NOTA 766 oktober 1973

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding

NN31545.0766

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOU

BIBLIOTHEEK DE HAAFF
Droevendaalsesteeg 3a
Postbus 241
6700 AE Wageningen

EEN ONDERZOEK NAAR DE SAMENHANG TUSSEN DE FACTOREN DIE VOORKOMEN IN DE FORMULE VAN MANNING, GELDEND VOOR DE SITUATIE, ZOALS DIE ZICH VOORDEED IN HET WATERSCHAP SALLAND IN HET JAAR 1970

ing. H. Fonck

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-middelen, 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 9921

1989-58

12 FEB. 1998

I N H O U D

	blz.
INLEIDING	1
PROBLEEMSTELLING	2
DE OPZET VAN EN DE WERKWIJZE BIJ HET ONDERZOEK	3
BEWERKING VAN DE GEGEVENS	8
BETROUWBAARHEID VAN DE GEGEVENS	9
UITEINDELIJK GEKOZEN WERKWIJZE	15
EEN EERSTE ORIENTATIE	16
ALGEMENE OPMERKINGEN BIJ DE DEFINITIEVE BEWERKING	20
DE BREEDTE-DIEPTE-VERHOUDING IN HET NATTE DWARSPROFIEL	21
Methode 1 : elke proefplek afzonderlijk	21
Methode 1A: elke proefplek afzonderlijk met introductie van de waterspiegelbreedte	28
Methode 2 : de gecorrigeerde waterdiepte	32
Methode 2A: de gecorrigeerde waterdiepte met introductie van de bodembreedte	33
Methode 2B: de gecorrigeerde waterdiepte met introductie van $\log A - \log y_g$	35
DE MANNING FORMULE	41
Algemene beschouwing	41
De numerische vereffening	43
De grafische vereffening	44
Controle	49
CONCLUSIE	53
LITERATUUR	55

INLEIDING

Gedurende de periode van 1 mei tot 1 november 1970 is in het waterschap Salland in westelijk Overijssel een onderzoek verricht naar verschillende aspecten van de toepassing van de zogenaamde formule van Manning op de situatie in de leggerlossingen van dit waterschap. Dit onderzoek vond plaats in het kader van het Hydrologisch onderzoek Overijssel.

De commissie, die het onderzoek leidt en uitvoert, ziet zich geplaatst tegenover het vraagstuk hoe een, naar men aanneemt, in de komende decennia steeds vaker dreigend watertekort in Twente kan worden opgevangen. De mogelijkheden van Salland als waterwingebied worden hierbij onderzocht. Als gevolg van de eventuele waterwinning met daaraan verbonden grondwaterstandsveranderingen is het denkbaar dat de peilen van de aan het waterschap toevertrouwde lossingen op een andere wijze dan thans het geval is, zouden gaan fluctueren gedurende een deel van het groeiseizoen. Deze gewijzigde fluctuatie zou een directe invloed kunnen gaan uitoefenen op de onkruidgroei en de bestrijding daarvan.

Het is o.a. de taak van dit onderzoek geweest na te gaan hoe de invloed van peilsveranderingen in de leidingen op de grootte van de wandruwheidsfactor zal zijn en of het mogelijk is een schattingsmethode voor de wandruwheidsfactor te ontwikkelen.

Aan de beantwoording van deze praktische vragen zal een meer fundamenteel onderzoek dienen vooraf te gaan naar de onderlinge samenhang van de in de Manning-formule voorkomende factoren, waarbij speciaal aandacht zal worden geschonken aan de waarden van de exponenten en de breedte-diepte-verhouding van het natte dwarsprofiel.

PROBLEEMSTELLING

Het probleem, dat zich voor onderzoek aandient, laat zich splitsen in drie onderdelen, die weliswaar afzonderlijk kunnen worden onderzocht, doch die logisch uit elkaar volgen en elkaar soms in zoverre overlappen, dat de resultaten van de bewerking van één onderdeel noodzakelijk zijn om het onderzoek in een volgend onderdeel te kunnen volvoeren, en gedeelten van verschillende onderdelen soms gezamenlijk dienen te worden onderzocht. Deze onderdelen zijn:

1. De wandruwheidsfactor

   Van de wandruwheidsfactor dient te worden nagegaan of er een mogelijkheid bestaat om deze grootheid uit veldwaarnemingen van andere in de formule van Manning voorkomende factoren te berekenen. Indien dit mogelijk zou blijken zou een schattingsmethode van de wandruwheidsfactor op grond van de resultaten kunnen worden ontwikkeld. Tevens zou de algemene geldigheid van de Manning-formule, zoals die overal nog steeds wordt gehanteerd, kunnen worden getoetst.

2. De diepte-breedte-verhouding

   In de formule van Manning komen de termen nat oppervlak (A), natte omtrek (P) en hydraulische straal (R) voor. Al deze factoren zijn in hoge mate afhankelijk van de waterdiepte (y). Het is van belang na te gaan of er een samenhang bestaat tussen deze factoren onderling of tussen de waterdiepte en één of meer van deze factoren. En wel om drie redenen:

   a. Bij een eventueel aanwezig verband zou één of meer factoren als functie van een andere factor kunnen worden weergegeven, hetgeen het aantal uiteindelijk in de bewerking op te nemen constanten zou kunnen doen verminderen en de bewerking zou kunnen vereenvoudigen.
   b. Bij een gebleken verband zou wellicht aangetoond kunnen worden, dat de tot nu toe steeds gehanteerde formules, welke berusten op een aangenomen trapeziumvorm van het dwarsprofiel, de werkelijkheid niet voldoende weergeven.
   c. Een eventueel aanwezig verband als bedoeld in 2b zou gebruikt

kunnen worden om aan nieuw te graven leidingen een dwarsprofiel mee te geven, gebaseerd op een in de praktijk aangetroffen door stroomsnelheid en bodemprofiel bepaalde factoren, zodanig dat van de aanvang af de leiding het optimale natuurlijke profiel bezit, dat zich anders pas na enige tijd uit de traditionele trapeziumvorm door uitschuring en opslibbing ontwikkelt.

3. De exponenten

Aangezien reeds lang het vermoeden bestaat dat de gebruikelijke exponentswaarden (0,5 voor het verhang Se en 0,67 voor de hydraulische straal R) verbetering behoeven, hetgeen door verschillende onderzoekers reeds is getracht, ligt het in de bedoeling hieraan ruime aandacht te schenken en een poging te ondernemen klaarheid te brengen in het probleem van de juiste exponentswaarde.

Als een verwachting mag worden uitgesproken omtrent de resultaten van dit onderzoek, dan komen ook hierbij wederom drie mogelijkheden naar voren:

1. Een nieuwe formule van het Manning-type, doch met andere dan de tot nu toe gebruikelijke exponentswaarden.
2. Een nieuwe formule, welke enigszins op de Manning-formule lijkt, doch waarin als gevolg van een eventueel gevonden verband tussen de diepte-breedte-verhouding in het dwarsprofiel en de waterdiepte het in de oude Manning-formule voorkomende complex $A.R^{2/3}$ is vervangen door een functie van de waterdiepte, welke de aangetroffen toestand op een exacte wijze weergeeft.
3. Een totaal andere, empirisch ontstane formule.

Het is zeker niet onmogelijk, dat er van deze drie geschetste mogelijkheden tenslotte meer dan één met even grote nauwkeurigheid tot hetzelfde doel zullen leiden.

DE OPZET VAN EN DE WERKWIJZE BIJ HET ONDERZOEK

Uit de vraagstelling blijkt reeds dat het noodzakelijk is het

onderzoek te verrichten bij een zo groot mogelijke variatie in waterdiepten. Deze noodzaak van variatie in waterdiepten is in hoofdzaak bepalend geweest bij de keuze van de proefplekken. In totaal zijn, over het gehele waterschap verspreid, 28 proefplekken uitgezocht, waarvan gedurende het gehele groeiseizoen regelmatig de ontwikkeling van de onkruidgroei is vastgelegd.

Samenhangend met de noodzakelijke variatie in waterdiepte is in de gekozen reeks een zo groot mogelijke spreiding in leidingafmetingen gebracht, omdat een grotere waterdiepte nu eenmaal meestal samengaat met een grotere leiding. Verdere overwegingen, die de keuze van de proefplekken in mindere mate beïnvloed hebben waren: 1. de bereikbaarheid en 2. het verzoek van het waterschap om ook enkele leidingen, die door aannemers worden gereinigd, in het onderzoek te betrekken.

Aangezien de wandruwheidsfactor slechts door de zogenaamde formule van Manning kan worden berekend, moesten telkenmale alle factoren, die in deze formule voorkomen, worden gemeten. Voor sommige factoren kon worden volstaan met een éénmalige opname. Deze formule van Manning luidt als volgt:

$$Q = k_M \, A \, R^{2/3} \, S^{1/2} \qquad (1)$$

Een verklaring van de in deze formule voorkomende factoren geeft meteen een overzicht van de te verzamelen gegevens:

Q = debiet in m^3/sec
Deze gegevens worden verkregen door toepassing van de formule $Q = 1{,}8 \, b \, h^{3/2}$, waarin b = stuwbreedte in m en h = overstorthoogte in m

A = natte oppervlak van het dwarsprofiel in m^2

P = natte omtrek van het dwarsprofiel in m

R = hydraulische straal = $\frac{A}{P}$

S = zogenaamd energieverhang in m/m

y = waterdiepte in m

Eenmalige opnamen waren: b, A en P. Steeds terugkerende opnamen waren: k_M, S en h.

Op de 28 proefplekken zijn deze gegevens tussen 1 mei en 1 november 18 maal verzameld, dat wil zeggen meestal eenmaal per week en een enkele maal eenmaal per veertien dagen.

De steeds terugkerende opnamen werden als volgt verricht: de overstorthoogte h werd gemeten met de overstorthoogtemeter van BON (1965). Voor vrijwel alle stuwen in het gebied was deze meter goed bruikbaar. Slechts een enkele maal is het voorgekomen, dat door een extreme stand van de klep de meter niet kon worden gebruikt, omdat de betonnen bovenbouw van de stuw de opstelling verhinderde.

Het waterspiegelverhang S_w is bepaald met de verhangmanometer van BON (1965). Het waterspiegelverhang is nu eenmaal een maat, welke op eenvoudige wijze kan worden vastgesteld, in tegenstelling tot het energieverhang. Daarom is het waterspiegelverhang steeds zoveel mogelijk gemeten, hoewel deze factor als zodanig niet in de formule van Manning voorkomt. Omdat evenwel vooral in de trajecten boven de stuw verhangen optreden, welke zo gering zijn, dat een afleesfout vooral bij aanwezigheid van wind een grote rol kan gaan spelen, zijn de proeftrajecten in eerste instantie zoveel mogelijk tussen twee stuwen gekozen, zodat zo nodig een ondersteuning van de gemeten verhangwaarden gevonden zou kunnen worden in de berekening van de stuwkromme. Dit hulpmiddel zou evenwel pas in het uiterste geval moeten worden toegepast omdat de berekening van een stuwkromme niet alleen zeer omslachtig is, doch de resultaten waarschijnlijk niet nauwkeuriger zijn dan de afgelezen waarden op de verhangmanometer.

Aangezien op deze wijze niet voldoende proefplekken in alle typen leidingen te vinden waren is een aanvulling gevonden in het opnemen van proefvakken boven en beneden eenzelfde stuw. Ook dan was variatie in waterdiepte verzekerd, doch het verhang moest steeds gemeten worden hetgeen dan ook zoveel mogelijk is geschied. Bovendien zijn op twee data twee series speciale verhangmetingen uitgevoerd.

De k_M kan als restfactor uit de formule van Manning worden berekend. Aangezien het echter in de bedoeling lag de mogelijkheden van het schatten van de wandruwheidsfactor k_M te onderzoeken is bij elke opname dan ook een schatting van de k_M verricht. Dit is in eerste instantie geschied door een beschrijving, waarbij de aard van

de begroeiing en de bedekkingsgraad van achtereenvolgens bodem, onderwatertalud en oppervlak werd omschreven. Verder werd een schets vervaardigd van de vulling van het dwarsprofiel. Om deze schattingen zo objectief mogelijk te houden en bovendien een goede ondersteuning te kunnen geven aan de omschrijving van de begroeiing zijn bovendien in totaal 183 foto's van de meest markante begroeiingsbeelden gemaakt, waarbij goede hulp is ondervonden van de toepassing van een polarisatiefilter, dat de spiegeling van het wateroppervlak grotendeels opheft.

Het lag in de bedoeling uit deze waarnemingen een k_M-cijfer te destilleren, dat in verband zou moeten worden gebracht met de berekende k_M-waarde.

D e e e n m a l i g e o p n a m e n betreffen voornamelijk de vorm van het dwarsprofiel. Bij lage waterstanden, zoals die in de zomer van 1970 tijdens droogteperioden nogal eens voorkwamen, is met behulp van de profielmeter van Bon van alle meetvakken het dwarsprofiel vastgesteld. Hierbij bleek, dat de vorm van het dwarsprofiel nogal eens afweek van dat van een trapezium, zodat de toepassing van de formules:

$$A = (b + py)y \qquad (3)$$

en

$$P = b + 2y \quad (1 + p^2) \qquad (4)$$

waarin y = waterdiepte
b = bodembreedte
p = taludhelling

welke de aanwezigheid van een trapeziumvormig dwarsprofiel veronderstellen nog wel eens geweld werd aangedaan. Daarom zijn de gemeten dwarsprofielen op schaal op millimeterpapier uitgetekend, waarna in deze figuren bij opklimmende waterdiepte de volgende factoren zijn gemeten en berekend: A = het natte oppervlak
P = de natte omtrek
R = de hydraulische straal
B = de waterspiegelbreedte

Tenslotte dient te worden vermeld, dat bij de keuze van de proef-

plekken ook nog enigszins is rekening gehouden met de aanwezigheid van zelfregistrerende peilmeters. De eigen wekelijkse of 14-daagse waarnemingen waren tenslotte momentopnamen. Door deze in te passen in de continue gegevens van de registreerstroken zou kunnen worden nagegaan of de eigen opnamen voldoende representatief waren voor de weergave van de hydrologische omstandigheden tijdens het groeiseizoen 1970. Deze zelfregistrerende peilmeters zijn geplaatst door het ICW (8), Rijkswaterstaat (1), Provinciale Waterstaat Overijssel (6) en Kon. Nederlandse Heidemaatschappij-Landbouwhogeschool (7). Van een tiental van deze meetpunten zijn de registreerstroken voor dit onderzoek gebruikt waarvan om te beginnen 4 van het ICW zelf en wel de volgende nummers:

nr. meter	nr. leidingtraject
1	52 II
2	54 III
3	56
4	96 II

De waterdiepten zijn steeds op twee manieren opgenomen: door peilschaalaflezing (beneden de stuw verminderd met het gemeten peilverschil) en tevens ten opzichte van een vast punt, in het meettraject gelegen, meestal een duiker of een brug. Dit is gedaan ter controle van de peilschaalaflezingen, omdat de peilschalen vooral bij lage waterstanden soms slecht leesbaar waren. De waterpeilen ten opzichte van een vast punt konden met behulp van de peilschaalaflezingen worden gebruikt om de hoogte van het vaste punt ten opzichte van NAP vast te leggen. Dit gaf tevens de mogelijkheid om de peilschaalaflezingen en de metingen ten opzichte van het vaste punt op elkaar te controleren. Een plotselinge afwijking moest noodzakelijkerwijs op een afleesfout berusten. Via de peilaflezing en de gemeten bodemdiepten in het meettraject kon de gemiddelde bodemdiepte ten opzichte van NAP worden bepaald. Deze kon wel eens wat afwijken van de door het waterschap opgegeven bodemdiepten zoals die op de legger voorkomen, hetgeen wel eens van invloed zou kunnen zijn op het bepalen van de evenwichtswaterdiepte, welke voorafgaat aan de berekening van de stuwkromme. Een afwijking hoefde overigens niet noodzakelijkerwijs op een

fout in de berekening van de bodemdiepte te berusten, doch kon heel goed het gevolg zijn van opslibbing of uitschuring.

BEWERKING VAN DE GEGEVENS

De verzamelde gegevens zijn op verschillende wijze vastgelegd. Deze waarnemingsverzamelingen vallen in twee hoofdgroepen uiteen:

A Die, welke de gegevens bevatten welke nodig zijn voor de berekening van de k_M

B Die, welke de gegevens bevatten welke nodig zijn voor de schatting van de k_M

A1 Lijsten, waarop per opnamedatum zijn gerangschikt:
peilschaalaflezing t.o.v. NAP
peilverschil boven en beneden de stuw
peil t.o.v. een vast punt
peil t.o.v. NAP
waterdiepte t.o.v. de bodem
overstorthoogte
Benevens enkele algemene gegevens als:
hoogte vast punt t.o.a. NAP
bodemhoogte t.o.v. NAP
lengte traject tussen twee stuwen

A2 Nomogrammen, waarop bij elke waterdiepte kan worden afgelezen:
A = natte oppervlak in m^2
P = natte omtrek in m
R = hydraulische straal in m
B = waterspiegelbreedte in m

B1 Lijsten, waarop de beschrijving van de begroeiing per opnamedatum

B2 Getekende dwarsprofielen met daarin aangegeven het begroeiingsbeeld per opnamedatum

BETROUWBAARHEID VAN DE GEGEVENS

Welke weg tenslotte gekozen zal worden om tot het gewenste doel te geraken, verschillende factoren zullen onveranderd noodzakelijk blijven omdat zij, volgens welke beschouwingswijze ook, direct met de gezochte wandruwheid samenhangen. Een nader onderzoek naar de betrouwbaarheid van deze gegevens is dan ook zeker op zijn plaats. Tot deze factoren behoren in de eerste plaats het debiet en het verhang.

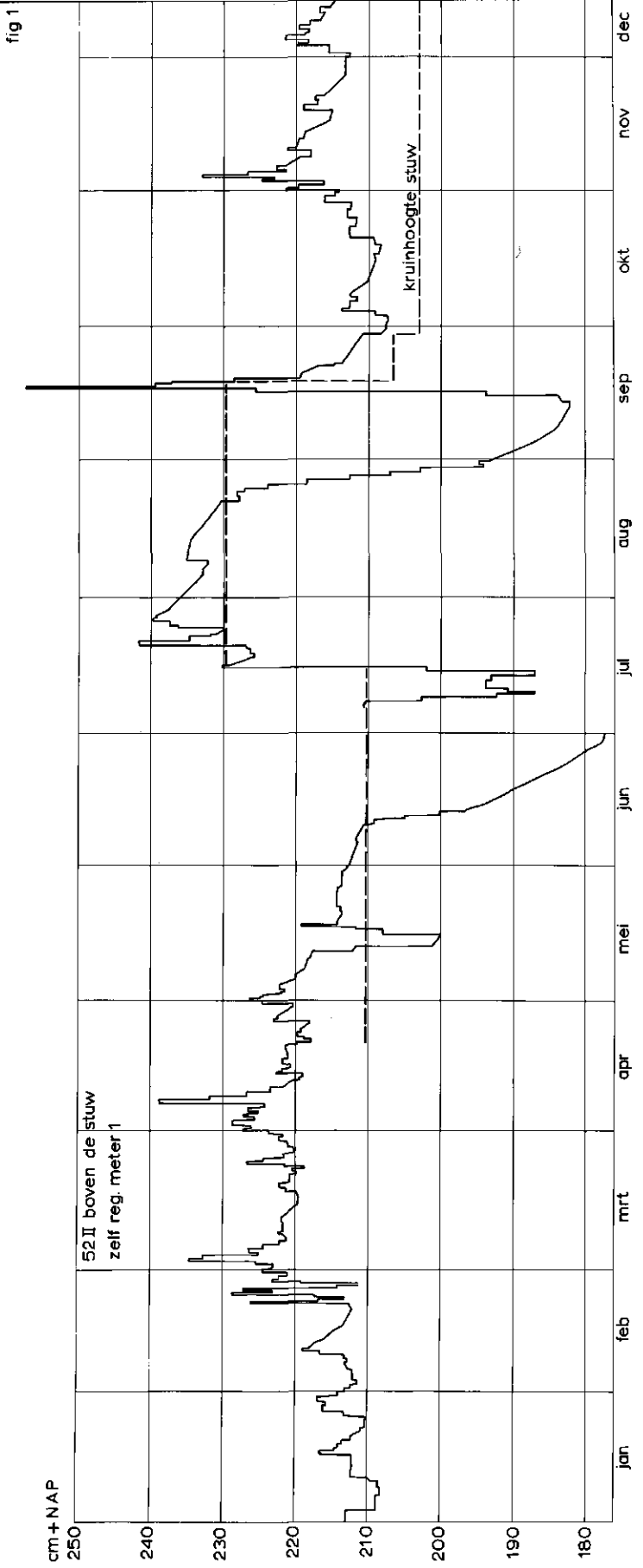
Het d e b i e t is berekend volgens formule (2) uit de overstorthoogte. Hierbij doen zich twee vragen voor:

1. Zijn de overstorthoogtemetingen op zichzelf betrouwbaar?
2. Zijn de wekelijkse of 14-daagse momentopnamen representatief genoeg voor de weergave van een periode, die het ontstaan van een zekere vorm van wandruwheid heeft bepaald?

Een controle van de overstorthoogtemetingen lijkt zinvol. Hiertoe zijn van een tweetal proefplekken over het gehele jaar de peilschommelingen van de stroken van de zelf-registrerende peilmeters afgelezen en ingetekend (fig. 1 en 2). In deze figuren zijn de gemeten kruinhoogten eveneens aangegeven. Op elk moment is de overstorthoogte als het verschil tussen de beide lijnen af te lezen. Deze gereconstrueerde overstorthoogten zijn in de figuren 3 en 4 voor dezelfde data uitgezet tegen de eigen overstorthoogtemetingen. Uit deze beide figuren zou men de conclusie kunnen trekken, dat de eigen metingen in het algemeen wat aan de hoge kant waren, voornamelijk bij object 52 II. Bij nr. 56 komt deze tendens echter veel minder duidelijk naar voren.

Er zijn evenwel enkele overwegingen, die zich ertegen verzetten aan de eigen overstorthoogtemetingen al te zeer te twijfelen:

1. De zelf-registrerende peilmeters hebben wel eens geweigerd. Het verloop is dan gereconstrueerd op grond van waarschijnlijkheid en navraag.
2. Hoewel de kruinhoogtemetingen op zichzelf juist zijn, bestaat geen absolute zekerheid dat er tussentijds niet met de stuwen is gema-


fig 1
cm + NAP
250
240
230
220
210
200
190
180
jan
feb
mrt
apr
mei
jun
jul
aug
sep
okt
nov
dec
52 II boven de stuw
zelf reg. meter 1
kruinhoogte stuw

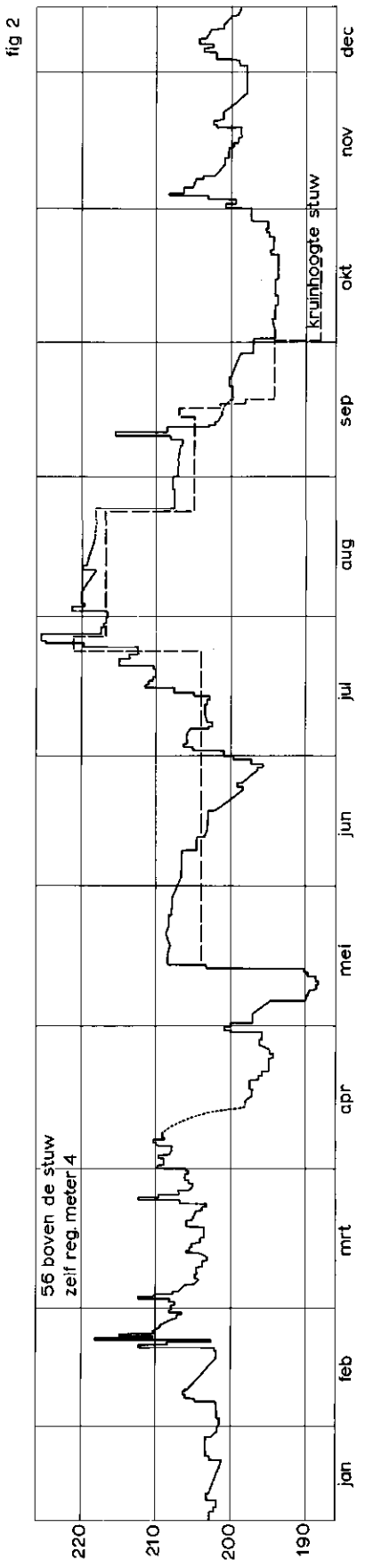

fig 2
220
210
200
190
jan
feb
mrt
apr
mei
jun
jul
aug
sep
okt
nov
dec
56 boven de stuw
zelf reg. meter 4
kruinhoogte stuw

fig. 3

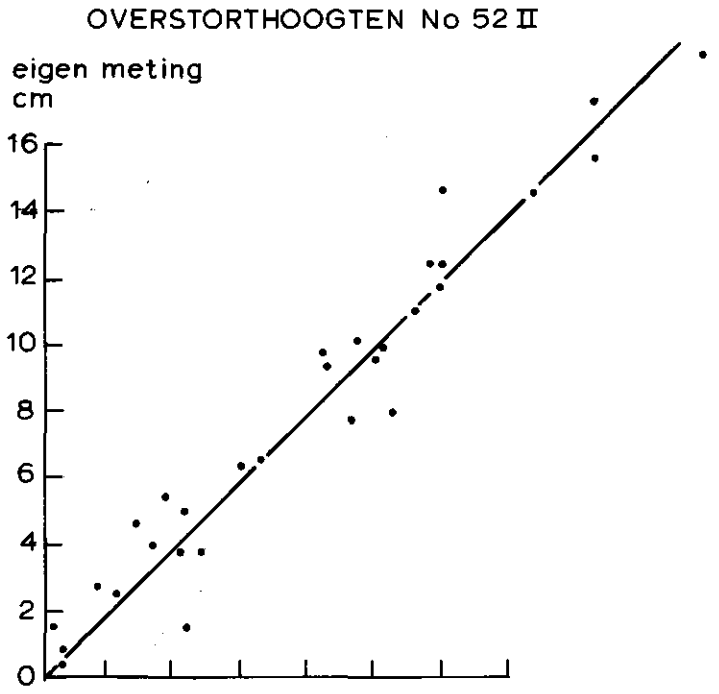
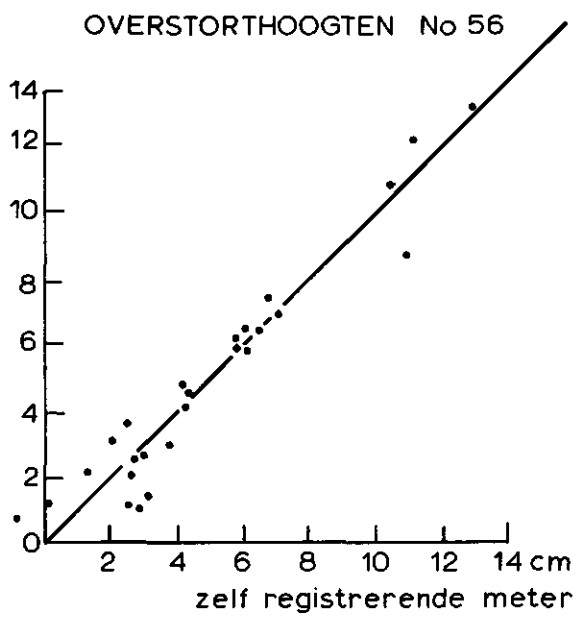


fig. 4



vergelijkingen overstorthoogtemetingen

nipuleerd.

3. De eigen overstorthoogtemetingen van Humbert vertonen geen geringere afwijkingen ten opzichte van de uit de peilmetergegevens berekende dan de onze.

Dit alles, gevoegd bij het feit dat de controlemetingen van Bon op zijn overstorthoogtemeter wel een grote mate van betrouwbaarheid vertoonden doet ons aan de eigen overstorthoogtemetingen een grotere mate van betrouwbaarheid verlenen dan aan de gereconstrueerde waarden. Wel dient te worden nagegaan in hoeverre de momentopnamen representatief zijn voor een afvoerperiode. Daarover kunnen de stroken van de zelfregistrerende peilmeters wel uitsluitsel geven.

Men kan ten aanzien van de representativiteit van de momentopnamen van mening verschillen. Indien men uitgaat van de wandruwheid, omdat die over een langere periode een constanter factor is dan b.v. het debiet of de waterdiepte omdat die mede afhankelijk zijn van de toevoer (neerslag) die sterk kan wisselen, dan heeft men het voordeel, dat resultaten meer zeggingskracht bezitten, omdat zij een aaneensluitende periode vertegenwoordigen. Een nadeel bij het onderhavige onderzoek zou kunnen zijn, dat men dan uit moet gaan van de geschatte wandruwheidsgegevens.

Het is evenwel zeker niet zo dat momentopnamen minder waarde zouden hebben dan gemiddelden over langere perioden. Elke momentopname behoudt zijn waarde omdat het debiet op dat moment het resultaat is van toevoer, hydraulische eigenschappen van de leiding en wandruwheid, die op dat zelfde moment voorkomen. Het enige, waarop men attent moet blijven is de toepasbaarheid van eventuele conclusies. Het zou kunnen zijn, dat momentopnamen te veel extreme waarden weergeven en daardoor een gemiddelde toestand niet voldoende benaderen. Een vergelijking van momentopnamen met de stroken van de zelf-registrerende peilmeters kan in dit opzicht verhelderend werken.

Het achterhalen van het juiste v e r h a n g is niet in alle gevallen even eenvoudig. Dit is een gevolg van het feit, dat in vele gevallen het verhang, vooral in het opgestuwde deel van de leiding boven een stuw, uiterst gering is. De afleesfout gaat dan, vooral bij aanwezigheid van wind, een (te) grote rol spelen.

Gemeten is steeds het waterspiegelverhang omdat dit met eenvoudige middelen te meten is, weliswaar met bovengenoemde restrictie van een overheersende afleesfout. Aangezien in vrijwel alle gevallen, die in het onderzoek betrokken zijn, een niet-eenparige waterbeweging aanwezig was, dat wil zeggen dat in de lengterichting van de leiding de waterdiepte varieert, zou eigenlijk uitgegaan moeten worden van het zogenaamde energieverhang. In fig. 5 wordt dit energieverhang verklaard:

x = de lengte van een stukje verhanglijn

z = de afstand van een punt op de bodem tot een gekozen horizontaal vergelijkingsvlak

$S_b = (z_1 - z_2)x$ = de bodemhelling

y = de waterdiepte t.o.v. de bodem

g = de versnelling van de zwaartekracht in m/sec^2

v = de gemiddelde snelheid in een bepaald dwarsprofiel in m/sec

$\frac{v^2}{2g}$ = de snelheidshoogte

Als voorts:

A = het natte oppervlak van het dwarsprofiel in m^2

Q = het debiet in m^3/sec

R = de hydraulische straal

Dan wordt het energieverhang Se voorgesteld door:

$$Se = \frac{v^2}{C^2R} \quad \text{of} \quad Se = \frac{Q^2}{A^2C^2R}$$

waarin volgens Chezy de stroomsnelheid $v = C\sqrt{RS}$.

Aangezien volgens Manning $v = k_M R^{2/3} Se^{1/2}$ kan men schrijven: $C\sqrt{RSe} = k_M R^{2/3} Se^{1/2}$, waaruit voor C volgt: $C^2 = k_M^2 R^{1/3}$. Dit, gesubstitueerd in $Se = \frac{Q^2}{A^2RC^2}$, levert wederom de bekende formule van Manning op.

In twee gevallen is het waterspiegelverhang S_w gelijk aan het energieverhang S_e, namelijk:

1. als de waterspiegel evenwijdig aan de bodem is;
2. als de bodem volkomen horizontaal is.

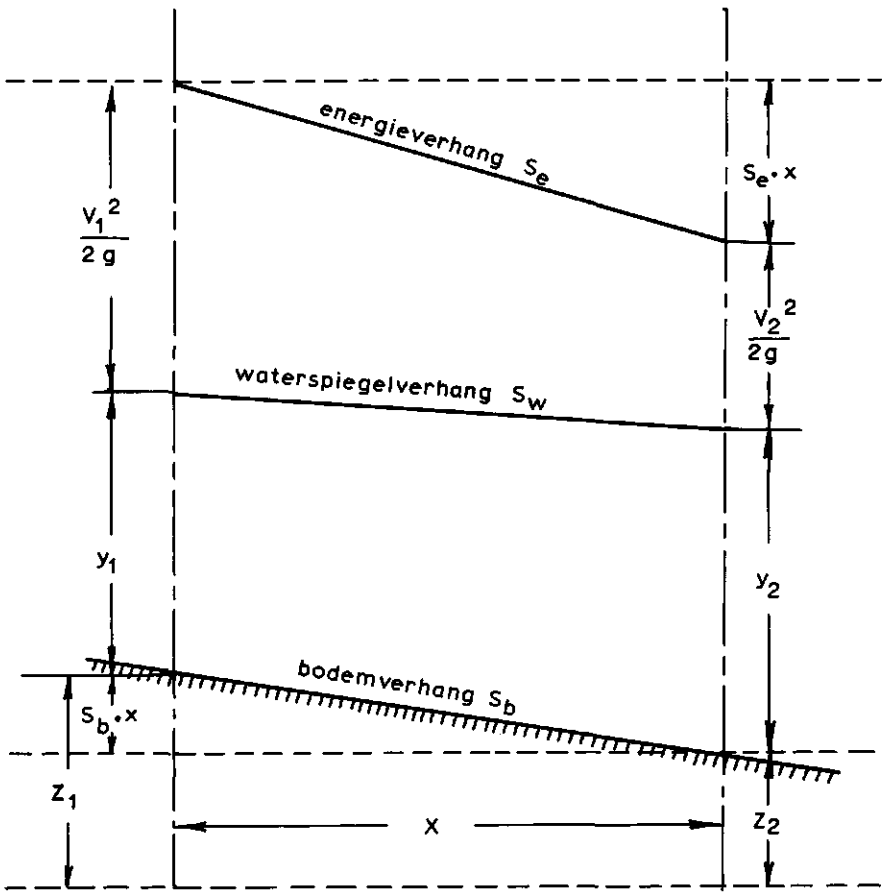


Fig. 5. Schematische voorstelling van het energieverhang en het waterspiegelverhang

In alle andere gevallen ligt het gezochte energieverhang ergens tussen bodem- en waterspiegelverhang in en is uit de beschikbare gegevens niet zonder meer op eenvoudige wijze te berekenen. Daarom lijkt het vooreerst weinig zin te hebben te trachten dit energieverhang te achterhalen. Het zal veeleer de voorkeur verdienen uit te gaan van het waterspiegelverhang om daarmee een formule van het type Manning te toetsen of een andere formule van welk type dan ook empirisch op te bouwen.

UITEINDELIJK GEKOZEN WERKWIJZE

Bij het raadplegen van de literatuur over dit onderwerp is gebleken, dat vele onderzoekers zich in de loop van de tijd bezig gehouden hebben met verbetering of verfijning van de formule van Manning, omdat deze formule in het algemeen niet meer dan een benaderende waarde als resultaat geeft, aangezien de waarden van de voor de berekening in te voeren factoren niet steeds met de gewenste exactheid kunnen worden vastgesteld. Theoretisch is het niet onmogelijk, dat de formule op zichzelf juist is, als de juiste gegevens maar voorhanden zijn. Aangezien dat evenwel nooit voor 100% het geval kan zijn wordt hiermee de exactheid van de resultaten, verkregen met de formule van Manning, wel wat aangetast. De mening van Prof. Kraijenhoff van de Leur over de berekeningsmogelijkheden luidt als volgt:

'Begroeide aarden leidingen vormen in theoretisch opzicht een hopeloos geval. De leidingweerstand wordt daarbij niet meer uitsluitend aan de omtrek opgewekt, aangezien de planten allerlei weerstanden in de stromende watermassa veroorzaken. Het beeld van de snelheidsverdeling is dientengevolge zeer verward en steeds wisselend. Een theoretische berekening van de wrijvingsweerstand is dan ook volkomen uitgesloten. Om toch enig houvast te hebben gebruikt men dan maar de formule van Manning, doch het spreekt vanzelf dat er van enige nauwkeurigheid in de berekening van de leiding geen sprake meer kan zijn'.

Dit heeft de mening doen postvatten, dat het de voorkeur ver-

dient om de meetresultaten onbevooroordeeld, dus niet in formulevorm, met elkaar in verband te brengen door b.v. een polyfactoranalyse om pas daarna de gevonden resultaten aan de bestaande formule(s) te toetsen. Dat daarnaast ook een numerische bewerking zal kunnen plaats hebben met dezelfde doeleinden, tast het principe: eerst een verband zoeken, daarna toetsing aan de bestaande theorie, niet aan.

EEN EERSTE ORIËNTATIE

Het is duidelijk, dat het debiet Q als afhankelijke variabele moet worden gezien en dat de grootte van het debiet bepaald wordt door:

1. verhang
2. begroeiing
3. leidingafmetingen in de vorm van factoren, die vorm en grootte van het dwarsprofiel bepalen
4. stuwopening
5. waterdiepte

Aangezien het, in verband met de hoeveelheid waarnemingen, gewenst zou zijn het aantal factoren wat te beperken, zou het zinvol zijn na te gaan of er tussen de verschillende factoren onderling dusdanig hoge correlaties bestaan, dat de ene factor als een functie van een andere beschouwd zou kunnen worden. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn met de factoren A (natte oppervlak) en R (hydraulische straal), die beide sterk met de waterdiepte y samen blijken te hangen (zie fig. 6A en 6B).

Allereerst is een oriënterende bewerking uitgevoerd met als onafhankelijke variabelen de waterdiepte y, het waterspiegelverhang Sw en de wandruwheidsfactor k_M. De uit deze bewerking resulterende verzamelfiguren zijn niet in extenso weergegeven, omdat het in eerste instantie een oriënterende bewerking betreft en omdat van de later volgende definitieve bewerkingen wel alle verzamelgrafieken zullen worden getoond. Wel is één verzamelfiguur (fig. 7) toegevoegd, waarin het debiet Q is uitgezet tegen het product van de drie

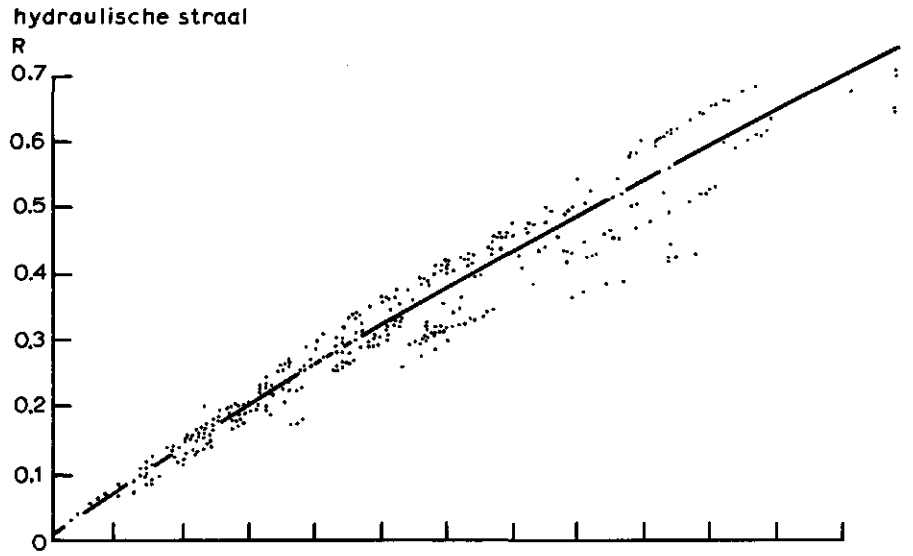


Fig. 6a. Relatie tussen waterdiepte en hydraulische straal R

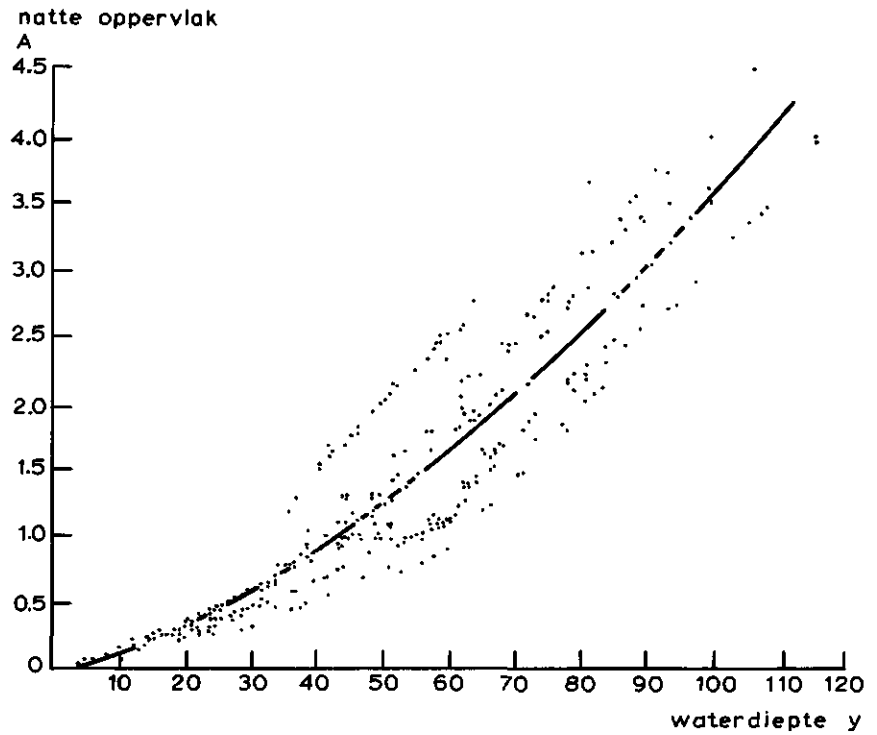


Fig. 6b. Relatie tussen waterdiepte en natte oppervlak A

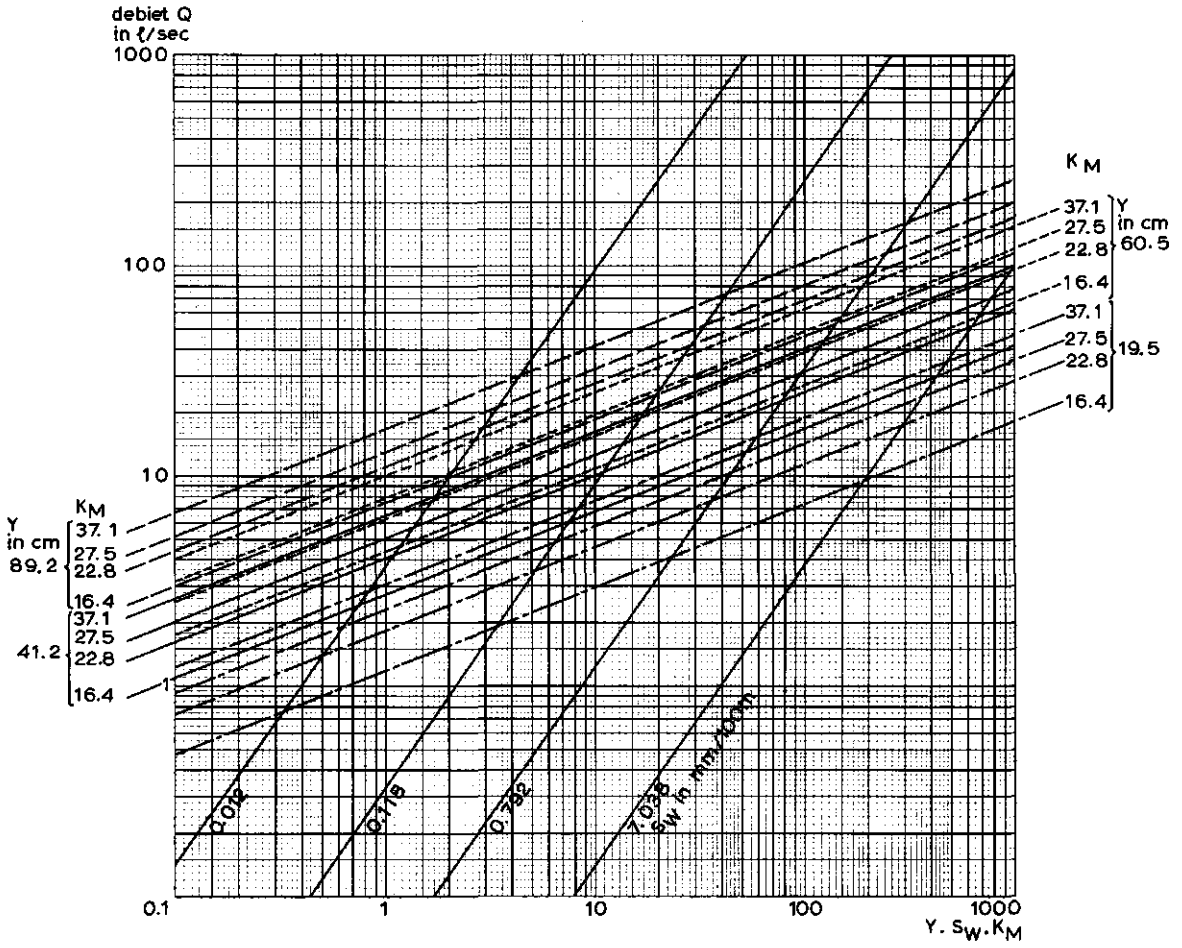


Fig. 7. Resultaat van een eerste oriënterende grafische bewerking. Ingetekend zijn lijnen van gelijke waarde voor elke orde uit de grafische bewerking van de factoren y (waterdiepte), S_w (waterspiegelverhang) en k_M (wandruwheidscoëfficiënt) en bijgeschreven de gemiddelde waarde van elke orde

onafhankelijke variabelen, terwijl lijnen van gelijke waarde voor elke factor afzonderlijk ingetekend zijn. De gebruikte waarde voor elke factor afzonderlijk is de waarde van het gemiddelde van elke orde, waarin het waarnemingsmateriaal voor deze bewerking is verdeeld.

In deze figuur wordt op zeer compacte wijze de samenhang weergegeven tussen waterdiepte, waterspiegelverhang, wandruwheid en debiet. Terwille van de compactheid is op de horizontale as het product van y, Sw en k_M gebruikt, omdat dit product - uitgezet tegen het debiet - een rechtlijnig verband blijkt op te leveren. Er zijn lijnen ingetekend, die de gemiddelde waarde vertegenwoordigen van elke orde, die in de polyfactoranalyse is gebruikt. Het waarnemingsmateriaal is opgesplitst in een aantal orden, in ieder waarvan evenveel waarnemingen zijn ondergebracht.

Deze figuur geeft althans enig inzicht in de vorm, welke een gewijzigde Manning-formule zou kunnen krijgen.

Uit de figuren 6A en 6B kan nog het volgende worden afgeleid:

uit fig. 6A: $R = 0{,}6\ y$ (5)

uit fig. 6B: $\log y = 0{,}65 \log A - 0{,}376$ of (6)

$$\log A = \frac{\log 2{,}278 + \log y}{\log 4{,}467} \tag{7}$$

Als deze waarden gesubstitueerd zouden worden in de Manning-formule ontstaat:

$$\log Q = \log k_M + \frac{\log 2{,}278 + \log y}{\log 4{,}467} + 2/3(\log 0{,}6 + \log y) + \tfrac{1}{2} \log Sw \tag{8}$$

Hieruit zou k_M als enige onbekende op te lossen zijn. Dit resultaat is evenwel nog wat te grof om als eindresultaat te dienen, omdat het gebaseerd is op de samenhang tussen y en A zowel als R. De spreiding, die in de figuren 6A en 6B deze samenhang begeleidt, dient teneinde tot nauwkeuriger resultaten te komen, vermeden te worden.

Het behoeft geen betoog, dat een gewijzigde Manning-formule, waarin de gehele diepte-breedte-verhouding van het natte dwarsprofiel als een functie van de waterdiepte kan worden weergegeven, bij de be-

rekening grote voordelen kan bieden. Deze eerste grove benadering wijst de richting aan, waarin de uiteindelijke oplossing waarschijnlijk moet worden gezocht.

ALGEMENE OPMERKINGEN BIJ DE DEFINITIEVE BEWERKING

Bij de hierna volgende definitieve bewerking van het waarnemingsmateriaal zal het niet geheel te vermijden zijn, dat de drie onderdelen, waarin het probleem volgens het hoofdstuk 'Probleemstelling' kan worden gesplitst, soms gezamenlijk tot een oplossing moeten worden gebracht.

Dit zal met name het geval zijn bij het onderzoek naar de algemene geldigheid van de gehele formule en de berekenbaarheid van de k_M en het onderzoek naar de waarde van de exponenten, welke in de Manning-formule voorkomen.

Het onderzoek naar de breedte-diepte-verhouding van het natte dwarsprofiel kan hier in grote trekken wel van gescheiden worden gehouden, hoewel voor de controle op de nauwkeurigheid van de resultaten weer gebruik gemaakt moet worden van de (al of niet gewijzigde) formule. De verschillende bewerkingen zullen derhalve niet strak gescheiden kunnen worden gehouden, doch zullen verschillende keren in elkaar grijpen.

Verder dient vooraf nog opgemerkt te worden dat bij de nu volgende onderdelen van het onderzoek soms een bepaald probleem op verschillende manieren is benaderd en tot een oplossing is gebracht. Hoewel in het onderhavige onderzoek, wat op Salland betrekking heeft, vaak de laatst ontwikkelde methode althans voor de situatie in Salland tot de beste oplossing heeft geleid, zijn toch de hieraan voorafgegane benaderingsmethoden eveneens weergegeven, omdat deze hun waarde blijven behouden. Het moet immers niet uitgesloten worden geacht, dat onder andere omstandigheden dan die in Salland aangetroffen zijn, van de eerder ontwikkelde berekeningsmethoden er één of meer tot betere resultaten leiden. Dit geldt vooral voor de oplossingen van het probleem van de diepte-breedte-verhouding in het natte dwarsprofiel.

Samenhang tussen de waterdiepte en de factoren, die het hydrologisch dwarsprofiel weergeven

Het lijkt van belang na te gaan of de factoren, die het natte dwarsprofiel bepalen, te weten het natte oppervlak A, de natte omtrek P en de hydraulische straal R kunnen worden weergegeven als een functie van de waterdiepte y. Dit zou ten eerste een grafische bewerking als gevolg van een beperking van het aantal in de bewerking op te nemen factoren aanzienlijk kunnen vereenvoudigen, doch zo zou tevens worden aangegeven of de tot nu toe steeds gebruikte formules voor A (3) en voor P (4) nog wel bruikbaar zijn, omdat deze uitgaan van een veronderstelde trapeziumvorm van het dwarsprofiel, die meestal niet met de werkelijkheid overeenkomt.

Wanneer men zich beperkt tot reële waterdiepten blijkt het heel goed mogelijk te zijn om een samenhang te vinden tussen A en y enerzijds en tussen A en P anderzijds. Deze samenhang blijkt lineair te zijn wanneer men de waarnemingen langs beide assen logarithmisch uitzet. Hierdoor wordt het mogelijk het verband op eenvoudige wijze in een formule uit te drukken. Afwijkingen van een lineaire samenhang gaan zich pas voordoen bij volkomen irreële situaties, bijvoorbeeld bij waterdiepten van slechts enkele centimeters in leidingen met zeer grote bodembreedten.

In de loop van het onderzoek zijn verschillende methoden ontwikkeld, die hieronder alle de revue zullen passeren.

M e t h o d e 1: e l k e p r o e f p l e k a f z o n d e r l i j k

In tabel 1 is voor elke proefplek afzonderlijk het gezochte verband opgenomen. Het is niet ondenkbaar dat het mogelijk zal zijn sommige proefplekken tot groepen met eenzelfde verband samen te voegen, doch van ingrijpende betekenis is dit voor een verdere bewerking niet.

Deze tabel is ontstaan uit de figuren, waarin de waterdiepte (y) is uitgezet tegen respectievelijk de natte omtrek (P), nat oppervlak

Tabel I. Het verband tussen log y en log A en tussen log A en log P voor elke proefplek afzonderlijk, berekend uit het grafisch verband, waarvan in de figuren 8B en 9B voorbeelden zijn gegeven. Tevens is nog berekend het verband tussen log y en log P en tussen log y en log R

Nr.		log y		log A		log P		log P		log R	
229	boven	0,586	log A − 0,238	1,706	log y + 0,406	0,515	log A + 0,510	0,879	log y + 0,719	0,827	log y − 0,313
229	beneden	0,624	" − 0,210	1,603	" + 0,337	0,539	" + 0,480	0,864	" + 0,662	0,739	" − 0,325
246		0,696	" − 0,262	1,437	" + 0,376	0,457	" + 0,480	0,657	" + 0,652	0,780	" − 0,276
516 I	boven	0,745	" − 0,300	1,342	" + 0,403	0,508	" + 0,472	0,682	" + 0,677	0,660	" − 0,274
516 I	beneden	0,612	" − 0,265	1,634	" + 0,433	0,455	" + 0,515	0,743	" + 0,712	0,891	" − 0,279
516 II		0,752	" − 0,445	1,330	" + 0,592	0,396	" + 0,562	0,527	" + 0,796	0,803	" − 0,204
517 III		0,684	" − 0,287	1,462	" + 0,420	0,450	" + 0,490	0,658	" + 0,679	0,804	" − 0,259
52 II		0,660	" − 0,413	1,515	" + 0,626	0,345	" + 0,597	0,523	" + 0,813	0,992	" − 0,187
522 II		0,692	" − 0,370	1,445	" + 0,535	0,344	" + 0,594	0,497	" + 0,778	0,948	" − 0,243
522 III		0,616	" − 0,286	1,623	" + 0,464	0,456	" + 0,543	0,740	" + 0,755	0,883	" − 0,291
534 I		0,735	" − 0,316	1,361	" + 0,430	0,430	" + 0,512	0,585	" + 0,670	0,776	" − 0,240
534 II		0,539	" − 0,180	1,855	" + 0,340	0,444	" + 0,503	0,824	" + 0,654	1,031	" − 0,314
544 I		0,612	" − 0,268	1,634	" + 0,438	0,450	" + 0,472	0,735	" + 0,669	0,899	" − 0,231
544 II		0,625	" − 0,210	1,600	" + 0,336	0,459	" + 0,445	0,734	" + 0,599	0,866	" − 0,263
574 I		0,627	" − 0,215	1,595	" + 0,343	0,576	" + 0,490	0,919	" + 0,688	0,676	" − 0,345
574 II		0,712	" − 0,245	1,404	" + 0,344	0,483	" + 0,467	0,678	" + 0,633	0,726	" − 0,289
54 III	boven	0,650	" − 0,410	1,538	" + 0,631	0,369	" + 0,605	0,568	" + 0,838	0,970	" − 0,207
54 III	beneden	0,712	" − 0,487	1,404	" + 0,684	0,323	" + 0,640	0,453	" + 0,861	0,951	" − 0,177
56	boven	0,744	" − 0,466	1,344	" + 0,626	0,305	" + 0,613	0,410	" + 0,804	0,934	" − 0,178
56	beneden	0,672	" − 0,422	1,488	" + 0,628	0,350	" + 0,606	0,521	" + 0,826	0,967	" − 0,198
565	boven	0,678	" − 0,315	1,475	" + 0,465	0,401	" + 0,538	0,591	" + 0,724	0,884	" − 0,259
565	beneden	0,625	" − 0,372	1,600	" + 0,595	0,260	" + 0,620	0,416	" + 0,775	1,184	" − 0,180
625		0,665	" − 0,315	1,504	" + 0,474	0,483	" + 0,588	0,726	" + 0,817	0,778	" − 0,343
626 II		0,668	" − 0,360	1,497	" + 0,539	0,348	" + 0,556	0,521	" + 0,744	0,976	" − 0,205
628 I		0,719	" − 0,281	1,391	" + 0,391	0,437	" + 0,517	0,608	" + 0,688	0,783	" − 0,297
628 II		0,682	" − 0,338	1,466	" + 0,496	0,316	" + 0,542	0,463	" + 0,699	1,003	" − 0,203
701 I		0,534	" − 0,222	1,873	" + 0,416	0,364	" + 0,550	0,682	" + 0,701	1,191	" − 0,285
701 II		0,649	" − 0,267	1,541	" + 0,411	0,373	" + 0,535	0,575	" + 0,688	0,966	" − 0,277
735 I	boven	0,688	" − 0,258	1,453	" + 0,375	0,431	" + 0,532	0,626	" + 0,694	0,827	" − 0,319
735 I	beneden	0,740	" − 0,338	1,351	" + 0,457	0,380	" + 0,516	0,513	" + 0,690	0,838	" − 0,233
735 II		0,589	" − 0,277	1,698	" + 0,470	0,395	" + 0,502	0,671	" + 0,688	1,027	" − 0,218
736 II		0,731	" − 0,262	1,368	" + 0,358	0,455	" + 0,512	0,622	" + 0,675	0,746	" − 0,317
74 I	boven	0,735	" − 0,546	1,361	" + 0,743	0,297	" + 0,699	0,404	" + 0,920	0,957	" − 0,177
74 I	beneden	0,696	" − 0,513	1,437	" + 0,737	0,349	" + 0,641	0,502	" + 0,898	0,935	" − 0,161
826 I	boven	0,633	" − 0,316	1,580	" + 0,499	0,364	" + 0,520	0,575	" + 0,702	1,005	" − 0,203
826 I	beneden	0,676	" − 0,290	1,479	" + 0,429	0,527	" + 0,528	0,740	" + 0,754	0,739	" − 0,325
83 I		0,690	" − 0,365	1,449	" + 0,529	0,310	" + 0,595	0,449	" + 0,759	1,000	" − 0,230
835 III		0,661	" − 0,368	1,513	" + 0,557	0,262	" + 0,590	0,396	" + 0,736	1,117	" − 0,179
911 I		0,621	" − 0,360	1,610	" + 0,580	0,416	" + 0,570	0,670	" + 0,811	0,940	" − 0,231
911 II		0,626	" − 0,388	1,597	" + 0,620	0,326	" + 0,602	0,521	" + 0,804	1,076	" − 0,184
96 I		0,759	" − 0,522	1,318	" + 0,688	0,324	" + 0,652	0,427	" + 0,875	0,891	" − 0,187
96 II		0,621	" − 0,338	1,610	" + 0,544	0,452	" + 0,582	0,728	" + 0,828	0,882	" − 0,284
941	boven	0,695	" − 0,372	1,439	" + 0,535	0,446	" + 0,540	0,642	" + 0,779	0,797	" − 0,244
941	beneden	0,672	" − 0,375	1,488	" + 0,558	0,488	" + 0,542	0,726	" + 0,814	0,762	" − 0,256
971	beneden	0,637	" − 0,340	1,570	" + 0,534	0,363	" + 0,600	0,570	" + 0,794	1,000	" − 0,260
974 I		0,644	" − 0,308	1,553	" + 0,478	0,428	" + 0,540	0,665	" + 0,745	0,888	" − 0,267
978 III		0,674	" − 0,300	1,484	" + 0,445	0,382	" + 0,526	0,567	" + 0,696	0,917	" − 0,251
		a	−b	f	g	p	q	n	m	s	t

$$\log A = \frac{\log y}{a} + \frac{b}{a} \qquad \log P = g + p(f \log y + g) \qquad \log R = (f-n)\log y + (g-m)$$

(A), hydraulische straal (R) en de waterspiegelbreedte (B). Voor elk object is een dergelijke figuur vervaardigd. Als voorbeeld zijn er twee exemplaren bijgevoegd en wel van proefplek 56 boven (fig. 8A, 8B en 8C) als voorbeeld van een regelmatig gevormd dwarsprofiel en van proefplek 83 I (fig. 9A, 9B en 9C) als voorbeeld van een als gevolg van de aanwezige betuining wat grilliger gevormd dwarsprofiel.

In de voorbeeldfiguur is duidelijk te zien dat er een nauw verband (lineair) bestaat tussen y en A wanneer de waarnemingen logarithmisch worden uitgezet. Een verband dat zich makkelijk in een eenvoudige formule laat vastleggen. Uit een vergelijking van de figuren 10A en 10B blijkt bovendien dat deze weergave door middel van de zojuist ontworpen formules de gemeten A-waarden veel dichter benadert dan door gebruikmaking van de conventionele, op veronderstelde trapeziumvorm van het dwarsprofiel gebaseerde formules.

Bij het verband tussen log A en log P liggen de zaken wat minder eenvoudig. Weliswaar laat ook hier zich, zoals in de twee voorbeelddoorsneden te zien is, een lineair verband aantonen, dat zich op eenvoudige wijze in een formule laat uitdrukken zoals in tabel I reeds is weergegeven, doch de spreiding blijft groter dan wenselijk is.

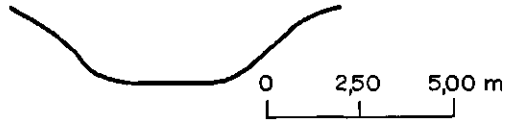
Weliswaar is de spreiding, wanneer de conventionele op veronderstelde trapeziumvorm gebaseerde formules worden gebruikt, helemaal ontoelaatbaar groot (fig. 11) en geeft het gebruik van de zojuist ontwikkelde formule ten opzichte daarvan reeds een verbetering te zien (fig. 12).

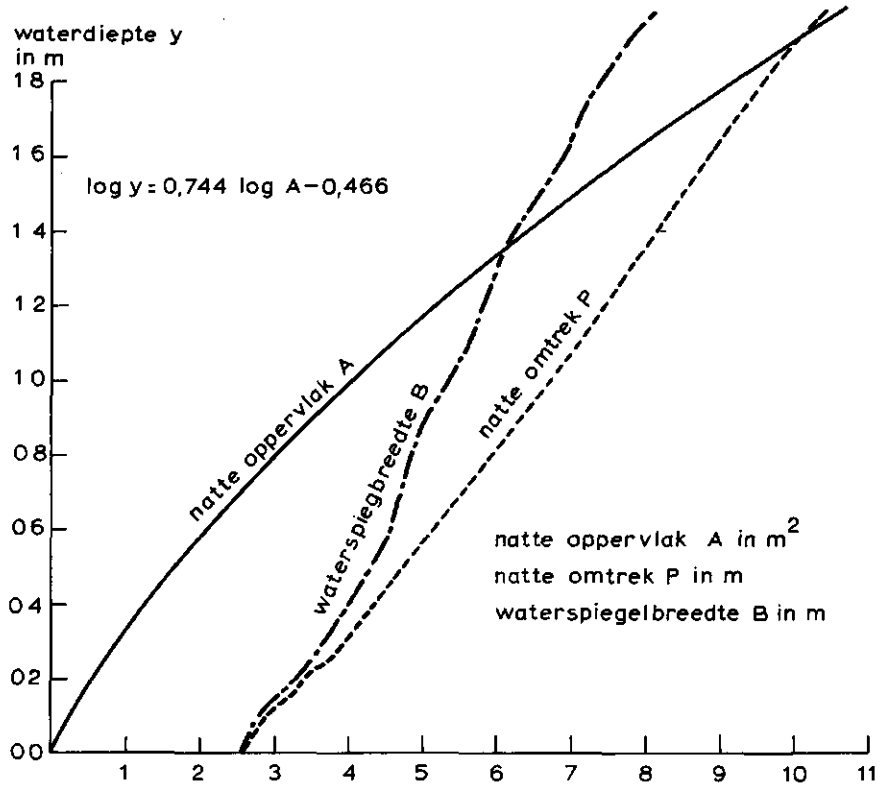
Alleen de P-waarden bij de waterdiepte van 100 cm vertonen wat afwijkingen, doch dit betreft uitsluitend gevallen van enkele kleine leidingen met een nogal grillig gevormd talud, waar bovendien een waterdiepte van 100 cm uiterst zelden of nooit voorkomt. In het algemeen liggen bij deze grotere waterdiepten de werkelijke P-waarden wat hoger dan de vereffende. Dit is het gevolg van het feit, dat in het algemeen bij het grafisch vereffenen meer het aangetroffen verband bij geringe waterdiepten is gevolgd, omdat dit in de praktijk veel vaker voorkomt. Bij de waterdiepte 40 cm is het verband dan ook veel nauwer.

Toch doen de voorbeeldfiguren 8C en 9C vermoeden dat er nog een

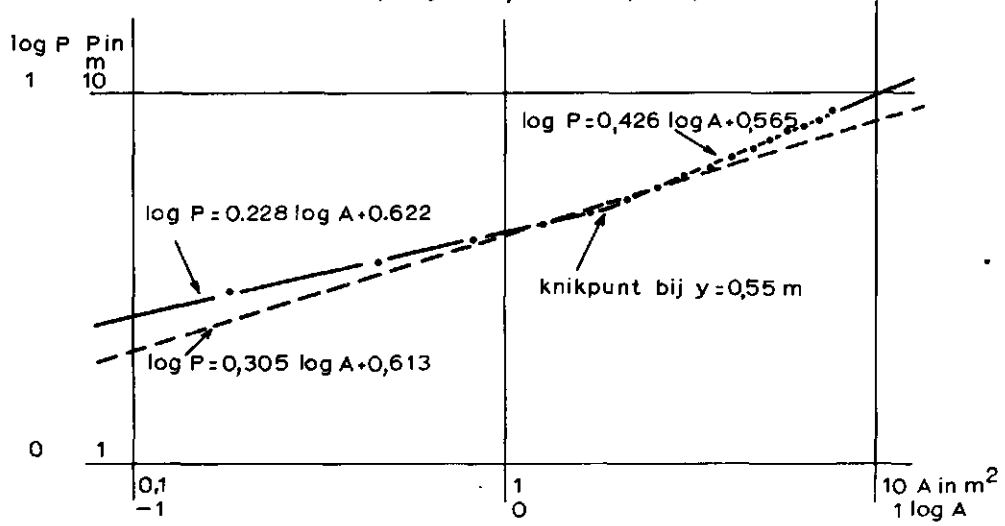
proefplek 56 boven dwarsdoorsnede, voorbeeld van een regelmatige vorm

(a)





(b) de relatie tussen waterdiepte y en A, P en B in proefplek 56 boven



(c) de relatie tussen log A en log P in proefplek 56 boven

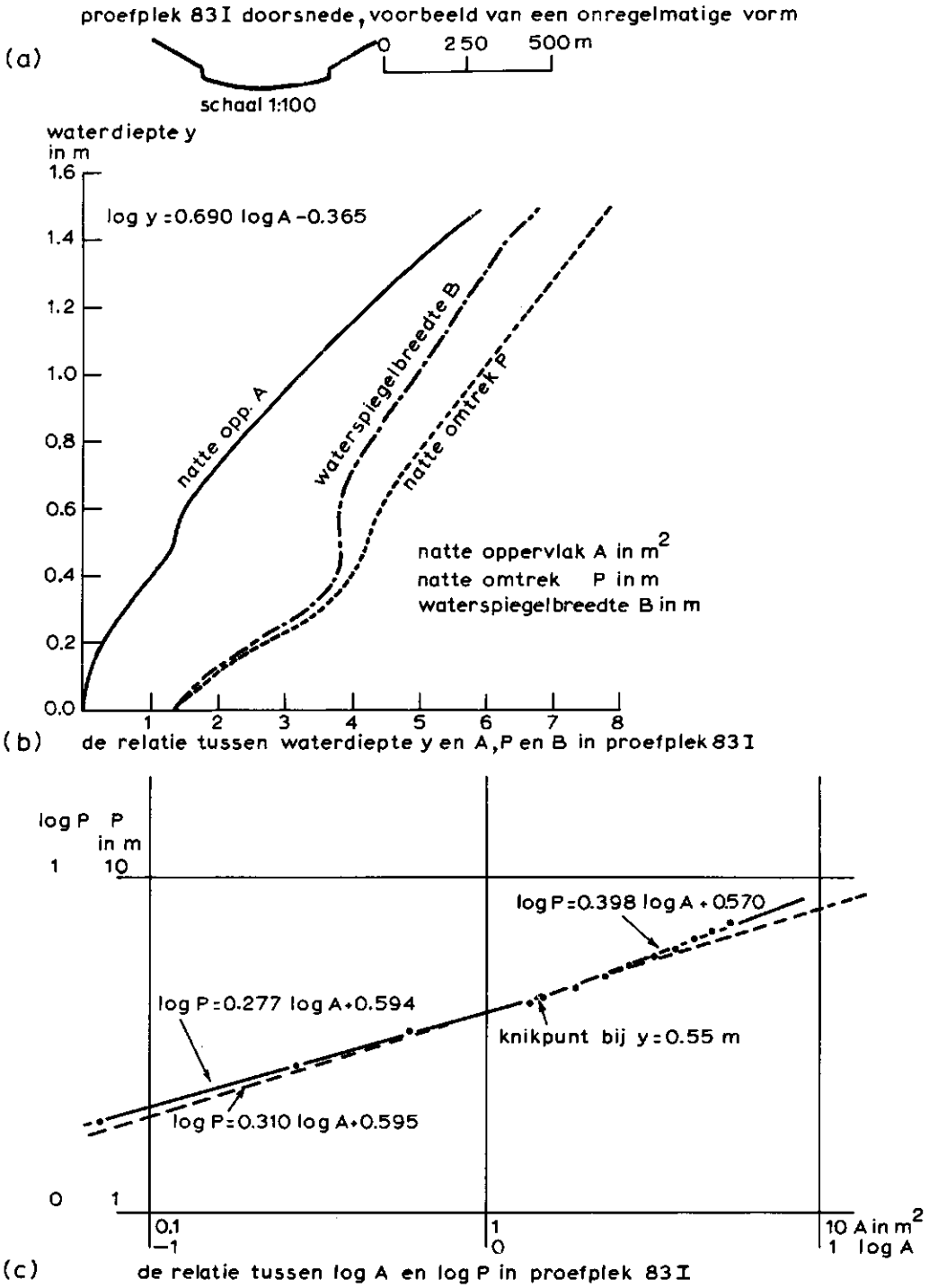
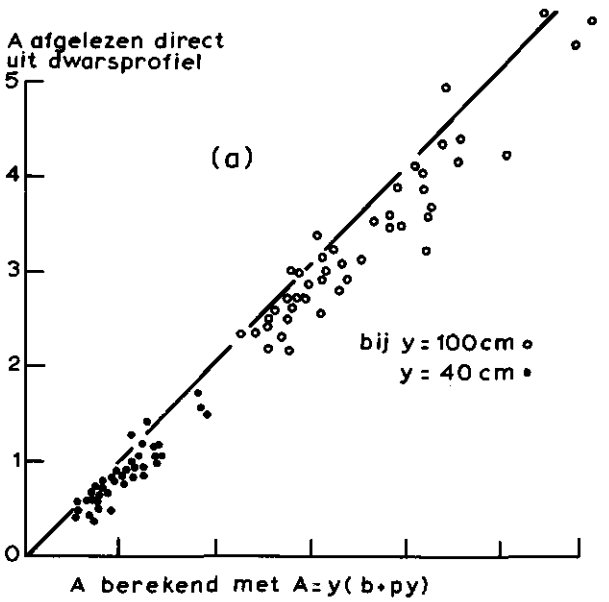

proefplek 83I doorsnede, voorbeeld van een onregelmatige vorm
(a)
0 250 500 m
schaal 1:100
waterdiepte y
in m
log y = 0.690 log A - 0.365
natte opp. A
waterspiegelbreedte B
natte omtrek P
natte oppervlak A in m2
natte omtrek P in m
waterspiegelbreedte B in m
(b) de relatie tussen waterdiepte y en A, P en B in proefplek 83I
log P P
in m
log P = 0.398 log A + 0.570
log P = 0.277 log A + 0.594
knikpunt bij y = 0.55 m
log P = 0.310 log A + 0.595
10 A in m2
log A
(c) de relatie tussen log A en log P in proefplek 83I

fig. 10


A afgelezen direct
uit dwarsprofiel
5
4
3
2
1
0
(a)
bij y = 100cm o
y = 40 cm •
A berekend met A=y(b+py)

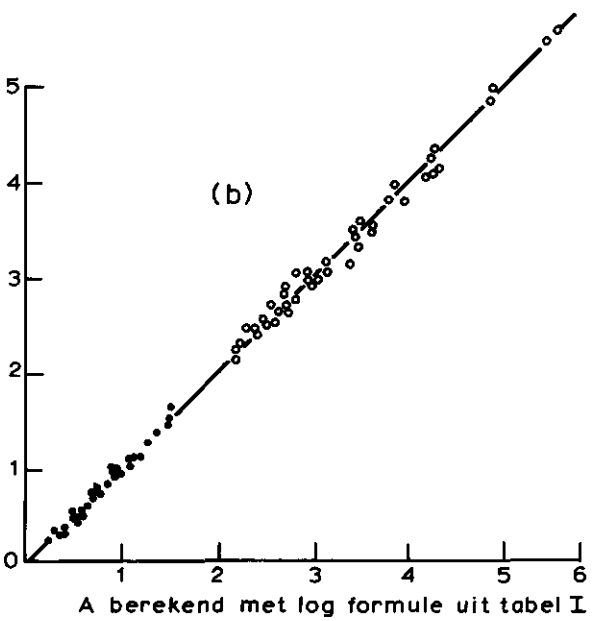

5
4
3
2
1
0
(b)
1
2
3
4
5
6
A berekend met log formule uit tabel I

fig.11

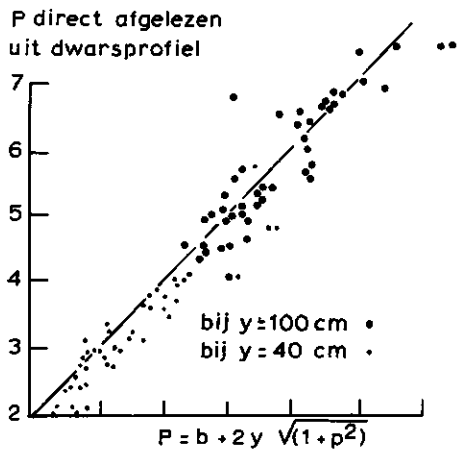


fig.12

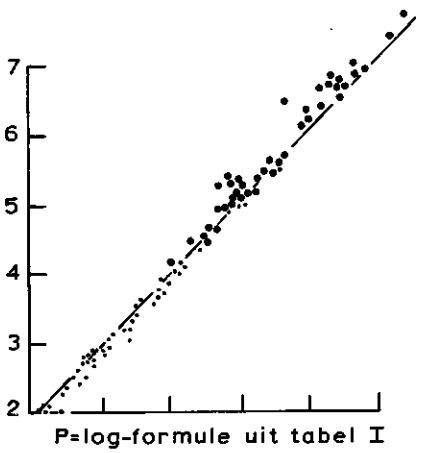
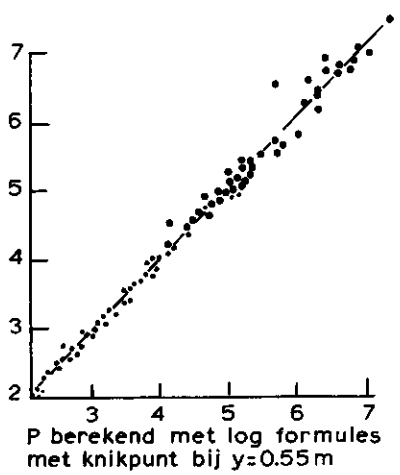


fig.13



afname van de spreiding mogelijk is. Het valt namelijk op dat al deze figuren (waarvan er als voorbeeld twee gegeven zijn) een duidelijke knik in het lineaire verband vertonen bij een waterdiepte van ongeveer 55 cm. Het is mogelijk van dit verschijnsel gebruik te maken en twee verschillende lineaire samenhangen te hanteren met als criterium voor hun toepassing de waterdiepte 55 cm.

Dit is geschied en in de controlefiguur 13 zijn de op deze wijze berekende P-waarden uitgezet tegen de gemeten P-waarden. Duidelijk kan geconstateerd worden, dat door toepassing van deze methode wederom een afname van de spreiding kan worden geconstateerd ten opzichte van fig. 12, waarin de knik in het lineaire verband werd genegeerd.

Methode 1A: e l k e p r o e f p l e k a f z o n d e r l i j k
met introductie van de w a t e r s p i e g e l b r e e d t e

Er is reeds vaker op gezinspeeld dat in een wat oudere leiding de oorspronkelijke trapeziumvorm wordt omgezet in een natuurlijk dwarsprofiel met geleidelijker overgangsvormen. Het is de vraag of het gemak van de berekening in het begin uiteindelijk zwaarder moet wegen dan de doelmatigheid na lange(re) tijd. Wiskundig zouden andere profielvormen zeker niet ingewikkeld behoeven te zijn, omdat het mogelijk is een profielvorm te kiezen, die door één enkele parameter wordt beheerst in plaats van twee, namelijk taludhelling en bodembreedte.

Met dit gegeven als uitgangspunt zijn alle dwarsprofielen, zoals die zijn opgenomen, nog eens aan een nader onderzoek onderworpen. Gebleken is daarbij, dat de vorm steeds meer een exponentiële gaat benaderen.

Wanneer men de logarithme van de waterspiegelbreedte (B) tegen de logarithme van de waterdiepte (y) uitzet, dan ontstaat bij goede benadering een rechte lijn, welke wordt weergegeven door:

$$\log y = a \log B + b \quad \text{(zie fig. 14)} \qquad (9)$$

Wanneer de variabele waarden voor a en b tegen elkaar worden uitgezet blijkt tussen deze grootheden een duidelijke lineaire samenhang te bestaan, welke weergegeven wordt door:

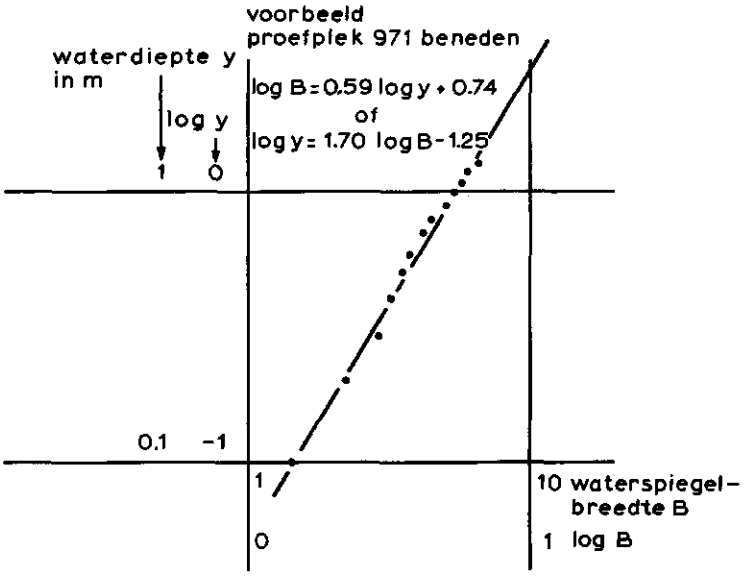


Fig. 14. Relatie tussen waterspiegelbreedte B en waterdiepte y op een proefplek

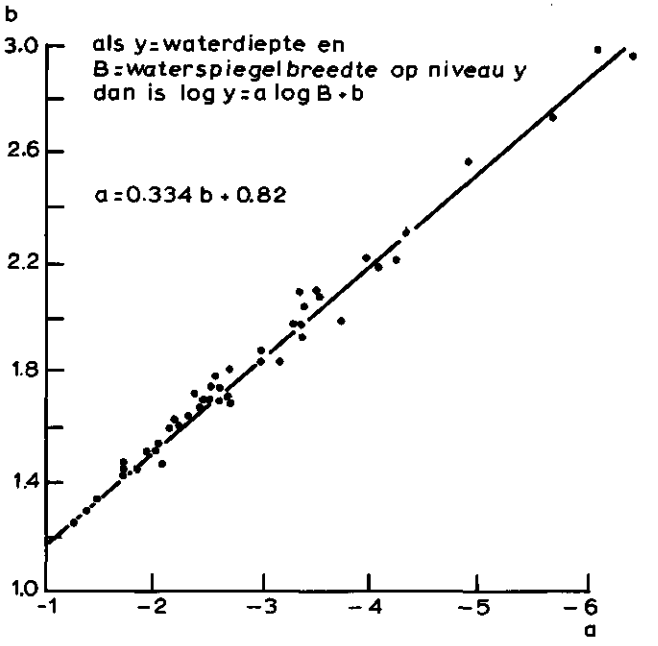


Fig. 15. Relatie tussen a en b in log y = a log B + b

$$\log a = \alpha + \beta \log b \quad \text{(zie fig. 15 en tabel II)} \tag{10}$$

Uit fig. 15 kunnen de waarden voor α en β berekend worden, zodat formule (10) wordt:

$$a = 0{,}82 + 0{,}334\ b \tag{11}$$

Men kan nu schrijven:

$$\begin{aligned} \log y &= b\ (\log B + 0{,}334) + 0{,}82 \\ &= b\ (\log B + \log 2{,}14) + \log 6{,}57 \\ &= \log 6{,}57(2{,}14\ B)^b \end{aligned}$$

of

$$y = 6{,}57\ (2{,}14\ B)^b \tag{12}$$

Voor de bodemgesteldheid van het gebied gelden vaste constanten: 0,82 en 0,334, die de erosieweerstand weergeven, terwijl B en y maar volgens één enkele variabele parameter b samenhangen.

Wanneer een bepaalde afvoerintensiteit wordt nagestreefd en het verhang en de wandruwheid reeds vaststaan, hangt de afvoer verder alleen van het dwarsprofiel af. Deze kan nu berekend worden als B en y bekend zijn. Tussen het natte oppervlak A en de natte omtrek P bestaat eveneens een relatie.

Als de toename van P bij een (geringe) waterspiegelverhoging wordt voorgesteld door dP dan hangt deze toename af van de toename van B en y volgens:

$$dP = \sqrt{dB^2 + dy^2} \quad \text{(Pythagoras)}$$

of

$$\frac{dP}{dB} = \sqrt{\left(\frac{dy}{dB}\right)^2 + 1}$$

De uitwerking hiervan blijkt veel ingewikkelder dan die van de vorige relatie.

Aan de oplossing kan dan ook beter een apart onderzoek worden gewijd omdat de resultaten belangrijk worden geacht, aangezien daarmee de leidingontwerpers reeds direct de mogelijkheid in handen wordt gelegd de leiding een natuurlijk profiel mee te geven, dat anders pas

Tabel II. Waarden voor elke proefplek afzonderlijk van:

b en a uit: $\log y = a \log B + b$

van B bij y = 100 cm en van $\frac{dy}{dB}$ uit: $\frac{dP}{dB} = \left(\frac{dy}{dB}\right)^2 + 1$

				b		a	B (bij y = 100)	dy dB
229		boven	log y =	1,23	log x	- 1,24	431	0,286
		beneden	=	1,27	"	- 1,32	411	0,309
246			=	1,62	"	- 2,18	380	0,426
516	I	boven	=	1,61	"	- 2,22	418	0,385
		beneden	=	1,44	"	- 1,83	457	0,315
516	II		=	1,78	"	- 2,92	581	0,306
517			=	1,50	"	- 1,94	423	0,354
52	II		=	2,17	"	- 4,04	607	0,357
522	II		=	1,96	"	- 3,30	506	0,387
522	III		=	1,53	"	- 2,05	444	0,345
534	I		=	1,69	"	- 2,47	442	0,383
534	II		=	1,44	"	- 1,71	377	0,382
544	I		=	1,42	"	- 1,72	417	0,341
544	II		=	1,46	"	- 1,71	348	0,420
574	I		=	1,33	"	- 1,45	393	0,339
574	II		=	1,72	"	- 2,37	347	0,495
54	III	boven	=	1,83	"	- 3,12	628	0,291
		beneden	=	2,19	"	- 4,22	692	0,316
56		boven	=	2,97	"	- 6,12	542	0,548
		beneden	=	1,91	"	- 3,35	632	0,302
565		boven	=	1,87	"	- 2,97	455	0,411
		beneden	=	2,30	"	- 4,31	554	0,415
625			=	2,03	"	- 3,36	437	0,465
626	II		=	1,96	"	- 3,27	488	0,401
628	I		=	1,74	"	- 2,53	401	0,434
628	II		=	2,07	"	- 3,51	459	0,451
701	I		=	1,59	"	- 2,15	407	0,390
701	II		=	1,80	"	- 2,70	408	0,441
735	I	boven	=	2,08	"	- 3,32	361	0,576
		beneden	=	2,08	"	- 3,49	436	0,477
735	II		=	1,64	"	- 2,31	425	0,386
736	II		=	1,78	"	- 2,56	365	0,488
74	I	boven	=	2,95	"	- 6,46	738	0,400
		beneden	=	1,97	"	- 3,70	782	0,252
826	I	boven	=	1,67	"	- 2,45	462	0,361
		beneden	=	1,51	"	- 2,02	459	0,329
83	I		=	2,20	"	- 3,93	496	0,444
835	III		=	2,56	"	- 4,87	483	0,530
911	I		=	1,46	"	- 2,07	613	0,238
911	II		=	1,68	"	- 2,70	628	0,268
96	I		=	2,72	"	- 5,72	689	0,395
96	II		=	1,78	"	- 2,89	559	0,319
941		boven	=	1,68	"	- 2,59	540	0,311
		beneden	=	1,83	"	- 2,98	526	0,348
971		beneden	=	1,70	"	- 2,66	551	0,309
974	I		=	1,69	"	- 2,51	466	0,362
978	III		=	1,73	"	- 2,59	450	0,384

na enige tijd door uitschuring en opslibbing wordt verkregen.

Methode 2: de g e c o r r i g e e r d e w a t e r d i e p t e

Bij de hieronder ontwikkelde methode is de grondgedachte geweest te komen tot een algemeen geldende formule voor een functie van de waterdiepte als maat voor de breedte-diepte-verhouding van het natte dwarsprofiel. De gedachtengang, die hieraan ten grondslag ligt, is de volgende.

Indien men beschikt over een formule (al of niet van het Manning-type), welke het gehele proces van de waterstroming in een leiding juist weergeeft, dan kan men uit de beschikbare waarnemingen een waterdiepte berekenen.

Terloops zij hier opgemerkt, dat in dit stadium van het onderzoek geschiedt, wat in het hoofdstuk 'Probleemstelling' reeds is voorspeld, namelijk dat de onderdelen waarin het onderzoek is gesplitst hier noodgedwongen enigszins dooreen gaan lopen. Uitgegaan wordt namelijk van de aanwezigheid van een formule, die het genoemde proces juist weergeeft. Deze verbeterde formule wordt eerst in een later stadium van het gehele onderzoek ontwikkeld, doch dient nu reeds te worden aangehaald omdat de controle op de methode van de gecorrigeerde waterdiepte alleen met deze verbeterde formule mogelijk is. Deze formule is als volgt:

$$\log Q = 0{,}9173 \log k_M + 0{,}3645 \log S_w + 0{,}5 \log y_b - 0{,}33 \log y_b \cdot \log S_w - 0{,}28 \qquad (23)$$

In deze formule wordt een berekende waterdiepte (in het vervolg y_b genoemd) ingevuld, die meestal afwijkt van de gemeten waterdiepte (y_g genoemd). Dit kan twee oorzaken hebben:

1. Foutieve waarnemingen. Dit kan vooral voorkomen bij de aflezingen van de overstorthoogte (nodig voor de berekening van het debiet Q) en van het verhang S_w. Dit soort fouten is op geen enkele wijze te corrigeren en dient dan ook bij de verdere ontwikkeling van deze methode buiten beschouwing te worden gelaten.

2. Variaties in de diepte-breedte-verhouding van het natte dwarsprofiel bij eenzelfde waterdiepte. In dat geval dient een verschil tussen gemeten en berekende waterdiepte juist als basis voor een onderzoek naar de mogelijkheid van een verband tussen genoemde factoren.

Methode 2A: de g e c o r r i g e e r d e w a t e r d i e p t e
met introductie van de b o d e m b r e e d t e

Als log y_b wordt uitgezet tegen log P (zie fig. 16) dan blijkt dat de ontstane puntenzwerm zich redelijk nauwkeurig laat opsplitsen in stroken met eenzelfde bodembreedte. Het verband tussen log y_b en log P is per strook met gelijke bodembreedte rechtlijnig en laat zich derhalve op eenvoudige wijze in een formule uitdrukken. Ook de ligging van de stroken met gelijke bodembreedte ten opzichte van elkaar hangt ten nauwste met de bodembreedte samen.

Een en ander blijkt te kunnen worden samengevat in de volgende, geheel empirische, formule:

$$\log y_b = \log P\ (1{,}25\ b + 0{,}625) - 1{,}093\ b - 0{,}218 \qquad (13)$$

waarin b de bodembreedte in m voorstelt.

Wanneer de volgens formule (13) verkregen log y_b gebruikt wordt in formule (23) kan een wandruwheidscoëfficiënt worden berekend, welke de oorspronkelijke gemeten waarde van de k_M beter benadert dan door gebruik te maken van de gemeten waterdiepte y_g.

Dit wordt aangetoond in fig. 17, waarin de volgens formule (13) verkregen k_M-waarden zijn uitgezet tegen de oorspronkelijke schattingen van de wandruwheid. Hierin zijn de gevallen, welke bij de berekening volgens formule (20) grote afwijkingen veroorzaakten, reeds weggelaten.

Toch blijkt de introductie van de bodembreedte in de praktijk een lastige opgave. Om te beginnen is de bodembreedte door de vaak halfronde bodemvorm moeilijk exact vast te stellen, terwijl deze berekeningsmethode een exacte vaststelling van de bodembreedte juist als basis heeft. Verder betekent het principe, dat aan de toepassing van deze werkwijze ten grondslag ligt eigenlijk weer een teruggang

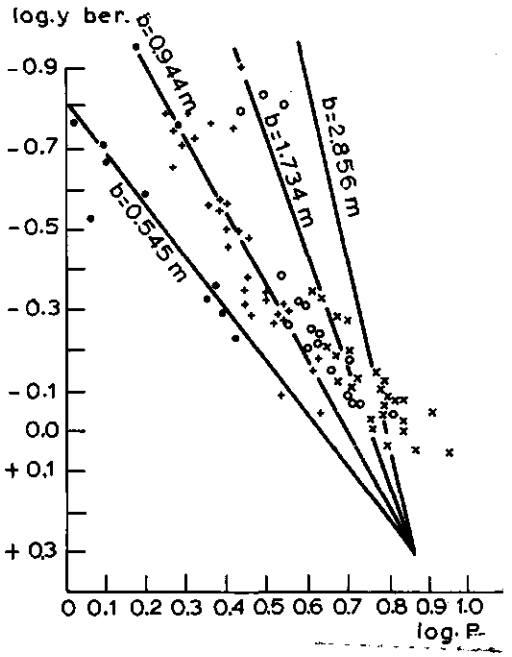


Fig. 16. Relatie tussen berekende (gecorrigeerde) waterdiepte ($\log y_b$), natte omtrek P en bodembreedte b volgens:

$\log y_b = \log P(1{,}25 + 0{,}625) - 1{,}093b - 0{,}218$

Ingetekend zijn lijnen met g gelijke gemiddelde bodembreedte volgens onderstaande legenda:

bodembreedte 40 t/m 70 cm
- • gem: 54,5
- 75 t/m 120 cm
- + gem: 94,4
- 125 t/m 200 cm
- o gem: 173,4
- 250 t/m 350 cm
- × gem: 285,6

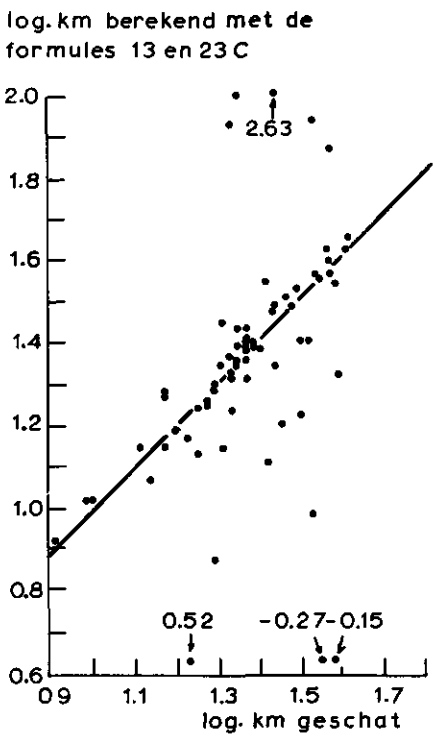


Fig. 17

naar het hanteren van de veronderstelde trapeziumvorm met rechte bodem, een veronderstelling die juist op grond van het niet overeenkomen met de werkelijkheid verlaten werd. De geïntroduceerde bodembreedte zou dan ook meer gezien moeten worden als een functie van de bodembreedte dan als de bodembreedte zelf, doch dat maakt een exacte vaststelling van deze factor niet eenvoudiger.

Toch is het niet ondenkbaar, dat deze methode in een gebied, waarin het bodemprofiel een exacte vaststelling van de bodembreedte wel toelaat, door zijn eenvoud waardevol zal kunnen blijken.

Methode 2B: de g e c o r r i g e e r d e w a t e r d i e p t e
met introductie van log A - log y_g

Er is nog een andere methode denkbaar, waarbij men niet tracht het natte dwarsprofiel in al zijn variaties vast te leggen. Ook deze methode heeft met de vorige gemeen, dat het gehele complex van het natte dwarsprofiel vervangen wordt door een berekende functie van de waterdiepte.

Het natte oppervlak A is te beschouwen als een product van waterdiepte y_g en een ongenoemde variabele maat voor de breedte van het dwarsprofiel. Deze maat is variabel als gevolg van de grilligheid in de variaties in de vorm van het natte dwarsprofiel en als zodanig niet in een exacte waarneming vast te leggen. Het is evenwel mogelijk deze variabele maat weer te geven als een quotiënt van het natte oppervlak A en de waterdiepte y_g. Dus als:

$$\log A - \log y_g$$

Aangezien deze methode goede perspectieven leek te bieden is voor een bewerking al het beschikbare waarnemingsmateriaal gebruikt en is dit niet beperkt gebleven tot de waarnemingen bij de hoogste en laagste beschikbare waterstand van elk object.

Uitgaande van de in de aanhef van deze paragraaf geannonceerde berekende waterdiepte y_b en het eveneens geïntroduceerde quotiënt log A - log y_g is gebleken, dat wanneer log A - log y_g wordt uitgezet tegen log y_g er lijnen van gelijke log y_b getrokken kunnen worden. Dit empirisch aangetroffen verband kan weliswaar physisch niet

goed verklaard worden, doch is ontegenzeggelijk zeer duidelijk aanwezig.

In fig. 18 is deze bewerking uitgevoerd, waarbij al het beschikbare materiaal is opgesplitst in groepen met een telkens met een waarde van 0,05 opklimmende log y_b-waarde. De lijnen met gelijke log y_b-waarde zijn recht en voldoen derhalve aan de betrekking:

$$\log y_g = -p(\log A - \log y_g) + q \qquad (14)$$

waarin p de helling van de lijn voorstelt en q het intercept.

Wederom empirisch blijkt dat p en q met log y_b samenhangen volgens:

$$\log y_b = 1{,}0283 \log(0{,}2 + p) - 0{,}218 \qquad (15)$$

en

$$\log y_b = 1{,}2468 \log(1{,}25 + q) - 0{,}384 \qquad (16)$$

(zie fig. 19A, 19B, 19C)

Na omwerking volgt hieruit:

$$p = 1{,}63\ y_b^{0{,}9725} - 0{,}2 \qquad (17)$$

$$q = 2{,}0325\ y_b^{0{,}8020} - 1{,}25 \qquad (18)$$

en wanneer deze formules worden gesubstitueerd in de basisformule:

$$\log y_g = -p(\log A - \log y_g) + q \qquad (14)$$

ontstaat:

$$(-1{,}63\ y_b^{0{,}9725} + 0{,}2)(\log A - \log y_g) + 2{,}0325\ y_b^{0{,}8020} - 1{,}25 = \log y_g \qquad (19)$$

In tabel III zijn de waarden van $1{,}63\ y_b^{0{,}9725} - 0{,}2$ en van $2{,}0325\ y_b^{0{,}8020} - 1{,}25$ voor de opklimmende waarden berekend, terwijl in tabel IV voor dezelfde opklimmende waarden van log y_b bij eveneens

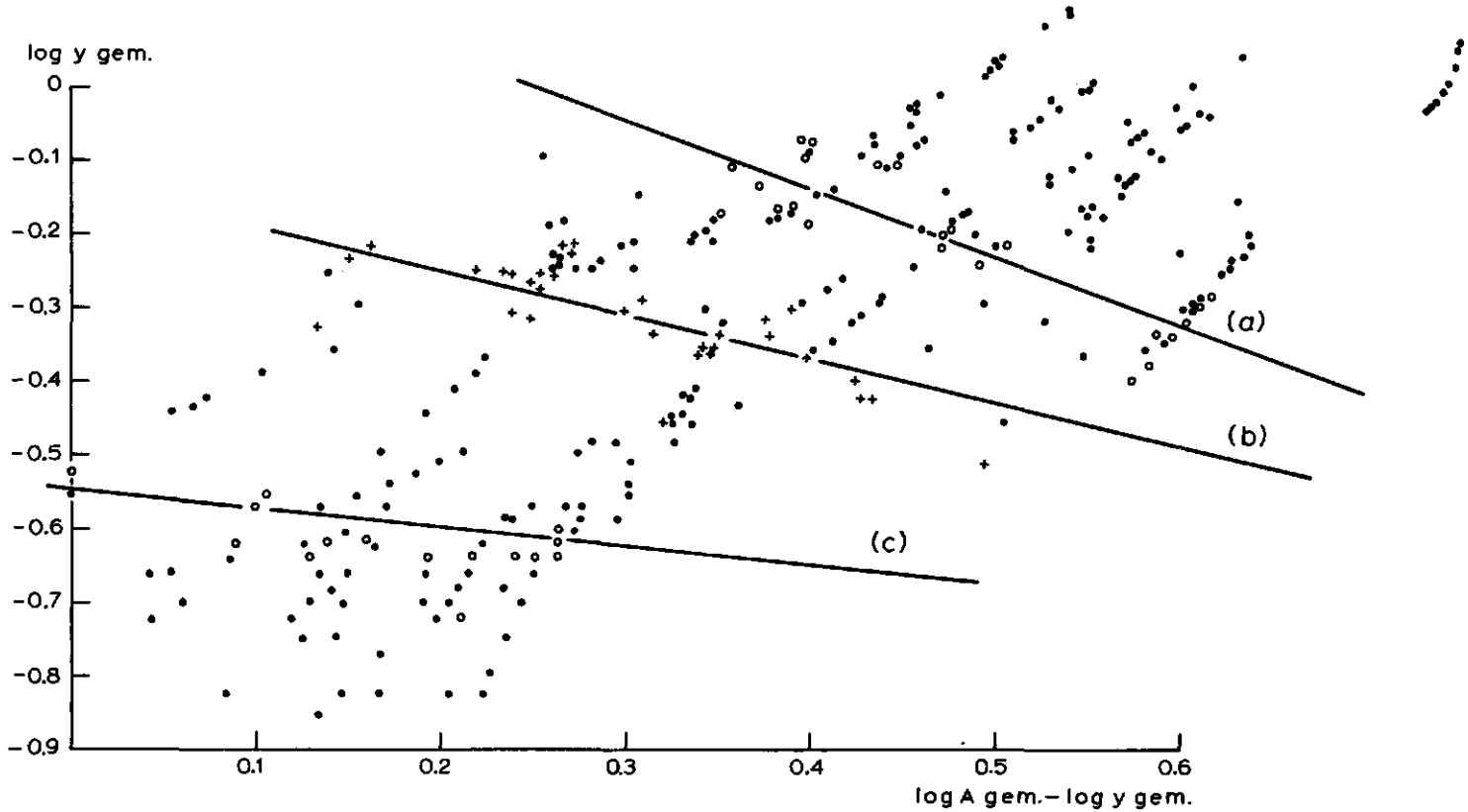
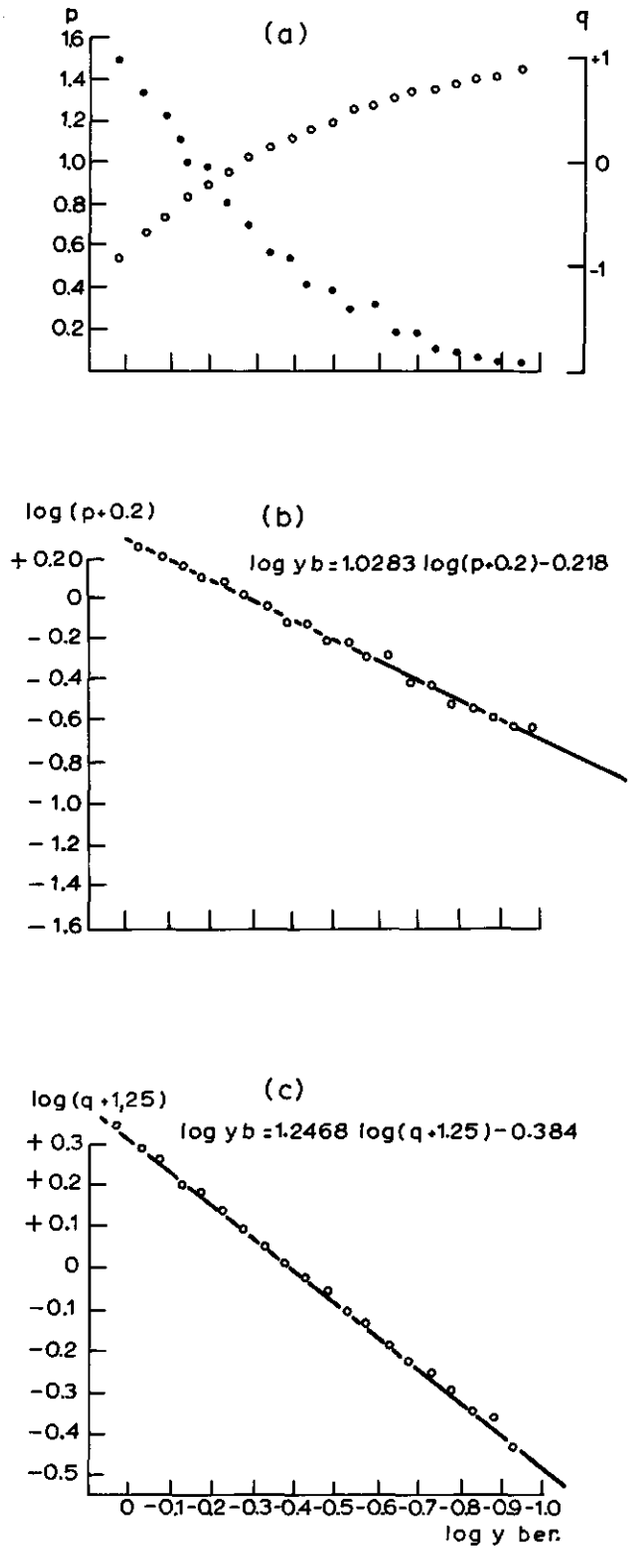


Fig. 18. De relatie tussen log y_{gem} en (log A_{gem} - log y_{gem}) welke een beschrijving geeft van het natte dwarsprofiel zonder zich om de vorm daarvan te bekommeren. Als voorbeelden zijn voor drie groepen van log y_{ber} (uit formule 23A) de waarnemingen, behorend bij die groepen met een apart teken aangegeven benevens de lijn welke voor de gemiddelde log y_{ber}-waarde van die groep is berekend met formule 19. Deze groepen zijn: log y_b -0.15/-0.20 (gem -0.175) (a), log y_b -0.30/-0.35 (gem -0.325) (b) en log y_b -0.55/-0.60 (gem -0.575) (c)

fig.19


p
q
(a)
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
+1
0
-1
log (p+0.2)
(b)
log y b = 1.0283 log(p+0.2)-0.218
+ 0.20
0
- 0.2
- 0.4
- 0.6
- 0.8
- 1.0
- 1.2
- 1.4
- 1.6
log (q +1,25)
(c)
log y b = 1.2468 log(q +1.25)- 0.384
+ 0.3
+ 0.2
+ 0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
0 -0.1-0.2-0.3-0.4-0.5-0.6-0.7-0.8-0.9-1.0
log y ber.

Tabel IV

De waarden van: $(-1{,}63\ y_b^{0{,}9725} + 0{,}2)(\log A_g - \log y_g) + 2{,}0325\ y_b^{0{,}8020} - 1{,}25\ (= \log y_g)$

en bij $\log y_b$	bij $(\log A_g - \log y_g)$ van:									
	−0,1	0	+0,1	+0,2	+0,3	+0,4	+0,5	+0,6	+0,7	+0,8
+ 0,1	1,3785	1,1945	1,0106	0,8266	0,6427	0,4587	0,2748	0,0908	−0,0932	−0,2771
0	0,9255	0,7825	0,6395	0,4965	0,3535	0,2105	0,0675	−0,0755	−0,2185	−0,3615
− 0,1	0,5500	0,4397	0,3294	0,2191	0,1088	−0,0015	−0,1118	−0,2221	−0,3324	−0,4427
− 0,2	0,2389	0,1547	0,706	−0,0136	−0,978	−0,1819	−0,2661	−0,3502	−0,4344	−0,5185
− 0,3	−0,0187	−0,0820	−0,1453	−0,2085	−0,2718	−0,3350	−0,3983	−0,4615	−0,5248	−0,5880
− 0,4	−0,2324	−0,2790	−0,3256	−0,3721	−0,4187	−0,4652	−0,5118	−0,5584	−0,6049	−0,6515
− 0,5	−0,4096	−0,4428	−0,4760	−0,5092	−0,5424	−0,5756	−0,6088	−0,642	−0,6752	−0,7084
− 0,6	−0,5564	−0,5789	−0,6014	−0,6240	−0,6465	−0,6690	−0,6916	−0,7141	−0,7366	−0,7591
− 0,7	−0,6780	−0,6920	−0,7060	−0,7200	−0,7340	−0,7480	−0,7620	−0,7759	−0,7899	−0,8039
− 0,8	−0,7789	−0,7861	−0,7932	−0,8005	−0,8076	−0,8148	−0,8220	−0,8292	−0,8364	−0,8417
− 0,9	−0,8626	−0,8643	−0,8660	−0,8677	−0,8695	−0,8712	−0,8729	−0,8746	−0,8763	−0,8781
− 1,0	−0,9320	−0,9294	−0,9268	−0,9241	−0,9215	−0,9189	−0,9163	−0,9136	−0,9110	−0,9084

groter wordende waarden van log A - log y_g de waarden van het deel van de formule vóór het =teken zijn berekend. Uit deze tabel IV is het nomogram in fig. 20 vervaardigd, die het werken met de empirisch gevonden en op het eerste gezicht wat onhandelbaar lijkende formule (19) zeer eenvoudig maakt.

Uit de waarnemingen leest men log y en log A - log y af. Op het snijpunt van log y (langs de X-as) en log A - log y_g (langs de Y-as) kan men tussen de lijnen van gelijke log y_b-waarde direct de waarde van log y_b aflezen.

Wanneer deze gevonden log y_b-waarde in de verbeterde Manning-formule (23) wordt ingevuld in plaats van de direct gemeten log y-waarde, blijkt dat de k_M-waarden, die op deze wijze kunnen worden berekend, op zeer bevredigende wijze overeenkomen met de oorspronkelijk geschatte k_M-waarden. De controlefiguren, die de nauwkeurigheid van deze berekeningswijze aantonen, zijn de figuren 25 en 26. Deze twee figuren worden later in dit rapport bij de ontwikkeling van de verbeterde Manning-formule gegeven.

Hiermede is, in tegenstelling tot methode 1 een algemeen geldende, weliswaar empirisch gevonden, formule ontwikkeld die berust op het hanteren van een vervangende waterdiepte, welke ontstaan is op grond van de variaties in de diepte-breedte-verhouding in het natte dwarsprofiel.

Het grote winstpunt daarbij is dat geen poging hoeft te worden gedaan de grillige vormvariaties in het natte dwarsprofiel op enigerlei wijze vast te leggen en dat toch de verouderde, weinig exacte op een veronderstelde trapeziumvorm berustende formules konden worden verlaten.

DE MANNING FORMULE

A l g e m e n e b e s c h o u w i n g

Bij het onderzoek naar de juistheid van de Manning-formule en de ontwikkeling van een eventuele verbetering daarvan zullen de volgende beide delen uit het hoofdstuk 'Probleemstelling' samengenomen moeten worden:

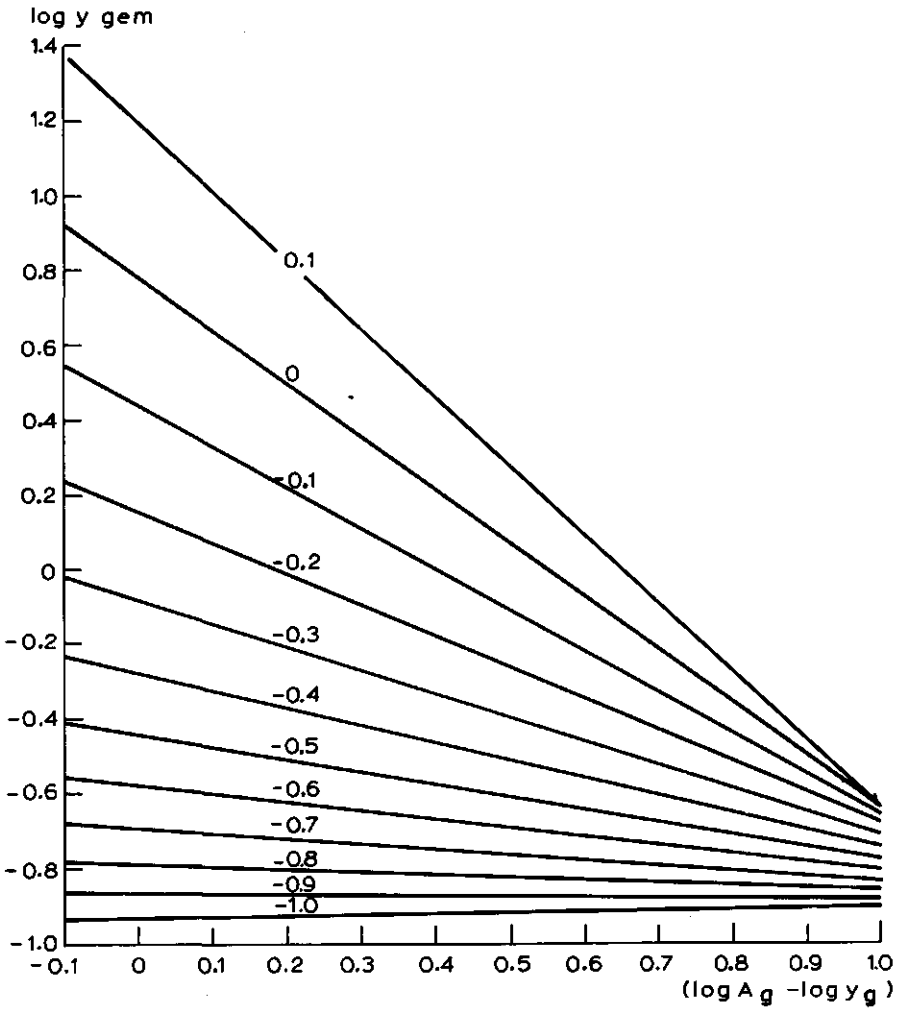


Fig. 20. Nomogram. Lijnen van gelijke log y_b-waarde

exponentswaarden en algemene geldigheid

Zoals reeds eerder uiteengezet wordt uitgegaan van de geschatte k_M-waarden. Dit is ook niet anders mogelijk, omdat van de werkelijke k_M-waarden alleen maar benaderende beschrijvingen bestaan en de werkelijke cijferwaarde van de wandruwheid alleen maar berekend kan worden als restwaarde bij gebruik van een foutloze formule.

De samenhang tussen de geschatte en de werkelijke k_M kan men als volgt voorstellen:

$$\log k_M \text{ berekend} = \alpha + \beta \log k_M \text{ geschat}$$

Is de schatting juist dan zal $\alpha = 0$ zijn en $\beta = 1$. Is de schatting evenwel te hoog of te laag dan zal $\beta = 1$ zijn en α van 0 afwijken.

Met het oog op de verbetering van de bestaande formule kunnen twee richtingen ingeslagen worden:

1. Getracht kan worden de v o l l e d i g e formule te verbeteren door hoofdzakelijk de exponentswaarden aan een nader onderzoek te onderwerpen.
2. Getracht kan worden een vereenvoudigde formule te ontwerpen, waarin een vervangende waterdiepte of een functie van de waterdiepte de plaats inneemt van de conventionele factoren A en R.

Bovendien staan voor het onderzoek twee mogelijkheden open:

A. een numerische vereffening
B. een grafische vereffening

Aangezien een numerische bewerking zich meer leent voor een vereffening met meer factoren is gekozen voor een combinatie van 1 en A (volledige formule numerisch), terwijl de grafische vereffening bestemd is voor de vereenvoudigde formule (2 en B).

D e n u m e r i s c h e v e r e f f e n i n g

Wordt de Manning-formule gelogarithmiseerd, dan ontstaat:

$$\log Q = \log k_M + \tfrac{1}{2}\log Sw + \log A + 2/3 \log R$$

Aangezien de hydraulische straal $R = A/P$ is ook $\log R = \log A - \log P$. De vereffening kan plaats hebben volgens:

$$b = \log Q - k \log k_{M_{geschat}} - s \log Sw - a \log A + p \log P$$

In deze formule komt log A maar eenmaal voor met een exponent van 1,67 of meer, terwijl log P in de noemer voorkomt met een exponent van 0,67 of hoger en een ander teken dan A. Berekend moeten worden: b, k, a, p en s.

De numerische vereffening volgens de methode der kleinste kwadraten gaf als resultaat: $k = 0{,}9174$

$s = 0{,}4803$

$a = 1{,}7120$

$p = -0{,}8886$

$b = 0{,}1258$

Men kan nu schrijven:

$$\log Q = (k \log k_M + b) + s \log Sw + (1+p) \log A - p \log P \qquad \text{of}$$

$$\log Q = (0{,}9174 \log k_M + 0{,}1258) + 0{,}4803 \log Sw + 1{,}7120 \log A + 0{,}8886 \log P \qquad (20)$$

D e g r a f i s c h e v e r e f f e n i n g

Voor de grafische vereffening is uitgegaan van de volgende formule:

$$\log Q = k \log k_M + s \log Sw + v \log y \qquad (21)$$

Er is een 4-dimensionale polyfactoranalyse uitgevoerd, waarvan de resultaten weergegeven zijn in de verzamelgrafieken in fig. 21A, 21B en 21C. De hellingen van de in deze verzamelgrafieken voorkomende lijnen geven direct de exponentswaarde weer van de betreffende factor bij het ordegemiddelde waarvoor de lijn geldt. Uit deze verzamelgrafieken kunnen de volgende exponentswaarden worden uitgerekend:

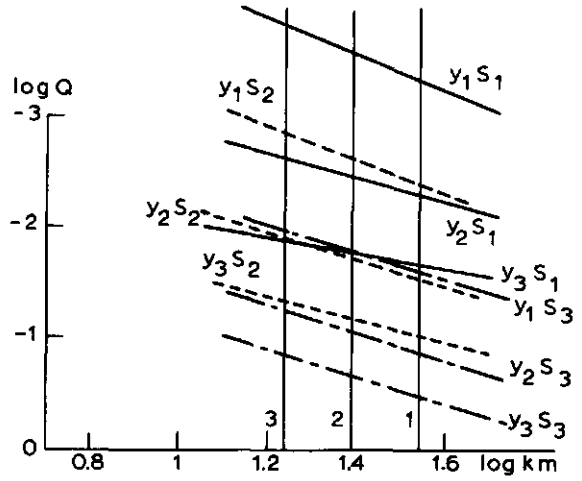


Fig. 21a. Verzamelgrafiek van de resultaten van de polyfactor-analyse met lijnen van gelijke waarde voor waterdiepte en verhang

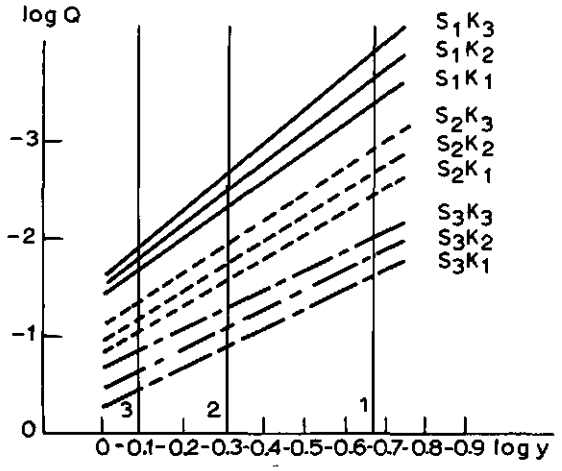


Fig. 21b. Verzamelgrafiek van de resultaten van de polyfactor-analyse met lijnen van gelijke waarde voor waterdiepte en wandruwheids-coëfficiënt

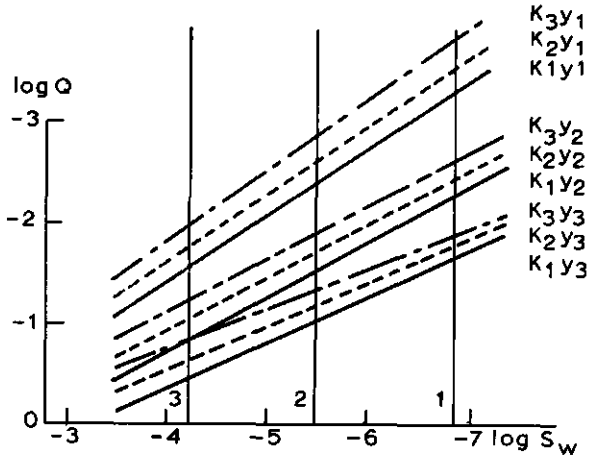


Fig. 21c. Verzamelgrafiek met resultaten van de polyfactor-analyse met lijnen van gelijke waarde voor verhang en wandruwheidscoëf-ficiënt

voor exponent s: bij orde (van log y)	ordegemiddelde (van log y)	exponentswaarde
1	-0,6721	0,5856
2	-0,3076	0,4652
3	-0,0912	0,3936

voor exponent v: bij orde (van log Sw)	ordegemiddelde (van log Sw)	exponentswaarde
1	-6,8862	2,7888
2	-5,4850	2,3257
3	-4,2316	1,9115

voor exponent k:	exponentswaarde
	altijd 0,9173

De exponentswaarde van s blijkt dus afhankelijk van de grootte van de waterdiepte y, terwijl omgekeerd de exponentswaarde van v afhankelijk is van de grootte van het verhang Sw. Daarentegen is de exponentswaarde van k volkomen onafhankelijk.

Een vergelijking van de gevonden exponentswaarden uit de numerische en de grafische vereffening heeft tot resultaat:

	numerisch	grafisch
k	0,9174	0,9173
s	0,4803	0,4815 (gem.)

Van de afhankelijkheid van s van y en van v van Sw is gebruik gemaakt om de exponenten als een functie van deze factoren weer te geven.

Men kan nu voor alle ordencombinaties van de factoren k_M, Sw en y het debiet log Q uitrekenen, gebruik makend van de algemene formule en de zojuist berekende exponentswaarden volgens:

$$\log Q = 0{,}9173 \log k_M + 0{,}4815 \log Sw + 2{,}3420 \log y \qquad (21A)$$

Op de verzamelfiguren kunnen bij dezelfde ordecombinaties (voor-

gesteld door de snijpunten van de verticale ordegemiddelden met de schuine lijn) andere waarden voor log Q worden afgelezen, omdat deze lijnen een helling (= exponentswaarde) vertonen, welke wel afhankelijk bleek van log Sw en van log y.

Als deze verschillen in log Q-waarden worden uitgezet tegen de ordegemiddelden van log Sw, dan blijkt (zie fig. 22) een lineair verband te bestaan, dat voorgesteld wordt door de volgende formules:

bij log y orde 1 is het verschil (hier U genoemd) =
$$-0{,}1041 \log Sw - 0{,}9480$$
bij log y orde 2 is het verschil (hier U genoemd) =
$$0{,}0163 \log Sw - 0{,}2827$$
bij log y orde 3 is het verschil (hier U genoemd) =
$$0{,}0878 \log Sw + 0{,}1134$$

Als men de algemene gedaante van deze 3 formules voorstelt door:

$$U = p \log Sw + q$$

dan kunnen p en q uitgezet worden tegen de ordegemiddelden van log y (zie fig. 23). Ook hier blijkt een lineair verband te bestaan, dat weergegeven wordt door:

$$p = 0{,}3303 \log y + 0{,}117$$
$$q = 1{,}8272 \log y + 0{,}28$$

U wordt dan:

$$U = (0{,}3303 \log y + 0{,}117) \log Sw + 1{,}8272 \log y + 0{,}28$$

en de algemene formule, verminderd met het verschil U:

$$\log Q = 0{,}9173 \log k_M + 0{,}4815 \log Sw + 2{,}3420 \log y - U \quad (22)$$

wordt door substitutie van U:

$$\log Q = 0{,}9173 \log k_M + 0{,}3645 \log Sw + 0{,}5148 \log y - 0{,}3303 \log y.\log Sw - 0{,}28 \quad (23)$$

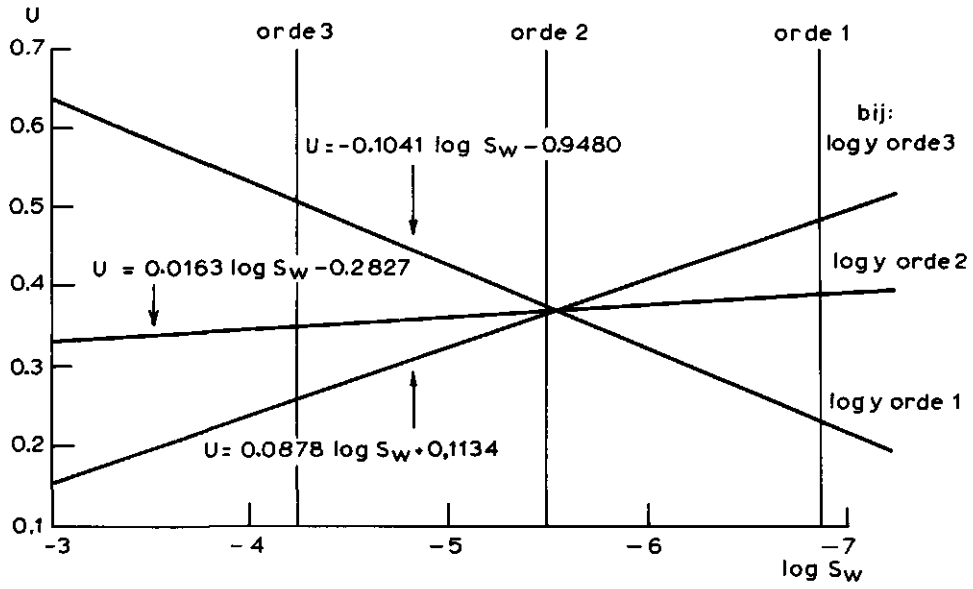


Fig. 22. Het verband tussen het verschil U (zie tekst) en het verhang van de waterspiegel bij drie waarden van de waterdiepte

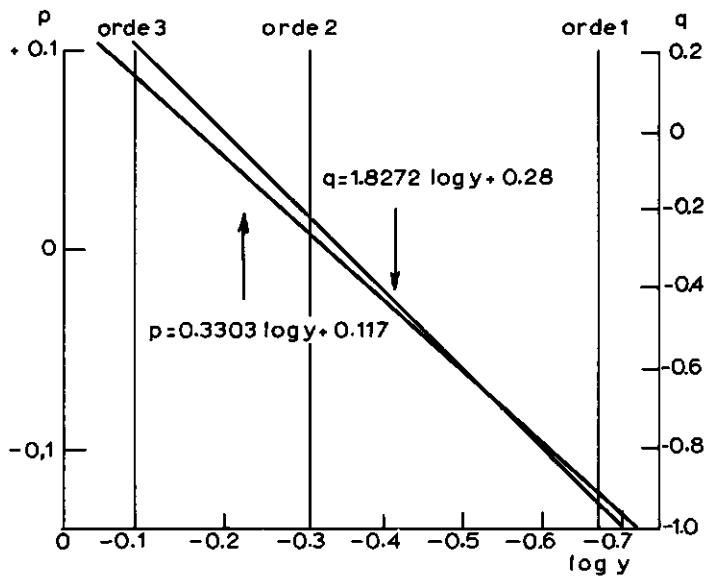


Fig. 23. Het verband tussen p, resp. q met log y in de formule $U = p \log S_w + q$

Deze gewijzigde formule biedt de mogelijkheid om, indien de pogingen de variaties in de breedte-diepte-verhouding als functie van de waterdiepte weer te geven met succes zijn bekroond, met deze functiewaarde de wandruwheid te berekenen.

C o n t r o l e

1. De formules van de numerische en de grafische vereffening

Teneinde na te gaan hoe nauwkeurig de ontwikkelde formules zijn is van elke leiding een waarneming met een hoogste en een met een laagste waterstand genomen, waarna de log k_M berekend is. De gevonden waarden zijn in de figuren 24A en 24B uitgezet tegen de oorspronkelijke k_M-schattingen. In fig. 24A is duidelijk te zien dat formule (20), het resultaat van de numerische vereffening, tot een redelijke berekening van de wandruwheidscoëfficiënt in staat stelt. De twee gebogen lijnen in deze figuur geven een marge van 5 punten op de Manning schaal aan naar beide zijden, waarvan aangenomen wordt, dat dit nog een toelaatbare afwijking is. Tenslotte gaat het hierbij om schattingen, waarvan sommige wellicht een correctie behoeven. De grotere afwijkingen buiten de puntenzwerm zijn het gevolg van waarnemingsfouten bij de bepaling van verhang en van het debiet. Afwijkingen van deze waarnemingen konden licht ontstaan wanneer het om zeer kleine verschillen ging, die evenwel bij de berekening ingrijpende resultaatsveranderingen tot gevolg konden hebben.

In fig. 24B zijn de afwijkingen in het algemeen te groot. Dit houdt in, dat de waterdiepte als functie van de factoren, die het natte profiel bepalen, althans op deze wijze nog niet geheel tot de gewenste resultaten leidt, hoewel daarmede het principe nog niet veroordeeld is. Weliswaar spelen hier dezelfde factoren, die in fig. 24A afwijkingen veroorzaakten, ook een rol.

2. De formules welke de weergave van de breedte-diepte-verhouding als functie van de waterdiepte ten doel hebben

Deze methode, die berust op het corrigeren van de factor waterdiepte op grond van de variërende breedte-diepte-verhouding in het natte dwarsprofiel, heeft een duidelijke physische achtergrond en is

met behulp van de werkfiguur (20) ook eenvoudig hanteerbaar. Wel blijkt reeds direct uit de opsplitsing van het waarnemingsmateriaal in fig. 18 dat er afwijkingen zijn, die ver buiten de opgesplitste stroken liggen. Met grote waarschijnlijkheid mag verondersteld worden, dat hier andere factoren in het spel zijn dan de variërende breedte-diepte-verhouding, namelijk fouten in de waarnemingen van verhang en debiet.

De controle op de resultaten is gegeven in fig. 25, waarin wederom de oorspronkelijke geschatte log k_M is uitgezet tegen de berekende log k_M.

Het moet niet uitgesloten worden geacht dat door de invoering van log y_b (gecorrigeerde waterdiepte) de waarde van de exponent v zich wijzigt (of eventueel van de andere exponenten). Teneinde daarover zekerheid te verkrijgen is opnieuw een numerische vereffening uitgevoerd volgens de methode der kleinste kwadraten, waarbij de exponenten van k, s en v_b opnieuw zijn vereffend. De resultaten van deze vereffening zijn als volgt:

k2 = 1,1378 (k1 was 0,9173)
s2 = 0,4711 (s1 was 0,4815)
v_b = 2,1712 (v1 was 2,3420)

Hierdoor gaat formule (22) over in:

$$\log k_M = \frac{\log Q - 0{,}4711 \log Sw - 2{,}1712 \log y_b}{1{,}1378} \qquad (24)$$

Wanneer de met formule (19) verkregen gecorrigeerde y_b-waarden tenslotte in deze formule (24) worden gesubstitueerd en de op deze wijze berekende k_M-waarden worden nogmaals uitgezet tegen de oorspronkelijke, zoals in fig. 26 is geschied, dan blijkt duidelijk dat hiermee de tot nu toe beste resultaten kunnen worden verkregen.

Hoewel deze methode min of meer empirisch tot stand is gekomen, liggen toch twee physische aspecten duidelijk aan de ontwikkeling ervan ten grondslag:

1. Het omschrijven van de variaties in de vorm van het natte dwars-

fig.25

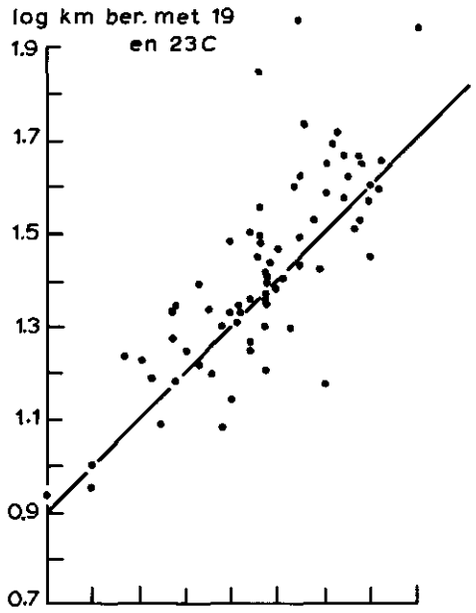
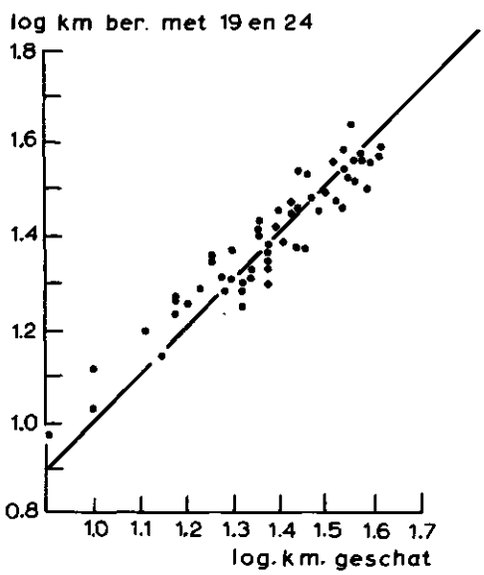

log km ber. met 19
en 23C
1.9
1.7
1.5
1.3
1.1
0.9
0.7

fig.26


log km ber. met 19 en 24
1.8
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7
log. km. geschat

profiel als een quotient van het natte oppervlak en de waterdiepte, waarbij het resultaat wordt vastgelegd als een functie van de waterdiepte.

2. Het vereenvoudigen van de Manning-formule door vervanging van het gehele complex dat de breedte-diepte-verhouding in het natte dwarsprofiel beschrijft door een functie van de waterdiepte.

De controle op de exponentswaarden is door deze werkwijze wel enigszins verloren gegaan omdat de vergelijking met de oude Manning-formule door de nieuwe vorm met de gecorrigeerde waterdiepte tot geheel andere exponentswaarden heeft geleid. Niettemin is de nauwkeurigheidswinst zo groot, dat dit ruimschoots moet kunnen opwegen tegen de verminderde mogelijkheid tot exponentsvergelijking.

CONCLUSIE

Door een combinatie van grafische en numerische bewerkingen van het waarnemingsmateriaal is getracht:

1. de juiste waarden vast te stellen voor de exponenten, voorkomend in de Manning-formule of een nieuw te ontwikkelen formule van hetzelfde type;
2. eventueel empirisch een andere formule te ontwerpen als dit tot betere resultaten zou leiden;
3. na te gaan of er een modus te vinden is voor weergave van de variërende breedte-diepte-verhouding in het natte dwarsprofiel.

De ongewijzigde Manning-formule blijkt het beste te voldoen wanneer de formule de volgende gedaante krijgt:

$$\log Q = 0{,}9174 \log k_M + 0{,}4803 \log Sw + 1{,}7120 \log A + 0{,}8886 \log P + \\ + 0{,}1258$$

Hierbij is het tot nu toe gebruikte energieverhang vervangen door het waterspiegelverhang.

Betere resultaten werden evenwel verkregen door gebruik te maken

van een empirisch ontwikkelde formule, waarin een gecorrigeerde waterdiepte y_b is geïntroduceerd, waarvan de correctie is gebaseerd op de variërende breedte-diepte-verhouding in het natte dwarsprofiel. Deze formule (alleen voor het deel, dat de breedte-diepte-verhouding beschrijft) luidt:

$$(1{,}6573\ y_b^{0{,}9888} - 0{,}2)(\log A_g - \log y_g) - 2{,}13\ y_b^{0{,}8421} = -1{,}25 - \log y_g$$

en is, uitgedrukt in een werkfiguur, zeer eenvoudig hanteerbaar.

Wanneer de hieruit verkregen vervangende y_b-waarde wordt gesubstitueerd in de formule:

$$\log k_M = \frac{\log Q - 0{,}4711 \log Sw - 2{,}1712 \log y_b}{1{,}1378}$$

kan een wandruwheidscoëfficiënt berekend worden, welke de oorspronkelijk in het veld vastgestelde zeer dicht benadert.

Het grote winstpunt is, dat de confrontatie met de voortdurende variërende vorm van het natte dwarsprofiel is weggenomen door de beschrijving ervan als een quotiënt van nat oppervlak en waterdiepte, waardoor de vorm van het dwarsprofiel er niet meer toe doet.

Ook goede resultaten geeft de introductie van de bodembreedte, maar de effectieve bodembreedte is vaak zeer moeilijk exact vast te stellen, ook weer als gevolg van de afgeronde vormen van het dwarsprofiel.

De gehele bewerking mondt tenslotte steeds uit in een berekende waarde voor de wandruwheidscoëfficiënt k_M. Deze was slechts te vergelijken met een gemeten (= geschatte) k_M-waarde. Ook bij de oude Manning-formule bestond geen exacte waarde voor de wandruwheid. Deze bestond slechts als restwaarde van een formule, die zeker niet mocht gelden als volkomen waterdicht of als een reeks tamelijk vrijblijvende beschrijvingen. Het zal daarom zaak zijn de nieuwe waarden voor de wandruwheid direct zo exact mogelijk bijvoorbeeld door middel van instruerende foto's vast te leggen, opdat een ontwikkeling van een

schattingsmethode van de wandruwheid op een zo hecht mogelijke basis tot stand kan komen.

LITERATUUR

BON, J. 1965. De verhangmanometer en enkele hulpmiddelen voor de debietmeting bij stuwen. Meded. 83 ICW

RADERMACHER, H. 1970. Hydraulik und Bemessung altener Entwässerungsgräben mit geringen Dimensionen unter besonderer Berücksichtigung von Verkrautung und Unterhaltung. Inaugural-Dissertation

WESSELING, J. 1965. Enkele opmerkingen over de bepaling van ruwheidsfaktoren in open leidingen. Nota 298 ICW