

NN31545.0614

NOTA 614

30 maart 1971

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding  
Wageningen

MODELONDERZOEK OPEN LEIDINGEN  
HYDRAULISCH GLADDE EN RUWE WAND

J.G.S. de Wilde

BIBLIOTHEEK  
STARINGGEBOUW

---

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking.

---



CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS

0000 0672 7198

23 1890

## I N H O U D

	Blz.
INLEIDING	1
BESCHRIJVING MEETOPSTELLING STROMINGSMODEL	2
KARAKTERISERING VAN DE STROMING	3
AARD VAN DE WAND	4
STROMING LANGS HYDRAULISCH GLADDE WAND	6
STROMING LANGS HYDRAULISCH RUWE WAND	9
SAMENVATTING	12
LITERATUURLIJST	14

## INLEIDING

Omtrent de toepassing van de formule van MANNING bij de berekening van open waterleidingen zijn reeds vele artikelen verschenen [o.a. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10].

In enkele van deze artikelen vraagt men zich af of deze formule wel een juist beeld geeft van de stroming in open leidingen.

Manning introduceerde zijn formule in 1889 [5]. Dit was in de tijd toen de invloed van de laminaire grenslaag nog niet bekend was en men nog niet beschikte over het tegenwoordige inzicht in de turbulente beweging langs gladde en ruwe wanden [2, 4, 5].

Het is natuurlijk niet verwonderlijk dat een formule, die zuiver empirisch is en niet berust op een fysisch-mathematische basis, manco's vertoond.

Sinds de invoering van de Manning formule is een groot aantal nieuwe theoriën ontwikkeld en zijn vele laboratorium- en praktijkproeven genomen om uit de resultaten daarvan, bruikbare, voor vele stromingsgevallen geldende vergelijkingen, af te leiden.

De enige jaren geleden in het Staringgebouw opgestelde proefgoot die speciaal bedoeld was om eenvoudige hydraulische modellen te testen, werd gebruikt om een aantal metingen over gladde en ruwe oppervlakken te verrichten.

De opstelling van deze proefgoot zal, waar nodig, in deze nota worden besproken. De nota moet echter in hoofdzaak dienen om de uit de meetresultaten ontstane formuleringen nader toe te lichten en te vergelijken met uit de literatuur bekende gegevens.

In het stromingsmodel wordt de leidingweerstand uitsluitend aan de omtrek opgewekt. De ligging van de bodem is horizontaal waardoor een niet geheel eenparige doch wel permanente stroming ontstaat.

Permanent houdt in, dat er geen verandering in de waterhoogte optreedt met de tijd, op een bepaald punt.

De eventuele onnauwkeurigheid ontstaan door niet zuivere profielafmetingen werd verrekend, evenals verrekening heeft plaatsgevonden

van de energie-toename ontstaan door de snelheidsverhoging bij het benedenstrooms gelegen meetpunt. Voor het verhang is ook steeds het verhang van de energielijn berekend en verwerkt. De onderste afvoerbegrenzing werd veroorzaakt door een onregelmatige watertoevoer bij lagere debieten en de bovenste begrenzing door de opbrengst van de watertoevoerpomp.

#### BESCHRIJVING MEETOPSTELLING STROMINGSMODEL

Een indruk van afmetingen en plaatsing van de diverse onderdelen van de proefopstelling kan worden verkregen uit figuur 1.

Uit een reservoir met een inhoud van ca. 30.000 liter, dat door middel van kunststofbuizen een circuit vormt met de stromingsgoot, wordt water gepompt in een bakvormige constructie die samen met de daar opgestelde apparatuur het constante afvoer-controlegedeelte vormt. Mocht de opbrengst van de afvoerpomp een kleine schommeling vertonen, dan wordt deze teniet gedaan door een instelbare overlooppijp. Met behulp van een recorder K kunnen eventuele opgetreden storingen in de watervoorziening direkt worden opgemerkt. De hoogte van het waterniveau in de bak kan tijdens de meting door middel van een peilnaald G worden afgelezen.

Met behulp van deze peilnaald kan tevens nauwkeurig de volgende debietstap worden ingeregeld.

Uit de bak stroomt het water via een Thomson- of een Cipolettmeet-schot in een verzamelbak waar de watertemperatuur wordt gemeten.

Het water vloeit vervolgens door evenwijdige geleidepijpjes in het eigenlijke houten stromingsmodel. Het talud hiervan heeft een helling van  $45^{\circ}$ , de bodembreedte is 250 mm en het meettraject een lengte van 800 cm.

De bodem en het talud zijn voorzien van pvc-doek met een oneffenheid van 0,02-0,05 mm.

Voor de "hydraulisch ruwe" metingen zijn op het pvc, op afstanden van 10 cm kunststofstrippen met een breedte van 18 mm aangebracht (zie detail figuur 1).

Voor het verkrijgen van bruikbare meetresultaten werd de horizontale

ligging van de op vele plaatsen ondersteunde gootbodem door middel van waterpassing gecontroleerd en ingesteld.

Op 2 plaatsen werd de waterspiegelhoogte bepaald ten opzichte van de bodem door middel van peilnaalden, voorzien van gloeilampindicatie, waarmee een aflezingsnauwkeurigheid van 0,1 mm te behalen is.

Uit de goot stroomt het water vrijuit in een **bassin** waarin de afvoermeting plaats heeft. Het is daarvoor voorzien van 2 niveauelektroden die vooraf op een bepaald hoogteverschil ten opzichte van elkaar werden ingesteld.

Indien het water in het **bassin** stijgt, start bij het aanraken van de laagst geplaatste elektrode (a) een digitale tijd-teleenheid, welke weer stopt als de hooggeplaatste elektrode (b) wordt geraakt door het water.

Als door uitpompen elektrode b vrijkomt, wordt de tijdwaarde van de tel-eenheid uitgeprint en bij vrijkomen van elektrode a wordt de tel-eenheid weer op 0 ingesteld waarna de automatische meetcyclus weer kan beginnen.

#### KARAKTERISERING VAN DE STROMING

Gedurende de proeven, waarbij de wanden niet van kunststofstrip-  
pen waren voorzien, d.w.z. tijdens de "gladde wand" metingen, beweegt het water met grote snelheid door het model. De mogelijkheid van "schietend" water zou zich kunnen voordoen. In deze situatie mag geen gebruik worden gemaakt van de normale stromingsformules. Het karakter van het bewegende water kunnen we nagaan met het getal van FROUDE. Dit getal geeft aan of we met "stromend" dan wel "schietend" water te maken hebben.

De maximumsnelheid in het meettraject van het stromingsmodel zal steeds worden bereikt bij het benedenstroomse meetpunt.

De formule voor de berekening van het getal van Froude luidt:

$$F_r = \frac{\bar{v}}{\sqrt{gD}} \quad (1) \quad [5]$$

waarin:

$\bar{v}$  = de gemiddelde stroomsnelheid in m/sec

$g$  = de zwaartekrachtsversnelling in m/sec<sup>2</sup>

$D = \frac{A}{T}$  is de hydraulische diepte in m

$A$  = de natte doorsnede in m<sup>2</sup>

$T$  = de breedte van het vrije wateroppervlak in m

Indien nu  $F_r < 1$  spreekt men van "stromend" water en

voor  $F_r > 1$  spreekt men van "schiend" water.

Geval A. Gladde wand

$\bar{v}$  max. = 0,605 m/sec  $g = 9,81$  m/sec<sup>2</sup>  $T = 0,42$  m

$A = 0,028$  m<sup>2</sup>  $D = \frac{A}{T} = \frac{0,028}{0,42} = 0,0666$  m

$$F_r = \frac{0,605}{\sqrt{9,81 \times 0,0666}} = \sim 0,748 < 1. \text{ Dus het water "stroomt"}$$

Geval B. Ruwe wand

$\bar{v}$  max. = 0,29 m/sec  $T = 0,52$  m  $A = 0,053$  m<sup>2</sup>

$D = \frac{0,053}{0,52} = 0,102$  m

$$F_r = \frac{0,29}{\sqrt{9,81 \times 0,102}} = \sim 0,29 < 1 \text{ Dus het water "stroomt"}$$

Hieruit blijkt dat het stadium van "schiend" bij geen van de uitgevoerde metingen werd bereikt.

#### AARD VAN DE WAND

Het pvc-doek aangebracht op bodem en talud werd als gladde wand beschouwd. Er dient nu te worden nagegaan of deze wand als hydraulisch glad mag worden opgevat.

De technische oneffenheid van het pvc-doek is erg klein en de grootte van de wandoneffenheid  $k$  ligt dan ook (volgens AKZO Arnhem) tussen 0,02 en 0,05 mm. Aangehouden werd  $k_{\max.} = 0,05$  mm

Voor een hydraulisch gladde wand moet gelden, dat het quotiënt van de dikte van het laminaire sublaagje van PRANDTL ( $\delta$ ) en de wandoneffenheid ( $k$ )

groter moet zijn dan 4,

$$\text{dus } \frac{\delta}{k} > 4 \quad [3]$$

De dikte van het laminaire sublaagje kunnen we berekenen met de formule van NIKURADSE:

$$\delta = \frac{12 \sqrt{\nu}}{\sqrt{g \cdot R \cdot S}} \quad (2)$$

waarin:

$\delta$  = dikte van het laminaire sublaagje in m

$\nu$  = kinematische viscositeit in  $\text{m}^2/\text{sec}$

$g$  = zwaartekrachtsversnelling is  $9,81 \text{ m/sec}^2$

$R$  = hydraulische straal in m

$S$  = verhang van de energielijn in  $\text{m/m}$

Voor het gehele meetgebied "gladde wand" moet nu  $\delta_{\text{min.}}$  bepaald worden. Deze waarde verkrijgen we indien voor het produkt van  $R$  en  $S$  de maximale waarde wordt ingevuld.

$R = 0,061 \text{ m}$  en  $S = 0,00094 \text{ m/m}$

De gemiddelde kinematische viscositeit werd aan de hand van de temperatuur voor het gehele proces vastgesteld op  $\nu = 1,18 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$

$$\delta_{\text{min.}} = \frac{12 \sqrt{\nu}}{\sqrt{g \cdot R \cdot S}} = \frac{12 \times 1,18 \times 10^{-6}}{\sqrt{9,81 \times 0,061 \times 0,00094}} = 0,597 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,597 \text{ mm}$$

$$k_{\text{max.}} = 0,05 \text{ mm} \quad \text{dus} \quad \frac{\delta}{k} = \frac{0,597}{0,05} = \sim 12$$

Hieruit volgt dat de stroming is op te vatten als een stroming langs een hydraulisch gladde wand.

Bij de beschrijving van de meetopstelling is reeds uiteengezet wat wordt verstaan onder een ruwe wand.

Voor de ruwe wand moet echter nog worden vastgesteld of zij inderdaad hydraulisch ruw is voor het gehele meetgebied.

De grootte van de wandoneffenheid  $k = 18 \text{ mm}$ . Deze ruwheid komt ongeveer overeen met grind-, gezette steen-, of oude betonnen wanden.

Voor een hydraulisch ruwe wand moet gelden dat

$$k > 6\delta \quad \text{of} \quad \frac{\delta}{k} < \frac{1}{6}$$

[3]

[2, 3]

Voor het ruwe meetgebied moeten we nu  $\delta_{\max.}$  bepalen.

Die waarde verkrijgen we indien we voor het produkt RS de minimale waarde invullen. Hiervoor is

$$R = 0,03166 \text{ m} \quad S = 0,000785 \text{ m/m} \quad \text{en} \quad \bar{v} = 1,18 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec} \quad g = 9,81 \text{ m/sec}^2$$

$$\delta = \frac{12 \times 1,18 \times 10^{-6}}{\sqrt{9,81 \times 0,03166 \times 0,000785}} = 0,0009068 \text{ m} \approx 0,9 \text{ mm}$$

$$\frac{k}{\delta} = \frac{18}{0,9} = 20 \quad \text{dus } k \gg 6\delta$$

Dit betekent dus dat we inderdaad met een stroming langs een hydraulisch ruwe wand te maken hebben.

Opmerking:

Het gebied tussen hydraulisch glad en hydraulisch ruw, dus dat gebied waarvoor  $\frac{1}{6} < \frac{\delta}{k} < 4$  geldt, heet het overgangsgebied.

#### STROMING LANGS HYDRAULISCH GLADDE WAND

Door middel van een diagram dat de relatie weergeeft tussen het getal van REYNOLDS  $Re$  en de wrijvingsfaktor  $f$  (wordt bij buizen  $\lambda$  genoemd) van DARCY-WEISBACH kan een stromingsbeeld gevormd worden.

Een diagram dat aldus ontstaan is, wordt een STANTON-diagram genoemd, het werd oorspronkelijk ontwikkeld voor buizen, doch is voor open leidingen ook goed te gebruiken. [5]

De begrenzingen van de gebieden waar laminaire of turbulente stroming optreedt, alsmede het tussenliggende overgangsgebied kan hierin worden aangegeven.

De stroming in buizen verandert van laminair naar turbulent tussen de  $Re$ -waarden van 2000 en 10.000. Opgemerkt dient te worden dat er in werkelijkheid geen scherpe bovenste begrenzing is. [2, 5]

Voor bepaling van het Reynolds getal wordt gebruik gemaakt van de formule:

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot L}{\nu} \quad (3) \quad [5]$$

waarin:  
 $\bar{v}$  = de gemiddelde stroomsnelheid in m/sec  
 $L$  = de karakteristieke lengte in m  
 $\nu$  = de kinematische viscositeit in  $\text{m}^2/\text{sec}$



Bij buizen wordt voor de karakteristieke lengte de diameter D genomen en voor open leidingen de hydraulische straal R.

Aangezien  $D = 4R$  mogen we, indien we R in (3) invullen, stellen dat het overgangsgebied tussen laminaire en turbulente stroming zich bij open leidingen uitstrekt tussen de 500 en 2500, alhoewel de bovenste begrenzing evenals bij buizen niet scherp te stellen is.

Voor open leidingen wordt (3) dus:

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot R}{\nu} \quad (3A)$$

De wrijvingsfaktor f laat zich berekenen uit de formule van Darcy-Weisbach:

$$f = \frac{8gR Se}{\bar{v}^2} \quad (4)$$

waarin:

$g$  = de zwaartekrachtsversnelling in  $m/sec^2$

$R$  = de hydraulische straal in m

$Se$  = het verhang van de energielijn in m/m

$\bar{v}$  = de gemiddelde stroomsnelheid in m/sec

De gestreepte lijn in figuur 2 (stanton-diagram) geeft de relatie weer tussen de uit de meetresultaten berekende waarden voor f en  $Re$  op dubbel-logaritmisch papier voor de stroming langs de hydraulisch gladde wand.

Tot  $Re = 900$  is er nog sprake van een zekere laminaire stroming, hetgeen zich uit in het lineaire verband tussen f en  $Re$ .

De punten bevinden zich dan tussen  $f = \frac{17}{Re}$  en  $f = \frac{24}{Re}$ .

Tot  $Re = ca. 3500$  strekt zich ongeveer het overgangsgebied uit, want vanaf deze waarde gaat de puntenzwerm zich richten naar de door BLASIUS bepaalde relatie  $f = \frac{0,223}{Re^{0,25}}$ . Dit verband geldt voor  $Re$ -waarden tussen 750-25.000. Voor hogere  $Re$ -waarden, dus boven de 25.000, geldt de relatie die door Prandtl-von Karman gevonden is:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re \sqrt{f}) + 0,4$$

Opmerking:

Door technische begrenzingen konden geen meetresultaten worden verkregen voor  $Re < 500$  en  $Re > 35.000$

Volgens Prandtl-Nikuradse is bij stroming langs een hydraulisch gladde wand  $f$  een functie van  $Re$ .

Veel wordt daarom gebruik gemaakt van deze relatie en een formule<sup>afgeleid</sup> van de vorm  $\frac{1}{\sqrt{f}} = a \log Re \sqrt{f} + b$  [1]

In figuur 3 wordt dit verband, tussen  $\frac{1}{\sqrt{f}}$  en  $Re \sqrt{f}$  op half-logarithmisch papier weergegeven door de uit de resultaten bepaalde regressielijn, voor de stroming langs de hydraulisch gladde wand:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,51 \log Re \sqrt{f} + 2,38 \quad (5)$$

waarbij een correlatiecoëfficiënt van  $r = 0,9369$  werd berekend.

Voor stromingen in open leidingen maakt men voor het bepalen van de gemiddelde snelheid veel gebruik van de formule van CHEZY:

$$\bar{v} = C \sqrt{R \cdot Se} \quad (6)$$

De  $C$  in deze formule wordt de coëfficiënt van Chezy genoemd en uitgedrukt in  $m^{1/2}/sec$ .

Voor stroming langs hydraulisch gladde wanden blijkt deze  $C$  uitsluitend een functie van  $Re$  te zijn, dus  $C = f(Re)$  [2]

De formule die naast (6) nog veel toepassing vindt, is die van Manning:

$$\bar{v} = k_M \times R^{2/3} \cdot Se^{1/2} \quad (7)$$

De faktor  $k_M$  wordt de coëfficiënt van Manning genoemd. Hij heeft de dimensie  $m^{1/3}/sec$  en blijkt een functie te zijn van de relatieve wandruwheid  $\frac{k}{R}$ .

Stellen we (6) en (7) gelijk dan vinden we  $C = k_M \cdot R^{1/6}$

waarbij dan echter  $C = f(Re)$  en  $k_M = f\left(\frac{R}{k}\right)$

Hieruit blijkt dus dat de formule van Manning niet is te gebruiken voor stroming langs hydraulisch gladde wanden. Aangezien de wandoneffenheid in ons geval een constante waarde heeft die ligt tussen 0,02 en 0,05 mm moet, indien  $k_M = f\left(\frac{R}{k}\right)$ ,  $k_M$  bij een toename van  $R$  ook toenemen.

In figuur 4 zijn de uit de metingen langs de gladde wand berekende  $k_M$ -waarden uitgezet tegen  $R$ . Aan de relatie die wordt voorgesteld door de streeplijn is duidelijk te zien dat bij een toename van  $R$  de waarden van  $k_M$  konstant blijven.

(De  $k_M$ -waarden liggen tussen ca. 100-120  $m^{1/3}/sec$ ).

Hieruit blijkt dat de formule van Manning inderdaad niet te gebruiken is voor stroming langs een hydraulisch gladde wand.

#### STROMING LANGS HYDRAULISCH RUWE WAND

De relatie tussen de wrijvingsfaktor  $f$  en het Reynolds getal  $Re$  voor de ruwe wand wordt in figuur 2 weergegeven door de getrokken lijn. Deze kromme op dubbel-logarithmisch papier, is zonder grote fouten weer te geven door een gebroken lijn, in ons geval 3 maal gebroken met lijnstukken A, B, C en D.

Deze lijn is dan voor de vorm  $\log f = -b \log Re + \log a$ , waarbij dus  $b$  de richtingscoëfficiënt en  $a$  de verschuiving van de lijn voorstelt.  $a$  is tevens een maat voor de invloed van de stromingsweerstand. Het verband tussen  $f$  en  $Re$  is nu dus:

$$f = a Re^{-b} \quad (8)$$

Door (4) in een iets andere vorm te schrijven vinden we

$$Se = \frac{f \times \bar{v}^2}{R \times 8g} \quad (9)$$

Vullen we nu achtereenvolgens (8) en (3A) in (9) in dan vinden we:

$$Se = \frac{a \cdot Re^{-b} \times \bar{v}^{-2}}{R \times 8g} = \frac{a \cdot \bar{v}^{-b} \times R^{-b} \times \bar{v}^{-2}}{\bar{v}^{-b} \times R \times 8g} = \frac{a \cdot \bar{v}^b}{8g} \times \bar{v}^{-(2-b)} \times R^{-(1-b)}$$

$$\bar{v}^{-2-b} = \frac{8 \times Se}{a \cdot \bar{v}^b \cdot R^{-(1-b)}}$$

$$\bar{v} = \frac{74,48^{\frac{1}{2-b}} \times Se^{\frac{1}{2-b}}}{\frac{1}{a^{\frac{1}{2-b}} \times \bar{v}^{\frac{b}{2-b}} \times R^{\frac{-1-b}{2-b}}} = \frac{74,48^{\frac{1}{2-b}}}{\frac{1}{a^{\frac{1}{2-b}} \times \bar{v}^{\frac{b}{2-b}}}} \times Se^{\frac{1}{2-b}} \times R^{\frac{1+b}{2-b}}$$

$$\text{Indien we faktor } \frac{74,48^{\frac{1}{2-b}}}{\frac{1}{a^{\frac{1}{2-b}} \times \bar{v}^{\frac{b}{2-b}}}} = C \quad (10)$$

$$\text{stellen, dan is dus } \bar{v} = C \times Se^{\frac{1}{2-b}} \times R^{\frac{1+b}{2-b}} \quad (11)$$

We zien **dus** dat we uiteindelijk de formule terug kunnen brengen tot de vorm  $\bar{v} = C \cdot S^m \times R^n$  tot welke vorm de formules van Chézy ( $\bar{v} = C \cdot S^{\frac{1}{2}} \times R^{\frac{1}{2}}$ ) en Manning ( $\bar{v} = \underbrace{k_M}_C \times R^{1/6} \times S^{\frac{1}{2}} \times R^{\frac{1}{2}}$ )

ook behoren.

We zullen nu voor de lijnstukken A, B, C en D eens nagaan welke gedaante, van de vorm (11), ze aannemen.

In tabel 1 worden de berekende waarden gegeven.

Tabel 1.

lijnstuk	b	$\frac{1}{2-b}$	$\frac{1+b}{2-b}$	C	gedaante
A	0,85	0,87	1,61	$C_A$	$\bar{v} = C_A \cdot S^{0,87} \times R^{1,61}$
B	0,73	0,787	1,36	$C_B$	$\bar{v} = C_B \cdot S^{0,787} \times R^{1,36}$
C	0,46	0,649	0,948	$C_C$	$\bar{v} = C_C \cdot S^{0,649} \times R^{0,948}$
D	0,38	0,617	0,852	$C_D$	$\bar{v} = C_D \cdot S^{0,617} \times R^{0,852}$

De C-waarden van A, B, C en D zijn niet gelijk, daar de faktor a en de exponent b, die er deel van uitmaken, niet constant zijn.

We weten dat  $f = a \cdot Re^{-b}$ . Daar we b voor de verschillende lijnstukken hebben bepaald, kunnen we  $a_A$ ,  $a_B$  enz. berekenen door een punt op het lijnstuk te kiezen en de daarbij behorende waarden voor f en Re af te lezen. Vullen we deze waarden in (8) in dan valt a te berekenen.

De gemiddelde kinematisch viscositeit  $\nu = 1,18 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$

Met behulp van (10) kunnen we dus de verschillende C-waarden ( $C_A$ ,  $C_B$  enz) berekenen.

In tabel 2 vinden we de berekende waarden voor a en C.

Tabel 2.

lijnstuk	a	C
A	730	3450
B	295,8	901,9
C	30	110,5
D	13,8	72,26

De volledige formuleringen voor de aldus ontstane vergelijkingen, voor berekening van de gemiddelde snelheid van de waterstroming in de gebieden bepaald door de lijnstukken A, B, C en D, zijn respectievelijk:

$$\bar{v}_A = 3450 \times Se^{0,87} \times R^{1,61} \quad (12A)$$

$$\bar{v}_B = 901,9 \times Se^{0,787} \times R^{1,36} \quad (12B)$$

$$\bar{v}_C = 110,5 \times Se^{0,649} \times R^{0,948} \quad (12C)$$

$$\bar{v}_D = 72,3 \times Se^{0,617} \times R^{0,852} \quad (12D)$$

We kunnen nu inzien dat (11) voor het geval  $b = 0$  overgaat in  $\bar{v} = C \times Se^{\frac{1}{2}} \times R^{\frac{1}{2}}$ , de formule van Chézy.

De richtingscoëfficiënt  $b = 0$  wil zeggen, dat de lijn die het verband tussen  $f$  en  $Re$  weergeeft, evenwijdig aan de  $x$ -as loopt.

Deze formule zou dus, in ons geval, bij benadering opgaan voor waterstroming bij zeer grote  $Re$ -waarden en dientengevolge zeer grote  $\bar{v}$  en/of  $R$ . We moeten hierbij denken aan  $Re$ -getallen  $> 10^8$ .

Manning's formule luidt:  $\bar{v} = k_M \times Se^{\frac{1}{2}} \times R^{\frac{2}{3}}$

Indien we deze formule vergelijken met (11), dan zien we dat  $b = 0$  moet zijn voor de exponent van  $Se$  en dat  $b = \frac{1}{5}$  is voor de exponent van  $R$ . De waarde voor  $b$  die formule (11) dicht laat naderen tot die van Manning, zal dus liggen tussen 0 en  $\frac{1}{5}$ , stel b.v.  $b = \frac{1}{10}$ .

Ook deze richtingscoëfficiënt (denk aan het - teken) duidt op zeer grote  $Re$ -waarden, nl.  $Re > 10^7$ . Doch de formule van Manning zal, wat de exponenten voor  $Se$  en  $R$  betreft, eerder gebruikt kunnen worden dan die van Chézy ( $C$  en  $k_M$  buiten beschouwing gelaten).

Aangezien  $v_{max}$  in de Nederlandse open leidingen, afhankelijk van de bodemgesteldheid op ca. 0,6 m/sec gesteld mag worden [ 9 ] ter voorkoming van erosie, zou voor het bereiken van  $Re = 10^7$  een hydraulische straal  $R = 20$  m nodig zijn, hetgeen in de praktijk vrijwel onmogelijk is.

In figuur 4 zijn ook de waarden voor  $k_M$  en  $R$  uitgezet voor de ruwe wand.

Het verband wordt hier weergegeven door de getrokken lijn.

We zien hier dat  $k_M = f(R)$ , hetgeen we reeds eerder hadden aangevoerd. De formule van Manning zou hier dus te gebruiken zijn,

daar  $k_M$  in verband kan worden gebracht met de gemiddelde afmeting van de wandruwheid en dit verband bij de hydraulische ruwe stroming aanwezig is.

Voor hydraulisch ruwe buizen is volgens Prandtl-Nikuradse de weerstandsfactor uitsluitend afhankelijk van de relatieve wandruwheid  $\frac{k}{D}$ . Bij hydraulisch ruwe wanden in open leidingen gaat men er ook van uit dat  $f$  uitsluitend een functie van  $\frac{k}{R}$  is. [ 2 ]

Veel wordt daarom gebruik gemaakt van formulering in de volgende gedaante:  $\frac{1}{\sqrt{f}} = a \log \frac{R}{y^1} + b$

Hierin stelt  $y^1$  de afstand voor tot de wand waarop de ongestoorde logaritmische snelheidsverdeling een waarde  $v = 0$  aangeeft. Hierbij wordt voor stroming langs hydraulisch ruwe wanden  $y^1 = \frac{k}{30}$  genomen. In ons geval is  $k = 18$  waarbij  $y^1 = \frac{18}{30} = 0,6$  wordt.

In figuur 5 wordt nu het verband tussen  $\frac{1}{\sqrt{f}}$  en  $\frac{R}{y^1}$  op half-logarithmisch papier weergegeven door de regressielijn, door de berekende punten, waarbij  $y^1 = 0,6$ . De aldus ontstane lijn wordt weergegeven door de formule:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,38 \log \frac{R}{y^1} + 3,74 \quad (13)$$

waarbij een correlatie-coëfficiënt van  $r = 0,9943$  werd berekend.

#### SAMENVATTING

Weergegeven zijn de resultaten van een serie stromingsmetingen langs een hydraulisch gladde- en ruwe wand, waarbij tevens het gebruikte stromingsmodel is beschreven.

Aangetoond werd dat de formule van Manning niet te gebruiken is bij turbulente stroming langs een hydraulisch gladde wand.

Eveneens werd aangetoond dat in het hier beschreven stromingsgeval, namelijk turbulente stroming langs een hydraulisch ruwe wand, de formule van Chézy pas bij  $Re$ -waarden  $> 10^8$  en de formule van Manning pas bij  $Re$ -waarden  $> 10^7$  te gebruiken zijn.

Voor de berekening van de gemiddelde stroomsnelheid in open leidingen, waarvan de wandruwheid overeenkomt met grind-, gezette steen-, of oude

betonnen wanden, zal de formule (12C)  $\bar{v} = 110,5 \times Se^{0,649} \times R^{0,948}$   
een redelijke uitkomst geven.

Nagegaan zal worden of dezelfde formule ook geldt voor andere  
ruwheidstypen, waarbij zowel de hoogte van de streppen als de onder-  
linge afstand zal variëren.

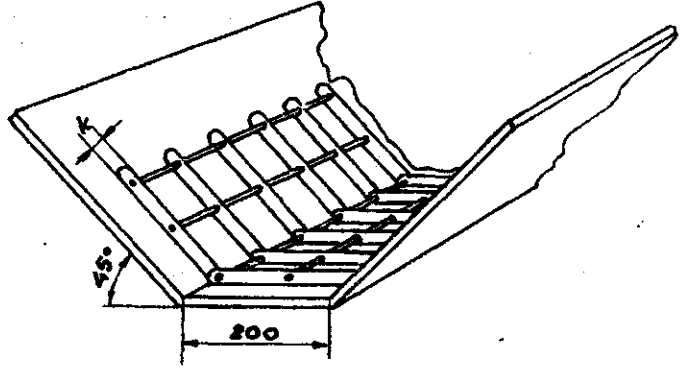
#### LITERATUUR

1. JAYARAWAN, V.V., 1970 - Resistance studies on smooth open channels -  
Journal of the hydraulics division vol. 96 no. HY 5, mei 1970
2. KRAIJENHOFF VAN DE LEUR, D.A., 1968 - Colledgeictaat hydraulica
3. NORRIER, I.W. en H. VAN DER VELDE, 1968 - Hydraulica voor water-  
bouwkundigen
4. ROUSE, H., 1949 - Engineering hydraulics, John Wiley & Sons, Inc.
5. VEN TE CHOW, Ph.D., 1959 - Open channel hydraulics, Mc. Graw-Hill  
Book Company, Inc.
6. WESSELING, J., 1965 - Enkele opmerkingen over de bepaling van  
ruwheidsfactoren in open leidingen, Nota I.C.W. no. 298
7. \_\_\_\_\_, 1966 - De betekenis van de hoogwaterlijn bij beekver-  
beteringen. Nota I.C.W. no. 334
8. \_\_\_\_\_ en F. HOMMA, 1967 - Hydraulic resistances of drainpipes -  
Technical Bulletin I.C.W. no. 50
9. Richtlijnen voor het ontwerpen van open waterlopen, 1958 - Werkgroep  
Waterlopen van de Cultuurtechnische Vereniging
10. WILDE, J.G.S. DE, 1970 - Invloed van de leidingvorm op de te ge-  
bruiken ontwerpnorm. Nota I.C.W. no. 581.



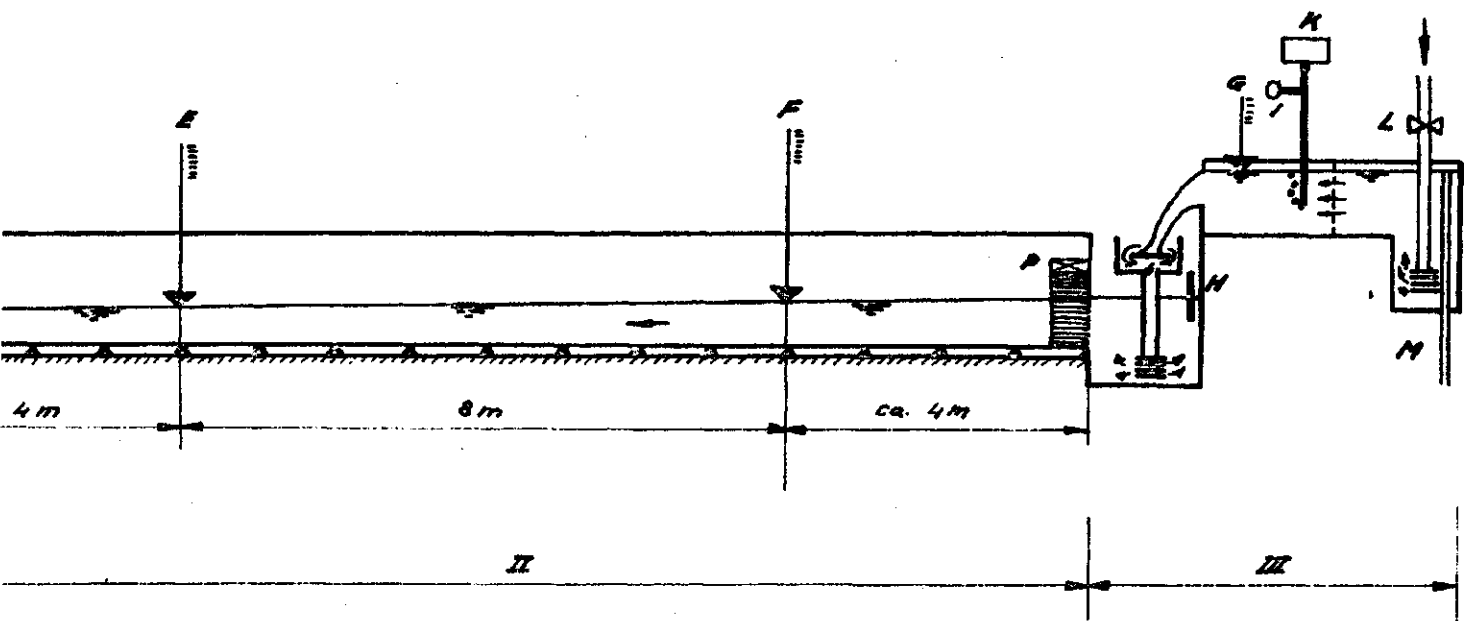
RODEN  
ENHEID

BENEDENSTROOMS  
BOVENSTROOMS  
PIJPEN  
ROLE GEDEELTE



DETAIL WANDRUWHEID

ROOMPIJP



leestopstelling

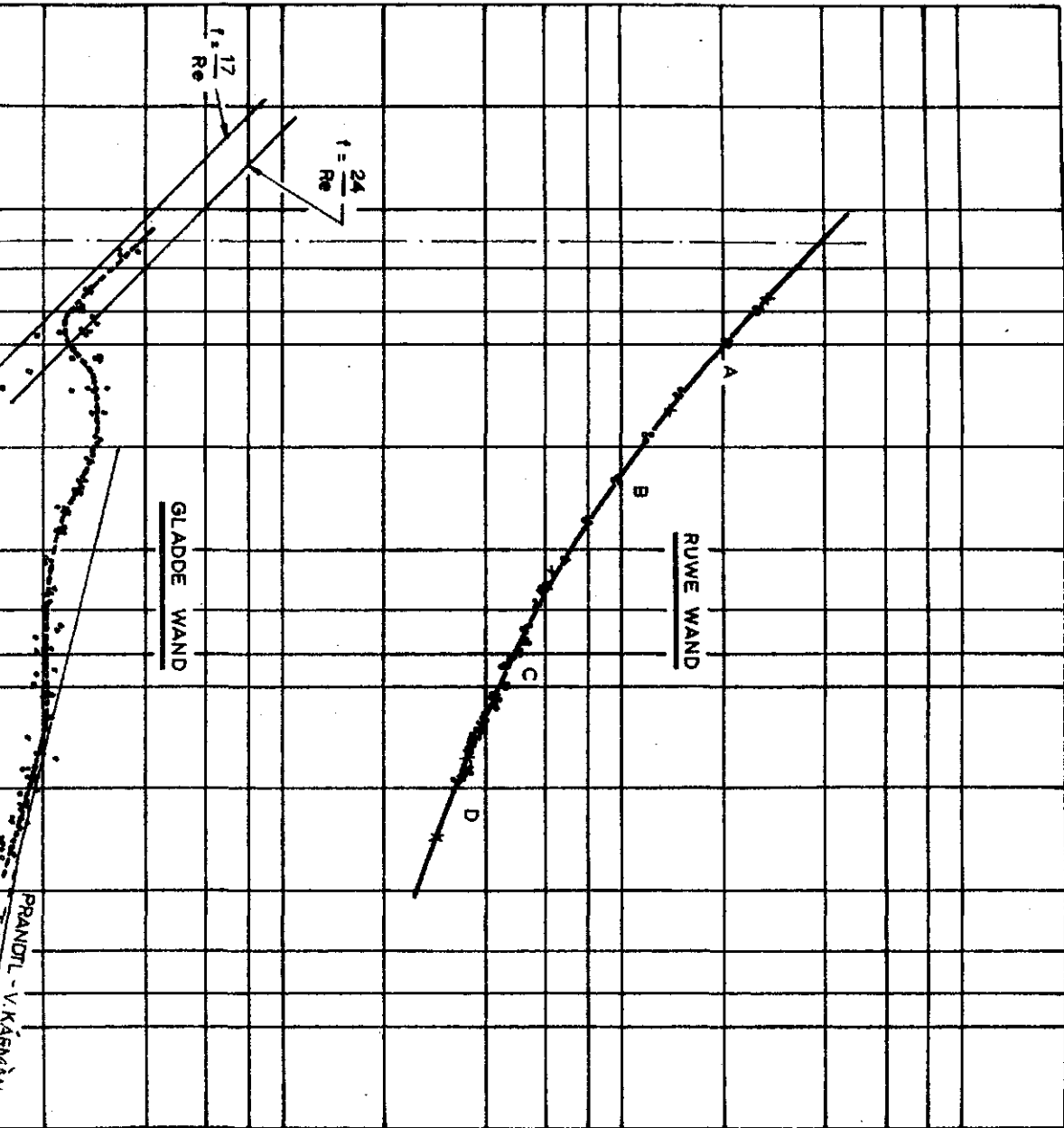
1

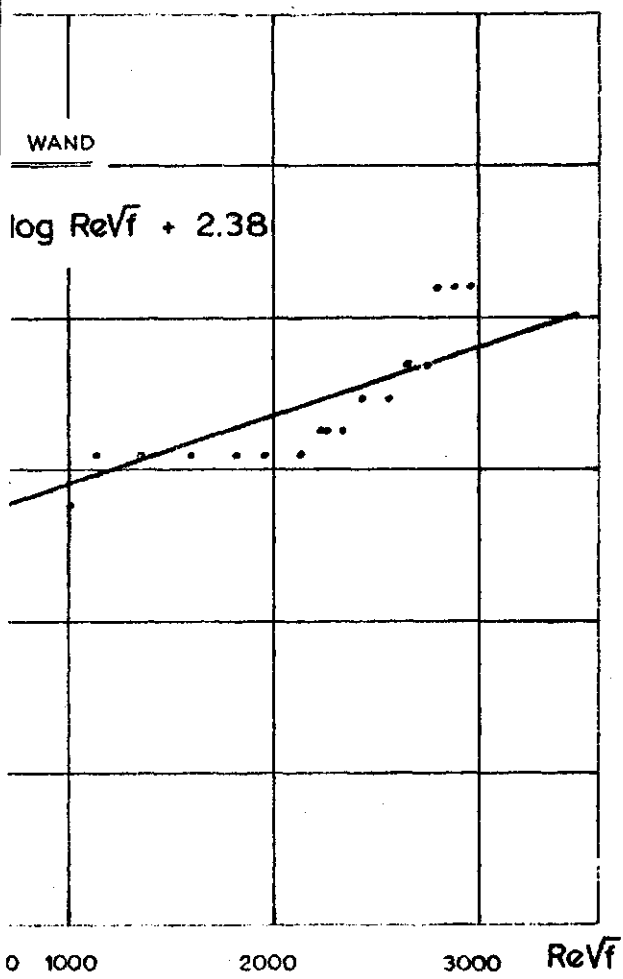
20

10

1.0

0.1





en  $Re\sqrt{f}$

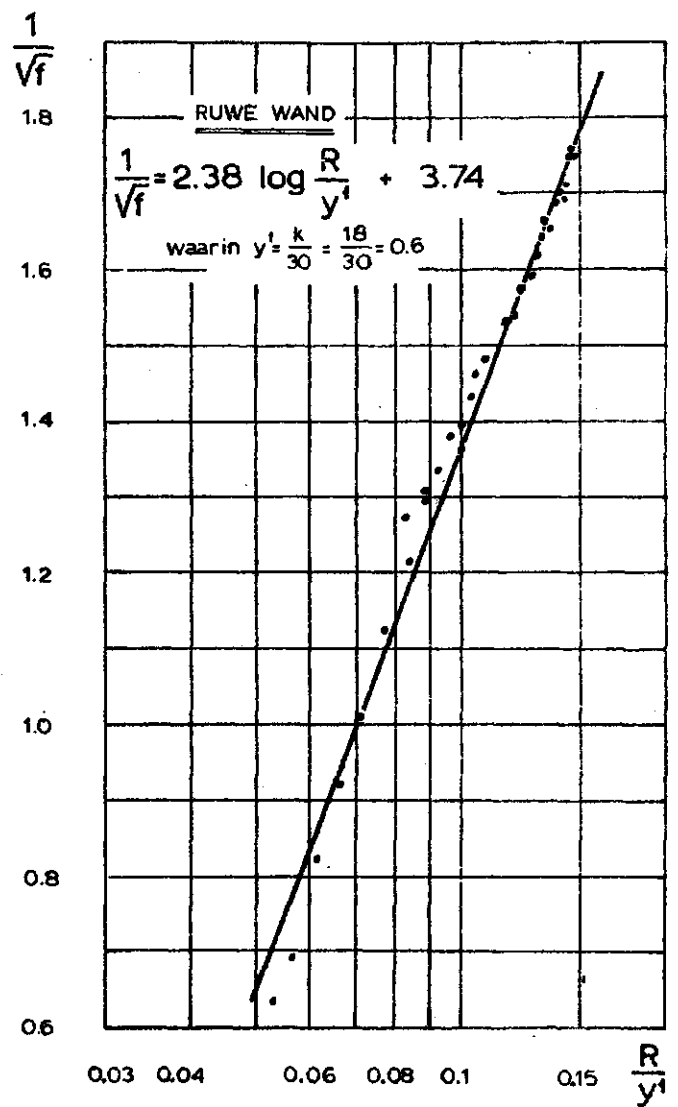


fig.5 relatie tussen  $\frac{1}{\sqrt{f}}$  en  $\frac{R}{y'}$

R in mm

