$
D	blokdikte	m
D_{eq}	equivalente diameter voor blokken	m
D_n	nominale steendiameter	m
D_{50}	karakteristieke steendiameter onderschreden door 50%	m
e	constante	-
G	afstand tussen ruwheidselementen loodrecht op stroomrichting, of gatgrootte	m
G'	afstand tussen ruwheidselementen in stroomrichting	m
g	versnelling zwaartekracht	$m \cdot s^{-2}$
h	waterdiepte	m
I_e	energieverhang	-
I_w	waterspiegelverhang	-
K	afstand tussen ruwheidselementen in stroomrichting	m
k_s	equivalante ruwheid volgens Nikuradse	m
M_{blok}	massa van een blok	kg
O	natte omtrek van de waterloop	m
R	hydraulische straal	m
R_b	gecorrigeerde hydraulische straal voor de bodem	m
Re	Reynoldsgetal	-
u	stroomsnelheid (algemeen)	$m \cdot s^{-1}$
u(z)	stroomsnelheid op afstand z tot de bodem	$m \cdot s^{-1}$
\bar{u}	gemiddelde stroomsnelheid in de vertikaal	$m \cdot s^{-1}$
\bar{u}_{cr}	kritieke gemiddelde stroomsnelheid	$m \cdot s^{-1}$
\bar{u}_{OTT}	geregistreeerde gemiddelde stroomsnelheid met Ott-snelheidsmeter	$m \cdot s^{-1}$
\bar{u}_{ASTM}	geregistreeerde gemiddelde stroomsnelheid met ASTM-snelheidsmeter	$m \cdot s^{-1}$
u_*	schuifspanningssnelheid	$m \cdot s^{-1}$
u_*_{cr}	kritieke schuifspanningssnelheid	$m \cdot s^{-1}$
W	blokbreedte (in stroomrichting)	m
W'	bloklengte (loodrecht op stroomrichting)	m
x	coördinaat in stroomrichting	m
Y	gatdiepte openingen in blokken	m
y	coördinaat loodrecht op stroomrichting	m

SYMBOLLEN

z	afstand tot de bodem	m
z_0	ruwheidparameter	m
α_2	ruwheidsparameter volgens Ryabov, gedefinieerd $\alpha_2 = \Delta/Y$	-
Δ	ruwheidsparameter volgens Ryabov	m
Δ	relatieve dichtheid	-
Δ_{eq}	equivalente relatieve dichtheid van blokken	-
δ	dikte viskeuze sublaag	m
ϵ	volumepercentage open ruimte in blokken	-
θ_{cr}	stabiliteitscoëfficiënt	-
κ	constante van Von Karman	-
ν	kinematische viscositeit	$m^2 \cdot s^{-1}$
ρ	dichtheid water	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_s	dichtheid stenen	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{blok}	dichtheid blokken	$kg \cdot m^{-3}$
τ_{cr}	kritieke bodemschuifspanning	$N \cdot m^{-2}$
χ	ruwheidsparameter volgens Knight/MacDonalds	m
ψ_{cr}	kritieke schuifspanningsparameter	-

HYDRAULISCHE RUWHEID VAN EEN ARMORFLEX-BLOKKENMAT

1. Inleiding

1.1 Aanleiding voor onderzoek

Blokkenmatten worden meer en meer toegepast in bodem- en oeververdedigingen. Een speciaal type blokkenmat is de Armorflex-blokkenmat van Nicolon BV (figuur 1). De grens tussen stabiliteit en instabiliteit van een Armorflex-blokkenmat is in het geval van belasting door golven bekend [1]. Voor de stabiliteitsgrens onder stroomaanval is dit niet het geval. Alvorens de toelaatbare stroomsnelheid te onderzoeken is het van belang te beschikken over informatie omtrent de hydraulische ruwheid van Armorflex-blokkenmatten onder prototype-omstandigheden en bij gereduceerde afmetingen.

In dit verslag worden de resultaten van onderzoek naar dit facet gerapporteerd. Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van WL-speurwerk onder leiding van ir.H.J.Verheij, die ook dit rapport samenstelde. De experimenten zelf zijn verricht bij WL door de TU Delft, aan welk instituut de uitvoering van het onderzoek was opgedragen. Namens de TU Delft zijn deze proeven uitgevoerd door ing.F.Tolman en ir.A.Ferguson, die werden begeleid door ir.J.Stuip. Het verslag maakt tevens onderdeel uit van het onderzoek "Erosie door open taludbekledingen". De resultaten zijn verwerkt in het samenvattend verslag [20], terwijl dit rapport zelf bijlage D is.

1.2 Doelstelling

Stabiliteitsrelaties in het geval van stroombelasting worden mede bepaald door de hydraulische ruwheid van de verdedigingsconstructie. Een gebruikelijke maat hiervoor is de equivalente ruwheid volgens Nikuradse. In het geval van Armorflex-blokkenmatten wordt verwacht dat de toelaatbare stroomsnelheid, alvorens instabiliteit optreedt, de mogelijkheden van de beschikbare experimentele onderzoeksfaciliteiten te boven gaat. Om die reden kan onderzoek op schaal worden overwogen. Stroming en ruwheid beïnvloeden elkaar echter en het is niet ondenkbaar dat bij schaalonderzoek de hydraulische ruwheid van de gereduceerde blokkenmat verandert ten opzichte van de prototype ruwheid ten gevolge van een ander turbulentie beeld, en dat daarmee ook de toelaatbare stroomsnelheid afwijkt van die bij prototype-omstandigheden. Een bijkomend probleem is dat ook de hydraulische ruwheid van Armorflex-blokkenmatten op prototypeschaal niet bekend is. Als doelstellingen voor het onderzoek kunnen daarom worden genoemd:

- Bepalen van de equivalente ruwheid volgens Nikuradse (of een daarmee vergelijkbare grootheid) voor Armorflex-blokkenmatten onder prototype-omstandigheden.
- Afschatten van de invloed van een reductie van de blokafmetingen op de waarde van de hydraulische ruwheid onder prototype-omstandigheden ten behoeve van schaalonderzoek.

De resultaten van het onderzoek zijn het uitgangspunt bij het bepalen van de stabiliteitsrelatie voor Armorflex-blokkenmatten.

1.3 Samenvatting en konklusies

Voor het bepalen van de stabiliteitsrelatie voor door stroming belaste Armorflex-blokkenmatten is informatie nodig over de hydraulische ruwheid. Het onderhavige onderzoek had ten doel deze ruwheid te bepalen voor prototype-omstandigheden, alsmede een uitspraak te doen over de schaling van de Armorflex-blokkenmatten bij schaalonderzoek. Hiertoe zijn in de grote stroomgoot van WL in De Voorst experimenten verricht met diverse typen Armorflex-blokkenmatten en is een literatuurstudie uitgevoerd naar hydraulische ruwheid.

In hoofdstuk 2 wordt allereerst ingegaan op de functie van de hydraulische ruwheid in stabiliteitsrelaties. Vervolgens wordt de hydraulische ruwheid als functie van de wandoneffenheden beschouwd. In het bijzonder zal daarbij worden ingegaan op literatuur met betrekking tot kunstmatige ruwheid. Hoofdstuk 3 behandelt de uitgevoerde experimenten in de stroomgoot. Gevarieerd zijn daarbij het type Armorflex-blokkenmat (gesloten en open blokken) de stroomsnelheid en de waterdiepte. Hoofdstuk 4 bevat een analyse van de meetresultaten. Daarin zijn diverse grootheden bepaald, waaronder de hydraulische ruwheid. Verder worden de uitkomsten vergeleken met de theorie. Hoofdstuk 5 tenslotte gaat in op de bruikbaarheid van de onderzoeksresultaten voor stabiliteitsrelaties en schaalproeven.

Op basis van het onderzoek kunnen de volgende konklusies worden getrokken :

- De hydraulische ruwheid van Armorflex-blokkenmatten is door middel van proeven bepaald op circa 0,02 m. Deze waarde komt overeen met een voorspelling volgens een methode welke is gebaseerd op resultaten voor de hydraulische ruwheid van kunstmatige ruwheidselementen.
- Tussen blokdikte en hydraulische ruwheid kon voor de onderzochte Armorflex-bloktypen geen direkt verband worden vastgesteld. De hydraulische ruwheid van een gesloten bloktype is een fractie lager dan de ruwheid van een open bloktype.

- Stabiliteitsproeven op schaal, of met uitsluitend een gereduceerde blokdikte, kunnen aan de hand van deze resultaten zo worden uitgevoerd dat ze resulteren in een betrouwbare voorspelling van de toelaatbare kritieke stroomsnelheid van Armorflex-blokken in praktijk omstandigheden.

2. Theoretische beschouwingen

2.1 Inleiding

De hydraulische ruwheid is een van de grootheden die een rol spelen bij stabiliteitsrelaties voor elementen belast door turbulente stroming. Grootte, vorm en patroon van de ruwheidselementen bepalen de hydraulische ruwheid en daarmee ook de stroming langs die ruwe wand. Voorafgaand aan de bepaling van de hydraulische ruwheid van Armorflex-blokkenmatten zal daarom in dit hoofdstuk worden ingegaan op een bruikbare stabiliteitsrelatie, het snelheidsprofiel boven een ruwe wand en de hydraulische ruwheid. In figuur 2 zijn definitieschetsen gegeven.

2.2 Stabiliteitsrelatie

Uit een evenwichtsbeschouwing van stabiliserende en destabiliserende krachten op granulair materiaal belast door turbulente stroming kan de kritieke schuifspanningsparameter ψ_{cr} worden afgeleid:

$$\psi_{cr} = \frac{u_{*cr}^2}{g\Delta D_n} \quad (1)$$

waarin :

- u_{*cr} = kritieke schuifspanningssnelheid, $u_{*cr} = (\tau_{cr}/\rho)^{0,15}$ [m/s]
- τ_{cr} = kritieke bodemschuifspanning [N/m²]
- ρ = dichtheid water [kg/m³]
- ρ_s = dichtheid stenen [kg/m³]
- g = versnelling zwaartekracht [m/s²]
- Δ = relatieve dichtheid, $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ [-]
- D_n = karakteristieke steendiameter [m]

De waarde van ψ_{cr} is een constante voor een gegeven criterium van begin van beweging (materiaal diameter groter dan circa 0,01 m). Een waarde van 0,03 kan worden aangehouden als grens voor stabiliteit [18], terwijl er voor een waarde van 0,06 sprake is van begin van bewegen van de gehele toplaag van granulair materiaal [19].

De door de stroom opgewekte schuifspanningssnelheid kan bij een uniforme stroming ($\partial u/\partial x = 0$), waar de snelheidsvertikaal zich heeft aangepast aan de bodemruwheid, worden gerelateerd aan de gemiddelde stroomsnelheid \bar{u} in de vertikaal, volgens:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (2)$$

waarbij:

$$C = 5,75 \sqrt{g} \log \frac{12 R}{k_s} \quad (3)$$

waarin:

C = coefficient van Chezy [$m^{0.5}/s$]

R = hydraulische straal, $R=A/O$ [m]

A = dwarsdoorsnede waterloop [m^2]

O = natte omtrek van de waterloop [m]

k_s = equivalente ruwheid, voor granulair materiaal geldt $k_s = 2 \cdot D_n$ [m]

Voor de kritieke gemiddelde stroomsnelheid is uit vgl.(1) en (2) af te leiden:

$$\frac{\bar{u}_{cr}}{\sqrt{g\Delta D_n}} = \frac{C}{\sqrt{g}} \sqrt{\psi}_{cr} \quad (4)$$

of

$$\frac{\bar{u}_{cr}}{\sqrt{g\Delta D_n}} = \theta_{cr} \quad (5)$$

In het geval van een bodemverdediging van granulair materiaal is door Isbash [16] voor θ_{cr} een waarde van 1,7 bepaald. Opgemerkt wordt dat in vgl. (5) de invloed van de waterdiepte niet is verdisconteerd, zodat deze formule slechts binnen een bepaalde grens geldig is.

Een formule bruikbaar bij kunstmatige ruwheidselementen wordt verkregen door de diameter D_n te vervangen door de ruwheidshoogte Y. In het geval van blokken met open ruimten in en tussen de blokken wordt aanbevolen de diameter D_n te vervangen door de equivalente diameter D_{eq} . Voorts wijzigt ook Δ dan in Δ_{eq} (zie ook hoofdstuk 5). Hierdoor ontstaat de volgende stabiliteitsrelatie:

$$\frac{\bar{u}_{cr}}{\sqrt{g\Delta_{eq} D_{eq}}} = \frac{c}{\sqrt{g}} \cdot \sqrt{\psi}_{cr} \quad (6)$$

Opgemerkt moet worden dat de invloed van niet-uniforme stroming, verhoogde turbulentie, onregelmatige ligging ruwheidselementen, taludinvloed, etc. met behulp van een korrektiefactor in rekening kan worden gebracht. Deze correctie is niet afhankelijk van de ruwheid en kan voor de onderhavige studie buiten beschouwing blijven.

Uitgaande van de vgl.(3) en (6) kan worden afgeleid dat \bar{u}_{cr} kan worden bepaald als ψ_{cr} en k_s bekend zijn voor een gegeven waterloop en bekende ruwheidselementen. Daarmee is dan de stabiliteitsrelatie volledig bepaald.

2.3 Snelheidsprofiel

Het snelheidsprofiel voor turbulente stroming wordt bepaald door de dikte van de viskeuze sublaag δ en de hoogte van de ruwheidselementen Y . De stroming wordt in het algemeen onafhankelijk van δ beschouwd als [15]:

$$\frac{u_* \cdot Y}{\nu} > 70 \quad (7)$$

waarin:

$$\nu = \text{kinematische viskositeit, } \nu \approx 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$$

In dat geval is het snelheidsprofiel onafhankelijk van het Reynoldsgetal en uitsluitend afhankelijk van de afstand z tot de bodem en een ruwheidsparameter z_0 , volgens [15]:

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (8)$$

waarin :

$u(z)$ = stroomsnelheid op een afstand z [m/s]

z = afstand tot de bodem [m]

κ = constante van Von Karman, $\kappa = 0,4$ [-]

Wat betreft de parameter z_0 kan worden opgemerkt dat voor $z = z_0$ geldt dat $u(z) = 0$.

Na integratie over de waterdiepte h onder de voorwaarde dat $z_0 \ll h$, volgt:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{2,3}{\kappa} \log \frac{R}{ez_0} \quad (9)$$

met e = constante, $e \approx 2,72$ [-]

Door Nikuradse is vervolgens een relatie gelegd tussen de equivalente ruwheid k_s en de ruwheidsparameter z_0 [15]:

$$k_s = 32 \cdot z_0 \quad (10)$$

Substitutie van de vgl.(2) en (10) en waarden van $e=2,72$ en $\kappa =0,4$ in vgl.(9), resulteert vervolgens in de eerder gegeven relatie voor de Chezy coëfficiënt (zie vgl.(3)).

Als de ruwheden klein zijn ten opzichte van de viskeuze sublaag, dat wil zeggen:

$$\frac{u_* \cdot Y}{\nu} < 5 \quad (11)$$

dan is er sprake van een hydraulisch gladde wand. De gemiddelde snelheid wordt dan gegeven door de Prandtl-Von Karman vergelijking [2] :

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{2,3}{\kappa} \log \frac{12R}{\delta/3,5} \quad (12)$$

$$\text{met } \delta = 11,6 \cdot \nu/u_* \quad (13)$$

Voorts geldt een verband analoog aan vgl.(10) :

$$\delta = 117 \cdot z_0 \quad (14)$$

Vgl.(12) kan worden beschouwd als een ondergrens voor de ruwheid, welke afhankelijk is van het Reynolds-getal, maar waarbij het snelheidsprofiel onafhankelijk is van de wandoneffenheden. Met vgl.(2), (13), $\kappa = 0,4$ en het Reynolds-getal, gedefinieerd als:

$$Re = R \cdot \bar{u} / \nu \quad (15)$$

is dit eenvoudig aan te tonen. Het resultaat is:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 5,75 \log \left(3,62 Re \frac{\sqrt{g}}{C} \right) \quad (16)$$

Met de relatie voor laminaire stroming volgens [2]:

$$C/\sqrt{g} \approx 0,5 \cdot Re^{0,5}$$

is vervolgens het bekende Moody-diagram samen te stellen (figuur 3).

Voor het overgangsgebied tussen hydraulisch glad en hydraulisch ruw tenslotte ontstaat door combinatie van de vgl.(9) en (12) de relatie van White-Colebrook [15]:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{2,3}{\kappa} \log \frac{12 R}{k_s + \frac{\delta}{3,5}} \quad (17)$$

Tenslotte wordt opgemerkt dat op zeer korte afstand van de ruwheden ($z/Y < 3 \text{ à } 4$) afwijkingen optreden van de gegeven logaritmische snelheidsprofielen.

2.4 Hydraulische ruwheid

Het begrip hydraulische ruwheid is niet scherp gedefinieerd. Tekenend hiervoor is de verscheidenheid aan grootheden die als maat voor de hydraulische ruwheid worden gehanteerd. Te noemen zijn : equivalente ruwheid k_s volgens Nikuradse, C-waarde volgens Chezy en de parameter z_0 .

Ten opzichte van een hydraulische gladde wand veroorzaken ruwheidselementen bij turbulente stroming extra energieverliezen, of anders gezegd: de hydraulische ruwheid neemt toe. De konsekwentie hiervan is dat het snelheidsprofiel zich wijzigt. Afmetingen, vorm en patroon van de ruwheidselementen bepalen de extra energieverliezen. Belangrijke onderzoeken in het verleden hiernaar betreffen in het bijzonder de onderzoeken naar de hydraulische ruwheid van wanden bedekt met granulair materiaal en met kunstmatige ruwheidselementen zoals strips, kubussen en bollen. Zo is voor granulair materiaal een equivalente Nikuradse ruwheid k_s bepaald gelijk aan 2 keer de diameter D_n .

Blokkenmatten zijn op te vatten als een dicht patroon van kunstmatige ruwheidselementen. In het navolgende zal daarom, uitgaande van bekende onderzoeksresultaten in zake de hydraulische ruwheid en stromingsparameters voor kunstmatige ruwheidselementen, een relatie gelegd worden tussen de equivalente ruwheid k_s en karakteristieke geometrische parameters voor kunstmatige ruwheidselementen.

Afhankelijk van de geometrische parameters van de kunstmatige ruwheid onderscheiden Knight en MacDonald [3] 6 stromingsomstandigheden (figuur 4). Morris [2] [4] heeft hiertoe de basis gelegd met beschouwingen over energieverliezen door het optreden van wervels achter ruwheidselementen. Bij een dicht patroon van ruwheidselementen ontstaan in de ruimten tussen de ruwheidselementen wervels die de hoofdstroming niet beïnvloeden. In feite is er sprake van pseudo-ruwheid en een hydraulisch gladde wand. De hydraulische ruwheid bij deze quasi-smooth flow is echter hoger dan bij een hydraulisch gladde wand, omdat de wervels wel energieverlies veroorzaken.

Bij toenemende afstand van de ruwheidselementen zullen de ruimten daartussen

in toenemende mate de stroming beïnvloeden en zal de ruwheid toenemen tot een zeker maximum. Bij nog verder toenemende afstand zal de invloed op de stroming weer afnemen en is er sprake van individuele geïsoleerde ruwheidselementen. De hydraulische ruwheid daalt dan weer naar het extreem van een hydraulisch gladde wand.

Knight en MacDonald [3] hebben behalve hun eigen experimenten de resultaten van een groot aantal andere onderzoekers geanalyseerd. De resultaten leiden tot de relaties (zie figuren 5 en 6, en figuur 2B):

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 6,06 \log \frac{h}{\chi} \quad (18)$$

en

$$\chi/Y = f \left(\frac{W + G}{Y} \right) \quad (19)$$

χ = ruwheidsparameter Knight en MacDonald [m].

Gelijkstelling van vgl.(18) aan vgl.(2) leidt tot het verband tussen k_s en χ volgens:

$$\chi = 0,094 \cdot k_s^{0,95} \cdot h^{0,05} \quad (20)$$

De resultaten van Knight en MacDonald zijn gebaseerd op onderzoeken van Morris [4], Sayre en Albertson [5], Adachi [6] en Raju en Garde [7] en betreffen strips, dus tweedimensionale ruwheidselementen.

Sayre en Albertson komen wat betreft vgl.(18) tot het zelfde resultaat met hun onderzoek, maar hebben ook driedimensionale ruwheidselementen onderzocht zoals kubussen. Voor vgl.(19) geven zij echter het verband (figuren 5 en 6):

$$\chi/Y = f \left(\frac{YW'}{(W + G)(G' + W')} \right) \quad (21)$$

Wat voor $G' = 0$ overgaat in vgl. (19).

Zoals reeds vermeld zijn hun resultaten impliciet ook opgenomen in het resultaat van Knight en MacDonald. Opgemerkt wordt dat beide vorige onderzoeken een waarde voor κ vinden gelijk aan 0,38, wat de faktor 6,06 verklaart ten opzichte van de faktor 5,75 bij $\kappa = 0,40$.

Ryabov [8] heeft in zijn onderzoek een aantal Russische experimenten meegenomen. Zijn resultaten luiden (zie figuur 7) :

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 7,34 \log \frac{h}{\Delta} \quad (22)$$

en

$$\alpha_2 = \Delta/Y = f\left(\frac{W+G}{Y+W}\right) \quad (23)$$

Δ = ruwheidsparameter Ryabov [m]

α_2 = dimensieloze ruwheidsparameter Ryabov [-]

Het verband tussen k_s en α_2 luidt :

$$\alpha_2 = 0,144 \cdot k_s^{0,78} \cdot Y^{-1} \cdot h^{0,22} \quad (24)$$

Ryabov vond voor de Von Karman parameter κ een waarde van 0,31.

Tenslotte kunnen de resultaten van Adachi [6] worden genoemd (figuur 8) :

$$\frac{k_s}{Y} = f\left(\frac{W+G}{Y}\right) \quad (25)$$

De diverse resultaten, welke ook door anderen (zie [9] [10]) zijn bevestigd ten aanzien van de relaties tussen ruwheidsparameter en geometrische parameters, vertonen alle een verloop geheel conform de theorie van Morris. Daarnaast wordt bevestigd dat een logaritmisch snelheidsprofiel geldt. Overigens moet worden opgemerkt dat het nivo waar z gelijk aan 0 wordt gesteld, bij alle onderzoeken verschilt.

Als algemene relatie kan vgl.(25) worden gehanteerd. Voor $(W+G)/Y < 5$ kunnen op basis van de resultaten gepresenteerd in de figuren, dan de volgende relaties worden afgeleid :

$$\text{Knight en MacDonald } k_s/Y = 0,01 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{2,55} \quad (26)$$

$$\text{Ryabov } \alpha_2 = 0,18 \left(\frac{W+G}{Y+W}\right)^{1,5} \quad (27)$$

$$\text{Adachi } k_s/Y = 0,05 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{2,10} \quad (28)$$

Substitutie van de vgl.(20) en (24) in respektievelijk vgl.(26) en (27) geeft:

$$\text{Knight en MacDonald } k_s/Y = 0,094 \left(\frac{Y}{h}\right)^{0,053} \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{2,685} \quad (29)$$

$$\text{Ryabov } k_s/Y = 1,336 \left(\frac{Y}{h}\right)^{0,28} \left(\frac{W+G}{Y+W}\right)^{1,92} \quad (30)$$

In figuur 9a zijn voor $h/Y=10,25$ en $102,5$ (geldigheidsgebied resultaten Knight en MacDonald, welke ook van toepassing zijn verklaard voor Ryabov) de krommen volgens Ryabov (vgl.(30)) gepresenteerd. Voor $Y=W$ gaat vgl.(30) over in:

$$\text{Ryabov } k_s/Y = 0,353 \left(\frac{Y}{h}\right)^{0,28} \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{1,92} \quad (31)$$

Vgl.(31) is met vgl.(29) in figuur 9b weergegeven. Gekonkludeerd kan worden dat:

- Ryabov en Knight en MacDonald goed aansluiten, en
- de invloed van h/Y beperkt is.

Substitutie van $h/Y=10,25$ en $102,5$ en vervolgens middelen, levert als eindresultaat voor de vgl.(29) en (31) dan op:

$$\text{Knight en MacDonald } k_s/Y = 0,08 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{2,685} \quad (32)$$

$$\text{Ryabov } k_s/Y = 0,14 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{1,92} \quad (33)$$

Voor waarden van $(W+G)/Y > 15$ kan een analoge exercitie worden uitgevoerd:

$$\text{Knight en MacDonald } k_s/Y = 400 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{-1,295} \quad (34)$$

$$\text{Ryabov } k_s/Y = 37,1 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{-0,877} \quad (35)$$

In figuur 10 zijn alle krommen gepresenteerd, tezamen met het overgangsgebied voor $5 < (W+G)/Y < 15$. Opgemerkt kan nog worden dat de resultaten van Sayre en Albertson identiek zijn aan die van Knight en MacDonald.

Konkluderend kan worden gesteld dat :

- Ryabov en Knight en MacDonald vrijwel identiek zijn,
- Adachi resulteert in een 3 à 4 keer kleinere waarde van k_s/Y dan de andere methoden,
- Voor $(W+G)/Y \approx 8$ een maximum optreedt voor k_s/Y ,

- Lage waarden van k_s/Y worden verkregen voor zowel hoge als lage waarden van $(W+G)/Y$. Dit hangt samen met de overgang van een kunstmatige ruwheid naar een hydraulisch glad oppervlak zonder ruwheidselementen als Y nadert naar 0 of naar een hydraulisch glad oppervlak met individuele geïsoleerde ruwheidselementen als G zeer groot wordt. Een glad oppervlak zonder ruwheidselementen geeft dus een asymptoot voor k_s/Y (aangenomen wordt dat de geldigheid beperkt is tot $[k_s/Y]_{\min} = 0,05$).

Een verklaring voor de reden dat Adachi afwijkt, is mogelijk gelegen in een afwijkende definiering van het niveau van de bodemligging, die door hem gedefinieerd is op $0,5 \cdot Y$.

Samenvattend wordt ten behoeve van de voorspelling van de hydraulische ruwheid het gebruik van de volgende set formules aanbevolen :

$$a) \quad k_s/Y = 0,08 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{2,685} \quad \text{voor } \frac{W+G}{Y} < 5 \quad (32)$$

$$b) \quad k_s/Y = 400 \left(\frac{W+G}{Y}\right)^{-1,295} \quad \text{voor } \frac{W+G}{Y} > 15 \quad (34)$$

c) overgangskromme volgens figuur 10 voor $5 < (W+G)/Y < 15$

Een beperkende voorwaarde is wel dat Y ongeveer gelijk moet zijn aan W . Afwijkingen in de waarde van de resulterende equivalente ruwheid k_s zijn mogelijk tot ongeveer 25 %. Dit is een gevolg van enerzijds de toegepaste procedures (onder andere het bepalen van gemiddelde waarden) en anderzijds de bepaling van de relaties tussen k_s en geometrieparameters uit grafieken.

3. Metingen

3.1 Inleiding

Proeven met Armorflex-blokkenmatten zijn uitgevoerd in de grote stroomgoot van WL in De Voorst in de periode november/december 1985. Onderzocht zijn diverse typen Armorflex-blokkenmatten, welke door Nicolon BV ter beschikking zijn gesteld. In de volgende paragrafen wordt gedetailleerd ingegaan op onderzoeksfaciliteiten, proevenprogramma en meetresultaten. Opgemerkt wordt dat prototype-matten worden gehanteerd, tenzij anders is vermeld.

3.2 Proefopstelling

De dwarsdoorsnede van de grote stroomgoot in De Voorst waarin het onderzoek heeft plaats gevonden, is teneinde hogere stroomsnelheden te kunnen realiseren, gereduceerd tot een breedte B van 1,55 m bij een maximale hoogte van 3,0 m. Hiertoe zijn in de oorspronkelijke goot perronwanden geplaatst en is de bodem opgehoogd met zand, deels afgedekt met een zanddicht geotextiel (figuur 11). Bij de proeven werd gebruik gemaakt van buitenwater.

De meetsectie van 10 m bevond zich op een afstand van 57 m tot 67 m van de instroomopening. Daarvoor lagen een ophoopsectie van 12 m en een betonvloer met een lengte van 25 m. Vervolgens is een aanstroomsectie van 20 m lengte aangebracht, die bestond uit een betonlaag met daarop aangebracht gebroken grind ($D_{50} = 0,015$ m). Het grind is aangebracht ter verhoging van de ruwheid van het beton in de verwachting dat de verkregen ruwheid ongeveer gelijk zou zijn aan die van Armorflex-blokkenmatten, zodat het snelheidsprofiel over de vertikaal zich heeft kunnen aanpassen. De meetsectie bestond uit Armorflex-blokkenmatten op een zanddicht geotextiel. De uitstroomsectie vanaf 67 m bestond uit Stelconplaten op een zanddicht geotextiel.

Tijdens de metingen zijn stroomsnelheden, waterdiepte en waterspiegelverhang bepaald (zie voor het assenstelsel figuur 2). De stroomsnelheden zijn geregistreerd op een aantal hoogten in verschillende vertikalen in een dwarsraai op 65 m met een ASTM-snelheidsmeter (zie figuur 12). Opgemerkt moet worden dat de ASTM-snelheidsmeter wel enigermate gevoelig is voor vuil dat met het buitenwater meekomt. De gemiddelde stroomsnelheid per meetpunt is bepaald over een periode van 1 à 2 minuten. Waterdiepte en waterspiegelverhang zijn bepaald met behulp van pitotbuizen die geplaatst waren in de raaien 32,4 m, 55 m en 69,5 m.

Het instellen van de gewenste stroomsnelheid geschiedde met een grote Ott-

snelheidsmeter die geplaatst was in raai 30 m op 37 % van de waterdiepte gerekend vanaf de bodem.

3.3 Meetprogramma

Onderzocht zijn diverse typen Armorflex-blokkenmatten (figuur 1); in overleg met Nicolon BV is gekozen voor 1 gesloten bloktype en 3 open bloktypen. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de onderzochte bloktypen.

blok- kode	blok- type	afmetingen		
		breedte [m]	lengte [m]	dikte [m]
215	gesloten	0,30	0,34	0,11
220	open	0,30	0,34	0,15
180	open	0,30	0,34	0,11
150	open	0,30	0,34	0,085

De gekozen bloktypen maken het mogelijk de volgende vergelijkingen te maken wat betreft de ruwheid:

- gesloten bloktype en open bloktype
- invloed blokdikte bij open bloktype

Opgemerkt moet worden dat de gaten in de blokken niet gevuld waren. Dit betekent dat blokdikte D en ruwheidshoogte Y gelijk waren.

Teneinde een eventuele invloed van de waterdiepte en de stroomsnelheid op de hydraulische ruwheid te kunnen nagaan, zijn 2 of 3 waterdiepten en 3 stroomsnelheden ingesteld. De volgende tabel geeft een samenvatting van ingestelde combinaties.

waterdiepte h [m]	stroomsnelheid \bar{u} [m]		
	0,50	1,00	1,50
0,50	x	x	x
0,75	x 1)		
1,00	x		x

Opm. 1. Alleen ingesteld bij de bloktypen 215 en 180.

3.4 Meetresultaten

Een overzicht van de uitgevoerde proeven is gegeven in tabel 1. De vermelde waterdiepten zijn bepaald voor raai 65 m door interpolatie van de pitotbuisaflezingen in de raaien 55 m en 69,5 m. Gegeven zijn daarnaast de geregistreerde stroomsnelheden \bar{u}_{OTT} met de Ott-snelheidsmeter, en de gemiddelde stroomsnelheden \bar{u} bepaald uit de registraties in de dwarsdoorsnede in raai 65 m met de ASTM-snelheidsmeter (voor bloktype 150 is het gemiddelde over de vertikaal in het hart van de goot gehanteerd, omdat bij dit blok geen andere vertikalen zijn doorgemeten). Vastgesteld kan worden dat bij de proeven 7,9,17, 23,26 en 28 een aanzienlijk verschil optreedt in de geregistreerde snelheden. In figuur 13 zijn beide resultaten tegen elkaar uitgezet. Bij de verdere analyse is uitsluitend gebruik gemaakt van de ASTM-metingen.

Voorts moet worden vermeld dat bij de proeven 9 en 26 het verschil tussen de over het dwarsprofiel gemiddelde stroomsnelheid aanzienlijk verschilde (meer dan 10 %) van de vertikaal gemiddelde stroomsnelheid in het hart van de goot. Bij de analyse zijn deze proeven om die reden buiten beschouwing gelaten.

Het waterspiegelverhang I_w is bepaald met behulp van de pitotbuisaflezingen. Het energieverhang I_e is berekend uit het verhang I_w volgens:

$$I_e = I_w \left(1 - \frac{\bar{u}^2}{gh} \right) \quad (36)$$

Hierbij is gebruik gemaakt van de stroomsnelheid geregistreerd met de ASTM-snelheidsmeter.

In de figuren 14 t/m 17 zijn de in raai 65 m gemeten snelheidsverdelingen gepresenteerd. Wat opvalt is dat bij sommige snelheidsprofielen de stroomsnelheid nabij de waterspiegel lager is dan op enige afstand onder de waterspiegel. Dit verschijnsel wordt veroorzaakt door de invloed van de zijwandruwheid. Het treedt op als de gootbreedte kleiner is dan 5 keer de waterdiepte, wat bij de onderhavige proeven het geval was [2].

4. Analyse meetresultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk komen achtereenvolgens aan de orde de bepaling van de diverse ruwheidsparameters en een toetsing van de resultaten aan de theorie zoals behandeld in hoofdstuk 2. De meetresultaten zelf staan vermeld in tabel 1 en voor een deel in de figuren 14 t/m 17.

4.2 Bepaling ruwheidsparameters

De bepaling van de diverse ruwheidsparameters uit de meetresultaten kan op verschillende wijzen plaats vinden. De eerste manier is door gebruik te maken van de gemeten snelheidsprofielen. De waarden van $u(z)$ worden daarbij op semi-logaritmisch papier uitgezet tegen de plaatshoogte z (bovenkant blokken is $z=0$). De ruwheidsmaat z_0 volgt dan uit het snijpunt van de geextrapoleerde rechte met $u(z)=0$. Deze procedure is voor alle doorgemeten snelheidsvertikalen uitgevoerd. Voorbeelden zijn gegeven in de figuren 18 t/m 21. De resultaten wat betreft z_0 per proef, welke zijn verkregen door aflezing en middelling over de diverse snelheidsprofielen, staan vermeld in tabel 2. De basis voor deze procedure is gelegen in vgl.(8) :

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{2,3}{\kappa} \log \frac{z}{z_0} \quad (8)$$

Kontroleberekeningen voor combinaties van waarden voor (u_1, z_1) en (u_2, z_2) leverden gelijke resultaten op. De waarde van k_s kan met vgl.(10):

$$k_s = 32 z_0 \quad (10)$$

worden bepaald.

De tweede manier om de ruwheid te bepalen gaat uit van het verhang I_e en de gekorrigeerde hydraulische straal R_b . Allereerst wordt bepaald de schuifspanningssnelheid u_* met:

$$u_* = (R_b \cdot g \cdot I_e)^{0,5} \quad (37)$$

De waarde van de Chezy-coefficient C , de ruwheidsmaat z_0 en de equivalente ruwheid k_s volgen dan uit:

$$C = \frac{\bar{u}}{u_*} \cdot \sqrt{g} \quad (2)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 5,75 \log \frac{R_b}{2,72 \cdot z_0} \quad (9)$$

$$k_s = 32 \cdot z_0 \quad (10)$$

In paragraaf 3.4 is reeds een relatie gegeven om de waarde van I_e te bepalen (zie vgl.(36)). De berekende waarden staan vermeld in tabel 1.

Vgl.(37) kan worden afgeleid door combinatie van de stromingsformule voor waterlopen volgens Chezy:

$$\frac{\bar{u}}{C} = (R \cdot I_e)^{0,15} \quad (38)$$

en vgl.(2). De waarde van de hydraulische straal R dient vervolgens te worden vervangen door de hydraulische straal R_b van de bodem, waarvoor geldt [17]:

$$\begin{aligned} R_b &= 0,25 B && \text{voor } h > 0,5 B \\ R_b &= h(B-h)/B && \text{voor } h < 0,5 B \end{aligned}$$

Door middel van deze procedure wordt gekompenseerd voor de invloed van de wandruwheid, die bij relatief smalle goten ($1,5 < B/h < 3,0$) groot kan zijn. De op deze manier berekende waarden van z_0 , k_s en C/\sqrt{g} zijn tezamen met waarden voor R_b en u_* eveneens vermeld in tabel 2.

Opgemerkt moet worden dat bij deze methode geen rekening wordt gehouden met een ruwheidsverschil tussen bodem en wanden van de goot. Door Knight en MacDonald [11] is een methode gegeven die hiermee wel rekening houdt. Deze methode is ook gebruikt, maar leverde geen systematische verschillen op met bovenstaande werkwijze.

In de figuren 22 en 23 zijn op semi-logaritmisch papier tegen elkaar uitgezet de waarden van \bar{u}/u_* en $12R_b/k_s$ voor respectievelijk het resultaat van de k_s -waarde bepaling per proef bepaald uit verhang en hydraulische straal en de k_s -waarde bepaling door aflezing uit logaritmische snelheidsvertikalen. Uiteraard wordt in figuur 22 vgl.(9) bevestigd als per bloktype een gemiddelde k_s -waarde wordt gehanteerd. Voor de volledigheid is overigens ook de kromme volgens vgl.(18) met een faktor 6,06 in plaats van 5,75 ingetekend.

Uit figuur 23 blijkt dat de coefficient 5,75, in geval k_s is bepaald door aflezing uit semi-logaritmisch uitgezette snelheidsprofielen, niet voldoet. Een betere aansluiting wordt verkregen met een faktor 5,0. Dit betekent dat z_0 systematisch een faktor 2 à 3 te laag is afgelezen, ofwel dat $z=0$ in

werkelijkheid lager dan de bovenkant van de blokken moet worden gedefinieerd. Wordt $z = 0$ toch gedefinieerd op de bovenkant van de blokken dan zou in vgl. (9) de faktor 5,75 voor een Armorflex-blokkenmat vervangen kunnen worden door: $c_1 \cdot 2,3/\kappa$ met $c_1 = 0,87$. In het navolgende zijn verder uitsluitend de resultaten op basis van verhang en hydraulische straal beschouwd.

Overigens wordt opgemerkt dat de figuren 22 en 23 de juistheid bevestigen van de impliciet gedane veronderstelling dat een logaritmisch snelheidsprofiel geldig is.

Per bloktype is vervolgens een gemiddelde k_s -waarde bepaald, evenals een gemiddelde waarde van de verhouding k_s/Y . De resultaten staan in onderstaande tabel.

blok- type	k_s [m]	k_s/Y [-]	opmerkingen
215	0,015	0,132	gesloten, $Y=0,11$ m
220	0,017	0,111	open, $Y=0,15$ m
180	0,023	0,212	open, $Y=0,11$ m
150	0,019	0,224	open, $Y=0,085$ m

De gemiddelde waarde voor k_s ongeacht het bloktype is 0,019 m.

In figuur 24 is de blokdikte Y uitgezet tegen de k_s -waarde en de verhouding k_s/Y . Een verband tussen de ruwheid en de blokdikte kan niet worden afgeleid. Wel kan worden gekonkludeerd dat de hydraulische ruwheid van het gesloten bloktype een fractie kleiner is dan die van de open bloktypen, wat kan worden verklaard door de aanwezigheid van de gaten in laatstgenoemde blokken.

Tenslotte wordt nog opgemerkt dat tussen de afzonderlijke blokken zich eveneens open ruimten bevinden en dat aan de bovenrand van de blokken een opstaande rand (afgeschuind) zit met een hoogte van 0,015 m (zie figuur 25). Deze laatste waarde zou, gezien de onafhankelijkheid van de blokdikte, wel eens verantwoordelijk kunnen zijn voor de geregistreerde k_s -waarden.

Aan het slot van deze paragraaf moet worden getoetst in hoeverre er sprake is van een hydraulisch ruwe wand. Hiertoe moet gelden :

$$\frac{u_* \cdot Y}{\nu} > 70 \quad (7)$$

Voor ieder bloktype is de minimale waarde behorend bij de laagste waarde van u_* berekend. Gekonkludeerd kan worden dat in alle gevallen ruimschoots voldaan is aan vgl.(7). Ook moet nog onderzocht worden of de stroming turbulent is. Per proef is het Reynolds-getal berekend met:

$$R_e = R_b \cdot \bar{u}/\nu \quad (15)$$

De resultaten staan in tabel 2. De waarden liggen in de orde van 10^5 à 10^6 , dus is er sprake van turbulente stroming.

4.3 Toetsing meetresultaten aan theoretische beschouwingen

In hoofdstuk 2 zijn beschouwingen gegeven over het snelheidsprofiel bij turbulente stroming en de hydraulische ruwheid. In de vorige paragraaf is reeds aangetoond dat de stroming turbulent is, terwijl de figuren 22 en 23 aannemelijk maken dat het snelheidsprofiel logaritmisch van aard is. Gebleken is voorts dat de Armorflex-blokkenmat als hydraulisch ruw kan worden gekarakteriseerd. Dit kan worden verduidelijkt in een Moody-diagram (zie figuur 3), waartoe in figuur 26 per proef het Reynolds-getal en de waarde van de parameter C/\sqrt{g} tegen elkaar zijn uitgezet. De meetresultaten liggen duidelijk hoger dan de limiet voor de ruwheid overeenkomend met de formule van Prandtl-Von Karman voor een hydraulisch gladde wand.

Ten aanzien van de hydraulische ruwheid zijn in paragraaf 2.4 voorspellingsformules voor k_s/Y gegeven voor een geometrie waarvoor geldt $Y \approx W$. In het geval van Armorflex-blokkenmatten wordt aan deze voorwaarde min of meer voldaan en kunnen de experimenteel bepaalde waarden van k_s worden vergeleken met de waarden volgend uit de voorspellingsformules. In figuur 25 is een open Armorflex-blok geschematiseerd weergegeven. Voor de verschillende bloktypen kan de waarde van $(W+G)/Y$ worden berekend, waarna met vgl.(32) voor $(W+G)/Y < 5$ de waarde van k_s/Y volgt. In onderstaande tabel is het resultaat weergegeven.

blok- type	Y [m]	W [m]	G [m]	W+G/Y [-]	berekend			gemeten
					k_s/Y [-]	k_s [m]	k_s [m]	k_s [m]
215	0,11	0,068	0,06	1,164	0,120	0,013	0,013	0,015
220	0,15	0,068	0,106/0,06	1,160/0,853	0,119/0,052	0,018/0,008	0,013	0,017
180	0,11	0,068	0,106/0,06	1,582/1,164	0,274/0,120	0,030/0,013	0,022	0,023
150	0,085	0,068	0,106/0,06	2,047/1,506	0,548/0,240	0,047/0,020	0,034	0,019

De k_s -waarden bepaald uit de experimenten zijn eveneens vermeld. In figuur 27 zijn de waarden van $(W+G)/Y$ en de gemeten k_s/Y -waarden gepresenteerd. Rekening houdend met de beperkte nauwkeurigheid kan worden gekonkludeerd dat de resultaten overeenstemmen. Ook kan worden vastgesteld dat door de lage waarden van $(W+G)/Y$ er sprake is van quasi-smooth flow (zie ook figuur 4).

4.4 Konklusies

Op basis van de experimenten kunnen ten aanzien van Armorflex-blokkenmatten de volgende konklusies worden getrokken :

- De equivalente ruwheid k_s bedraagt circa 0,02 m, wat overeenkomt met 0,1 à 0,2 keer de blokdikte.
- Geen verband kon worden vastgesteld tussen blokdikte en equivalente ruwheid.
- De equivalente ruwheid van een gesloten bloktype is een fractie kleiner dan de equivalente ruwheid van open bloktypen.
- Een logaritmisch snelheidsprofiel werd aangetoond.
- Een vergelijking tussen op metingen gebaseerde k_s -waarden en voorspelde k_s -waarden, ontleend aan experimenten met kunstmatige ruwheidselementen, leidt tot de konklusie dat k_s -waarden voor blokkenmatten globaal kunnen worden geschat.

Tenslotte moet worden opgemerkt, dat toepassing van bovenstaande resultaten zorgvuldig dient te geschieden. Uitgegaan is namelijk van een vlak liggende blokkenmat. Is dit echter niet het geval, bijvoorbeeld tengevolge van een ongelijke ligging in hoogte van individuele blokken, dan kan lokaal de hydraulische ruwheid aanzienlijk toenemen. In hoofdstuk 5 zal hierop nader worden ingegaan.

5. Evaluatie onderzoek

5.1 Bruikbaarheid ruwheidsparameter in stabiliteitsrelatie

Experimentele resultaten van diverse onderzoekers betreffende de hydraulische ruwheid konden worden samengevoegd tot een relatie die in principe geschikt is om de equivalente ruwheid volgens Nikuradse van open bekledingen te voorspellen. Een voorspelling ten aanzien van deze equivalente ruwheid voor diverse Armorflex-blokkenmatten is bevestigd door speciaal hiertoe uitgevoerde metingen. De waarde van de equivalente ruwheid k_s is in dit geval ongeveer 0,02 m voor alle bloktypen ongeacht de blokdikte. Deze waarde kan nu worden toegepast in vgl.(6), de stabiliteitsrelatie die in paragraaf 2.2 is afgeleid voor blokken die niet onderling door kabels zijn verbonden:

$$\frac{\bar{u}_{cr}}{\sqrt{g\Delta_{eq}} \frac{D_{eq}}{k_s}} = \frac{C}{\sqrt{g}} \sqrt{\psi_{cr}} \quad (6)$$

waarbij :

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 5,75 \log \frac{12R}{k_s} \quad (3)$$

Voor een gegeven criterium van begin van bewegen, bijvoorbeeld $\psi_{cr} = 0,03$, kan nu \bar{u}_{cr} worden bepaald als functie van R/k_s . Stel $R=4$ m dan volgt:

$$\frac{\bar{u}_{cr}}{\sqrt{g} \Delta_{eq} \frac{D_{eq}}{k_s}} = 3,4$$

met andere woorden:

$$\theta_{cr} = 3,4 \quad (39)$$

Deze geschatte waarde blijkt goed overeen te stemmen met de resultaten van proeven uitgevoerd in het kader van de Stormvloedkering Oosterschelde naar de stabiliteit van bodemverdedigingen. Hierbij werd een faktor 3,0 à 3,2 gevonden voor de blokkenmat [12] en 4,1 voor kubusvormige gabions met een ribbe van 0,1 m [13].

Vastgesteld kan worden dat met $\theta_{cr} = 3,4$ een aanzienlijk hogere toelaatbare stroomsnelheid mag optreden alvorens instabiliteit ontstaat, dan in het geval van granulair materiaal, waarvoor een faktor van 1,7 wordt aanbevolen door Isbash (zie ook paragraaf 2.2). De toelaatbare stroomsnelheid zelf kan worden bepaald door waarden voor $\Delta_{eq} \frac{D_{eq}}{k_s}$ te bepalen. De equivalente blokdiameter D_{eq} wordt gedefinieerd volgens:

$$D_{eq} = (M_{\text{blok}}/\rho_{\text{blok}})^{0,33} \quad (40)$$

waarin :

M_{blok} = massa van een blok [kg]

ρ_{blok} = dichtheid blok [kg/m³]

De waarde van ρ_{blok} kan worden berekend uit:

$$\rho_{\text{blok}} = M_{\text{blok}}/W \cdot W' \cdot D \quad (41)$$

waarin :

W = blokbreedte [m]

W' = bloklengte [m]

D = blokdikte [m]

Voorts geldt:

$$\rho_{\text{blok}} = \rho_s (1 - \varepsilon) \quad (42)$$

waarin :

ε = volumepercentage open ruimte in blokken [-]

In vgl.(42) kan voor ρ_s een waarde worden aangehouden van 2300 kg/m³. De waarde van ε kan dan met behulp van de vgl.(41) en (42) worden berekend voor elk bloktype.

De term $\Delta_{eq} D_{eq}$ kan nu worden geschreven als:

$$\Delta_{eq} D_{eq} = \frac{\rho_{\text{blok}} - \rho(1 - \varepsilon)}{\rho} \cdot \left(\frac{M_{\text{blok}}}{\rho_{\text{blok}}}\right)^{0,33} \quad (43)$$

Voor Armorflex-bloktype 180 is de toelaatbare stroomsnelheid berekend. Daarbij is gebruik gemaakt van $M_{\text{blok}} = 17,1$ kg wat resulteert in $\Delta_{eq} D_{eq} = 0,193$ m. Substitutie van de laatste waarde in vgl.(39) leidt tot een toelaatbare stroomsnelheid van $\bar{u}_{cr} = 4,68$ m/s. Waarschijnlijk is dit een conservatieve waarde omdat ook voor ψ_{cr} een conservatieve waarde van 0,03 is aangehouden. Te verwachten is namelijk dat als gevolg van de beschermde ligging van individuele blokken tussen de omringende blokken, hogere waarden voor ψ_{cr} gehanteerd mogen worden. Via gericht onderzoek zou de juiste waarde van ψ_{cr} zijn te bepalen.

Samenvattend: De bepaalde k_s -waarde voor Armorflex-blokkenmatten leidt tot waarden van θ_{cr} die vergelijkbaar zijn met resultaten van stabiliteitsonderzoeken voor soortgelijke verdedigingskonstrukties. Wel moet worden aangetekend dat in geval van verhoogde turbulentie, niet-uniforme stroming, etc. een correctie moet worden toegepast op θ_{cr} . Zo is in een onderzoek betreffende onregelmatige ligging een correctiefactor $M=1,2$ afgeleid, waardoor θ_{cr} gelijk wordt aan 2,8 [14].

5.2 Bruikbaarheid onderzoeksresultaten bij schaalproeven

Bepaling van de toelaatbare stroomsnelheid \bar{u}_{cr} op prototypeschaal gaat, gezien het conservatieve resultaat vermeld in voorgaande paragraaf, de mogelijkheden te boven van de beschikbare experimentele faciliteiten. Schaalonderzoek of onderzoek met gereduceerde blokdikte is dan de overblijvende weg.

Vastgesteld is in paragraaf 4.4 dat er geen verband was tussen blokdikte en equivalente ruwheid. Voorts verandert bij schaling de faktor $(W+G)/Y$ en dus k_s niet. Op basis hiervan kan worden gekonkludeerd dat schaalonderzoek realiseerbaar is. Als immers de ruwheid gelijk blijft bij een geringere blokdikte, dan verandert het stroombeeld niet en dus ook niet de uitgeoefende schuifspanningen (of schuifspanningssnelheden) op de blokken. Met de in een schaalmodel bepaalde waarde van ψ_{cr} volgens:

$$\psi_{cr} = \frac{u_{*cr}^2}{g \Delta_{eq} D_{eq}} \quad (1)$$

waarbij:

$$u_{*cr}^2 = \frac{\bar{u}_{cr}}{C} \cdot \sqrt{g} \quad (2)$$

kan dan de toelaatbare \bar{u}_{cr} in het prototype worden bepaald door substitutie van de ruwheid k_s en de prototypewaarden voor waterdiepte en blokkarakteristieken.

Bij stabiliteitsproeven met uitsluitend een gereduceerde blokdikte wijzigt de verhouding $(W+G)/Y$ zich wel. Deze waarde neemt toe en volgens figuur 10 neemt dan ook k_s toe. De proeven met Armorflex-blokkenmatten wijzen echter niet in deze richting (zie paragraaf 4.2) en op grond hiervan wordt gekonkludeerd dat ook in geval van proeven met gereduceerde blokdikte de toelaatbare stroomsnelheid kan worden bepaald.

Samenvattend : stabiliteitsproeven op schaal of met uitsluitend een gereduceerde blokdikte resulteren in een betrouwbare voorspelling van de toelaatbare stroomsnelheid waarbij instabiliteit van individuele Armorflexblokken optreedt.

LITERATUUR

1. Waterloopkundig Laboratorium,
Stabiliteit Armorflex-steenzetting onder golfaanval
Verslag modelonderzoek M1910, Delft, 1983.
2. Chow, Ven te,
Open-Channel Hydraulics
McGraw-Hill, New York, 1959.
3. Knight, D.W., MacDonald, J.A.
Hydraulic Resistance of Artificial Strip Roughness,
Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 105, HY6, June 1979.
4. Morris, H.M.,
Flow in rough conduits
Transactions ASCE, Vol. 120, Paper no. 2745, 1955.
5. Sayre, W. and Albertson, M.L.
The effect of roughness spacing in rigid open channels,
Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins,
Colorado, CER 59 WWS 31, October 1959.
6. Adachi, S.
On the artificial strip roughness,
Disaster prevention research institute,
Kyoto University Bulletin 60, March 1964.
7. Raju, K.G. and Garde, R.J.
Resistance to flow over two-dimensional Strip Roughness,
Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 96, No. HY3,
Proceedings, Paper 7181, March 1970.
8. Ryabov, A.K.
Hydraulic design of channels with artificial roughness,
Hydrotechnical Construction, No. 9, September 1967.
9. Akan, A.O. and Akiltopu, S.
Open-channel flow resistance with high relative roughness
Proceedings XX IAHR Congress, Volume V, Moscow, 1983.

LITERATUUR (vervolg)

10. Buffoni, E.
Scabrezza artificiale realizzata con listelli trasversali
L'Energia elettrica, no 4, 1986
11. MacDonald, J.A.
Boundary shear in smooth and rough channels
Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 107, HY7, July 1981
12. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde-Stabiliteit bodemverdediging
Verslag modelonderzoek M2010, Delft, 1984
13. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde-Stroombestendigheid gabions
Verslag modelonderzoek R1795, Delft, 1982.
14. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde-Stabiliteit beschadigde blokkenmat
Verslag modelonderzoek Q108, Delft, 1987
15. Jansen, P.Ph. (ed)
Principles of River Engineering
Pitman, London, 1979
16. Isbash, S.V.
Construction of dams and other structures by dumping stones into flowing water,
Trans. Scient. Res. Leningrad no. 17, 1935.
17. Waterloopkundig Laboratorium
Stormvloedkering Oosterschelde, negatieve overlap fundatiebedmatten.
Transport van het zeegrind onder getijomstandigheden,
Verslag modelonderzoek M1681, 1981
18. Breusers, H.N.C. en Schukking, W.H.P.
Begin van beweging van bodemmateriaal
WL, Speurwerkverslag S159-I, Delft, 1971

LITERATUUR (vervolg)

19. Shields, A.

Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung

Mitt. der Preusz. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau,
Berlin, Heft 26, 1936

20. Waterloopkundig Laboratorium

Erosie door open taludbekledingen, samenvattend rapport,

WL, verslag H657, Delft, 1988.

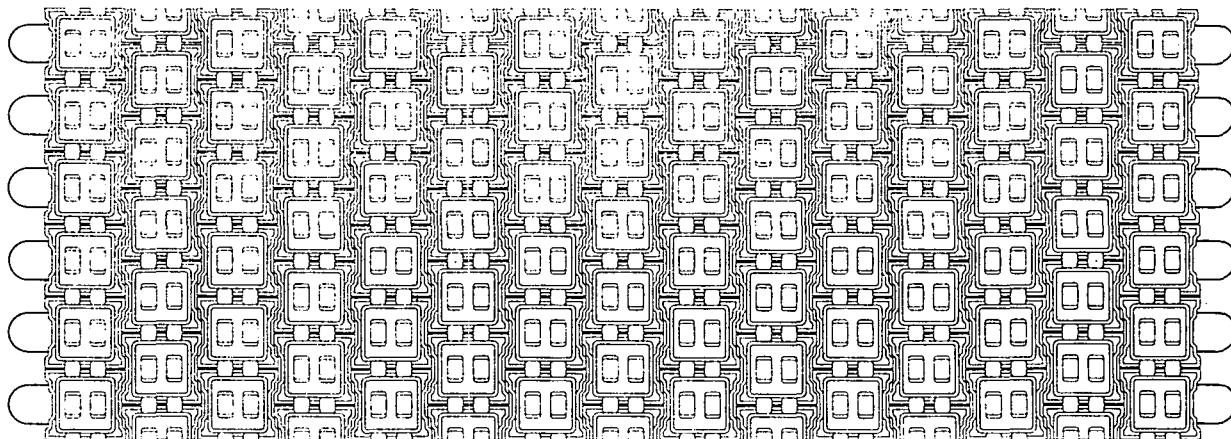
proef	blokkode	water diepte h [m]	gem. stroomsnelheid		verhang	
			\bar{u}_{ott} [m/s]	\bar{u} [m/s]	I_w * 10^{-3} [-]	I_e * 10^{-3} [-]
4	215	0,975	0,51	0,52	0,30	0,29
5		0,74	0,53	0,55	0,28	0,26
6	(gesloten,	0,49	0,52	0,56	0,59	0,55
7*	0,11 m)	0,496	0,99	0,80	1,8	1,53
8		0,528	1,50	-	-	-
9*		0,980	1,48	1,10	2,0	1,75
14	180	0,991	0,48	0,47	0,31	0,30
15	(open,	0,725	0,51	0,52	0,38	0,37
16	0,11 m)	0,49	0,48	0,55	0,52	0,49
17*		0,44	1,01	0,925	3,0	2,41
18		0,605	1,45	1,49	5,7	3,58
19		0,992	1,49	-	-	-
20		0,985	1,39	1,35	2,6	2,12
21	220	1,0	0,49	0,48	0,34	0,34
22	(open,	0,482	0,55	0,59	0,52	0,48
23*	0,15 m)	0,49	1,06	0,87	2,5	2,09
24		0,58	1,49	1,36	4,8	3,24
25		0,58	1,47	1,36	5,0	3,40
26*		1,0	1,47	1,15	2,2	1,92
27	150	0,509	0,50	0,52	0,55	0,52
28*	(open,	0,493	1,02	0,80	1,9	1,67
29	0,085 m)	0,578	1,43	1,48	5,1	3,15
30		0,985	1,49	1,44	2,3	1,78
34		0,98	0,52	0,57	0,41	0,40

Tabel 1 Overzicht uitgevoerde proeven

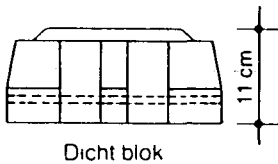
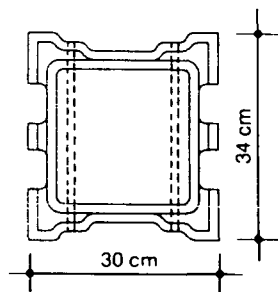
proef	stroom- en gootparameters				bepaald uit verhang en hydr.straal					bepaald uit log. profiel		
	\bar{u} [m/s] * 10 ³	I _e [-] * 10 ³	R _b [m]	Re [-] * 10 ⁶	u* [m/s]	C/g [-]	z _o [m] * 10 ⁶	k _s [m]	12R _b /k _s [-]	z _o [m] * 10 ⁶	k _s [m]	12R _b /k _s [-]
4	0,52	0,29	0,388	1,83	0,033	15,76	307	0,010	466	30	0,00096	4850
5	0,55	0,26	0,387	1,94	0,032	17,19	189	0,006	774	55	0,00176	2639
6	0,56	0,55	0,335	1,71	0,043	13,02	930	0,030	134	30	0,00096	4188
7	0,80	1,53	0,337	2,45	0,068	11,76	368	0,012	337	25	0,00080	5055
14	0,47	0,30	0,388	1,65	0,034	13,82	526	0,017	274	300	0,0096	485
15	0,52	0,37	0,386	1,82	0,037	14,05	618	0,020	232	250	0,0080	579
16	0,55	0,49	0,335	1,68	0,040	13,75	992	0,032	126	275	0,0088	457
17	0,925	2,41	0,315	2,65	0,084	11,01	975	0,032	118	350	0,0112	337
18	1,49	3,58	0,369	5,00	0,116	12,84	919	0,030	148	200	0,0064	692
20	1,35	2,12	0,388	4,76	0,089	15,17	275	0,009	517	250	0,0080	582
21	0,48	0,34	0,388	1,69	0,036	13,33	627	0,020	233	200	0,0064	728
22	0,59	0,48	0,332	1,78	0,040	14,75	474	0,015	266	200	0,0064	623
23	0,87	2,09	0,335	2,65	0,079	11,01	590	0,019	212	340	0,0109	369
24	1,36	3,24	0,363	4,48	0,102	13,33	397	0,013	335	400	0,0128	340
25	1,36	3,40	0,363	4,48	0,105	12,95	501	0,016	272	550	0,0176	248
27	0,52	0,52	0,342	1,62	0,042	12,38	1100	0,036	114	150	0,0048	855
28	0,80	1,67	0,336	2,44	0,071	11,27	381	0,012	336	200	0,0064	630
29	1,46	3,15	0,362	4,80	0,107	13,64	651	0,021	207	250	0,0080	543
30	1,45	1,78	0,388	5,11	0,082	17,68	99	0,03	1552	350	0,0112	416
34	0,52	0,40	0,388	1,83	0,039	13,33	711	0,023	202	150	0,0048	970

Tabel 2 Stroom- en ruwheidsparameters

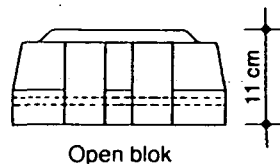
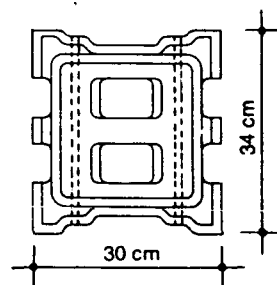
Blokkenmat



Bloktypen



215 - gesloten type



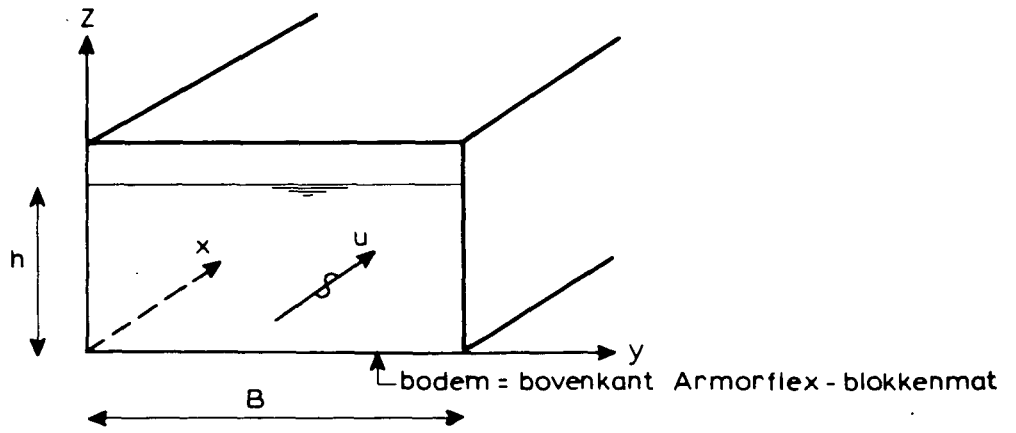
180 - open type

ARMORFLEX - BLOKKEN EN - BLOKKENMAT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

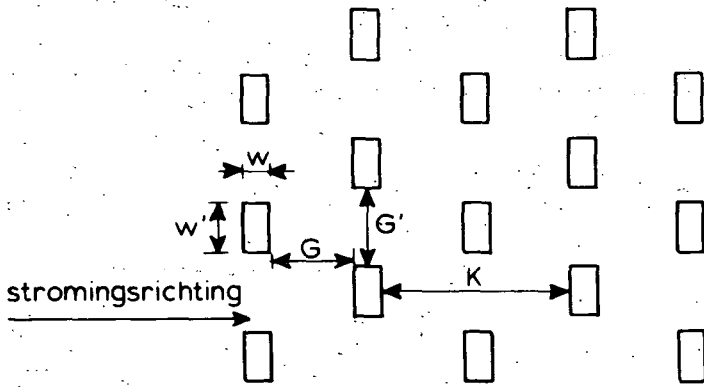
Q 439

FIG. 1

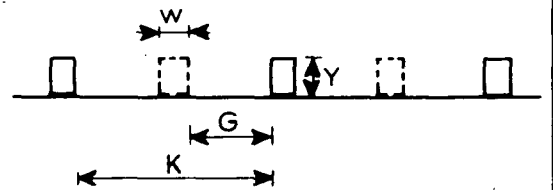


A. Assenstelsel stroomgoot

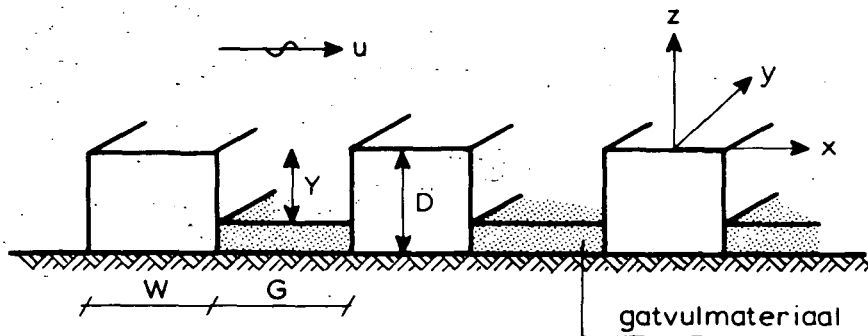
BOVENAANZICHT



LENGTEDOORSNEDE

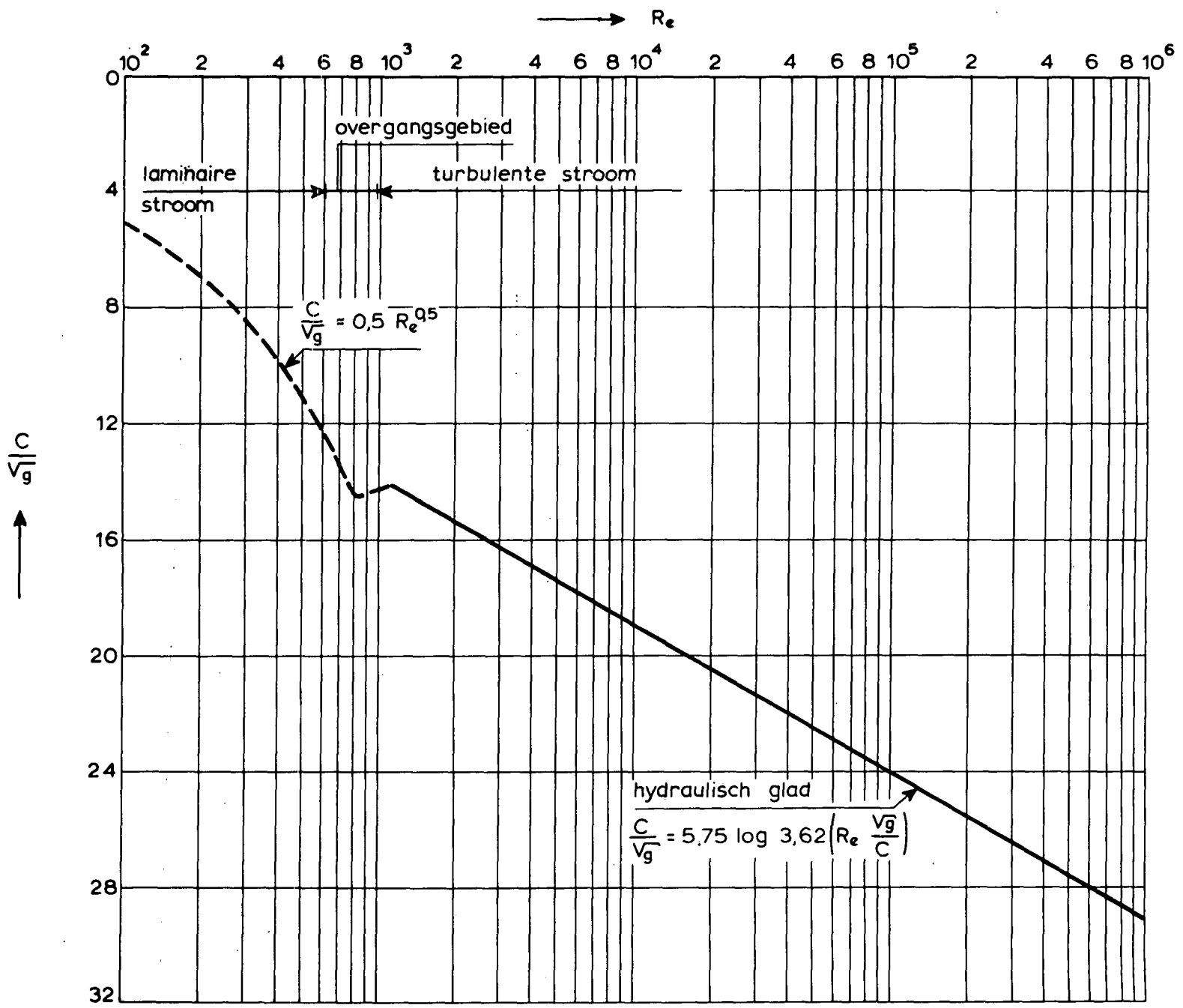


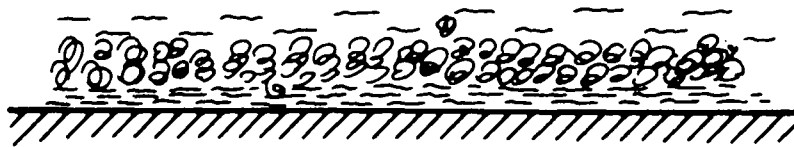
B. Parameters kunstmatige ruwheid



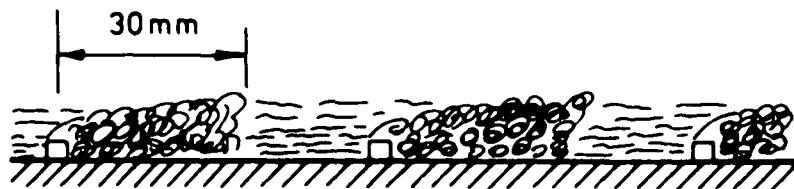
C. Parameters bekleding met gaten

DEFINITIES





(a) Smooth Turbulent Flow



(b) Semismooth Turbulent Flow



(c) Nonuniform Hyperturbulent Flow



(d) Uniform Hyperturbulent Flow



(e) Semi-Quasi-Smooth Flow

dead water



(f) Quasismooth Flow

bron: Knight/Mac. Donald [3]

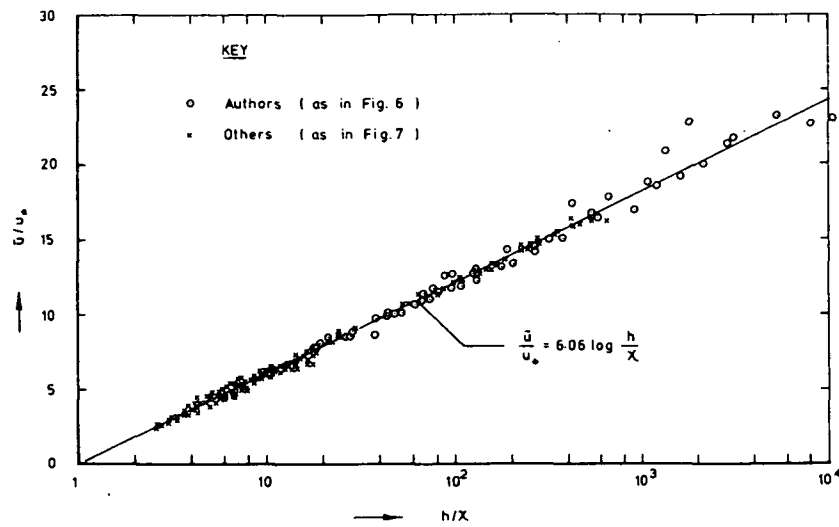
STROMINGSOMSTANDIGHEDEN BIJ
KUNSTMATIGE RUWHEID

DELFT HYDRAULICS LABORATORY

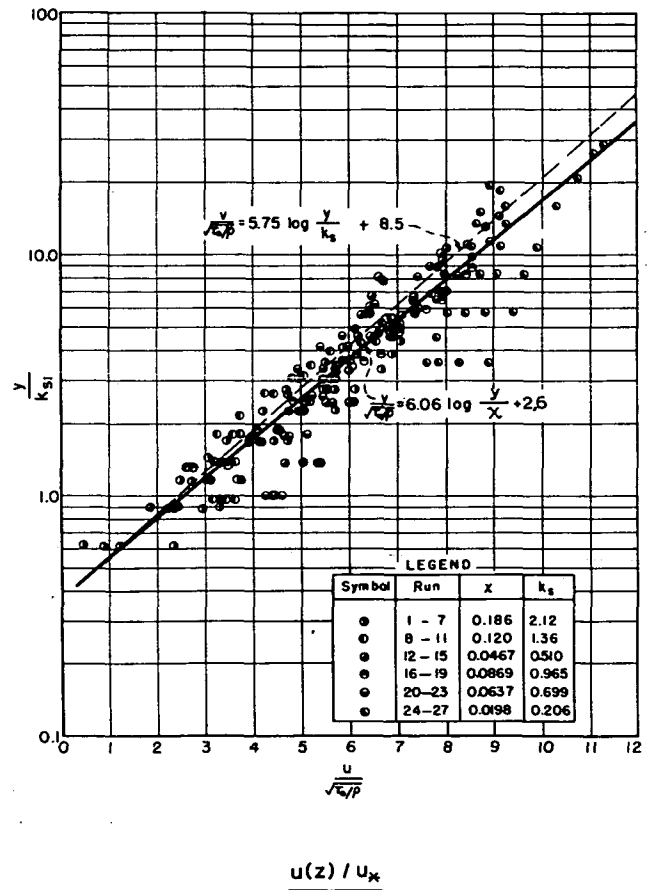
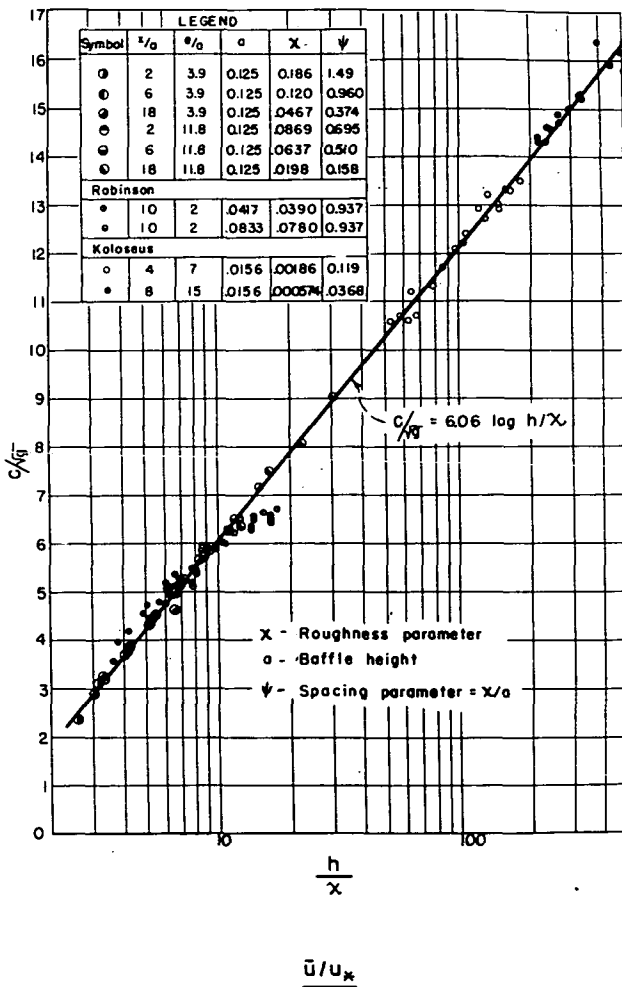
Q 439

FIG. 4

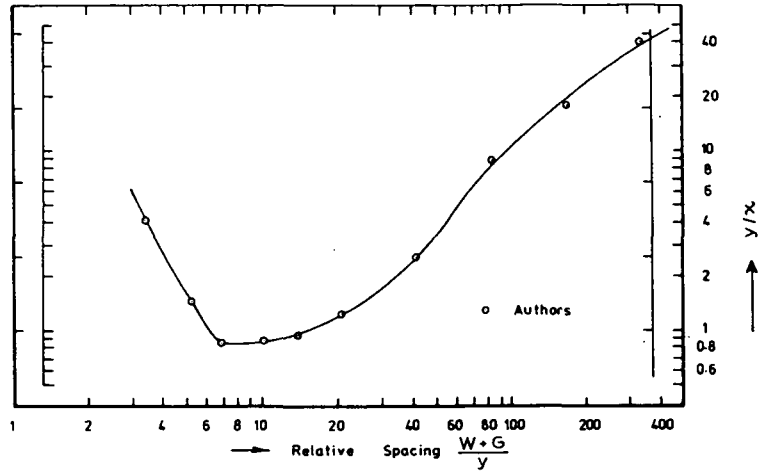
Knight / MacDonald [3]



Sayre / Albertson [5]

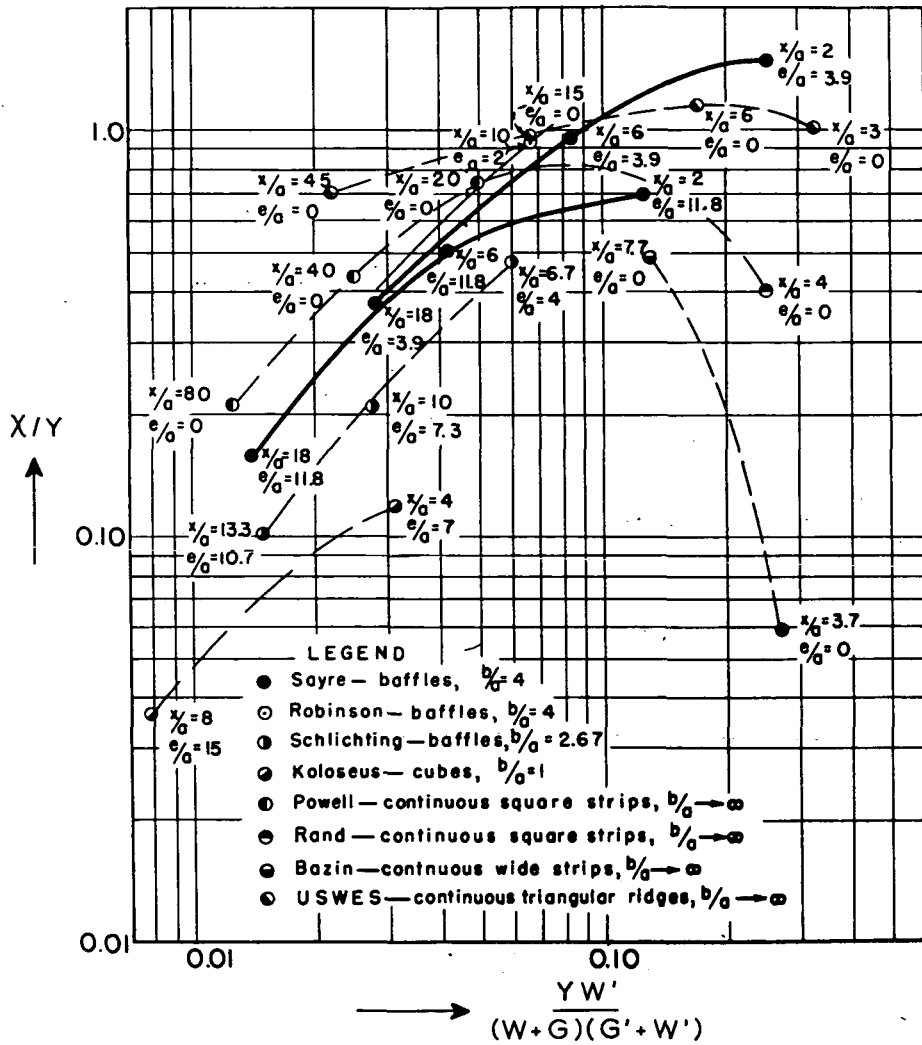


SNELHEIDSVERDELINGEN VOLGENS KNIGHT /
MACDONALD EN SAYRE / ALBERTSON

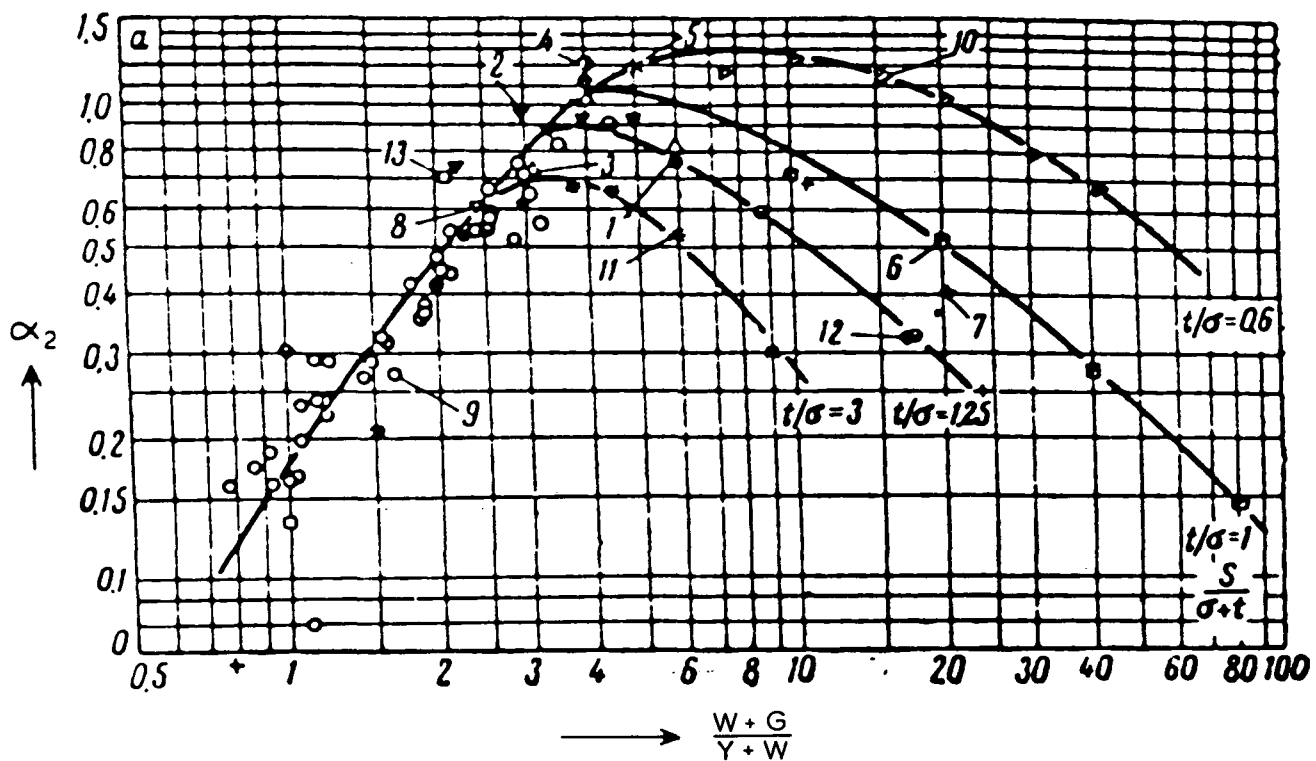


Sayre / Albertson [5]

$$\frac{x}{a} = \frac{G+W}{Y} \quad \frac{e}{a} = \frac{G'}{Y}$$



VERBAND TUSSEN RUWHEIDSPARAMETER EN GEOMETRISE PARAMETERS, KNIGHT / MACDONALD EN SAYRE / ALBERTSON

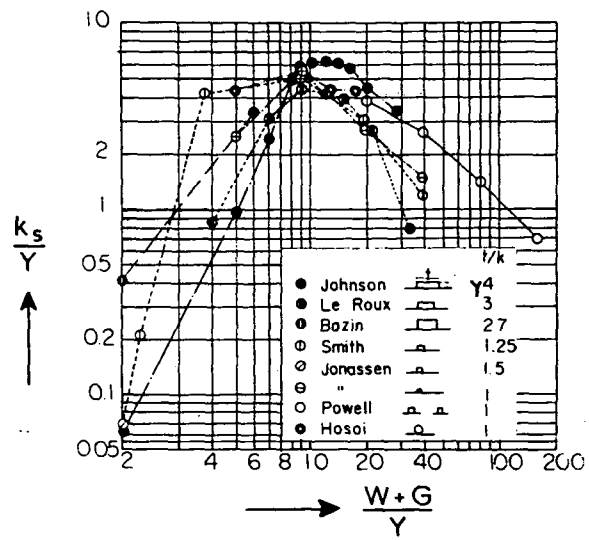


VERBAND TUSSEN RUWHEIDSPARAMETER EN
GEOMETRISCHE PARAMETERS, RYABOV [8]

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 439

FIG. 7

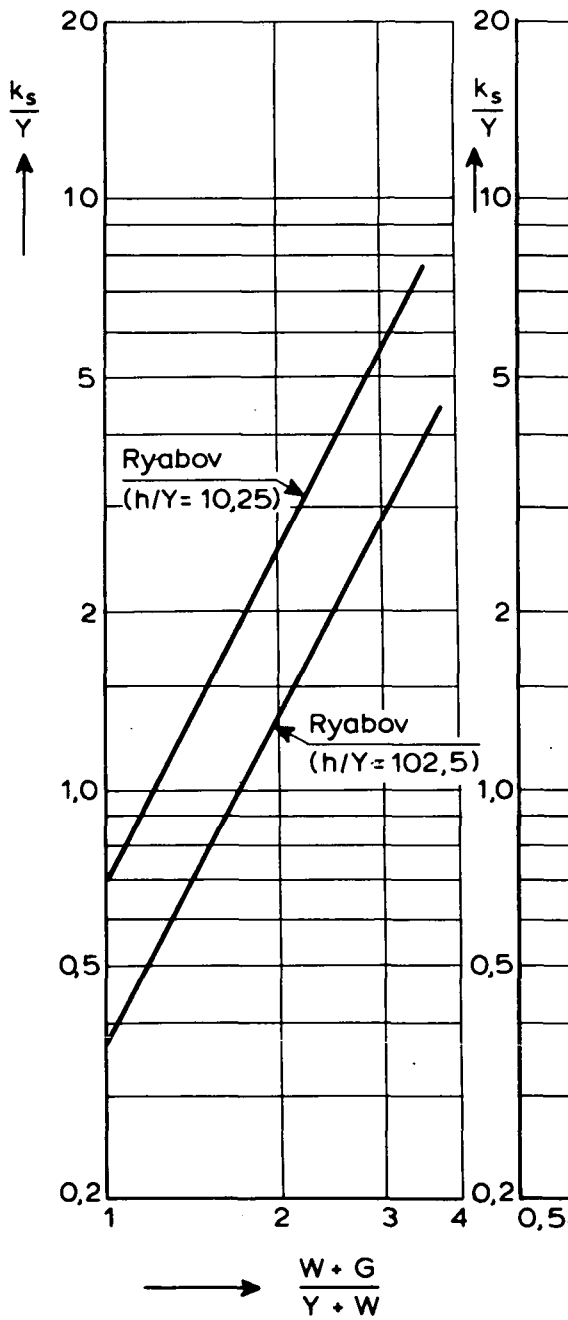


VERBAND TUSSEN RUWHEIDSPARAMETER EN
 GEOMETRISCHE PARAMETERS, ADACHI [6]

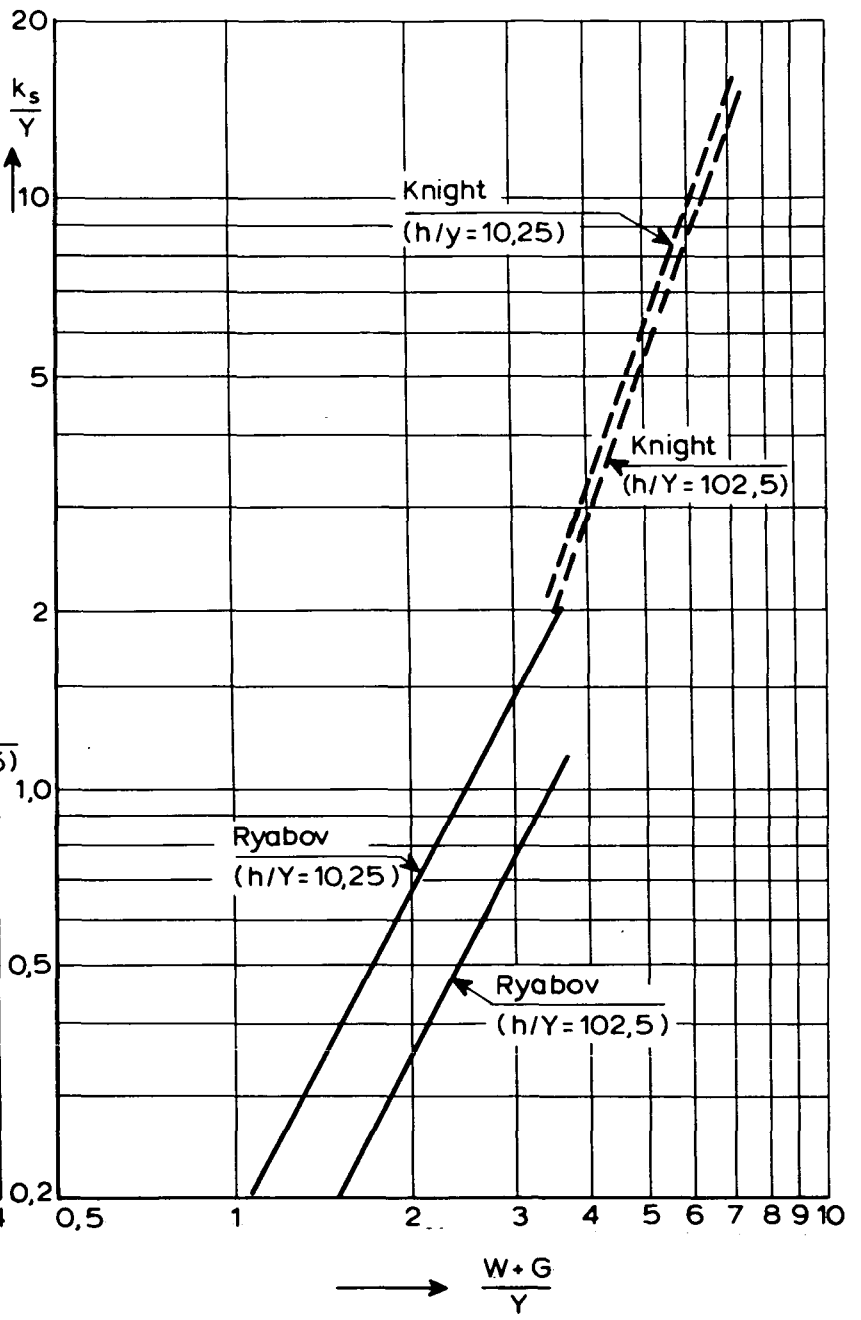
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 439

FIG. 8

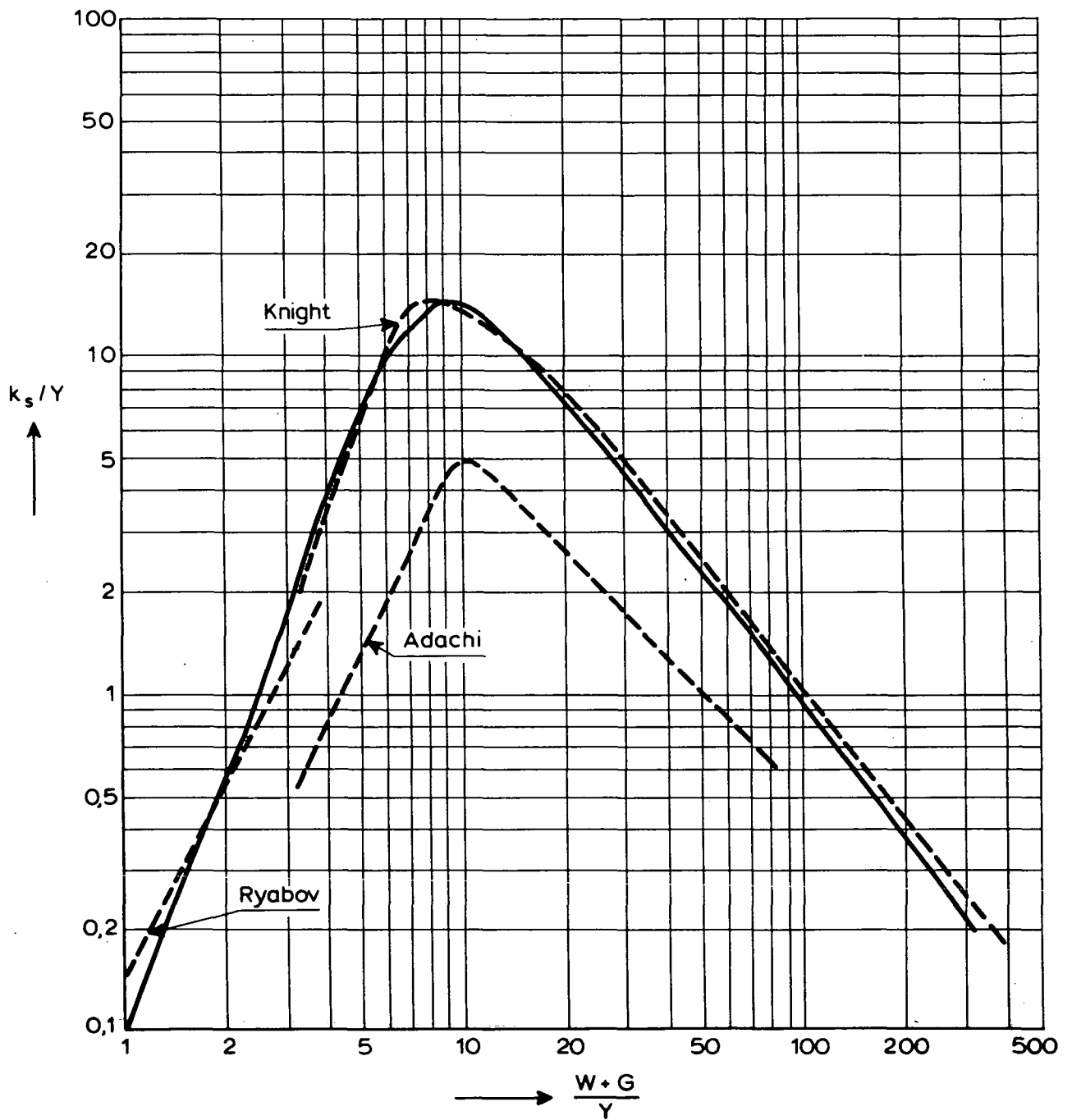


A. vgl. (30)



B. vgl. (29) en (31)

KROMMEN VAN RYABOV EN KNIGHT / MACDONALD

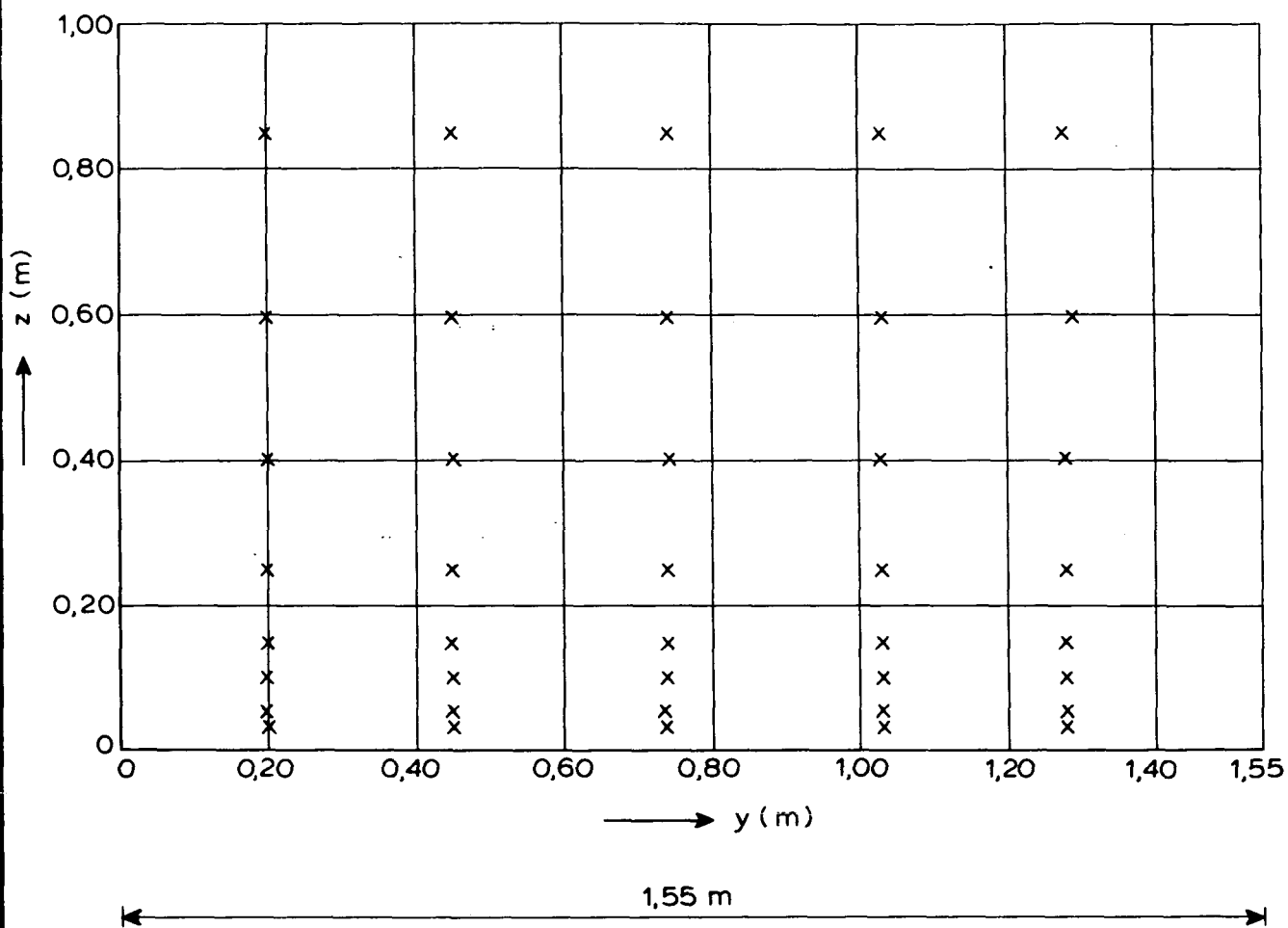


VERBAND TUSSEN k_s / Y EN $W+G/Y$ VOOR
KUNSTMATIGE RUWHEIDSELEMENTEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 439

FIG. 10



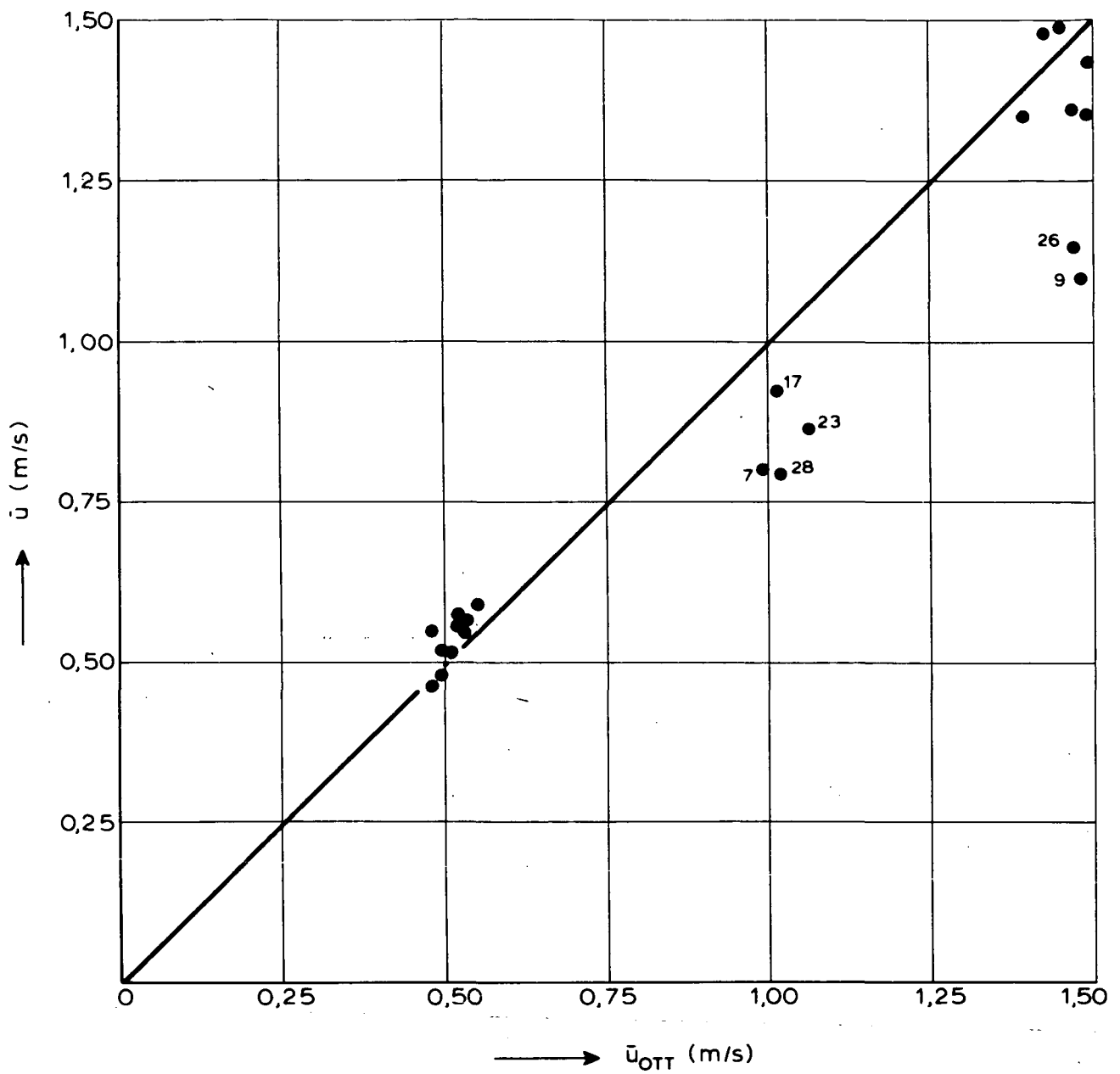
opm. niet bij alle proeven is gemeten in iedere meetlokatie

MEETLOKATIES IN DWARSPROFIEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 439

FIG. 12

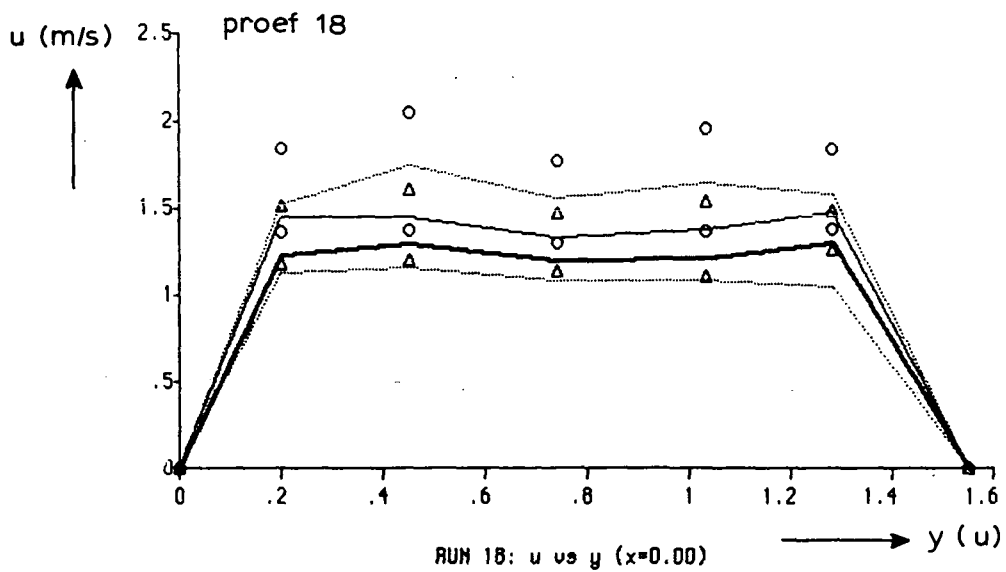
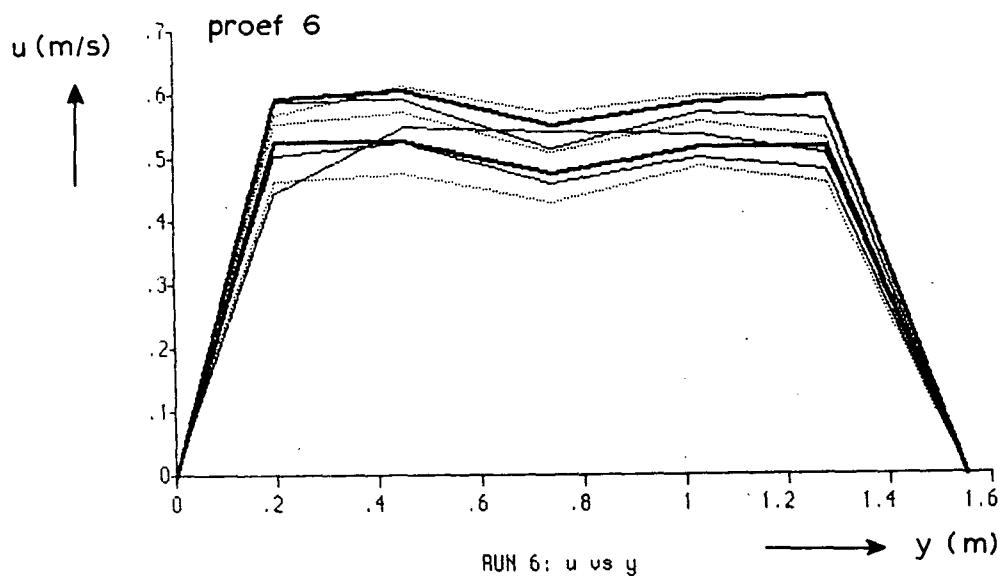


VERGELIJKING \bar{u}_{OTT} EN \bar{u} IN MEETRAAI

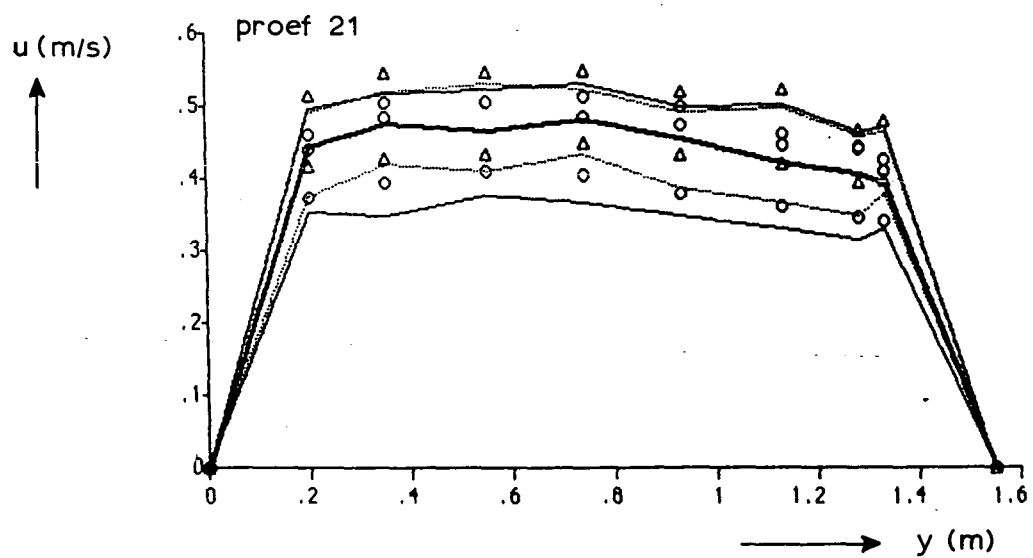
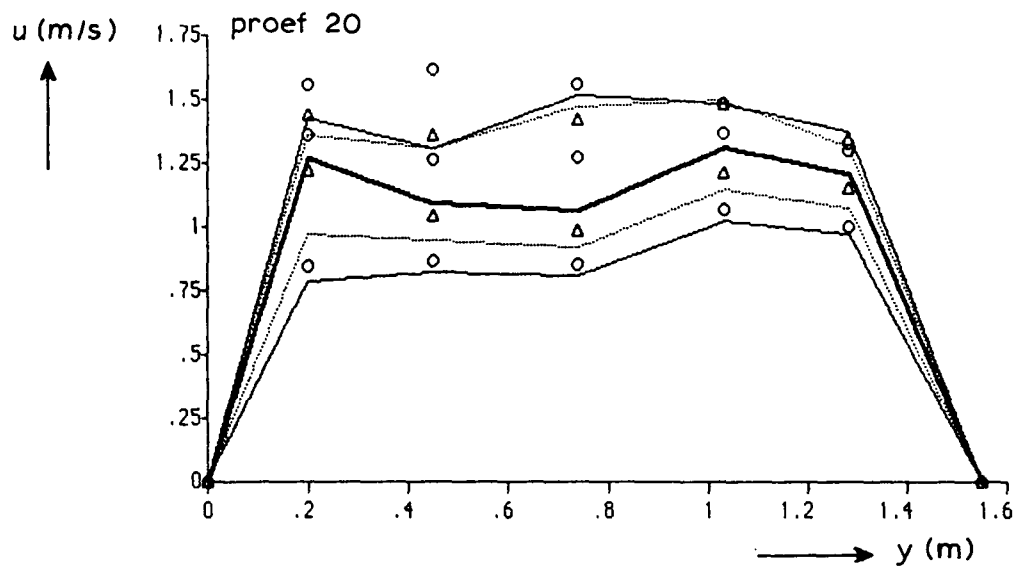
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 439

FIG. 13



SNELHEIDSVERDELINGEN IN EEN DWARSDOORSNEDE
 PROEVEN 6 EN 18



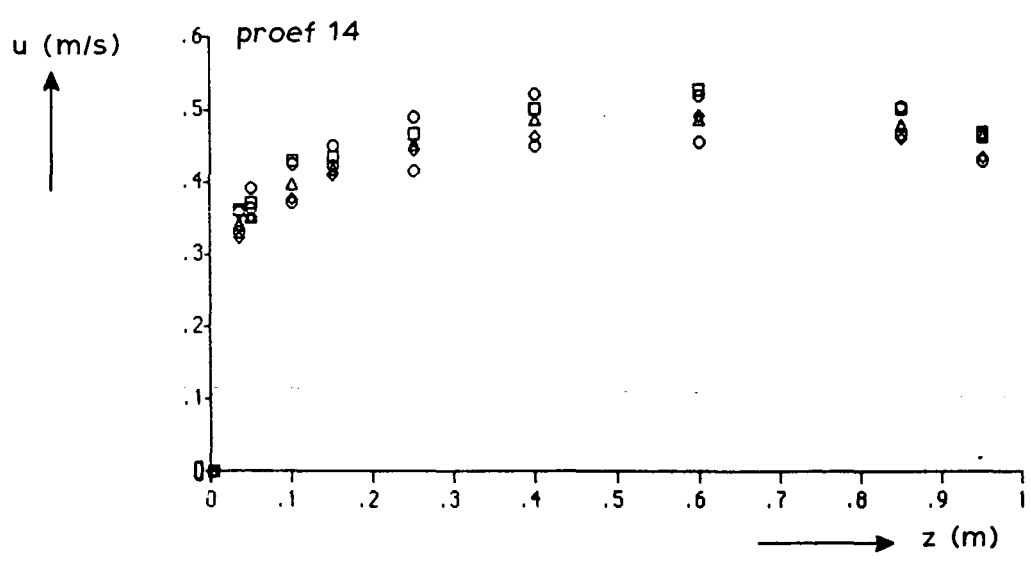
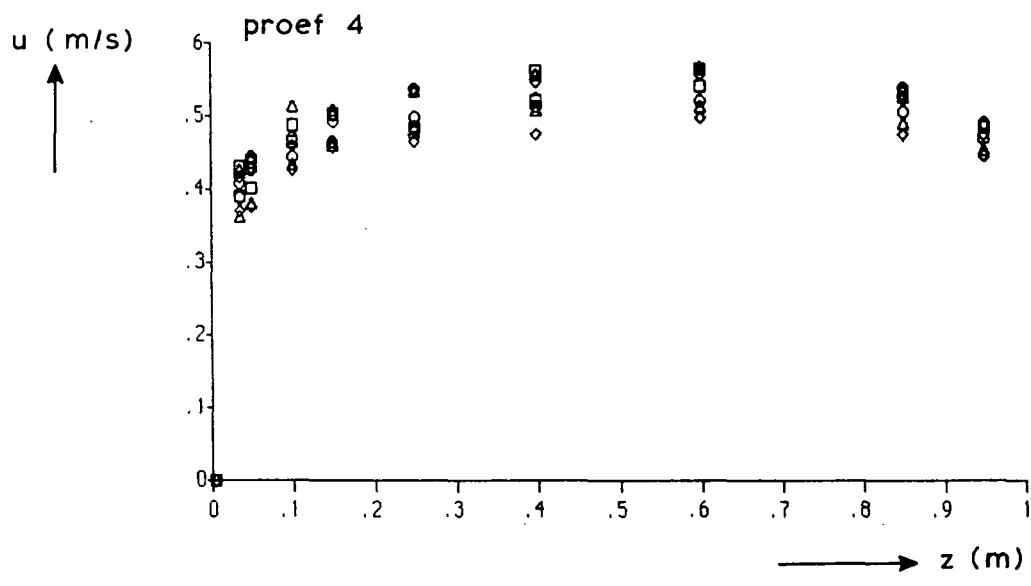
SNELHEIDSVERDELINGEN IN EEN DWARSDOORSNEDE

PROEVEN 20 EN 21

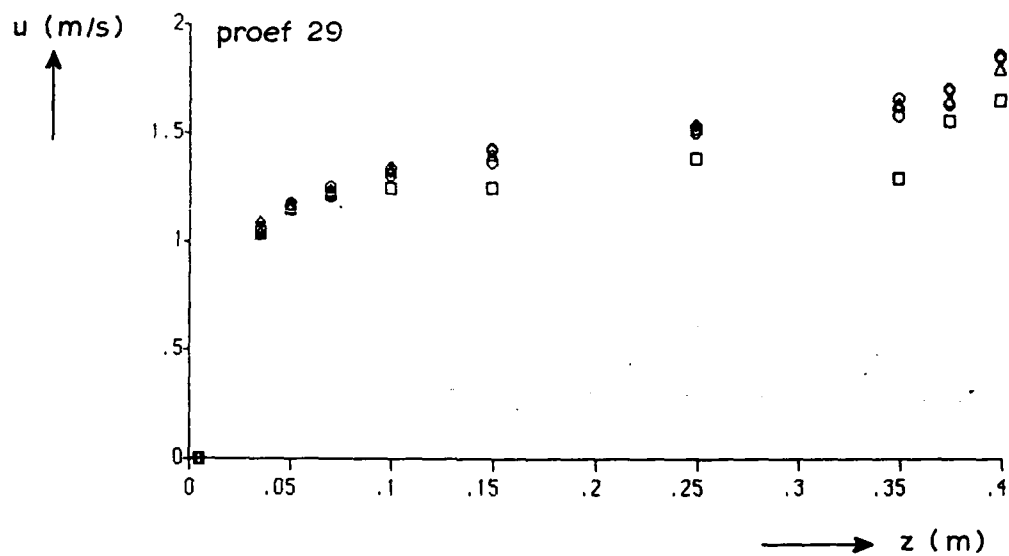
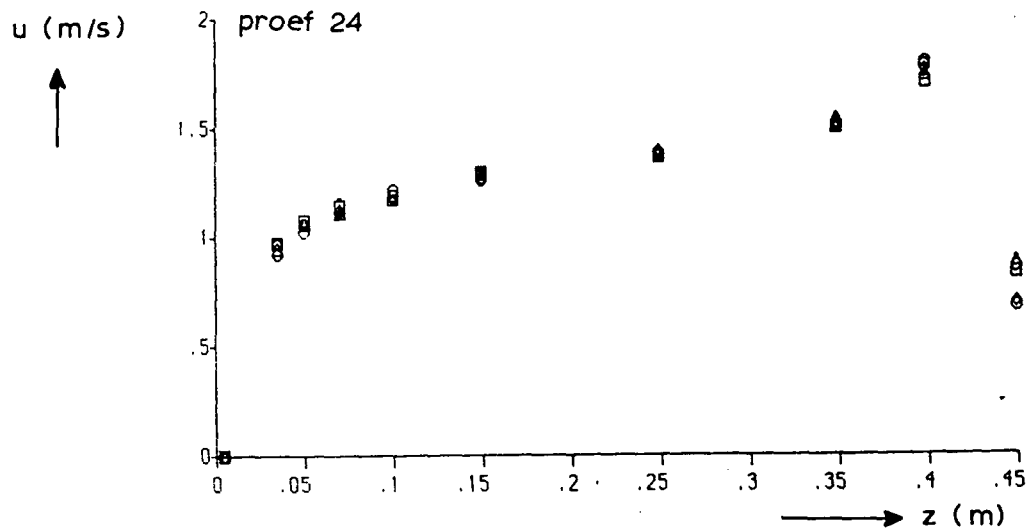
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 439

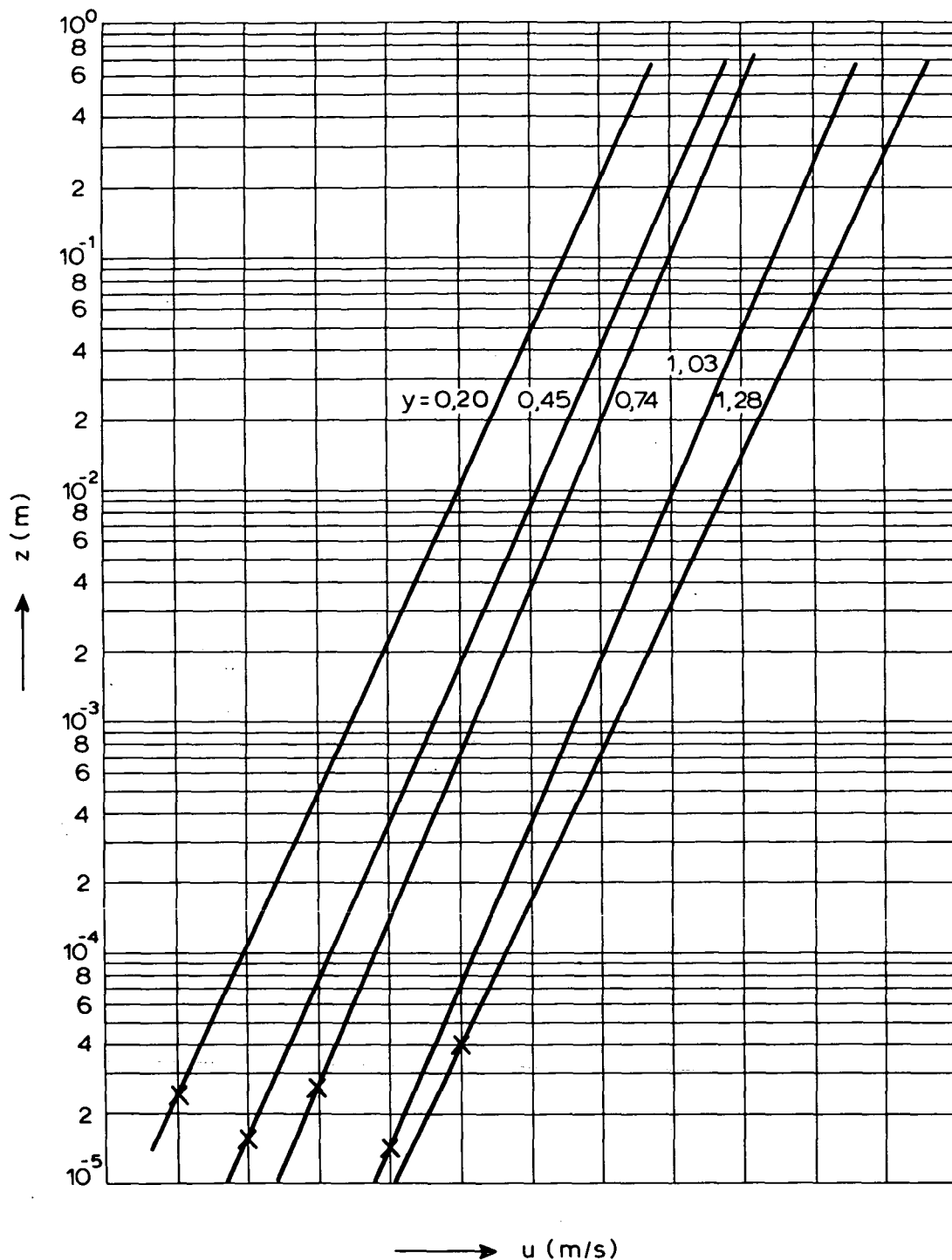
FIG. 15



SNELHEIDSVERDELINGEN IN DE VERTIKAAL,
 PROEVEN 4 EN 14



SNELHEIDSVERDELINGEN IN DE VERTIKAAL,
 PROEVEN 24 EN 29



X = positie z_0 waar voor betreffende snelheidsvertikaal geldt $u(z) = 0$

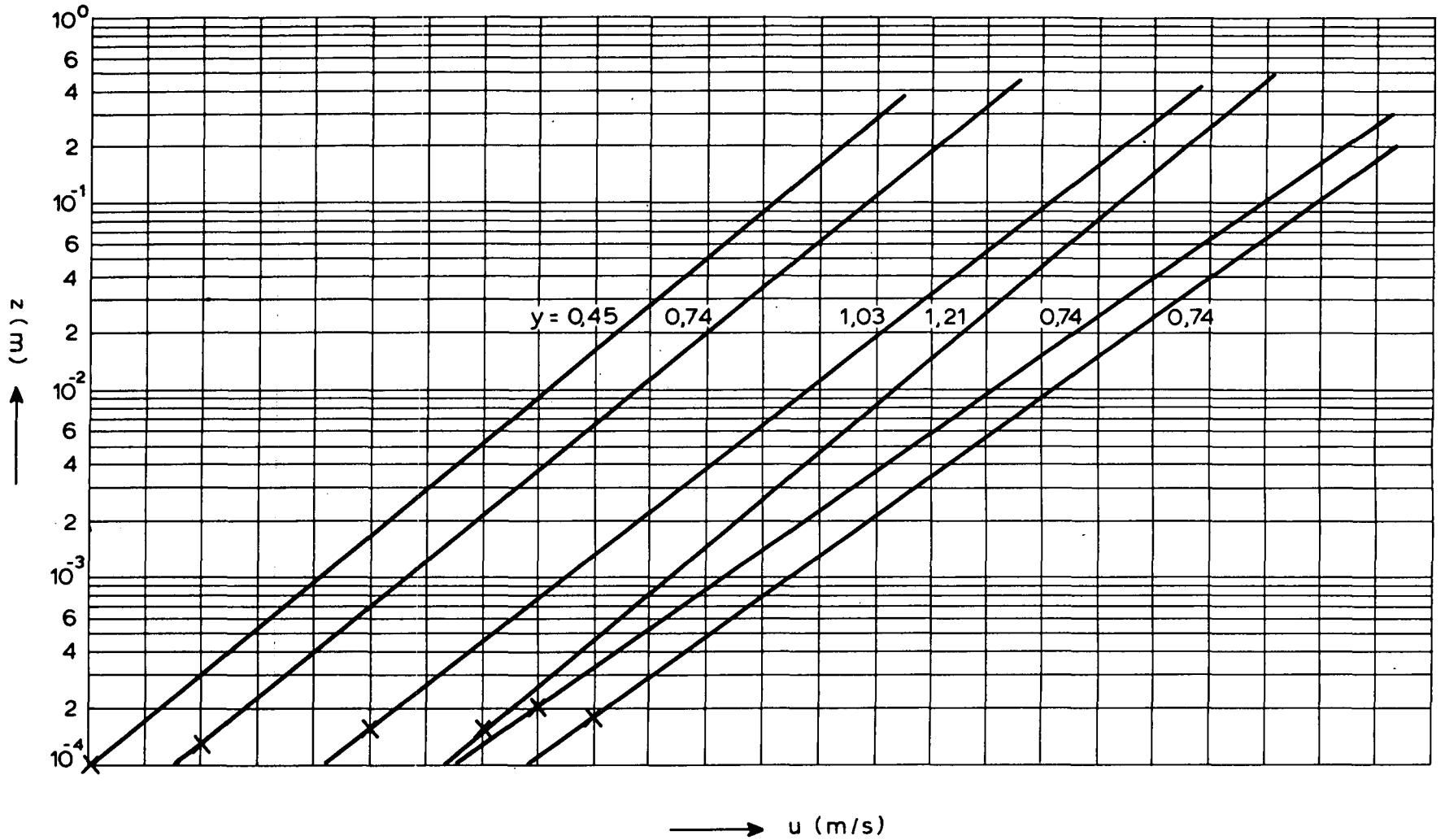
snelheidsschaal: 1 cm $\hat{=}$ 0,1 m/s

LOGARITMISCHE SNELHEIDSPROFIELEN, PROEF 6

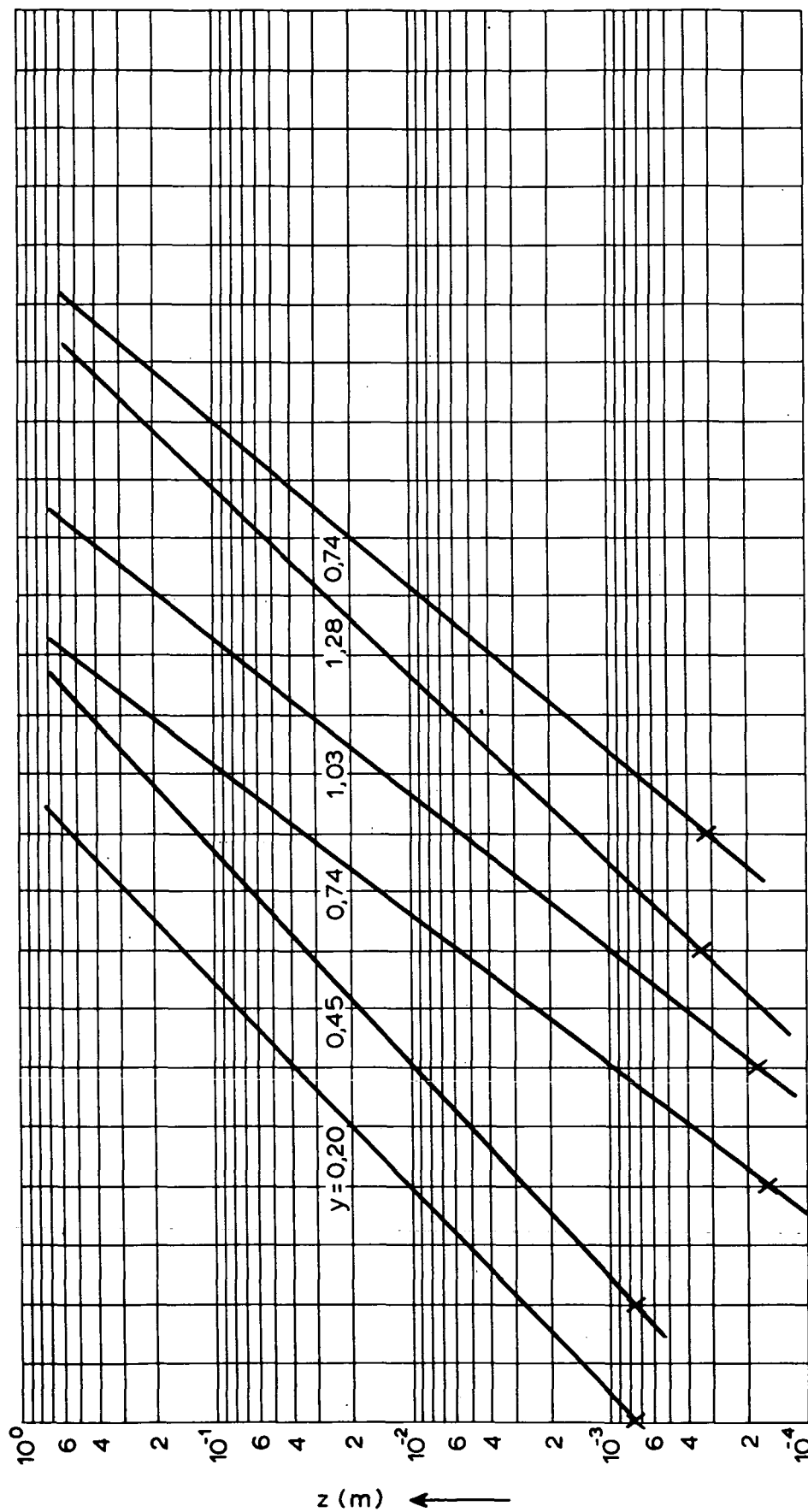
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 439

FIG. 18



X = positie z_0 waar voor betreffende snelheidsvertikaal geldt $u(z) = 0$
 snelheidsschaal : 1 cm $\hat{=}$ 0,1 m/s



→ u (m/s)

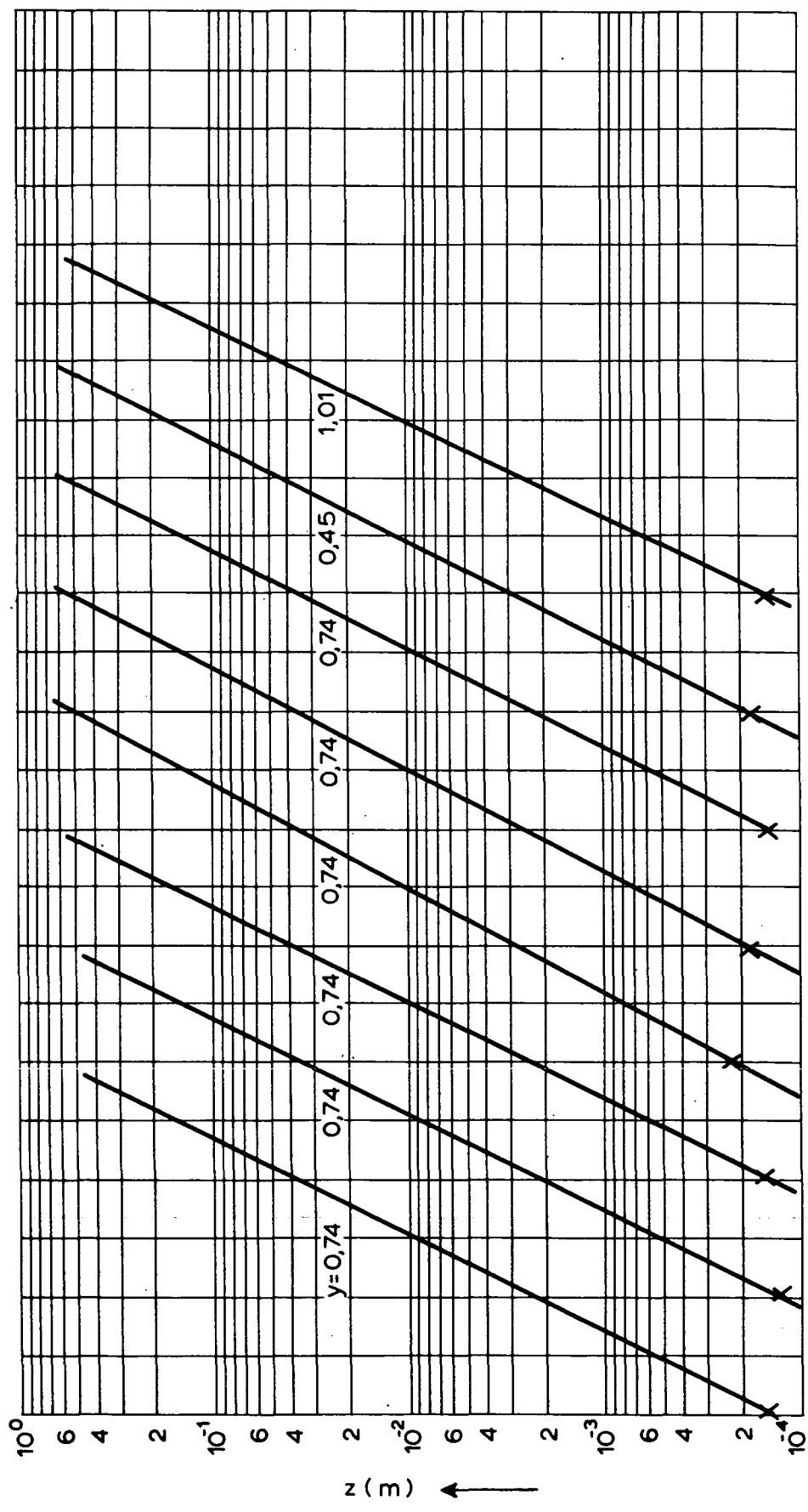
X = positie z_0 waar voor betreffende snelheidsvertikaal geldt $u(z) = 0$
 snelheidsschaal: $1 \text{ cm} \hat{=} 0,1 \text{ m/s}$

LOGARITMISCHE SNELHEIDSPROFIELEN, PROEF 23

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 439

FIG. 20



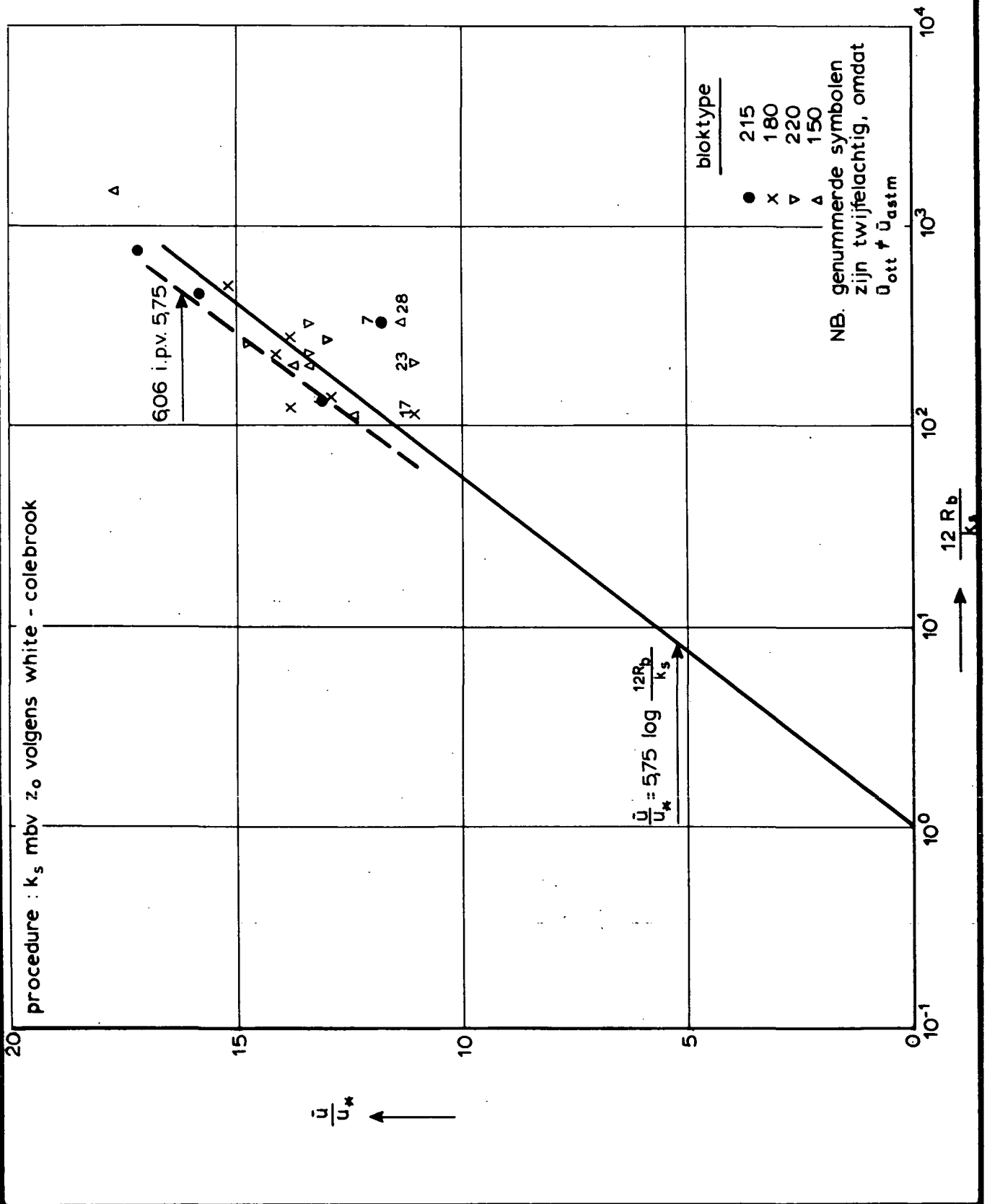
X = positie z_0 waar voor betreffende snelheidsvertikaal geldt $u(z) = 0$
 snelheidsschaal : 1 cm $\hat{=}$ 0,1 m/s

LOGARITMISCHE SNELHEIDSPROFIELEN, PROEF 34

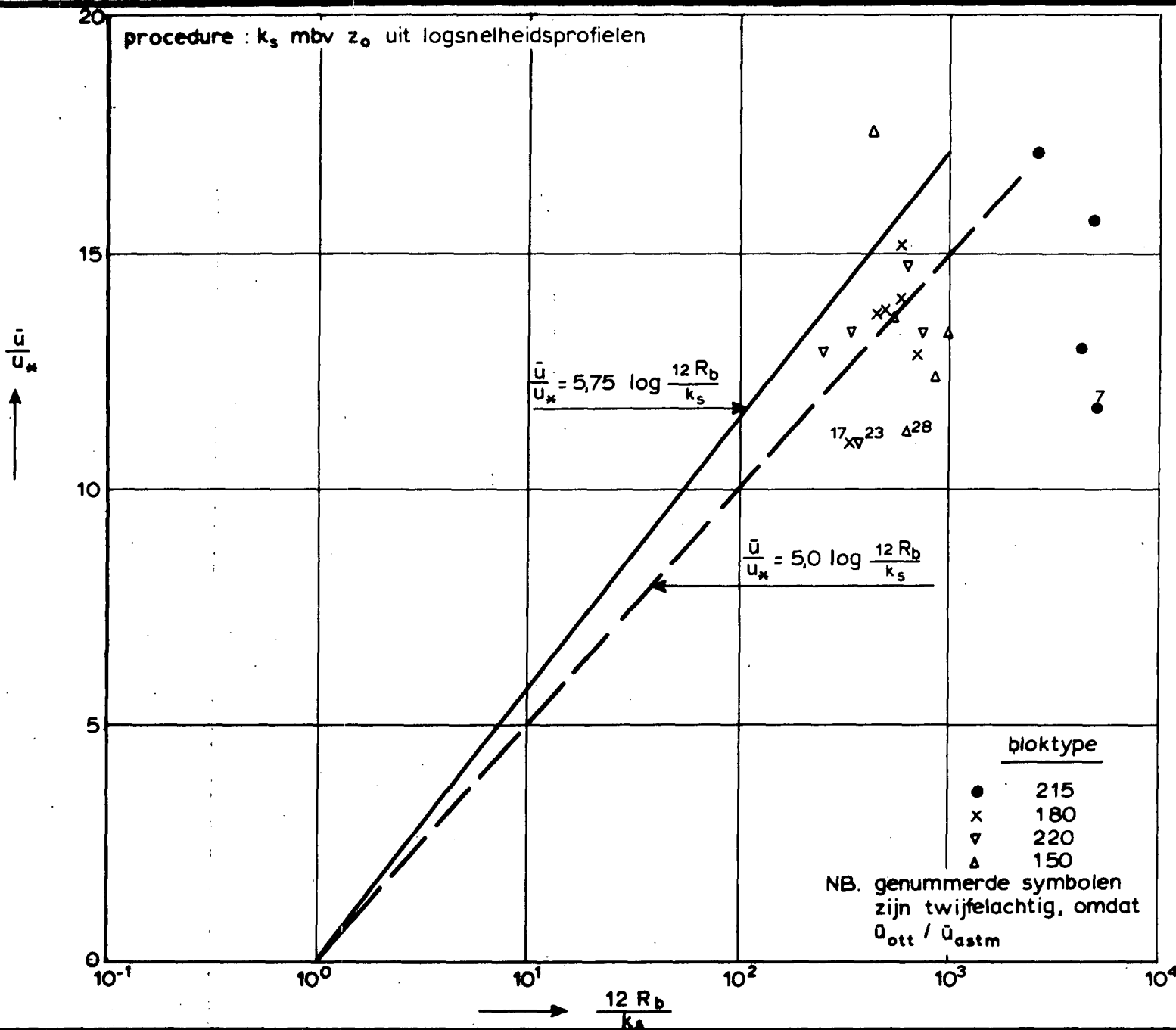
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

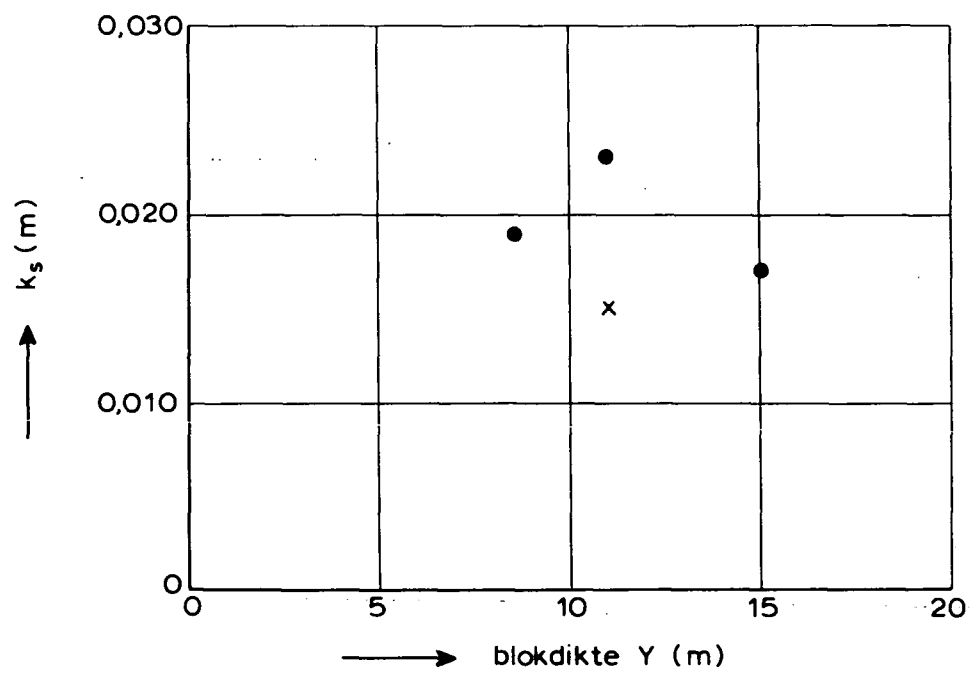
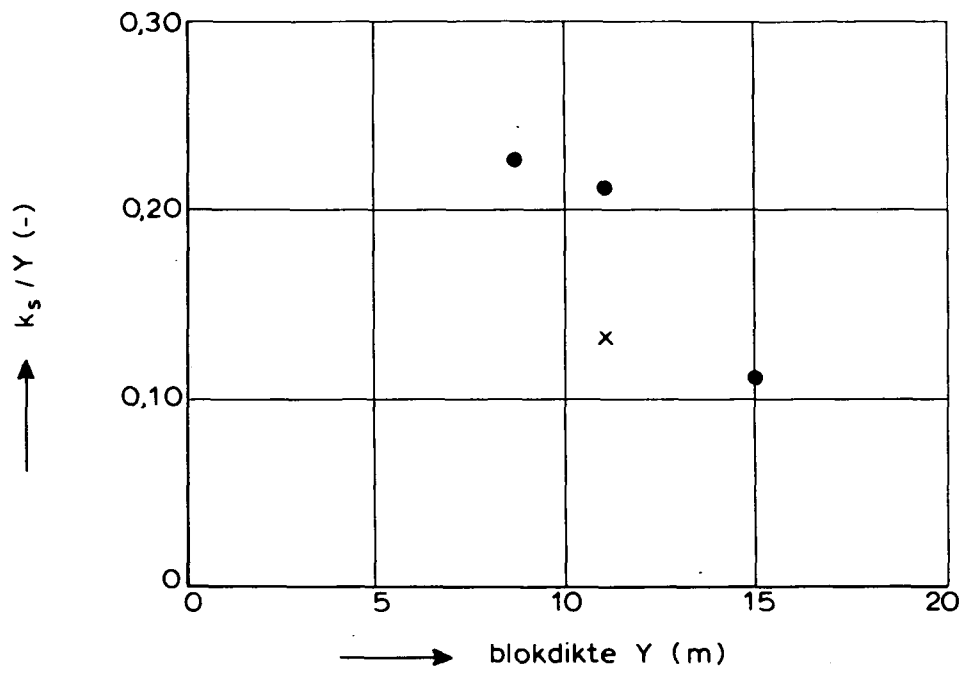
Q 439

FIG. 21



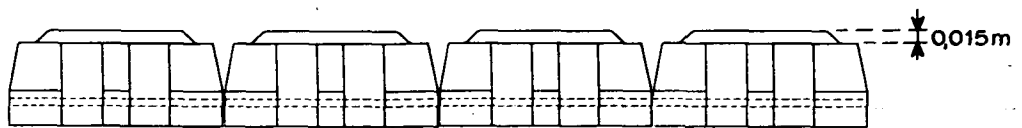
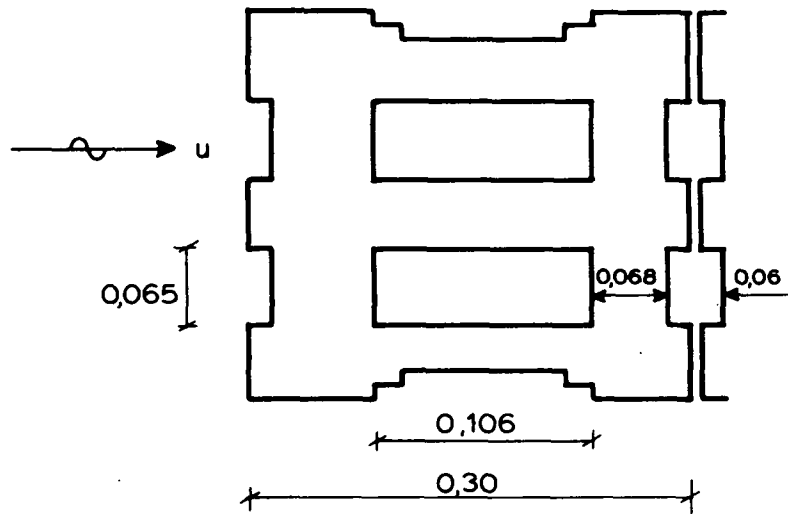
RELATIE \bar{U} / U_* VERSUS $12 R_b / K_s$, VERHANG
EN HYDRAULISCHE STRAAL





● open bloktype
 x gesloten bloktype

INVLOED BLOKDIKTE OP k_s - WAARDE



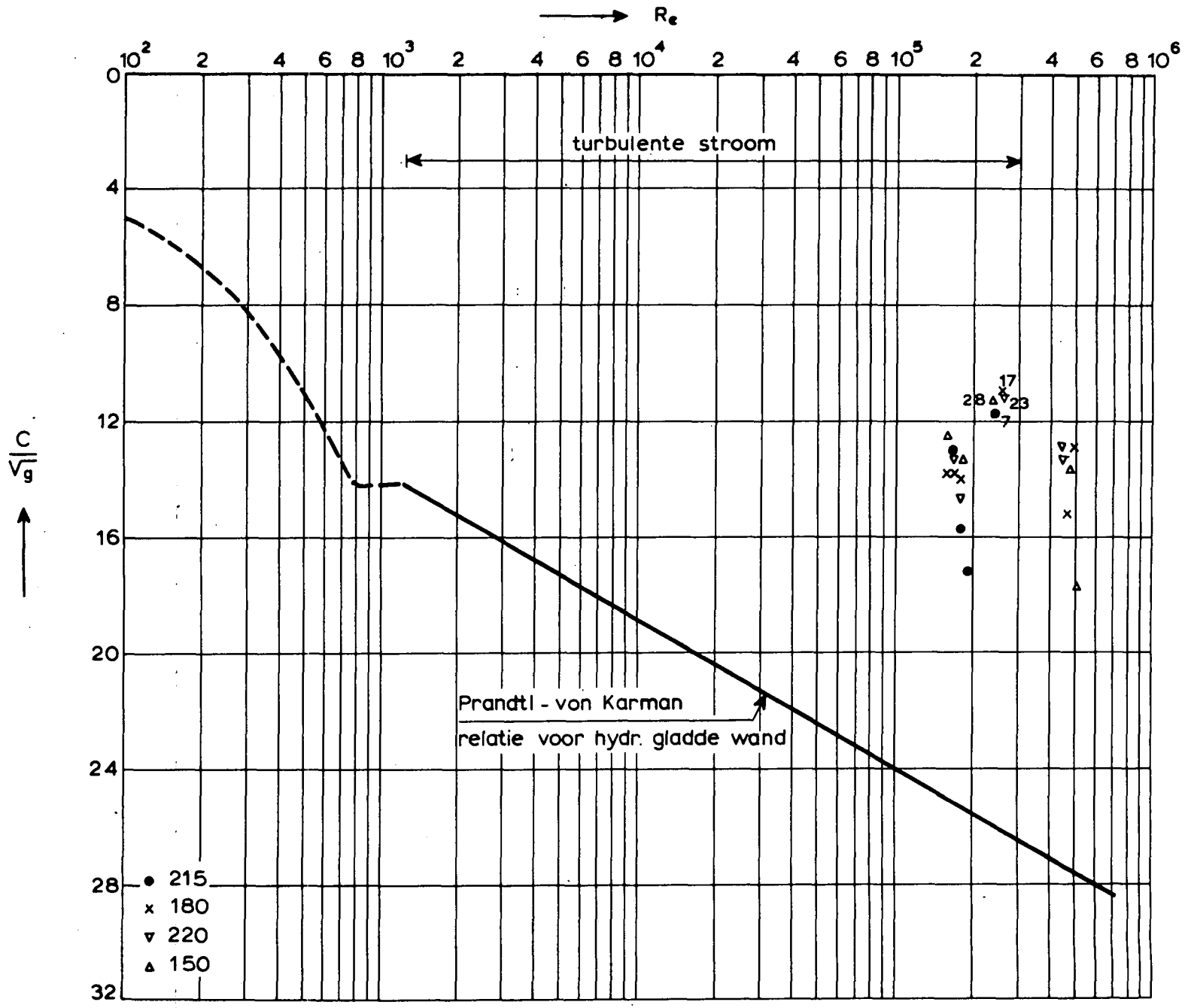
maten in m

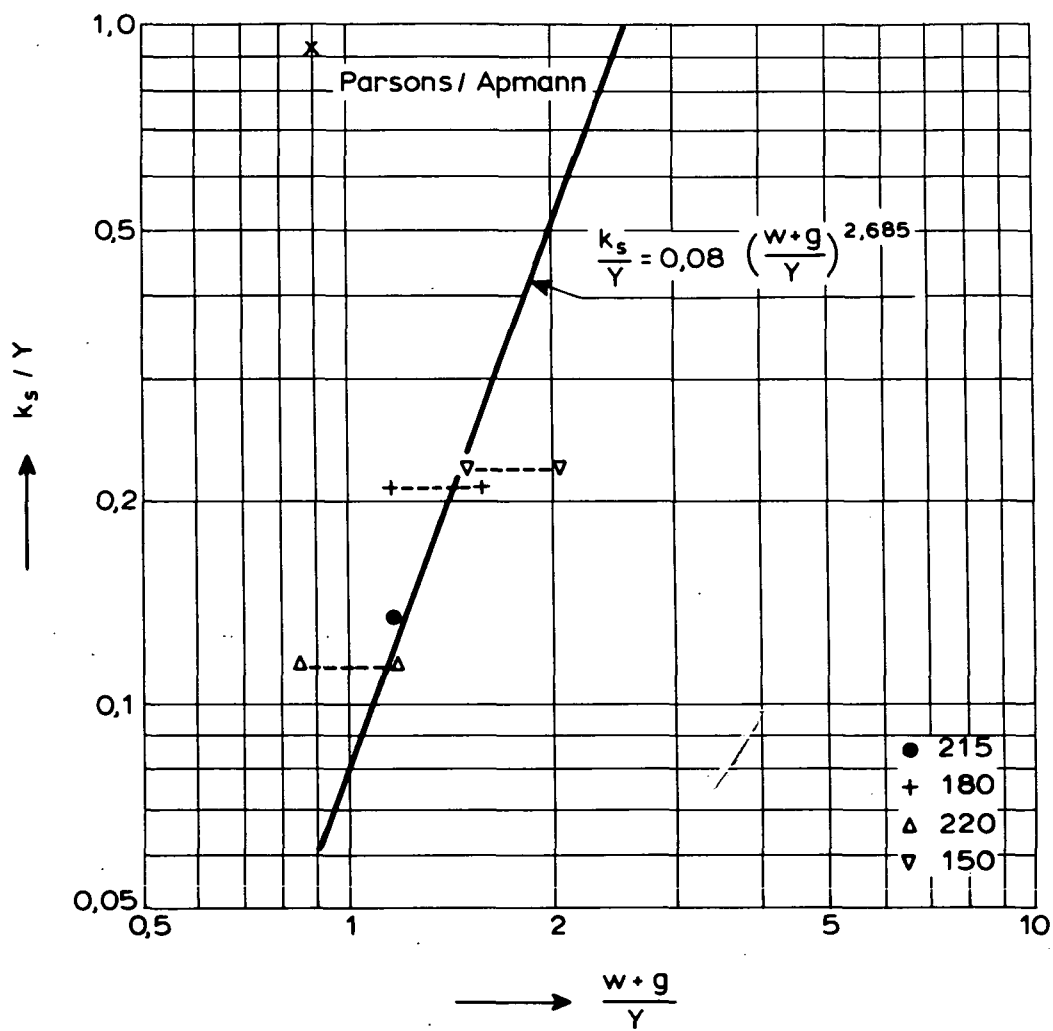
SCHEMATISATIE ARMORFLEX - BLOK

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 439

FIG. 25



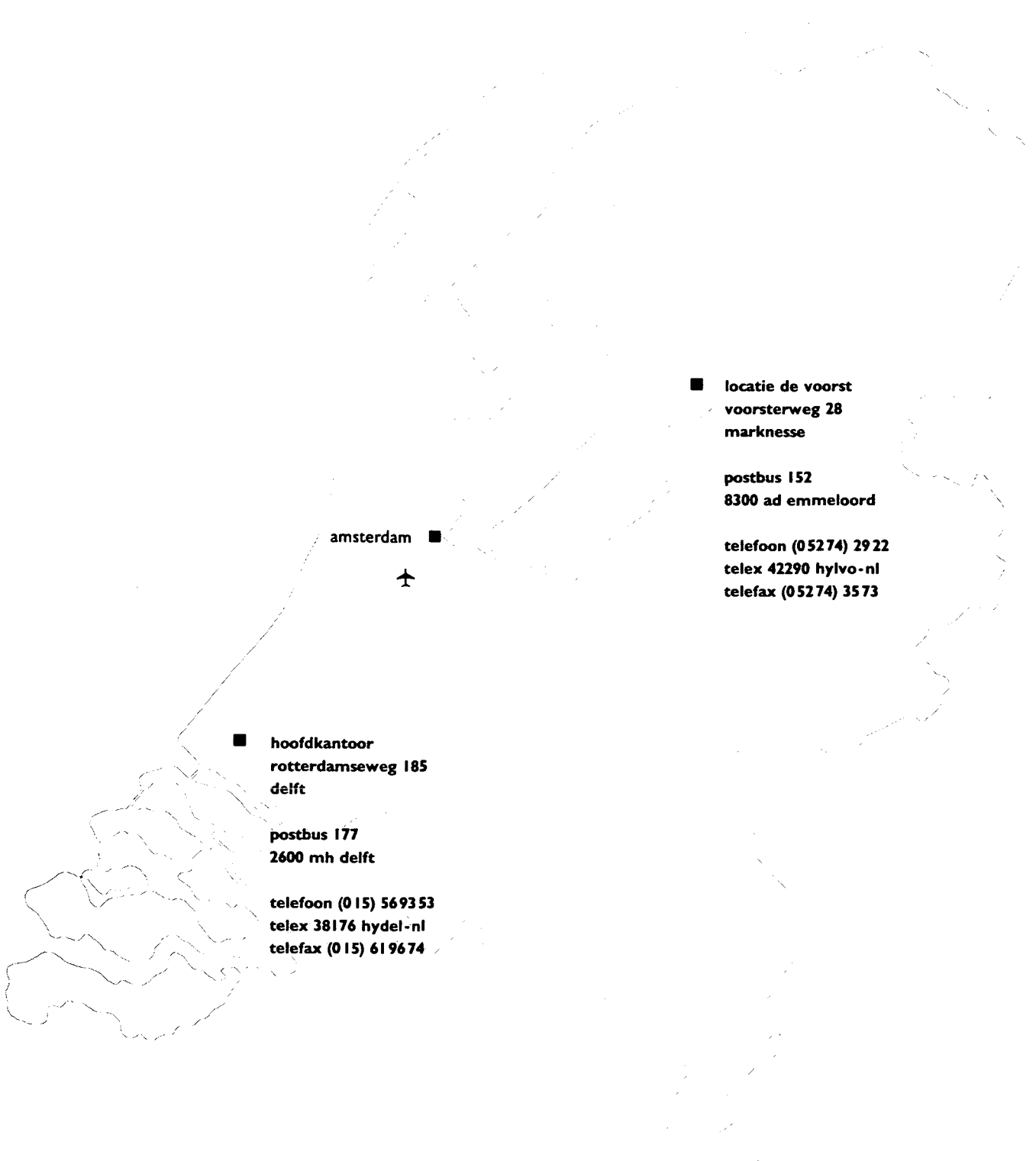


VERGELIJKING GEMETEN EN VOORSPELLING
RUWHEID

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Q 439

FIG. 27



amsterdam ■
✈

■ locatie de voorst
voorsterweg 28
marknesse

postbus 152
8300 ad emmeloord

telefoon (0 5274) 29 22
telex 42290 hylvo-nl
telefax (0 5274) 3573

■ hoofdkantoor
rotterdamseweg 185
delft

postbus 177
2600 mh delft

telefoon (0 15) 569353
telex 38176 hydel-nl
telefax (0 15) 619674

**waterloopkundig laboratorium | wl
advisering & research**