Modelonderzoek van de Venturi-meetdoorlaat

Een vispasseerbare debietmeetinrichting

A. Dommerholt, W. Boiten en R.T. Oosterhoff

Rapport 106

Sectie Waterhuishouding
Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen
Internet: www.dow.wau.nl/whh

ISSN 0926-230X

1640875

INHOUDSOPGAVE

blz.

1.	**INLEIDING**	1
2.	**ALGEMEEN**	2
3.	**PRINCIPE VAN DE MEETMETHODE**	3
4.	**BESCHRIJVING VENTURI-MEETDOORLAAT**	4
5.	**BESCHRIJVING MEETOPSTELLING IN HET LABORATORIUM**	6
6.	**GEGEVENSVERWERKING**	14
7.	**MEETPROGRAMMA**	18
	7.1 Meetpunten in drijver	18
	7.2 Meetpunten in drempel	18
8.	**MEETRESULTATEN**	20
	8.1 Meetpunten in drijver	20
	8.1.1 Symmetrische aanstroming	20
	8.1.2 Asymmetrische aanstroming	22
	8.1.3 Plaats meetopeningen in landhoofden	24
	8.2 Meetpunten in drempel	25
	8.2.1 Metingen met korte drempel	25
	8.2.2 Metingen met verlengde drempel bovenstrooms	28
	8.2.3 Metingen met verlengde drempel boven- en benedenstrooms	32
9.	**NAUWKEURIGHEID VAN DE BEPALING VAN HET DEBIET**	36
10.	**CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN**	39
11.	**FOTOPAGINA'S**	42

1. INLEIDING

Op 16 februari 2000 verleende **Agro Research Instruments** (de naam is begin 2001 gewijzigd in **ENRIN (Environmental Research Instruments)**) te Wageningen per brief nr. 200002008 opdracht aan de Sectie Waterhuishouding van Wageningen Universiteit tot het hydraulisch testen van een model van een vispasseerbare Venturi-meetdoorlaat.
De opdracht was conform de offerte 20 007 AD/hw dd. 5 januari 2000.

Ir. A.P. van Loon van ENRIN heeft de afgelopen jaren een idee uitgewerkt voor de constructie van een doorlaat met een variabele opening door middel van een drijver, waarmee met een redelijke nauwkeurigheid debieten kunnen worden gemeten. Door de variabele opening is het bovendien mogelijk de stroomsnelheid in de doorlaat zodanig te reguleren, dat bepaalde stroomsnelheden niet worden overschreden, zodat een goede vispasseerbaarheid in het merendeel van de gevallen gehandhaafd blijft.
Tijdens een aantal gesprekken bij de Sectie Waterhuishouding heeft dit idee steeds vastere vormen aangenomen, hetgeen uiteindelijk heeft geleid tot het uitvoeren van een hydraulisch modelonderzoek. Bij bevredigende resultaten was het de bedoeling om octrooi aan te vragen op de meetmethode. Inmiddels is dit gebeurd.

De Machinefabriek Wageningen B.V. (MFW) participeerde in het project voor wat betreft het constructieve deel. Het model van de meetdoorlaat zelf werd dan ook aldaar gefabriceerd.

Aangezien het project gedeeltelijk is gefinancierd door de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), werd een begeleidingscommissie ingesteld bestaande uit vertegenwoordigers van waterbeheerders en deskundigen op het gebied van vistrek en stromingsleer. Gedurende de meetperiode is deze commissie een drietal keren bijeengekomen om de resultaten te evalueren en waar nodig het meetprogramma aan te passen of aan te vullen.

Het modelonderzoek heeft plaatsgevonden in het hydraulica laboratorium van de Sectie Waterhuishouding in "De Nieuwlanden" te Wageningen in de loop van 2000 en de eerste maanden van 2001. Het merendeel van de metingen werd uitgevoerd door R.T. Oosterhoff, in het kader van een afstudeervak hydraulica. Het gehele onderzoek stond onder leiding van ing. A. Dommerholt van de Sectie Waterhuishouding en ing W. Boiten (gastmedewerker bij de Sectie Waterhuishouding). Tijdens het modelonderzoek vond regelmatig overleg met de opdrachtgever plaats, die ook verantwoordelijk was voor het data-registratie gedeelte van de meetopstelling en eventuele aanpassingen en wijzigingen hieraan.

2. ALGEMEEN

Het zowel nauwkeurig meten van afvoeren in open waterlopen als deze zelfde waterlopen geschikt houden of maken voor vismigratie is in veel gevallen strijdig.
Voor het meten van afvoeren bestaan verschillende methoden (zie ook STOWA-rapport 94-13 "Handboek debietmeten in open waterlopen"). Enkele methoden met de consequenties voor vismigratie zijn:

- *Meetstuwen en meetgoten*: Het principe van deze constructies is dat boven de overlaat of in de vernauwing van de meetgoot kritische stroming optreedt, waardoor een eenduidige relatie tussen de bovenstroomse waterstand en het debiet ontstaat. Kritische stroming houdt in, dat de bijbehorende stroomsnelheid zodanig hoog is, dat dit een onoverkoombaar obstakel voor de meeste migrerende vis betekent. Als norm wordt meestal een maximum stroomsnelheid van 1 m/s gehanteerd. In veel gevallen zal er bovendien een aanzienlijk hoogteverschil bestaan tussen de boven- en benedenstroomse waterstand.
- *Stage-discharge methode*: Bij deze methode bestaat er een verband tussen de waterstand in een waterloop en het debiet. Deze afvoerrelatie moet door metingen bij verschillende afvoeren ter plaatse worden vastgesteld. In de meeste gevallen zal het een aantal jaren duren alvorens dit is vastgesteld voor zowel lage als hoge afvoeren. Wanneer de bodemligging niet stabiel is door erosie of sedimentatie en de ruwheid van de waterloop sterk varieert gedurende een seizoen is dit echter een onbetrouwbare methode, dus maar in een beperkt aantal gevallen bruikbaar. Voor vismigratie vormt deze methode geen belemmering.
- *Akoestische methode*: Een akoestisch debietmeetstation vormt eveneens geen belemmering voor vismigratie. De methode heeft ook zijn beperkingen, bijv. wat betreft de verhouding breedte-diepte van de waterloop. De verticale snelheidsverdeling dient goed bekend te zijn bij verschillende afvoeren voor een juiste bepaling van de gemiddelde stroomsnelheid.

De aanleg van allerlei soorten vistrappen in een by-pass naast (meet)stuwen resulteert in de vraag/behoefte om ook voor de vistrap een betrouwbare afvoer-relatie te hebben. Een laboratorium calibratie kan tot een goed resultaat leiden.
Vispassages functioneren echter meestal maar goed bij een beperkte range van afvoeren en dan nog alleen bij een juiste aanleg (denk hierbij bijv. aan een goede lokstroom).

ENRIN heeft met zijn ontwerp van de zogenaamde Venturi-meetdoorlaat getracht een betrouwbare afvoer-relatie te combineren met een goede vispasseerbaarheid voor een grote variatie in afvoeren en voor verschillende vissoorten.

3. PRINCIPE VAN DE MEETMETHODE

Het meetprincipe van de Venturi-meetdoorlaat berust op de energiewet, beter bekend als de Wet van Bernoulli. Deze is geldig bij een versnellende stroming. Wanneer over een korte afstand een toename van de stroomsnelheid optreedt, door bijv. het aanbrengen van een vernauwing in het dwarsprofiel van de waterloop, zal de totale hoeveelheid energie vóór en in de vernauwing gelijk zijn (er wordt aangenomen dat er geen wrijvings- en andere soorten van verliezen zijn). Wel vindt er een omzetting plaats van potentiële (druk, waterhoogte) naar kinetische energie (snelheid). De druk in de vernauwing zal lager zijn dan vóór de vernauwing waar een veel lagere stroomsnelheid heerst. Door de druk (=waterhoogte) vóór de vernauwing op een punt te meten waar de snelheid zeer klein is ($v \approx 0$, waarbij v de gemiddelde stroomsnelheid is), is het verschil in druk, gemeten vóór en in de vernauwing volledig toe te schrijven aan de omzetting in kinetische energie in de vernauwing ($= v^2/2g$). Hieruit kan de gemiddelde stroomsnelheid in de vernauwing worden bepaald. Vermenigvuldiging met het doorstroomde oppervlak levert dan het debiet ($Q = v.A$).
In formulevorm:

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_1 + \frac{v_2^2}{2g}$$

waarbij:

index 1	: dwarsprofiel vóór de vernauwing
index 2	: dwarsprofiel in de vernauwing
P	: druk op een bepaald punt in de vloeistof (N/m^2)
ρ	: dichtheid van de vloeistof (kg/m^3)
g	: versnelling van de zwaartekracht ($= 9{,}81\ m/s^2$)
z	: verticale afstand van waar P wordt gemeten tot een horizontaal referentievlak
v	: gemiddelde stroomsnelheid (m/s)

$P/\rho g$ wordt aangeduid als de *drukhoogte,* z als de *plaatshoogte* en $v^2/2g$ als de *snelheidshoogte.* De som van drukhoogte, plaatshoogte en snelheidshoogte heet *energiehoogte* (H). De som van drukhoogte en plaatshoogte heet ook wel *piëzometrische* hoogte of *stijghoogte* en komt bij een vrije waterspiegel, indien er geen stroming is, overeen met de waterhoogte. In een gesloten systeem zal door het aanbrengen van een stijgbuisje loodrecht op de stroomrichting, het water in dit buisje stijgen tot deze piëzometrische hoogte, vandaar ook de benaming stijghoogte.
Als in bovenstaande formule $P_1/\rho g + z_1$ wordt vervangen door h_1 (= waterhoogte vóór de vernauwing t.o.v. een horizontaal referentievlak) en $P_2/\rho g + z_2$ door h_2 (= stijghoogte in de vernauwing t.o.v. het referentievlak) en $v_1 \approx 0$ wordt verondersteld, volgt:

$$h_1 = h_2 + v_2^2/2g \quad \text{of} \quad v_2 = \sqrt{2g(h_1-h_2)}$$

4. BESCHRIJVING VENTURI-MEETDOORLAAT

De vernauwing in het dwarsprofiel van een waterloop die nodig is voor het meetprincipe zoals beschreven in hoofdstuk 3, wordt verkregen door twee landhoofden waardoor in de dwarsrichting een rechthoekige doorstroomopening ontstaat. Een verdere vernauwing wordt in verticale richting enerzijds gevormd door een tussen de landhoofden op de bodem aangebrachte drempel en anderzijds door een drijver op het wateroppervlak die in verticale richting vrij op en neer kan bewegen tussen de landhoofden (zie figuren in hoofdstuk 5 en fotopagina's).
Het geheel kan symmetrisch worden uitgevoerd waardoor het mogelijk is om het debiet in twee richtingen te meten.

De landhoofden zijn afgerond om te voorkomen dat er contractie ontstaat bij de instroming in de vernauwing teneinde energieverliezen zoveel mogelijk worden te beperken. De wand van het landhoofd is dubbelwandig uitgevoerd. De meetopeningen voor de hoogtemeting vóór de vernauwing zijn in de bovenstroomse zijde van het landhoofd aangebracht en staan in verbinding met de ruimte tussen de dubbele wand. Deze ruimte functioneert dus als "stilling well". Aangenomen mag worden dat de stijghoogte in deze stilling wells ongeveer gelijk is aan de energiehoogte. De situering van de meetopeningen wordt bij de meetopstelling besproken.

De drempel is in de stroomrichting gezien trapeziumvormig en heeft in het midden een horizontaal gedeelte. Deze vormgeving dient ervoor om extra stromingscontractie zoveel mogelijk te vermijden en om daarmee samenhangende energieverliezen zoveel mogelijk te beperken. Een andere reden voor deze afschuining is het scheppen van mogelijkheden voor vissoorten en amfibieën die zich dicht boven de bodem voortbewegen om de doorlaat te passeren.

De drijver heeft tot taak een goede afvoermeting en vispassage mogelijk te maken. Voor een goede afvoermeting mag de stroomsnelheid niet al te klein zijn, omdat anders de snelheidshoogte te klein wordt om nauwkeurig te kunnen meten. Anderzijds mag de stroomsnelheid niet te hoog worden omdat vissen dan de doorlaat niet meer kunnen passeren. Dit is erg afhankelijk van de soort vis. Als algemeen aanvaarde norm wordt een maximale stroomsnelheid van 1 m/s aangehouden. Met andere woorden, de drijver dient de stroomsnelheid in de doorlaat zodanig te reguleren, dat zoveel mogelijk aan deze voorwaarden wordt voldaan. Daarvoor is het nodig dat het gewicht van de drijver al naar de omstandigheden kan worden verhoogd of verminderd. Het is de bedoeling dat dit wordt gerealiseerd door water in of uit de drijver te pompen.

De geleiding van de drijver kan op verschillende wijzen geschieden. Tijdens het onderzoek is dit op twee manieren gebeurd. In de eerste opstelling is een drijver gebruikt met zijgeleiding die in sponningen in de landhoofden op en neer kon glijden. Een tweede drijver werd op zijn plaats gehouden door twee scharnierende armen die op de landhoofden waren gemonteerd. De twee armen staan onder een hoek met elkaar, waardoor slechts één beweging mogelijk is, namelijk de verticale beweging. Er is verder geen geleiding nodig, waardoor de zijwanden van de drijver en de landhoofden glad afgewerkt kunnen worden.

De meting van de stijghoogte in de vernauwing is voor twee varianten onderzocht.

- Meetopeningen in de bodem van de drijver. Deze methode hield in dat de meetpunten via flexibele leidingen verbonden moesten worden met de meetapparatuur die een vaste opstelling had in een van de landhoofden.
- Meetopeningen in de drempel.

Ook hier wordt uitgebreider op teruggekomen bij de beschrijving van de meetopstelling.

Bij bekende breedte van de doorlaatopening berust de bepaling van de afvoer in feite op twee metingen, nl. het verschil in de waterhoogtes h_1 en h_2 en de doorstroomhoogte tussen de drempel en de drijver.
Uit onderstaande tabel blijkt dat vooral de verschilmeting h_1-h_2 zeer nauwkeurig dient te geschieden, omdat het hier relatief kleine waarden betreft. Als ondergrens voor de snelheid bij de uit te voeren metingen is daarom gekozen voor 0,2 m/s.

v_2 (m/s)	h_1-h_2 ($=v_2^2/2g$) (m)
0,2	0,0020
0,4	0,0082
0,6	0,0183
0,8	0,0326
1,0	0,0510

Het energieverlies dat optreedt wanneer het water uitstroomt in het benedenstroomse pand, zal ten hoogste $v_2^2/2g$ bedragen, dus max. ca. 0,05 m. Hieruit blijkt dat het verval over deze meetdoorlaat slechts gering is. Wordt anderzijds een groter verval gecreëerd, door de drijver te verzwaren, dan zal de snelheid in de doorlaat groter worden dan het gehanteerde maximum van 1 m/s.

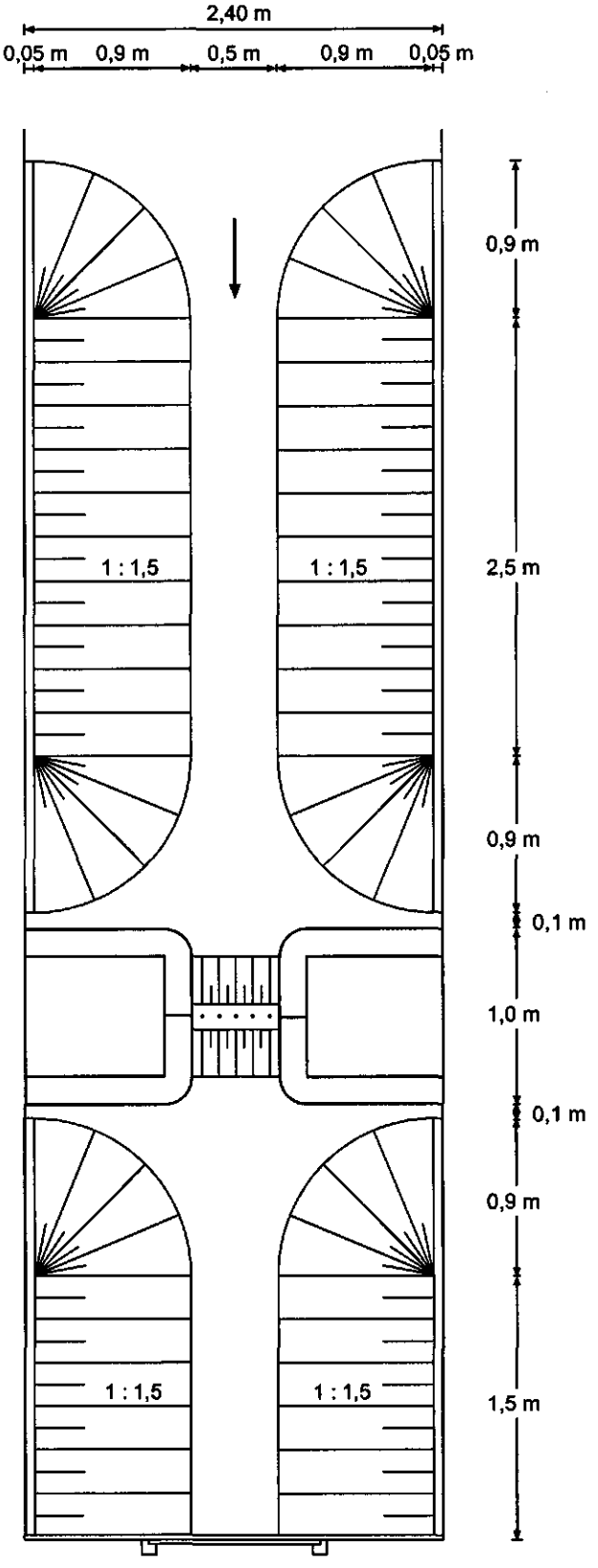
5. BESCHRIJVING MEETOPSTELLING IN HET LABORATORIUM

Het onderzoek is uitgevoerd in een modelgoot met een breedte van 2,40 m. Het dwarsprofiel van de bovenstroomse en benedenstroomse waterloop was trapeziumvormig met een bodembreedte van 0,50 m en een taludhelling van 1:1,5. De doorstroomopening tussen de landhoofden was eveneens ca. 0,50 m (zie figuur 1).
Door het talud op enige afstand voor en achter de landhoofden af te ronden, werd het dwarsprofiel juist voor en achter de landhoofden rechthoekig, zodat hier een soort "dode" hoek ontstond waar de snelheid nagenoeg nul werd. In beide landhoofden waren zes meetopeningen aangebracht op steeds grotere afstand van de doorstroomopening om te onderzoeken of de plaats van de meetopening invloed had op de meetresultaten (zie figuur 2). Door stroming ter plaatse van de meetopening is het mogelijk dat een ander niveau wordt gemeten dan bij (nagenoeg) stilstaand water. Bij stilstaand water is de energiehoogte per definitie gelijk aan de waterstand ter plaatse. In een variant van de meetopstelling is het trapeziumvormige dwarsprofiel doorgetrokken tot tegen het landhoofd aan, waardoor slechts één meetpunt (6a) in het landhoofd kon worden aangebracht.

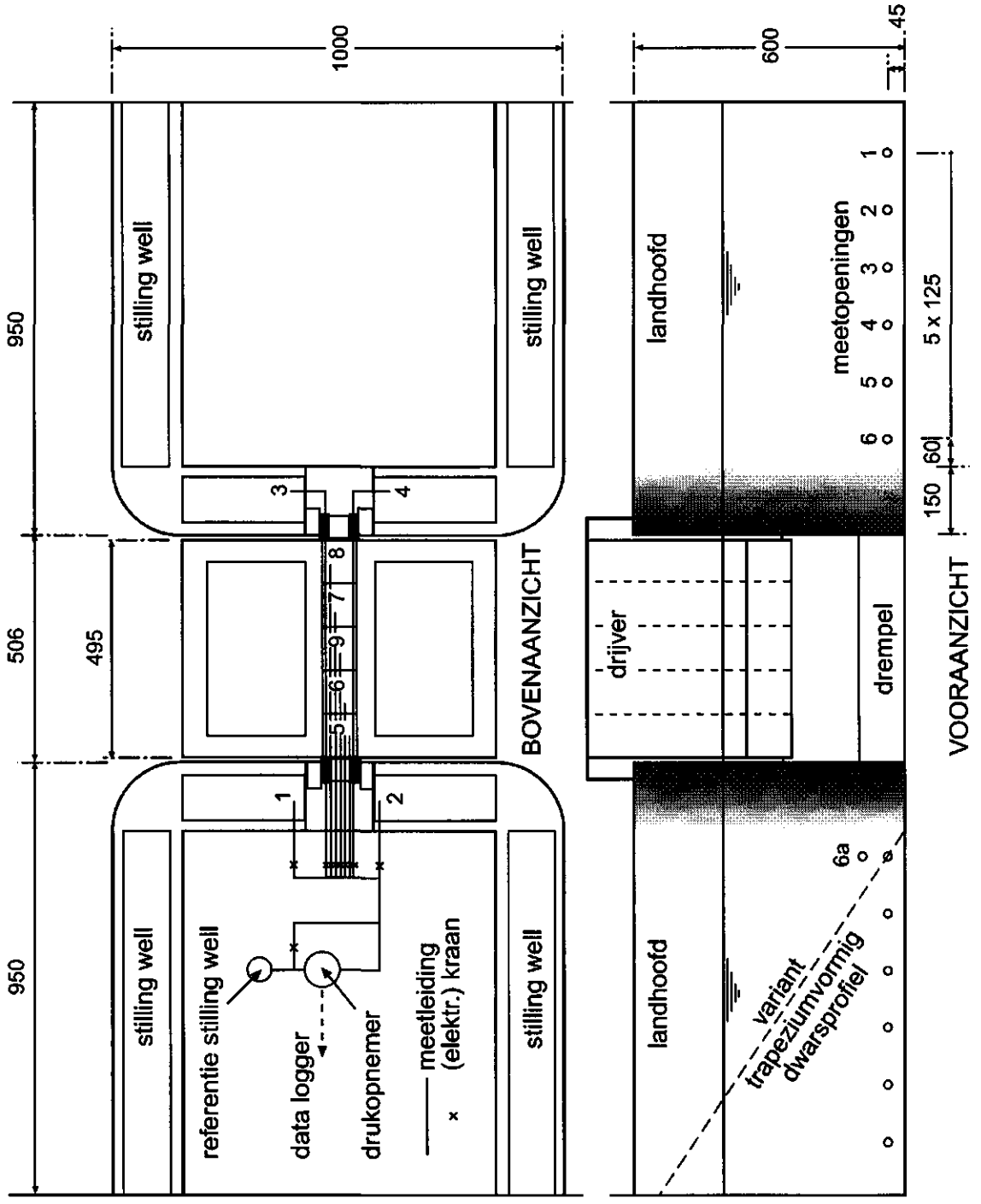
De maatvoering van de landhoofden en de oorspronkelijke drempel is weergegeven in de figuren 2 en 3. In een latere versie is de drempel eerst aan de bovenstroomse zijde verlengd en nog later ook aan de benedenstroomse zijde om deze weer symmetrisch te maken (figuur 5a).

Onderzocht zijn twee verschillende drijvers met ieder een andere methode van verticale geleiding. Daaraan gekoppeld werd ook een andere meetlocatie voor de stijghoogte in de vernauwing toegepast.

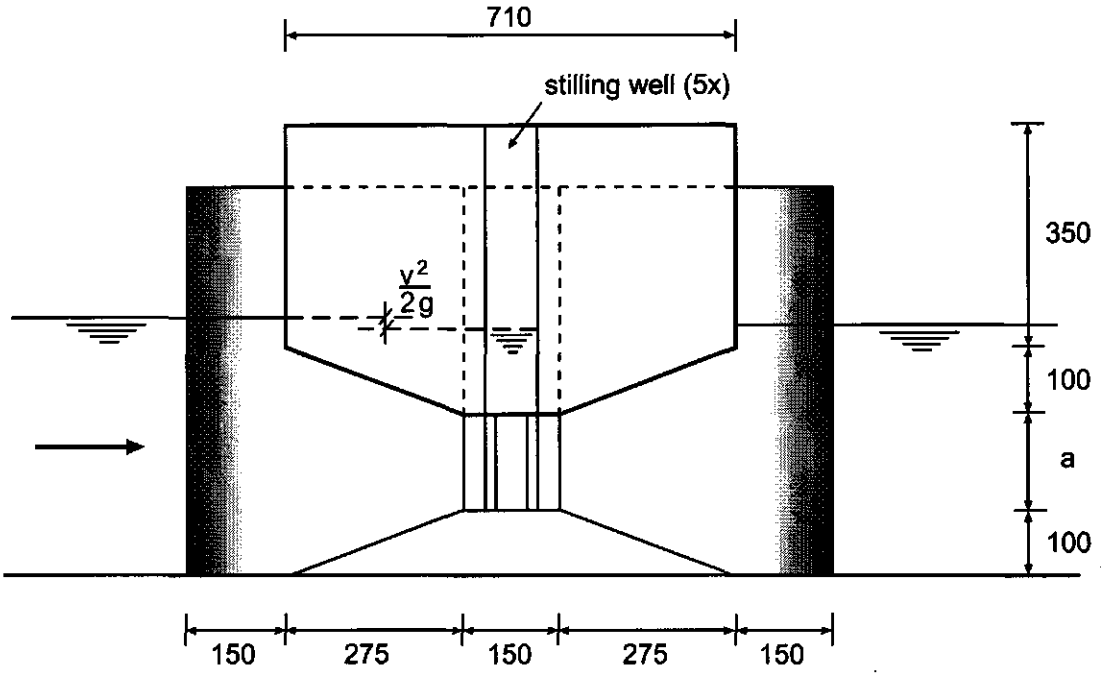
- De eerste drijver werd verticaal geleid door een aan de zijkanten van de drijver aangebracht kokerprofiel dat in een sponning in het landhoofd kon glijden. Doordat het water in horizontale richting druk op de drijver uitoefent, moet bij het stijgen en dalen van de drijver de wrijving worden overwonnen. Daardoor is het mogelijk dat deze beweging enigszins schokkerig verloopt. Bij deze drijver werd de stijghoogte in de vernauwing gemeten via meetpunten in de bodem van de drijver. In het midden van de drijver was over de volle breedte en de volle hoogte een ruimte met een breedte van 80 mm aangebracht, die in de dwarsrichting weer was verdeeld in vijf waterdicht van elkaar gescheiden gelijke compartimenten. In de bodem van ieder compartiment waren openingen aangebracht, waardoor ieder compartiment als stijgbuisje en als stilling well fungeerde. Ieder compartiment stond via een buisje in verbinding met de sponning in het landhoofd en was daar aangesloten op een flexibele slang die de druk overbracht naar een meetinstrument (drukverschilopnemer). Door deze verdeling in vijf secties in de dwarsrichting was het mogelijk te onderzoeken wat de invloed van een ongelijkmatige of niet-symmetrische snelheidsverdeling in de vernauwing zou zijn op de totale debietmeting.



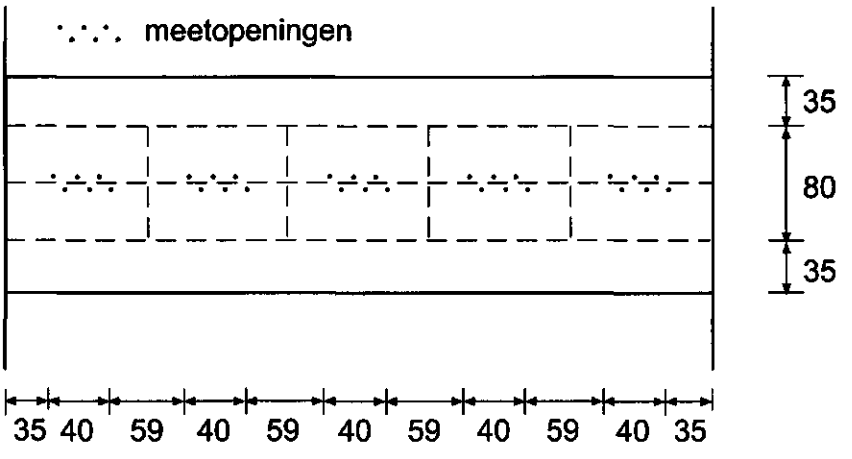
Figuur 1 Plattegrond meetgoot (zonder drijver, meetpunten in drempel)



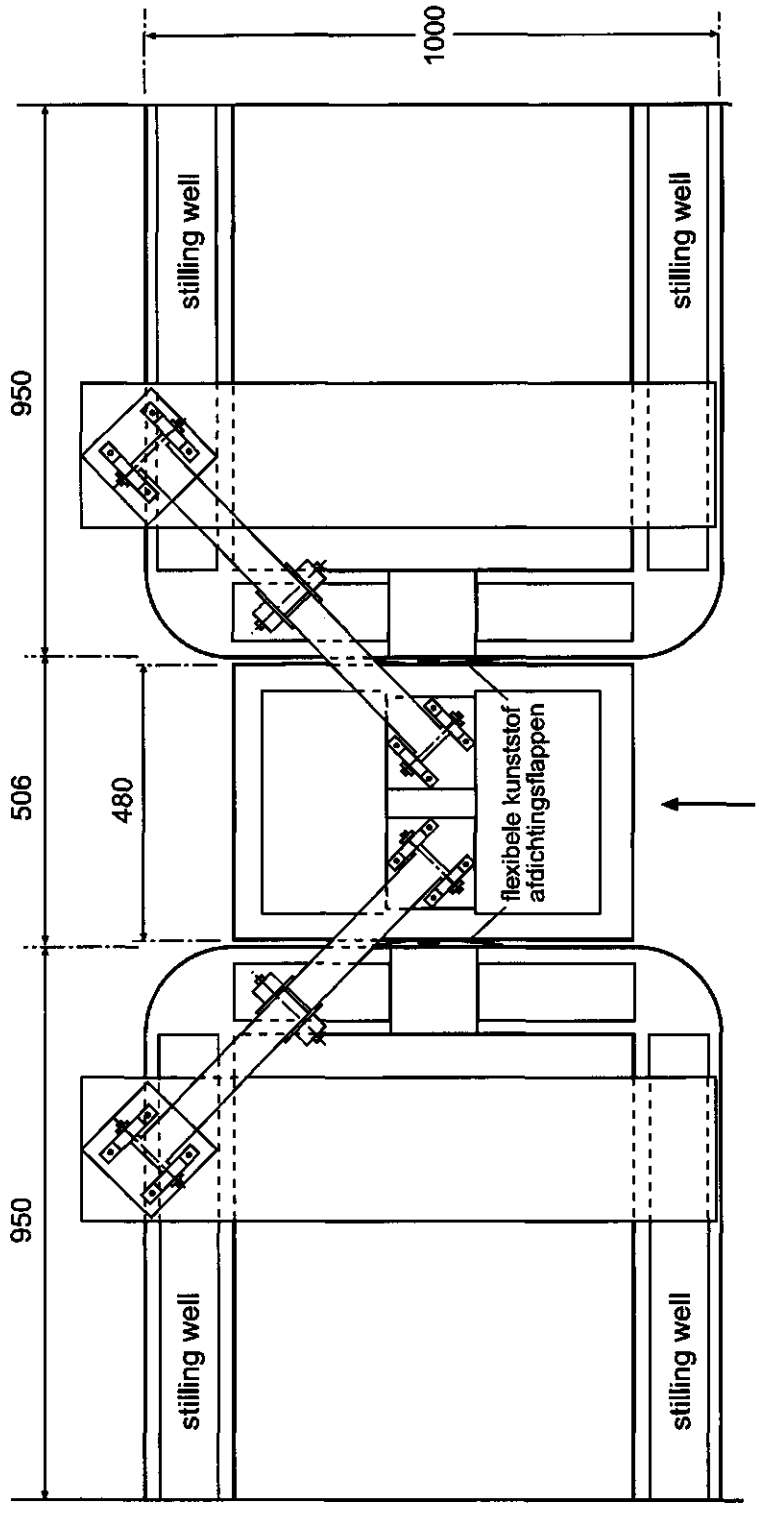
Figuur 2 Bovenaanzicht en vooraanzicht landhoofden en drijver met zijgeleiding (maten in mm)



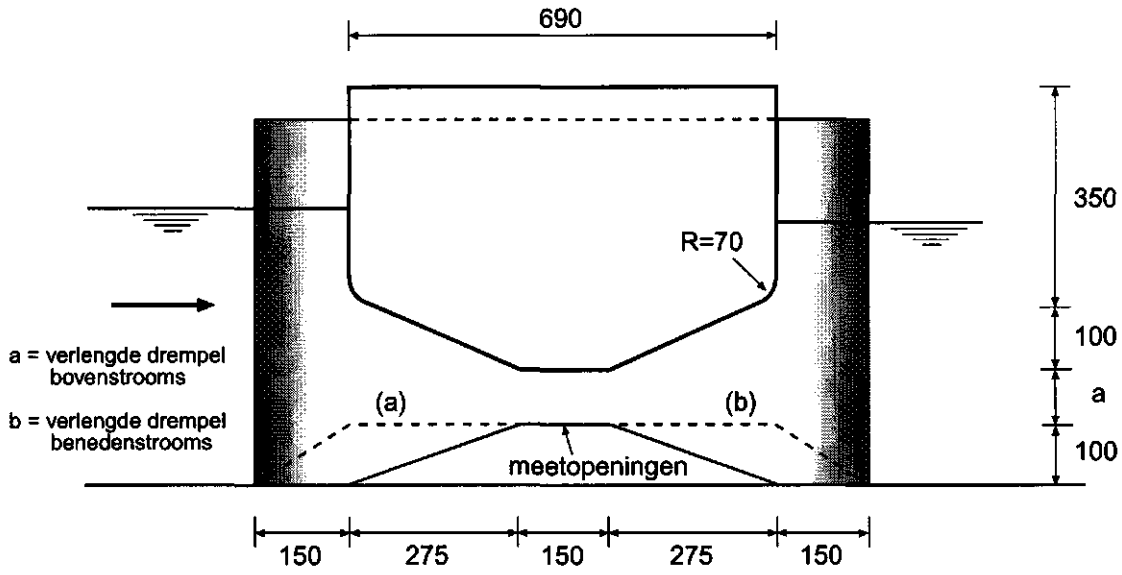
Figuur 3a Lengtedoorsnede van drijver met zijgeleiding en meetpunten in drijver (maten in mm)



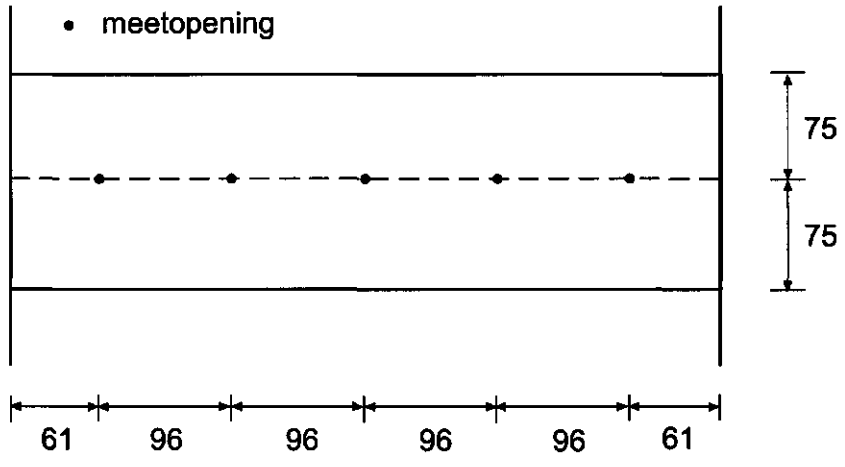
Figuur 3b Onderaanzicht drijver met plaats meetopeningen (maten in mm)



Figuur 4 Bovenaanzicht landhoofden en drijver met scharnierende ophangarmen (maten in mm)



Figuur 5a Lengtedoorsnede van drijver met ophangarmen en meetpunten in drempel (maten in mm)



Figuur 5b Bovenaanzicht drempel met plaats meetopeningen (maten in mm)

- De tweede onderzochte drijver werd verticaal geleid door twee op de landhoofden bevestigde scharnierende armen (figuren 4 en 5). Door de werkrichting van deze twee armen onder een hoek ten opzichte van elkaar te plaatsen, is slechts beweging in de verticale richting mogelijk. Er is geen geleiding in het landhoofd nodig, waardoor ook geen sponning nodig is. Als de stijghoogte in de drijver wordt gemeten, dient de druk via een flexibele verbinding naar het landhoofd te worden overgebracht.
Om dit te ontlopen is bij deze drijver tevens de meting van de stijghoogte verplaatst van de drijver naar de drempel, waardoor met vaste verbindingen kon worden gewerkt. Ook in de drempel werd de stijghoogte op vijf punten gemeten, vergelijkbaar met de metingen in de drijver. Meetpunten in de drempel zijn gevoeliger voor vervuiling, zodat de drempel regelmatig schoongemaakt dient te worden en er bovendien een voorziening aanwezig moet zijn om de meetpunten door te spoelen.

Alle drukmeetpunten konden één voor één via elektrische bediende kraantjes worden aangesloten op een verschildrukopnemer met een klein meetbereik (volle schaal is 5 mbar) en daardoor grote nauwkeurigheid. De opgegeven nauwkeurigheid bedraagt ± 0,25% van de volle schaal waarde (= 0,000125 m). In totaal waren er negen drukmeetpunten, twee in de bovenstroomse zijde van de landhoofden, twee in de benedenstroomse zijde van de landhoofden en de vijf meetpunten in drijver of drempel. Al deze hoogten werden gemeten ten opzichte van een gedurende een meetcyclus vast niveau dat was verbonden met de andere zijde van de verschildrukopnemer.
De stand van de drijver werd gemeten door middel van een potentiometer die op een vaste "brug" boven de drijver was opgesteld en hiermee was verbonden door middel van een koord dat over windingen van de potentiometer liep.

De metingen werden uitgevoerd en opgeslagen in een datalogger van ENRIN. De instellingen van de datalogger konden worden gewijzigd met behulp van een daarop aangesloten PC. Het starten en stoppen van een meetsessie gebeurde ook via de PC evenals het uitlezen van de gegevens voor verdere verwerking. Eén meetsessie bestond uit het een aantal malen (ca. 10 tot 15) afscannen van alle meetwaarden. Eén gegevensregel bevatte aldus 11 waarden, nl. de doorstroomhoogte (a), de vier niveaus in de landhoofden (2 bovenstrooms en 2 benedenstrooms), de vijf stijghoogtes in de drijver/drempel en een controlemeting. Door de toepassing van twee extra stijgbuisjes aan weerszijden van de drukopnemer, was het nodig om enige tijd te wachten met het vastleggen van een meetwaarde zodat zich een evenwicht kon instellen. Deze twee stijgbuisjes lagen parallel onder een helling van 1:10 en vormden zo een redelijk nauwkeurige manometer, die werd gebruikt voor het globaal instellen van het referentieniveau voor de drukopnemer bij verschillende waterstanden in het model. Het bleek dat dit evenwicht zich binnen 12 seconden had ingesteld. Het scannen van een gegevensregel

kostte dus ongeveer 2 minuten. Gekozen werd om iedere 180 sec. een meetcyclus uit te voeren.

Tijdens de verdere verwerking werd het gemiddelde van de gegevensregels berekend en deze gemiddelde waarden werden gebruikt voor presentaties in grafieken en tabellen.

Tenslotte werd het werkelijke debiet door de meetopstelling gemeten met behulp van een elektromagnetische debietmeter waarvan de onnauwkeurigheid geringer was dan 1% voor alle tijdens het onderzoek gebruikte debieten.

6. GEGEVENSVERWERKING

De ruwe data zoals opgeslagen in de datalogger zien er uit als weergegeven in onderstaande tabel 6-1.

Tabel 6-1. Voorbeeld van ruwe data voor een complete meting

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Type	Hoogte	Druk1	Druk2	Druk3	Druk4	Druk5	Druk6	Druk7	Druk8	Druk9	dDruk1
uumm	mm	mmH2O	mmH2O	mmH2O	mmH2O	mmH2O	mmH2O	mmH2O	mmH2O	mmH2O	mmH2O
0942	176,9	39,5	37,5	39,4	37,6	36,8	36,6	36,4	36,5	36,6	0,2
0945	176,9	39,3	37,3	39,4	37,5	36,9	36,7	36,4	36,5	36,5	0,0
0948	176,9	39,4	37,5	39,4	37,5	36,9	36,8	36,5	36,4	36,5	0,2
0951	176,9	39,3	37,4	39,4	37,6	36,9	36,7	36,5	36,5	36,5	0,0
0954	176,9	39,3	37,3	39,3	37,5	36,9	36,7	36,5	36,5	36,5	0,1
0957	176,9	39,3	37,3	39,2	37,5	36,8	36,6	36,5	36,6	36,6	0,0
1000	176,9	39,4	37,5	39,4	37,4	36,9	36,7	36,5	36,6	36,7	0,1
1003	176,9	39,3	37,4	39,4	37,5	36,8	36,6	36,4	36,5	36,5	0,0
1006	176,9	39,2	37,4	39,4	37,4	36,9	36,7	36,5	36,5	36,5	0,2
1009	176,9	39,4	37,3	39,3	37,4	36,9	36,6	36,5	36,5	36,6	0,0
1012	176,9	39,3	37,3	39,4	37,4	36,9	36,6	36,5	36,4	36,5	0,0

Verklaring:

- linkerkolom geeft de tijd aan (uu=uren, mm=minuten)
- Hoogte = opening (verder aangeduid met a) tussen drempel en drijver.
- Druk1 en Druk3 zijn de stijghoogtes in de bovenstroomse zijde van de landhoofden, gemeten t.o.v. een willekeurig referentieniveau dat constant werd gehouden voor een gehele meting en dus hetzelfde voor Druk1 t/m Druk9 (zie ook figuur 2 en foto's 5 en 6).
- Druk2 en Druk 4 zijn de stijghoogtes in de benedenstroomse zijde van de landhoofden.
- Druk 5 t/m Druk9 zijn de stijghoogtes in de vijf meetpunten in de drijver/drempel.
- dDruk1 is het verschil tussen Druk1 gemeten aan het begin van een meetcyclus en nogmaals gemeten aan het eind van deze cyclus, dus na Druk9. Het betreft hier een controlemeting.

Voor verdere verwerking werden deze gegevens in Excel ingelezen en uitgewerkt zoals weergegeven in tabel 6-2, waarbij in de tabel enkele tussenstappen in de bewerking zijn weggelaten.

Verklaring:

- a = hoogte opening tussen drempel en drijver
- A = oppervlak dwarsdoorsnede in venturi = a x breedte

- h1 = bovenstroomse waterhoogte t.o.v. de kruin van de drempel
- V1 t/m V5 = stroomsnelheden in de vijf meetpunten berekend uit de gemeten stijghoogtes
- V = gemiddelde van V1 t/m V5
- Cd = afvoercoëfficiënt (Qf/Qv)
- Qf = debiet zoals gemeten met de elektromagnetische flowmeter
- Qv = debiet berekend als A x V

Tabel 6-2. Voorbeeld van verwerking van ruwe data (tabel 6-1) naar afvoer en afvoercoëfficiënt.

Tijd	a (mm)	A (m^2)	h1 (mm)	h1/a (-)	Druk1 (mm)	Druk2 (mm)	Druk3 (mm)	Druk4 (mm)	Druk5 (mm)	Druk6 (mm)	Druk7 (mm)	Druk8 (mm)	Druk9 (mm)
9:42	176,9	0,0895	323	1,83	39,5	37,5	39,4	37,6	36,8	36,6	36,4	36,5	36,6
9:45	176,9	0,0895	323	1,83	39,3	37,3	39,4	37,5	36,9	36,7	36,4	36,5	36,5
9:48	176,9	0,0895	323	1,83	39,4	37,5	39,4	37,5	36,9	36,8	36,5	36,4	36,5
9:51	176,9	0,0895	323	1,83	39,3	37,4	39,4	37,6	36,9	36,7	36,5	36,5	36,5
9:54	176,9	0,0895	323	1,83	39,3	37,3	39,3	37,5	36,9	36,7	36,5	36,5	36,5
9:57	176,9	0,0895	323	1,83	39,3	37,3	39,2	37,5	36,8	36,6	36,5	36,6	36,6
10:00	176,9	0,0895	323	1,83	39,4	37,5	39,4	37,4	36,9	36,7	36,5	36,6	36,7
10:03	176,9	0,0895	323	1,83	39,3	37,4	39,4	37,5	36,8	36,6	36,4	36,5	36,5
10:06	176,9	0,0895	323	1,83	39,2	37,4	39,4	37,4	36,9	36,7	36,5	36,5	36,5
10:09	176,9	0,0895	323	1,83	39,4	37,3	39,3	37,4	36,9	36,6	36,5	36,5	36,6
10:12	176,9	0,0895	323	1,83	39,3	37,3	39,4	37,4	36,9	36,6	36,5	36,4	36,5
Gemiddelde	176,9	0,0895	323	1,83	39,3	37,4	39,4	37,5	36,9	36,7	36,5	36,5	36,5

V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	V5 (m/s)	V (m/s)	Qf (l/s)	Qv (l/s)	Qv-Qf (l/s)	Cd=Qf/Qv (-)
0,230	0,238	0,236	0,242	0,238	0,237	20,06	21,23	1,17	0,945
0,217	0,226	0,236	0,242	0,238	0,232	20,06	20,76	0,70	0,966
0,221	0,226	0,238	0,238	0,242	0,233	20,06	20,88	0,82	0,961
0,217	0,226	0,236	0,238	0,238	0,231	20,06	20,69	0,63	0,969
0,217	0,226	0,234	0,234	0,234	0,229	20,06	20,51	0,45	0,978
0,221	0,230	0,228	0,230	0,226	0,227	20,06	20,32	0,26	0,987
0,221	0,230	0,230	0,238	0,234	0,231	20,06	20,66	0,60	0,971
0,221	0,230	0,236	0,242	0,238	0,234	20,06	20,92	0,86	0,959
0,212	0,221	0,234	0,238	0,238	0,229	20,06	20,49	0,43	0,979
0,221	0,234	0,232	0,234	0,234	0,231	20,06	20,70	0,64	0,969
0,217	0,230	0,236	0,238	0,242	0,233	20,06	20,84	0,78	0,963
0,220	0,229	0,234	0,238	0,237	0,232	20,06	20,73	0,67	0,968

Bij de berekening van de stroomsnelheid ter plaatse van de meetpunten in drijver of drempel, wordt ervan uitgegaan dat:

- bovenstrooms in de landhoofden de stijghoogte gelijk is aan de energiehoogte (v=0);
- er geen energieverliezen optreden tussen de bovenstroomse meetpunten en de meetpunten in drijver/drempel;
- er in de vernauwing ter plaatse van de meetpunten in drijver/drempel rechte en evenwijdige stroomlijnen zijn en dus een hydrostatische drukverdeling.

In dat geval komt namelijk het verschil in stijghoogte volledig voor rekening van de snelheidshoogte $v_2^2/2g$. In werkelijkheid zal dit natuurlijk niet het geval zijn en daarom wordt een afvoercoëfficiënt Cd geïntroduceerd die alle afwijkingen van de eerdergenoemde aannamen en mogelijke andere effecten herbergt.

De waarde van Cd wordt vooral bepaald door:

- de vormgeving van landhoofden, drijver en drempel;
- de situering van de meetpunten;
- de wijze van bepaling van de gemiddelde stroomsnelheid uit puntmetingen. Bij zowel meetpunten in drijver als drempel werd op vijf punten gemeten. De hieruit bepaalde gemiddelde stroomsnelheid zal ook bij een exacte hydrostatische drukverdeling in de venturi afwijken van de werkelijke gemiddelde stroomsnelheid omdat de snelheid dicht bij de landhoofden lager zal zijn dan ter plaatse van de meetpunten. De berekende gemiddelde snelheid zal door dit effect dus altijd te hoog zijn. Bij de opstelling met de zijgeleiding in de landhoofden, waren de wanden niet geheel vlak door enigszins uitstekende delen van de geleiding. Ook dit kan een kleine contractie van de stroming in de dwarsrichting veroorzaken en invloed hebben op de waarde van de afvoercoëfficiënt.

Zo is er dus een aantal factoren dat de waarde van de afvoercoëfficiënt op verschillende wijzen en in verschillende situaties ook in verschillende mate beïnvloedt. Het is vrijwel onmogelijk om deze effecten afzonderlijk te kwantificeren. Vandaar dat ervoor is gekozen om alle effecten onder te brengen in één afvoercoëfficiënt Cd.

Bij de presentatie van de meetresultaten in de volgende hoofdstukken, is de afvoercoëfficiënt Cd steeds gegeven als functie van de dimensieloze grootheid h1/a, zoals in de literatuur (bijv. in ISO-standards) gebruikelijk is voor stroming onder een schuif of anderzins.

De stroomsnelheden zijn steeds voor iedere gegevensregel en voor ieder meetpunt berekend. Daarna is per gegevensregel het rekenkundige gemiddelde van V1 t/m V5 als gemiddelde stroomsnelheid V in de vernauwing genomen. Tenslotte zijn deze waarden gemiddeld voor alle gegevensregels per meting. Een andere mogelijke methode is eerst de drukverschillen te middelen voor alle gegevensregels en daaruit tenslotte de stroomsnelheid te berekenen. Wanneer de getalwaarden niet al teveel uit elkaar liggen, is het verschil in eindresultaat tussen de verschillende manieren van middelen te verwaarlozen.

V1 is berekend uit het verschil van Druk 1 en Druk5 ($V1 = ((Druk1-Druk5)2g)^{1/2}$)

V2 is berekend uit het verschil van Druk1 en Druk6

V3 is berekend uit het verschil van (Druk1+Druk3)/2 en Druk 9

V4 is berekend uit het verschil van Druk3 en Druk7

V5 is berekend uit het verschil van Druk3 en Druk8

7. MEETPROGRAMMA

7.1 Meetpunten in drijver

De metingen in deze serie zijn in eerste instantie alle uitgevoerd met de drempel zoals weergegeven in figuur 3a, dus met een horizontale kruin met een lengte van 150 mm. en met de meetopeningen in de landhoofden die het verst van de hoofdstroom waren verwijderd, nl. meetopening 1 (zie figuur 2) en met de afgeronde taluds (voor resultaten zie par. 8.1.1).

- Verder zijn metingen gedaan met de verschillende meetopeningen (1 t/m 6) in de landhoofden om te onderzoeken in hoeverre de afstand tot de instroom naar de Venturi invloed heeft op de meting van de bovenstroomse energiehoogte. Het is namelijk te verwachten dat dichter bij de instroom een zekere stroomsnelheid op zal treden langs het landhoofd waardoor een ander niveau in het landhoofd wordt gemeten dan bij stilstaand water, zoals bij meetopening 1 ongeveer het geval is. Ook zal de stroomrichting hierin een rol spelen (par. 8.1.3).
- Om de gevoeligheid voor de snelheidsverdeling in de aanstroom te onderzoeken is een asymmetrische aanstroming gecreëerd in de aanvoerleiding (par. 8.1.2). De snelheidsverdeling in de aanvoerleiding is op ongeveer 1,5 m bovenstrooms van de landhoofden, dus in het trapeziumvormige dwarsprofiel, gemeten met behulp van een propeller (Ott-molen). Dit is zowel voor de symmetrische als de asymmetrische aanstroming gedaan.

7.2 Meetpunten in drempel

De metingen met de meetopeningen in de drempel zijn uitgevoerd bij drie verschillende drempelvormen (figuur 5a).

- De eerste is dezelfde drempel als bij de metingen met de meetopeningen in de drijver, nl. met een horizontale kruin met een lengte van 150 mm. Bij deze opstelling is ook onderzocht of en in hoeverre er verschillen in het eindresultaat optreden tussen het meten met vijf afzonderlijke meetopeningen in de drempel waaruit dus vijf stroomsnelheden worden bepaald en wanneer deze vijf meetopeningen worden aangesloten op één stilling well waardoor een fysieke middeling plaatsvindt van de vijf stijghoogtes, waaruit dan een gemiddelde stroomsnelheid wordt berekend. De laatste methode beperkt de tijd die nodig is voor één meting natuurlijk aanzienlijk. Alle metingen in de landhoofden werden uitgevoerd via meetopening 1 en het talud was afgerond. De resultaten zijn weergegeven in par. 8.2.1.
- Bij de tweede drempel is deze aan de bovenstroomse zijde verlengd, zodat de lengte van het horizontale gedeelte 150+275=425 mm is geworden. De reden voor deze verlenging

is om te onderzoeken in hoeverre de vorm van de drempel invloed heeft op de vorm van de stroomlijnen ter plaatse van de meetopeningen en dus op de afvoercoëfficiënt. Het piëzometrisch niveau dat wordt gemeten, zal bij enigszins gekromde stroomlijnen in de verticaal boven de meetopening anders zijn dan bij rechte, evenwijdige stroomlijnen (hydrostatische drukverdeling). Bij een langere horizontale drempel (en ook bij een langer horizontaal gedeelte in de onderkant van de drijver) zullen de stroomlijnen naar verwachting minder gekromd zijn dan bij een korte drempel. De grootte van de opening tussen drempel en drijver zal hier ook invloed op hebben.

Tevens is bij deze variant onderzocht of het doortrekken van het trapeziumvormige dwarsprofiel van de aanvoerleiding tot tegen de landhoofden invloed had op het resultaat. Bij deze opstelling konden de meetopeningen 1 t/m 6 niet worden gebruikt en werd een nieuwe meetopening 6a aangebracht die zich recht boven het oude meetpunt 6 bevond. Het is te verwachten dat in deze situatie bij de meetopening een zekere snelheidscomponent ter plaatse van de meetopening optreedt omdat de "dode hoek" niet meer aanwezig is (par. 8.2.2).

- Bij de derde variant is de drempel aan de benedenstroomse zijde op dezelfde wijze verlengd als aan de bovenstroomse zijde was gebeurd. Hierdoor werd weer een symmetrische opstelling verkregen. Bij deze opstelling werd eveneens nogmaals onderzocht of het koppelen van de vijf meetopeningen in de drempel andere resultaten zou opleveren dan het meten van vijf afzondelijke stijghoogtes (par. 8.2.3).

8. MEETRESULTATEN

8.1 Meetpunten in drijver

8.1.1 Symmetrische aanstroming

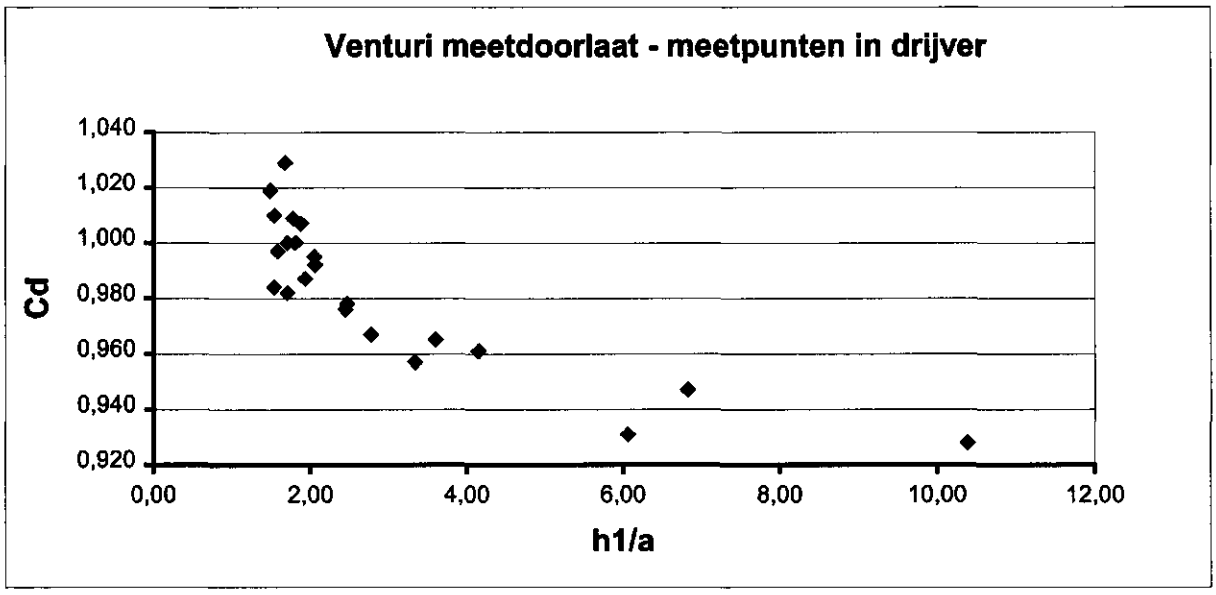
In tabel 8-1 staan de resultaten samengevat van de metingen met de oorspronkelijke (korte) drempel, normale (min of meer symmetrische) aanstroming, afgerond talud en meetopening nr. 1 in de landhoofden (zo ver mogelijk van de hoofdstroom verwijderd).
In figuur 8-1 is de afvoercoëfficiënt Cd grafisch uitgezet tegen h1/a.

Qf = debiet zoals gemeten met de elektromagnetische debietmeter
v = gemiddelde stroomsnelheid zoals berekend uit de drukmetingen
h1 = bovenstroomse waterdiepte t.o.v. de kruin van de drempel
a = hoogte opening tussen drempel en drijver
Cd = afvoercoëfficiënt (= Qf/(b·a·v))

De breedte (b) van de opening bedroeg 0,495 m. (geleiding in sponning stak iets uit buiten de wand van de landhoofden)

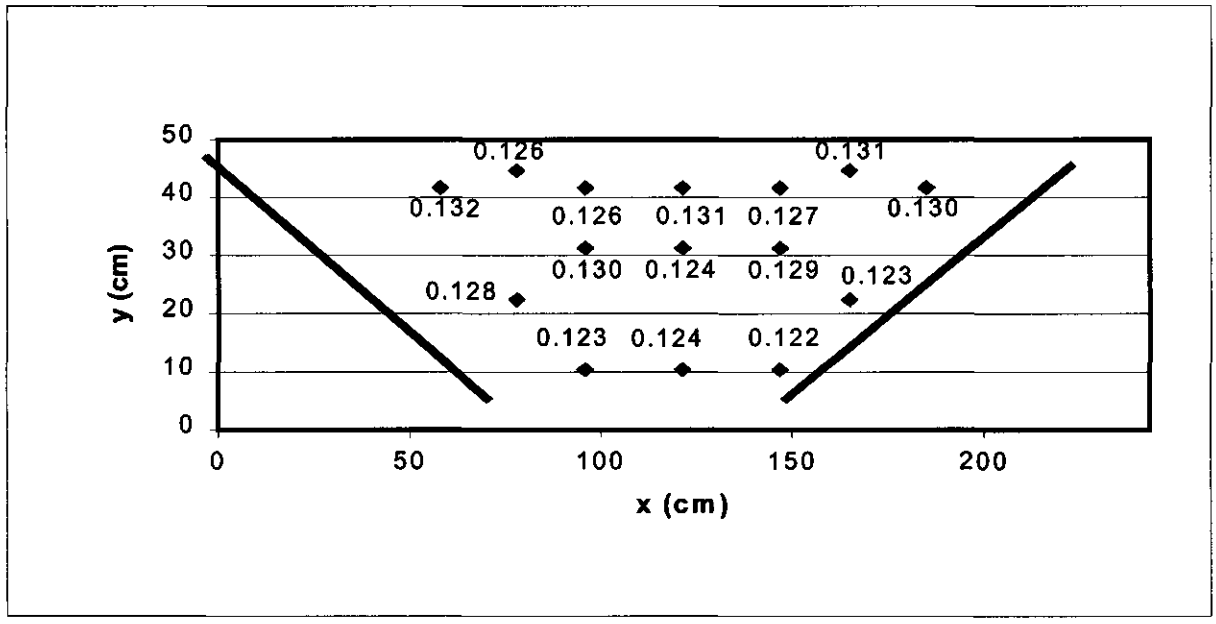
Tabel 8-1. Meetpunten in drijver, korte drempel, symmetrische aanstroming, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden

Qf (m^3/s)	v (m/s)	h1 (m)	a (m)	h1/a (-)	Cd (-)
0,01048	0,737	0,322	0,0310	10,39	0,928
0,01047	0,448	0,308	0,0508	6,06	0,931
0,01045	0,243	0,303	0,0909	3,33	0,957
0,02018	0,859	0,342	0,0501	6,83	0,947
0,02020	0,467	0,325	0,0905	3,59	0,965
0,02016	0,319	0,322	0,1306	2,47	0,978
0,02015	0,237	0,322	0,1706	1,89	1,007
0,04076	0,950	0,374	0,0902	4,15	0,961
0,04076	0,656	0,360	0,1299	2,77	0,967
0,04076	0,485	0,350	0,1705	2,05	0,995
0,04075	0,380	0,353	0,2104	1,68	1,029
0,04075	0,325	0,446	0,2507	1,78	1,009
0,04075	0,270	0,445	0,2993	1,49	1,019
0,07981	0,967	0,417	0,1707	2,44	0,976
0,07983	0,777	0,406	0,2104	1,93	0,987
0,07982	0,657	0,428	0,2503	1,71	0,982
0,07983	0,547	0,461	0,2998	1,54	0,984
0,10020	0,968	0,435	0,2110	2,06	0,992
0,10019	0,807	0,428	0,2508	1,71	1,000
0,10020	0,669	0,461	0,2996	1,54	1,010
0,11975	0,967	0,453	0,2502	1,81	1,000
0,11965	0,810	0,473	0,2994	1,58	0,997



Figuur 8-1 Afvoercoëfficiënt als functie van h1/a voor symmetrische aanstroming, korte drempel, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden

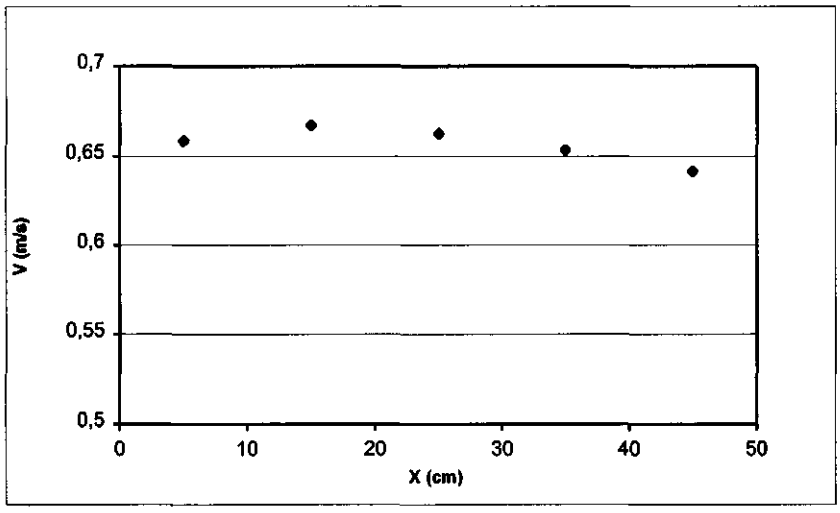
Voor enkele situaties is de snelheidsverdeling in de aanvoerleiding op een afstand van ongeveer 1,5 m bovenstrooms van de landhoofden gemeten met behulp van een propellermeter. Figuur 8-2 toont een voorbeeld hiervan bij een debiet van 0,080 m^3/s en een keelopening (a) van 0,17 m. De aanstroming blijkt vrijwel symmetrisch te zijn. Ook voor de andere metingen was dit het geval.



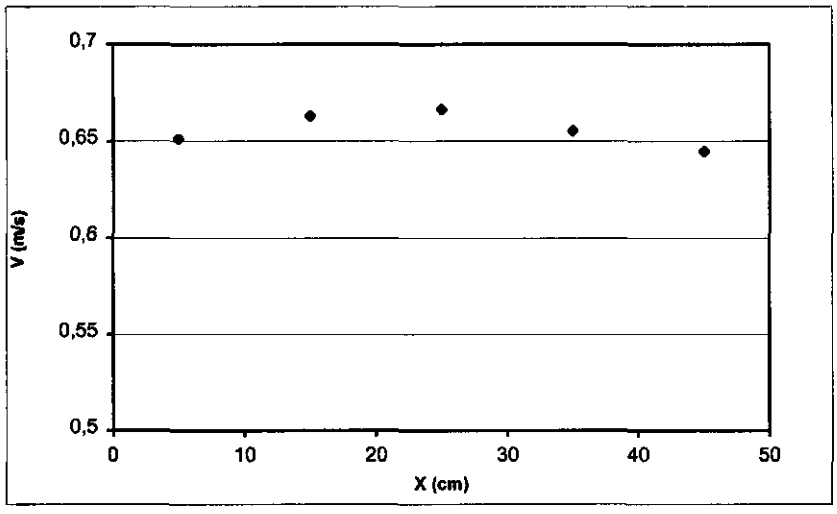
Figuur 8-2 Snelheidsverdeling in de aanvoerleiding bij een debiet van 0,080 m^3/s

8.1.2. Asymmetrische aanstroming

Teneinde te onderzoeken wat de invloed is van een asymmetrische aanstroming op de snelheidsverdeling in de venturi en op de afvoercoëfficiënt, is een extreem asymmetrische snelheidsverdeling in de aanvoerleiding gecreëerd.
In de figuren 8-3 en 8-4 zijn de snelheden ter plaatse van de vijf meetpunten in de drijver uitgezet bij een debiet van ongeveer 0,080 m^3/s en een doorlaathoogte a van ongeveer 0,25 m voor respectievelijk symmetrische en asymmetrische aanstroming in de aanvoerleiding.
Het verschil blijkt slechts marginaal te zijn. Blijkbaar heeft de venturi-vorm een stabiliserend effect en wordt het effect van een asymmetrische aanstroming door de versnelling in de Venturi doorlaat vrijwel geheel opgeheven.
Uit figuur 8-5 blijkt eveneens dat er nauwelijks verschil in de afvoercoëfficiënt optreedt tussen asymmetrische en symmetrische aanstroming. De meetresultaten voor asymmetrische aanstroming staan vermeld in tabel 8-2.



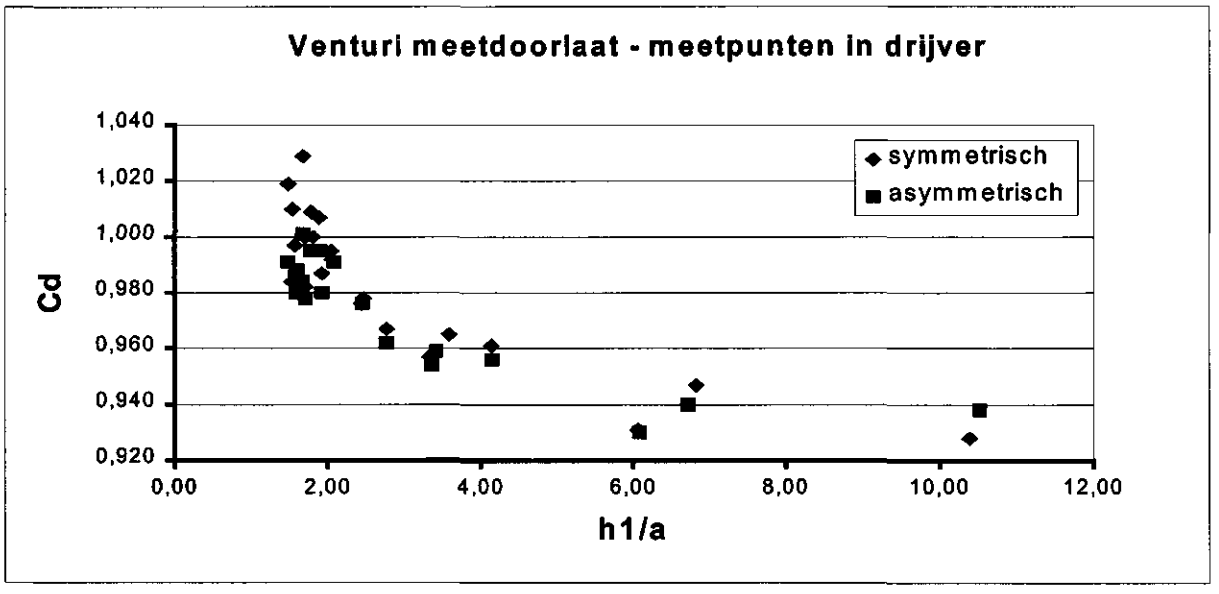
Figuur 8-3 Snelheidsverdeling in Venturi doorlaat bij symmetrische aanstroming



Figuur 8-4 Snelheidsverdeling in Venturi doorlaat bij asymmetrische aanstroming

Tabel 8-2 Meetpunten in drijver, korte drempel, asymmetrische aanstroming, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden

Qf (m^3/s)	v (m/s)	h1 (m)	a (m)	h1/a (-)	Cd (-)
0,01007	0,709	0,322	0,0306	10,52	0,938
0,01005	0,431	0,308	0,0506	6,09	0,930
0,01005	0,236	0,303	0,0901	3,36	0,954
0,01995	0,842	0,342	0,0509	6,72	0,940
0,01995	0,468	0,308	0,0899	3,43	0,959
0,01995	0,315	0,322	0,1310	2,46	0,976
0,01995	0,238	0,322	0,1699	1,90	0,995
0,04009	0,941	0,374	0,0900	4,16	0,956
0,04009	0,644	0,360	0,1303	2,76	0,962
0,04009	0,477	0,356	0,1708	2,08	0,991
0,04008	0,384	0,353	0,2105	1,68	1,001
0,04007	0,327	0,446	0,2503	1,78	0,995
0,04007	0,273	0,445	0,2996	1,49	0,991
0,08032	0,786	0,407	0,2107	1,93	0,980
0,08030	0,655	0,404	0,2507	1,61	0,988
0,08029	0,549	0,501	0,3002	1,67	0,984
0,10000	0,827	0,428	0,2498	1,71	0,978
0,09998	0,687	0,479	0,3000	1,60	0,980
0,11960	0,820	0,473	0,2991	1,58	0,986



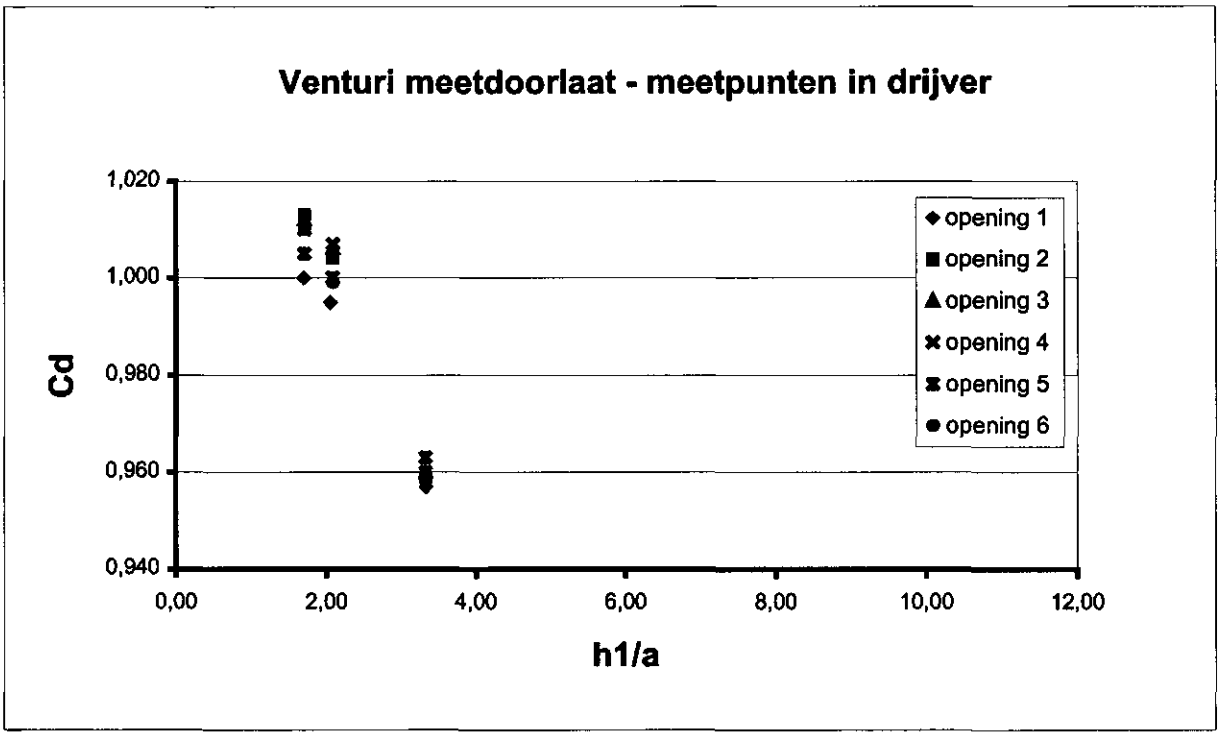
Figuur 8-5 Afvoercoëfficiënt als functie van h1/a voor symmetrische en asymmetrische aanstroming, korte drempel, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden

8.1.3 Plaats meetopeningen in landhoofden

Om te onderzoeken wat de invloed van de plaats van de meetopeningen in de landhoofden is op de afvoercoëfficiënt is bij drie situaties achtereenvolgens met de zes verschillende meetopeningen gemeten. Meetopening 1 bevindt zich het verst verwijderd van de instroom naar de Venturi doorlaat, meetopening 6 het dichtst daarbij (zie figuur 2).
In tabel 8-3 zijn de resultaten van deze metingen samengevat en deze zijn in figuur 8-6 grafisch weergegeven.
De waarden van de afvoercoëfficiënt verschillen onderling maximaal slechts ca. 1,5 %. Bovendien is er geen duidelijke trend te constateren in relatie tot de afstand tot de hoofdstroom.

Tabel 8-3 Meetpunten in drijver, korte drempel, symmetrische aanstroming, afgerond talud, meetopeningen 1 t/m 6

Qf (m^3/s)	v (m/s)	h1 (m)	a (m)	h1/a (-)	Cd (-)	
0,01045	0,243	0,303	0,0909	3,33	0,957	
0,04076	0,485	0,350	0,1705	2,05	0,995	opening 1
0,10019	0,807	0,428	0,2508	1,71	1,000	
0,01044	0,242	0,303	0,0910	3,33	0,959	
0,04075	0,481	0,356	0,1703	2,09	1,004	opening 2
0,10024	0,798	0,430	0,2506	1,72	1,013	
0,01042	0,241	0,303	0,0911	3,33	0,960	
0,04075	0,480	0,356	0,1704	2,09	1,006	opening 3
0,10020	0,798	0,430	0,2507	1,72	1,012	
0,01042	0,241	0,303	0,0911	3,33	0,960	
0,04074	0,480	0,356	0,1704	2,09	1,007	opening 4
0,10021	0,800	0,430	0,2507	1,72	1,010	
0,01040	0,240	0,303	0,0911	3,33	0,963	
0,04075	0,483	0,356	0,1704	2,09	1,000	opening 5
0,10023	0,803	0,430	0,2507	1,72	1,005	
0,01039	0,241	0,303	0,0910	3,33	0,959	
0,04075	0,483	0,356	0,1705	2,09	0,999	opening 6
0,10020	0,799	0,430	0,2508	1,71	1,010	



Figuur 8-6 Afvoercoëfficiënt als functie van h1/a voor symmetrische aanstroming, korte drempel, afgerond talud, meetopeningen 1 t/m 6 in landhoofden.

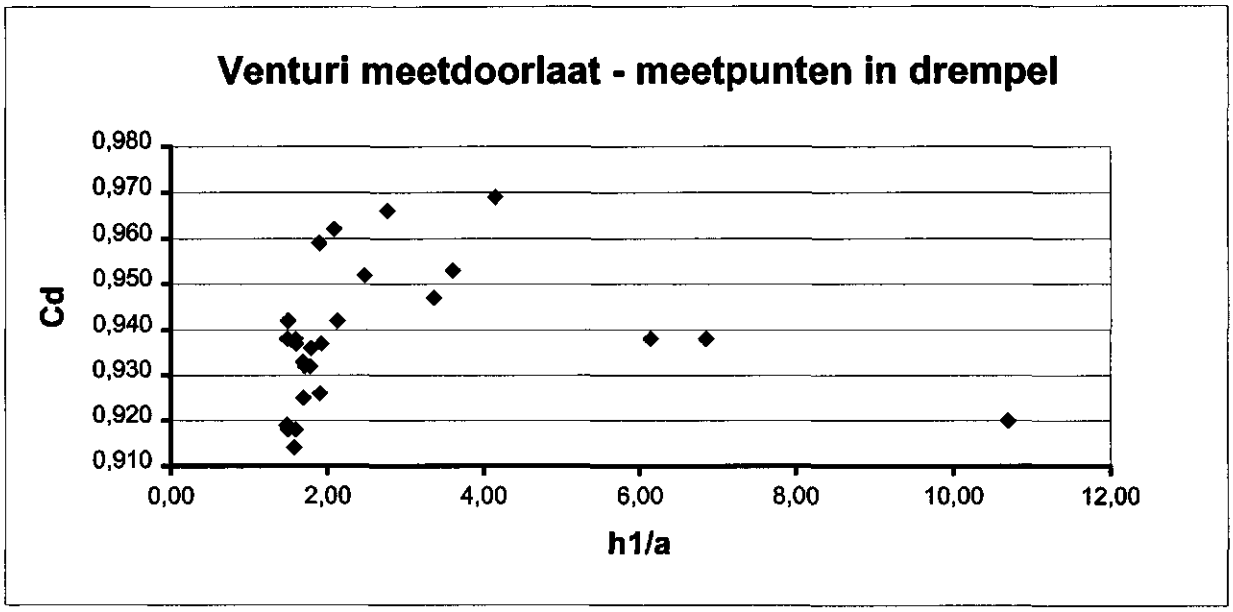
8.2 *Meetpunten in drempel*

8.2.1 Metingen met korte drempel

In tabel 8-4 en figuur 8-7 zijn de resultaten weergegeven van de metingen die zijn uitgevoerd met vijf afzonderlijke meetopeningen in de drempel (zie figuur 5). In iedere meetopening werd de stijghoogte gemeten. Uit het verschil met de waterhoogte in de bovenstroomse landhoofden werd een stroomsnelheid berekend. Het gemiddelde van de vijf aldus gevonden stroomsnelheden werd vermenigvuldigd met het oppervlak tussen drempel en drijver. Bij deze serie metingen werd meetopening 1 in de landhoofden gebruikt. De drempel was dezelfde als bij de metingen met de meetpunten in de drijver, namelijk met een horizontaal gedeelte van 150 mm in de stroomrichting gezien (verder aangeduid als: korte drempel), evenals het afgeronde talud. De drijver was een andere en had een iets afgerondere vorm dan de eerder gebruikte (figuur 3a). De zijgeleiding in de sponning was vervangen door een ophanging aan twee scharnierende armen zoals beschreven in hoofdstuk 5, waardoor de zijwanden van de landhoofden glad afgewerkt konden worden. Alle metingen in dit hoofdstuk zijn uitgevoerd met symmetrische aanstroming.

Tabel 8-4 Meetpunten in drempel, korte drempel, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden.

Qf (m^3/s)	V (m/s)	h1 (m)	a (m)	h1/a (-)	Cd (-)
0,01007	0,716	0,322	0,0301	10,70	0,920
0,01006	0,423	0,308	0,0501	6,15	0,938
0,01005	0,233	0,303	0,0901	3,36	0,947
0,01997	0,844	0,342	0,0499	6,85	0,938
0,01996	0,459	0,325	0,0903	3,60	0,953
0,01996	0,318	0,322	0,1304	2,47	0,952
0,01998	0,242	0,322	0,1700	1,89	0,959
0,04021	0,911	0,374	0,0901	4,15	0,969
0,04020	0,632	0,360	0,1302	2,76	0,966
0,04019	0,484	0,356	0,1706	2,09	0,962
0,04019	0,401	0,447	0,2102	2,13	0,942
0,04019	0,341	0,446	0,2502	1,78	0,932
0,04020	0,288	0,445	0,3000	1,48	0,919
0,08011	0,803	0,406	0,2104	1,93	0,937
0,08010	0,680	0,428	0,2497	1,71	0,932
0,08011	0,577	0,447	0,2989	1,50	0,918
0,10028	0,852	0,428	0,2516	1,70	0,925
0,10032	0,720	0,479	0,2999	1,60	0,918
0,12001	0,864	0,473	0,3004	1,57	0,914
0,08012	0,676	0,449	0,2501	1,80	0,936
0,08011	0,675	0,400	0,2501	1,60	0,938
0,08013	0,672	0,375	0,2502	1,50	0,942
0,10036	0,856	0,477	0,2501	1,91	0,926
0,10039	0,850	0,423	0,2501	1,69	0,933
0,10040	0,846	0,401	0,2501	1,60	0,937
0,10041	0,846	0,373	0,2502	1,49	0,938

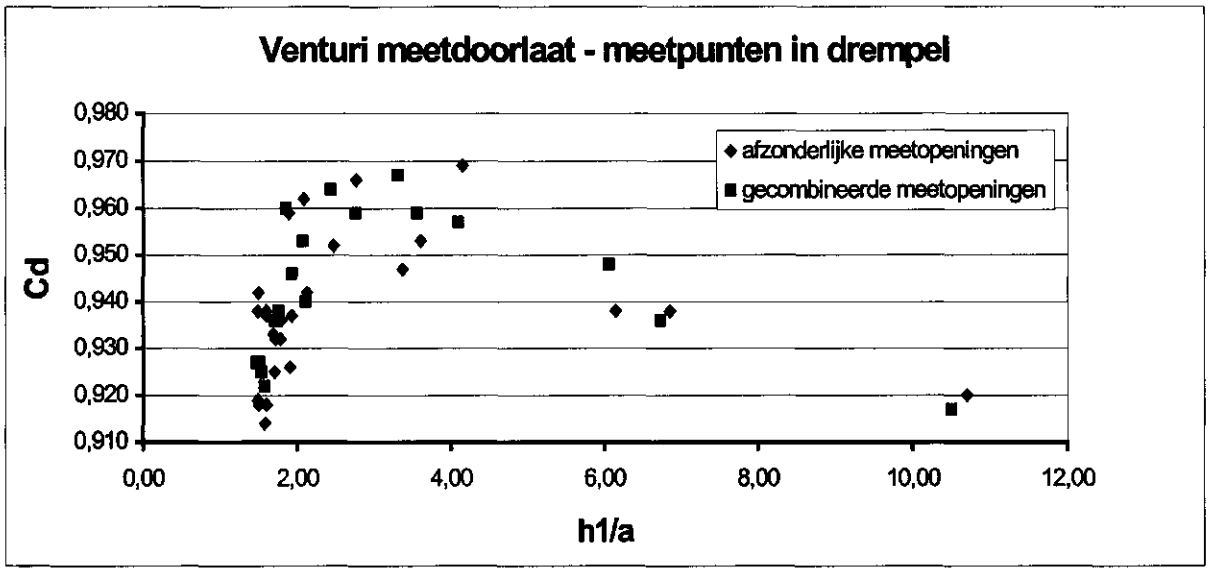


Figuur 8-7 Afvoercoëfficiënt als functie van h1/a voor korte drempel, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden.

Teneinde het aantal metingen te beperken, hetgeen zeker in een veldopstelling aan te bevelen is, zijn de vijf afzonderlijke meetpunten in de drempel aangesloten op één gemeenschappelijke stilling well, die vervolgens was verbonden met de drukopnemer. Hierdoor vond een fysieke middeling plaats van de vijf stijghoogtes in de drempel.
De meetresultaten zijn vermeld in tabel 8-5 en grafisch weergegeven in figuur 8-8 tesamen met de metingen met vijf afzonderlijke meetpunten. De resultaten blijken goed overeen te komen, zodat zonder bezwaar kan worden volstaan met één meting van de stijghoogte in de drempel, die wordt gevormd door meerdere openingen in de drempel met elkaar te verbinden. Door het aanbrengen van meer openingen dan tijdens het onderzoek is gebeurd en vooral enkele openingen dichter bij de landhoofden, is het mogelijk dat door de snelheidsverdeling in de dwarsrichting die aan de wanden lager zal zijn dan naar het midden toe, de afvoercoëfficiënt wel in geringe mate zal afwijken van de hier gepresenteerde waarden.

Tabel 8-5 Meetpunten in drempel met één gemeenschappelijke stilling well, korte drempel, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden.

Qf (m^3/s)	V (m/s)	h1 (m)	a (m)	h1/a (-)	Cd (-)
0,01007	0,718	0,317	0,0302	10,50	0,917
0,01006	0,420	0,302	0,0499	6,05	0,948
0,01005	0,228	0,298	0,0901	3,31	0,967
0,02006	0,846	0,337	0,0501	6,73	0,936
0,02006	0,457	0,321	0,0904	3,55	0,959
0,02006	0,316	0,317	0,1302	2,43	0,964
0,02007	0,243	0,315	0,1702	1,85	0,960
0,04009	0,916	0,370	0,0904	4,09	0,957
0,04007	0,636	0,358	0,1298	2,76	0,959
0,04006	0,489	0,352	0,1700	2,07	0,953
0,04005	0,335	0,442	0,2519	1,75	0,938
0,04003	0,400	0,444	0,2102	2,11	0,940
0,04004	0,284	0,441	0,3000	1,47	0,927
0,08022	0,798	0,405	0,2101	1,93	0,946
0,08023	0,676	0,427	0,2506	1,70	0,936
0,08025	0,574	0,448	0,2984	1,50	0,927
0,10021	0,847	0,425	0,2498	1,70	0,936
0,10025	0,715	0,458	0,2993	1,53	0,925
0,12019	0,860	0,470	0,2994	1,57	0,922



Figuur 8-8 Afvoercoëfficiënt als functie van h1/a voor korte drempel, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden voor vijf afzonderlijke meetopeningen in drempel en voor vijf meetopeningen op een gemeenschappelijke stilling well.

8.2.2 Metingen met verlengde drempel bovenstrooms

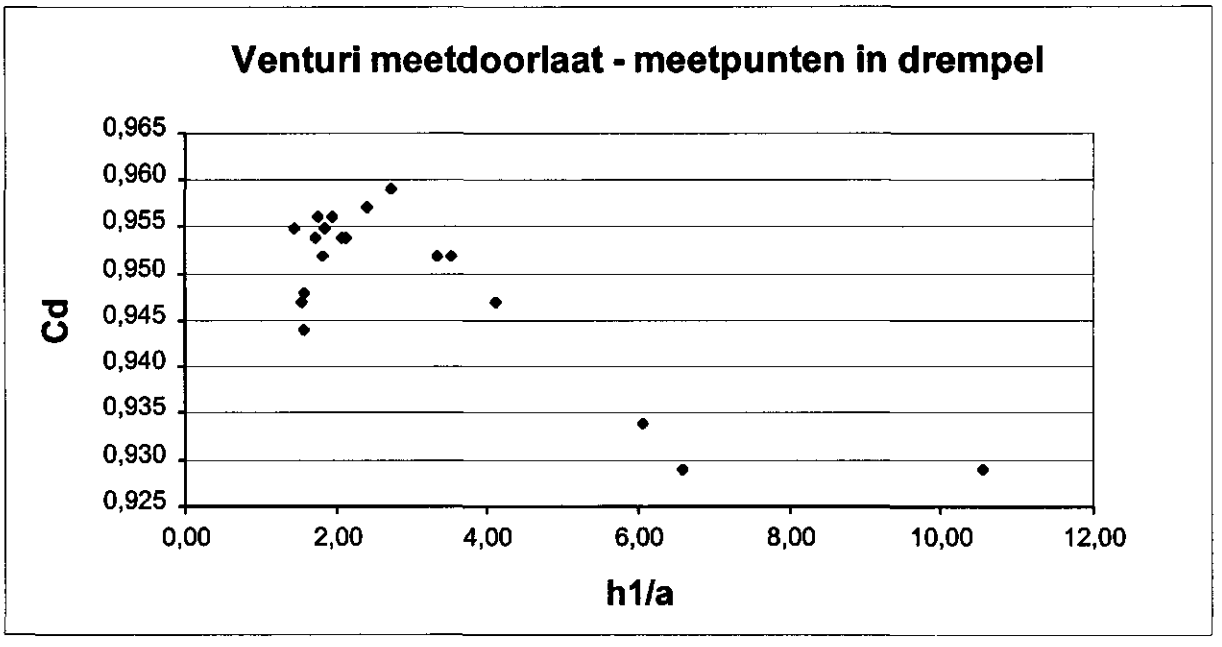
Zoals in het vorige hoofdstuk al is aangegeven, zal de waarde van de afvoercoëfficiënt worden beïnvloed door de vorm van de stroomlijnen in de verticalen waar de stijghoogtes in de drempel worden gemeten. De vormgeving van de drempel (en ook van de onderkant van de drijver) zal hierop zeker invloed hebben. Vandaar dat het horizontale gedeelte van de drempel - in eerste instantie alleen aan de bovenstroomse zijde – is verlengd met 275 mm (figuur 5a). De resultaten zijn weergegeven in tabel 8-6 en figuur 8-9.

Wanneer het niet mogelijk of niet wenselijk is om bij de landhoofden een soort "dode hoek" te creëren waar de stroomsnelheid te verwaarlozen is en het dwarsprofiel van de leiding doorgetrokken is tot tegen de landhoofden, zullen de meetopeningen in de landhoofden vrij dicht bij de instroomopening aangebracht moeten worden. Hierdoor kan de stroomsnelheid ter plaatse van de meetopeningen een andere stijghoogte in het landhoofd tot gevolg hebben dan bij vrijwel stilstaand water en dus ook een andere waarde van de afvoercoëfficiënt. Het trapeziumvormige dwarsprofiel is aangebracht zoals is te zien in figuur 2. Meetopening 6a is gebruikt voor de meting van de stijghoogte in het landhoofd. De resultaten zijn vermeld in tabel 8-7 en in figuur 8-10 zijn deze grafisch weergegeven en vergeleken met de resultaten bij een afgerond talud en meetopening 1. Door een kleiner dwarsprofiel bij het trapeziumvormig dwarsprofiel en doordat de meetopening 6a zich dichter bij instroomopening bevindt is het aannemelijk dat de stijghoogte in het landhoofd lager is dan bij meetopening 1. Dit resulteert

in een kleinere Qv ($v^2/2g$ neemt af) en dus wordt Cd = Qf/Qv groter, hetgeen in figuur 8-10 inderdaad wordt aangetoond.

Tabel 8-6 Meetpunten in drempel, verlengde drempel bovenstrooms, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden.

Qf (m^3/s)	v (m/s)	h1 (m)	a (m)	h1/a (-)	Cd (-)
0,01011	0,714	0,317	0,0301	10,53	0,929
0,01007	0,425	0,303	0,0501	6,05	0,934
0,01005	0,232	0,300	0,0901	3,33	0,952
0,02011	0,843	0,335	0,0508	6,59	0,929
0,02011	0,461	0,319	0,0906	3,52	0,952
0,02010	0,319	0,315	0,1300	2,42	0,957
0,02007	0,244	0,314	0,1701	1,85	0,955
0,04021	0,929	0,371	0,0903	4,11	0,947
0,04020	0,635	0,357	0,1305	2,74	0,959
0,04021	0,488	0,352	0,1707	2,06	0,954
0,04020	0,397	0,445	0,2099	2,12	0,954
0,04020	0,322	0,443	0,2502	1,77	0,956
0,04023	0,277	0,441	0,3004	1,47	0,955
0,08021	0,792	0,411	0,2094	1,96	0,956
0,08019	0,663	0,431	0,2507	1,72	0,954
0,08018	0,561	0,458	0,2984	1,53	0,947
0,10015	0,832	0,456	0,2499	1,82	0,952
0,10021	0,705	0,473	0,2975	1,59	0,944
0,12025	0,833	0,476	0,3008	1,58	0,948



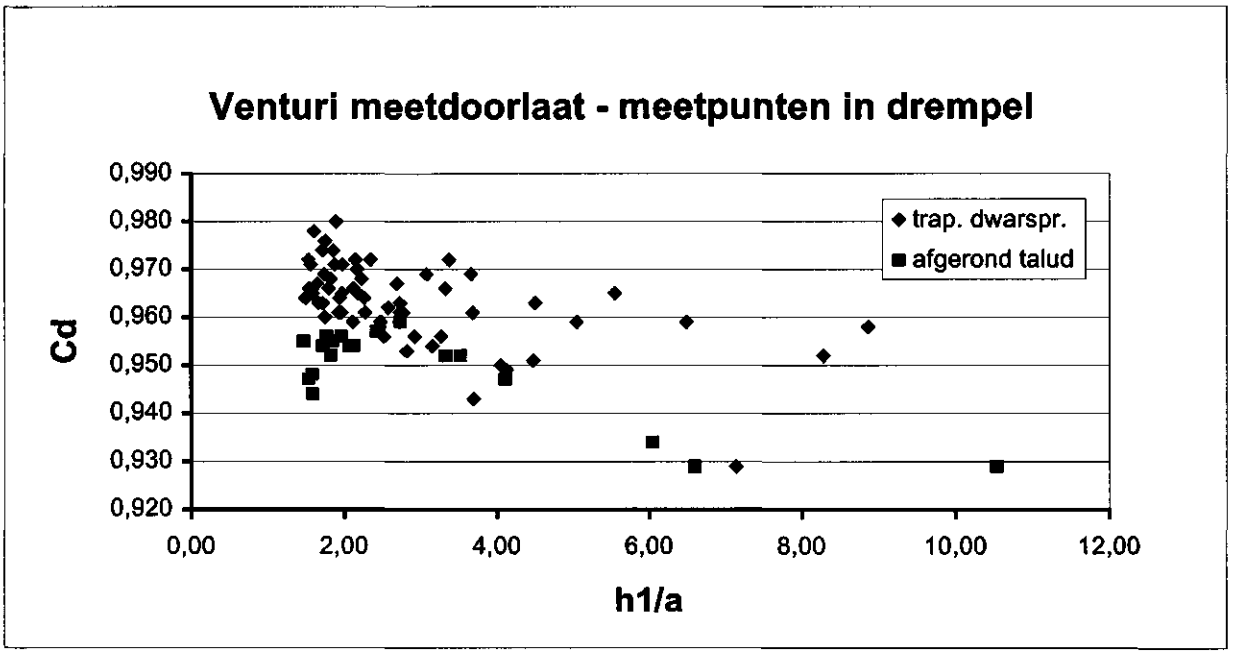
Figuur 8-9 Afvoercoëfficiënt als functie van h1/a voor verlengde drempel bovenstrooms, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden.

Tabel 8-7 Meetpunten in drempel, verlengde drempel bovenstrooms, trapeziumvormig talud, meetopening 6a in landhoofden.

Qf (m^3/s)	v (m/s)	h1 (m)	a (m)	h1/a (-)	Cd (-)
0,02006	0,232	0,323	0,1769	1,83	0,968
0,02004	0,321	0,325	0,1291	2,52	0,956
0,02003	0,474	0,327	0,0885	3,69	0,943
0,02003	0,876	0,347	0,0486	7,14	0,929
0,04011	0,917	0,376	0,0910	4,13	0,949
0,04011	0,647	0,362	0,1286	2,81	0,953
0,04011	0,490	0,357	0,1688	2,11	0,959
0,04011	0,409	0,354	0,2021	1,75	0,960
0,08000	0,671	0,408	0,2446	1,67	0,963
0,08010	0,867	0,420	0,1888	2,22	0,968
0,10080	0,786	0,432	0,2622	1,65	0,967
0,04016	0,500	0,318	0,1652	1,92	0,961
0,04016	0,668	0,281	0,1236	2,27	0,961
0,04022	0,924	0,263	0,0901	2,92	0,956
0,04020	0,336	0,390	0,2447	1,59	0,965
0,04020	0,405	0,394	0,2033	1,94	0,964
0,04020	0,516	0,397	0,1606	2,47	0,959
0,04031	0,689	0,401	0,1189	3,37	0,972
0,04029	0,904	0,412	0,0915	4,50	0,963
0,04020	0,682	0,401	0,1207	3,32	0,966
0,04018	0,514	0,397	0,1611	2,46	0,958
0,04017	0,412	0,394	0,2006	1,96	0,961
0,04021	0,292	0,430	0,2801	1,54	0,972
0,04022	0,343	0,431	0,2397	1,80	0,966
0,04022	0,412	0,433	0,1998	2,17	0,965
0,04022	0,518	0,435	0,1600	2,72	0,959
0,04021	0,681	0,441	0,1204	3,66	0,969
0,04021	0,924	0,453	0,0897	5,05	0,959
0,04020	0,682	0,324	0,1205	2,69	0,967
0,04020	0,906	0,336	0,0913	3,68	0,961
0,04020	0,921	0,295	0,0902	3,27	0,956
0,02004	0,866	0,263	0,0474	5,55	0,965
0,02003	0,457	0,246	0,0901	2,73	0,961
0,02002	0,879	0,305	0,0470	6,49	0,959
0,02002	0,458	0,286	0,0906	3,16	0,954
0,02002	0,315	0,283	0,1300	2,18	0,965
0,02012	0,898	0,385	0,0465	8,28	0,952
0,02008	0,464	0,365	0,0901	4,05	0,950
0,02007	0,317	0,361	0,1303	2,77	0,961
0,02007	0,214	0,360	0,1701	2,12	0,966
0,02006	0,195	0,359	0,2092	1,72	0,974
0,02006	0,872	0,421	0,0475	8,86	0,958
0,02013	0,463	0,405	0,0904	4,48	0,951
0,02013	0,315	0,401	0,1304	3,08	0,969

Tabel 8-7 (vervolg)

Qf (m^3/s)	v (m/s)	h1 (m)	a (m)	h1/a (-)	Cd (-)
0,02012	0,240	0,400	0,1705	2,35	0,972
0,02010	0,193	0,399	0,2106	1,89	0,980
0,02009	0,164	0,398	0,2479	1,61	0,978
0,08054	0,807	0,376	0,2025	1,86	0,974
0,08052	0,921	0,382	0,1779	2,15	0,972
0,08069	0,923	0,462	0,1795	2,57	0,962
0,08072	0,785	0,454	0,2094	2,17	0,970
0,08062	0,686	0,448	0,2392	1,87	0,971
0,08060	0,579	0,443	0,2834	1,56	0,971
0,08067	0,926	0,488	0,1788	2,73	0,963
0,08067	0,782	0,478	0,2115	2,26	0,964
0,08070	0,687	0,474	0,2404	1,97	0,965
0,08072	0,590	0,483	0,2809	1,72	0,963
0,08072	0,516	0,480	0,3207	1,50	0,964
0,10000	0,682	0,465	0,3000	1,55	0,966
0,10000	0,757	0,469	0,2695	1,74	0,969
0,10010	0,851	0,473	0,2393	1,98	0,971
0,10050	0,862	0,415	0,2362	1,76	0,976



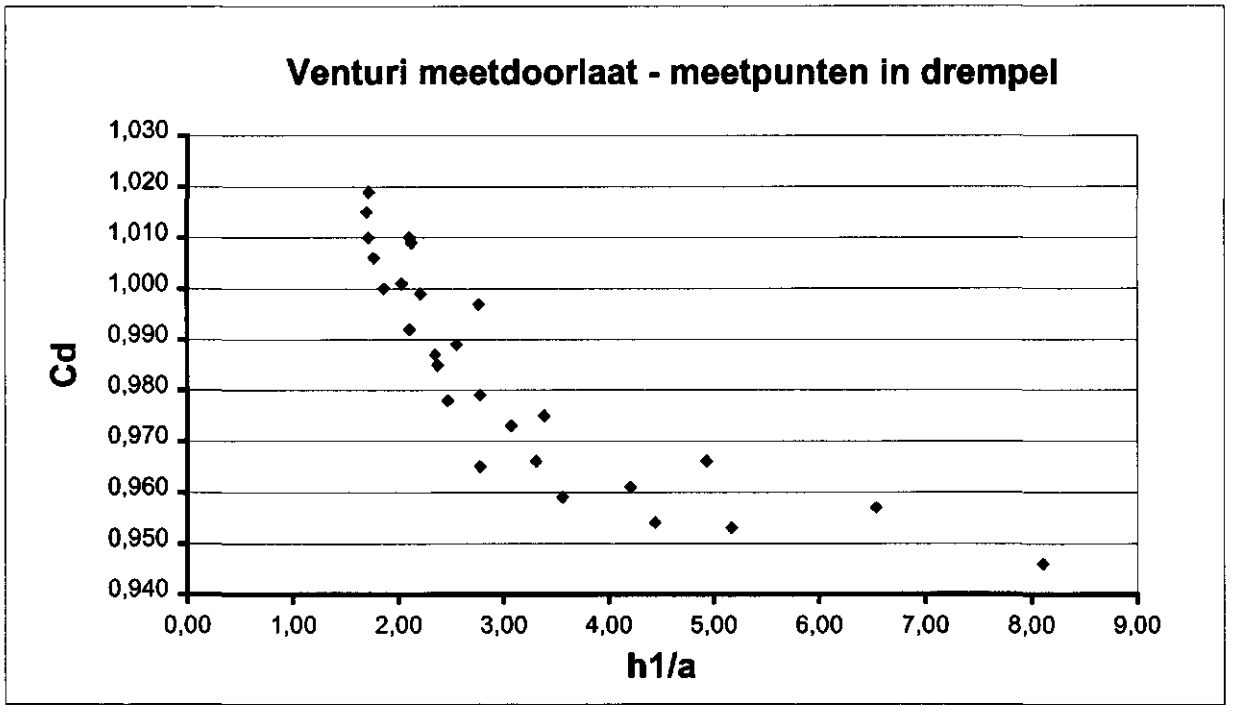
Figuur 8-10 Afvoercoëfficiënt als functie van h1/a voor verlengde drempel bovenstrooms, met afgerond talud en meetopening 1 in landhoofden en met trapeziumvormig talud en meetopening 6a in landhoofden.

8.2.3 Metingen met verlengde drempel boven- en benedenstrooms

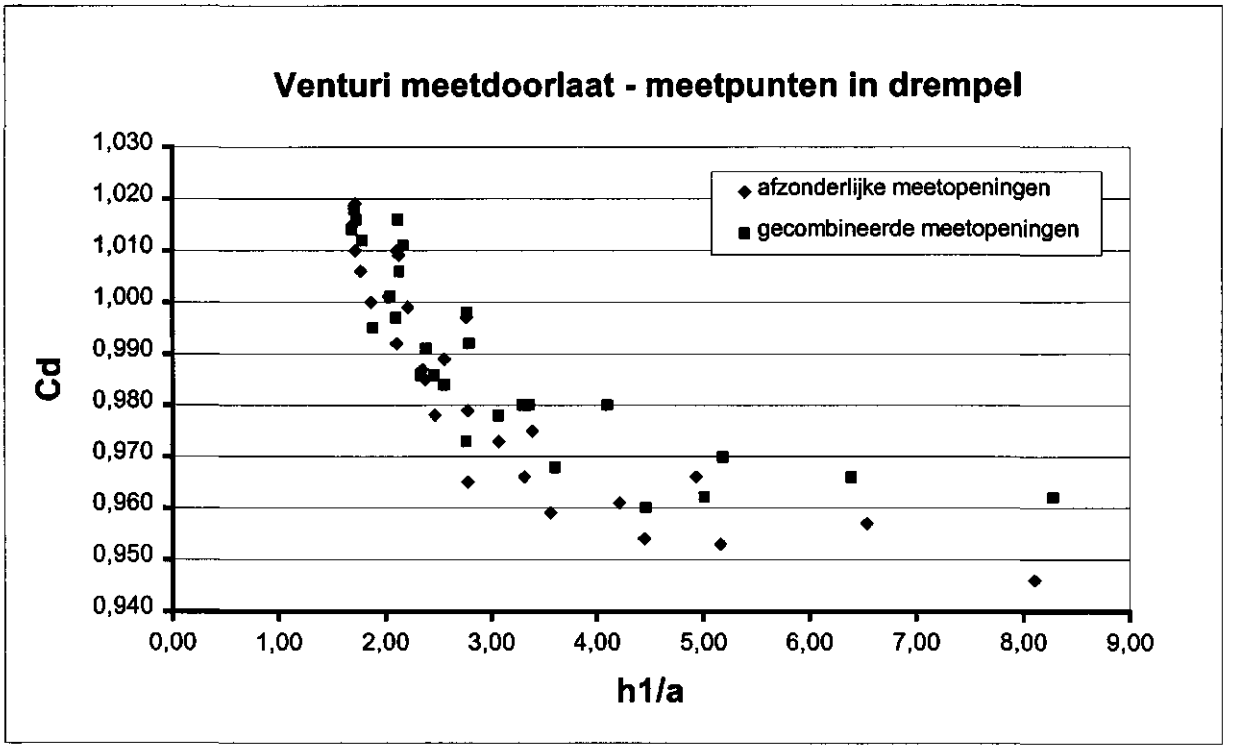
Om de opstelling weer symmetrisch te maken voor twee stroomrichtingen, is de drempel ook aan de benedenstroomse zijde verlengd, op dezelfde wijze als aan de bovenstroomse zijde (figuur 5a). Deze metingen zijn wederom uitgevoerd met een afgerond talud en meetopening 1 in de landhoofden. De resultaten staan vermeld in tabel 8-8 en zijn grafisch uitgezet in figuur 8-11.
Bij deze opstelling is nogmaals onderzocht of het koppelen van de vijf meetopeningen in de drempel, en dus het meten van één gemiddelde stijghoogte, invloed heeft op de waarde van de afvoercoëfficiënt. De meetresultaten staan vermeld in tabel 8-9. Uit figuur 8-12 blijkt dat het meten van vijf afzonderlijke stijghoogtes of het meten van één gemiddelde stijghoogte geen verschillende waarden voor de afvoercoëfficiënt oplevert, hetgeen de meting eenvoudiger en sneller kan laten verlopen.

Tabel 8-8 Meetpunten in drempel, verlengde drempel boven- en benedenstrooms, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden.

Qf (m^3/s)	v (m/s)	h1 (m)	a (m)	h1/a (-)	Cd (-)
0,02014	0,231	0,321	0,1722	1,86	1,000
0,02011	0,312	0,322	0,1304	2,47	0,978
0,02009	0,454	0,325	0,0913	3,56	0,959
0,02009	0,798	0,340	0,0520	6,54	0,957
0,04006	0,922	0,376	0,0893	4,21	0,961
0,04011	0,621	0,362	0,1303	2,78	0,979
0,04011	0,471	0,357	0,1697	2,10	0,992
0,04011	0,393	0,354	0,2002	1,77	1,006
0,08000	0,647	0,409	0,2409	1,70	1,015
0,08000	0,835	0,419	0,1895	2,21	0,999
0,10030	0,929	0,445	0,2113	2,11	1,010
0,10030	0,767	0,435	0,2537	1,71	1,019
0,02020	0,460	0,250	0,0900	2,78	0,965
0,02020	0,816	0,265	0,0513	5,17	0,953
0,04050	0,921	0,298	0,0900	3,31	0,966
0,04049	0,675	0,286	0,1204	2,38	0,985
0,02028	0,238	0,400	0,1703	2,35	0,987
0,02028	0,316	0,401	0,1305	3,07	0,973
0,02028	0,461	0,405	0,0911	4,45	0,954
0,02026	0,818	0,420	0,0518	8,11	0,946
0,04051	0,375	0,433	0,2136	2,03	1,001
0,04051	0,475	0,435	0,1703	2,55	0,989
0,04051	0,631	0,441	0,1302	3,39	0,975
0,04051	0,901	0,454	0,0920	4,93	0,966
0,07988	0,556	0,483	0,2814	1,72	1,010
0,07988	0,682	0,488	0,2295	2,13	1,009
0,07988	0,879	0,498	0,1802	2,76	0,997



Figuur 8-11 Afvoercoëfficiënt als functie van h1/a voor verlengde drempel boven- en benedenstrooms, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden.

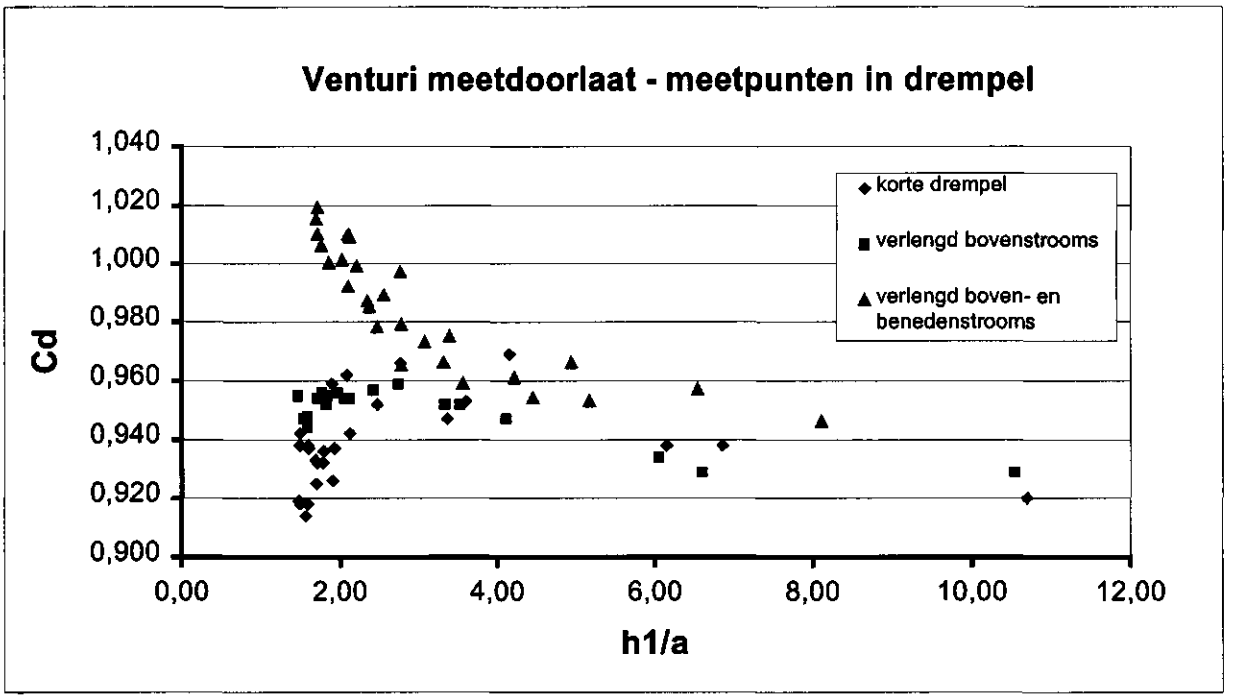


Figuur 8-12 Afvoercoëfficiënt als functie van h1/a voor verlengde drempel boven- en benedenstrooms, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofd, voor vijf afzonderlijke meetopeningen in drempel en voor vijf gekoppelde meetopeningen.

Tabel 8-9 Meetpunten in drempel, verlengde drempel boven- en benedenstrooms, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden, vijf meetopeningen in drempel gekoppeld tot één meetpunt.

Qf (m^3/s)	v (m/s)	h1 (m)	a (m)	h1/a (-)	Cd (-)
0,01999	0,235	0,398	0,1706	2,33	0,986
0,01998	0,310	0,400	0,1303	3,07	0,978
0,01996	0,454	0,403	0,0904	4,46	0,960
0,01995	0,812	0,418	0,0505	8,28	0,962
0,04008	0,909	0,454	0,0906	5,01	0,962
0,04005	0,618	0,440	0,1306	3,37	0,980
0,04004	0,472	0,435	0,1702	2,56	0,984
0,04001	0,374	0,432	0,2115	2,04	1,001
0,08010	0,554	0,485	0,2810	1,73	1,016
0,08010	0,684	0,491	0,2301	2,13	1,006
0,08010	0,887	0,502	0,1799	2,79	0,992
0,02020	0,777	0,340	0,0532	6,39	0,966
0,02018	0,457	0,325	0,0901	3,61	0,968
0,02011	0,308	0,322	0,1311	2,46	0,986
0,02011	0,235	0,321	0,1700	1,89	0,995
0,04024	0,394	0,355	0,1994	1,78	1,012
0,04026	0,471	0,356	0,1696	2,10	0,997
0,04026	0,613	0,360	0,1300	2,77	0,998
0,04027	0,890	0,374	0,0913	4,10	0,980
0,08020	0,816	0,417	0,1922	2,17	1,011
0,08030	0,650	0,410	0,2400	1,71	1,018
0,10020	0,759	0,434	0,2573	1,69	1,014
0,10030	0,932	0,443	0,2095	2,11	1,016
0,02004	0,799	0,265	0,0511	5,19	0,970
0,02004	0,450	0,250	0,0904	2,77	0,973
0,04008	0,899	0,296	0,0899	3,29	0,980
0,03961	0,660	0,285	0,1197	2,38	0,991

In figuur 8-13 tenslotte zijn de afvoercoëfficiënten voor de drie varianten van de drempellengte nogmaals met elkaar vergeleken. In alle drie gevallen bij een afgerond talud en meetopening 1 in de landhoofden. Het is duidelijk dat de vormgeving van de drempel invloed heeft op de waarde van de afvoercoëfficiënt, zoals ook was te verwachten. Toepassing van andere vormen drempels en ook andere vormgeving van de onderzijde van de drijver zal leiden tot andere afvoercoëfficiënten, zodat de hier gepresenteerde relaties slechts geldig zijn voor de onderzochte varianten. Voor een betrouwbare afvoermeting zal de afvoercoëfficiënt voor iedere afwijkende vormgeving steeds opnieuw vastgesteld moeten worden.



Figuur 8-13 Afvoercoëfficiënt als functie van h1/a voor korte drempel, verlengde drempel bovenstrooms en verlengde drempel boven- en benedenstrooms, afgerond talud, meetopening 1 in landhoofden.

9. NAUWKEURIGHEID VAN DE BEPALING VAN HET DEBIET

De fouten in de bepaling van het debiet uit de gemeten stijghoogten en de doorstroomopening worden onderscheiden in *systematische* en *toevallige* fouten. *Systematische* fouten kunnen bijvoorbeeld optreden bij het instellen van de nulinstelling en het meetbereik van de drukopnemer en van de potentiometer voor het meten van de doorstroomhoogte (a) en in de opgemeten doorstroombreedte. Zodra een systematische fout is geconstateerd, kan hierop worden gecorrigeerd. Zolang ze niet is geconstateerd, is ze evenmin te kwantificeren.
Toevallige fouten zijn inherent aan de meetmethode en de gebruikte apparatuur.
Voor de in dit rapport beschreven opstelling geldt de volgende afvoerformule:

$$Q = Cd \cdot a \cdot B \cdot v$$

met:

- Q = het debiet
- Cd = afvoercoëfficiënt
- a = doorstroomhoogte tussen drempel en drijver
- B = breedte van de doorstroomopening tussen de landhoofden
- v = gemiddelde stroomsnelheid in de Venturi doorlaat

Hiervoor geldt de volgende toevallige fout in het debiet:

$$X_Q = \sqrt{X_{Cd}^{\ 2} + X_a^{\ 2} + X_B^{\ 2} + X_v^{\ 2}}$$

met:

- X_Q = procentuele fout in het debiet Q
- X_{Cd} = procentuele onzekerheid in de factor Cd
- X_a = procentuele fout in de bepaling van de doorstroomhoogte a
- X_B = procentuele fout in de bepaling van de doorstroombreedte B
- X_v = procentuele fout in de bepaling van de gemiddelde stroomsnelheid v

Bij zorgvuldig uitgevoerd modelonderzoek mag worden aangenomen dat de onzekerheid in de factor Cd ongeveer 2,5% bedraagt. Dit is een waarde die ook in internationale standards wordt gehanteerd voor dit type onderzoek.
De onnauwkeurigheid in de meting van de doorstroomhoogte a kan worden gesteld op maximaal 1 mm. Voor kleine openingen zal dit een hogere procentuele fout opleveren dan voor grote openingen. Dit levert de volgende waarden op voor X_a:

a = 50 mm $X_a = 2\%$

a = 300 mm $X_a = 0{,}33\%$

De onnauwkeurigheid in B is een systematische fout omdat deze breedte exact kan worden opgemeten en hiervoor kan worden gecorrigeerd. Vandaar dat hier deze fout wordt verwaarloosd.

Blijft de procentuele fout in de berekende gemiddelde stroomsnelheid v. Deze is gecompliceerder, omdat deze afhankelijk is van de wijze waarop v wordt bepaald.
De stroomsnelheid in één meetpunt in drempel of drijver voor één individuele meting wordt berekend als $v = \sqrt{2g(h_1-h_2)}$, waarbij h_1 en h_2 respectievelijk de stijghoogtes in het landhoofd en de drempel/drijver zijn. Deze twee waterhoogtes (drukken) worden afzonderlijk gemeten met de drukopnemer. Uit de specificaties van de drukopnemer en controlemetingen aan de proefopstelling blijkt de onnauwkeurigheid maximaal ongeveer 0,3 mm te bedragen.
Voor h_1-h_2 bedraagt de waarschijnlijke onnauwkeurigheid dan $\sqrt{(0,3^2 + 0,3^2)} = 0,42$ mm.
Ook hier geldt wederom dat de procentuele fout bij kleine waarden van h_1-h_2 en dus lage stroomsnelheden, toe zal gaan nemen. Voor een individuele meting geldt dan dat $X_{v(i)} = 0,5X_{(h1-h2)}$.
De gemiddelde stroomsnelheid voor één meetcyclus wordt berekend uit vijf individuele metingen. Dit verkleint de onnauwkeurigheid van de bepaling van de gemiddelde stroomsnelheid v met een factor $\sqrt{5}$. Ook in het geval dat de vijf meetpunten worden gekoppeld en dus maar één meting plaatsvindt voor de stijghoogte in de Venturi doorlaat, mogen we aannemen dat door de middeling de onnauwkeurigheid op dezelfde wijze afneemt.

$h_1-h_2 = 50$ mm	$X_{(h1-h2)} = 0,84\%$	$X_{v(i)} = 0,42\%$	$X_v = 0,19\%$
$h_1-h_2 = 5$ mm	$X_{(h1-h2)} = 8,4\%$	$X_{v(i)} = 4,2\%$	$X_v = 1,9\%$
$h_1-h_2 = 2$ mm	$X_{(h1-h2)} = 21\%$	$X_{v(i)} = 10,5\%$	$X_v = 4,7\%$

Tijdens het modelonderzoek werd de meetcyclus steeds minimaal 10x herhaald en vond daarover nogmaals middeling plaats. Dit reduceert de waarschijnlijke fout nogmaals met een factor $\sqrt{10}$. In het laboratorium kan voor onbepaalde tijd een stationaire toestand worden gehandhaafd. In het veld is dit uiteraard niet het geval. Voor veldomstandigheden wordt daarom aangenomen dat de gemiddelde stroomsnelheid wordt berekend uit één meetcyclus.

In onderstaand overzicht is de resulterende waarschijnlijke onnauwkeurigheid in Q (X_Q) voor enkele situaties berekend.

$h_1-h_2 = 50$ mm, overeenkomend met v = 0,99 m/s

a = 50 mm $\quad X_Q = \sqrt{2,5^2 + 2^2 + 0^2 + 0,19^2} = 3,2\%$

a = 300 mm $\quad X_Q = \sqrt{2,5^2 + 0,33^2 + 0^2 + 0,19^2} = 2,5\%$

$h_1-h_2 = 5$ mm, overeenkomend met v = 0,31 m/s

a = 50 mm $\quad X_Q = \sqrt{2,5^2 + 2^2 + 0^2 + 1,9^2} = 3,7\%$

a = 300 mm $\quad X_Q = \sqrt{2,5^2 + 0,33^2 + 0^2 + 1,9^2} = 3,2\%$

h_1-h_2 = 2 mm, overeenkomend met v = 0,20 m/s

a = 50 mm $\quad X_Q = \sqrt{2{,}5^2 + 2^2 + 0^2 + 4{,}7^2} = 5{,}7\%$

a = 300 mm $\quad X_Q = \sqrt{2{,}5^2 + 0{,}33^2 + 0^2 + 4{,}7^2} = 5{,}3\%$

In veldomstandigheden zal de nauwkeurigheid van de afvoermeting kunnen variëren met de keuze van de gebruikte apparatuur voor het meten van de doorstroomhoogte en van de stijghoogtes. Ook speelt de zorgvuldigheid waarmee nul-waardes en meetbereiken worden ingesteld en of deze regelmatig worden gecontroleerd een belangrijke rol in de nauwkeurigheid van de totale afvoermeting. De hierboven genoemde percentages zullen moeten worden aangepast aan de specificaties van de gebruikte apparatuur conform de in deze paragraaf beschreven methode.

10. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Conclusies

- Het blijkt met de geteste laboratoriumopstelling goed mogelijk om afvoermetingen te verrichten met een acceptabele onnauwkeurigheid bij gebruik van de van toepassing zijnde Cd-waarden. Gesteld kan worden dat het bij toepassing van zeer nauwkeurige apparatuur voor de bepaling van de stijghoogtes en de doorstroomhoogte en bij regelmatige controle van nulpuntsinstellingen en meetbereik, mogelijk is de afvoer te bepalen met een onnauwkeurigheid ten gevolge van toevallige fouten die beter is dan ca. 5% voor stroomsnelheden in de vernauwing tussen 0,3 en 1,0 m/s. Voor stroomsnelheden tussen 0,2 en 0,3 m/s zal dit enkele procenten hoger kunnen liggen.
- De resultaten tonen aan, dat de waarde van de afvoercoëfficiënt Cd in sterke mate wordt bepaald door de vormgeving van de drempel en waarschijnlijk ook van de drijver, hoewel dit niet is onderzocht. Dit geldt in het bijzonder voor waarden van h1/a < ca. 4. De in dit rapport gepresenteerde waarden zijn dan ook slechts geldig voor de betreffende vormgeving van drempel en drijver. Toepassing van afwijkende vormen maakt een calibratie noodzakelijk, tenzij met een grotere onnauwkeurigheid genoegen wordt genomen.
- De plaats van de meetopeningen in de landhoofden bij een afgerond talud heeft slechts geringe invloed op de waarde van de afvoercoëfficiënt. De situatie waarin het trapeziumvormige dwarsprofiel is doorgetrokken tot tegen de landhoofden, waardoor de meetopening vrij dicht bij de instroomopening moest worden aangebracht levert een Cd-waarde die tot ca.3% hoger is dan de situatie met afgerond talud en de meetopening zo ver mogelijk verwijderd van de instroom.
- Het achteraf middelen van vijf afzonderlijke metingen in de drempel/drijver of het met elkaar verbinden van deze vijf meetpunten en het meten van deze ene waarde leverde geen verschillen op. Het aantal metingen kan dus sterk worden beperkt.
- De opstelling met de twee scharnierende armen functioneerde goed en heeft als voordeel dat de landhoofden glad kunnen worden afgewerkt. Waarschijnlijk is het wel nodig enige mechanische demping aan te brengen in de verticale beweging, om te voorkomen dat de drijver korte niveauschommelen door bijvoorbeeld golven en wind zal volgen. Ook moet worden gezorgd voor een goede flexibele afdichting tussen drijver en landhoofd om lekkage tot een minimum te beperken.
- Meetpunten in de drempel heeft als voordeel dat geen flexibele overbrenging van de stijghoogtes in de drijver naar de meetapparatuur nodig is, waardoor ontluchting van de meetleidingen aanmerkelijk eenvoudiger wordt. Wel zal de nodige aandacht moeten worden geschonken aan mogelijkheden om verstopping van de meetopeningen te voorkomen.

Aanbevelingen

- Teneinde de invloed van de zijwanden op de snelheidsverdeling in de dwarsrichting te beperken, wordt een minimale breedte in de venturi van 0,30 m aanbevolen. Dit is conform de "limits of application" die in de ISO-standards voor meetstuwen tussen verticale zijwanden worden gehanteerd. Voor h1/a dient een minimale waarde van ca. 1,6 te worden gehanteerd, aangezien geen metingen zijn uitgevoerd voor lagere waarden.
- De geschiktheid van de onderzochte opstelling in een veldsituatie kan het best worden beoordeeld door een proefopstelling gedurende een geheel jaar nauwgezet te testen. In het bijzonder onder winterse omstandigheden dient ervoor te worden gezorgd dat meetleidingen en meetapparatuur niet kunnen bevriezen.
- Bij het toepassen van meetopeningen in de drempel dient er een voorziening te zijn om deze openingen op eenvoudige wijze door te kunnen spoelen, zodat deze niet verstopt raken.
- Zowel de onderkant van de drijver als de drempel dienen regelmatig te worden gereinigd en ontdaan van eventuele aangroeingen (bijv. algen) omdat dit anders een extra fout in de meting zal veroorzaken.
- Er zal de nodige aandacht moeten worden geschonken aan de afscherming van de drijver en de apparatuur met het oog op mogelijk vandalisme.
- Het is zeer wel mogelijk dat drijvend vuil zich zal ophopen voor de drijver en daardoor de werking ervan zal bemoeilijken. Een drijfbalk op enige afstand voor de opstelling kan een mogelijkheid zijn om het meeste vuil eerder op te vangen. Een andere mogelijkheid kan zijn de scharnierende armen zodanig uit te voeren, dat het mogelijk is dat deze de drijver indien nodig tot boven de waterspiegel kunnen tillen, zodat het drijvend vuil zijn weg kan vervolgen.
- Onze voorkeur gaat uit naar een variant met meetpunten in de drempel, mits kan worden voorzien in een mogelijkheid om verstopping hiervan te voorkomen. De variant met een verlengde drempel aan de bovenstroomse zijde levert, vooral bij lagere h1/a-waarden, de meest constante waarde van Cd op en kan daarom de voorkeur genieten. Wanneer behoefte bestaat aan een symmetrische uitvoering vormt de variant met verlengde drempel aan boven- en benedenstroomse zijde een goed alternatief.

  Bovendien is het waarschijnlijk mogelijk om bij een geheven drijver – dus tot boven de waterspiegel – het debiet af te leiden uit de bovenstroomse en benedenstroomse waterstand tot zelfs hoge verdrinkingsgraden. ISO International Standard 4362 – "Measurement of liquid flow in open channels – Trapezoidal profile weirs" geeft hier uitsluitsel over. De huidige opstelling wijkt enigszins af van de in deze Standard beschreven opstelling, zodat een vervolgonderzoek naar de juiste afvoerrelatie is aan te

raden. Ook de invloed van de drempellengte en de helling van instroom en uitstroom daarvan, evenals de vorm van de onderkant van de drijver op de afvoercoëfficiënt zijn onderwerpen voor een mogelijk vervolgonderzoek.

11. FOTOPAGINA'S

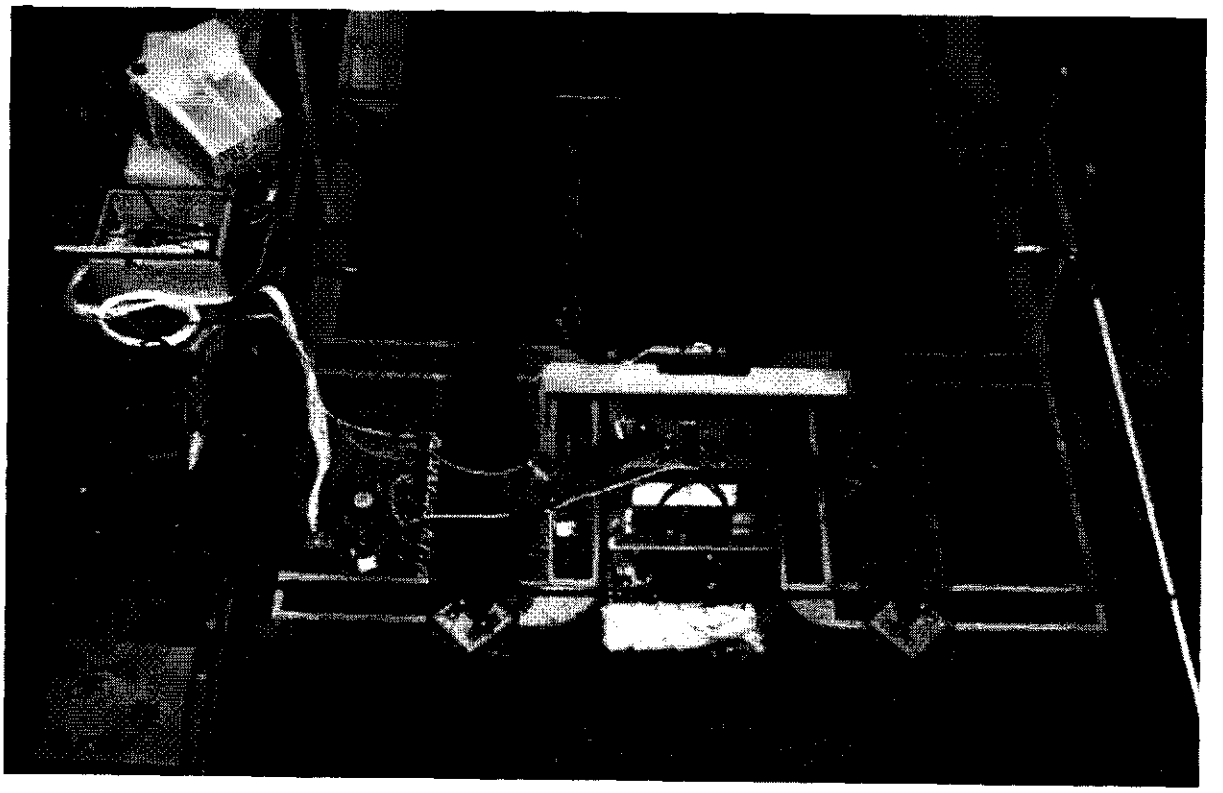


Foto 1 Overzicht meetopstelling, drijver met ophangarmen

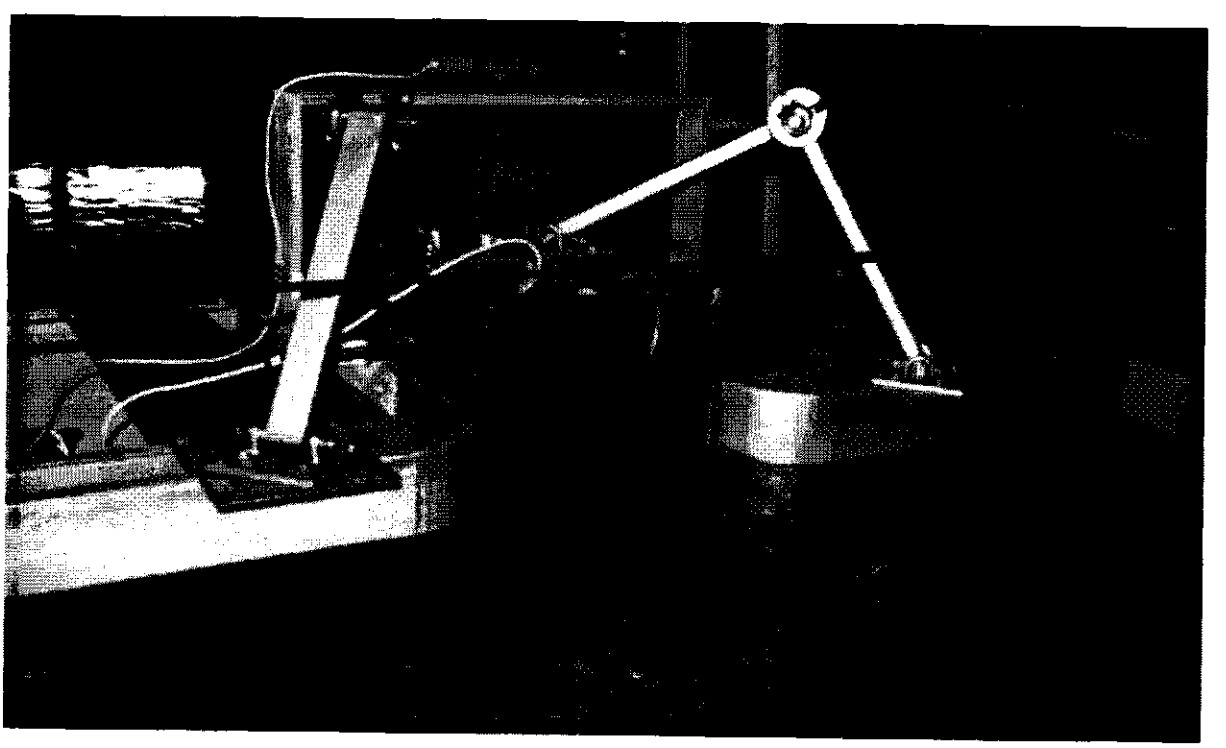


Foto 2 benedenstrooms aanzicht landhoofden en drijver met ophangarmen

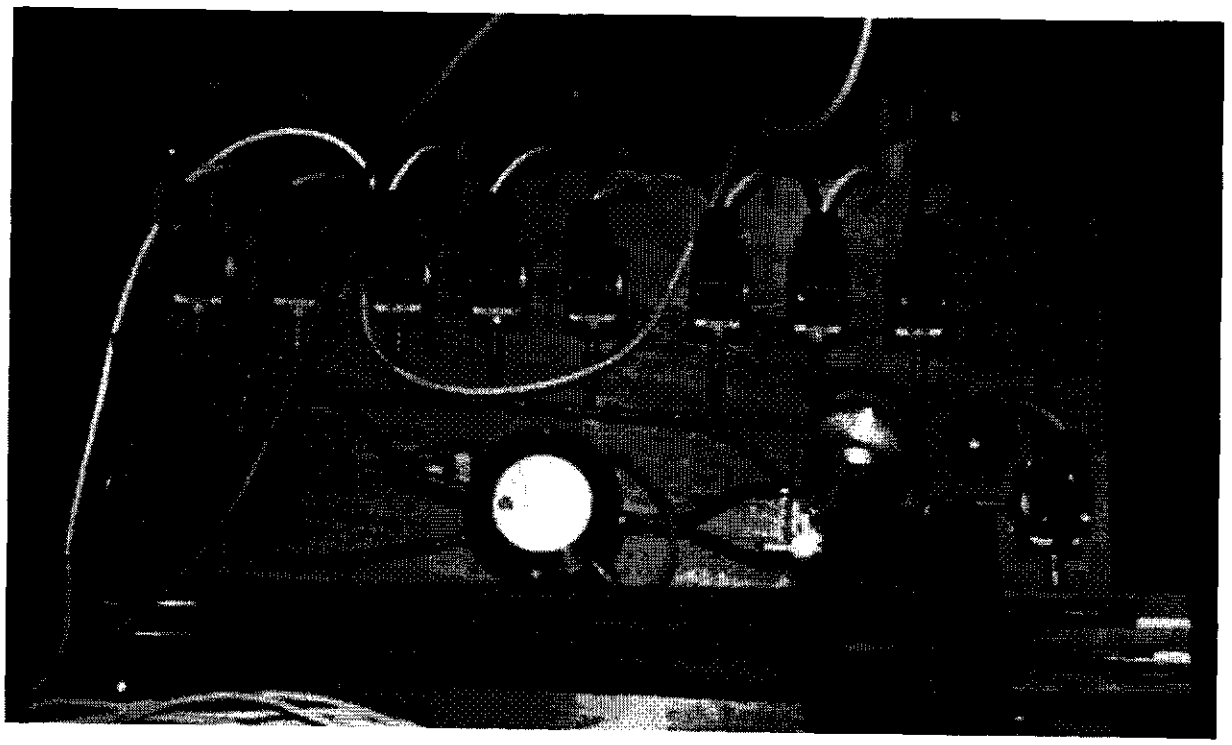


Foto 3 Detail drukopnemer, referentie stilling well en elektrische kranen voor bediening meetpunten

Foto 4 Drijver met zijgeleiding en vijf stilling wells voor meetpunten in bodem drijver