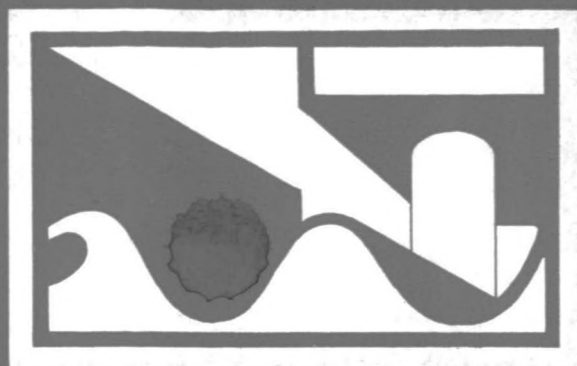


3152

198



ONTGRONDING ONDER PIJPLEIDINGEN  
TEN GEVOLGE VAN STROOM

E. van Meerendonk  
A.J.G.M. van Roermund

Vakgroep Kustwaterbouwkunde  
Afdeling der Civiele Techniek  
Technische Hogeschool Delft

ONTGRONDING ONDER  
PIJPLEIDINGEN  
TEN GEVOLGE VAN STROOM

E. van Meerendonk

Door:

A.J.G.M. van Roermund

september 1981

Vakgroep Kustwaterbouwkunde  
Afdeling der Civiele Techniek  
Technische Hogeschool Delft

## VOORWOORD

Het onderwerp van dit verslag is de ontgroning onder pijpleidingen ten gevolge van stroom.

Zowel het hoofd- als het deelontwerp zijn aan dit onderwerp gewijd; beide zijn in dit verslag opgenomen.

Het hoofdontwerp is gedaan bij de Vakgroep Kustwaterbouwkunde onder begeleiding van prof.dr.ir. E.W. Bijker.

Het deelontwerp is gedaan bij de Vakgroep Vloeistofmechanica onder begeleiding van prof.dr.ir. M. de Vries en ir. J.S. Ribberink.

In juli 1981 is van het hoofdontwerp reeds een voorlopig verslag uitgebracht. Dit is met enkele aanvullingen opgenomen in dit definitieve verslag als de hoofdstukken 1 tot en met 10.

Het deelontwerp is opgenomen in de hoofdstukken 11 tot en met 13.

N.B. Omdat de in dit verslag gebruikte notaties afwijken van de gebruikelijke, wordt aangeraden eerst bladzijde 77 te raadplegen.

## SAMENVATTING

Ten behoeve van het opstellen van de randvoorwaarden bij het ontwerp van onderzeese pijpleidingen is het noodzakelijk het gedrag van de zeebodem in de directe omgeving van de leiding onder invloed van stroom, golven en combinaties daarvan te kennen.

Dit verschijnsel is dermate complex, dat het nodig is het onderzoek ernaar in meerdere afstudeerprojecten te splitsen.

Het is de bedoeling uiteindelijk te komen tot een model, dat de ontgronding onder de pijpleiding voorspelt.

Dit afstudeerproject heeft betrekking op een pijpleiding in een uniforme stroming.

In de Leidse goot van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Afdeling der Civiele Techniek is een aantal proeven in een model met beweeglijke bodem uitgevoerd. Daarbij is een deel van de pijpleiding gesimuleerd door een stuk pijp loodrecht op de stroomrichting tussen de gootwanden te klemmen. De onderkant van de pijp kan zich daarbij zowel boven als onder het oorspronkelijke bodemniveau bevinden. In een aantal proevenseries is bij een vaste pijphoogte in een aantal raaien het snelheidsprofiel gemeten ten behoeve van het vastleggen van het stroombeeld. In andere proevenseries is bij een variabele pijphoogte het snelheidsprofiel in de raai ter plaatse van het hart van de pijp gemeten.

De oorspronkelijke opzet was uit de (gemeten) snelheidsprofielen de bodemschuifspanning te bepalen. Daaruit zou dan het sedimenttransport in de verschillende raaien moeten volgen. Met behulp van een continuïteitsbeschouwing voor het sediment zou de ontgronding onder de pijp berekend moeten worden. Daar dit niet mogelijk bleek te zijn, is een andere methode voorgesteld. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de in veel sedimenttransportformules voorkomende stroomparameter. Tenslotte is een aantal aanbevelingen opgesteld, die van belang kunnen zijn bij volgende onderzoeken.



I N H O U D

Voorwoord	1
Samenvatting	2
1. Inleiding	6
2. Doelstelling	7
3. De Leidse Goot	8
4. Parameters die op het proces betrekking hebben	9
4.1 Definities	9
4.2 Nadere beschouwing	9
5. Aanvankelijke methode voor de berekening van de gat- diepte ksi	12
5.1 Het scheidingsvlak	12
5.2 Het snelheidsprofiel onder de pijp	12
5.3 De bodemschuifspanning	13
5.4 Het sedimenttransport	13
5.5 De ontgrondingskuil in de evenwichtssituatie	13
5.6 Berekening van de gatdiepte ksi	14
6. Het verkrijgen van de benodigde gegevens	15
6.1 De laser-doppler snelheidsmeter	15
6.2 De snelheidsprofielen	16
6.3 Het scheidingsvlak	17
-Uit de met behulp van de laser gemeten snelheidsprofielen	17
-Met behulp van de injectie van kalium- permanganaat	17
-Kalkinjectie	18
-Injectie van waterstofbelletjes	18
6.4 De schuifspanning	19
6.5 De stroomlijnen	20
6.6 Het sedimenttransport	21
7. De gemeten situaties	22
8. Vergelijking van de methoden waarmee het scheidingsvlak bepaald is	27
9. Resultaten van de experimenten	29
9.1 Overzicht	29
9.2 Het scheidingsvlak	31

9.3	Het snelheidsprofiel onder de pijp	33
9.4	De gatdiepte ksi	33
9.5	De gevolgen van het doorstromen na het bereiken van de evenwichtssituatie	35
9.6	De gevolgen van extreem grote stroomsnelheden	35
10.	Afronding van het voorlopige verslag	36
11.	Het snelheidsprofiel onder de pijp (standaardvorm)	37
11.1	Inleiding	37
11.2	Analyse op basis van $z \cdot dV/dz$	37
11.3	Analyse volgend uit een geschematiseerd snelheidsprofiel	39
12.	De bepaling van de schuifspanning uit het snelheidsprofiel	41
12.1	Inleiding	41
12.2	Secundaire stromingen	41
12.3	De schuifspanning	42
12.3.1	De numerieke methode uit het computerprogramma	43
12.3.2	ln-curvefitting	44
12.3.3	Derde-graads curvefitting	46
12.3.4	Vijfde-graads curvefitting	46
12.3.5	De handmethode	48
12.3.5.1	De mengweglengte	49
12.4	Conclusie ten aanzien van de bodemschuifspanning	49
13.	Het berekenen van de gatdiepte ksi met behulp van een transportformule en de continuïteit van het sediment	51
13.1	Inleiding	51
13.2	Experimentele bepaling van het sedimenttransport	51
13.3	Invoerparameters voor de transportformules	52
13.4	De transportformules	56
13.5	De continuïteit van het sediment	59
13.6	De berekening van de gatdiepte ksi met behulp van Vong	60
13.7	Berekening van $V_r$	64

13.8	Voorstel voor de berekening van de gatdiepte ksi in de gebruikte laboratoriumopstelling	65
13.9	Vergelijking van de gemeten en de berekende gatdiepte ksi	66
13.10	Conclusies ten aanzien van de berekening van de gatdiepte ksi	67
14.	Aanbevelingen	69
15.	Het computerprogramma	71
	Lijst van symbolen, gebruikte notaties en indices	73
	Lijst van bijlagen	78
	Literatuur	80

## 1. INLEIDING

Indien een op de zeebodem gelegde pijpleiding wordt aangestroomd, zal er met name ter plaatse van de opleggingen kans op uitschuring bestaan.

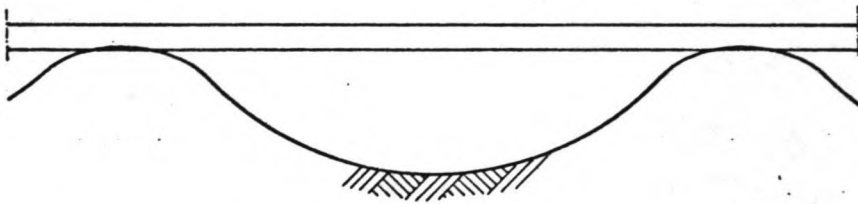


fig. 1. Situatieschets

Ten gevolge van deze uitschuring kan de overspanning tussen de opleggingen veranderen. Hierdoor kunnen de materiaalspanningen in de pijp tot zeer hoge waarden oplopen en zelfs tot breuk leiden.

Vaak wordt daarom de eis gesteld dat de leiding geheel in de bodem wordt ingegraven. Met deze ingraafoperaties zijn zeer hoge investeringen gemoeid.

De vraag of het ingraven onder alle omstandigheden noodzakelijk is, is daarom gerechtvaardigd.

Om iets te weten te komen over de effecten van stroom op het bodemmateriaal bij en onder een pijpleiding is in een model onderzoek gedaan. In de Leidse Goot van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Afdeling der Civiele Techniek is daartoe een stuk pijp aangebracht. De pijp is tussen de wanden van de goot geklemd en bevindt zich loodrecht op de stroomrichting.

In dit onderzoek wordt alleen het effect van stroom onderzocht. Later zal het noodzakelijk zijn het onderzoek met lopende golven te herhalen. Uiteindelijk zal de combinatie van beide onderzocht moeten worden.

## 2. DOELSTELLING

De doelstelling van het onderzoek is voor een laboratorium-situatie, afhankelijk van de diverse in te stellen variabelen, de ontgroning onder een pijp ten gevolge van stroom te kunnen voorspellen.

Het onderzoek beperkt zich tot het model. De vertaling naar het prototype is in dit stadium nog achterwege gelaten.

### 3. DE LEIDSE GOOT

Gootbreedte b	:	0,506m
Gootlengte	:	14 m
Lengte zandbodem:	11	m
Meetplaats	:	7 m vanaf begin zandbodem
Zijwanden	:	glas
Debiet Q-goot	:	ingesteld debiet te controleren met behulp van manometer
Instroming	:	via bodem aan begin goot, 2 m voor begin zandbodem
Uitstroming	:	via verstelbare overlaat, 1 m na einde zandbodem. Met de overlaat is ook het waterniveau in de goot in te stellen.

Om een indruk te krijgen van het verloop van de watersnelheid in de lengterichting van de goot, zijn met behulp van een micromolen diverse snelheidsmetingen verricht (zie bijlage 1).

In een raai is op drie verschillende hoogten een horizontaal snelheidsprofiel gemeten (zie bijlagen 2, 3 en 4). Uit deze profielen blijkt dat de wandinvloed naar boven toe groter wordt.

Al deze metingen zijn verricht bij een gemiddelde watersnelheid  $V_g$  van 0,20 m/s, een waterdiepte  $h$  van 0,315 m en een mediane korreldiameter  $D_{50}$  van 0,150 mm.



#### 4. PARAMETERS DIE OP HET PROCES BETREKKING HEBBEN

##### 4.1 Definities

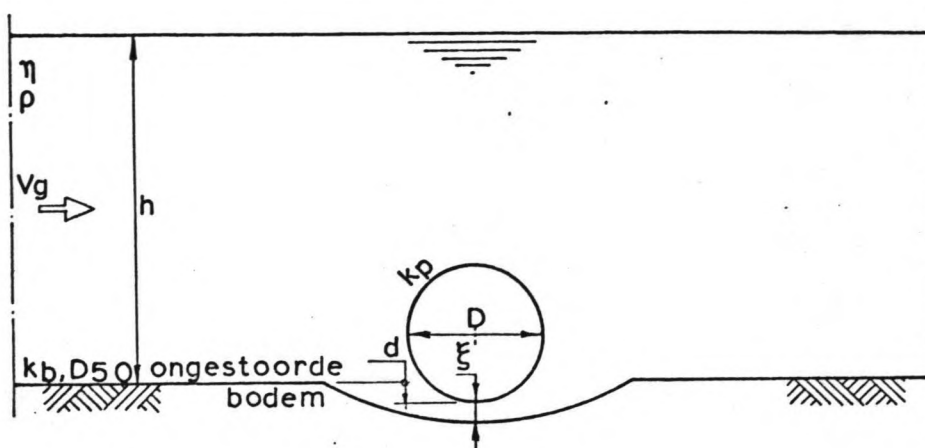


fig. 2. Definitieschets

$V_g$	: gemiddelde watersnelheid = $(Q\text{-goot}) / (b \cdot h)$	(m/s)
$\eta$	: dynamische viscositeit van het water	(Ns/m <sup>2</sup> )
$\rho$	: soortelijke massa van het water	(kg/m <sup>3</sup> )
$h$	: waterdiepte bij gemiddeld bodemniveau	(m)
D50	: mediane zandkorreldiameter	(m)
$k_b$	: ruwheid zandbodem	(m)
$D$	: pijpdiameter	(m)
$k_p$	: ruwheid pijpoppervlak	(m)
$d$	: afstand onderkant pijp beneden ongestoorde bodemhoogte	(m)
$\xi$	: afstand onderkant pijp tot kuilbodem	(m)

##### 4.2 Nadere beschouwing

$V_g$  : De stroomsnelheid heeft een belangrijke invloed op het te beschouwen verschijnsel (zie literatuur 18). Deze wordt dan ook gevarieerd. Er is gestroomd met snelheden van 0,17, 0,20 en 0,25 m/s. De ondergrens van 0,17 m/s wordt bepaald door het feit dat, bij een gebruikte D50 van 0,150 mm, een la-

gere snelheid geen transport en nauwelijks ontgroning onder de pijp tot gevolg heeft.

De bovengrens van 0,25 m/s wordt bepaald door het feit dat, bij dezelfde D50, bij hogere snelheden de aanpassingslengte van het snelheidsprofiel groter wordt dan de beschikbare lengte van de zandbodem. Bovendien treedt bij snelheden die groter zijn dan 0,25 m/s zoveel zwevend transport op, dat er met behulp van de laser-doppler snelheidsmeter geen betrouwbare snelheidsmetingen meer verricht kunnen worden. In het beschouwde snelheidsgebied is er dus alleen sprake van bodemtransport.

eta ) : Deze grootheden zijn in hoofdzaak afhankelijk van de  
rho ) watertemperatuur. De watertemperatuur verandert nauwelijks vanwege de grote hoeveelheid water die in het watervoorzieningssysteem circuleert.

De dynamische viscositeit en de soortelijke massa van het water worden dus constant verondersteld.

h : In het prototype zal de invloed van de pijp op de waterbeweging aan de wateroppervlakte meestal verwaarloosbaar zijn. Daarom is het wenselijk om in het model met een zo groot mogelijke waterdiepte te werken. In verband met de beperkte hoogte van het glazen deel van de gootwand is de hoogte, waarover met behulp van de laser-doppler snelheidsmeter nog snelheden gemeten kunnen worden, aan een maximum gebonden. Dit maximum bedraagt, bij voldoende dikte van het zandpakket, 0,32 m.

Voor alle proeven is zoveel mogelijk dezelfde waterdiepte van 0,31 m gehandhaafd.

D50 : Volgens lit.18 heeft de mediane korreldiameter weinig invloed op het te beschouwen verschijnsel.

De uitvoering van meerdere experimenten met verschillende D50 is zeer tijdrovend, zodat bij het onderzoek slechts van een soort zand gebruik is gemaakt.

Om aan te sluiten op metingen die eerder in dezelfde goot zijn gedaan (zie lit.17), is gekozen voor een

D50 van 0,150 mm. De zeefkromme van het gebruikte zand is weergegeven in bijlage 5.

kb : In het geval dat er een beweeglijke zandbodem in de goot aanwezig is, is de ruwheid afhankelijk van de D50 van het zand en van de gemiddelde stroomsnelheid  $V_g$ .

Wanneer de in de zandbodem ontstane bodemvorm met behulp van cement is vastgelegd, dan is de vormruwheid dezelfde als in het niet vastgelegde geval.

In het geval dat er over de vaste bodem van de goot wordt gestroomd geldt:  $kb = 5E-4$  m.

D : De pijpdiameter is van grote invloed op het te beschouwen verschijnsel.

Om het aantal metingen beperkt te houden is met slechts een diameter gewerkt. Deze bedraagt 0,05 m.

kp : Gedurende de gehele proevenserie is een gladde perspex pijp gebruikt.

Om een indruk te krijgen van de invloed van de pijpruwheid is na afloop van de eigenlijke proevenseries nog gestroomd met een ruwe pijp.

Deze is beplakt met zandkorrels die een diameter hebben van 0,750 mm. Er is daarbij alleen naar de ontwikkeling van de ontgrondingskuil onder de pijp gekeken.

d : De hoogte van de pijp beneden de ongestoorde bodem is van grote invloed op het te beschouwen verschijnsel. Een grote variatie in pijphoogten is daarom in de onderzoeken betrokken.

ksi : Deze parameter is afhankelijk van alle voorgaande. De doelstelling van het onderzoek is onder andere deze parameter te kunnen voorspellen.

## 5. AANVANKELIJKE METHODE VOOR DE BEREKENING VAN DE GAT- DIEPTE KSI

### 5.1 Het scheidingsvlak

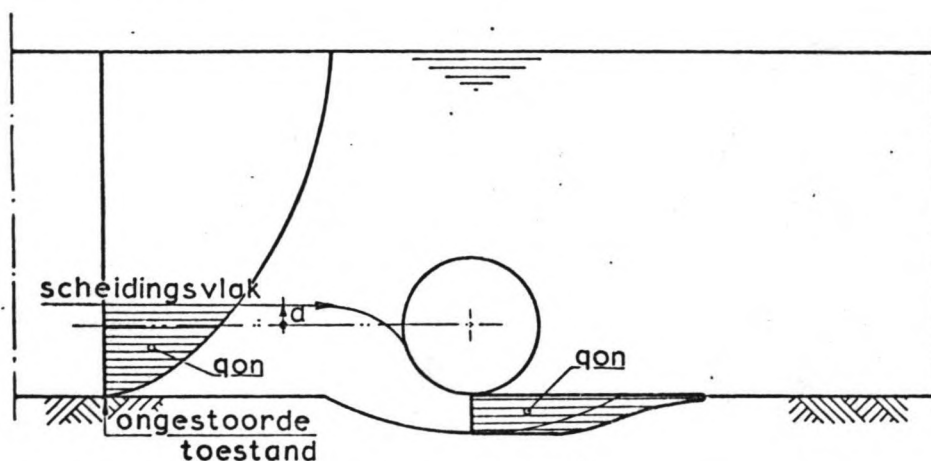


fig. 3. Het scheidingsvlak

De opzet is per situatie te kunnen voorspellen welk deel van het totale debiet onder de pijp door gaat. Deze hoeveelheid water per strekkende meter wordt aangeduid met  $q_{on}$  ( $q$ -onder- $g$ -normeerd: deze laatste term wordt in paragraaf 6.2 verklaard).

Om  $q_{on}$  vooraf te kunnen bepalen moeten het snelheidsprofiel in de ongestoorde toestand en de hoogte van het scheidingsvlak daarin bekend zijn. Door de invloed van de bodem bovenstrooms van de pijp is namelijk te verwachten dat het scheidingsvlak zich niet op de hoogte van het hart van de pijp bevindt.

De hoogte van het scheidingsvlak boven het hart van de pijp wordt aangeduid met  $a$ .

### 5.2 Het snelheidsprofiel onder de pijp

Wanneer de hoogte van het scheidingsvlak bekend is kan met behulp van het ongestoorde snelheidsprofiel  $q_{on}$  bepaald worden.

Indien het snelheidsprofiel onder de pijp aan een standaard-

formule voldoet, is met behulp van  $q_{on}$  dat snelheidsprofiel te berekenen.

### 5.3 De bodemschuifspanning

De bodemschuifspanning volgt uit het verloop over de hoogte van de schuifspanning in het water.

De beste methode om de schuifspanning in het water te bepalen is het meten van de turbulente snelheidsfluctuaties in twee loodrechte richtingen. Hiervoor is echter een laser-doppler snelheidsmeter nodig die in twee richtingen tegelijk de snelheid kan meten. Aangezien een dergelijk apparaat gedurende de meetperiode niet beschikbaar was, is noodgedwongen gebruik gemaakt van de volgende methode.

Met de beschikbare laser is alleen de horizontale snelheidscomponent gemeten. Om de bodemschuifspanning te bepalen is nu alleen het horizontale snelheidsprofiel beschikbaar. Uit de turbulentie-theorie volgt dat de vorm van het snelheidsprofiel dichtbij de bodem logaritmisch is. De bodemschuifspanning is uit deze logaritme te bepalen.

### 5.4 Het sedimenttransport

Het sedimenttransport moet volgen uit hypothesen die opgesteld moeten worden voor het verband tussen de bodemschuifspanning en het sedimenttransport. Dat verband zal waarschijnlijk in de ongestoorde situatie niet gelijk zijn aan dat in de omgeving van de pijp.

### 5.5 De ontgrondingskuil in de evenwichtssituatie

De ontgrondingskuil bevindt zich in evenwicht als het sedimenttransport in de ongestoorde situatie gelijk is aan dat onder de pijp.

Dit gegeven kan gebruikt worden bij het opstellen van de hypothesen genoemd in de vorige paragraaf.



### 5.6 Berekening van de gatdiepte ksi

De voorgestelde berekeningswijze is als volgt:

Uit de gegeven  $V_g$  en  $d$  wordt via het gevonden verband  $a$  bepaald.

$a$  geeft met het bekende ongestoorde profiel  $q_{on}$ . Dit debiet wordt in het vervolg van de berekening constant gehouden.

Vervolgens wordt  $k_{si}$  geschat.

Bovenstaande gegevens leveren samen met de standaardformule uit paragraaf 5.2 het snelheidsprofiel onder de pijp op.

Hieruit wordt de bodemschuifspanning berekend.

Het sedimenttransport onder de pijp is nu te bepalen.

Is dit groter dan het sedimenttransport in de ongestoorde toestand dan is  $k_{si}$  te klein gekozen.  $k_{si}$  wordt nu iets groter geschat, waarna de bovenstaande berekening wordt herhaald.

In het tegengestelde geval wordt de berekening met een iets kleinere  $k_{si}$  herhaald.

Deze stabiele iteratie levert uiteindelijk de  $k_{si}$  in evenwichtstoestand op.



## 6. HET VERKRIJGEN VAN DE BENODIGDE GEGEVENS

### 6.1 De laser-doppler snelheidsmeter

Voor de snelheidsmetingen is gebruik gemaakt van een laser-doppler snelheidsmeter.

Het principe van deze snelheidsmeter is als volgt.

Twee lichtstralen van dezelfde lichtbron (laser) interfereren, zodat er een drie-dimensionaal interferentiepatroon tot stand komt. Dit patroon bestaat uit afwisselend lichte en donkere vlakken. Wanneer een deeltje een lichtvlak passeert, verstrooit het het licht. Zo zendt het als het ware een reeks lichtpulsjes uit waarvan de frequentie de doppler-frequentie genoemd wordt. Deze frequentie is een lineaire functie van de component van de deeltjessnelheid loodrecht op deze 'vlakken'. Dit signaal, dat opgewekt is in het eerste deel van het systeem (het zogenaamde optisch-mechanische deel), wordt verder omgezet in een beter bruikbaar signaal door het tweede deel van het systeem (het elektronische deel). Het signaal wordt uiteindelijk omgezet in een analoge spanning. Hieruit kan de snelheid berekend worden.

Voordelen van dit systeem zijn:

- Het systeem onttrekt geen energie aan de stroming en voegt er ook niets aan toe. Er is dus geen snelheidsverstoring.
- Het systeem is temperatuur-onafhankelijk.
- Het is een lineair systeem en behoeft niet geijkt te worden.
- Het is mogelijk zeer lokaal snelheden te meten (bijvoorbeeld in het gat onder de pijp).
- Het is mogelijk de dopplerfrequentie een voorver-schuiving te geven, zodat ook negatieve snelheden gemeten kunnen worden (bijvoorbeeld achter de pijp).

Voor een verdere beschrijving en tevens handleiding van het gebruikte T.S.I. lasersysteem wordt verwezen naar lit.41.

## 6.2 De snelheidsprofielen

De meetseries zijn onder te brengen in twee groepen.

Bij de eerste groep (serie 1 tot en met 4) wordt per serie uitgegaan van een vaste gemiddelde snelheid ( $V_g$ ) en een vaste pijphoogte ( $d$ ), waarbij in meerdere raaien het verticale snelheidsprofiel wordt gemeten.

Bij de tweede groep (serie 5 en 6) wordt per serie uitgegaan van een vaste gemiddelde snelheid ( $V_g$ ), waarbij voor een variabele pijphoogte ( $d$ ) het verticaal snelheidsprofiel ter plaatse van de pijp wordt gemeten.

Alle metingen met beweeglijke bodem zijn verricht in de evenwichtssituatie. Als evenwichtssituatie wordt beschouwd de toestand waarbij na langer stromen de ontgronding onder de pijp niet meer toeneemt.

Een snelheidsmeting met behulp van de laser-doppler snelheidsmeter duurt 1,5 tot 3 minuten. Deze laatste tijdsduur is alleen gehanteerd als de eerste meting sterk afweek van een vlakbij gemeten snelheid (vanwege de continuïteit van het snelheidsprofiel). De voortplantingssnelheid van de ribbels is dermate klein, dat het snelheidsprofiel gedurende de meetduur nauwelijks verandert als gevolg van een gewijzigde bodemligging.

Ter controle zijn enkele profielen opnieuw gemeten met een micromolen. De resultaten bleken goed overeen te komen. Gezien de in paragraaf 6.1 genoemde voordelen van het laser-doppler systeem is verder geen gebruik gemaakt van de micromolen.

Om de invloed van meetfouten in de snelheidsmetingen en van debietvariatiës zoveel mogelijk te elimineren wordt een middelingsprocedure toegepast. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van de computer.

Hierbij worden per serie de integralen  $q_t$  ( $q$ -totaal) van de snelheidsprofielen bepaald. Deze integralen zouden in geval van afwezigheid van bovengenoemde onregelmatigheden alle dezelfde waarde hebben. Aangezien dit niet het geval is, worden de waarden van alle integralen uit dezelfde serie

gemiddeld:  $q_{tn}$  (q-totaal-genormeerd).

Er wordt van uitgegaan dat de fout in de bepaling van de waterdiepte niet verantwoordelijk is voor het niet gelijk zijn van de waarden van  $q_t$ . Per profiel worden daarom alle snelheden vermenigvuldigd met de waarde  $q_{tn} / q_t$ . Per serie hebben nu alle profielen dezelfde integraal (namelijk  $q_{tn}$ ) gekregen.

De aldus verkregen snelheidsprofielen zijn door de computer uitgetekend.

### 6.3 Het scheidingsvlak

De bepaling van het scheidingsvlak is op verschillende manieren aangepakt:

-Uit de met behulp van de laser gemeten snelheidsprofielen:

Het genormeerde snelheidsprofiel onder de pijp wordt geïntegreerd ( $q_{on}$ ). Het genormeerde snelheidsprofiel in de ongestoorde raai wordt nu stapsgewijs van beneden naar boven geïntegreerd. De hoogte waarbij deze integraal gelijk wordt aan  $q_{on}$  is de hoogte van het scheidingsvlak.

-Met behulp van injectie van kaliumpermanganaat ( $KMnO_4$ ): Deze injectie vindt plaats via een dun buisje (uitwendige diameter 1 mm), dat evenwijdig aan de stroomrichting loopt.

De plaats van injectie is circa 0,20 m voor de pijp in het hart van de goot.

Het buisje wordt nu zo lang in verticale richting bewogen, tot er op het oog gemiddeld evenveel  $KMnO_4$  bovenover de pijp gaat als er onderdoor.

De hoogte waarop de uitstroomopening van het buisje zich dan bevindt is de hoogte van het scheidingsvlak.

De spreiding in de resultaten is echter zeer groot. Dit is te wijten aan de grote turbulentie in het water, die het moeilijk maakt de juiste hoogte op het oog te schatten.

Om de middelingsduur te verlengen en de methode objectiever te maken wordt deze procedure fotografisch vastgelegd.

Een nadeel is, dat het nodig is voor iedere injectiehoogte een aparte foto te maken.

Na ontwikkelen van de foto's wordt de hoogte van het scheidingsvlak vastgesteld. Het blijkt echter, dat het contrast tussen de witte achtergrond en de paarse injectievloeistof te gering is om een goede beoordeling van de foto's mogelijk te maken.

Om dit nadeel te ondervangen is overgegaan op de volgende methode.

**-Kalkinjectie:**

Om het contrast te verhogen wordt nu een zwarte achtergrond toegepast. Een spleetverlichting zorgt er voor, dat alleen de kalk in het midden van de goot wordt verlicht. In deze verlichtingsbak zijn filmzonnen aangebracht met een gezamenlijk vermogen van 3750 Watt. Het contrast van de witte kalk tegen de zwarte achtergrond is veel beter.

De opnameduur bedraagt 1 minuut bij een filmgevoeligheid van 6 ASA.

Een probleem bij deze methode is echter, dat de kalkconcentratie van de geïnjecteerde vloeistof moeilijk constant te houden is.

**-Injectie van waterstofbelletjes (H<sub>2</sub>):**

Deze kunnen worden opgewekt door electrolyse van water.

Hiertoe wordt over de gehele waterdiepte een verticale stalen draad in het hart van de goot aangebracht. Deze bevindt zich circa 0,20 m bovenstrooms van de pijp. Tevens wordt aan de rand van de goot in het water een tegen-electrode geplaatst. Deze bestaat uit een zinken plaat met een oppervlakte van circa 0,1 m<sup>2</sup>. De draad wordt verbonden met de negatieve pool van een gelijkstroombron; de zinken plaat met de positieve pool. Het potentiaalverschil bedraagt 60 V, de stroomsterkte



800 mA. Aan de draad worden nu over de gehele waterdiepte belletjes gevormd. Deze zijn zeer klein. Hun stijgsnelheid is daardoor in het algemeen gering. De belletjes zullen de stroomlijnen van het water dan ook goed volgen.

De spleetverlichting en de zwarte achtergrond zorgen ook nu voor een goed contrast.

De beweging van de belletjes wordt fotografisch vastgelegd. Een belichtingstijd van 1/15 s in combinatie met een filmgevoeligheid van 400 ASA levert de beste foto's op.

Er is echter wel sprake van een momentopname, zodat het aan te bevelen is om meerdere opnamen te maken. Dit omdat de afgifte van belletjes door de draad als gevolg van de waterturbulentie niet altijd even regelmatig verloopt. Plaatselijk kan hierdoor een tekort aan belletjes ontstaan.

Uit de strepen die de belletjes op de foto veroorzaken kan het verloop van de stroomlijnen afgeleid worden. Deze kunnen worden gebruikt om er de ligging van het scheidingsvlak uit af te leiden.

#### 6.4 De schuifspanning

Om een eerste indruk te krijgen van het verloop van de schuifspanningen over de hoogte is het computerprogramma iets uitgebreid. In iedere raai is een aantal schuifspanningen berekend. Als formule voor de schuifspanning is gebruikt:

$$\tau_{uz} = \rho * (l)^2 * (dV/dz)^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (1)$$

Hierin is voor de lengte aangenomen:

$$l = \kappa * z * \sqrt{1 - z/h} \quad (\text{m}) \quad (2)$$

met  $\kappa$  = constante van Von Karman = circa 0,4 (-)

$z$  = de hoogte ten opzichte van de bodem ter plaatse waarop de schuifspanning berekend wordt (m)

$h$  = de waterdiepte ter plaatse; onder de pijp wordt hiervoor de waarde van  $\kappa$  genomen (m)

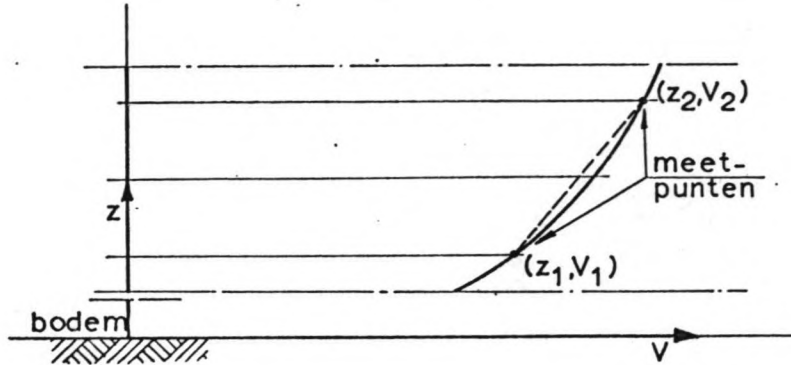


fig. 4. Bepaling schuifspanning

$$dV/dz = \text{aangenomen als } (V_2 - V_1) / (z_2 - z_1) \quad (1/s) \quad (3)$$

$$z = (z_2 + z_1) / 2 \quad (m) \quad (4)$$

Uit de berekeningen blijkt echter, dat de spreiding in de resultaten erg groot is. Dit is het gevolg van het feit dat een kleine afwijking in de gemeten snelheden een grote afwijking in de berekende schuifspanning geeft.

In hoofdstuk 12 zal besproken worden hoe op een andere manier geprobeerd is  $\tau_{uz}$  uit het gemeten snelheidsprofiel te berekenen.

### 6.5 De stroomlijnen

Het stroombeeld rond de pijp kan worden weergegeven met behulp van stroomlijnen.

Deze zijn bepaald voor de meetseries waarbij, bij een vaste gemiddelde snelheid en een vaste pijphoogte, in meerdere raaien het verticale snelheidsprofiel gemeten is (serie 1 tot en met 4).

De integraal van elk snelheidsprofiel wordt in een gelijk aantal delen verdeeld. Ieder deel vertegenwoordigt een vast gedeelte van het totale debiet. Door al deze delen



in de snelheidsprofielen in te tekenen zijn stroomlijnen te construeren.

Ook de berekening van de stroomlijnen is in het computerprogramma opgenomen.

#### 6.6 Het sedimenttransport

Omdat in de berekeningen ook het sedimenttransport een rol speelt, is dit transport voor elke serie proeven bepaald. Hiertoe zijn per proevenserie met behulp van een PROfielVOLger (PROVO) meerdere registraties van het bodemprofiel gemaakt.

7. DE GEMETEN SITUATIES

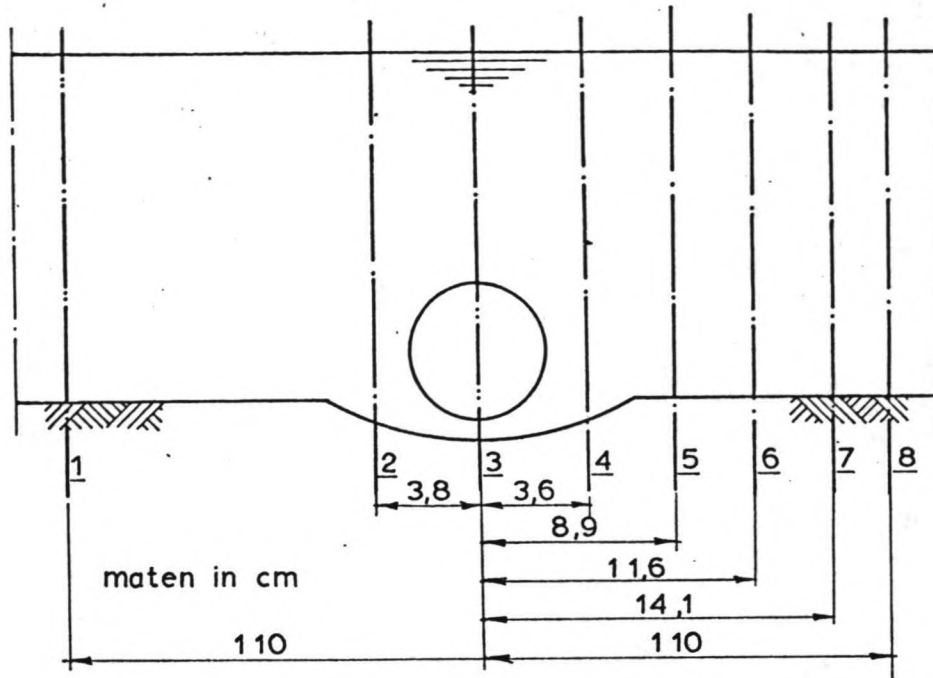


fig. 5. Posities van de raaien

Tabel 1a:

grafiek nummer	raai	Vg (m/s)	d (m)	bodem	KMnO4	kalk	bellen	laser
SERIE 1:								
3	1	,25	-	zand				x
4	3	,25	+,0085	zand	x			x
5	8	,25	-	zand				x
6	2	,25	-	zand				x
7	4	,25	-	zand				x
8	5	,25	-	zand				x
9	7	,25	-	zand				x
10	6	,25	-	zand				x
SERIE 2:								
11	1	,25	-	cement				x
12	2	,25	-	cement			x	x
13	3	,25	+,0085	cement	x	x	x	x

grafiek nummer	raai	Vg (m/s)	d (m)	bodem	KMnO4	kalk	bellen	laser
14	4	,25	-	cement			x	x
15	5	,25	-	cement			x	x
16	6	,25	-	cement			x	x
17	7	,25	-	cement			x	x
18	8	,25	-	cement				x
SERIE 3:								
19	4	,25	-	hout			x	x
20	5	,25	-	hout			x	x
21	3	,25	-,0370	hout		x	x	x
22	1	,25	-	hout				x
SERIE 4:								
23	1	,20	-	zand				x
25	1	,20	-	zand				x
33	3	,20	+,0010	zand			x	x
34	2	,20	-	zand			x	x
36	4	,20	-	zand			x	x
37	5	,20	-	zand			x	x
38	7	,20	-	zand			x	x
SERIE 5:								
39	3	,20	-,1000	zand			x	x
40	3	,20	-,0795	zand			x	x
41	3	,20	-,0605	zand			x	x
42	3	,20	-,0395	zand			x	x
43	3	,20	-,0300	zand			x	x
44	3	,20	-,0190	zand			x	x
45	3	,20	-,0160	zand			x	x
46	3	,20	-,0105	zand			x	x
47	3	,20	-,0050	zand			x	x
48	3	,20	-,0015	zand			x	x
49	3	,20	+,0050	zand			x	x
50	3	,20	+,0100	zand			x	x
51	3	,20	+,0155	zand			x	x
52	3	,20	+,0175	zand			x	x
53	3	,20	+,0205	zand			x	x

grafiek nummer	raai	Vg (m/s)	d (m)	bodem	KMnO4	kalk	bellen	laser
54	3	,20	+,0235	zand			x	x
55	3	,20	+,0255	zand			x	x
56	3	,20	+,0265	zand			x	x
57	3	,20	+,0295	zand			x	x
58	1	,20	-	zand				x
SERIE 6:								
60	1	,17	-	zand				x
61	3	,17	-,1025	zand			x	x
62	3	,17	-,0805	zand			x	x
63	3	,17	-,0600	zand			x	x
64	3	,17	-,0400	zand			x	x
65	3	,17	-,0300	zand			x	x
66	3	,17	-,0200	zand			x	x
67	3	,17	-,0150	zand			x	x
68	3	,17	-,0100	zand			x	x
69	3	,17	-,0050	zand			x	x
70	3	,17	,0000	zand			x	x
71	3	,17	+,0050	zand			x	x
72	3	,17	+,0100	zand			x	x
73	3	,17	+,0135	zand			x	x
74	3	,17	+,0160	zand			x	x
75	3	,17	+,0190	zand			x	x

- . Met de in de kolom 'bodem' voorkomende term 'cement' wordt aangegeven, dat de bodem is ontstaan na het vastleggen met cement van een zandbodem met volledig ontwikkeld ribbelpatroon.
- . In grafieknummer 23 is het ribbelpatroon nog niet geheel ontwikkeld. Grafieknummer 25 geeft de situatie enige tijd later weer wanneer dit wel zo is.
- . Voor de verwerking van de lasermetingen: Zie bijlage 6
- . Voor de getekende snelheidsprofielen : Zie bijlage 7
- . Voor enkele voorbeeldfoto's van kalkinjecties : Zie bijlage 8

Deze foto's hebben betrekking op de situaties als in de grafieknummers 13 en 21.

In foto 1 bevindt het injectiepunt zich boven het scheidingsvlak.

In foto 2 bevindt het injectiepunt zich ongeveer ter hoogte van het scheidingsvlak.

In foto 3 bevindt het injectiepunt zich duidelijk onder het scheidingsvlak.

- Voor een voorbeeld van de belletjesmethode: Zie bijlage 9. Deze foto's hebben betrekking op de situaties als in de grafieknummers 13 en 21.

Foto 1 toont het hele stroombeeld rond de pijp.

Foto 2 is een uitvergroting van foto 1.

De onderste figuur toont de stroomlijnen geconstrueerd uit foto 2.

- De uit de lasermetingen bepaalde stroomlijnenfiguren zijn bijeengebracht in de bijlagen 10 t/m 13.
  - Bijlage 10 heeft betrekking op serie 1.
  - Bijlage 11 heeft betrekking op serie 2.
  - Bijlage 12 heeft betrekking op serie 3.
  - Bijlage 13 heeft betrekking op serie 4.

Na afloop van de in tabel 1a genoemde series experimenten is nog enige tijd gestroomd met een ruw gemaakte pijp. Daartoe is een PVC-pijp (diameter 0,05 m) beplakt met zand met een D50 gelijk aan 0,750 mm.

Bij een gemiddelde snelheid van 0,20 m/s is gestroomd met de pijp op een vaste hoogte:  $d = 0,0000$  m. Bij een gemiddelde stroomsnelheid van 0,17 m/s is de pijp stapsgewijs dieper gedrukt, van  $d = -0,1000$  m tot  $d = +0,0160$  m. Zie tabel 1b.

Tabel 1b:

grafiek nummer	raai	Vg (m/s)	d (m)	bodem
SERIE 7:				
76	3	0,20	0,0000	zand
SERIE 8:				
77	3	0,17	-0,1000	zand
78	3	0,17	-0,0400	zand
79	3	0,17	-0,0100	zand
80	3	0,17	0,0000	zand
81	3	0,17	+0,0115	zand
82	3	0,17	+0,0160	zand

In een aantal evenwichtssituaties is de ontgrondingsdiepte opgemeten en zijn foto's gemaakt.

Na het bereiken van de evenwichtssituatie is in een aantal gevallen nog doorgestroomd. Tijdens dit doorstromen is bekeken of er zich nog afwijkingen voordoen ten opzichte van de situatie die bereikt wordt na een normale stromingsduur. Tenslotte is nog enkele malen kort gestroomd met extreem hoge snelheden (tot een Vg in de orde van 1 m/s).



### 8. VERGELIJKING VAN DE METHODEN WAARMEE HET SCHEIDINGSVLAK BEPAALD IS

De drie methoden zijn vergeleken voor de situaties als genoemd in serie 2 en 3 (zie tabel 1a).

De resultaten hiervan zijn ondergebracht in onderstaande tabel.

Tabel 2:

serie	a-kalk (mm)	a-belletjes (mm)	a-laser (mm)
2	+17 *	+12 £	+13
3	-6 *	-10 £	-11,4

\* Voor enkele foto's van deze situatie: Zie bijlage 8

£ Voor enkele foto's van deze situatie: Zie bijlage 9

Uit deze tabel blijkt reeds, dat de resultaten van de kalkmethode afwijken van die van de beide andere methoden. Deze uitkomst is niet verrassend. Het juist interpreteren van de foto's is namelijk erg moeilijk.

Als de injectie plaatsvindt op de hoogte van het scheidingsvlak, gaan er gemiddeld evenveel kalkdeeltjes over de pijp heen als er onderdoor. Voor een goede interpretatie van de foto's is het dus nodig dit te kunnen beoordelen.

Dat is niet goed mogelijk, omdat op de foto slechts de concentratie en niet de hoeveelheid kalkdeeltjes is te zien. Als er evenveel deeltjes onderdoor als bovenover gaan, zal de deeltjesconcentratie onder en boven toch verschillend zijn. De spreiding van de deeltjes boven de pijp is namelijk groter dan onder de pijp. De zwarting op het negatief zal dus onder de pijp het grootst zijn. Dit effect wordt nog verergerd, doordat de gootbodem het licht van de filmzonnen reflecteert.

Nog enkele nadelen van de kalkmethode zijn:

- De hoeveelheid kalk die per seconde geïnjecteerd wordt is niet goed constant te houden.
- Doordat de kalk slecht in het water oplost, is de kans op verstopping van het injectiebuisje groot.
- Om in een situatie het scheidingsvlak te kunnen bepalen zijn veel foto's nodig.

Een en ander heeft tot gevolg, dat met behulp van de kalkmethode het scheidingsvlak te hoog geschat wordt. Dit volgt ook uit tabel 2.

Voor de serie proeven die begint met grafieknummer 23 is de kalkmethode om deze reden niet verder toegepast.

De uitkomsten van de belletjesmethode sluiten goed aan bij die van de lasermethode.

Bijkomende voordelen van de belletjesmethode zijn:

- Er wordt direct een indruk verkregen van het stroombeeld.
- Deze methode werkt snel en gemakkelijk: Voor de bepaling van het scheidingsvlak zijn enkele, kort na elkaar genomen foto's voldoende.
- De methode werkt veel directer dan de overige methoden.

Voor de series proeven die beginnen met grafieknummer 23 zijn alleen de belletjes- en de lasermethode toegepast.

9. RESULTATEN VAN DE EXPERIMENTEN

9.1 Overzicht

In tabel 3a is een overzicht van de resultaten gegeven welke bepaald zijn uit de lasermetingen.

(Vong = V-onder de pijp-genormeerd-gemiddeld = qon / ksi).

Tabel 3a:

grafiek nummer	d (m)	ksi (m)	qon (m <sup>2</sup> /s)	Vong (m/s)	niveau scheidingsvlak (m)	a (m)
SERIE 1:						
4	,0085	,0205	,0037	,1805	,715	,009
SERIE 2:						
13	,0085	,0230	,0043	,1869	,719	,013
SERIE 3:						
21	-,0370	,0370	,0114	,3081	,740	-,011
SERIE 4:						
33	,0010	,0220	,0035	,1591	,717	,008
SERIE 5:						
39	-,1000	,1025	,0222	,2167	,819	,008
40	-,0795	,0760	,0166	,2184	,792	,002
41	-,0605	,0630	,0130	,2063	,775	,004
42	-,0395	,0425	,0085	,2001	,751	,001
43	-,0300	,0370	,0067	,1824	,741	,000
44	-,0190	,0270	,0050	,1868	,730	,001
45	-,0160	,0310	,0048	,1555	,729	,002
46	-,0105	,0255	,0044	,1722	,726	,005
47	-,0050	,0220	,0036	,1639	,721	,006
48	-,0015	,0200	,0031	,1554	,718	,006
49	,0050	,0165	,0024	,1468	,713	,008
50	,0100	,0145	,0020	,1410	,710	,010
51	,0155	,0125	,0013	,1074	,705	,010
52	,0175	,0115	,0011	,0982	,703	,010
53	,0205	,0090	,0008	,0898	,701	,011

grafiek nummer	d (m)	ksi (m)	qon (m <sup>2</sup> /s)	Vong (m/s)	niveau scheidingsvlak (m)	a (m)
54	,0235	,0060	,0004	,0704	,697	,010
55	,0255	,0045	,0002	,0498	,695	,010
56	,0265	,0035	,0001	,0360	,694	,010
57	,0295	,0000	--	--	--	--
SERIE 6						
61	-,1025	,1025	,0219	,2141	,815	-,001
62	-,0805	,0825	,0172	,2090	,791	-,004
63	-,0600	,0615	,0130	,2111	,768	-,006
64	-,0400	,0425	,0090	,2123	,747	-,007
65	-,0300	,0325	,0068	,2088	,734	-,010
66	-,0200	,0235	,0048	,2031	,722	-,012
67	-,0150	,0190	,0036	,1916	,715	-,014
68	-,0100	,0160	,0029	,1811	,711	-,013
69	-,0050	,0130	,0023	,1781	,707	-,012
70	,0000	,0110	,0020	,1795	,704	-,010
71	,0050	,0100	,0016	,1564	,702	-,007
72	,0100	,0070	,0010	,1435	,698	-,006
73	,0135	,0055	,0006	,1080	,695	-,006
74	,0160	,0020	--	--	--	--
75	,0190	,0000	--	--	--	--

In tabel 3b is een overzicht van de resultaten gegeven, welke verkregen zijn bij het stromen met een ruwe pijp.

Tabel 3b:

grafiek nummer	d (m)	ksi (m)
SERIE 7		
76	0,0000	0,0185
SERIE 8		
77	-0,1000	0,1000
78	-0,0400	0,0420
79	-0,0100	0,0160
80	0,0000	0,0140
81	+0,0115	0,0085
82	+0,0160	0,0070

### 9.2 Het scheidingsvlak

Voor de meetseries 5 en 6 zijn grafieken getekend, die het verband aangeven tussen d en a (zie de bijlagen 14 en 15). De benodigde gegevens hiervoor zijn afkomstig uit tabel 3a. Bij de beschouwing van de bijlagen 14 en 15 vallen twee dingen op.

In de eerste plaats hebben de krommen een overeenkomstige vorm.

Daarnaast ziet men, dat de krommen ten opzichte van elkaar in de hoogte zijn verschoven. Een verklaring hiervoor kan gegeven worden aan de hand van figuur 6 en figuur 7.

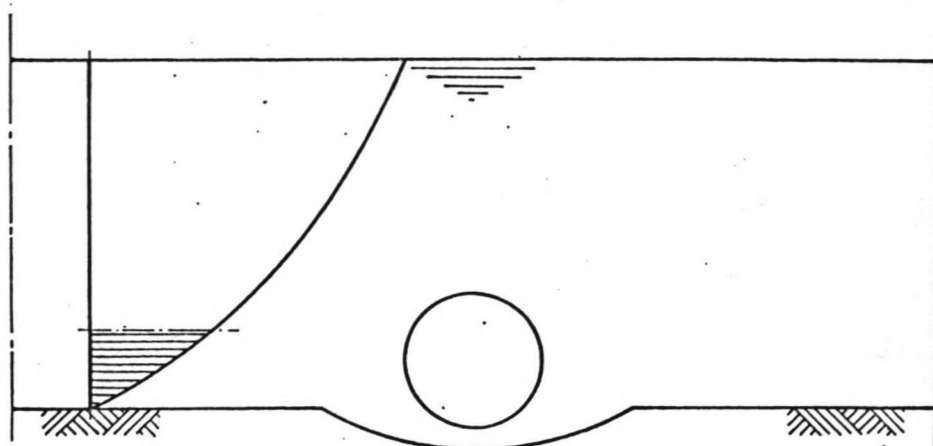


fig. 6. Ongestoord snelheidsprofiel serie 5

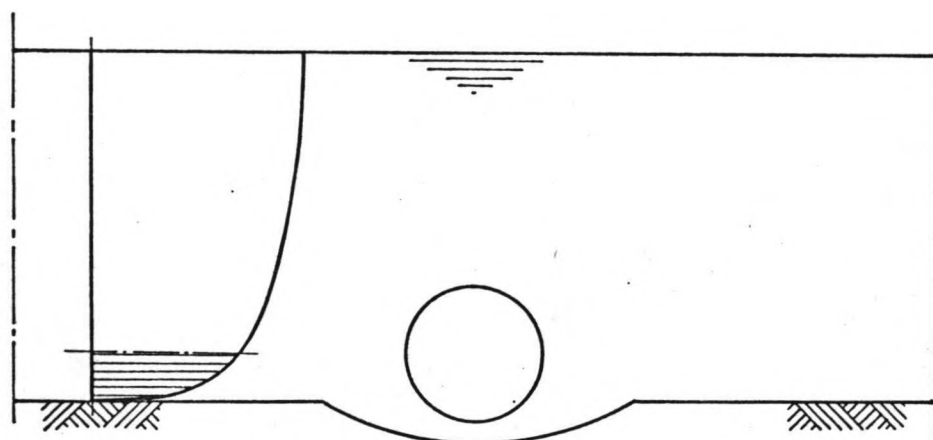


fig. 7. Ongestoord snelheidsprofiel serie 6

Zoals in de volgende paragraaf zal blijken, kan men globaal stellen, dat het debiet onder de pijp in beide situaties hetzelfde is voor eenzelfde  $d$ .

De vorm van de onderkant van het ongestoorde snelheidsprofiel wordt in hoge mate beïnvloed door de ruwheid van de zandbodem (zie figuren 6 en 7).

Bij serie 6 is de bodemruwheid kleiner dan bij serie 5. Dit is een gevolg van de lagere gemiddelde snelheid. Hierdoor zal het niveau van het scheidingsvlak voor deze serie lager liggen dan voor serie 5.

Vooralsnog lijkt het niet mogelijk de hoogte van het



scheidingsvlak theoretisch te berekenen.

Om deze hoogte op basis van een empirische relatie in elke denkbare situatie te kunnen voorspellen zijn echter meer metingen nodig.

### 9.3 Het snelheidsprofiel onder de pijp

Voor de gemeten snelheidsprofielen onder de pijp (raai 3) wordt verwezen naar bijlage 7.

In het computerprogramma zijn van al deze snelheidsprofielen de integralen ( $q_{on}$ ) berekend (zie bijlage 6).

Voor de meetseries 5 en 6 is met behulp van tabel 3a het verband tussen  $d$  en  $q_{on}$  getekend (zie bijlagen 16 en 17). Ook is voor deze meetseries het verband tussen  $d$  en  $V_{ong}$  getekend (zie bijlagen 18 en 19).

Als  $d$  toeneemt blijkt, dat  $V_{ong}$  afneemt. Dit is als volgt plausibel te maken. Als  $d$  groter wordt, dan wordt  $k_{si}$  kleiner. Het is namelijk niet mogelijk, dat  $k_{si}$  dan groter wordt. Een kleinere  $k_{si}$  heeft tot gevolg, dat de invloed van de bodem en de pijpruwheid op het onder de pijp doorstromende water toeneemt. De gemiddelde snelheid van dit water ( $V_{ong}$ ) zal hierdoor afnemen.

Het is de bedoeling aan de hand van de gemeten profielen voor de in paragraaf 5.2 genoemde standaardvorm een voorschrift te geven. Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 11.

### 9.4 De gatdiepte $k_{si}$

Voor de meetseries 5 en 6 is aan de hand van tabel 3a het verband getekend tussen  $d$  en  $k_{si}$  (zie bijlagen 20, respectievelijk 21).

Voor de meetseries 7 en 8 (ruwe pijp) zijn aan de hand van tabel 3b de meetpunten ingetekend in de bijlagen 20, respectievelijk 21.

Voordat begonnen is met de lasermetingen van serie 4, is de ontgronding als functie van de tijd bekeken. Zie bijlage 22. Hiertoe zijn op gezette tijden foto's gemaakt van de

ontgronding. Zolang de evenwichtstoestand nog niet bereikt is, neemt de ontgronding ongeveer toe met  $\log(t)$ . De afwijkingen van de meetpunten ten opzichte van de lijn gevonden met behulp van de methode der kleinste kwadraten:

$$d + ksi = 4,95 * \log(t) - 2,75 \quad (t \text{ in seconden}) \quad (5)$$

zijn nauwelijks groter dan de nauwkeurigheid waarmee  $d + ksi$  gemeten kan worden. Toch blijkt dat er een bepaalde regelmaat in de afwijkingen zit. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt, doordat het sedimentaanbod aan de bovenstroomse rand van de ontgrondingskuil ten gevolge van het aankomen van ribbels varieert.

Na ongeveer 24 uur stromen wordt de evenwichtstoestand bereikt. Ook in lit.1 is men tot deze conclusie gekomen.

Deze toestand is niet zo stabiel, omdat de waarde van  $ksi$  in de evenwichtstoestand beïnvloed wordt door de turbulentie en het variërende sedimentaanbod.

In de meeste literatuur vindt men een logaritmische toename van de ontgronding als functie van de tijd. In lit.12 worden echter ook andere verbanden gevonden. Het voordeel van deze verbanden is, dat de waarde van  $ksi$  aan een bepaald maximum is gebonden. Dit in tegenstelling tot de onbegrensde toename van  $ksi$  volgens vergelijking (5). Deze verbanden blijken echter niet van toepassing op de in bijlage 22 getekende meetgegevens.

Uit bijlage 22 is een goede indruk verkregen omtrent de orde van de tijdsduur benodigd voor het bereiken van de evenwichtssituatie. Hiervan is gebruik gemaakt bij de uitvoering van de proeven van serie 5 en 6.

De eindwaarde van  $d + ksi$  in serie 4 komt redelijk overeen met de waarde van  $d + ksi$  gevonden in serie 5 (voor dezelfde  $d$ ). Dit ondanks het feit, dat in serie 4 de ontgronding bij een vaste  $d$  tot stand is gekomen en in serie 5 via een stapsgewijze vergroting van  $d$ . Vanwege het wegdrukken van de pijp is de totale stromingsduur in serie 5 uiteraard langer dan de eerder genoemde 24 uur.

#### 9.5 De gevolgen van het doorstromen na het bereiken van de evenwichtssituatie

Bij langer doorstromen blijft de gatdiepte  $k_{si}$  om de gemiddelde eindwaarde schommelen. De wal achter de ontgrondingskuil verdwijnt na enige tijd in het midden van de goot. Aan de randen van de goot verdwijnt de wal minder snel dan in het midden. Op deze wijze breidt de ontgrondingskuil zich langzaam naar achteren uit. Soms komt het voor, dat zich direct benedenstrooms van de ontgrondingskuil een relatief diep gat van 3 a 5 cm diep ontwikkelt. Waarschijnlijk is dit een gevolg van de wervels die achter de pijp loslaten. De invloed hiervan wordt pas merkbaar bij een lange stromingsduur.

#### 9.6 De gevolgen van extreem grote stroomsnelheden

De watersnelheid is stapsgewijs opgevoerd tot circa 1 m/s. Bij iedere stap is de pijp zover weggedrukt, dat  $d + k_{si}$  een maximale waarde bereikt. Bij de hoogste snelheid -circa 1 m/s- is voor  $d + k_{si}$  een maximale waarde gemeten van 0,075 m. Er is geen reden aan te nemen, dat er bij verder opvoeren van de gemiddelde snelheid een maximum voor  $d + k_{si}$  gevonden kan worden. Hierbij moet wel bedacht worden, dat bij zulke hoge snelheden van een aangepast snelheidsprofiel geen sprake kan zijn.

## 10. AFRONDING VAN HET VOORLOPIGE VERSLAG

Op het moment waarop het voorlopige verslag is geschreven, is het onderzoek nog niet geheel afgerond.

Nadat de aanpak van het probleem in principe is vastgelegd, is een groot aantal laboratoriumproeven gedaan. De direct uit deze proeven verkregen resultaten zijn in het voorlopige verslag volledig vermeld. De verder verwerking van de resultaten is opgenomen in het navolgende deel van dit definitieve verslag.

## 11. HET SNELHEIDSPROFIEL ONDER DE PIJP (STANDAARDVORM)

### 11.1 Inleiding

Om een indruk te geven van het verloop van het evenwichts-snelheidsprofiel onder de pijp als functie van  $d$  is figuur 8 opgenomen.

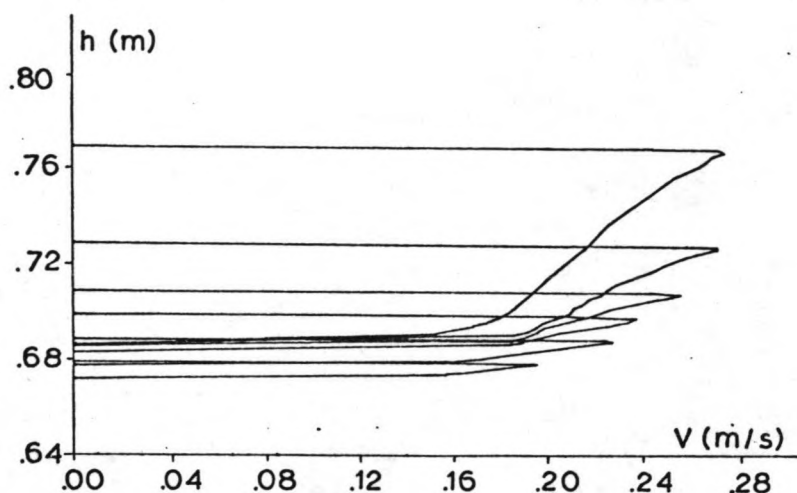


fig. 8. Snelheidsprofiel onder de pijp voor de grafieknummers 62, 64, 66, 68, 70 en 72

Geprobeerd is voor de in paragraaf 5.2 en 9.3 genoemde standaardvorm voor het snelheidsprofiel onder de pijp een voorschrift te geven.

### 11.2 Analyse op basis van $z \cdot dV/dz$

Zoals in paragraaf 5.3 reeds is aangegeven geldt volgens de theorie dat de vorm van het snelheidsprofiel dichtbij de bodem logaritmisch is.

De vergelijking van deze logaritme is:

$$V = U_x / \kappa \cdot \ln(z) - U_x / \kappa \cdot \ln(z_0) \quad (6)$$

met  $U_x$  = schuifspanningssnelheid (m/s)

$z_0$  = hoogte waarop de snelheid nul is (m)

Hieruit volgt:

$$dV/dz = U_x / (\kappa \cdot z) \quad (7)$$

zodat:

$$z \cdot dV/dz = U_x / \kappa = \text{constant voor iedere } z \quad (8)$$

In hoofdstuk 12 zijn enkele methoden onderzocht om voor een willekeurig gemeten snelheidsprofiel  $dV/dz$  te bepalen. Er blijkt, dat de in paragraaf 12.3.5 gepresenteerde methode het best voldoet. Deze is hier reeds gebruikt om  $z \cdot dV/dz$  voor de snelheidsprofielen onder de pijp vast te stellen. Een representatief voorbeeld, namelijk grafieknummer 41, is weergegeven in bijlage 23.

Opvallend hierin is, dat  $z \cdot dV/dz$  geen constante blijkt te te zijn, maar lijkt te kunnen worden weergegeven door twee rechte lijnen. De onderste rechte lijn wordt nader onderzocht, omdat hieruit misschien de bodemschuifspanning te berekenen is.

Deze beschouwing heeft tot doel vast te stellen of er een verband bestaat tussen de parameters die deze rechte lijn beschrijven en  $d$ .

De vergelijking voor de rechte lijn heeft de vorm:

$$z \cdot dV/dz = a_1 \cdot z + a_2 \quad (9)$$

Voor de diverse gevallen zijn  $a_1$  en  $a_2$  te bepalen als aangeven in figuur 9.

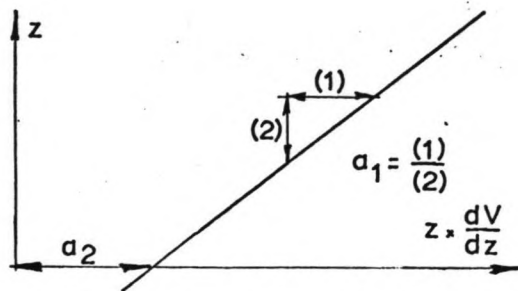


fig. 9.  $z \cdot dV/dz$  voor het onderste deel van het snelheidsprofiel onder de pijp

Na integratie van (9):

$$V = a_1 \cdot z + a_2 \cdot \ln(z/a_3) \quad (10)$$



Als gesteld wordt:

$$a_4 = a_2 * \ln(1/a_3) \quad (11)$$

dan wordt vergelijking (10):

$$V = a_1 * z + a_2 * \ln(z) + a_4 \quad (12)$$

$a_4$  kan nu berekend worden door voor een willekeurig punt in vergelijking (12) de  $z$  en de bijbehorende  $V$  te substitueren. Voor een aantal gevallen zijn de berekende waarden weergegeven in tabel 4.

Tabel 4:

grafiek nummer	$\bar{d}$ (m)	$a_1$ (1/s)	$a_2$ (m/s)	$a_4$ (m/s)	$z$ voor $V = a_4$ (m)
SERIE 5:					
39	-0,1000	+0,45	+0,031	+0,291	+0,136
40	-0,0795	+1,33	+0,005	+0,188	+0,015
41	-0,0605	+1,36	+0,018	+0,243	+0,043
43	-0,0300	+3,13	+0,008	+0,176	+0,012
47	-0,0050	+4,94	0,000	+0,123	-
52	+0,0175	+1,35	+0,020	+0,210	+0,045
53	+0,0205	-2,24	+0,033	+0,299	-

Vanwege het onregelmatige verloop van de parameters met  $\bar{d}$  blijkt het niet mogelijk een uitdrukking voor  $z*dV/dz$  als functie van  $\bar{d}$  te vinden. Dit houdt in, dat de vorm van het onderste deel van het snelheidsprofiel onder de pijp als functie van  $\bar{d}$  op deze manier niet te bepalen is.

Een andere manier om te proberen hiervoor een standaardvorm vast te stellen wordt besproken in de volgende paragraaf.

### 11.3 Analyse van een geschematiseerd snelheidsprofiel

Het snelheidsprofiel onder de pijp wordt geschematiseerd als in figuur 10.

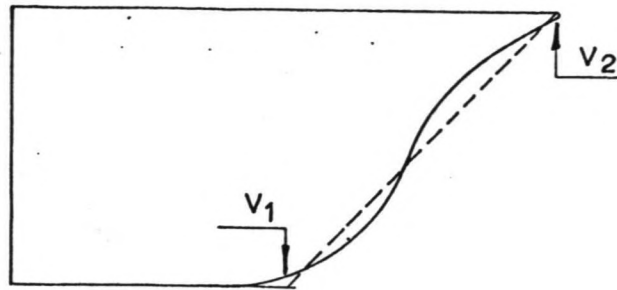


fig. 10. Schematisatie van het snelheidsprofiel onder de pijp

Bekeken is of er een verband bestaat tussen  $v_1$ ,  $v_2$ , ksi en  $d$ . Verwezen wordt naar bijlage 24. De daarin voorkomende gegevens zijn grafisch weergegeven in de bijlagen 25 a, b, c en d.

Zoals uit deze bijlagen blijkt, is het aantal metingen te beperkt om een trend te ontdekken in de verandering van de vorm van het snelheidsprofiel onder de pijp als functie van  $d$ .

Voorlopig is het niet mogelijk vooraf deze vorm vast te stellen. In het volgende hoofdstuk zal geprobeerd worden uit de gemeten snelheidsprofielen de bodemschuifspanning te bepalen.

## 12. DE BEPALING VAN DE SCHUIFSPANNING UIT HET SNELHEIDSPROFIEL

### 12.1 Inleiding

In paragraaf 5.3 is al aangegeven, dat het nodig is uit het aanwezige snelheidsprofiel de bodemschuifspanning (taub) te bepalen. Deze taub wordt namelijk nodig geacht om het sedimenttransport te berekenen.

In de navolgende paragraaf 12.3 wordt een poging gedaan aan te geven hoe taub uit het aanwezige snelheidsprofiel bepaald moet worden. Daartoe wordt getracht uit de gemeten snelheidsprofielen de taub die in de meetsituaties aanwezig geweest moet zijn, vast te stellen.

In paragraaf 12.2 wordt eerst nog het een en ander opgemerkt over de secundaire stromingen die de vorm van het snelheidsprofiel in een goot beïnvloeden.

### 12.2 Secundaire stromingen

Zoals in de snelheidsprofielen van bijlage 7 te zien is, loopt de watersnelheid aan de oppervlakte terug. Dit is een bekend verschijnsel bij de stroming in relatief diepe open goten.

Theoretisch zou de maximale snelheid aan de vrije wateroppervlakte op moeten treden. De snelheid wordt daar echter gereduceerd, doordat het langzaam bewegende water aan de kanten van de goot naar de oppervlakte stroomt. Aan de oppervlakte stroomt het water vervolgens naar het midden. Deze bewegingen worden secundaire stromingen genoemd. Ze zijn het gevolg van het niet in alle richtingen gelijk zijn van de turbulentie-intensiteit.

Het optreden van de secundaire stromingen is inherent aan het fysische verschijnsel van de stroming door een rechte goot. Het is geen gevolg van een slechte instroming van zand en/of water. Zie lit.36.

Er zijn vele patronen voor deze secundaire stromingen moge-

lijk. Zie lit.12 en 31. Een voorbeeld is gegeven in figuur 11.

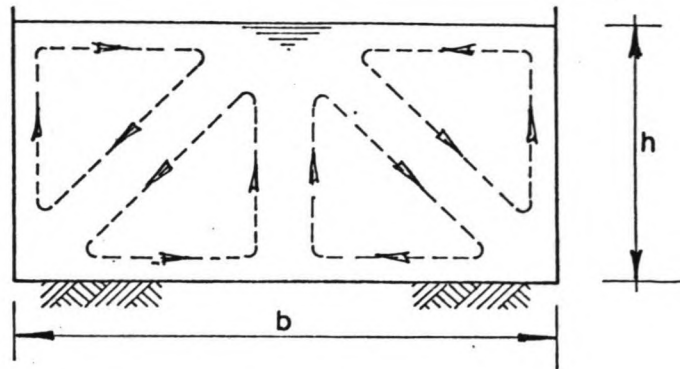


fig. 11. Secundaire stroming in een rechte goot

Ten aanzien van het teruglopen van de watersnelheid aan de oppervlakte beweren sommige auteurs, dat ook de wrijving tussen water en lucht van belang is.

Vanwege de hier besproken afwijking in het bovenste deel van het snelheidsprofiel moet dit gedeelte in de verdere berekeningen buiten beschouwing gelaten worden.

### 12.3 De schuifspanning

Als het snelheidsprofiel over de hoogte logaritmisch is, dan geldt voor de schuifspanningen het volgende.

De schuifspanning in het water:

$$\tau_{uz} = \rho * l^2 * (dV/dz)^2 \quad (13)$$

De schuifspanning aan de bodem:

$$\tau_{aub} = \rho * l^2 * (dV/dz)^2 / (1 - z/h) \quad (14)$$

In beide is de mengweglengte volgens Von Karman:

$$l = \kappa * z * \sqrt{1 - z/h} \quad (15)$$

De schuifspanningen in het water verlopen dus lineair van nul aan de oppervlakte tot  $\tau_{aub}$  aan de bodem.

Uitgaande van deze formules is geprobeerd uit het gemeten snelheidsprofiel de bodemschuifspanning te bepalen. De verschillende manieren waarop dit is gedaan worden in de volgende subparagrafen besproken. Deze methoden zijn toegepast

op alle gemeten snelheidsprofielen. Omwille van de beperking van het aantal bijlagen zal de uitleg echter steeds vergezeld gaan van een representatief voorbeeld.

### 12.3.1 De numerieke methode uit het computerprogramma

In paragraaf 6.4 is reeds vermeld, dat het regelrecht bepalen van de differentiaal  $dV/dz$  uit de differentie  $(V_2-V_1) / (z_2-z_1)$  niet goed gaat.

Ter illustratie hiervan is in bijlage 26 een voorbeeld gegeven, dat betrekking heeft op grafieknummer 11. In deze grafiek komt de grote spreiding in de op deze wijze berekende waarden van  $\tau_{\text{auz}}$  duidelijk naar voren.

Met behulp van lineaire regressie is de rechte lijn die het beste bij deze waarden past, berekend. Het resultaat is onbevredigend. In de eerste plaats levert een lineaire regressie berekening waarbij de som van de kwadraten van de afwijkingen in  $\tau_{\text{auz}}$  wordt geminimaliseerd, een heel andere lijn op dan zo'n berekening waarbij met de afwijkingen in  $z$  wordt gerekend. Uit de grote hoek tussen de beide regressielijnen volgt, dat de correlatie slecht is. In de tweede plaats volgt uit beide regressielijnen een bodemschuifspanning die in het geheel niet aansluit bij de berekende schuifspanningen onderaan.

Gedacht is, dat het misschien zin zou hebben een andere definitie voor de mengweglengte  $l$  te gebruiken. In bijlage 27 zijn naast de gebruikelijke definitie volgens vergelijking (2) enkele andere definities grafisch weergegeven. Er is te zien, dat de uitkomsten van de verschillende formules in het beschouwde gebied nabij de bodem niet veel van elkaar afwijken. Een andere formule voor de mengweglengte kan dus niet zorgen voor betere resultaten. De slechte uitkomsten van de hier bedoelde methode zijn namelijk te wijten aan de manier waarop  $dV/dz$  bepaald is.



### 12.3.2 ln-curvefitting

Allereerst wordt de ongestoorde situatie beschouwd.

Theoretisch is het snelheidsprofiel in de ongestoorde situatie logaritmisch:

$$V = U_x / \kappa * \ln(z) - U_x / \kappa * \ln(z_0) \quad (16)$$

Hieruit volgt met behulp van vergelijking (14):

$$\tau_{aub} = \rho * (U_x)^2 \quad (17)$$

Op het gemeten snelheidsprofiel wordt nu een ln-fitting toegepast. Het resultaat is:

$$V = b_1 + b_2 * \ln(z) \quad (18)$$

Daarin worden  $b_1$  en  $b_2$  bij de fitting berekend.

Uit (16) en (18) volgt, dat bij het gefitte snelheidsprofiel een schuifspanningssnelheid behoort van:

$$U_x = \kappa * b_2 \quad (19)$$

De bodemschuifspanning die uit de ln-fitting volgt is nu:

$$\tau_{aub} = \rho * (U_x)^2 = \rho * (\kappa * b_2)^2 \quad (20)$$

Het logaritmisch snelheidsprofiel geldt alleen tot dichtbij de bodem, als die bodem redelijk vlak is. Zodra er ribbels ontstaan, zal het onderste deel van het snelheidsprofiel zeker niet meer logaritmisch zijn. Om deze reden moeten bij het fitten een aantal van de onderste punten worden weggelaten. De vraag is echter hoeveel dat er moeten zijn. Een nadeel is ook dat juist de onderste watersnelheden (daar waar de bodemschuifspanning aanwezig is) worden weggelaten.

In paragraaf 12.2 is al aangegeven, dat ook van het bovenste deel van het snelheidsprofiel een aantal punten buiten beschouwing moet blijven. Ook hier is het aantal weg te laten punten een probleem.

Voor een ln-fitting is het van groot belang, dat bekend is op welke hoogte  $z$  gelijk aan nul genomen moet worden. Door de aanwezigheid van ribbels is voor deze hoogte niet direct een keuze te maken.

Voordat met het fitten kan worden begonnen, dient dus een aantal keuzen te worden gemaakt. Om te bekijken welke invloed de gedane keuzen hebben op het eindresultaat ( $\tau_{aub}$ )



is een rekenmachine-programma geschreven voor de TI-59 van Texas Instruments. In dit programma wordt het aantal weg te laten punten onder en boven, alsmede de hoogte waarop  $z$  gelijk aan nul is, gevarieerd. Telkens wordt, nadat een combinatie van keuzen is vastgesteld, de ln-fitting uitgevoerd. Dit levert steeds de coëfficiënten  $b_1$  en  $b_2$  en de bijbehorende correlatiecoëfficiënt op.

Bij nadere beschouwing van de uitkomsten van deze fittingen blijkt, dat de fitting met de hoogste correlatiecoëfficiënt niet de beste aanpassing aan het gemeten snelheidsprofiel behoeft te zijn. Dit kan worden veroorzaakt, doordat een groot aantal van de meegenomen punten niet goed past tussen de andere, niet meegenomen meetpunten. De fitting sluit dan wel zeer goed aan bij de meegenomen punten, maar past toch slecht bij het totale snelheidsprofiel. Schematisch is dit aangegeven in figuur 12.

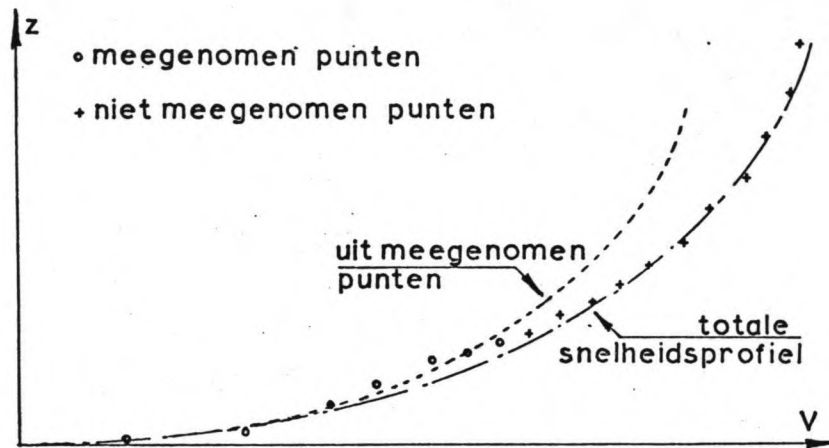


fig. 12. Verkeerde fitting ten gevolge van een afwijking in de meetpunten

Verder valt op dat, doordat de ongestoorde profielen in het algemeen slecht logaritmisch zijn, bij een heel laag nulpunt vaak een hogere correlatiecoëfficiënt gevonden wordt dan in hetzelfde geval bij een hoog nulpunt. Het aantal in de fitting mee te nemen punten is ook op zichzelf van belang voor de ligging van de berekende fitting. Dit is te zien in bij-

lage 28.

Dat de gemeten snelheidsprofielen in de ongestoorde toestand in het algemeen slecht logaritmisch zijn, is aangegeven in bijlage 29.

Vervolgens wordt de situatie onder de pijp beschouwd.

Uit de turbulentie-theorie volgt, dat het onderste deel van het snelheidsprofiel logaritmisch moet zijn. In hoofdstuk 11 is al aangetoond, dat dit in de metingen die onder de pijp zijn gedaan, niet terug te vinden is. Het blijkt dus niet mogelijk het snelheidsprofiel onder de pijp door een logaritme te benaderen. Voor de berekening van de bodemschuifspanning kan dus ook geen gebruik gemaakt worden van de formules die voor een logaritmisch profiel gelden.

### 12.3.3 Derde-graads curvefitting

In de vorige paragraaf is aanvankelijk aangenomen, dat het gemeten snelheidsprofiel behoorlijk te benaderen is door een logaritme. Deze aanname blijkt niet terecht te zijn.

Om nu het gemeten snelheidsprofiel toch goed met behulp van een analytische functie te kunnen benaderen, is een derde-graads fitting toegepast op het stuk van het gemeten snelheidsprofiel waarvoor geldt:  $dV/dz > 0$ . Dit kan op twee manieren gebeuren. Deze resulteren in respectievelijk:

$$V = b_3 * (z)^3 + b_2 * (z)^2 + b_1 * z + b \quad (21)$$

en

$$z = b_3 * (V)^3 + b_2 * (V)^2 + b_1 * V + b \quad (22)$$

De fitting volgens formule (22) voldoet beter. Toch sluit ook deze fitting niet goed aan bij het gemeten snelheidsprofiel.

### 12.3.4 Vijfde-graads curvefitting

Een vijfde-graads fitting is flexibeler dan een derde-graads, zodat er waarschijnlijk een betere aansluiting

bij de meetwaarden gevonden kan worden.

Analoog aan paragraaf 12.3.3 is hier geprobeerd:

$$V = b_5 * (z)^5 + b_4 * (z)^4 + b_3 * (z)^3 + \\ + b_2 * (z)^2 + b_1 * z + b \quad (23)$$

en

$$z = b_5 * (V)^5 + b_4 * (V)^4 + b_3 * (V)^3 + \\ + b_2 * (V)^2 + b_1 * V + b \quad (24)$$

De fitting volgens formule (24) sluit nu goed aan bij de meetpunten. Zie bijlage 30.

Willen we nu uit deze fitting op een bepaalde hoogte  $z$   $\tau_{\text{auz}}$  berekenen (zie formule (13)), dan is de werkwijze als volgt.

Na substitutie van  $z$  in vergelijking (24) wordt op impliciete wijze  $V$  berekend (via programma 8 uit de basis software module van de TI-59). Voor de berekening van de schuifspanning is echter  $dV/dz$  nodig. Uit (24) volgt:

$$dz/dV = 5 * b_5 * (V)^4 + 4 * b_4 * (V)^3 + \\ + 3 * b_3 * (V)^2 + 2 * b_2 * V + b_1 \quad (25)$$

Substitutie van de berekende  $V$  in vergelijking (25) levert nu  $dz/dV$  op. Voor  $dV/dz$  geldt:

$$dV/dz = 1 / (dz/dV) \quad (26)$$

De vergelijkingen (13) en (15) geven:

$$\tau_{\text{auz}} = \rho * (\kappa)^2 * (z)^2 * (1 - z/h) * (dV/dz)^2 \quad (27)$$

waaruit vervolgens  $\tau_{\text{aub}}$  berekend kan worden.

Als het profiel logaritmisch zou zijn, dan is:

$$\tau_{\text{auz}} = (1 - z/h) * \tau_{\text{aub}} \quad (28)$$

en

$$\tau_{\text{aub}} = \tau_{\text{auz}} / (1 - z/h) = \text{constant voor elke } z \quad (29)$$

$\tau_{\text{aub}}$  wordt bij gebrek aan beter met behulp van formule (29) berekend. Voor deze berekening is aangenomen, dat het punt waar  $z$  gelijk aan nul is, samenvalt met de bodem ter plaatse. Deze keuze heeft in tegenstelling tot wat bij de ln-fitting het geval was geen invloed op het resultaat van de vijfde-graads fitting. In eerste instantie lijkt deze methode goede resultaten te geven. Als de fitting evenwel herhaald wordt met slechts een punt extra of met een punt dat slechts iets verschoven wordt, dan blijkt de nieuwe  $\tau_{\text{auz}}$

ten opzichte van de oude een relatief veel afwijkende waarde te krijgen. De nieuwe fitting sluit op het gezicht nog steeds even goed als de oude aan bij het gemeten snelheidsprofiel.

In bijlage 31 is een deel van beide fittingen vergroot weergegeven. Het geconstateerde verschil in  $\tau_{\text{auz}}$  blijkt nu veroorzaakt te worden door een plaatselijk afwijkende waarde van  $dV/dz$ . De beide fittingen sluiten even goed aan bij de meetpunten, maar de minimale slingeringen geven aanleiding tot verschillen in  $dV/dz$ . Deze verschillen werken kwadratisch door in  $\tau_{\text{auz}}$ .

Helaas geeft deze methode geen eenduidige resultaten bij een wijziging in de invoergegevens die op zichzelf van ondergeschikt belang is.

Ook nu heeft het gebruik van een andere definitie voor de mengweglengte geen verbetering tot gevolg.

#### 12.3.5 De handmethode

Omdat bij de vijfde-graads curvefitting het probleem gelegen is in de slingeringen van de fitting tussen de opgegeven punten en daarmee in  $dV/dz$ , is nu met de hand een snelheidsprofiel door de meetpunten geschetst ("dikkepotlood-methode"). Met de hand is ook  $dV/dz$  bepaald. Hierdoor is het verloop van  $dV/dz$  meer eenduidig geworden. In bijlage 32 is deze methode toegepast op grafieknummer 11. Aangenomen is weer, dat de hoogte van de bodem ter plaatse overeenkomt met de hoogte waarop  $z$  gelijk aan nul is. Met deze methode is  $\tau_{\text{auz}}$  volgens formule (13) goed te benaderen. De nadelen van de vorige methoden zijn hier niet aanwezig. Wanneer echter  $\tau_{\text{aub}}$  volgens formule (14) berekend wordt voor diverse waarden van  $z$ , dan blijkt dat voor  $\tau_{\text{aub}}$  geen eenduidige waarde gevonden kan worden. Zie bijlage 32.

Het heeft geen zin een andere bestaande formule voor de mengweglengte te gebruiken.

In de volgende paragraaf zal daarom geprobeerd worden een



eigen uitdrukking voor de mengweglengte  $l$  te vinden.

#### 12.3.5.1 De mengweglengte

Er wordt van uitgegaan, dat de schuifspanning lineair over de hoogte verloopt. Aan de bodem geldt:  $\tau_{uz} = \tau_{aub}$ . Aan de oppervlakte geldt  $\tau_{uz} = 0$ . Dus:

$$\tau_{uz} = (1 - z/h) * \tau_{aub} \quad (30)$$

Ook wordt gesteld dat:

$$\tau_{uz} = \rho * (l)^2 * (dV/dz)^2 \quad (31)$$

Bekeken wordt nu welke formulering voor de mengweglengte  $l$  nodig is om uitgaande van het gemeten snelheidsprofiel tot het driehoekige schuifspanningsverloop te komen.

Uit (31) volgt:

$$(l)^2 = \tau_{uz} / (\rho * (dV/dz)^2) \quad (32)$$

met (30):

$$(l)^2 = (1 - z/h) * \tau_{aub} / (\rho * (dV/dz)^2) \quad (33)$$

zodat:

$$l/\sqrt{\tau_{aub}} = \sqrt{(1 - z/h) / (\rho * (dV/dz)^2)} \quad (34)$$

Hierin is  $\tau_{aub}$  in het linkerlid opgenomen, omdat dan in het rechterlid alleen variabelen staan waarvan de waarden uit het snelheidsprofiel kunnen worden bepaald.  $\tau_{aub}$  die constant is voor een bepaald snelheidsprofiel, kan zodoende nog onbekend gelaten worden.

Als voorbeeld is weer grafieknummer 11 op deze manier bewerkt. Het resultaat hiervan is in bijlage 32 te vinden. Het verloop van de waarden van  $l/\sqrt{\tau_{aub}}$  blijkt voor de verschillende profielen niet overeen te stemmen. Er is geen verband op te stellen, dat het verloop van  $l/\sqrt{\tau_{aub}}$  voor de verschillende situaties goed weergeeft.

De conclusie hieruit moet dan ook zijn dat deze beschouwing geen bruikbaar resultaat oplevert.

#### 12.4 Conclusie ten aanzien van de bodemschuifspanning

In de vorige paragrafen is gebleken, dat het niet mogelijk is op een enigszins betrouwbare wijze de bodemschuifspan-

ning uit het gemeten snelheidsprofiel te bepalen.

Het toch gebruiken van de aldus berekende waarden geeft onoverkomelijke problemen, omdat een kleine variatie in de bodemschuifspanning een grote variatie in het sedimenttransport tot gevolg heeft.

In paragraaf 9.2 is reeds aangegeven, dat ook het bepalen van  $a$  en dus  $q_0$  moeilijkheden met zich meebrengt.

Een en ander leidt ertoe, dat de in paragraaf 5.6 voorgestelde methode wordt verlaten, zodat een andere manier gezocht moet worden om het sedimenttransport te bepalen.



13. HET BEREKENEN VAN DE GATDIEPTE KSI MET BEHULP VAN  
EEN TRANSPORTFORMULE EN DE CONTINUITEIT VAN HET SEDIMENT

13.1 Inleiding

De ontgrondingskuil bevindt zich in evenwicht als het sedimenttransport in de ongestoorde situatie gelijk is aan dat onder de pijp.

Wanneer het mogelijk is zowel het transport in de ongestoorde toestand als onder de pijp met behulp van een transportformule te beschrijven, kan de gatdiepte uit de continuïteit van het sediment bepaald worden. Dit wordt in de navolgende paragrafen uitgewerkt.

Om te kunnen beslissen welke transportformule geschikt is om het transport in de ongestoorde toestand te beschrijven moet een aantal parameters bekend zijn.

13.2 Experimentele bepaling van het sedimenttransport

Om de toepasbaarheid van een bepaalde formule te kunnen toetsen moeten de werkelijk optredende transporten bekend zijn.

Bij de watersnelheden waarmee gestroomd is treedt uitsluitend bodemtransport op. Dit transport vindt alleen plaats, doordat de ribbels zich voortplanten.

In dit geval kan het transport geschreven worden als:

$$s = \alpha * c * H_{rib} \quad (35)$$

Met  $s$  = sedimenttransport per eenheid van breedte  
( $m^2/s$ )

$\alpha$  = een constante afhankelijk van de beddingvorm  
(-)

$c$  = gemiddelde voortplantingssnelheid van de  
ribbels (m/s)

$H_{rib}$  = gemiddelde top-dalhoogte van de ribbels (m)

Als de dwarsdoorsnede van de ribbels wordt geschematiseerd tot een driehoek geldt:  $\alpha = 0,5$ . Volgens lit.27 geldt in werkelijkheid dat  $\alpha$  ongeveer gelijk aan 0,6 is.

Met behulp van een PROVO is een registratie van het bodemprofiel te maken.

Door twee registraties, die een bepaalde tijd na elkaar gemaakt zijn, te vergelijken is de gemiddelde voortplantingsnelheid van de ribbels te bepalen. De tijdsduur tussen de twee opnamen moet zodanig zijn, dat de ribbels zich niet meer dan een ribbellengte hebben vërplaatst. Anders zijn de overeenkomstige ribbels in de twee registraties niet meer van elkaar te onderscheiden. De voortplantingssnelheid (c) is nu: gemiddelde ribbelverplaatsing gedeeld door de tijdsduur tussen de twee registraties. Uit een registratie is ook de gemiddelde top-dalhoogte van de ribbels (Hrib) te bepalen.

De gemeten transporten (sm) zijn op deze wijze bepaald en samengevat in tabel 5.

Tabel 5:

Serie	Vg (m/s)	c (m/uur)	Hrib (m)	sm (m <sup>2</sup> /s)
1,2	0,25	0,018	0,022	6,9E-8
4,5	0,20	0,008	0,012	1,6E-8
6	0,17	0,005	0,004	3,3E-9

### 13.3 Invoerparameters voor de transportformules

In de meeste transportformules moet een aantal stromingsgegevens worden ingevoerd, die in dit geval niet zonder meer bekend zijn. Deze moeten dus nog berekend worden.

Bij laboratoriumonderzoek in smalle goten met een alluviale bodem en glazen wanden mag de invloed van de wandruwheid niet verwaarloosd worden. Men kan dan gebruik maken van de hypothese van Einstein. Zie figuur 13.

In lit.36 is geconcludeerd, dat met het oog op de nauwkeurigheid van de resultaten en de uitvoerbaarheid van de berekening deze hypothese voorlopig de meest bruikbare is.

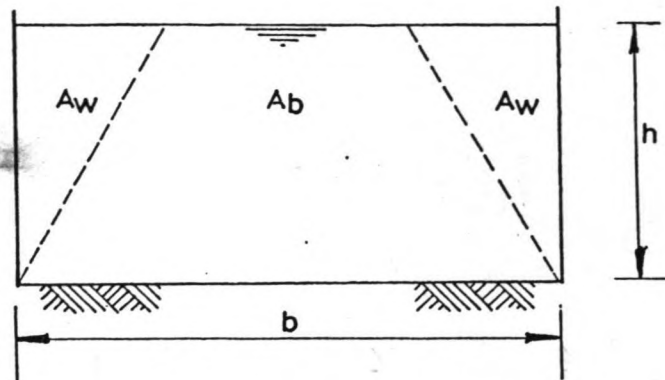


fig. 13. Indeling dwarsprofiel van de goot volgens de hypothese van Einstein

De bodemruwheid  $C_b$  is onder te verdelen in een vormruwheid  $C_b''$  en een korrelruwheid  $C_b'$ .

Volgens lit.38 geldt voor de vormruwheid:

$$C_b'' = \sqrt{8 \cdot g} * (3,5 * \log(R_b / (e * H_{rib})) - 2,3) \quad (\sqrt{m} / s) \quad (36)$$

met  $C_b''$  = vormruwheid ( $\sqrt{m} / s$ )

$R_b$  = hydraulische straal betrokken op de bodem (m)

$e$  =  $A_s / A$  (-)

$A_s$  = gemiddelde oppervlakte van de horizontale projectie van de lijzijde van de ribbels (te bepalen uit een PROVO-registratie) (m<sup>2</sup>)

$A$  = gemiddelde oppervlakte van de horizontale projectie van de gehele ribbels (te bepalen uit een PROVO-registratie) (m<sup>2</sup>)

$H_{rib}$  = gemiddelde top-dalhoogte van de ribbels (m)

Juist deze formule is gekozen, omdat hij gebaseerd is op een groot aantal metingen in soortgelijke goten als de Leidse goot.

Voor de korrelruwheid geldt:

$$C_b' = 18 * \log(12 * R_b / D_{90}) \quad (\sqrt{m} / s) \quad (37)$$

met  $D_{90}$  = de grootte van de gaten van de zeef waar 90 gewichtsprocent van het mengsel doorheen gaat (m)

voor de totale ruwheid geldt nu:

$$\left(\frac{1}{C_b}\right)^2 = \left(\frac{1}{C_{b'}}\right)^2 + \left(\frac{1}{C_{b''}}\right)^2 \quad (38)$$

De hydraulische straal met betrekking tot de wand:

$$R_w = A_w / h \quad (m) \quad (39)$$

De hydraulische straal met betrekking tot de bodem:

$$R_b = A_b / b \quad (m) \quad (40)$$

met  $A_w$  en  $A_b$  gedefinieerd als in figuur 13.

Einstein veronderstelt, dat in  $A_w$  en  $A_b$  de gemiddelde snelheid en het verhang gelijk zijn:

$$V_g = C_b * \sqrt{R_b * i} = C_w * \sqrt{R_w * i} \quad (41) (42)$$

Voor het totale doorstromingsprofiel geldt:

$$b * h = 2 * A_w + A_b. \quad (43)$$

De Chezy-coëfficiënt voor de wand is:

$$C_w = 18 * \log(12 * R_w / (k_w + \Delta w / 3, 2)) \quad (\sqrt{m} / s) \quad (44)$$

met  $k_w$  = Nikuradse ruwheid van de wand (m)

$$\Delta w = 11,6 * \nu / \sqrt{g * R_w * i} \quad (45)$$

= dikte viskeuze sublaag aan de wand (m)

met  $\nu$  = kinematische viscositeit (m<sup>2</sup>/s)

De Chezy-coëfficiënt voor de bodem is:

$$C_b = 18 * \log(12 * R_b / (k_b + \Delta b / 3, 2)) \quad (\sqrt{m} / s) \quad (46)$$

met  $k_b$  = Nikuradse ruwheid van de bodem (m)

$$\Delta b = 11,6 * \nu / \sqrt{g * R_b * i} \quad (47)$$

= dikte viskeuze sublaag aan de bodem (m)

Dit zijn 12 vergelijkingen met 12 onbekenden. Deze zijn:

$A_b$ ,  $A_w$ ,  $C_b$ ,  $C_{b'}$ ,  $C_{b''}$ ,  $C_w$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta w$ ,  $i$ ,  $k_b$ ,  $R_b$  en  $R_w$ .

Bekend moeten zijn:  $V_g$ ,  $b$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $H_{rib}$ ,  $D_{90}$ ,  $k_w$  en  $\nu$ .

(39) en (40) in (43) geeft:

$$R_w = (b * h - b * R_b) / (2 * h) \quad (48)$$

(42) geeft:

$$(C_b)^2 * R_b = (C_w)^2 * R_w \quad (49)$$

(44) en (46) in (49) geeft:

$$R_w * \left(\log \frac{12 * R_w}{k_w + \Delta w / 3, 2}\right)^2 - R_b * \left(\log \frac{12 * R_b}{k_b + \Delta b / 3, 2}\right)^2 = 0 \quad (50)$$

(48) in (50) geeft:

$$\frac{b \cdot h - b \cdot R_b}{2 \cdot h} \cdot \left( \log \frac{12 \cdot (b \cdot h - b \cdot R_b) / (2 \cdot h)}{k_w + \Delta t_{aw} / 3, 2} \right)^2 - R_b \cdot \left( \log \frac{12 \cdot R_b}{k_b + \Delta t_{ab} / 3, 2} \right)^2 = 0 \quad (51)$$

(48) in (45) geeft:

$$\Delta t_{aw} = 11,6 \cdot \nu / g \cdot (b \cdot h - b \cdot R_b) \cdot i / (2 \cdot h) \quad (52)$$

Om de onbekenden te berekenen moet een iteratieproces worden uitgevoerd met behulp van de vergelijkingen: (36), (37), (38), (41), (46), (47), (51) en (52).

De werkwijze is hierbij als volgt:

1. Schat  $k_b$ ,  $i$  en  $R_b$ .
2. Substitueer  $R_b$  en  $i$  in (47) en (52).
3. Substitueer (47) en (52) in (51).
4. Bereken een nieuwe schatting voor  $R_b$  via iteratie uit (51).
5. Substitueer  $R_b$  in (36) en bereken  $C_b''$ .
6. Substitueer  $R_b$  in (37) en bereken  $C_b'$ .
7. Bereken  $C_b$  uit  $C_b'$ ,  $C_b''$  en (38).
8. Bereken de nieuwe schatting voor  $k_b$  uit  $R_b$ ,  $\Delta t_{ab}$  en (46).
9. Bereken de nieuwe schatting voor  $i$  uit  $V_g$ ,  $C_b$ ,  $R_b$  en (41).
10. Herhaal de stappen 1 t/m 9 voor de nieuwe schattingen van  $R_b$ ,  $k_b$  en  $i$  zolang de nieuwe schattingen teveel afwijken van de oude.

Deze procedure is toegepast op de ongestoorde situaties van de uitgevoerde proevenseries: Zie tabel 6.

Tabel 6:

Serie		1,2	4,5	6
Gegevens:				
Vg	(m/s)	0,25	0,20	0,17
b	(m)	0,506	0,506	0,506
h	(m)	0,311	0,315	0,311
D90	(m)	0,17E-3	0,17E-3	0,17E-3
e	(-)	0,18	0,14	0,08
Hrib	(m)	0,022	0,012	0,004
kw	(m)	4E-5	4E-5	4E-5
Berekend:				
Rb	(m)	0,2350	0,2114	0,1773
Cb"	( $\sqrt{m}$ /s)	34,01	44,73	64,69
Cb'	( $\sqrt{m}$ /s)	75,96	75,13	73,75
Cb	( $\sqrt{m}$ /s)	31,04	38,43	48,63
kb	(m)	5,30E-2	1,84E-2	3,90E-3
i	(-)	2,76E-4	1,28E-4	0,70E-4

Deze waarden zijn berekend met behulp van een rekenmachineprogramma, geschreven voor de TI-59 van Texas Instruments. Een listing van dit programma plus gebruiksaanwijzing is te vinden in bijlage 33.

Opgemerkt kan nog worden, dat voor serie 6 het verhang  $i$  in de goot gemeten is met behulp van een microvervalmeter. Het verhang blijkt  $0,71E-4$  te zijn, hetgeen goed overeen komt met de berekende waarde. Zie tabel 6. Omdat het verhang voor de andere series niet bekend is, is het nodig de bovenstaande berekening uit te voeren met gebruikmaking van de vergelijkingen (36) en (46).

#### 13.4 De transportformules

In lit.32 is een aantal van de belangrijkste bodemtransportformules opgenomen.



Bekeken is met behulp van welke van deze formules het transport in de ongestoorde toestand in de goot het beste is te voorspellen.

Hierbij is uitgegaan van de in tabel 6 vermelde gegevens. Voor de gedaante van deze formules wordt verwezen naar bovengenoemde literatuur. Voor de formule van Engelund-Hansen voor het transport van bodemmateriaal: zie lit.27. In tabel 7 zijn de met behulp van deze formules berekende transporten (sr) opgenomen.

Tabel 7:

formulenaam	Serie 1,2		Serie 4,5		Serie 6	
	sr	sr/sm	sr	sr/sm	sr	sr/sm
Schoklitsch	-		-		-	
Meyer-Peter	3,54E-7	5	-		-	
Casey	2,90E-6	42	9,43E-7	59	2,97E-7	88
Haywood	-		-		-	
Straub-Dubois	-		-		-	
Waterways Exp. Station	-		-		-	
Shields	1,27E-5	184	1,21E-6	76	-	
Meyer-Peter & Muller	-		-		-	
Elzermann- Frijlink	8,30E-8	1,2	1,35E-8	0,8	6,21E-9	1,9
Laursen	-		-		-	
Rottner	1,67E-6	24	6,03E-7	38	2,69E-7	82
Engelund- Hansen	2,16E-6	31	3,79E-7	24	8,11E-8	25

. Indien in bovenstaande tabel voor sr een streepje is ingevuld, is met die formule in het betreffende geval geen transport te berekenen. Dit komt omdat de formule dichtbij het begin van beweging slecht voldoet, zodat hier een negatief transport berekend wordt.

Ook in de gevallen waarin wel een positief transport

verkregen is moet men bedenken, dat de meeste formules in de buurt van begin van beweging geen al te betrouwbare resultaten opleveren. Dit kan de grote afwijkingen tussen de berekende en gemeten transporten verklaren. Zie tabel 7.

- . In de formule van Elzermann-Frijlink wordt gewerkt met de waterdiepte  $h$ . Eigenlijk zou hiervoor  $R_b$  moeten worden ingevuld vanwege het stromen in een smalle goot. Het blijkt echter, dat toepassing van  $h$  in plaats van  $R_b$  in de formule veel betere resultaten geeft. De in tabel 7 vermelde waarden voor de formule van Elzermann-Frijlink zijn dan ook berekend met  $h$ . Het invullen van  $h$  voor  $R_b$  in de overige formules heeft geen verbetering tot gevolg.

De hier gevolgde gedachtengang is analoog aan die welke gevolgd wordt bij het gebruikelijke aanpassen van de ribbelfactor  $\mu$  teneinde de onzekerheden in de formule te compenseren.

Uit tabel 7 blijkt, dat de resultaten van de bodemtransportformule van Elzermann-Frijlink goed overeenkomen met de gemeten transporten. Bezwaar van deze formule is, dat hij op slechts een relatief klein aantal metingen berust.

Daarom is ook getracht de transportformule van Englund-Hansen toe te passen. Deze is namelijk gebaseerd op een groot aantal metingen en heeft een uitgebreid geldigheidsgebied. Het blijkt echter, dat de formule in de beschouwde situaties slecht voldoet.

De formule van Elzermann-Frijlink luidt als volgt:

$$sr / (D50 \sqrt{\mu * g * h * i}) = 5 * \exp((-0.27 * \delta * D50) / (\mu * h * i)) \quad (53)$$

Hierin is:

- $sr$  = berekend sedimenttransport per eenheid van breedte (m<sup>2</sup>/s)
- $\delta$  = de relatieve dichtheid van het sedimentmateriaal (-)
- $\mu$  =  $(C_b / C_b')^2$  = ribbelfactor (-)

De resultaten van de gehele transportberekening zijn aange-

geven in tabel 8.

Tabel 8:

Serie		1,2	4,5	6
Vg	(m/s)	0,25	0,20	0,17
D50	(m)	0,15E-3	0,15E-3	0,15E-3
Cb	( $\sqrt{m}$ /s)	31,04	38,43	48,63
Cb'	( $\sqrt{m}$ /s)	75,96	75,13	73,75
$\mu = (C_b/C_b')^2$	(-)	0,167	0,262	0,435
h	(m)	0,311	0,315	0,311
i	(-)	2,76E-4	1,28E-4	0,70E-4
delta	(-)	1,65	1,65	1,65
sr	(m <sup>2</sup> /s)	8,30E-8	1,35E-8	6,21E-9

In de formule van Elzermann-Frijlink wordt -zoals overigens ook in vele andere formules- gebruik gemaakt van de stroomparameter:  $\text{delta} \cdot D50 / (\mu \cdot h \cdot i)$ .

Omdat in het vervolg alleen gebruik gemaakt wordt van de stroomparameter is de bruikbaarheid van de hierna volgende theorie niet alleen beperkt tot die situaties waarin de formule van Elzermann-Frijlink goed voldoet.

### 13.5 De continuïteit van het sediment

In de evenwichtssituatie volgt uit de continuïteit van het sediment dat de sedimenttransporten in de ongestoorde toestand en onder de pijp aan elkaar gelijk zijn.

Aangenomen wordt, dat in de ongestoorde toestand het sedimenttransport bepaald wordt door de stroomparameter  $\text{delta} \cdot D50 / (\mu \cdot h \cdot i)$ .

Onder de pijp wordt aangenomen, dat het sedimenttransport bepaald wordt door de stroomparameter:  $\text{delta} \cdot D50 / (\mu \cdot R_b \cdot i)$ .

Dit ondanks het niet uniform zijn van de stroming daar.

Uit het voorgaande volgt, dat de stroomparameters in de ongestoorde toestand en onder de pijp aan elkaar gelijk ge-

steld kunnen worden.

13.6 De berekening van de gatdiepte ksi met behulp van Vong

Het gat onder de pijp is verdeeld in een deel waarin de invloed van de pijp overheerst, en een deel waarin de invloed van de bodem overheerst.

Analoog aan de gevolgde werkwijze in het ongestoorde gebied is ook onder de pijp de hypothese van Einstein toegepast. De situatie wordt hierbij geschematiseerd tot het geval van een stroming tussen twee vlakke platen.

Zie figuur 14.

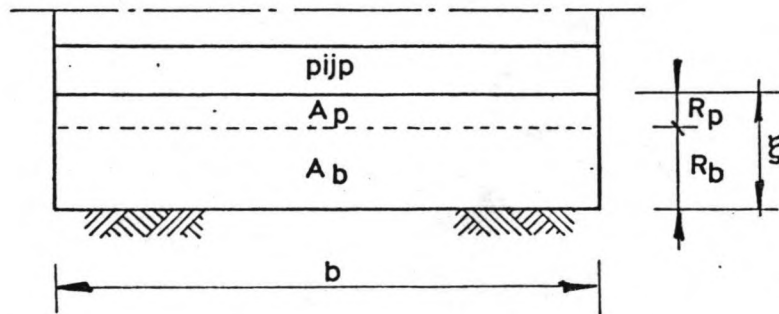


fig. 14. Indeling dwarsprofiel onder de pijp volgens de hypothese van Einstein

De breedte van de goot is vele malen groter dan ksi, zodat de invloed van de wandwrijving verwaarloosd mag worden. Dit wordt ook bevestigd door de visuele waarnemingen in de goot gedaan bij de injectie van kaliumpermanganaat. De geringe invloed van de wand blijkt ook uit het feit, dat ksi over de breedte van de goot nagenoeg constant is.

De hydraulische straal met betrekking tot de pijp:

$$R_p = A_p / b \quad (m) \quad (54)$$

De hydraulische straal met betrekking tot de bodem:

$$R_b = A_b / b \quad (m) \quad (55)$$

Voor de twee oppervlakken geldt:

$$Vong = C_b * \sqrt{R_b * i} = C_p * \sqrt{R_p * i} \quad (56) \quad (57)$$

Voor het totale doorstromingsprofiel geldt:

$$b * ksi = A_p + A_b \quad (58)$$

De Chezy-coëfficiënt voor de pijp is:

$$C_p = 18 * \log(12 * R_p / (k_p + \delta_{tap} / 3, 2)) \quad (\sqrt{m} / s) \quad (59)$$

met  $k_p$  = Nikuradse ruwheid van de pijp (m)

$$\delta_{tap} = 11,6 * \nu / \sqrt{g * R_p * i} \quad (60)$$

= dikte van de viskeuze sublaag aan de pijp (m)

De Chezy-coëfficiënt voor de bodem is:

$$C_b = 18 * \log(12 * R_b / (k_b + \delta_{tab} / 3, 2)) \quad (\sqrt{m} / s) \quad (61)$$

met  $\delta_{tab} = 11,6 * \nu / \sqrt{g * R_b * i}$  (62)

Op analoge wijze als in paragraaf 3 van dit hoofdstuk kan uit de voorgaande vergelijkingen worden afgeleid:

$$(ksi - R_b) * \left( \log \frac{12 * (ksi - R_b)}{k_p + \delta_{tap} / 3, 2} \right)^2 - R_b * \left( \log \frac{12 * R_b}{k_b + \delta_{tab} / 3, 2} \right)^2 = 0 \quad (63)$$

Een extra vergelijking wordt geleverd door de stroomparameter in de ongestoorde toestand en die onder de pijp aan elkaar gelijk te stellen.

Over de hele goot zijn  $\delta$  en  $D_{50}$  constant. Als er van uitgegaan wordt, dat er zich onder de pijp geen ribbels bevinden (bij  $d > \text{circa } -3 \text{ cm}$ ), dan is  $\mu$  daar de eenheid.

De extra vergelijking wordt nu:

$$(\mu * h * i)_{ongestoord} = (R_b * i)_{pijp} \quad \text{stel} = C_0 \quad (m) \quad (64)$$

De waarde van  $C_0$  is te berekenen uit de parameters in de ongestoorde toestand. Deze parameters zijn vermeld in tabel 8. De berekende waarden van  $C_0$  zijn opgenomen in tabel 9.

Tabel 9:

Vg (m/s)	0,25	0,20	0,17
C0 (m)	1,43E-5	1,06E-5	9,47E-6



Uit de vergelijkingen (56), (61), (62) en (64) volgt:

$$C_0 = \frac{(Vong)^2}{(18)^2 \left( \log \frac{12 \cdot R_b}{k_b + \frac{11,6 \cdot \nu}{3,2 \cdot \sqrt{g \cdot C_0}}} \right)^2} \quad (65)$$

In formule (65) wordt Vong gebruikt. Deze is verkregen uit de experimenten. De in deze paragraaf volgende berekening kan dan ook niet dienen als een voorspelling van ksi. Wel kan hiermee geverifieerd worden of de hier behandelde theorie voldoet en of Vong de juiste parameter is om het transport weer te geven.

Uit vergelijking (63) met daarin (62) en (60) volgt:

$$\begin{aligned} & (ksi - R_b) \cdot \left( \log \frac{12 \cdot (ksi - R_b)}{k_p + \frac{11,6 \cdot \nu}{3,2 \cdot \sqrt{g \cdot (ksi - R_b) \cdot C_0 / R_b}}} \right)^2 + \\ & - R_b \cdot \left( \log \frac{12 \cdot R_b}{k_b + \frac{11,6 \cdot \nu}{3,2 \cdot \sqrt{g \cdot C_0}}} \right)^2 = 0 \quad (66) \end{aligned}$$

De twee vergelijkingen (65) en (66) met de twee onbekenden  $R_b$  en  $ksi$  zijn nu overgebleven.

Wanneer op deze wijze  $ksi$  berekend wordt ( $ksir$ ), blijkt deze in het geheel niet overeen te komen met de gemeten waarde van  $ksi$  ( $ksim$ ).

Ter illustratie zijn in tabel 10 enkele van deze waarden met elkaar vergeleken.



Tabel 10:

Serie	1	2	4	5	6	6
Vg (m/s)	0,25	0,25	0,20	0,20	0,17	0,17
grafieknr	4	13	33	46	68	72
d (m)	+0,0085	+0,0085	+0,0010	-0,0105	-0,0100	+0,0100
C0 (m)	1,43E-5	1,43E-5	1,06E-5	1,06E-5	9,47E-6	9,47E-6
Vong (m/s)	0,1805	0,1869	0,1591	0,1722	0,1811	0,1435
kp (m)	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5	4E-5
kb=D90 (m)	0,17E-3	0,17E-3	0,17E-3	0,17E-3	0,17E-3	0,17E-3
ksim (m)	0,0205	0,0230	0,0220	0,0255	0,0160	0,0070
ksir (m)	0,0344	0,0427	0,0441	0,0739	0,1650	0,0344
rel. afw in ksi (%)	+68	+86	+100	+190	+931	+392

Bekeken wordt nu welke variabelen de oorzaak kunnen zijn van de grote verschillen tussen de gemeten en de berekende ksi.

- De waarde van C0 geeft het transport in ongestoorde toestand goed weer.
- De waarde van kp voor glas is redelijk goed bekend en heeft bovendien weinig invloed op de berekende ksi.
- Voor kb kan alleen de D90 van het zand genomen worden.
- De enige parameter die de verschillen kan veroorzaken moet dus Vong zijn.

Een verklaring hiervoor kan de volgende zijn.

Als het gat kleiner wordt, verandert de vorm van het snelheidsprofiel. Het onderste deel van het snelheidsprofiel is bepalend voor het zandtransport. De verandering van de vorm van het onderste deel van het snelheidsprofiel wordt niet goed weergegeven door de verandering van Vong. Men moet ook bedenken, dat het hier geen aangepast snelheidsprofiel betreft. Dit wordt bij het gebruik van transportformules wel verondersteld.

In de volgende paragraaf zal aan de hand van de gemeten ksi die snelheid Vr berekend worden, die ingevoerd in de vergelijkingen (65) en (66) de gemeten ksi zou opleveren.

### 13.7 Berekening van Vr

Om aan de hand van de gemeten  $k_{si}$  de in de vorige paragraaf genoemde snelheid  $V_r$  te bepalen wordt als volgt te werk gegaan.

Voor een bepaalde  $V_g$  (dat wil zeggen een bepaalde  $C_0$ ) kan na substitutie van  $k_{si}$  in vergelijking (66)  $R_b$  opgelost worden. Vervolgens wordt met behulp van vergelijking (65)  $V_r$  bepaald. De resultaten van deze berekening zijn opgenomen in bijlage 34.

Naast de ingestelde  $d$  en de opgemeten  $k_{si}$  zijn opgenomen:

- De berekende  $R_b$ .
- De in de vorige paragraaf voor de berekening van  $k_{si}$  gebruikte  $V_{ng}$ .
- De berekende  $V_r$ .

Vergelijking van de waarden van  $V_r$  en  $V_{ng}$  maakt de onderlinge grote verschillen duidelijk.

- De met behulp van  $V_{ng}$  dimensieloos gemaakte  $V_r$ .

Hier is gebruik gemaakt van  $V_{ng}$  in plaats van  $V_g$ , omdat alle metingen betrekking hebben op wat zich in het hart van de goot afspeelt.

- De met behulp van  $g$  en  $V_{ng}$  dimensieloos gemaakte  $d$ .

Dit is gedaan om de volgende reden. Bij een vaste  $V_{ng}$  is  $k_{si}$  afhankelijk van  $d$ . Naar de aard van deze afhankelijkheid wordt gezocht. Als in het bovenstaande aangegeven loopt het verband tussen  $d$  en  $k_{si}$  via  $V_r$ . Er bestaat door middel van de vergelijkingen (65) en (66) een direct verband tussen  $k_{si}$  en  $V_r$ . Het lijkt dus zinvol om de dimensieloos gemaakte  $d$  en  $V_r$  tegen elkaar uit te zetten.

Dit is gedaan in de grafiek van bijlage 35.

Hierin is ook het verband tussen de dimensieloos gemaakte  $k_{si}$  en  $V_r$  aangegeven.

Uit de grafiek blijkt, dat er voor een vaste  $V_{ng}$  (vaste  $V_g$ ) een verband bestaat tussen  $d$  en  $V_r$ . Voor twee snelheden  $V_{ng}$  ( $V_g$ ): serie 6: 0,187 m/s (0,17 m/s) en serie 5: 0,212 m/s (0,20 m/s) liggen de snelheden die bovenstaand verband voor

de dimensieloos gemaakte  $d$  en  $V_r$  weergeven, dicht bij elkaar.

Daarnaast zijn nog enkele metingen beschikbaar uit de series 1, 2 en 4 met  $V_{ng}$  ( $V_g$ ) respectievelijk 0,270, 0,270 en 0,226 m/s (respectievelijk 0,25, 0,25 en 0,20 m/s). Ook die punten blijken in hetzelfde gebied te liggen. Het lijkt dus mogelijk voor meerdere snelheden  $V_{ng}$  een verband tussen de dimensieloze  $d$  en de dimensieloze  $V_r$  te bepalen. Onderzocht zal moeten worden of een dergelijk verband ook in een andere testopstelling wordt verkregen. Men zou kunnen vermoeden, dat het dicht bij elkaar liggen van de lijnen 2 en 3 in bijlage 35 wordt veroorzaakt door het optreden van een schijnrelatie. In de berekening van  $V_r$  wordt echter  $d$  niet betrokken, maar in bijlage 35 is wel de dimensieloze  $V_r$  tegen de dimensieloze  $d$  uitgezet. Bovendien heeft het verband tussen de dimensieloze  $d$  en de dimensieloze  $V_{ng}$  een overeenkomstige vorm als het verband tussen de dimensieloze  $d$  en de dimensieloze  $V_r$ . Zie bijlage 36.

### 13.8 Voorstel voor de berekening van de gatdiepte $k_{si}$ in de gebruikte laboratoriumopstelling

Wanneer we aannemen dat ook voor andere dan de gemeten snelheden  $V_{ng}$  dit verband (aangegeven door lijn 1 in de grafiek in bijlage 35) geldt, dan is het mogelijk ook voor die snelheden de  $k_{si}$  als functie van  $d$  te berekenen. Uitgaande van  $d$  is met behulp van de grafiek  $V_r$  te bepalen. Met behulp van vergelijking (65) en  $V_r$  is dan  $R_b$  te berekenen. Uit vergelijking (66) en  $R_b$  volgt nu  $k_{si}$ . Ook voor deze berekening is een rekenmachineprogramma geschreven voor de TI-59. Het verband tussen de dimensieloze  $d$  en de dimensieloze  $V_r$  is hierin weergegeven door een curvefitting met een vijfde-graads kromme. In bijlage 37 is de listing en de gebruiksaanwijzing van dit programma te vinden.

De toepassing van de methode is beperkt tot alleen de variatie in  $d$  en  $V_{ng}$  ( $V_g$ ). Als ook andere parameters gevarieerd

moeten worden, dient te worden onderzocht of de grafiek in bijlage 35 nog geldt.

### 13.9 Vergelijking van de gemeten en de berekende gatdiepte ksi

In deze paragraaf wordt geprobeerd een indicatie te krijgen van de nauwkeurigheid van de ksi die berekend kan worden met de in de vorige paragraaf aangegeven berekeningswijze.

Om ksi te berekenen bij de snelheden  $V_{ng} = 0,187$  m/s ( $V_g = 0,17$  m/s) en  $V_{ng} = 0,270$  m/s ( $V_g = 0,25$  m/s) wordt het verband tussen de dimensieloze  $d$  en de dimensieloze  $V_r$  gebruikt, dat is opgesteld voor  $V_{ng} = 0,212$  m/s ( $V_g = 0,20$  m/s). Zie lijn 2 in de grafiek op bijlage 35. De uitkomsten van deze berekeningen, uitgevoerd voor de ingestelde waarden van  $d$ , zijn bijeengebracht in bijlage 38.

Om ksi te berekenen bij de snelheden  $V_{ng} = 0,270$  m/s ( $V_g = 0,25$  m/s) en  $V_{ng} = 0,212$  m/s ( $V_g = 0,20$  m/s) wordt het verband tussen de dimensieloze  $d$  en de dimensieloze  $V_r$  gebruikt, dat is opgesteld voor  $V_{ng} = 0,187$  m/s ( $V_g = 0,17$  m/s). Zie lijn 3 in de grafiek op bijlage 35. De uitkomsten van deze berekeningen, uitgevoerd voor de ingestelde waarden van  $d$ , zijn bijeengebracht in bijlage 39.

Bij de tabellen van de bijlagen 38 en 39 moet nog het volgende worden opgemerkt:

- De berekening is uitgevoerd voor alle gemeten situaties.
- In de eerste plaats is in de berekening de aanname gedaan dat er geen ribbels voorkomen onder de pijp. Hieraan wordt bij een grotere afstand tussen de pijp en de ongestoorde bodem niet meer voldaan. Dit heeft tot gevolg dat de berekende waarde van  $d + ksi$  afwijkt van de waarde van  $d + ksi$  die zou volgen uit een berekening waarin wel rekening wordt gehouden met ribbels onder de pijp.



Ten tweede is de gemeten waarde van  $d + k_{si}$  bij een grotere afstand tussen de pijp en de bodem zo klein ten opzichte van de ribbelhoogte dat deze waarde in het model met de tijd varieert met het voorbij lopen van de ribbels. Dit heeft tot gevolg dat het geen zin heeft de aanwezigheid van ribbels in de berekening te betrekken.

- In de tabel van bijlage 39 zijn de laatste 3 situaties niet te berekenen, omdat in het gebied waarin geldt  $(g \cdot d) / (V_{ng})^2 > 3,8$  voor  $V_{ng} = 0,187$  m/s geen gegevens voorhanden zijn.

In bijlage 40 zijn nog de resultaten uit de bijlagen 38 en 39 grafisch weergegeven.

### 13.10 Conclusies ten aanzien van de berekening van de gatdiepte $k_{si}$

Het volgende kan opgemerkt worden.

- Bij een hoge pijpopstelling is de invloed van de wandwrijving onder de pijp relatief groot. De verwaarlozing van deze invloed is in dat geval dus in mindere mate toelaatbaar.
- Uit de bijlagen 38 en 39 blijkt dat in het toepassingsgebied (niet al te hoge pijpopstellingen) de afwijkingen tussen de gemeten en de berekende waarden van  $d + k_{si}$  alleszins acceptabel zijn (zie de laatste kolom met de relatieve afwijking in procenten). Hierbij moet men zich realiseren, dat  $k_{si}$  in de evenwichtstoestand om een bepaalde eindwaarde schommelt (zie ook bijvoorbeeld bijlage 22).
- Het is te verwachten dat wanneer er meer invoergegevens beschikbaar zijn, lijn 1 uit bijlage 35 nauwkeuriger bepaald kan worden.
- In de voorgaande paragrafen is  $V_r$  bepaald aan de hand van de uitgevoerde experimenten. Het zou wenselijk zijn  $V_r$  theoretisch te kunnen berekenen. De mogelijkheden hiertoe zullen nader onderzocht

moeten worden. Op het moment lijken de stroming rond de pijp en de wijze van het sedimenttransport in de ontgrondingskuil te ingewikkeld om een voorspelling te geven van de ontgroning gebaseerd op een zuiver theoretische beschouwing.



#### 14. AANBEVELINGEN

Hieronder is puntsgewijs een aantal aanbevelingen opgenomen die bij volgende onderzoeken van belang zouden kunnen zijn. Bij iedere aanbeveling is een korte motivering gegeven.

\* Bredere goot:

- Minder wandinvloed.
- Misschien een beter logaritmisch snelheidsprofiel in de ongestoorde toestand.

\* Langere goot:

- Vooral bij hogere snelheden een grotere aanpassingslengte beschikbaar.
- Misschien een beter logaritmisch snelheidsprofiel in de ongestoorde toestand.

\* Instromingsconstructie direct voor het begin van de zandbodem:

- Een zodanige constructie plaatsen, dat het snelheidsprofiel zo ver mogelijk bovenstrooms zo goed mogelijk logaritmisch is.

\* Meer experimenten:

- Ten einde de invloed van de in dit onderzoek niet gevarieerde parameters te kunnen vaststellen, bijvoorbeeld  $D$ ,  $D50$ .
- Met meer gegevens kan de ligging van het scheidingsvlak beter bepaald worden.
- Om de gegeven theorie uit hoofdstuk 13 aan meer gegevens te kunnen toetsen en een beter inzicht te krijgen in  $V_r$ .

\* Met behulp van cement vastleggen van de bodem bij een pijphoogte  $d_1$  en daarna metingen doen bij een pijphoogte  $d_2$  ( $d_2 > d_1$ ):

- Simulatie van de situatie waarbij het gat nog niet in evenwicht is. Hierdoor kan een inzicht verkregen worden in de situatie dat de transportcapaciteit onder de pijp groter is dan het aanwezige sedimenttransport. Dit is de oorzaak van het dieper worden van de

ontgrondingskuil.

- \* Als vorige aanbeveling, maar nu met Vg1 in plaats van d1 en Vg2 in plaats van d2.
- \* Verrichten van twee-dimensionale laser snelheidsmetingen:
  - Ten einde uit de gemeten turbulenties in de twee richtingen de turbulente schuifspanningen te kunnen bepalen. Dit biedt de mogelijkheid de schuifspanningen in het water direct te meten, zodat de bodemschuifspanning misschien makkelijker bepaald kan worden. Onder de pijp zijn zulke metingen evenwel slecht uitvoerbaar, omdat de laserstralen meer ruimte nodig hebben om twee-dimensionaal te kunnen meten (drie stralen in plaats van twee).
- \* Metingen verrichten met de pijp niet loodrecht op de goot-as:
  - Deze situatie zal in de praktijk het meeste voorkomen. Het vermoeden bestaat, dat de ontgroning in dit geval groter is dan in het geval van loodrechte aanstroming.
- \* Proberen het stroombeeld rond de pijp met behulp van de vergelijking van Navier-Stokes te berekenen. In eerste instantie zou men zich daarbij kunnen beperken tot een situatie met een vaste bodem.
- \* Onderzoeken of de benodigde Vr theoretisch te voorspellen is.

## 15. HET COMPUTERPROGRAMMA

Een listing van het in de vorige hoofdstukken genoemde computerprogramma is gegeven in bijlage 41.

Voor de verwerking van de gemeten snelheidsprofielen wordt verwezen naar bijlage 6.

De door de computer getekende snelheidsprofielen zijn gegeven in bijlage 7.

Hieronder volgt de gebruiksaanwijzing van het programma. Tussen haakjes zijn de namen van de variabelen vermeld, zoals deze in het programma gebruikt worden.

Per serie moet worden ingevoerd:

- Het aantal snelheidsprofielen van de serie (PROF).
- Het aantal te berekenen stroomlijnen (N).
- Voor de schuifspanningsberekening (SCHSP):
  - 0 = geen berekening
  - 1 = wel berekening
- Voor het berekenen van stroomlijnen bij raaien / scheidingsvlak bij wegdrücken (SCH):
  - 0 = geen berekening
  - 1 = berekening van stroomlijnen
  - 2 = berekening van het scheidingsvlak
- Voor het tekenen van de snelheidsprofielen (TEK):
  - 0 = geen tekening
  - 1 = wel een tekening

Per snelheidsprofiel moet vervolgens worden ingevoerd:

- Grafieknummer (GRNR).
- Raainummer (RNR).
- Datum (DAT).
- Q-goot (QTOT). (m<sup>3</sup>/s)
- Breedte van de goot (B). (m)
- Afgelezen niveau van de waterspiegel (WS). (m)
- Afgelezen niveau van de ongestoorde bodem (BODO). (m)
- Afgelezen niveau van de gestoorde bodem (BODG). (m)
- Afgelezen niveau van de bovenkant van de buis (BKB). (m)

- Afgelezen niveau van de onderkant van de buis (OKB). (m)
- Nulcount voor het berekenen van de snelheid (NULST).
- Factor voor het berekenen van de snelheid (FACT).
- Getal (PULS): = 0, indien de count is afgelezen in millivolt  
= 1, indien de count is afgelezen in pulsen

Vanaf de waterspiegel naar beneden moet per meetpunt worden ingevoerd:

- Afgelezen niveau waarop de snelheid is gemeten (H). (m)
- De afgelezen waarde die voor de berekening van de snelheid gebruikt wordt (COUNT).  
Deze kan in mV zijn of in pulsen.  
In beide gevallen is het ook mogelijk direct de snelheid in m/s in te voeren.

Opmerkingen:

- Op het niveau van OKB, BKB en BODG moet voor de count altijd nul ingevoerd worden.
- Als voorbeeld is in bijlage 42 de invoer van serie 3 opgenomen.
- Als men snelheidsprofielen getekend wil hebben, moet men eerst de plotterhandleiding van het Rekencentrum raadplegen: publicatienummer RC-IVA-78002-0.  
De gebruikte plotprocedures zijn geheel conform deze publicatie.

S Y M B O L E N - L I J S T

a	afstand scheidingsvlak boven hart pijp	(m)
alfa = $\alpha$	constante afhankelijk van de beddingvorm	(-)
a1	coefficient	(1/s)
a2	coefficient	(m/s)
a3	coefficient	(-)
a4	coefficient	(m/s)
A	gemiddelde oppervlakte van de horizontale projectie van de gehele ribbels	(m <sup>2</sup> )
Ab	gedeelte van het doorstromings- oppervlak dat beïnvloed wordt door de bodem	(m <sup>2</sup> )
Ap	gedeelte van het doorstromings- oppervlak dat beïnvloed wordt door de pijp	(m <sup>2</sup> )
As	gemiddelde oppervlakte van de horizontale projectie van de lijzijde van de ribbels	(m <sup>2</sup> )
Aw	gedeelte van het doorstromings- oppervlak dat beïnvloed wordt door de wand	(m <sup>2</sup> )
b	breedte goot	(m)
b	coefficient	(-)
b1	coefficient	(-)
b2	coefficient	(-)
b3	coefficient	(-)
b4	coefficient	(-)
b5	coefficient	(-)
c	gemiddelde voortplantingssnelheid van de ribbels	(m/s)
count (pulsen/millivolt)	afgelezen waarde waaruit V berekend wordt	(-)

$C_b$	Chezy-coefficient voor de bodem	$(\sqrt{m} / s)$
$C_b'$	Chezy-coefficient voor de korrels	$(\sqrt{m} / s)$
$C_b''$	Chezy-coefficient voor de beddingvorm	$(\sqrt{m} / s)$
$C_p$	Chezy-coefficient voor de pijp	$(\sqrt{m} / s)$
$C_w$	Chezy-coefficient voor de wand	$(\sqrt{m} / s)$
$C$	deel van de stroomparameter = $(\mu \cdot h \cdot i)$ ongestoord = $(R_b \cdot i)$ pijp	(m)
$d$	afstand onderkant pijp beneden ongestoorde bodemhoogte	(m)
$\text{delta} = \Delta$	relatieve dichtheid van het sedimentmateriaal	(-)
$\text{deltab} = \delta_b$	dikte van de viskeuze sublaag aan de bodem	(m)
$\text{deltap} = \delta_p$	dikte van de viskeuze sublaag aan de pijp	(m)
$\text{deltaw} = \delta_w$	dikte van de viskeuze sublaag aan de wand	(m)
$dV/dz$	snelheidsverandering per eenheid van hoogte	(1/s)
$D$	pijpdiameter	(m)
$D_{50}$	mediane zandkorreldiameter	(m)
$D_{90}$	de grootte van de gaten van de zeef waar 90 gewichtsprocent van het zand doorheen gaat	(m)
$e$	= $A_s/A$	(-)
$\text{eta} = \eta$	dynamische viscositeit van het water	(Ns/m <sup>2</sup> )
$g$	versnelling van de zwaartekracht	(m/s <sup>2</sup> )
$h$	waterdiepte bij gemiddeld bodemniveau	(m)



h-gemeten	hoogte gemeten ten opzichte van de in de goot aanwezige referentie	(m)
h-norm	hoogte met de waterspiegel als referentie (ws = 1)	(m)
Hrib	gemiddelde top-dal hoogte van de ribbels	(m)
i	verhang	(-)
kappa = $\kappa$	constante van Von Karman	(-)
kb	Nikuradse ruwheid van de bodem	(m)
kp	Nikuradse ruwheid van de pijp	(m)
ksi = $\xi$	afstand van onderkant pijp tot kuilbodem	(m)
ksim = $\xi_m$	gemeten ksi	(m)
ksir = $\xi_r$	berekende ksi	(m)
kw	Nikuradse ruwheid van de wand	(m)
l	mengweglengte	(m)
mu = $\mu$	ribbelfactor	
	= $(C_b/C_b')^2$	(-)
nu = $\nu$	kinematische viscositeit van het water	(m <sup>2</sup> /s)
qon	genormeerde integraal van het snelheidsprofiel onder de pijp	(m <sup>2</sup> /s)
qt	integraal van het totale snelheidsprofiel	(m <sup>2</sup> /s)
qtn	genormeerde integraal van het totale snelheidsprofiel	(m <sup>2</sup> /s)
Q-goot	gootafvoer	(m <sup>3</sup> /s)
rho = $\rho$	soortelijke massa van het water	(kg/m <sup>3</sup> )
Rb	hydraulische straal met betrekking tot de bodem	(m)
Rp	hydraulische straal met betrekking tot de pijp	(m)
Rw	hydraulische straal met betrekking tot de wand	(m)

s	sedimenttransport per eenheid van breedte	(m <sup>2</sup> /s)
sm	gemeten sedimenttransport per eenheid van breedte	(m <sup>2</sup> /s)
sr	berekende sedimenttransport per eenheid van breedte	(m <sup>2</sup> /s)
t	tijd	(s)
taub = $\tau_b$	bodemschuifspanning	(N/m <sup>2</sup> )
tauz = $\tau_z$	schuifspanning in het water op hoogte z	(N/m <sup>2</sup> )
Ux = U <sub>*</sub>	schuifspanningssnelheid	(m/s)
V	snelheid	(m/s)
Vg	gemiddelde watersnelheid = (Q-goot) / (b * h)	(m/s)
Vng	gemiddelde genormeerde water- snelheid = qtn/h	(m/s)
V-norm	= V * (qtn/qt)	(m/s)
Vong	gemiddelde genormeerde water- snelheid onder de pijp = qon / ksi	(m/s)
Vr	rekensnelheid ten behoeve van de berekening van de gatdiepte ksi	(m/s)
V1	snelheid op hoogte 1	(m/s)
V2	snelheid op hoogte 2	(m/s)
z	hoogte ten opzichte van de bodem ter plaatse	(m)
z	hoogte waarop de snelheid nul is	(m)
z1	hoogte 1	(m)
z2	hoogte 2	(m)

### Gebruikte notaties

- \* = vermenigvuldigd met
- / = gedeeld door
- (x)<sup>y</sup> = x tot de macht y; behalve in dimensieaanduidingen
- xy = x met subscript y; in dimensieaanduidingen x tot de  
macht y
- xE-y = x \* (10)<sup>-y</sup>

Omdat dit verslag tot stand gekomen is via een tekstverwerkend programma van de IBM-computer, zijn in de tekst trema's en accenten weggelaten.

### Gebruikte indices

- b = bodem
- g = gemiddeld
- m = gemeten
- n = genormeerd
- o = onder de pijp
- p = pijp
- r = berekend
- rib = ribbel
- t = totaal
- w = wand

L I J S T   V A N   B I J L A G E N

1. Snelheidsverloop in de lengterichting van de goot (0,07 en 0,23 m onder de waterspiegel)
2. Horizontaal snelheidsprofiel in de dwarsrichting van de goot (0,23 m onder de waterspiegel)
3. Horizontaal snelheidsprofiel in de dwarsrichting van de goot (0,15 m onder de waterspiegel)
4. Horizontaal snelheidsprofiel in de dwarsrichting van de goot (0,07 m onder de waterspiegel)
5. Zeefkromme van het gootzand
6. Computerverwerking van de lasermetingen
7. Getekende snelheidsprofielen
8. Foto's van kalkinjecties
9. Foto's van de injectie van waterstofbelletjes
10. Stroomlijnenfiguur serie 1
11. Stroomlijnenfiguur serie 2
12. Stroomlijnenfiguur serie 3
13. Stroomlijnenfiguur serie 4
14. Verband tussen  $\bar{d}$  en  $a$  voor serie 5
15. Verband tussen  $\bar{d}$  en  $a$  voor serie 6
16. Verband tussen  $\bar{d}$  en  $q_{on}$  voor serie 5
17. Verband tussen  $\bar{d}$  en  $q_{on}$  voor serie 6
18. Verband tussen  $\bar{d}$  en  $V_{ong}$  voor serie 5
19. Verband tussen  $\bar{d}$  en  $V_{ong}$  voor serie 6
20. Verband tussen  $\bar{d}$  en  $k_{si}$  voor serie 5
21. Verband tussen  $\bar{d}$  en  $k_{si}$  voor serie 6
22. Ontwikkeling van  $\bar{d} + k_{si}$  als functie van de tijd
23.  $V$ ,  $dV/dz$  en  $z \cdot dV/dz$  onder de pijp voor grafieknummer 41
24. Tabel  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $k_{si}$  en  $\bar{d}$  voor serie 5 en 6
- 25.a.  $V_1$  en  $V_2$  tegen  $\bar{d}$  voor serie 5 en 6
  - b.  $V_2 - V_1$  tegen  $\bar{d}$  voor serie 5 en 6
  - c.  $(V_2 - V_1)/k_{si}$  tegen  $\bar{d}$  voor serie 5 en 6
  - d.  $V_2/V_1$  tegen  $\bar{d}$  voor serie 5 en 6
26. Computerbepaling  $\tau_{auz}$  voor grafieknummer 11
27. Mengweglengten

28. ln-fittingen met een verschillend aantal punten voor grafieknummer 11
29. Snelheidsprofiel van grafieknummer 11 uitgezet op halflogaritmisch papier
30. Vijfde-graads curvefitting voor grafieknummer 11
31. Uitvergroting vijfde-graads fitting voor grafieknummer 11
32. Handmethode voor grafieknummer 11
33. Einstein berekening: listing en gebruiksaanwijzing TI-59
34. Tabel berekening  $V_r$
35. Verband tussen  $V_r/V_{ng}$  en  $g \cdot d / (V_{ng})^2$  en tussen  $V_r/V_{ng}$  en  $g \cdot \kappa_{si} / (V_{ng})^2$
36. Verband tussen  $V_{ong}/V_{ng}$  en  $g \cdot d / (V_{ng})^2$
37. Berekening  $\kappa_{si}$ : listing en gebruiksaanwijzing TI-59
38. Tabel berekening  $\kappa_{si}$  behorende bij  $V_{ng} = 0,187$  en  $0,270$  m/s uit gemeten  $\kappa_{si}$  bij  $V_{ng} = 0,212$  m/s
39. Tabel berekening  $\kappa_{si}$  behorende bij  $V_{ng} = 0,212$  en  $0,270$  m/s uit gemeten  $\kappa_{si}$  bij  $V_{ng} = 0,187$  m/s
40. Vergelijking van  $(d + \kappa_{si})$  gemeten en  $(d + \kappa_{si})$  berekend
41. Listing van het computerprogramma
42. Voorbeeld invoer computerprogramma voor serie 3



L I T E R A T U U R

1. Ast, W. van, Boer, P.L. de (1973)  
Ontgroning onder een pijpleiding door stroming en/of golven.
2. Bogardi, J. (1974)  
Sediment transportation in alluvial streams.
3. Bonapace, A.C. (1974)  
Conditions of particle equilibrium at the boundary of a stream.
4. Breugel, J.W. van (1963)  
Metingen in de grenslaagstroming langs een geribbelde wand.
5. Breusers, H.N.C. (1961)  
Vergelijking bodemtransportformules.
6. Breusers, H.N.C. (1965)  
Conformity and timescale in two-dimensional local scour.
7. Breusers, H.N.C. (1970)  
Berekening snelheden en transporten in ontgrondingskuilen.
8. Breusers, H.N.C. (1971)  
Local scour near offshore structures.
9. Breusers, H.N.C. (1971)  
Begin van beweging van bodemmateriaal.
10. Breusers, H.N.C. (1975)  
Computation of velocity profiles in scour holes.
11. Durst, F., Melling, A., Whitelaw, J.H. (1971)  
Principles and practice of laser-doppler anemometry.
12. Garde, R.J., Ranga Raju, K.G. (1977)  
Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems.
13. Graf, W.H. (1971)  
Hydraulics of sediment transport.
14. Herbich, J.B. (1976)  
Scour around model pipelines due to wave action.

15. Hjort, P. (1975)  
Studies on the nature of local scour.
16. Iwagaki, Y., Smith, G.L., Albertson, M.L. (1981)  
Analytical study of the mechanics of scour for three-dimensional jet.
17. Jansen, E.F.P. (1981)  
Ontgroning onder een pijp.
18. Kjeldsen, S.P., Gjorsvik, O., Bringaker, K.G., (1974)  
Experiments with local scour around submarine pipelines in a uniform current.
19. Laursen, E.M. (1953)  
Observations on the nature of scour.
20. Liu, C.K., Kline, S.J., Johnston, J.P. (1966)  
An experimental study of turbulent boundary layer on rough walls.
21. Maaten, R., Os, A.G. van (1973)  
Submarine pipeline; stability test; scouring effects.
22. Manley, R.N., Herbich, J.B. (1976)  
Foundation stability of buried offshore pipelines.
23. Marien Technologisch Speurwerk (MATS) (1979)  
PL-2 Krachten op pijpleidingen en het gedrag van de zeebodem.
24. Marien Technologisch Speurwerk (MATS) (1980)  
PL-5/6 Beschadigingsmogelijkheden van pijpleidingen.
25. Maza, J.A. (1968)  
Socavation bajo tuberias.  
(Vertaling: Ontgroning onder pijpleidingen)
26. Meland, N., Norrman, J.O. (1966)  
Transport velocities of single particles in bed-load motion.
27. Prins, A. (1978)  
Sedimenttransport (collegedictaat f10).
28. Prins, J.E. (1966)  
Sediment transportation by flowing water.
29. Ralston, D.O., Herbich, J.H. (1968)  
The effect of waves and currents on submerged pipelines.

30. Rouse, H. (1949)  
Engineering hydraulics.
31. Shen, H.W. (1961)  
Rivermechanics, Volume I.
32. Shulits, S., Hill, R.D. (1968)  
A selection of bedload formulas.
33. Simons, D.B., Senturk, F. (1977)  
Sediment transport technology.
34. Stichting Postdoctoraal Onderwijs (1975/1976)  
Cursus pijpleidingen in zee.
35. Straub, L.G. (1934)  
Effect of channel-contraction works upon regiment of  
movable bed streams.
36. Toegepast Onderzoek Waterstaat (TOW) (1979)  
Rivieren - R657.
37. Vanoni, V.A., Brooks, N.H., Kennedy, J.F. (1961)  
Lecture notes on sediment transportation and channel  
stability.
38. Vanoni, V.A., Hwang, L.S. (1967)  
Relation between bedforms and friction in streams.
39. Vanoni, V.A. (1975)  
Sediment engineering.
40. Vermaas, H. (1980)  
Onderzoek beddingvormen bij zandtransport.
41. Vries, W. de (1978)  
Handleiding laser-doppler snelheidsmeter met T.S.I.  
apparatuur.
42. Wallingford Hydraulics Research Station (1973)  
A study of scour around submarine pipelines.  
Field tests on the behaviour of pipes when laid on  
the sea bed and subjected to tidal currents.
43. Wieringen, H.S.J. van (1979)  
Theoretische beschouwingen ten aanzien van sediment-  
transport in een ontgrondingskuil.

