

BRINK DEPTH METHOD FOR FLOW MEASUREMENTS

(Aanvullende metingen van Nederland op
ISO/TC 113/WG 2(Secr-26)95)

D.A. Kraijenhoff van de Leur

A. Dommerholt

Nota 26

Laboratorium voor

Hydraulica en Afvoerhydrologie

April 1973

(70-60)

1996534

INHOUD

	Pag.:
1. Inleiding	1
2. Literatuur onderzoek	1
3. De afvoerrelatie	2
4. Onderzoek	3
4.1. Instrumentarium	3
4.2. Meetgoot	3
4.3. Meetprogramma	3
4.4. Bespreking meetresultaten	5
5. Konklusies	7
Symbolenlijst	8
Literatuurlijst	9

Bijlagen

6 figuren

1 fotopagina.

1. INLEIDING

De mogelijkheid om in een rechthoekig kanaal waarin een loodrechte overstortrand optreedt, de afvoer te bepalen d.m.v. het meten van de einddiepte (Y_e) boven deze rand, is reeds door verschillende onderzoekers bestudeerd. In dit verband werd door India een voorstel tot normalisatie van deze meetmethode bij de I.S.O.* ingediend |1|, |2|. Tijdens een I.S.O.-bijeenkomst te Parijs bleek genoemd voorstel op enige bezwaren te stuiten. Dit is de reden geweest dat in het Laboratorium voor Hydraulica en Afvoerhydrologie van de Landbouwhogeschool te Wageningen een aantal aanvullende metingen zijn verricht.

2. LITERATUUR ONDERZOEK

Rouse |3| beschouwt de vrije overstort als een scherpe overlaat met een hoogte nul en komt daarbij tot een theoretische kontraktie-koëfficiënt van 0.715. Deze koëfficiënt C_c volgt uit de basisformule voor stuwen:

$$Q = C_c \frac{2}{3} (2g)^{1/2} B \left[\left(h + \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} \right]$$

en is gelijk aan $\frac{C_q}{C_v}$, waarin C_q = afvoerkoëfficiënt en C_v = snelheidskoëfficiënt. Uit vele metingen vond Rouse een waarde van 0.715 voor de verhouding van de einddiepte Y_e tot de berekende kritische diepte $Y_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{1/3}$ in een breed rechthoekig kanaal (fig. 1). De bijbehorende afvoerformule luidt:

$$q = g^{1/2} \cdot \left(\frac{Y_e}{0.715} \right)^{3/2}$$

In hun onderzoek vonden Bauer en Graf |4| een gemiddelde waarde van 0.781 voor de verhouding van Y_e en Y_c . Dit onderzoek hield verschillende waarden in voor helling en ruwheid. De verhouding 0.781 wijkt aanzienlijk af van de door Rouse gegeven waarde en is waarschijnlijk te wijten aan een te korte gootlengte.

Deze onvolkomenheid werd reeds door de auteurs zelf genoemd.

* I.S.O. = International Organization for Standardization.

Het reeds genoemde Indiase voorstel tot normalisatie |1|, |2| geeft dezelfde afvoerformule als Rouse, ook voor een bodemhelling tot maximaal 0.0025. Wat de breedte-diepte verhouding van het kanaal betreft zijn in dit voorstel geen beperkingen opgenomen.

Kalkwijk |5| gaat uit van een publikatie van Andersen waarin deze voor $\frac{Y_o}{Y_c} > 1$ (stromend water) voor $\frac{Y_e}{Y_c}$ een waarde geeft van 0.695.

Kalkwijk leidt af dat voor de grootste helling (0.0025) uit het Indiase voorstel bij gladde wanden en bodem schietend water kan voorkomen.

In dat geval is $\frac{Y_o}{Y_c} < 1$ en zou de waarde $\frac{Y_e}{Y_c}$ afwijken van 0.695.

3. DE AFVOERRELATIE

Door het aannemen van evenwijdige stroomlijnen is het mogelijk te berekenen dat de verhouding van de einddiepte (Y_e) tot de kritische diepte (Y_c) gelijk is aan 0.715. Voor de afleiding van deze relatie zie o.a. Rouse |3|.

De specifieke energiehogte H_o in de goot is: $H_o = y + \alpha \frac{v^2}{2g}$... (1)

waarin y de waterdiepte en tevens de ligging van het piëzometrisch niveau aangeeft, omdat de kromming van de stroomlijnen kan worden verwaarloosd. In een rechthoekig leidingprofiel geldt verder: $\frac{Q}{B} = q = \bar{v}y$, dus $\bar{v} = \frac{q}{y}$.

Formule (1) wordt nu: $H_o = y + \alpha \frac{q^2}{gy^2}$... (2)

H_o zal een minimum bereiken bij $\frac{dH_o}{dy} = 0$. Dit toegepast op formule (2) levert:

$$0 = 1 - \alpha \frac{q^2}{gy^3} \text{ of}$$

$$y = \left(\frac{\alpha q^2}{g}\right)^{1/3} = Y_c \text{ of}$$

$$q = \left(\frac{gY_c^3}{\alpha}\right)^{1/2} \dots (3)$$

Door Y_c te berekenen uit de gemeten Y_e en deze in formule (3) te substitueren ontstaat een eenvoudige afvoerformule. Uitgaande van $\frac{Y_e}{Y_c} = 0.715$ levert dit op:

$$q = \left(\frac{Y_e}{0.715}\right)^{3/2} \left(\frac{g}{\alpha}\right)^{1/2} \dots (4)$$

4. ONDERZOEK

4.1. Instrumentarium

Voor het meten van snelheidsprofielen werd gebruik gemaakt van een wandpitotbuis, zoals is beschreven door Ippen e.a. [7]. Deze pitotbuis was verbonden met een drukverschilopnemer, die het drukverschil via een meetversterker en een quadrafilter overbracht op een recorder. Dit quadrafilter maakte een rechtstreekse registratie van de snelheden mogelijk.

Precies boven de overstortrand in de hartlijn van de goot werd de einddiepte Y_e gemeten met behulp van een waterstandsvolger, type "Wavo" [8] (fig. 1). Het principe van dit instrument is dat een draadje met een hoge frequentie loodrecht op het wateroppervlak trilt (zie fotopagina). De benodigde elektronische apparatuur brengt de stand van het draadje over op een recorder die de einddiepte Y_e registreert.

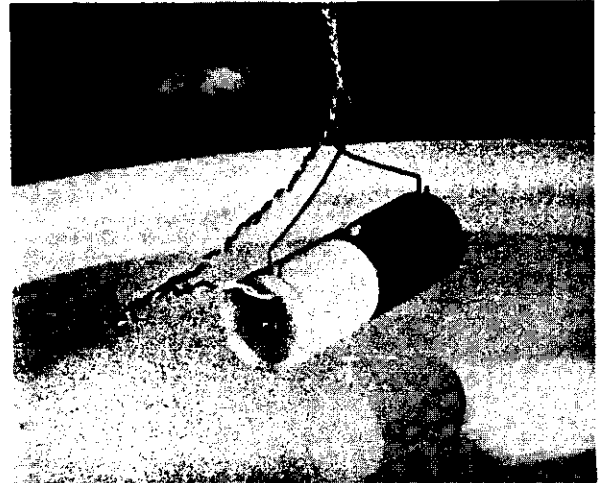
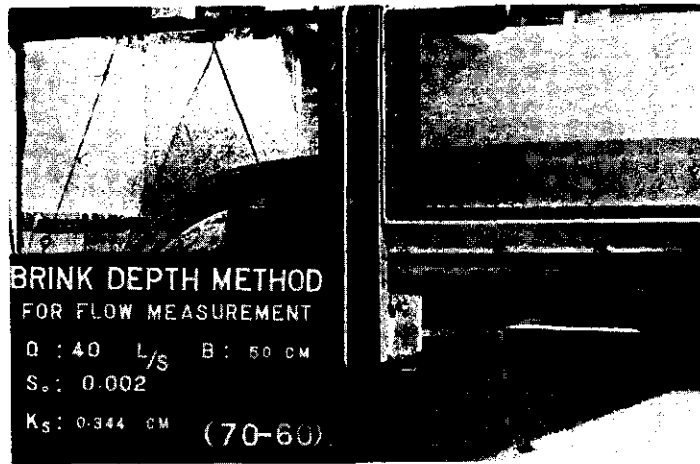
4.2. Meetgoot

De bodem van de meetgoot bestaat uit gepolijste hardstenen platen. De lengte is 15 m en de afstand tussen de verticale glazen zijwanden is bij benadering 1 m. De grootste waarde van de instelbare helling is $5^{\circ}30'$. Naast de metingen welke werden uitgevoerd over de bovengenoemde gladde bodem, werden proeven genomen met een kunstmatige ruwheid. Deze ruwheid werd bereikt door de bodem te bedekken met glasplaten waarop in een regelmatig patroon glazen bolletjes waren gelijmd (fig. 2 en fotopagina). Het beschikbare debiet in de goot was beperkt tot $0.055 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Het debiet werd volumetrisch gemeten in een geijkt reservoir. Teneinde een voldoende diepte-breedte verhouding in de goot te bereiken, werd de effectieve breedte door het plaatsen van een gepolijste en watervast gelakte wand teruggebracht tot 0.5 m.

4.3. Meetprogramma

Voor alle metingen bleek de effectieve lengte met een redelijke eenparige stroomverdeling 12 m te bedragen. De gootbreedte was 0.5 m. De bodemhelling werd als volgt gevarieerd:

$$S_0 = 0; S_0 = 0.001; S_0 = 0.002; S_0 = 0.0025.$$



De tweede onafhankelijke variabele was de bodemruwheid:

- a. Gladde bodem van gepolijste hardstenen platen. De voegen, met een onderlinge afstand van 1 m, waren opgevuld met neopreen dat zo glad mogelijk was afgewerkt.
- b. Een regelmatig patroon van glaskorrels van 0.0039 m diameter gelijmd op glasplaten zoals aangegeven in fig. 2. De stroomrichting in de figuur is horizontaal. Voor deze ruwheid is de karakteristieke afstand $D = 0.04$ m. Rouse [9] heeft een groot aantal experimentele gegevens van dergelijke bepaalde ruwheden verzameld en fig. 2A is ontleend aan zijn publikatie. De middelste lijn heeft betrekking op een patroon van bolvormige voorwerpen zoals deze in het onderhavige onderzoek zijn toegepast. De bezettingsgraad λ van de korrels met een diameter van 0.0039 m en met een karakteristieke afstand van $D = 0.04$ m is $\lambda = 0.0075$.
Met behulp van fig. 2A blijkt de equivalente zandruwheid $k = \pm 8 \cdot 10^{-4}$ m te zijn.
- c. Deze ruwheid is gelijk aan die welke onder sub b. beschreven is, alleen is de karakteristieke afstand D teruggebracht tot $D = 0.02$ m.
Hieruit volgt dat $\lambda = 0.0298$ en $k = \pm 3 \cdot 10^{-3}$ m.

De derde variabele is het debiet. Bij iedere combinatie van helling en ruwheid werden 8-10 debieten doorgemeten, variërende van $\pm 0.005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ tot $0.055 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. In een breed rechthoekig kanaal komt dit overeen met respectievelijk $q = \pm 0.010 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en $0.110 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

In zijn rapport over vrije uitstroming aan het einde van prismatische kanalen beschreef Garbrecht [10] de invloed van de wanden en bodem op de snelheidsverdeling en het effect daarvan op de plaats van de overgang van stromend naar schietend water op verschillende afstanden van de wanden. Garbrecht konstateerde dat dicht bij de wand de overgang van stromen naar schieten op kortere afstand van de rand van de vrije uitstroming optrad. Ook dit aspect werd onderzocht en fig. 3 toont de gemeten snelheidsverdelingen op drie niveaus in de dwarsdoorsnede van de goot waar de kritische diepte volgens de formule $Y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$ zou moeten optreden. Aangezien deze formule geldt voor tweedimensionale stroming, kan verwacht worden dat de breedte-diepte verhouding zekere grenzen stelt aan de "end depth method".

4.4. Bespreking meetresultaten

Uitgaande van de veronderstelling dat de afhankelijke variabele Y_e een functie is van de volgende onafhankelijke variabelen:

- q - het debiet per breedte-eenheid
- k - de ruweheidsmaat van de bodem
- v - de kinematische viscositeit
- ρ - de dichtheid van het water
- g - de versnelling van de zwaartekracht
- S_o - de bodemhelling,

verkrijgt men de onderstaande groepering van dimensieloze variabelen:

$$\frac{Y_e}{k} = f\left(\frac{v}{q}, \frac{k^3 g}{q^2} \text{ en } S_o\right) = f\left(R_e, \frac{k}{Y_c} \text{ en } S_o\right)$$

N.B.: Replogle [12] toonde aan dat de invloed van de verdelingskoëfficiënten α en β op de verhouding $\frac{Y_e}{Y_c}$ te verwaarlozen is.

Aangezien het doel van dit onderzoek het verband tussen Y_e en $Y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$ betreft, werden deze grootheden in een grafiek tegen elkaar uitgezet (zie fig. 4).

Het getal van Reynolds (R_e) en de bodemhelling zouden aanleiding kunnen zijn voor systematische afwijkingen van een gemiddeld verband tussen $\frac{Y_e}{Y_c}$. Dit verband werd benaderd door middel van een lineaire regressie tussen Y_e en Y_c met behulp van de formule $Y_e = aY_c$. Door alle uitgevoerde metingen in te voeren werd een regressie koëfficiënt $a = 0.714$ gevonden. De eventuele invloed van de bodemhelling buiten beschouwing latende, werd de regressie koëfficiënt voor drie toegepaste ruwheden bepaald. Een gladde bodem leverde $a = 0.716$ op en voor de equivalente zandruwheden $k = 0.0008$ en $k = 0.003$ m werd respectievelijk $a = 0.721$ en $a = 0.704$ gevonden. Voor deze kleine variatie was geen verklaring te vinden.

In fig. 5 is een poging gedaan om de invloed van de andere variabelen, te weten de bodemhelling S_o en het getal van Reynolds, R_e , na te gaan.

Voor Reynolds getallen kleiner dan $2 \cdot 10^4$ overeenkomende met $q = \pm 0.002 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ werden de waarden van $\frac{Y_e}{Y_c}$ enigszins lager. Dit zou

toegeschreven kunnen worden aan de invloed van de viskositeit, vooral bij gladde bodem. Een systematische invloed van de bodemhelling S_0 kan niet ontdekt worden. Deze bevindingen bleken overeen te komen met die van Delleur, Dooge en Gent [12] die eveneens geen invloed van ruwheid en helling constateerden. De gevonden waarde van 0.714 voor alle metingen gezamenlijk komt zeer goed overeen met de waarde van 0.715 van Rouse die in het Indiase voorstel naar voren wordt gebracht.

Bij de beschouwing van schijnbaar systematische invloeden in fig. 5, moet met de beperkte nauwkeurigheid van de metingen rekening worden gehouden. Dergelijke afwijkingen worden daarom niet significant geacht.

Uitgaande van de gemiddelde verhouding van $\frac{Y_e}{Y_c} = 0.714$ als referentiewaarde bleek dat de afwijking bij 4 van alle metingen met $q > 0.002 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (80 metingen) groter was dan 2% en in slechts één geval de 3% te boven ging. Deze afwijkingen komen bij benadering overeen met fouten in de berekende afvoeren van respectievelijk 3% en 4,5%.

Fig. 3 toont enige invloed van de zijwanden op de snelheidsverdeling, zoals aangegeven door Garbrecht. Dit lijkt een punt voor voortgezet onderzoek te kunnen zijn.

Ofschoon op verschillende plaatsen in de literatuur de evenwichtsdiepte ingevoerd is teneinde zowel de kritische diepte als de einddiepte als dimensieloze grootheden weer te geven, leek dit de schrijvers dezes niet noodzakelijk. Bovendien zou dit het geval van een horizontale bodem uitsluiten. Zelfs bij de kleine waarden voor S_0 die in dit onderzoek werden toegepast, was de lengte van de meetgoot niet voldoende om volledige eenparige stroming te ontwikkelen. Bovendien traden bij hoge debieten staande golven op.

In zijn artikel over de "brink depth method" merkte Kalkwijk op dat schietend water zou kunnen voorkomen in een gladde goot met een bodemhelling van $S_0 = 0.0025$. Deze veronderstelling werd weliswaar niet bevestigd door de huidige metingen, maar enige metingen met een bodemhelling van 0.0050 leverden wel schietend water op.

Kalkwijks benadering volgende, wordt Thijsse's formule, zoals die gegeven is in de ASCE Task Force on Friction Factors in

Open Channels |13|, gebruikt om de Chézy koëfficiënt voor een glad rechthoekig kanaal te bepalen:

$$C = 18 \log \frac{11.7 R_e}{C} m^{\frac{1}{2}} s^{-1} \quad \text{waarin } R_e = \frac{Q}{(B + 2Y)v}$$

Als de invloed van de zijwanden op de snelheidsverdeling in de dwarsdoorsnede buiten beschouwing gelaten wordt is de kritische diepte $Y_c = \left(\frac{Q^2}{B^2g}\right)^{1/3}$.

Voor het minimum debiet $Q = 0.005 m^3 s^{-1}$ werden de volgende waarden gevonden: $Y_c = 0.0217 m$, $R_e = 8.365 \times 10^3$, $C = 58.1 m^{\frac{1}{2}} s^{-1}$.

De kritische helling voor dit debiet in deze gladde goot is:

$$S_c = \frac{K}{C^2} \cdot \frac{B + 2Y_c}{B} = 0.00316.$$

Voor het maximum debiet $Q = 0.055 m^3 s^{-1}$ werden deze waarden:

$$Y_c = 0.1072 m, R_e = 6.959 \times 10^4, C = 72.9 m^{\frac{1}{2}} s^{-1} \text{ en } S_c = 0.00264.$$

Uit het bovenstaande kan in overeenstemming met de formule van Thijssse gekonkludeerd worden dat de bodem van hardstenen platen volkomen glad is en dat het grootste toegepaste debiet bij $S_o = 0.0025$ bijna de grens vormt tussen stromen en schieten. Dit houdt in dat grotere debieten met $S_o = 0.0025$ inderdaad schietend water zouden opleveren en $a = \frac{Y_e}{Y_c}$ dan zou afnemen, zoals is getoond in |12|.

5. KONKLUSIES

Voor zover de volgende konklusies niet in tegenspraak zijn met de aanmerkingen van Nederland op Doc. ISO/TC 113/WG 2 (secr-26)95, moeten ze beschouwd worden als aanvullende informatie.

a. In een serie van 100 metingen bleek de verhouding tussen de einddiepte en de kritische diepte in een breed rechthoekig kanaal een gemiddelde waarde van 0.714 te bezitten.

Deze waarde werd niet significant beïnvloed door de bodemhelling of door de bodemruwheid. De waarde is goed in overeenstemming met de waarde van 0.715 zoals die gegeven is door Rouse en is voorgesteld in het Indiase voorstel.

b. De resultaten wijzen op zekere grenzen voor wat betreft het getal van Reynolds en de breedte-diepte verhouding. Meer onderzoek zal vereist zijn om deze grenzen te bepalen.

SYMBOLENLIJST

- Q : Afvoer per tijdseenheid.
- q : Afvoer per tijdseenheid per eenheid van breedte.
- Y_c : Kritische diepte.
- Y_e : Einddiepte (diepte ter plaatse van de "brink").
- Y_o : Evenwichtsdiepte.
- a : $\frac{Y_e}{Y_c}$.
- g : Versnelling van de zwaartekracht.
- D : Afstand tussen rijen korrels (voor ruwe bodem, zie fig. 2).
- d : Korreldiameter (voor ruwe bodem).
- k : Equivalente zandruwheid.
- S_o : Helling van de bodem.
- B : Breedte van de goot.
- α : Korrektiefactor voor de snelheidshoogte.
- v : Stroomsnelheid.
- \bar{v} : Gemiddelde stroomsnelheid.
- H_o : Specifieke energiehogte.
- C : Koëfficiënt van Chézy.
- R_e : Getal van Reynolds.

LITERATUURLIJST

- | 1| "Second Draft Proposal for ISO Recommendation (Supplementary) on Brink Depth Method for Measurement of Flow at Free Overfall" (67-12-26) from India. ISO/TC 113/WG 2 (secr-26)95.
- | 2| End Depth Method for Estimation of Flow in Rectangular Channels with a Free Overfall (Approximate Method) - Second Draft Indian Proposal. ISO/TC 113/WG 2 (India-14)148.
- | 3| Rouse, H.: "Discharge Characteristics of the Free Overfall" (Civil Engineering, April 1936, Vol. 6, No. 4).
- | 4| Bauer, Sebastian W. and Graf, Walter H.: "Free Overfall as Flow Measuring Device" (Journal of the Irrigation and Drainage Division, March 1971).
- | 5| Kalkwijk, Ir. J.P.Th.: Some Remarks on "Brink Depth Method for Measurement of Flow at a Free Overfall" with reference to the ISO-Proposal concerned (May 1968) ISO/TC 113/WG 2(Neth-8)116.
- | 6| Ippen, A.T.; Drinker, P.A.; Jokin, W.R. and Noutsopoulos, G.K.: "The distribution of boundary shear stresses in curved trapezoidal channels" (Techn. report no. 43, Mass. Inst. of Technology, Oct. 1963).
- | 7| Gasbeek, G.H.: "Een meetopstelling voor het dynamisch meten van enige hydraulische grootheden" (Nota no. 23, Laboratorium voor Hydraulica en Afvoerhydrologie, Landbouwhogeschool, Wageningen).
- | 8| Delft Hydraulics Laboratory (P.O. Box 177, Delft) "Waterlevel Follower (vibrating needle)" - Technical description.
(Manufactured under the licence of: "Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou, France").
- | 9| Rouse, H.: "Critical Analysis of Open-Channel Resistance" (Journal of the Hydraulics Division, July 1965, Vol. 91, pages 1-25).
- | 10| Garbrecht, Günther: "Über den stetigen Fließwechsel oberhalb von Abstürzen" (Die Wasserwirtschaft, 1964, no. 1).

- |11| Replogle, J.A.: Discussion on "End depth at a drop in trapezoidal channels by M.H. Diskin, (Proc. ASCE, Vol. 88, no. HY 2, March 1962, p. 161).
- |12| Delleur, J.W.; Dooge, J.C.I.; Gent, K.W.: "Influence of Slope and Roughness on the Free Overfall" (Proc. ASCE, Vol. 82, no. HY 4, August 1956, p. 1038).
- |13| Report, ASCE Task Force on Friction Factors in Open Channels, Proc. ASCE, Vol. 89, no. HY 2 (March 1963), p. 97.

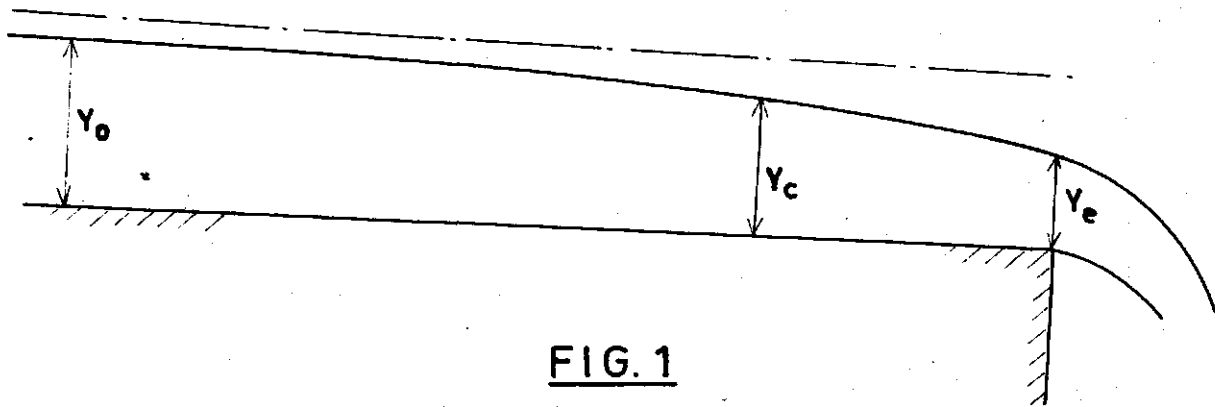


FIG. 1

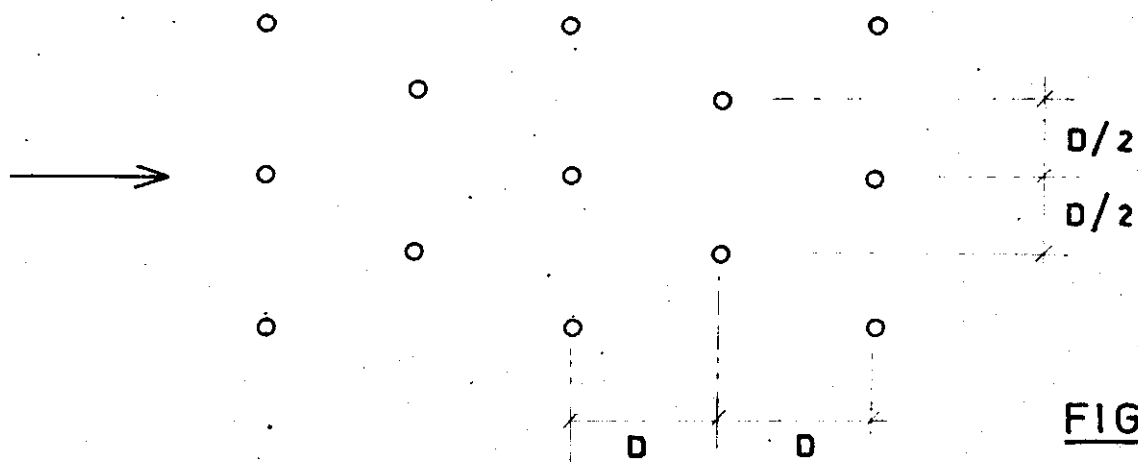


FIG. 2

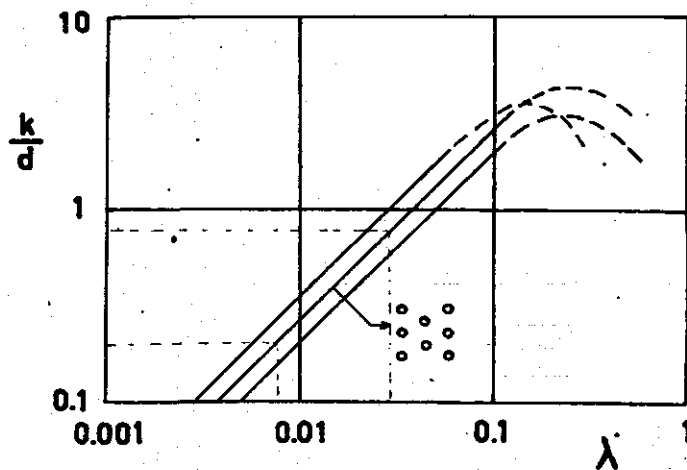


FIG. 2 a

FIG. 3

$S_0 = 0$
 $B = 50 \text{ cm}$
 $q = 3,262 \text{ l/sec/dm}$
 smooth bottom

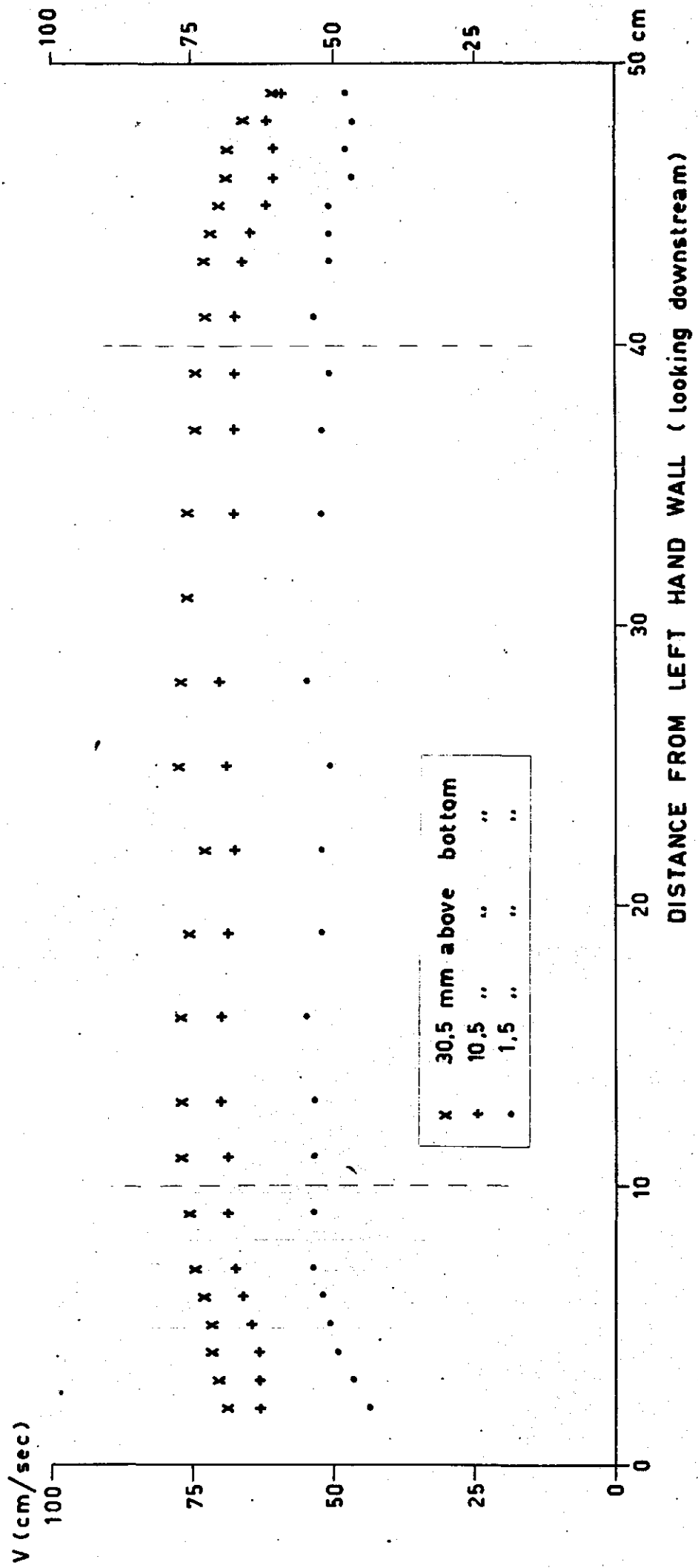


FIG. 4

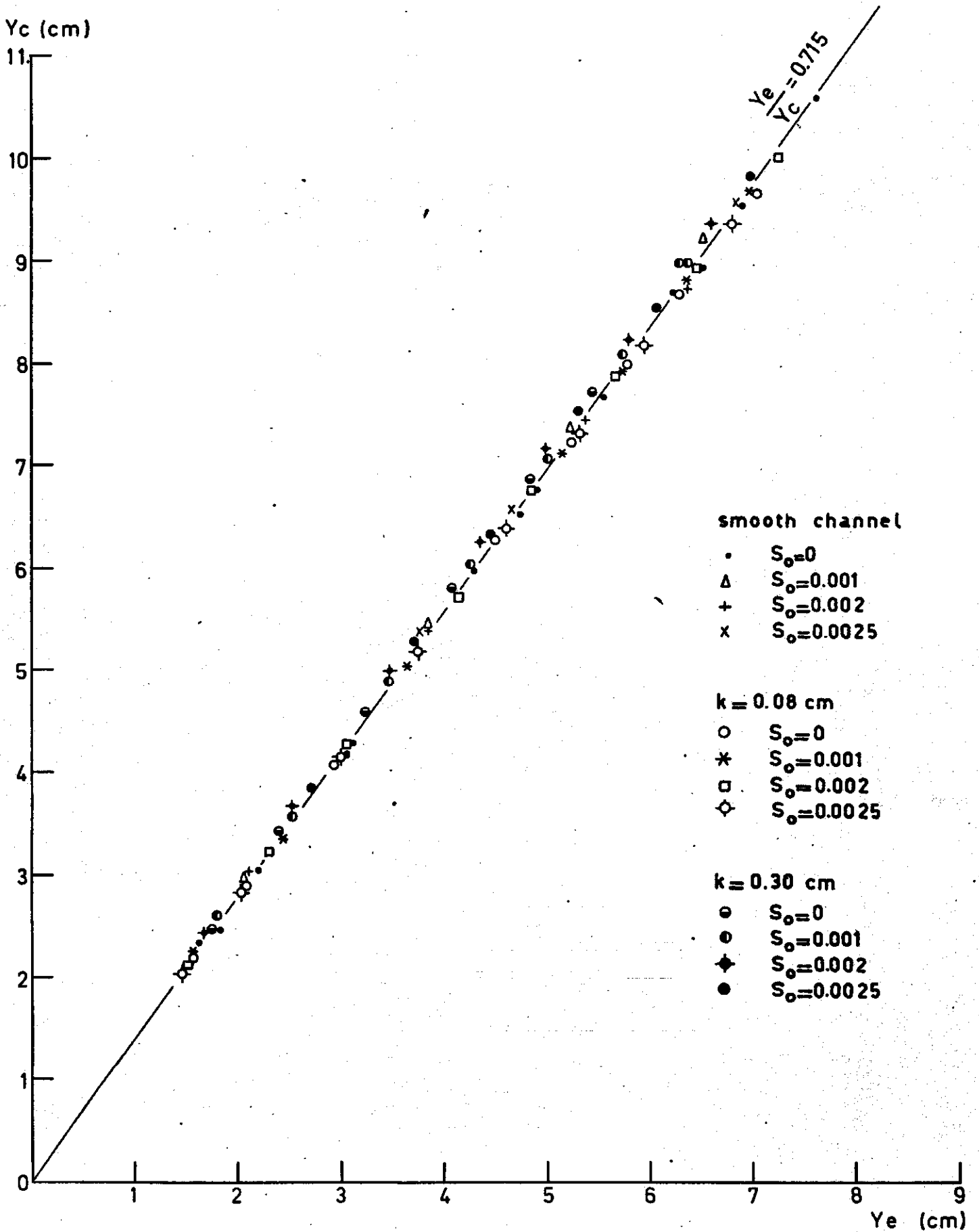


FIG. 5

