

# **Meetopstelling voor hoogwater peilregistratie**

## **Afwijking tussen gemeten en werkelijke waterhoogte**

A. Dommerholt, W.Boiten en M.R. Hoffmann

### **Rapport 103**

Sectie Waterhuishouding  
Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen  
Internet: [www.dow.wau.nl/whh](http://www.dow.wau.nl/whh)

ISSN 0926-230X

1039134

# **INHOUDSOPGAVE**

	blz.
<b>1. INLEIDING</b>	1
<b>2. BESCHRIJVING MEETBUIS HOOGWATER PEILREGISTRATIE</b>	2
<b>3. BESCHRIJVING LABORATORIUMOPSTELLING</b>	5
<b>4. RESULTATEN MODELONDERZOEK</b>	8
4.1 Schaalmodel 1:4	8
4.2 Schaalmodel 1:8	13
4.3 Vergelijking schaalmodel 1:4 met schaalmodel 1:8	13
4.4 Theoretische analyse van de stroming rond de meetbuis	15
<b>5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	22
5.1 Conclusies	22
5.2 Aanbevelingen	23
<b>6. LITERATUUR</b>	25
<b>7. FOTOPAGINA'S</b>	26
<b>8. BIJLAGEN</b>	29

## 1. INLEIDING

Op 21 mei 2001 verleende Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland te Arnhem per brief nr. 79 56021 opdracht aan de Sectie Waterhuishouding van Wageningen Universiteit tot het hydraulisch testen van een schaalmodel van een meetopstelling voor registratie van hoogwaterstanden in de uiterwaarden. De vraag was eventuele afwijkingen tussen geregistreeerde en werkelijke waterhoogte ten gevolge van stromingseffecten rondom de meetopstelling bij verschillende omstandigheden te kwantificeren. De inhoudelijke begeleiding van het onderzoek werd overgedragen aan het Rijksinstituut voor Kust en Zee, afdeling Hydro-Instrumentatie.

De opdracht was conform de offerte 01179 AD/ah dd. 14 mei 2001.

De in de offerte beschreven werkzaamheden zijn tot stand gekomen na enkele oriënterende gesprekken met T.G.M. Sijben en M. Andernach van de afdeling Hydro-Instrumentatie, waarbij de oorspronkelijk geformuleerde eisen enigszins zijn bijgesteld vanwege de beperkingen opgelegd door het hydraulisch laboratorium.

Het overleg heeft geleid tot de volgende randvoorwaarden:

- modelonderzoek aan een schaalmodel 1:4;
- onderzoek tot een maximale stroomsnelheid van 0,75 m/s in het model.

Bij het modelonderzoek moesten de volgende aspecten aan de orde komen:

- vaststellen van afwijkingen tussen de werkelijk optredende waterhoogte en de in de meetbuis voor peilregistratie gemeten waterhoogte bij verschillende waterhoogtes en stroomsnelheden, waarbij van belang kunnen zijn:
  - positie van de drukopnemer in de meetbuis;
  - grootte van de opening tussen de flenzen;
  - de bodemruwheid;
  - verstopping van de openingen door meegevoerd vuil.

Gezien de complexe stroming rondom de meetopstelling en de relatief kleine breedte van de goot konden schaalears effecten ten gevolge van turbulentie en een "blokkerings-effect" niet worden uitgesloten. Daarom is ook een schaalmodel 1:8 gemaakt en onderzocht, hetgeen een normale procedure is wanneer schaalears effecten worden vermoed.

De resultaten daarvan bevestigden deze vermoedens, zodat vervolgens is getracht om door effecten zoals turbulentie (via het zogenaamde Reynolds-getal) in de beschouwing te betrekken, voorspellingen te doen voor het prototype.

Het modelonderzoek heeft plaatsgevonden in het hydraulica laboratorium van de Sectie Waterhuishouding in "De Nieuwlanden" te Wageningen in de maanden juli en augustus 2001. Het onderzoek stond onder leiding van ing. A. Dommerholt van de Sectie Waterhuishouding, bijgestaan door ing. W. Boiten (gastmedewerker) en ir. M.R. Hoffmann eveneens van de Sectie Waterhuishouding. Met erkentelijkheid is gebruik gemaakt van de ervaringen van dr. ir. P.A. Kolkman en zijn adviezen.

## 2. BESCHRIJVING MEETBUIS HOOGWATER PEILREGISTRATIE

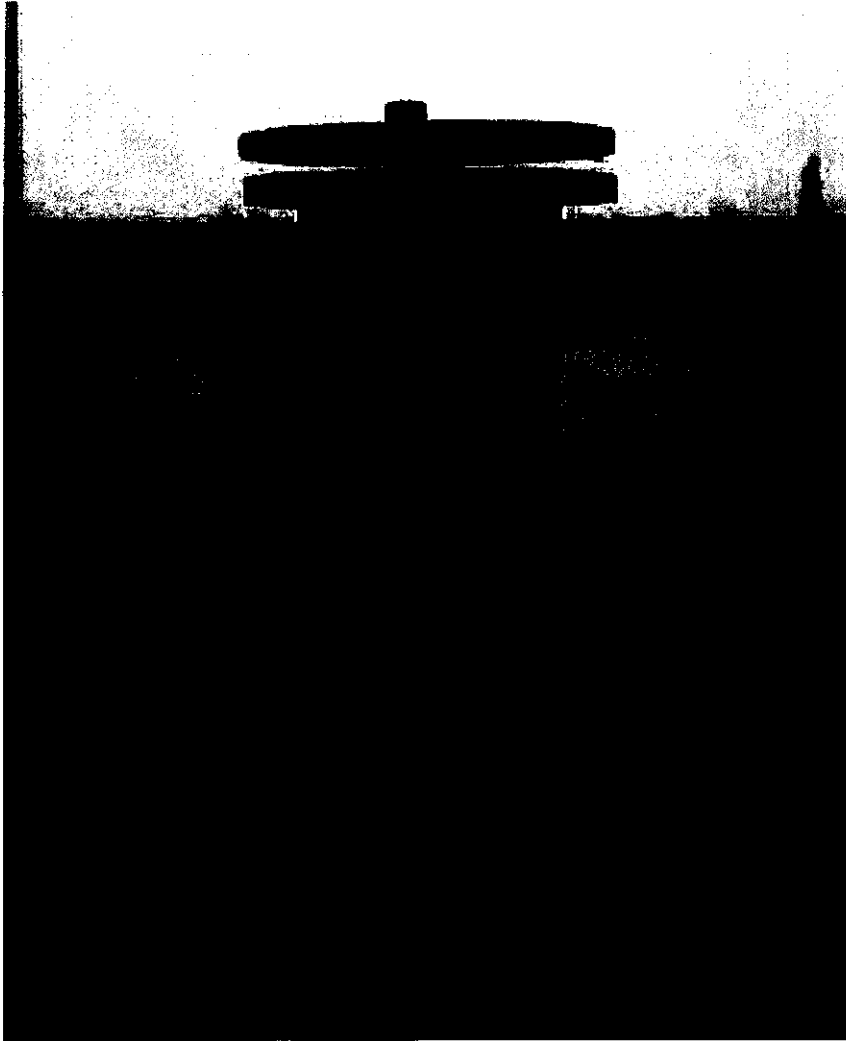
Figuur 1 geeft de meetopstelling zoals voorgesteld door Rijkswaterstaat. De peilregistratie voor het meten van de waterstand in de uiterwaarden tijdens hoogwater, gebeurt in een buisstuk met een hoogte van 0,50 m dat aan de boven- en onderzijde is voorzien van een flens. Aan de bovenzijde wordt de buis afgedekt met een dichte flens, waarbij tussen de twee flenzen een opening wordt gelaten van ca. 0,035 m. Aan de onderzijde rust het buisstuk op een ander buisstuk van dezelfde diameter dat in de bodem wordt ingegraven. Dit buisstuk steekt ca. 0,20 m boven maaiveld uit en heeft aan de bovenzijde eveneens een flens. Ook tussen de flenzen van deze twee buisstukken wordt een opening van ca. 0,035 m gelaten. Het water kan dus bij lage waterstanden ( $< \text{ca. } 0,70 \text{ m}$ ) door de onderste spleet toetreden tot de meetbuis en bij hogere waterstanden door beide spleten.

In het buisstuk bevindt zich een drukopnemer voor de feitelijke registratie, hetgeen inhoudt dat pas registratie kan plaatsvinden wanneer de opnemer zich onder water bevindt. Wanneer deze ongeveer in het midden van de meetbuis wordt bevestigd, betekent dat, dat waterhoogtes groter dan ca. 0,5 m boven maaiveld ter plaatse van de meetopstelling kunnen worden geregistreerd.

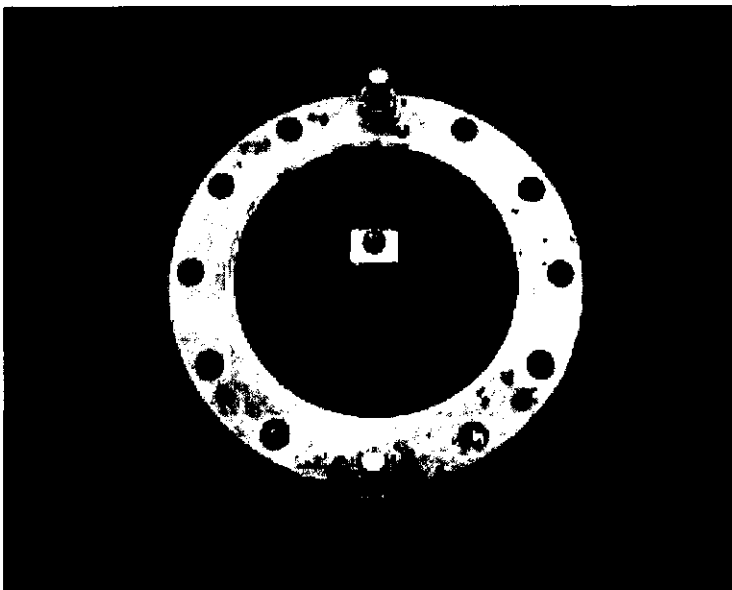
In de Nederrijn ongeveer 200m benedenstrooms van de stuw bij Driel bevindt zich inmiddels een testopstelling van de betreffende meetbuis (zie foto's 1 t/m 3).



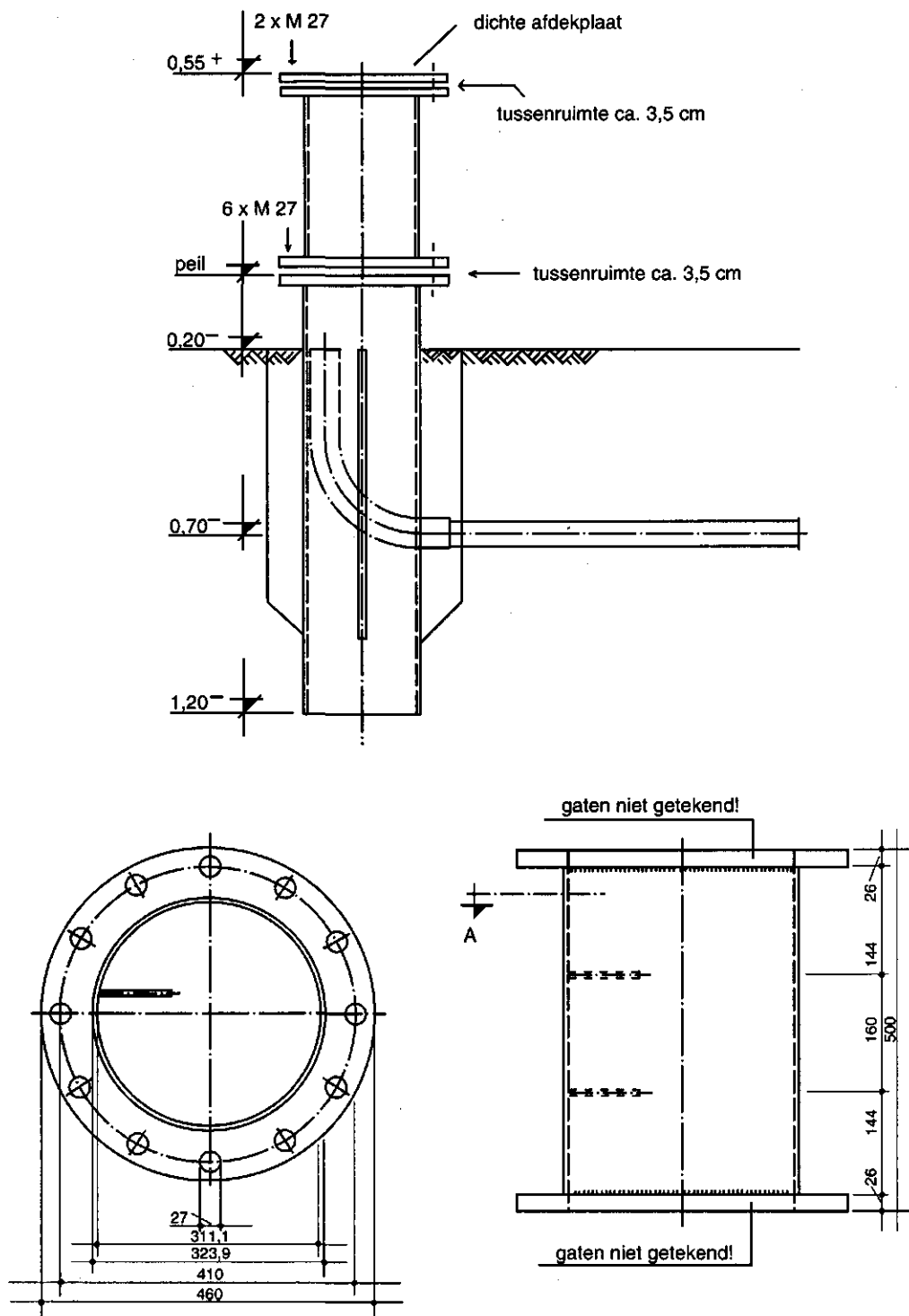
Foto 1 Proefopstelling van enkele verschillende typen hoogwater registratie in de Neder-Rijn bij Driel



**Foto 2** Bovenste gedeelte van de meetopstelling (het water staat juist gelijk met de onderste spleet)



**Foto 3** Bovenste dichte flens is verwijderd, bevestiging drukopnemer zichtbaar.



**Figuur 1 Meetopstelling voor hoogwater peilregistratie zoals voorgesteld door Rijkswaterstaat, proefopstelling bij Driel.**

### 3. BESCHRIJVING LABORATORIUMOPSTELLING

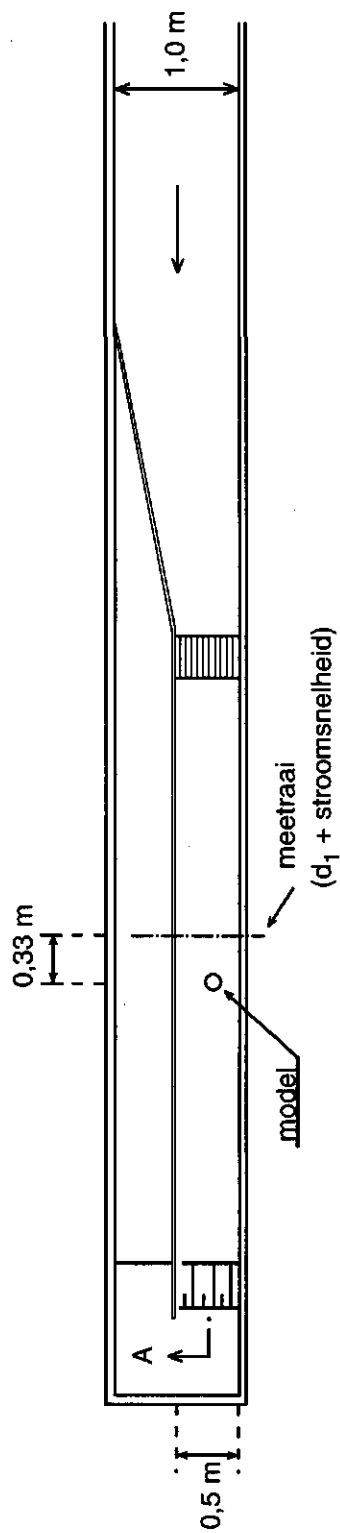
In de figuren 2 en 3 en foto's 4,5 en 6 (Hfdst. 7) is de modelopstelling in de stroomgoot in het hydraulica laboratorium weergegeven. Voor het modelonderzoek is een stroomgoot gebruikt met een lengte van 15 m, een breedte van 1,0 m en een diepte van ca. 0,35 m. Deze goot is instelbaar onder een helling. Om de maximum stroomsnelheid van 0,75 m/s te realiseren bij voldoende waterdiepte en het maximaal beschikbare debiet is de goot over een lengte van 5 m versmald tot ca. 0,5 m. Aan de bovenstroomse zijde hiervan is de goot over een lengte van 2,5 m geleidelijk versmald. Het schaalmodel is ongeveer halverwege het versmalde gedeelte geplaatst. Aan het einde van de goot kon met een klep die op de bodem scharnierde de waterstand in de goot worden geregeld. De bodem van de goot bestond uit een houten plaat. De goot werd onder een geringe helling geplaatst. De tangens van de hellingshoek bedroeg 0,003 (3 mm/m).

De werkelijke waterhoogte werd op enige afstand bovenstrooms van het schaalmodel gemeten en wel op een afstand van 0,33 m met behulp van een statische buis die via een slang was verbonden met een peilbuis. De statische buis is een meetbuis die meetopeningen heeft loodrecht op de stroomrichting, zodat hiermee de statische druk = waterhoogte wordt gemeten. De bodem van de goot lag op dat punt dus 1 mm hoger dan ter plaatse van het schaalmodel. Voor de berekening van de afwijking in het schaalmodel is hiervoor gecorrigeerd. Hierbij is ervan uitgegaan dat er éénparige stroming in de goot plaatsvond, hetgeen inhoudt dat de helling van de waterspiegel gelijk is aan de helling van de bodem.

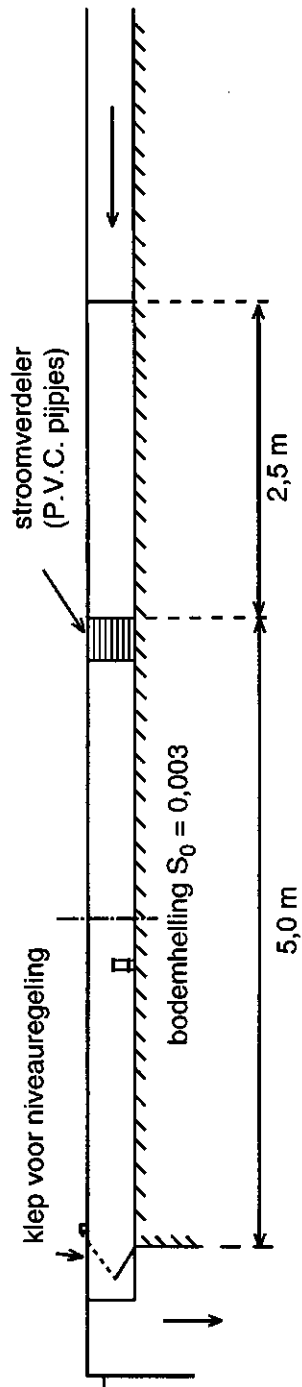
Voor de meting van de waterhoogte in het schaalmodel werd in het midden van de bovenste flens een gat gemaakt waardoor verticaal een buisje in het schaalmodel kon worden gestoken, die in hoogte verstelbaar was, zodat de verticale positie van de drukopnemer in de meetbuis kon worden onderzocht. Ook dit buisje werd via een slang verbonden met een peilbuis. De beide waterstanden in de peilbuizen werden gemeten met peilnaalden die tot op 0,1 mm nauwkeurig af te lezen zijn.

De stroomsnelheid werd met behulp van een propeller, een zogenaamde Ott-molen, gemeten. Dit gebeurde ook op enige afstand bovenstrooms van het schaalmodel en wel juist bovenstrooms van de statische buis, in het midden van de goot. In alle gevallen werd gemeten op de hoogte van de spleten tussen de flenzen - in figuur 3:  $V_{\text{boven}}$  en  $V_{\text{onder}}$  - (voor zover mogelijk, anders zo dicht mogelijk daarbij) en in een aantal gevallen werd een heel verticaal snelheidsprofiel gemeten.

De invloed van verstopping van de spleten tussen de flenzen door vuil werd nagebootst door aan de bovenstroomse zijde van de spleten een reepje dun zeil aan te brengen.



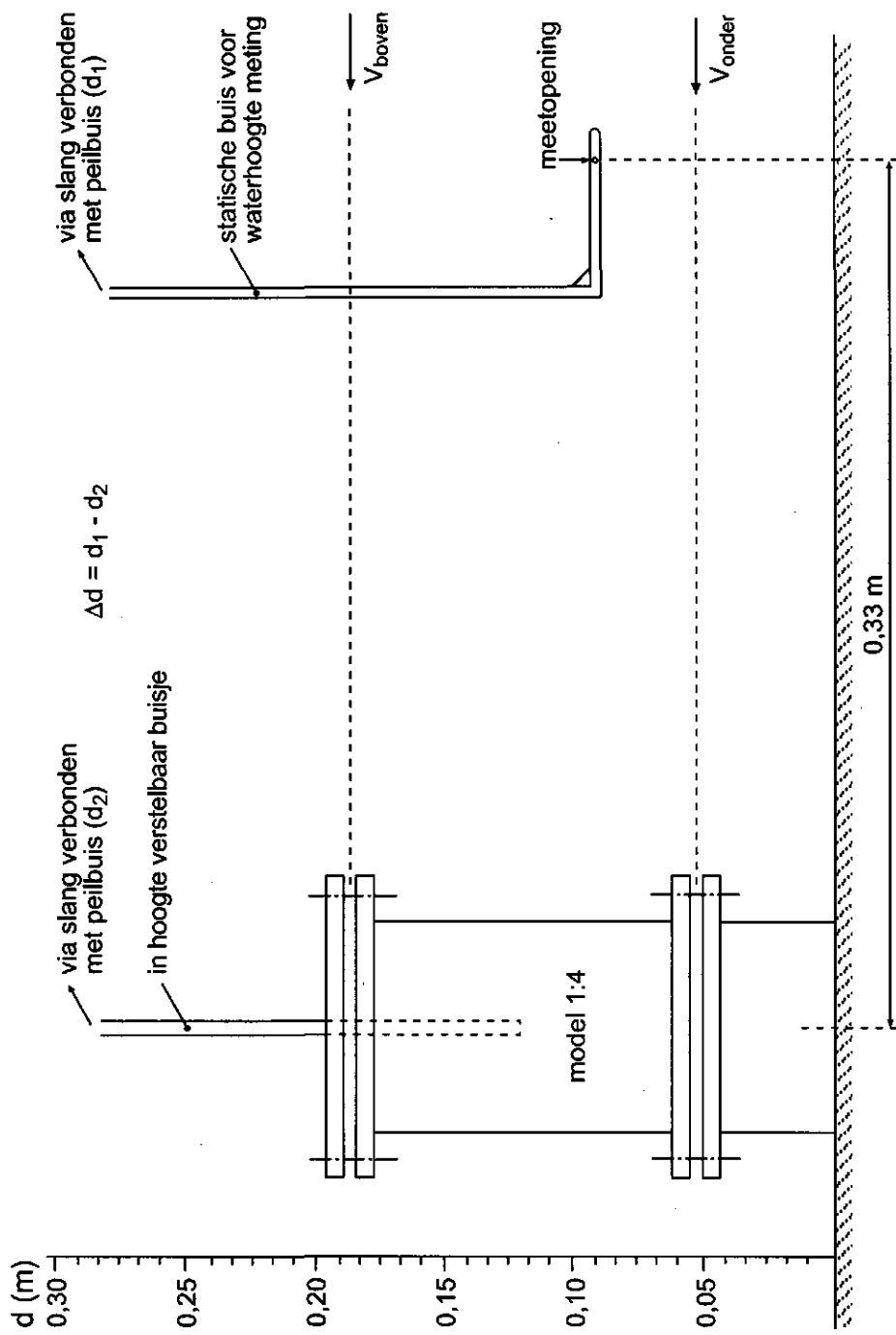
Bovenaanzicht



Doorsnede A

**Figuur 2**    **Overzicht modelopstelling in het hydraulica laboratorium**





**Figuur 3** Detail van de meetopstelling met meetbuis, statische buis en plaats stroomsnelheidsmeting

## 4. RESULTATEN MODELONDERZOEK

Alle dimensies, genoemd in de paragrafen 4.1 en 4.2 hebben betrekking op de schaalmodellen (1:4 of 1:8) en zijn dus niet omgerekend naar het ontwerp op ware grootte, verder het prototype genoemd. De meetresultaten van de schaalmodellen 1:4 en 1:8 zijn vermeld in Bijlage I, respectievelijk tabel I-1 en I-2.

### 4.1 *Schaalmodel 1:4*

Bij dit schaalmodel is een uitgebreide serie metingen gedaan met een spleetopening bij beide flenzen van 5 mm. Vervolgens zijn enkele metingen uitgevoerd met spleetopeningen van 10 mm en 15 mm. In onderstaande figuren 4 en 5 is voor de drie spleetopeningen het verschil uitgezet van de waterhoogte gemeten in het model en de waterhoogte gemeten met de statische buis, dus juist bovenstrooms van het model, verder aangeduid als  $\Delta d$  (delta-d in figuren). Dit verschil is uitgezet tegen de stroomsnelheid  $v$ . Wanneer de waterstand zich onder de bovenste flens bevindt, is dat de snelheid gemeten ter hoogte van de spleet bij de onderste flens. Bij een waterstand hoger dan de totale meetbuis, is de snelheid het gemiddelde van de twee snelheden ter hoogte van de beide spleten.

Een en ander is gedaan voor twee waterhoogtes en wel een lage van ca. 0,16 m boven de bodem van de goot (dus onder de bovenste flens, figuur 4) en voor een waterhoogte van ca. 0,28 m boven de bodem (dit was ongeveer de grootste waterhoogte die in de stroomgoot kon worden gerealiseerd, figuur 5). Figuur 3 geeft een beeld van deze waterhoogtes ten opzichte van de spleten in het model. Er kan geen duidelijk significant verschil worden geconstateerd voor de spleetgroottes van 5 en 10 mm. Vooral bij de hoogste gemeten stroomsnelheden blijkt de spleetgrootte van 15 mm enigszins hogere waarden voor  $\Delta d$  op te leveren. Er is bovendien geconstateerd dat bij deze opening van 15 mm en bij een lage waterstand de turbulentie binnenin het model sterk toenam en er daarom zo nu en dan lucht in de meetopening kwam en zelfs luchtballen uit de onderste spleet ontsnapten. Daarom zijn voor de spleetopeningen van 10 en 15 mm geen aanvullende metingen uitgevoerd en wordt de analyse van de meetcijfers alleen gedaan met de uitgebreide serie voor de opening van 5 mm

Bij zowel een kleine (ca. 0,16 m boven de bodem) als een grotere waterhoogte (ca. 0,28 m boven de bodem) is de plaats van de meetopening van het buisje in het model in verticale richting gevarieerd. Het is gebleken dat er geen noemenswaardige andere waarden worden gemeten, zolang de meetopening meer dan ca. 0,01 m (in het model) van een spleetopening blijft verwijderd.

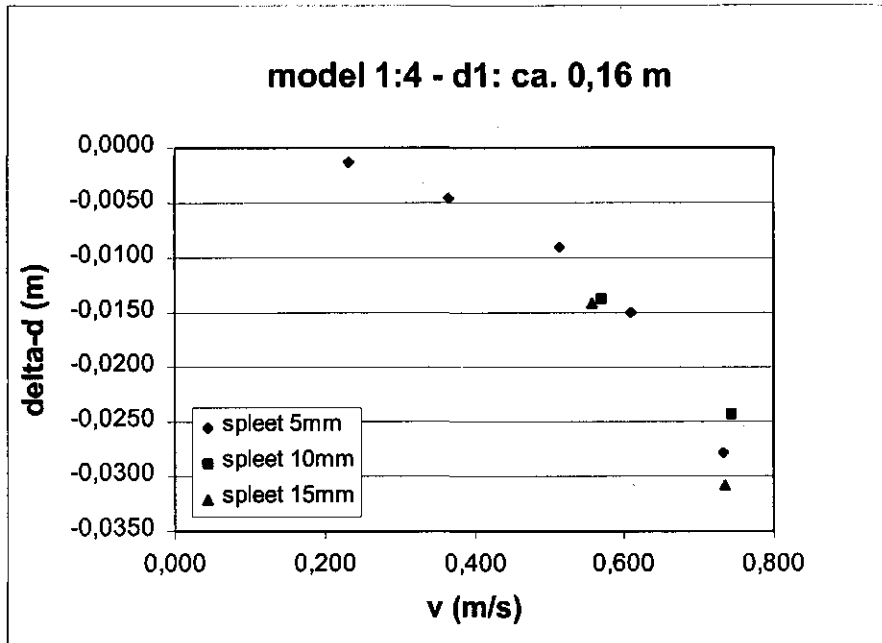
De metingen voor de bepaling van  $\Delta d$  zijn uitgevoerd voor een vijftal waterhoogtes en steeds bij 5 à 6 verschillende stroomsnelheden variërende van ca. 0,20 m/s tot 0,75 m/s.

De gekozen waterhoogtes zijn:

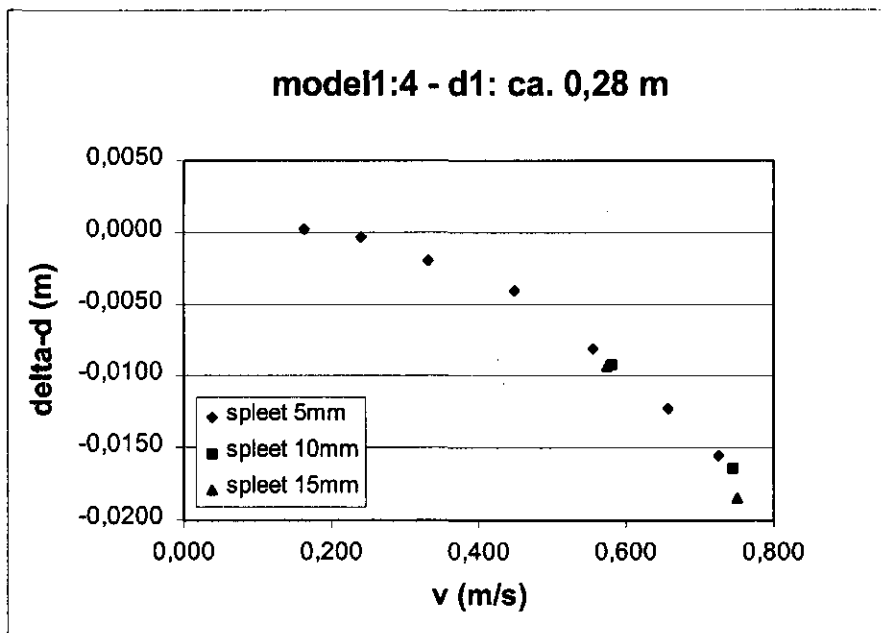
- de hoogst haalbare waterhoogte (ca. 0,28 m boven de bodem);

- een waterhoogte duidelijk onder de bovenste spleet (ca. 0,16 m boven de bodem);
- drie waterhoogtes vrij dicht bijeen, waarbij de bovenste spleet juist mee gaat doen tot dat het water juist over de bovenste flens stroomt;
- eventueel nog enkele aanvullende metingen bij andere waterhoogtes.

Bij een aantal van deze metingen is de onderste spleet, de bovenste spleet of zijn beide spleten afgedekt door een reepje zeil om verstopping door drijvend vuil na te bootsen.

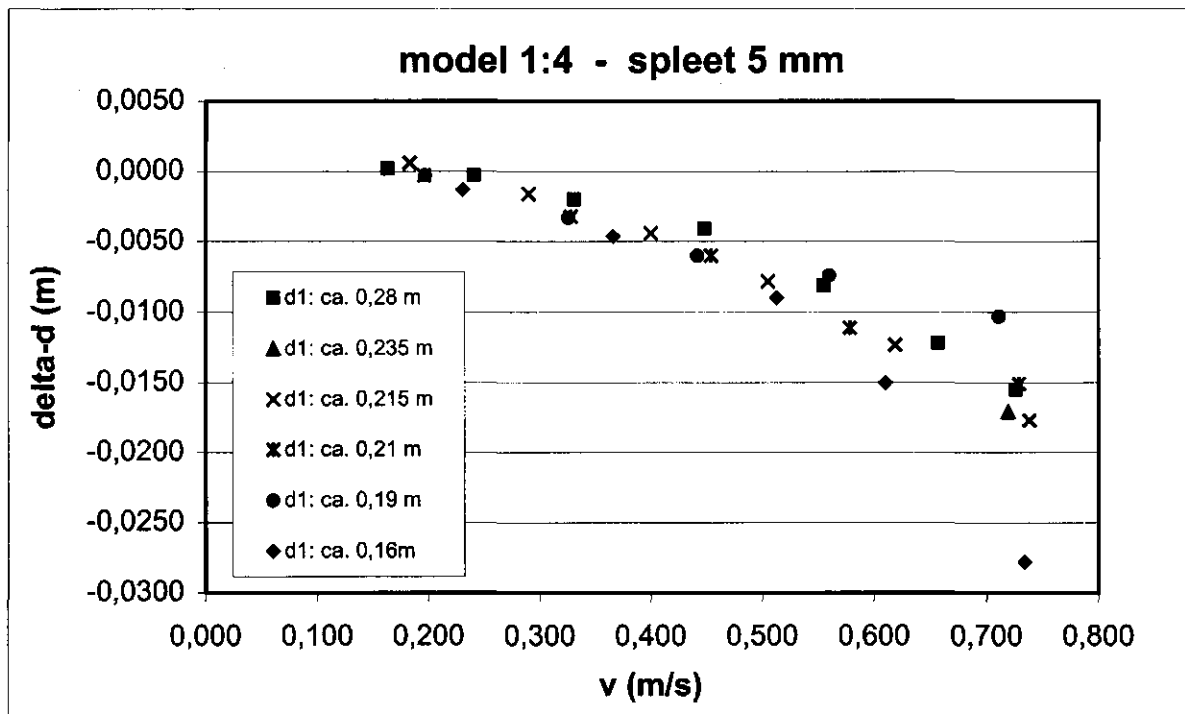


**Figuur 4** delta-d voor de drie onderzochte spleetgroottes bij een waterhoogte van ca. 0,16 m boven de bodem (alle getallen zijn modelwaarden)



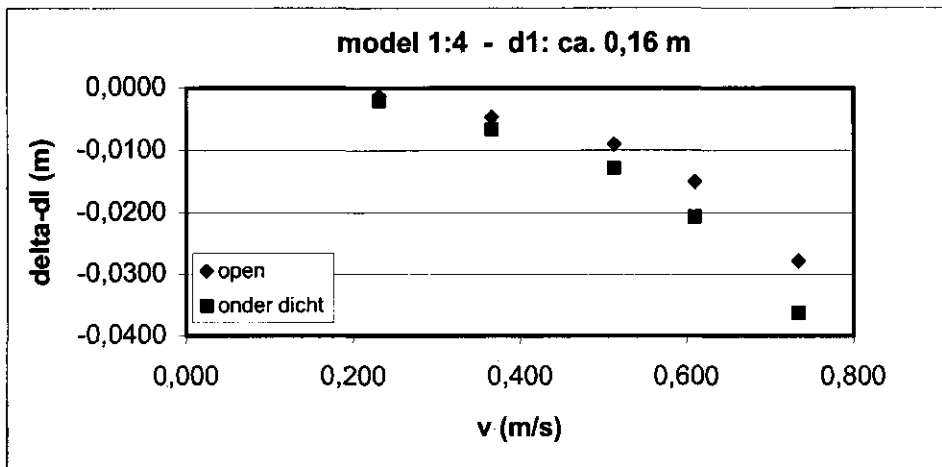
**Figuur 5** delta-d voor de drie onderzochte spleetgroottes bij een waterhoogte van ca. 0,28 m boven de bodem (alle getallen zijn modelwaarden)

In figuur 6 zijn alle metingen uitgezet bij een spleet van 5 mm tussen de flenzen. Duidelijk is te zien dat de grootste verschillen in gemeten waterhoogte optreden als de waterstand zich onder de bovenste flens bevindt ( $d_1 = \text{ca. } 0,16 \text{ m}$ ). Wanneer de waterhoogte een zodanige stand bereikt dat er net water in de bovenste spleet stroomt ( $d_1 = \text{ca. } 0,19 \text{ m}$ ) blijken de afwijkingen kleiner te zijn. In dit traject van enkele cm's is er waarschijnlijk een combinatie van allerlei effecten die de waterhoogte in het model beïnvloeden. Het voert te ver om in het kader van dit onderzoek te trachten al deze effecten afzonderlijk te kwantificeren.

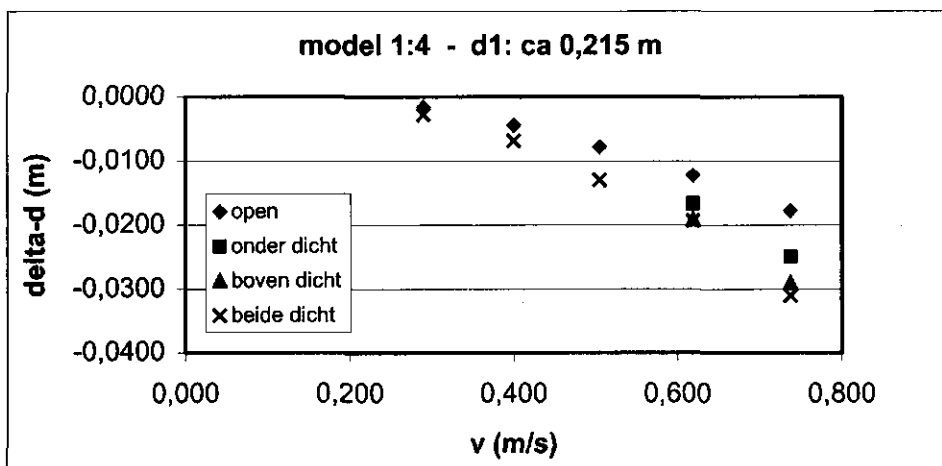


**Figuur 6** delta-d als functie van de stroomsnelheid voor alle metingen bij een spleet tussen de flenzen van 5 mm (alle getallen zijn modelwaarden)

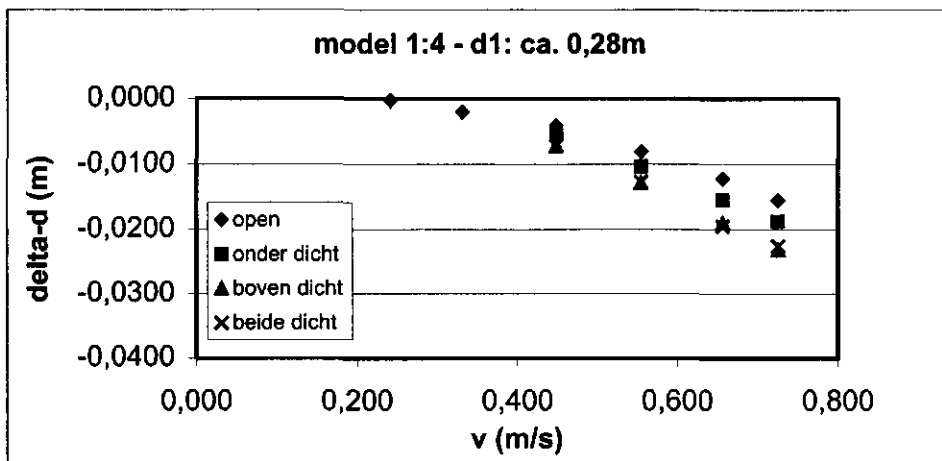
In de figuren 7a,b en c is voor drie waterhoogtes (de waterhoogtes zijn voor de verschillende metingen ongeveer aan elkaar gelijk) delta-d uitgezet voor het geval één van de spleten (onder of boven) of beide spleten zijn verstopt. Ook zijn hierin de metingen uitgezet wanneer de spleten open zijn. Uit de resultaten blijkt, dat er weinig verschil in delta-d is tussen de situatie dat de bovenste spleet is afgesloten en dat beide spleten zijn afgesloten. In alle gevallen treden wel grotere verschillen op tussen de gemeten waterhoogte en de werkelijk optredende waterhoogte. Deze verschillen ontstaan door een gewijzigd stromingspatroon ter plaatse van de spleten, waardoor de drukverdeling verandert in het model en daardoor ook de waarde van delta-d. De situatie dat de onderste spleet is afgesloten kan enigszins worden vergeleken met een grote bodemruwheid, waarbij de snelheid ter hoogte van de onderste spleet veel lager is dan de snelheid bij de bovenste spleet. Dit is echter zeer extreem. In werkelijkheid zal het verschil tussen de snelheden bij de beide spleten veel kleiner zijn en ook het verschil in delta-d ten opzichte van de "open" situatie.



**Figuur 7a** delta-d als functie van de stroomsnelheid waarbij de onderste spleet is afgedekt

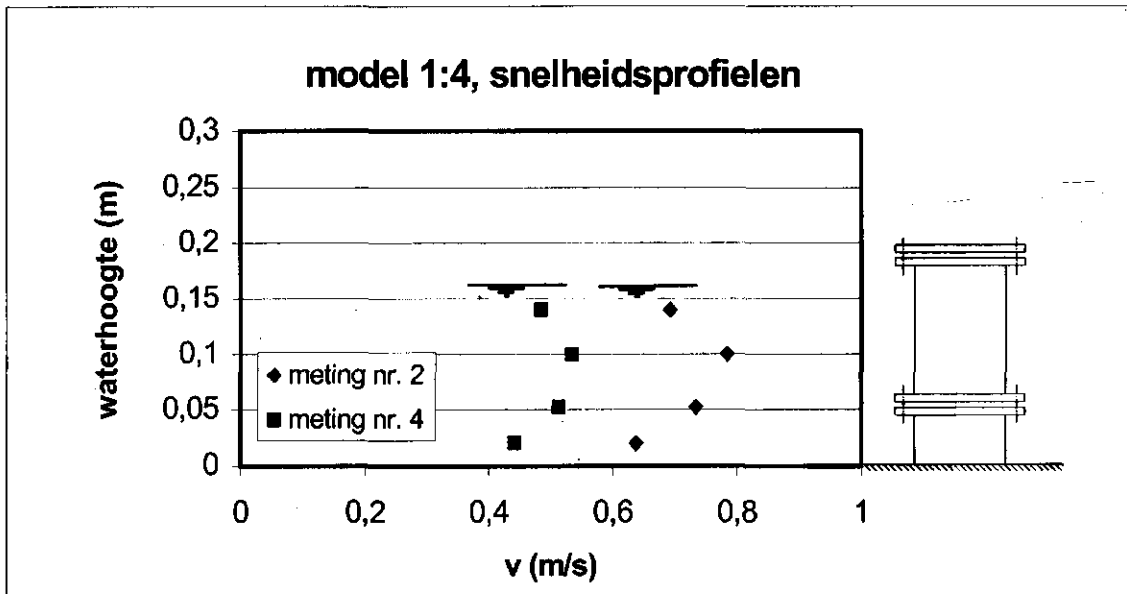


**Figuur 7b** delta-d als functie van de stroomsnelheid waarbij de onderste of bovenste spleet is afgedekt of beide spleten zijn afgedekt ( $d_1 = \text{ca. } 0,215 \text{ m}$ )

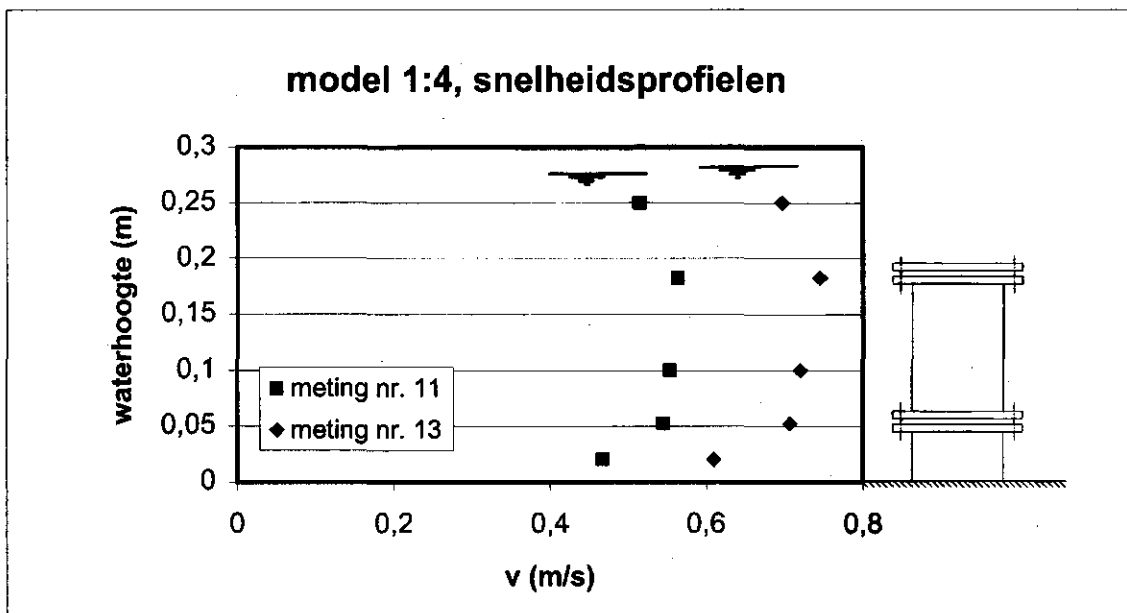


**Figuur 7c** delta-d als functie van de stroomsnelheid waarbij de onderste of bovenste spleet is afgedekt of beide spleten zijn afgedekt ( $d_1 = \text{ca. } 0,28 \text{ m}$ )

In de figuren 8a en 8b zijn enkele snelheidsprofielen weergegeven. De nummers van de metingen komen overeen met de nrs uit tabel I-1 in Bijlage I. Het feit dat de snelheid dicht aan het oppervlak afneemt is toe te schrijven aan het gebruik van een drijvende plaat op het wateroppervlak bij de instroom van het versmalde gedeelte van de goot. Deze plaat voorkomt dat er golven in de goot ontstaan ter plaatse van de meetopstelling. Zoals gezegd is de gebruikte snelheid het gemiddelde van de snelheid ter hoogte van de openingen tussen de flenzen. Uit de figuren blijkt dat dit niet hetzelfde hoeft te zijn als de gemiddelde snelheid in de gehele verticaal.



**Figuur 8a** verticaal snelheidsprofiel in de meetraai bij een waterhoogte van ca. 0,16 m boven de bodem



**Figuur 8b** verticaal snelheidsprofiel in de meetraai bij een waterhoogte van ca. 0,28 m boven de bodem

## 4.2 *Schaalmodel 1:8*

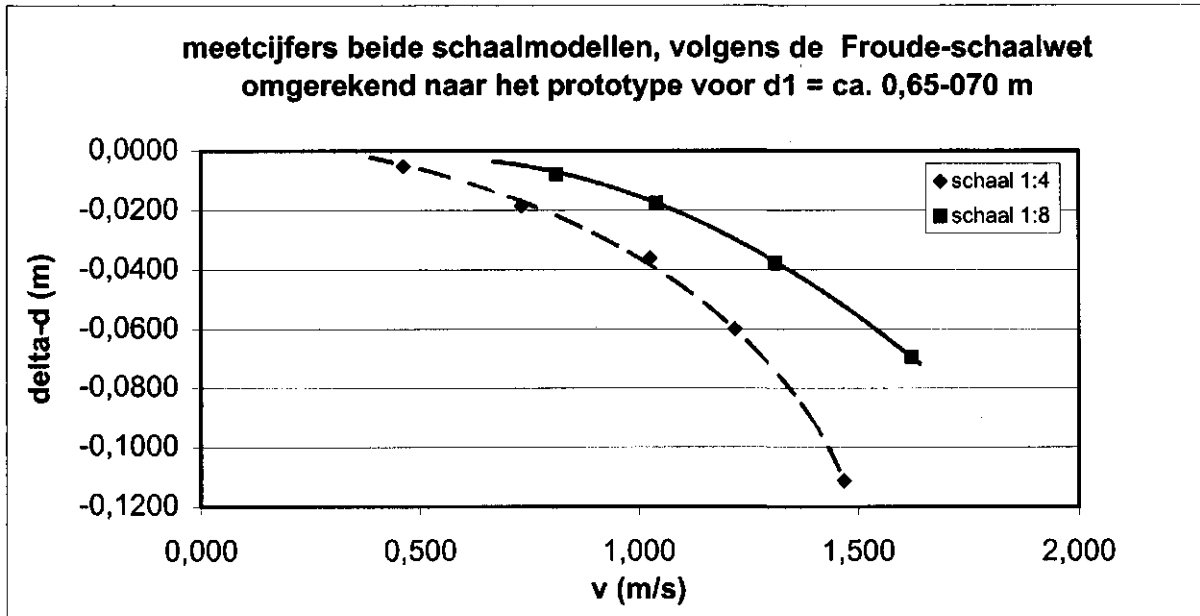
Zoals eerder vermeld werden ook metingen verricht aan een model met een andere schaal, teneinde mogelijke schaaleffecten, bijvoorbeeld door een geringe gootbreedte (effect van blokkering), en de invloed van andere effecten zoals turbulentie veroorzaakt door het schaalmodel te onderzoeken. De laatste effecten zijn namelijk niet naar het prototype te vertalen door gebruik te maken van de Froude-schaalwet, maar hierin speelt het Reynolds-getal ook een rol. Wanneer deze verschillende effecten een rol spelen, is een andere benadering van het probleem noodzakelijk. In paragraaf 4.4 zal hierop nader worden ingegaan.

In tabel I-2 in Bijlage I zijn de meetcijfers aan het schaalmodel 1:8 weergegeven. In paragraaf 4.1 is aangegeven dat er voor het schaalmodel 1:4 geen duidelijk significant verschil in de meetresultaten is geconstateerd voor de spleetgroottes van 5 en 10 mm. Voor het schaalmodel 1:8 is dit daarom ook niet te verwachten. Gekozen is voor een opening tussen de flenzen van 5 mm.

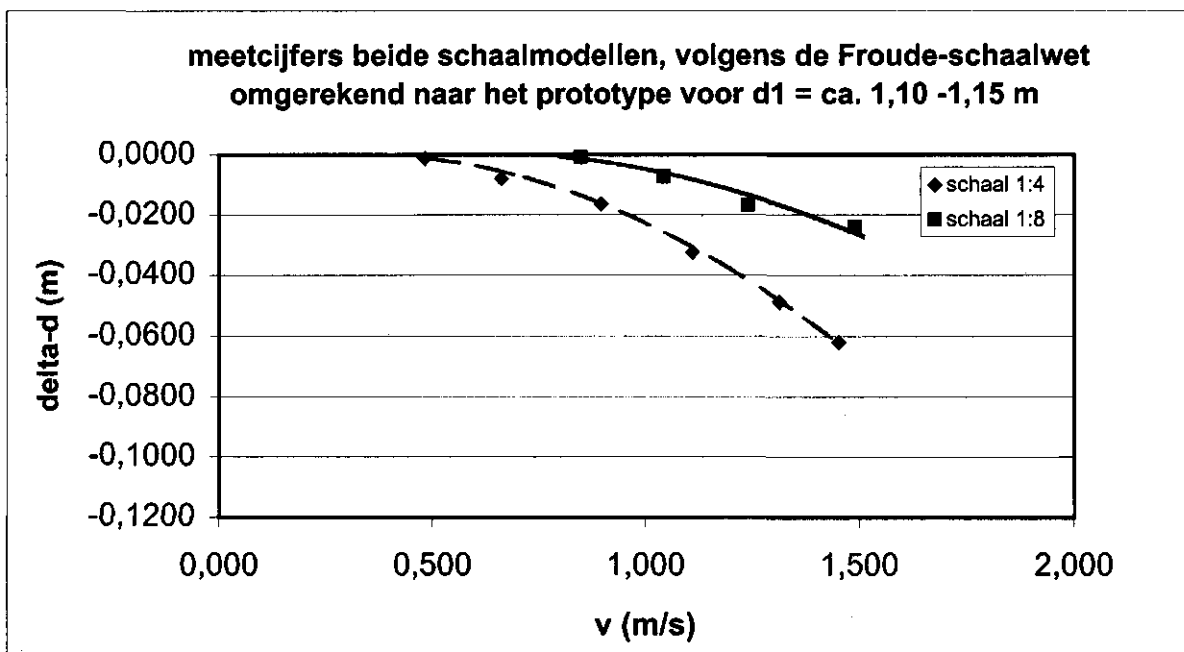
## 4.3 *Vergelijking schaalmodel 1:4 met schaalmodel 1:8*

In de figuren 9a en 9b zijn voor een kleine waterhoogte van ca. 0,65-0,70 m in het prototype (lager dan de bovenste flens) en voor een grotere waterhoogte van ca. 1,10-1,15 m (ca. 0,40 m boven de bovenkant van de meetopstelling), de meetresultaten bij een spleet van 5 mm tussen de flenzen voor beide schaalmodellen omgerekend naar het prototype volgens de Froude-schaalwet. Dit houdt in, dat de waterhoogtes en delta-d worden vermenigvuldigd met de lengteschaal van de modellen;  $n_l = 4$  en  $n_l = 8$  en dat de snelheid wordt vermenigvuldigd met de wortel uit de lengteschaal ( $n_v = n_l^{0,5}$ ), dus  $n_v = 2$ , respectievelijk  $n_v = 2,828$ .

Uit de twee figuren blijkt dat deze aanpak tot totaal verschillende resultaten voor het prototype leidt. Het is daarom duidelijk dat hier een andere aanpak noodzakelijk is.



**Figuur 9a** resultaten van beide schaalmodellen omgerekend naar het prototype volgens de Froude-schaalwet voor een waterstand lager dan de bovenste flens (alle getallen zijn prototype-waarden)



**Figuur 9b** resultaten van beide schaalmodellen omgerekend naar het prototype volgens de Froude-schaalwet voor een waterstand boven de bovenste flens (alle getallen zijn prototype-waarden)



#### 4.4 Theoretische analyse van de stroming rond de meetbuis

Omdat gebleken was dat de twee schaalmodellen 1:4 en 1:8 verschillende afwijkingen gaven, is een dimensieanalyse doorgevoerd om de relevante grootheden te karakteriseren (Panton, Douglas e.a.). Met deze dimensieanalyse is vooral getracht inzicht te krijgen in het feit of de breedte van de modelgoot een belangrijke invloed uitoefent op de meetresultaten, of dat turbulentie rond de meetbuis de verschillende afwijkingen kan verklaren. Eerder onderzoek in de literatuur leidde niet tot een afdoende verklaring. In de literatuur is ruim informatie aanwezig over de stroming rondom cilinders (Panton, Douglas e.a., Okamoto e.a.). Hieruit valt af te leiden dat al bij relatief lage Reynolds getallen effecten van inertia en/of turbulentie een rol gaan spelen. Inertia effecten hebben betrekking op de traagheid van de water stroming. Doordat achter het model afwisselend aan de linker- en rechterkant wervels ontstaan, is er een dynamisch stromingspatroon en treden traagheidseffecten op. Er zijn geen onderzoeken of andere literatuur bronnen gevonden, waarin de geometrie van de meetbuis, zoals deze in dit onderzoek is gebruikt, onderzocht is. Het was niet mogelijk de gevonden resultaten van de stroming rondom cilinders te vertalen naar het ontwerp van de meetopstelling, omdat de meetopstelling twee horizontale spleten bevat. Juist deze spleten beïnvloeden de stroming rondom de meetopstelling heel sterk. Verder geven de onderzoeken van de stroming rondom cilinders alleen informatie over het stromingspatroon en de drukverdeling rondom de cilinder, maar niet over de druk zoals deze binnenin de cilinder aanwezig is (zie ook figuur 15, Bijlage II).

In de dimensieanalyse zijn de volgende basis grootheden meegenomen:

- de dichtheid van de vloeistof ( $\rho$ )
- de versnelling van de zwaartekracht ( $g$ )
- de gemiddelde stroomsnelheid ( $v$ )
- de werkelijke waterdiepte ( $d_1$ )
- de gemeten afwijkingen in de meetbuis ( $\Delta d$ )
- de dynamische viscositeit van de vloeistof ( $\eta$ )
- de diameter van de meetbuis in het model ( $D$ )
- en als additionele dimensieloze grootheid de fractie van het door de modelopstelling geblokkeerde oppervlak van de stroomgoot.

Als deze variabelen in de dimensieanalyse worden betrokken, blijkt dat de volgende dimensieloze termen (ook Pi-termen genoemd) een rol kunnen spelen:

- Pi-1: de fractie van het door de modelopstelling geblokkeerde oppervlak van de stroomgoot,  $n$
- Pi-2: het Froude-getal in het kwadraat,  $Fr^2 = v^2/(g \cdot d_1)$
- Pi-3: het Reynolds-getal,  $Re = (\eta \cdot v \cdot D)/\rho$
- Pi-4:  $\Delta d/d_1$

De Pi-termen die door de dimensieanalyse zijn gevonden, kunnen andere exponenten hebben dan gebruikelijk (bijv.  $Fr^2$  in plaats van  $Fr$ ). Dit is afhankelijk van de keuze van de basisgrootheden in de dimensieanalyse. Later wordt een functioneel verband tussen de Pi-termen afgeleid. De exponenten die in dit functioneel verband worden gebruikt, worden gevonden door de data tegen de Pi-termen uit te zetten.

De eerste Pi-term kan een belangrijke invloed op de metingen hebben als de goot te smal is voor het schaalmodel. Dat betekent dat een blokkeringseffect optreedt.

De tweede Pi-term, het Froude-getal, karakteriseert de toestand van de stroming van het water. Als het Froude getal groter is dan 1, wordt de stroming schietend genoemd. De term schietend betekent dat het water zo snel stroomt, dat benedenstroomse verstoringen zich niet tegen de stroom in kunnen voortplanten. Bij een Froude-getal kleiner dan 1 is het water stromend. Wanneer het Froude-getal precies 1 bedraagt, noemen we dat kritische stroming. In de meeste schaalmodellen is het Froude-getal maatgevend voor de opschaling naar de werkelijke grootte. De Froude-schaalwet voor het omrekenen van modelresultaten naar het prototype wordt gebruikt als de zwaartekracht de belangrijkste kracht is die de stroming bepaald. Dit is normaal gesproken het geval bij stroming in open waterlopen.

Het Reynolds-getal, de derde Pi-term, geeft een indicatie van het type van de stroming. Hoe groter het Reynolds-getal is, hoe turbulenter zal de stroming zijn. Het Reynolds-getal wordt gebruikt als de stroming wordt beïnvloed door wrijving langs lichamen. In dit onderzoek is dat het schaalmodel. Deze wrijving veroorzaakt turbulente effecten.

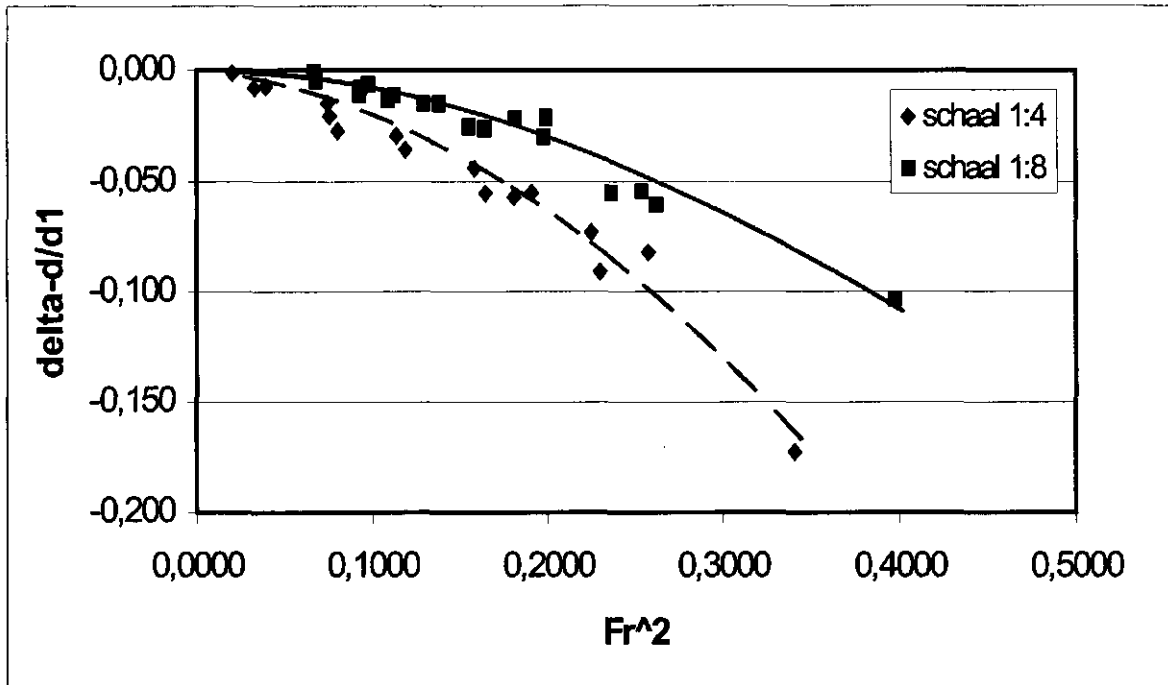
De vierde en laatste Pi-term karakteriseert de relatieve afwijkingen van de waterstand in de meetopstelling ten opzichte van de werkelijke waterstand.

Volgens dimensieanalyse kunnen deze vier Pi-termen op de volgende manier met elkaar in verband worden gebracht:

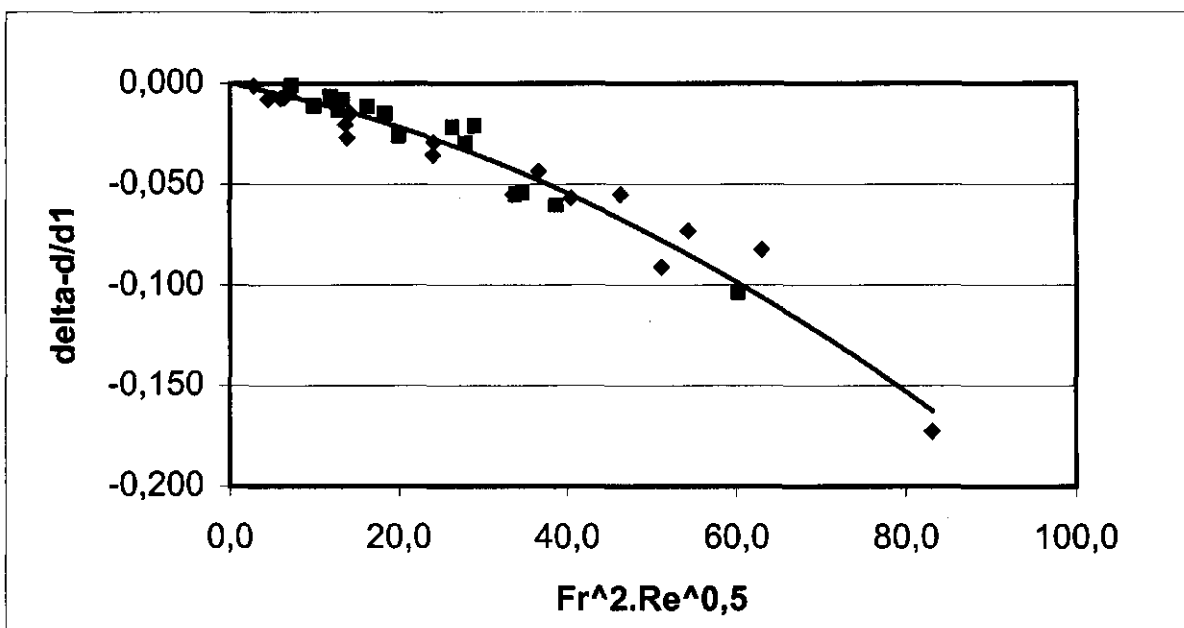
$$\Delta d/d_1 = f(n, v^2/(g \cdot d_1), (\eta \cdot v \cdot D)/\rho) \quad (Pi-4 = f(Pi-1, Pi-2, Pi-3))$$

Waarbij  $f(\dots)$  een niet nader gespecificeerd functioneel verband is.

Door het uitzetten van  $\Delta d/d_1$  tegen de andere Pi-termen is getracht achter dit verband te komen. In eerste instantie werd  $\Delta d/d_1$  uitgezet tegen Pi-2 (Froude<sup>2</sup>, figuur 10). Het blijkt dat de metingen van de twee schaalmodellen een duidelijk verschil vertonen. In tweede instantie is  $\Delta d/d_1$  uitgezet tegen verschillende combinaties van de resterende Pi-termen. Hieruit bleek dat  $n$ , de fractie van het door de model opstelling geblokkeerde oppervlak van de stroomgoot, geen belangrijke bijdrage levert aan de gemeten verschillen tussen de schaalmodellen. Het bleek dat het Reynolds-getal wel een duidelijke relatie met de afwijkingen had. Uit het oogpunt van ervaring is gekozen voor een multiplicatief verband tussen enerzijds  $\Delta d/d_1$ , en anderzijds het Froude- en het Reynolds-getal. In figuur 11 zijn alle metingen van de twee schaalmodellen uitgezet.



**Figuur 10**  $\delta d$  als functie van  $Fr^2$  voor de metingen aan beide schaalmodellen



**Figuur 11**  $\delta d$  als functie van  $Fr^2 Re^{0,5}$  voor de metingen aan beide schaalmodellen

Het bleek dat het functioneel verband:

$$\frac{\Delta d}{d_1} = f(Fr^2 \cdot Re^{0.5})$$

de verschillen tussen de schaalmodellen goed kan verklaren. In de figuur is ook een kwadratische regressielijn tussen  $\Delta d/d_1$  en  $Fr^2 \cdot Re^{0.5}$  ingetekend:

$$y = -0,0000137 x^2 - 0,000817 x$$

$$\text{waarbij: } x = Fr^2 \cdot Re^{0.5}$$

$$y = \Delta d/d_1$$

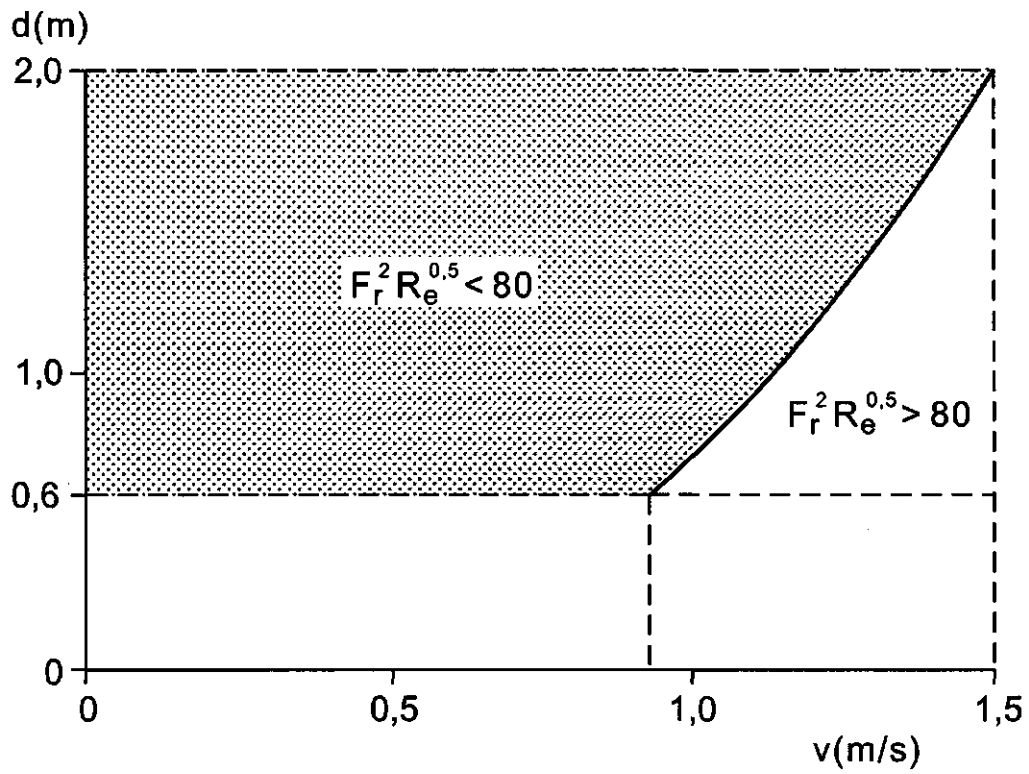
De standaard afwijking in de coëfficiënt voor  $x^2$  bedroeg 0,0000021 en voor  $x$  0,000116.

Met behulp van de bovengenoemde vergelijking valt nu het relatieve verschil tussen de gemeten waterstand in de meetopstelling en de waterstand buiten de meetopstelling te berekenen. Dit verband houdt rekening met (turbulente) stromingseffecten rond de meetopstelling (het Reynolds-getal) en de stromingstoestand van het water buiten de meetopstelling. Doordat de vergelijking dimensieloos is, en er rekening is gehouden met schaafeffecten, geldt deze vergelijking voor verschillende diameters van de meetbuis.

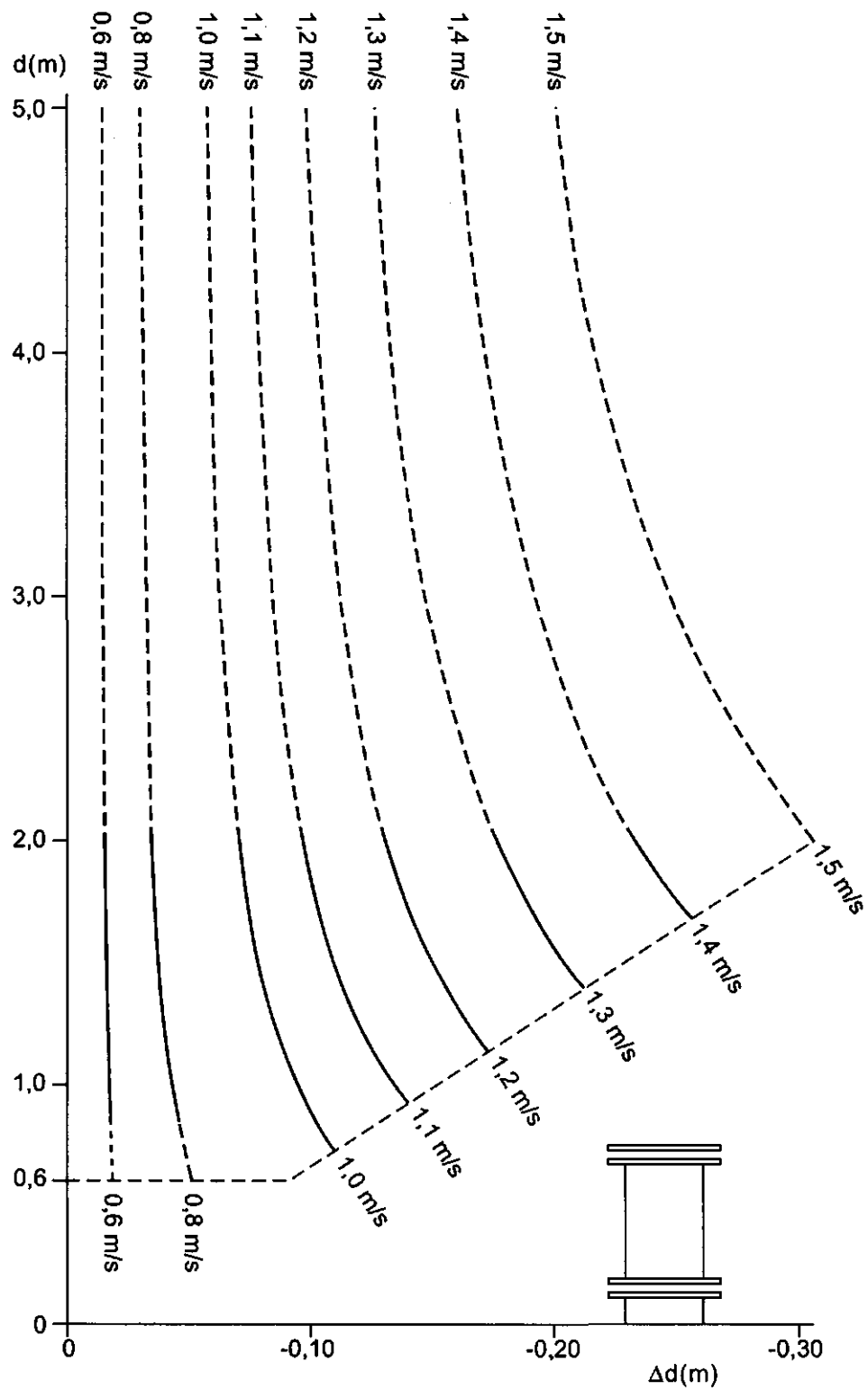
Met behulp van de verkregen regressie vergelijking is voor een aantal stroomsnelheden tot maximaal 1,5 m/s en waterdieptes variërend van 0,6 tot 5,0 m de waarde van  $\Delta d$  berekend voor de meetopstelling zoals die is voorzien in het veld en is gerealiseerd bij Driel (figuur 13). Hierbij is voor de waarde van  $Fr^2 Re^{0.5}$  een maximum aangehouden van 80, omdat extrapolatie buiten de in het laboratorium gemeten waarden gezien de regressievergelijking tot onrealistische waarden kan leiden voor hogere waarden. In figuur 12 is aangegeven welke combinaties van stroomsnelheid en waterhoogte zich boven en beneden deze grenswaarde van 80 bevinden. Hoewel bij waterhoogtes groter dan ca. 2,0 m de waarden van  $Fr^2 Re^{0.5}$  lager dan 80 zijn, is dit toch een gebied waarvoor geen metingen zijn verricht in het laboratorium. Echter is hier wel geëxtrapoleerd, omdat het realistisch is dat bij toenemende waterhoogte de invloed van de meetopstelling steeds geringer zal worden. In figuur 13 zijn de lijnen boven een waterhoogte van ca. 2,0 m gestippeld weergegeven.

De lijnen op de hoogte van de bovenste flens, waar zoals eerder vermeld afwijkende (lagere) waarden van  $\Delta d$  werden geconstateerd zijn eveneens gestippeld.

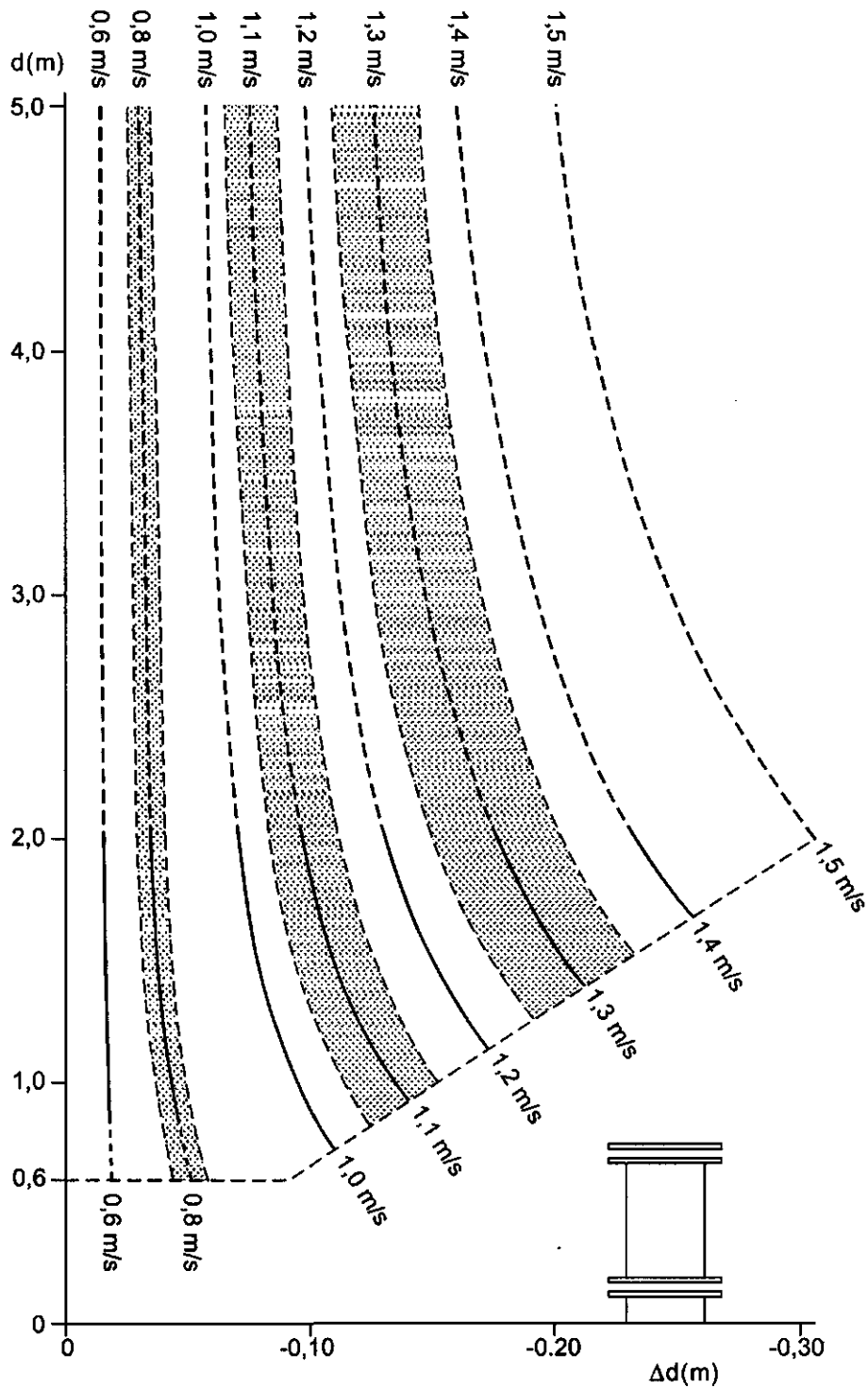
Het gevonden verband in de regressielijn tussen  $y$  en  $x$  is afhankelijk van de metingen die aan de modellen zijn verricht. Het aantal metingen beïnvloedt de precisie van de coëfficiënten in de regressievergelijking tussen  $y = \Delta d/d_1$  en  $x = Fr^2 Re^{0.5}$ . Om de betrouwbaarheid van de regressielijn bij de huidige metingen aan te geven is in figuur 14 gearceerd het gebied aangegeven waarbinnen de afwijkingen van deze regressielijn bij omrekening verwacht kunnen worden. Dit is als voorbeeld bij drie snelheden ( $v=1,3$ ,  $v=1,1$  en  $v=0,8$  m/s) gedaan, waarbij de regressiecoëfficiënten met de eerder vermelde bijbehorende standaard fout zijn verhoogd en verlaagd.



**Figuur 12** De waarde van  $Fr^2 Re^{0.5} = 80$  bij verschillende combinaties van de stroomsnelheid  $v$  en de waterdiepte  $d$



**Figuur 13** Uit de regressielijn van figuur 11 berekende waarden van  $\Delta d$  voor het prototype bij verschillende waterdiepten en een aantal stroomsnelheden.



**Figuur 14** Uit de regressielijn van figuur 11 berekende waarden van  $\Delta d$  voor het prototype bij verschillende waterdiepten en een aantal stroomsnelheden, inclusief de betrouwbaarheidsintervallen bij de stroomsnelheden 1,3 m/s, 1,1 m/s en 0,8 m/s, wanneer de regressiecoëfficiënten met de standaard fout worden verhoogd en verlaagd.

## 5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 5.1 Conclusies

- Voor alle uitgevoerde metingen bleek de in de meetopstelling gemeten waterhoogte lager te zijn dan de werkelijke waterhoogte.
- Waarden voor de relatieve waterstandsverlaging  $\Delta d/d_1$  zijn als resultaat van modelonderzoek en dimensie-analyse in figuur 11 gegeven als functie van  $Fr^2 Re^{0,5}$ . Met de hieruit verkregen regressie vergelijking geeft figuur 13 de te verwachten waterstandsverlaging  $\Delta d$  als functie van de waterdiepte  $d_1$  (0,6 – 5,0 m) en de stroomsnelheid (maximaal 1,5 m/s), waarbij een maximum is gesteld aan de waarde van  $Fr^2 Re^{0,5}$  van 80.
- Wanneer de waterstand ongeveer gelijk staat met de bovenste spleet, is de stroming bijzonder complex. In figuur 13 is dit traject van enkel cm's gestippeld weergegeven, omdat de afwijkingen daar niet voldoen aan de afwijkingen zoals berekend met de gevonden regressielijn. Wel is geconstateerd dat de afwijkingen in het betreffende traject geringer zijn dan juist erboven en eronder.
- De gevonden afwijkingen in de meetopstelling ten opzichte van de waterstand buiten de meetopstelling lijken op het eerste gezicht aanzienlijk. De grootste afwijkingen treden echter op bij de laagste waterstanden. Vermoedelijk zullen de stroomsnelheden in de uiterwaard bij deze waterstanden niet al te hoog zijn, zodat de hoogste weergegeven afwijkingen ook niet zullen voorkomen.
- Bij een stroomsnelheid van ca. 0,6 m/s liggen de hoogste te verwachten afwijkingen in de orde van grootte van de gewenste meetnauwkeurigheid, namelijk 0,025 m. Hierbij is echter geen rekening gehouden met nauwkeurigheden die te maken hebben met de drukopnemer en de installatie daarvan.
- De plaats van de drukopnemer in het prototype heeft pas invloed op de in de meetopstelling gemeten waterhoogte als deze zich dichterbij de spleten bevindt.
- Metingen aan spleetgroottes overeenkomende met 0,02 en 0,04 m in het prototype gaven geen significante verschillen te zien (figuur 4 en 5). Bij een spleetgrootte overeenkomende met 0,06 m in het prototype werden wel kleine verschillen geconstateerd. Bovendien nam de turbulentie in de meetopstelling bij deze spleetgrootte aanzienlijk toe.
- Omdat de gemeten waterhoogte in de meetopstelling hoofdzakelijk wordt bepaald door het stromingspatroon rondom de meetopstelling, is te verwachten dat verschillen in de verhouding van de stroomsnelheden ter hoogte van de twee spleten, veroorzaakt door bijvoorbeeld verschillende bodemruwheden, slechts geringe invloed zullen hebben op de waarde van  $\Delta d$ . Eerst bij gehele verstopping van één spleet of beide spleten door bijvoorbeeld drijvend vuil treden aanzienlijk grotere afwijkingen op (figuren 7a, 7b en 7c).



Uit modelonderzoek is gebleken dat de stroming langs verticaal staande ronde buizen niet zondermeer op te schalen is naar de werkelijke situatie. Hierin meespelende effecten zijn de volgende:

- turbulentie en de daarmee samenhangende drukverdeling rondom de buis
- daling van de waterstand direct achter de buis

In het onderzochte model speelt bovendien de stroming door de spleten aan de onder- en bovenzijde een rol.

Middels een theoretische (dimensie)analyse is gebleken dat de waterstandsverlaging in de meetopstelling een primaire relatie heeft met het Reynolds-getal en dat het blokkerings-effect (geringe gootbreedte) slechts van ondergeschikt belang is.

## 5.2 Aanbevelingen

- De stroming rondom een cilindervormig voorwerp en de daarmee samenhangende drukverdeling varieert sterk met het Reynolds-getal en dus met de stroomsnelheid. Door de vorming van wervels achter de cilinder kan de stroming zeer instabiel worden. Deze instabiele stroming wordt gekenmerkt door een afwisseling van wervels aan de linker- en rechterkant achter het model. Uit dat oogpunt is een andere vormgeving die een stabiel stromingspatroon geeft aan te bevelen. Een vormgeving die rekening houdt met de richting van de stroming kan voorkomen dat een instabiel stromingspatroon ontstaat. Wanneer de richting van de stroming niet bij voorbaat bekend is, kan voor een ontwerp worden gekozen dat voorkomt dat afwisselend aan de linker- en rechterkant wervels optreden. Dit zou kunnen door een kunstmatige ruwheid op de buis aan te brengen. De putjes in een golfbal zijn een voorbeeld van zo'n ruwheid. Zonder nader onderzoek is het niet mogelijk uitspraken te doen over de mate van ruwheid of de vorm ervan.
- De twee spleten aan de onder- en bovenzijde van de meetbuis zorgen voor een complex stromingspatroon in en rond de meetbuis. Door deze spleten te vervangen door ringen of spiralen van gaten in de meetbuis, verwachten wij dat directe effecten, zoals het net wel of net niet binnendringen van water door de bovenste spleet, minder effect zullen hebben. De effecten van turbulentie rondom de buis zullen echter onveranderd blijven bestaan, tenzij er dermate veel gaten in de meetopstelling worden aangebracht, dat deze gedeeltelijk permeabel is voor de stroming. Zonder nader onderzoek kan hier geen uitspraak over worden gedaan.
- In dit onderzoek is geen aandacht besteed aan de combinatie van drukopnemer en meetopstelling. In het bijzonder de meetfrequentie van de drukopnemer, golfslag door wind en scheepvaart en wisselende stromingssituaties kunnen de meetuitkomsten beïnvloeden.
- Een meetopstelling die opgesteld staat in de baan van het stromende water en dus de stroming blokkeert, zal afhankelijk van het blokkerend oppervlak en de vormgeving altijd het stromingspatroon verstoren en de meting beïnvloeden. Het is daarom aan te bevelen na te denken over andere meetmethoden voor het meten van waterhoogtes,

waarbij geen of slechts een opstelling van geringe afmetingen in het stromende water nodig is. Te denken valt hierbij bijvoorbeeld aan akoestische systemen of radarsensoren.

Wanneer drukopnemers worden toegepast is het te overwegen een zodanige opstelling te ontwerpen dat er geen delen boven maaiveld uitsteken.

## 6. LITERATUUR

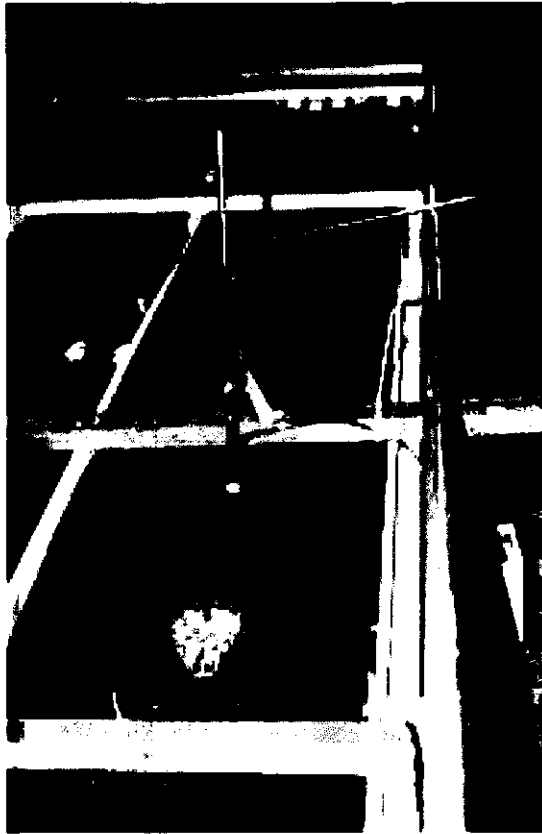
Dommerholt, A. "Afwijkingen in gemeten waterstanden -- waterstandsmetingen met peilbuis en intakepipe", Rapport 29, vakgroep Waterhuishouding, Landbouwwuniversiteit Wageningen, 1992.

Douglas, J. F.; Gasiorek, J. M. and Swaffield, J. A. Fluid Mechanics, 4th ed., Prentice Hall, ISBN 0-582-41476-8, 2001.

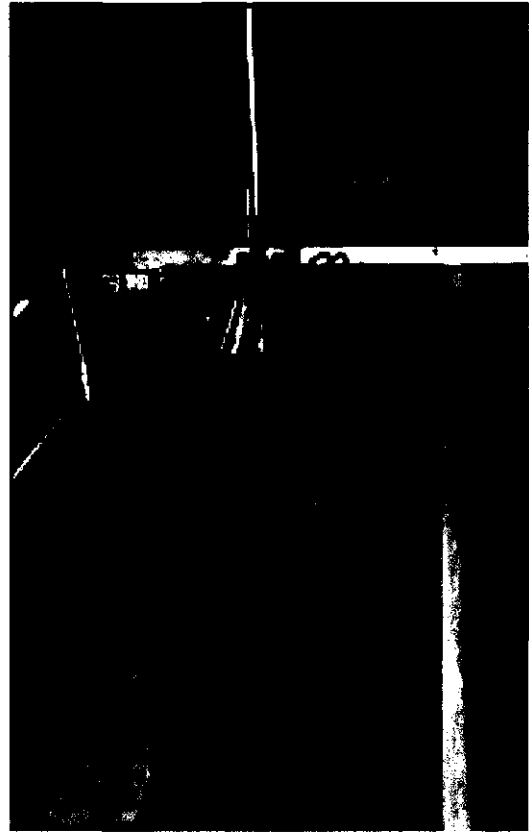
Okamoto, S. and Yagita, M., Flow past circular cylinder of finite length placed normal to ground plane in uniform shear flow, Bulletin of JSME, Vol. 27, No. 229, July 1984.

Panton, R. L. Incompressible Flow, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-89765-5, 1984.

## 7. FOTOPAGINA'S



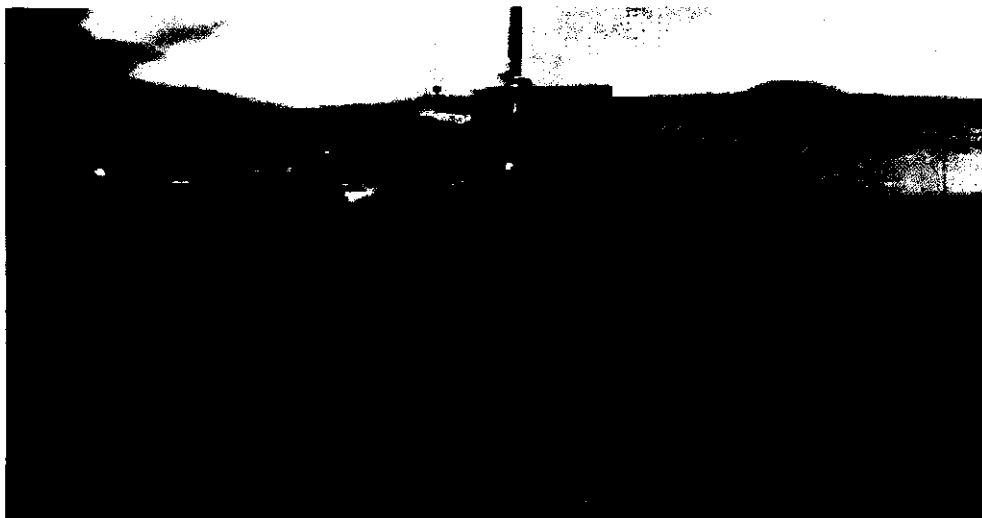
**Foto 4** Overzicht meetopstelling in stroomopwaartse richting



**Foto 5** Overzicht meetopstelling in stroomafwaartse richting



**Foto 6** Model 1:4 met statische buis,  $v = 0,63$  m/s en  $d \approx 0,17$  m



**Foto 7** Model 1:4,  $v = 0,63$  m/s en  $d \approx 0,17$  m



**Foto 8** Model 1:4,  $v = 0,54$  m/s en  $d \approx 0,19$  m



**Foto 9** Model 1:4,  $v = 0,69$  m/s en  $d \approx 0,23$  m



**Foto 10** Model 1:4,  $v = 0,73$  m/s en  $d \approx 0,20$  m



**Foto 11** Model 1:4,  $v = 0,73$  m/s en  $d \approx 0,20$  m, bovenaanzicht

## BIJLAGE I

**Tabel I-1 Meetresultaten van het schaalmodel 1:4**

nr.	$d_1$ (m)	$v$ (m/s)	$\Delta d$ (m)	$\Delta d_O$ (m)	$\Delta d_B$ (m)	$\Delta d_{OB}$ (m)
<b>Spleten tussen flenzen: 5 mm</b>						
2	0,1611	0,734	-0,0278	-0,0363		
3	0,1648	0,610	-0,0150	-0,0207		
4	0,1633	0,513	-0,0090	-0,0129		
5	0,1700	0,366	-0,0046	-0,0066		
6	0,1647	0,231	-0,0013	-0,0020		
7	0,2778	0,163	0,0002			
8	0,2894	0,241	-0,0003			
9	0,2830	0,331	-0,0020			
10	0,2742	0,448	-0,0041	-0,0055	-0,0072	-0,0072
11	0,2761	0,555	-0,0081	-0,0104	-0,0129	-0,0127
12	0,2779	0,657	-0,0122	-0,0155	-0,0190	-0,0195
13	0,2816	0,726	-0,0155	-0,0188	-0,0232	-0,0226
14	0,2340	0,719	-0,0171			-0,0255
15	0,2154	0,738	-0,0177	-0,0249	-0,0290	-0,0310
16	0,2162	0,619	-0,0123	-0,0167	-0,0191	-0,0193
17	0,2191	0,505	-0,0078			-0,0130
18	0,2152	0,400	-0,0044			-0,0068
19	0,2165	0,290	-0,0016			-0,0028
20	0,2203	0,183	0,0006			0,0001
21	0,2007	0,196	-0,0003			
22	0,1985	0,328	-0,0032			
23	0,2005	0,454	-0,0060			
24	0,1984	0,578	-0,0111			
25	0,1955	0,729	-0,0151	-0,0226	-0,0234	-0,0342
26	0,1851	0,711	-0,0103			
27	0,1900	0,560	-0,0074			
28	0,1891	0,442	-0,0060			
29	0,1887	0,326	-0,0033			
30	0,1906	0,197	-0,0003			
<b>Spleten tussen flenzen: 10 mm</b>						
31	0,1573	0,744	-0,0243			
32	0,1541	0,570	-0,0137			
33	0,1928	0,687	-0,0129			
34	0,1941	0,530	-0,0075			
35	0,2818	0,580	-0,0092			
36	0,2741	0,744	-0,0164			
<b>Spleten tussen flenzen: 15 mm</b>						
37	0,2771	0,750	-0,0185			
38	0,2788	0,575	-0,0093			
39	0,2034	0,680	-0,0137			
41	0,1628	0,735	-0,0309			
42	0,1665	0,557	-0,0142			

$d_1$  waterdiepte juist bovenstreams van het model

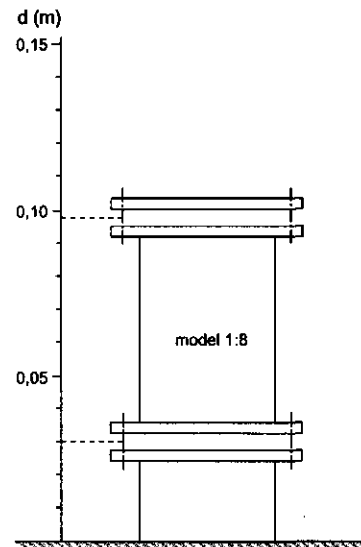
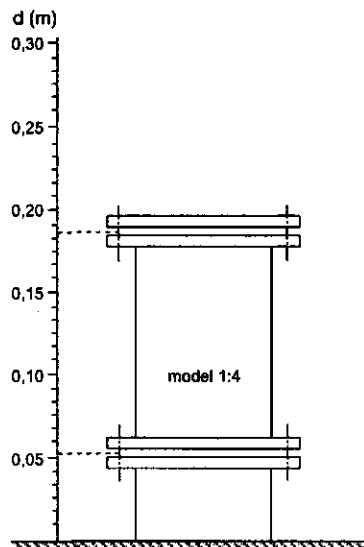
$v$  stroomsnelheid

$\Delta d$  waterdiepte gemeten in het model – waterdiepte  $d_1$

- $\Delta d_O$  waterdiepte gemeten in het model – waterdiepte  $d_1$ , onderste spleet afgedekt  
 $\Delta d_B$  waterdiepte gemeten in het model – waterdiepte  $d_1$ , bovenste spleet afgedekt  
 $\Delta d_{OB}$  waterdiepte gemeten in het model – waterdiepte  $d_1$ , beide spleten afgedekt.

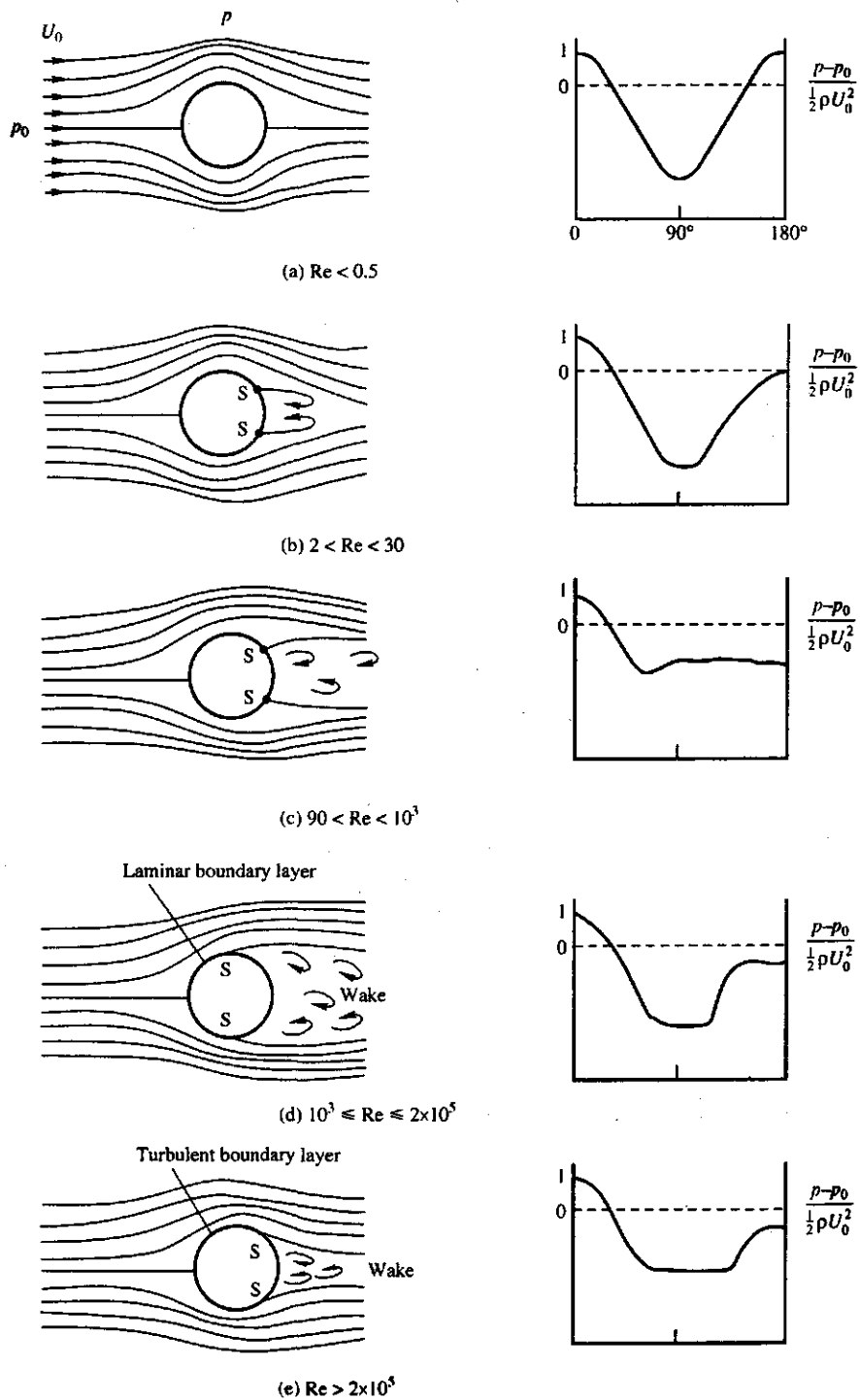
Tabel I-2 Meetresultaten van het schaalmodel 1:8

nr.	$d_1$ (m)	$v$ (m/s)	$\Delta d$ (m)
<b>spleet tussen flenzen: 5 mm</b>			
1	0,2869	0,512	-0,0023
2	0,2445	0,519	-0,0028
3	0,1995	0,503	-0,0030
4	0,1566	0,528	-0,0034
5	0,1280	0,498	-0,0038
6	0,1127	0,511	-0,0062
7	0,1156	0,545	-0,0070
9	0,0841	0,573	-0,0087
10	0,0866	0,464	-0,0047
11	0,0841	0,368	-0,0022
12	0,0906	0,287	-0,0010
13	0,1148	0,418	-0,0029
14	0,1116	0,345	-0,0015
15	0,1121	0,274	-0,0005
16	0,1370	0,300	0,0001
17	0,1421	0,369	-0,0009
18	0,1420	0,438	-0,0021
19	0,1420	0,527	-0,0030





## BIJLAGE II



**Figuur 15** Enkele voorbeelden van stroming rond een cilinder met de bijbehorende drukverdeling aan de wand van de cilinder voor verschillende Reynolds-getallen (Douglas et al, Fluid Mechanics)