

IJking Aflaatwerk naar het Twenthekanaal in Lochem

W. Boiten en A. Dommerholt

Rapport 114

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

ISSN 0926-230X

167 2757

INHOUD

Lijst van figuren, tabellen en fotobladen

Lijst van symbolen en eenheden

1.	Inleiding	1
2.	Beschrijving aflatwerk naar het Twenthekanaal	2
3.	Stuwpeil en oude afvoerrelaties	4
4.	Locatie waterstandsmeetpunt	5
5.	Modelonderzoek	7
6.	De nieuwe afvoerrelaties	10
7.	Resumé en aanbevelingen	16

Fotobladen

Annex A Modelonderzoek aflatwerk Lochem

Lijst van figuren, tabellen en fotobladen

Figuren

1. Het aflatwerk
2. Maatvoering van de schuif
3. De afvoercoëfficiënt C als functie van de energiehogte H_1
4. $Q - H_1$ relatie aflatwerk Lochem voor $H_1 \leq 0,40$ m
5. $Q - H_1$ relatie aflatwerk Lochem voor $H_1 \geq 0,40$ m

Tabellen

- I Afstellingsschema van verdeelwerk Lochem
- II Informatie over topafvoeren
- III De nieuwe afvoerrelatie voor het aflatwerk Lochem
- IV Samenvatting nieuwe afvoervergelijkingen
- V Vergelijking oude afvoerrelatie tot de nieuwe

Fotobladen

- I Aflatwerk naar het Twenthekanaal in Lochem
- II Het detailmodel, $n_t = 2,75$
- III Het overzichtsmodel, $n_t = 10$
- IV Effect drempel op de afvoercoëfficiënt
- V IJking overzichtsmodel bij een topafvoer

Lijst van symbolen en eenheden

A	oppervlakte dwarsdoorsnede	m^2
B	dagmaat, breedte	m
C	afvoercoëfficiënt in de afvoerformule	-
g	versnelling zwaartekracht	m/s^2
h_1	overstorthoogte t.o.v. de kruin	m
h_k	kruinhoogte	m NAP
h_v	h_1 bij stuwpeil en laagste kruinstand	m
H_1	energiehoogte werkelijkheid	m
H_m	energiehoogte model	m
n_t	lengteschaal model	-
Q	debiet werkelijkheid	m^3/s
Q_m	modeldebiet	m^3/s
Q_v	debiet bij h_v	m^3/s
R	afrondingsstraal landhoofden	m
v	stroomsnelheid in meetraai	m/s
WS1	bovenstrooms energie niveau, $WS1 = H_1 + h_k$	m NAP
WS2	benedenstrooms peil	m NAP
X_C	onnauwkeurigheid in C	%
X_h	onnauwkeurigheid in h_1 en H_1	%
X_Q	onnauwkeurigheid in Q	%
σ_h	absolute fout in h_1 en H_1	m

Inleiding

Op 20 december 2001 verleende het Waterschap Rijn en IJssel opdracht aan de Sectie Waterhuishouding, Wageningen Universiteit, per brief 01.12654, tot de ijking van het aflatwerk naar het Twenthekanaal in Lochem.

De opdracht was conform de offerte 01.378 WB/ah d.d. 7 december 2001, waarin werd geadviseerd de afvoerrelatie van het aflatwerk te bepalen met behulp van een modelcalibratie voor ongestuwde afvoer met twee modellen:

- een detailmodel, schaal $n_\ell = 2,75$, waarin de helft van de schuifstuw is gebouwd tussen verticale wanden, een bij benadering twee dimensionaal model. Het meetbereik is $0,05 < H_1 < 0,50$ m, de lagere afvoeren.
- een overzichtsmoel, schaal $n_\ell = 10$, waarin de gehele schuifstuw is gebouwd, inclusief een gedeelte van het bovenstrooms pand. Het bereik is $0,30 < H_1 < 2,40$ m, de hogere afvoeren.

De ijking van het aflatwerk heeft plaats gevonden in het Hydraulica Laboratorium "De Nieuwlanden" te Wageningen.

Voorafgaand en tijdens het onderzoek is er enige keren overleg geweest met mw. Taminiau en mw. Otten, en is de schuifstuw gedetailleerd opgemeten, bij gebrek aan tekeningen.

Het gehele onderzoek stond onder leiding van dhr. W. Boiten, gastmedewerker bij de Sectie Waterhuishouding van de Wageningen Universiteit.

Het verdeelwerk Lochem bestaat uit twee naast elkaar gelegen klepstuwen in de doorgaande Berkel, en een aflatwerk in de aftakking van de Berkel naar het Twenthekanaal.

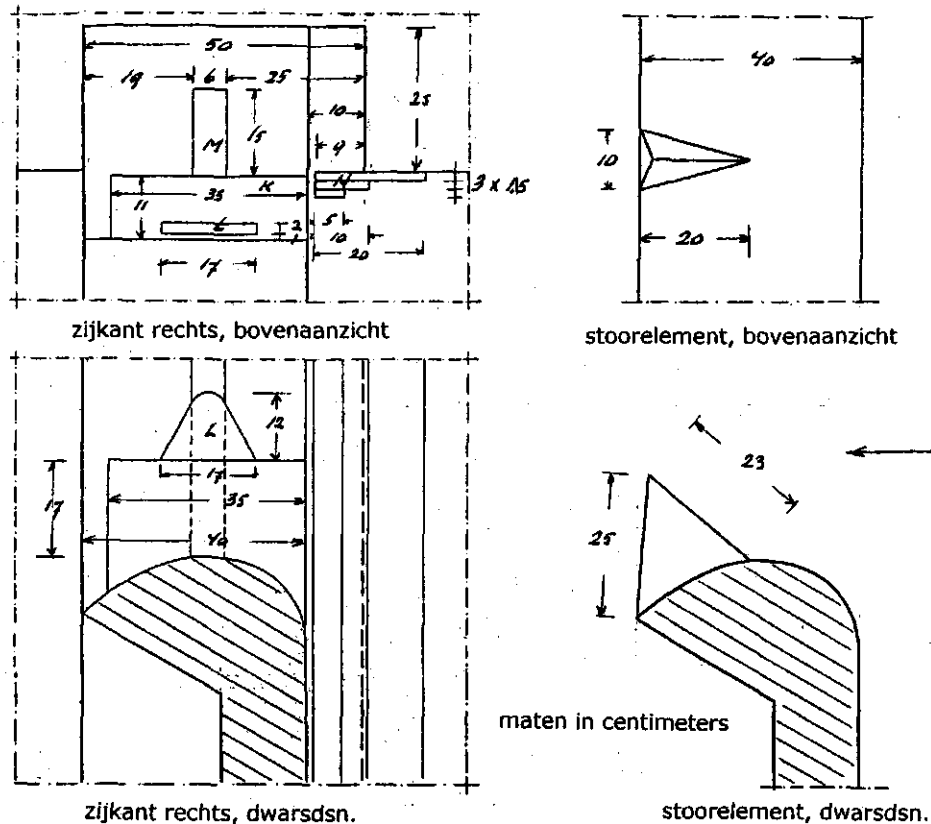
Figuur 1 geeft een beeld van de schuifstuw, gekopieerd van de revisietekening van het Technisch Bureau van de Unie van Waterschapsbonden N.V., oktober 1965.



Enkele belangrijke gegevens in de maatvoering van het aflatwerk zijn de volgende:

- bodemligging bovenstrooms NAP +9,00 m
- afronding landhoofden $R = 1,40$ m
- drempel vóór de schuif: lengte 2,10 m en hoogte NAP +9,85 m
- bereik verticale schuif: $\text{NAP} +10,08 \text{ m} \leq h_k \leq \text{NAP} +11,80 \text{ m}$
- dagmaat tussen de betonwanden $B = 5,00$ m

Figuur 2 geeft de details van de schuif, zoals ter plaatse opgemeten.



Figuur 2 Maatvoering van de schuif

Enkele belangrijke gegevens in deze maatvoering volgens figuur 2 zijn de volgende:

- de kruin is een sterk gekromde staalplaat, 0,40 m lang in de stroomrichting
- de ophangblokken K zijn 0,17 m hoog en versmallen de kruinbreedte tot $B = 4,76$ m
- op de kruin staan twee stoorelementen/straalbrekers, gelijk verdeeld over de breedte
- de schuif is met heugelstangen M beweegbaar in sponningen 0,50 m breed en 0,25 m diep
- bij overstorthoogtes groter dan 0,17 m stroomt een geringe hoeveelheid water achter de heugelstangen langs (kierbreedte ca. 0,12 m aan weerszijden).

Alle in figuur 2 vermelde maten zijn in het voorjaar 2002 ter plaatse opgemeten.

Fotoblad I geeft een indruk van het aflatwerk in Lochem.

3. Stuwpeil en oude afvoerrelaties

Het stuwpeil in de Berkel ter plaatse van het aflatwerk bedraagt NAP +11,78 m.

De verticale schuif heeft een ingesteld bewegingsbereik:

- onder eind contact NAP +10,08 m (0,23 m boven de drempel)
- bove eind contact NAP +11,80 m (0,02 m boven het stuwpeil)

De schuifstand wordt dus bepaald door het debiet.

Tabel I toont het afstellingsschema van het verdeelwerk Lochem (de debietverdeling tussen enerzijds de beide klepstuwen en anderzijds het aflatwerk). De afvoerrelatie voor het aflatwerk is gebaseerd op $Q = 11,424 h_1^{1,545}$. In dit schema worden vier modes onderscheiden.

Als de schuif in de laagste stand staat en de bovenwaterstand op stuwpeil is, dan is de overstorthoogte $h_v = 1,70$ m en is het debiet Q_v . Voor debieten $Q > Q_v$ wordt het stuwpeil overschreden (mode 3 en mode 4).

Uit informatie van het waterschap wordt niet geheel duidelijk, welke afvoerrelatie voor het aflatwerk tot nu toe is gehanteerd:

- formule 1 $Q = 11,424 h_1^{1,545}$

is de $Q-h_1$ relatie van het afstellingsschema voor het verdeelwerk Lochem en klopt ook met de verstrekte informatie over de topafvoeren.

- formule 2 $Q = 11,424 h_1^{1,569}$

wordt vermeld als de $Q-h_1$ relatie van het aflatwerk te Lochem zoals tot nu toe gebruikt, en klopt ook met de verstrekte informatie over de topafvoer Q_v .

Tabel II geeft een overzicht van informatie over topafvoeren.

Aflatwerk Lochem	Afvoer Q (m ³ /s)	Peil (m NAP)	overstorthoogte h_1 (m)	schuifstand h_K (m NAP)
Q_v (ca 5x per jaar)	26,2	11,78	1,70	10,08
(1x per jaar)	32,8	12,06	1,98	10,08
(1x per 100 jaar)	36,5	12,20	2,12	10,08

Tabel II Informatie over topafvoeren.

LOCHEM STUW

M.H.W	12.20 m+NAP (0.80 m WACO)
Q-M.H.W	40.2 m ³ /s
Qh-relatie	40.2 m ³ /s = 1.49 m
Ondereindcontact M.H.W	8.80 + 0.70 = 9.50 m+NAP
Normaalpeil Lochem	11.75 m+NAP
Q-normaal	5.6 m ³ /s = 0.44 m
Ondereindcontact normaal	

Qh-relatie **Q = 21,665*(h^{1,622})**
LOCHEM AFLAAT

M.H.W	12.20 m+NAP (0.80 m WACO)
Q-M.H.W	36.9 m ³ /s
Qh-relatie	36.9 m ³ /s = 2.12 m
Ondereindcontact M.H.W	12.20 - 2.12 = 10.08 m+NAP
Normaalpeil Haarlo	11.75 m+NAP
Q-normaal	
Ondereindcontact normaal	

Qh-relatie **Q = 11,424*(h^{1,545})**
AFSTELLINGSSCHEMA VAN VERDEELWERK LOCHEM

01 Juni 1995

 "winter regeling" : bij Q > 1.4m³/s wordt afgelaten naar het Kanaal

 : stuw 1 en 2 wisselen elkaar af bij Q<1.4m³/s

	Boven Berkel		Berkel stuw (rap)			Berkel aflaat (form)		
	Aanvoer	Peil	klep	overst	m ³ /s	schuif	overst	m ³ /s
mode 1	<1.4	11,78	11,59	0,19	1,42	11,80	0,00	0,00
mode 2	1,75	11,78	11,59	0,19	1,42	11,88	0,10	0,33
	2,37	11,78	11,59	0,19	1,42	11,58	0,20	0,95
	3,20	11,78	11,59	0,19	1,42	11,48	0,30	1,78
	4,20	11,78	11,59	0,19	1,42	11,38	0,40	2,77
	5,34	11,78	11,59	0,19	1,42	11,28	0,50	3,91
	6,61	11,78	11,59	0,19	1,42	11,18	0,60	5,19
	8,01	11,78	11,59	0,19	1,42	11,08	0,70	6,58
	9,52	11,78	11,59	0,19	1,42	10,98	0,80	8,09
	11,13	11,78	11,59	0,19	1,42	10,88	0,90	9,71
	12,85	11,78	11,59	0,19	1,42	10,78	1,00	11,42
	14,66	11,78	11,59	0,19	1,42	10,68	1,10	13,24
	16,56	11,78	11,59	0,19	1,42	10,58	1,20	15,14
	18,56	11,78	11,59	0,19	1,42	10,48	1,30	17,13
	20,64	11,78	11,59	0,19	1,42	10,38	1,40	19,21
	22,80	11,78	11,59	0,19	1,42	10,28	1,50	21,37
JHW	25,04	11,78	11,59	0,19	1,42	10,18	1,60	23,61
	26,19	11,78	11,59	0,19	1,42	10,13	1,65	24,76
	27,36	11,78	11,59	0,19	1,42	10,08	1,70	25,93
	27,59	11,80	11,63	0,17	1,19	10,08	1,72	26,41
	29,41	11,85	11,63	0,22	1,81	10,08	1,77	27,60
	31,33	11,90	11,63	0,27	2,52	10,08	1,82	28,82
	33,36	11,95	11,63	0,32	3,32	10,08	1,87	30,05
	35,49	12,00	11,63	0,37	4,20	10,08	1,92	31,30
	37,72	12,05	11,63	0,42	5,15	10,08	1,97	32,57
	38,18	12,06	11,63	0,43	5,35	10,08	1,98	32,82
mode 3	39,10	12,08	11,63	0,45	5,76	10,08	2,00	33,34
	40,04	12,10	11,63	0,47	6,18	10,08	2,02	33,85
	42,44	12,15	11,63	0,52	7,29	10,08	2,07	35,16
	44,93	12,20	11,63	0,57	8,46	10,08	2,12	36,48
	45,67	12,20	11,60	0,60	9,19	10,08	2,12	36,48
mode 4	46,94	12,20	11,55	0,65	10,46	10,08	2,12	36,48
	48,28	12,20	11,50	0,70	11,80	10,08	2,12	36,48
	49,67	12,20	11,45	0,75	13,20	10,08	2,12	36,48
	51,13	12,20	11,40	0,80	14,65	10,08	2,12	36,48
	52,65	12,20	11,35	0,85	16,17	10,08	2,12	36,48
	54,22	12,20	11,30	0,90	17,74	10,08	2,12	36,48
	55,84	12,20	11,25	0,95	19,37	10,08	2,12	36,48
	57,52	12,20	11,20	1,00	21,05	10,08	2,12	36,48
	59,26	12,20	11,15	1,05	22,78	10,08	2,12	36,48
	61,04	12,20	11,10	1,10	24,56	10,08	2,12	36,48
	62,88	12,20	11,05	1,15	26,40	10,08	2,12	36,48
	64,76	12,20	11,00	1,20	28,29	10,08	2,12	36,48
	66,70	12,20	10,95	1,25	30,22	10,08	2,12	36,48
	68,69	12,20	10,90	1,30	32,21	10,08	2,12	36,48
	70,72	12,20	10,85	1,35	34,24	10,08	2,12	36,48
	72,80	12,20	10,80	1,40	36,32	10,08	2,12	36,48
	74,93	12,20	10,75	1,45	38,45	10,08	2,12	36,48
	77,10	12,20	10,70	1,50	40,62	10,08	2,12	36,48
	79,32	12,20	10,65	1,55	42,84	10,08	2,12	36,48
	81,58	12,20	10,60	1,60	45,11	10,08	2,12	36,48

Tabel I Afstellingsschema van verdeelwerk Lochem

4. Locatie waterstandsm Meetpunt

Momenteel wordt bij het verdeelwerk Lochem – twee klepstuwen in de doorgaande Berkel en het aflatwerk naar het Twenthekanaal – het bovenstroomse peil gemeten tegen het rechterlandhoofd van de klepstuw op slechts enkele meters van de doorstroomopening.

Wat hier gemeten wordt is in ieder geval niet de waterhoogte ten behoeve van de debietmeting voor de klepstuwen. Deze waterhoogte in m NAP, waaruit de overstorthoogte h_1 t.o.v. de klepstuw wordt herleid, dient te worden gemeten:

- a) in het stroomprofiel
- b) op enkele meters bovenstrooms van de landhoofden

Op de huidige meetlocatie zal tijdens lage afvoeren het water vrijwel stagnant zijn, waardoor

dan de energiehogte $H_1 = h_1 + \frac{v^2}{2g}$ wordt gemeten. Gezien de stroomsnelheid in de gewenste meetraai dan relatief laag is, zal er geen meetbaar verschil zijn tussen h_1 en H_1 bij de klepstuwen.

Tijdens topafvoeren – mode 4 – mag worden verwacht dat de huidige waterstandsm Meetlocatie zich in een gebied met neren bevindt, waardoor niet meer duidelijk is wat er wordt gemeten: het is goed denkbaar dat tijdens topafvoeren de gemeten waterstand systematisch lager is dan zowel h_1 als H_1 .

In het afstellingsschema voor het verdeelwerk zal de waterstandsmeting, zoals nu tegen het rechterlandhoofd van de klepstuw, bij benadering representatief zijn voor de waterstand in een gewenste meetraai voor het aflatwerk, zo lang er wordt afgevoerd in de modes 1, 2 en 3 (afvoer beide klepstuwen $Q > 8,5 \text{ m}^3/\text{s}$).

In mode 4 zal de systematische fout, die toeneemt bij een toenemend debiet over de klepstuwen, onvoorspelbaar zijn.

Dit heeft niet alleen consequenties voor de debietmeting bij de klepstuwen, maar eveneens voor die bij het aflatwerk.

In het modelonderzoek is de waterstand in een meetraai op 15 meter bovenstrooms van het aflatwerk gemeten, waarna de hieruit herleide plaatshoogte h_1 is omgerekend naar de energiehogte H_1 .

Er is veel voor te zeggen, een nieuw waterstandsmeetpunt bij het aflatwerk in te richten, in plaats van gebruik te maken van het waterstandsmeetpunt bij de klepstuw. Uit praktische overwegingen – relatief lagere aanlegkosten en een zeer goede bereikbaarheid – gaat de voorkeur uit naar een locatie tegen het linkerlandhoofd, zover mogelijk verwijderd van de doorstroomopening: voor het gehele meetbereik wordt dan de energiehogte H_1 gemeten.

5. Modelonderzoek

De afvoerrelatie van het aflatwerk Lochem luidt als volgt:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot (g)^{\frac{1}{2}} \cdot B \cdot C \cdot H_1^{1,50}$$

waarin Q het debiet (m^3/s)

g de versnelling van de zwaartekracht, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

B de dagmaat van de stuw, in dit geval $B = 5,00 \text{ m}$

C de afvoercoëfficiënt (-)

C wordt bepaald door de dikte van de overstortende straal en door de geometrie van het aflatwerk (vorm van de kruin en kruinhoogte t.o.v. de drempel)

H_1 de energiehogte (m)

$$Q = 8,525 C \cdot H_1^{1,50}$$

In het modelonderzoek gaat het om het opsporen van de afvoercoëfficiënt $C = f(H_1)$

Wanneer modelonderzoek gericht is op het vaststellen van de afvoerrelatie van een meetstuw, dan worden de modelschalen bepaald door enerzijds het gevraagde meetbereik van het debiet, en anderzijds de beschikbare ruimte en het beschikbare debiet in het hydraulica laboratorium.

Voor een groot bereik, zoals ook voor het aflatwerk $0,1 < Q < 36,5 \text{ m}^3/\text{s}$, kan dan niet worden volstaan met één model.

Ten behoeve van de huidige ijking is gekozen voor twee modellen.

- een detailmodel, lengteschaal $n_\ell = 2,75$

Hierin is de rechterhelft van de schuif gebouwd tussen verticale wanden. De schuif had een vaste hoogte van 0,60 m boven de modelvloer, hetgeen overeenkomt met een kruinhoogte van NAP +11,50 m werkelijkheid. In dit model is de drempel NAP +9,85 m niet gebouwd: bij de geringe overstorthoogtes in dit model zal de drempel geen meetbaar effect hebben op de grootte van de afvoercoëfficiënt C .

Fotoblad II geeft een beeld van het detailmodel

Annex A, paragraaf 1 beschrijft alle metingen en de meetresultaten voor het meetbereik $0,05 < H_1 < 0,50 \text{ m}$ (de lagere afvoeren).

- een overzichtsmodel, lengteschaal $n_\ell = 10$

Dit model is een exacte weergave van het aflatwerk: schuif en drempel tussen de landhoofden, inclusief ca. 40 meter van het bovenstrooms pand voor de correcte

aanstroming. Nu was de schuif in hoogte verstelbaar voor hetzelfde bewegingsbereik als in werkelijkheid.

Fotoblad III toont het overzichtsmodel.

Annex A, paragraaf 2 beschrijft alle metingen en de meetresultaten voor het meetbereik $0,30 < H_1 < 2,40$ m (de hogere afvoeren).

Alle meetresultaten – debieten en afvoercoëfficiënten – zijn gerelateerd aan de energiehoopte H_1 bij het aflatwerk, zoals aanbevolen in de vorige paragraaf. Het eindresultaat van Annex A is gegeven in figuur A-3, waarin de resultaten van beide modellen zijn gekoppeld via een stippellijn.

Figuur 3 geeft nogmaals $C = f(H_1)$, op basis waarvan de afvoerrelatie wordt opgesteld. Aan deze grafiek liggen de volgende randvoorwaarden ten grondslag:

- benedenwaterstand $WS2 = \text{NAP} + 10,00$ m
- bovenwaterstand (energieniveau) $WS1 = \text{NAP} + 11,78$ m voor $0,05 < H_1 < 1,70$ m.
waarbij de kruinhoopte varieert in het bereik $\text{NAP} + 11,78 < h_k < \text{NAP} + 10,08$ m
- vaste schuifhoopte $h_k = \text{NAP} + 10,08$ m, waarbij het stuwpeil $\text{NAP} + 11,78$ m wordt overschreden.

Figuur 3 laat zien dat C toeneemt bij een toenemende H_1 , hetgeen een normaal verloop is.

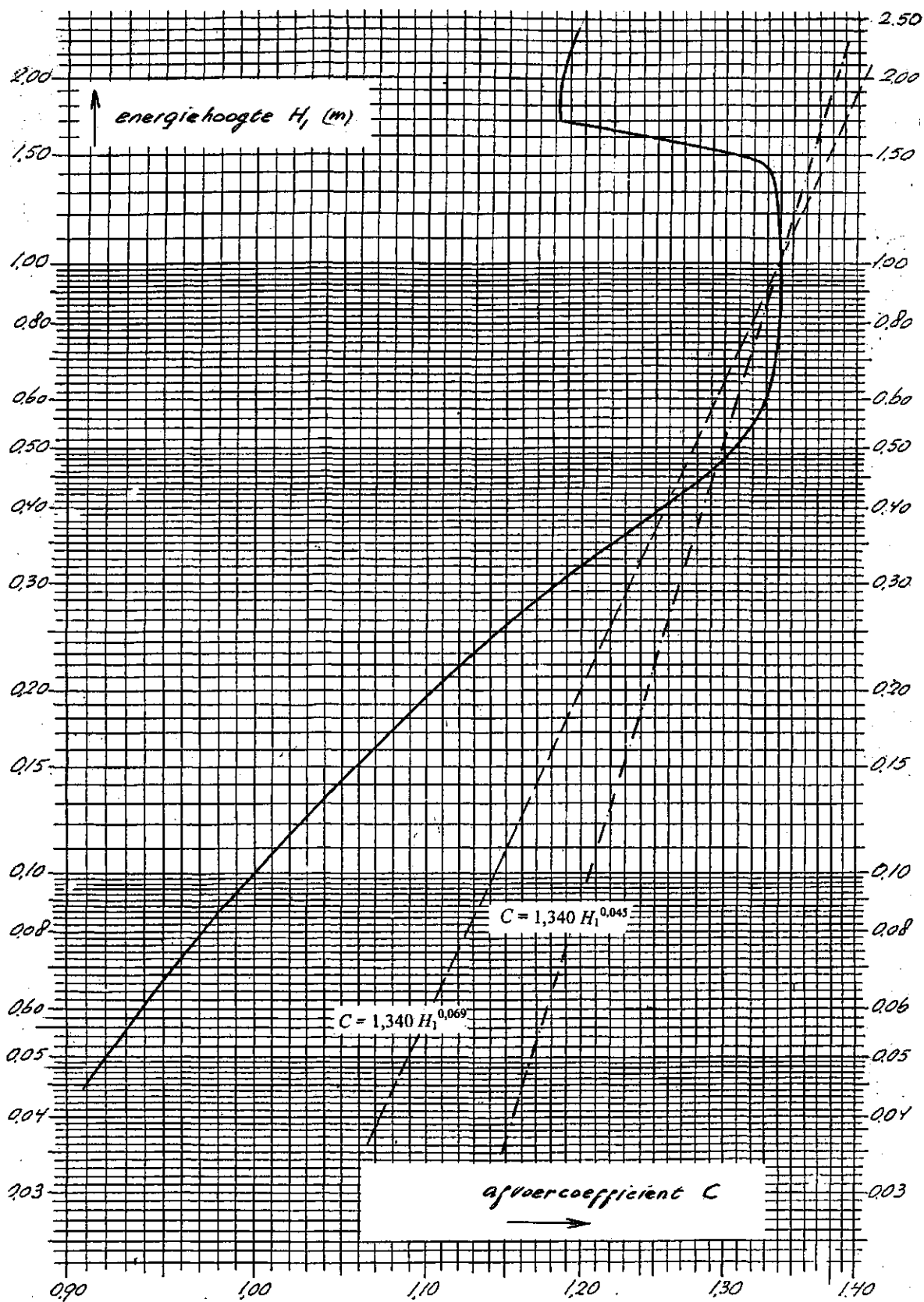
In het bereik $1,00 < H_1 < 1,40$ m loopt de waarde van C iets terug.

In het bereik $1,40 < H_1 < 1,70$ m neemt de waarde van C ineens sterk af.

Fotoblad IV geeft aan hoe het stroombeeld zich heeft gewijzigd als bij een stuwpeil $\text{NAP} + 11,78$ m de schuifhoopte daalt van $\text{NAP} + 10,38$ m (0,53 m boven de drempel) naar $\text{NAP} + 10,08$ m (0,23 m boven de drempel). In het laatste geval heeft de drempel een duidelijk effect op het stroombeeld, en dus ook op de grootte van de afvoercoëfficiënt C .

In het bereik $H_1 > 1,70$ m blijft C nagenoeg constant.

Fotoblad V toont de stroming in dit hoge bereik met $Q = 31,66 \text{ m}^3/\text{s}$ (één à twee maal per jaar).



Figuur 3 De afvoercoëfficiënt C als functie van de energiehoogte H_1

6. De nieuwe afvoerrelatie

De afvoerrelatie van het aflatwerk Lochem is $Q = 8,525 C \cdot H_1^{1,50}$

Tabel III geeft de relatie $Q = f(H_1)$, waarbij C is ontleend aan figuur 3.

De figuren 4 en 5 geven de $Q - H_1$ relatie grafisch weer (let op de knik in figuur 5)

Voor de automatische gegevens verwerking is het aantrekkelijk de afvoerrelaties volgens tabel III in een zestal mathematische eerstegraads vergelijkingen te hebben, zoals gegeven in tabel IV.

	afvoerformule	bereik
I	$Q = 11,564 H_1^{1,631}$	$H_1 < 0,197 \text{ m}$
II	$Q = 12,726 H_1^{1,690}$	$0,197 < H_1 < 0,522 \text{ m}$
III	$Q = 11,528 H_1^{1,538}$	$0,522 < H_1 < 0,827 \text{ m}$
IV	$Q = 11,415 H_1^{1,486}$	$0,827 < H_1 < 1,472 \text{ m}$
V	$Q = 11,728 H_1^{0,657}$	$1,472 < H_1 < 1,700 \text{ m}$
VI	$Q = 9,881 H_1^{1,533}$	$H_1 \geq 1,700 \text{ m}$

Tabel IV Samenvatting nieuwe afvoervergelijkingen.

Het aantal eerstegraads afvoerformules is beperkt tot zes. De extra fout als gevolg van deze beperking bedraagt ten hoogste $\pm 0,5\%$.

De totale fout X_Q in het afleiden van het debiet Q uit de gemeten H_1 volgt uit de afvoerformule

$$X_Q = \sqrt{X_C^2 + (1,5X_H)^2}$$

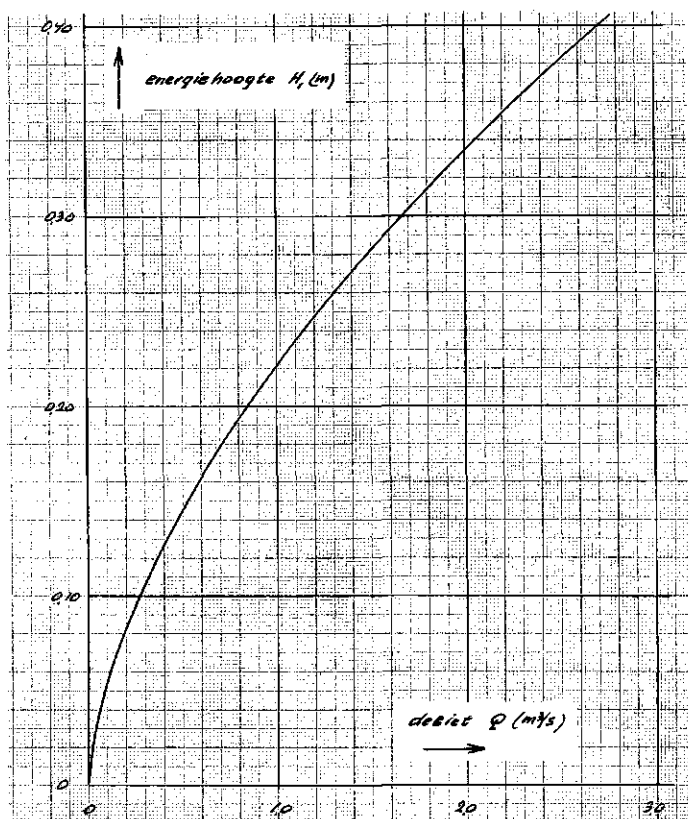
$$X_C = 2,5 \%$$

$$X_H = 100\delta_h / H_1$$

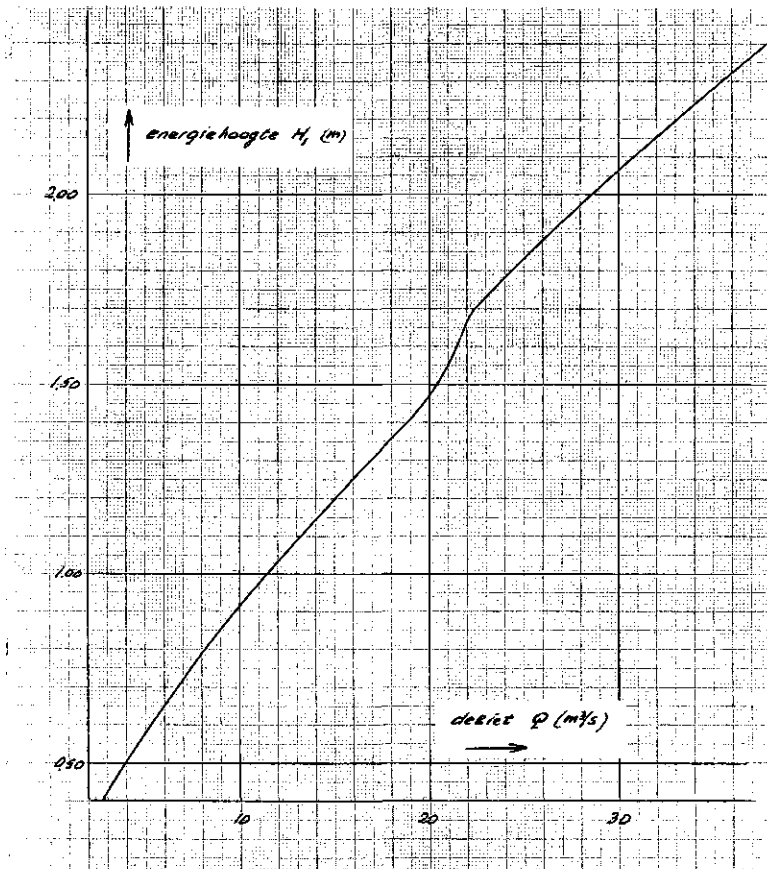
δ_h is de absolute fout in de bepaling van H_1 , geschat op $\delta_h = 0,004 \text{ m}$

H_1 (m)	Q (m ³ /s)	H_1 (m)	Q (m ³ /s)	H_1 (m)	Q (m ³ /s)
0,01	0,007	0,32	1,852	0,95	10,58
0,02	0,020	0,34	2,053	1,00	11,42
0,03	0,039	0,36	2,265	1,05	12,29
0,04	0,061	0,38	2,480	1,10	13,17
0,05	0,088	0,40	2,707	1,15	14,08
0,06	0,118	0,42	2,942	1,20	14,98
0,07	0,151	0,44	3,182	1,25	15,92
0,08	0,187	0,46	3,431	1,30	16,87
0,09	0,227	0,48	3,686	1,35	17,85
0,10	0,270	0,50	3,936	1,40	18,81
0,11	0,315	0,52	4,197	1,45	19,74
0,12	0,363	0,54	4,459	1,50	20,45
0,13	0,414	0,56	4,723	1,55	20,98
0,14	0,468	0,58	4,933	1,60	21,46
0,15	0,524	0,60	5,270	1,65	21,90
0,16	0,583	0,62	5,539	1,70	22,35
0,17	0,644	0,64	5,818	1,75	23,35
0,18	0,707	0,66	6,102	1,80	24,35
0,19	0,773	0,68	6,382	1,85	25,38
0,20	0,842	0,70	6,670	1,90	26,41
0,21	0,913	0,72	6,963	1,95	27,49
0,22	0,986	0,74	7,261	2,00	28,55
0,23	1,063	0,76	7,563	2,05	29,65
0,24	1,141	0,78	7,869	2,10	30,77
0,25	1,220	0,80	8,174	2,15	31,93
0,26	1,303	0,82	8,482	2,20	33,08
0,27	1,389	0,84	8,795	2,25	34,24
0,28	1,478	0,86	9,111	2,30	35,42
0,29	1,567	0,88	9,430	2,35	36,64
0,30	1,659	0,90	9,754	2,40	37,85

Tabel III De nieuwe afvoerrelatie voor het aflatwerk Lochem.



Figuur 4 $Q - H_1$ relatie aflatwerk Lochem voor $H_1 \leq 0,40$ m.



Figuur 5 $Q - H_1$ relatie aflatwerk Lochem voor $H_1 \geq 0,40$ m.

$$X_Q = \sqrt{6,25 + (0,6/H_1)^2}$$

Hieruit volgt:

$$X_Q \geq 10\% \quad \text{voor } H_1 \leq 0,062 \text{ m} \quad Q \leq 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$X_Q \leq 5\% \quad \text{voor } H_1 \geq 0,139 \text{ m} \quad Q \geq 0,46 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vergelijking van de nieuwe afvoerrelaties met de tot nu toe gehanteerde

In figuur 3 zijn drie C - H_1 relaties getekend

- de nieuwe, volgend uit de huidige ijking
 - $C = 1,340 H_1^{0,045}$, volgend uit formule 1 $Q = 11,424 h_1^{1,545}$
 - $C = 1,340 H_1^{0,069}$, volgend uit formule 2 $Q = 11,424 h_1^{1,569}$
- (gemakshalve is h_1 vervangen door H_1).

De verschillen zijn tot uitdrukking gebracht in tabel V

meetbereik in H_1	hoe verhoudt de oude relatie zich tot de nieuwe
$0,05 < H_1 < 0,40 \text{ m}$	forse tot matige overschatting
$0,40 < H_1 < 1,00 \text{ m}$	geringe onderschatting
$1,00 < H_1 < 1,40 \text{ m}$	matige overschatting
$1,40 < H_1 < 1,70 \text{ m}$	snel toenemende overschatting
$H_1 > 1,70 \text{ m}$	forse overschatting, 17 à 18%

Tabel V Vergelijking oude afvoerrelatie tot de nieuwe.

De nieuwe afvoerrelaties hebben ook consequenties voor de in tabel I gegeven afvoerdeling in het afstellingsschema en voor de in tabel II gegeven informatie over topafvoeren.

7. Resumé en aanbevelingen

1. Het aflatwerk Lochem is geijkt met behulp van een detailmodel, $n_t = 2,75$ en een overzichtsmodel, $n_t = 10$. Het modelonderzoek is beschreven in paragraaf 5 en Annex A.
2. Op basis van dit onderzoek is de afvoerrelatie opgesteld, zoals weergegeven in de figuren 4 en 5. In paragraaf 6 is deze afvoerrelatie weergegeven in tabel III en ook in zes eenvoudige eerstegraads vergelijkingen gezet (Tabel IV).

Het gehele onderzoek is uitgevoerd voor een nagenoeg constante benedenwaterstand van NAP +10,00 m, hetgeen over het gehele meetbereik neerkomt op ongestuwde afvoer.

3. De onnauwkeurigheid in de bepaling van het debiet is als volgt:

$X_Q \geq 10\%$	voor $H_1 \leq 0,062$ m	$Q \leq 0,12$ m ³ /s
$X_Q \leq 5\%$	voor $H_1 \geq 0,139$ m	$Q \geq 0,46$ m ³ /s

4. Vergelijking van de oude afvoerrelaties tot de nieuwe laat het volgende zien:

- geringe overschatting c.q. onderschatting in het bereik $0,40 < H_1 < 1,40$ m
- matige tot forse overschattingen voor de lage afvoeren en de topafvoeren

Tabel V geeft hiervan een overzicht.

5. De schuifstuw is gevoelig voor vervuiling. Dit leidt altijd tot een systematische overschatting van de debieten. Geregeld schoonmaken van de overstortrand en de stoorelementen is zeer gewenst.
6. De beste locatie voor het meten van de bovenwaterstand bij het aflatwerk is een plaatsing tegen het linkerlandhoofd, zover mogelijk verwijderd van de doorstroomopening: voor het gehele meetbereik wordt dan de energiehogte H_1 gemeten.

In de nieuwe afvoerrelaties, zoals beschreven in dit rapport, zijn de debieten Q gerelateerd aan de energiehogte H_1 .

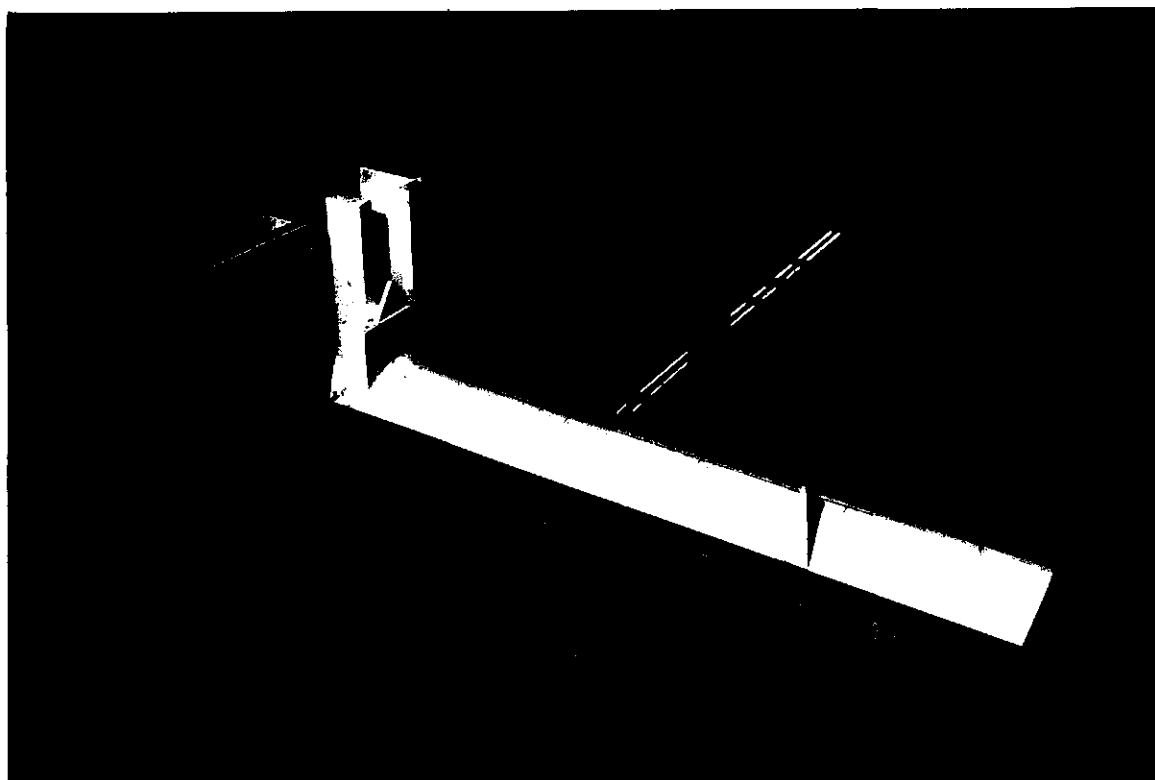


bovenstrooms aanzicht



stroming over de schuif
langs de linker oever

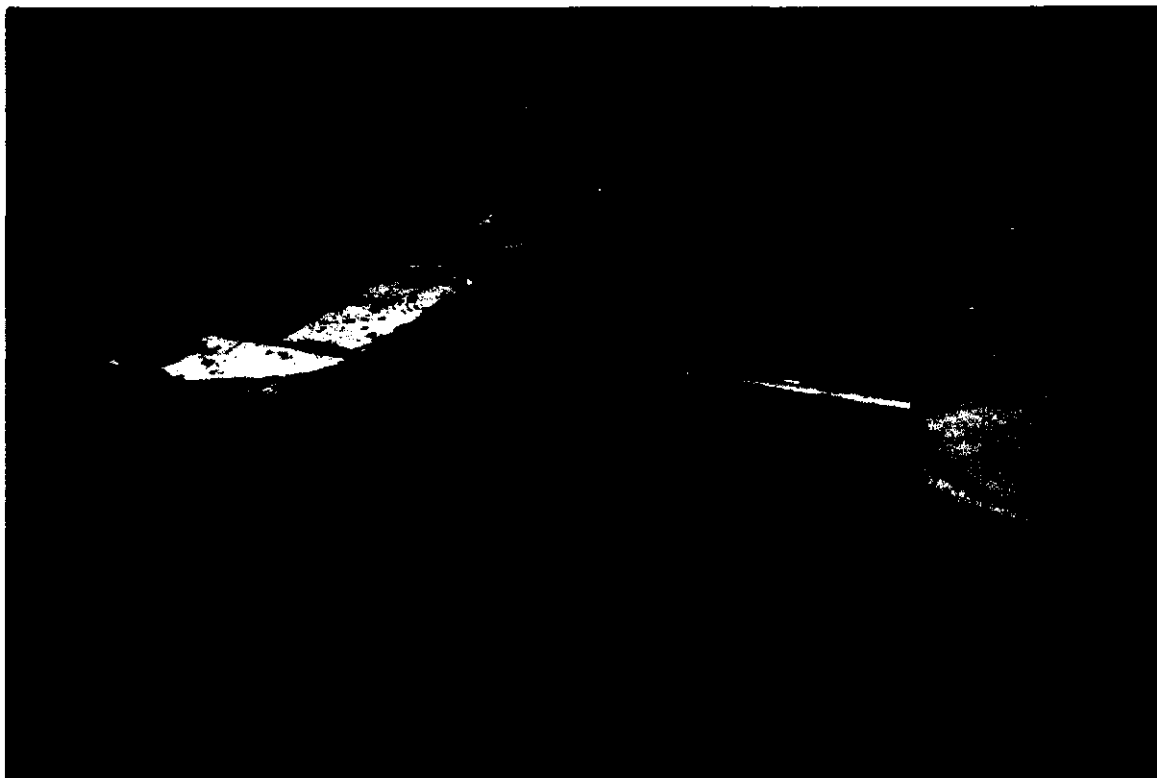
Fotoblad I Aflaatwerk naar het Twenthekanaal in Lochem.



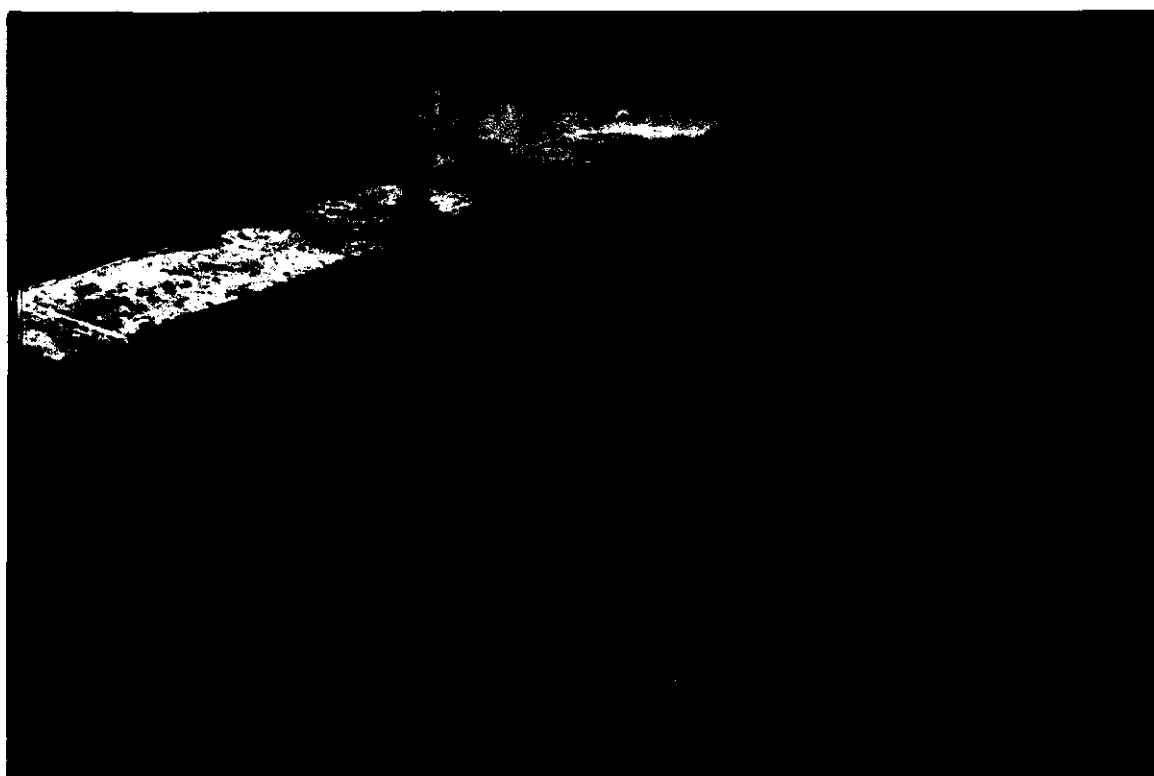
detailmodel, schaal $n_\ell = 2,75$



ijking detailmodel tijdens meting 8

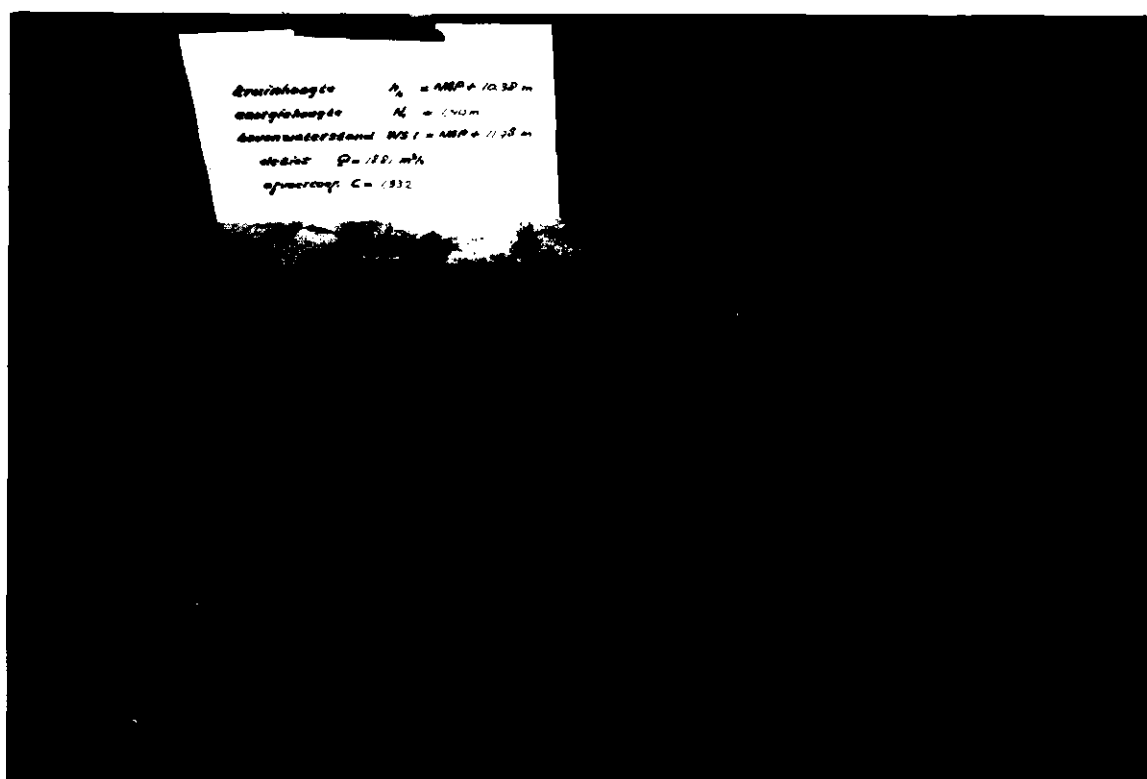


de schuif is verticaal beweegbaar achter de drempel op NAP +9,85 m



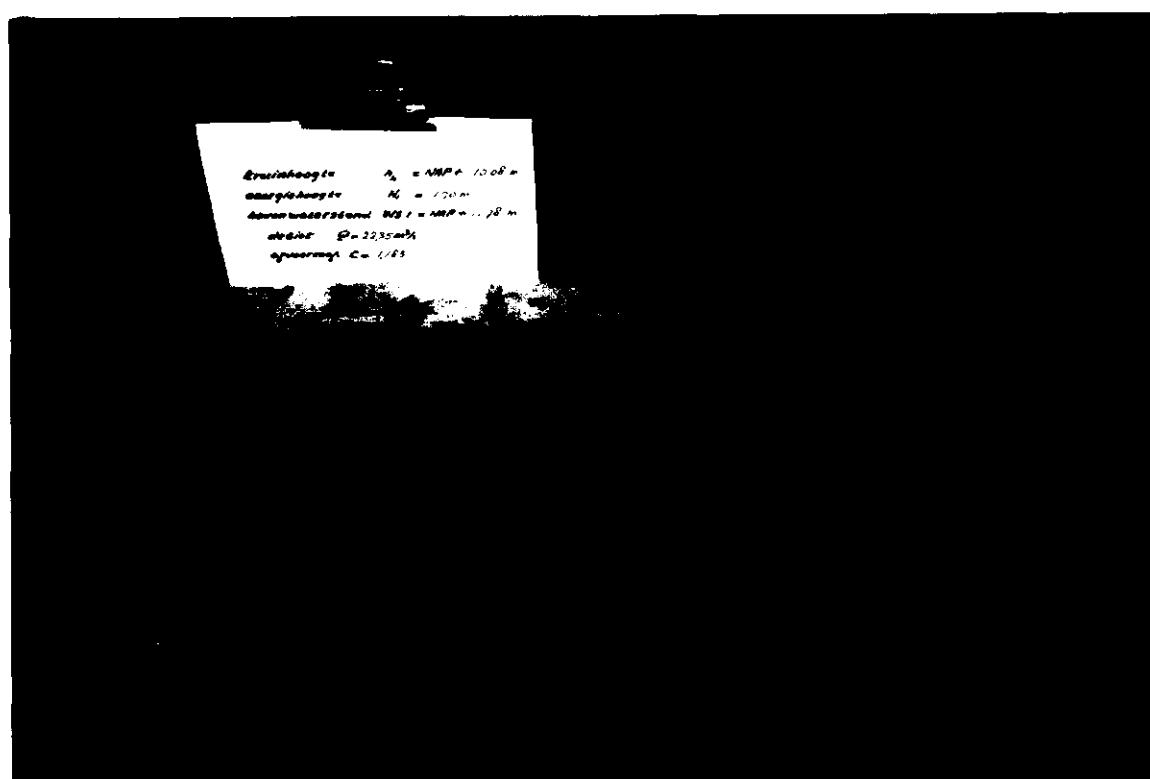
de schuif heeft twee stoorelementen en aan beide zijden een ophangblok

Fotoblad III Het overzichtsmodel, $n_\ell = 10$



kruinhoogte $h_K = \text{NAP} + 10,38 \text{ m}$
 energiehoopte $H_1 = 1,40 \text{ m}$
 peil WS1 = NAP + 11,78 m

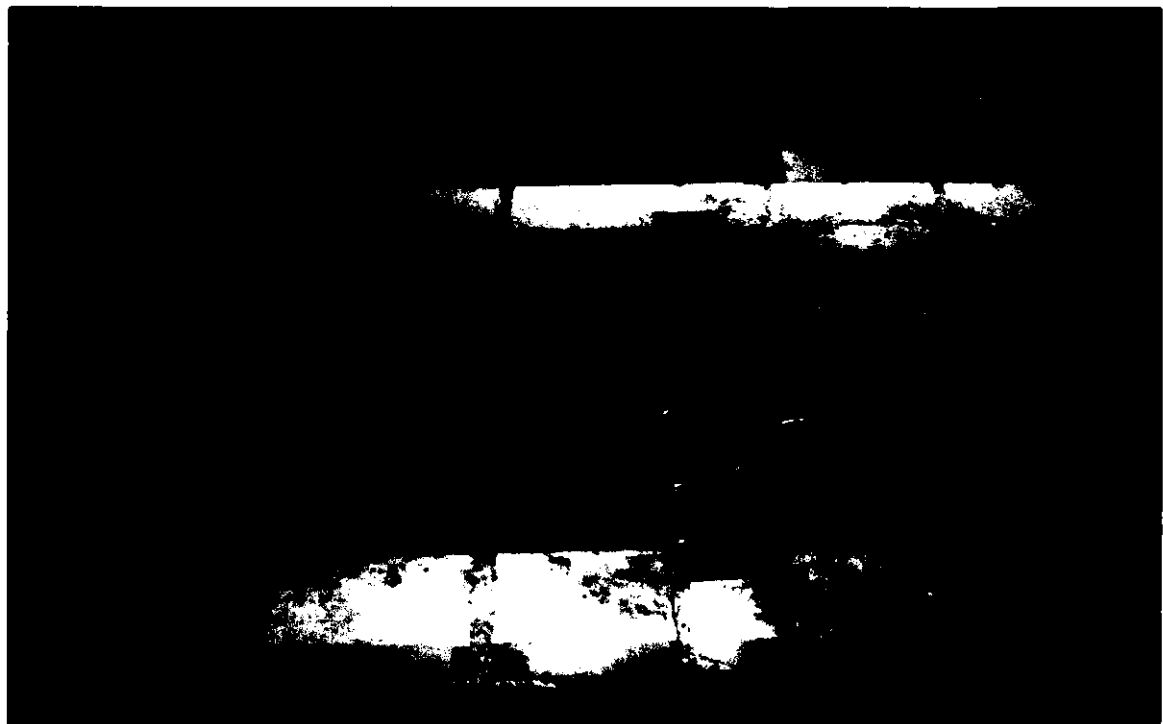
debiet $Q = 18,81 \text{ m}^3/\text{s}$
 $C = 1,332$



kruinhoogte $h_K = \text{NAP} + 10,08 \text{ m}$
 energiehoopte $H_1 = 1,70 \text{ m}$
 peil WS1 = NAP + 11,78 m

debiet $Q = 22,35 \text{ m}^3/\text{s}$
 $C = 1,183$

Fotoblad IV Effect drempel op de afvoercoëfficiënt



kruinhoogte $h_K = \text{NAP} + 10,08 \text{ m}$
 energiehogte $H_1 = \underline{\quad 2,14 \text{ m} \quad}$
 peil WS1 = NAP + 12,22 m
 peil WS2 = NAP + 10,06 m

debiet $Q = 31,66 \text{ m}^3/\text{s}$
 (meting 26)

Fotoblad V IJking overzichtsmodel, bij een topafvoer

Annex A Modelonderzoek aflatwerk Lochem

Inhoud

1. Detailmodel, $n_t = 2,75$
2. Overzichtsmode!, $n_t = 10$
3. Koppeling resultaten van beide modellen

Tabellen

- A-I Stroombeeld over de schuif
- A-II Metingen en analyse naar het prototype, detailmodel
- A-III Metingen en analyse naar het prototype, overzichtsmode!

Figuren

- A-I Afvoercoëfficiënt C als functie van H_1 , detailmodel
- A-2 Afvoercoëfficiënt C als functie van H_1 , overzichtsmode!
- A-3 Koppeling $C = f(H_1)$ van beide modellen

1. Detailmodel $n_t = 2,75$

In dit model is de rechter helft van de schuif gebouwd, die in werkelijkheid een dagmaat $B = 5,00$ m heeft tussen de betonwanden. Met een lengteschaal $n_t = 2,75$ werd de afvoerende breedte in het model $b = 0,909$ m.

De schuif had een vaste hoogte van 0,60 m boven de modelvloer, hetgeen overeenkomt met een kruinhoogte NAP +11,50 m werkelijkheid.

Het doel van de metingen in dit detailmodel was het vinden van waarden voor de afvoercoëfficiënt C als functie van de energiehogte H_1 in het bereik van de lage afvoeren $0,050 < H_1 < 0,500$ m.

Tabel A-II geeft een overzicht van alle metingen.

Er zijn 15 metingen uitgevoerd in het model. De debieten zijn volumetrisch bepaald, de meest nauwkeurige methode, waardoor de fout slechts $X_Q = 0,5\%$ bedraagt. De bovenwaterstand is met een peilnaald gemeten, waardoor de absolute fout in de bepaling van de overstorthoogte beperkt blijft tot $\sigma_h = 0,0002$ m.

Tijdens de metingen is ook gelet op het stroombeeld over de schuif met aandacht voor de volgende aspecten:

- Wat doet het stoorelement? Voor geringe overstorthoogtes splitst de overstortende straal, die daardoor volledig wordt belucht. Bij grotere overstorthoogtes raakt het stoorelement geheel onder water en wordt de straal niet meer belucht.
- hoe is de stroming rondom het 0,17 m hoge ophangblok waarachter de heugelstang is bevestigd. Voor geringe overstorthoogtes verkleint dit blok de afvoerende breedte met 4,8%. Bij grotere overstorthoogtes begint er eerst water achter het blok langs te stromen en daarna ook over het blok.

Tabel A-I geeft een overzicht van het stroombeeld.

meting no.	beluchting door stoorelement	stroming achterlangs ophangblok	stroming over ophangblok	bereik H_1 (m) werkelijkheid
1 t/m 7	ja	nee	nee	$H_1 < 0,20$
8	ja	ja	nee	$0,20 < H_1 < 0,23$
9	ja	ja	ja	$0,23 < H_1 < 0,27$
10 t/m 15	nee	ja	ja	$H_1 > 0,27$

Tabel A-I Stroombeeld over de schuif.

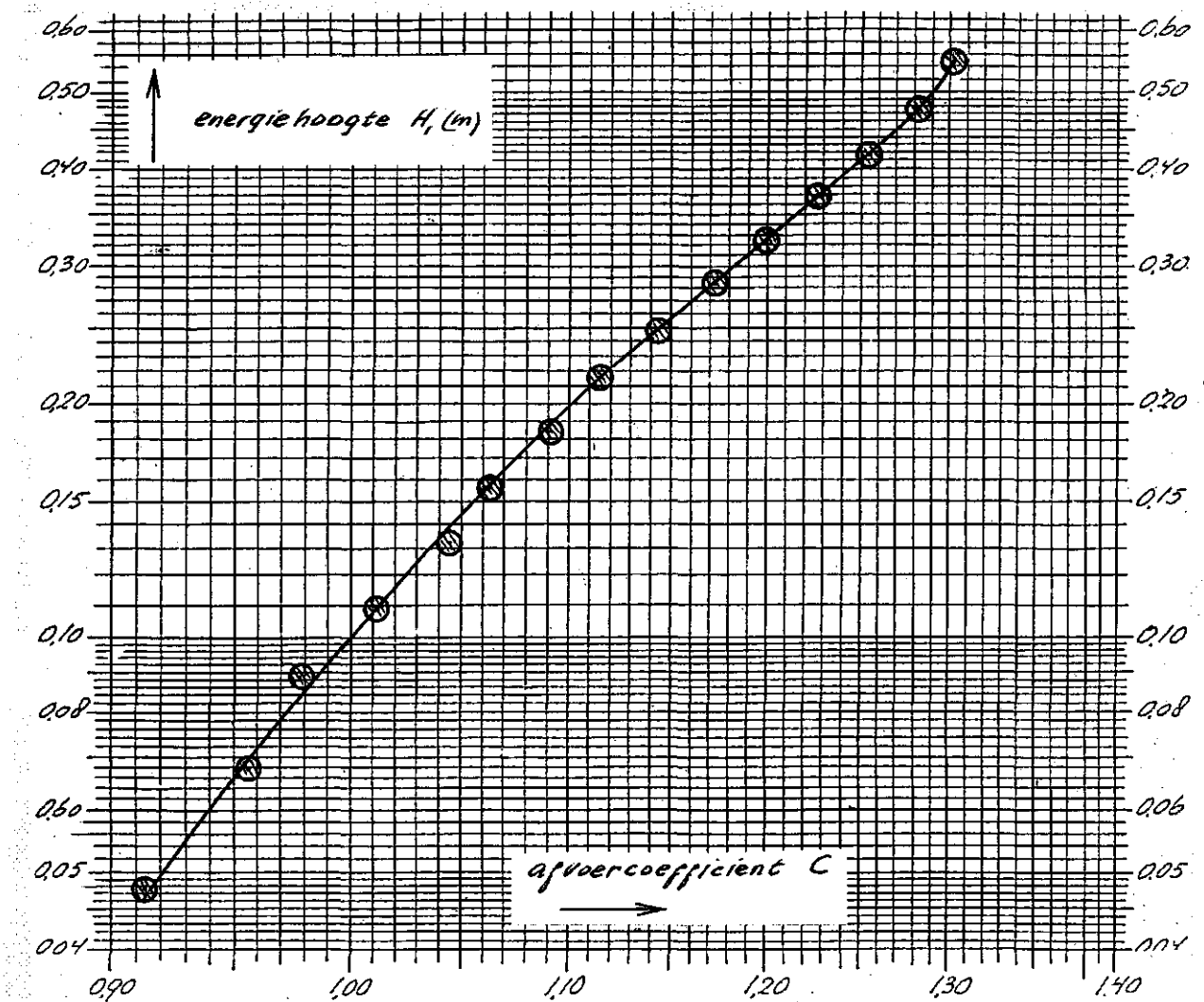
Fotoblad II toont het model en het stroombeeld tijdens meting 8.

In tabel A-II zijn de metingen ook geanalyseerd naar debiet Q en energiehogte H_1 voor het prototype (de werkelijkheid) en is hieruit de afvoercoëfficiënt C afgeleid.

metingen in het model					analyse prototype		
meting no.	Q_m ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	h_1 (m)	H_m (m)	overstort- straal	Q (m^3/s)	H_1 (m)	C (-)
1	3,26	0,0174	0,0174	belucht	0,082	0,048	0,914
2	5,72	0,0246	0,0246	belucht	0,144	0,068	0,956
3	8,82	0,0323	0,0323	belucht	0,221	0,089	0,978
4	12,46	0,0398	0,0398	belucht	0,313	0,110	1,012
5	17,21	0,0483	0,0483	belucht	0,431	0,133	1,045
6	22,36	0,0569	0,0570	belucht	0,561	0,157	1,060
7	29,41	0,0670	0,0671	belucht	0,738	0,185	1,091
8	37,84	0,0781	0,0783	belucht	0,949	0,215	1,115
9	48,35	0,0903	0,0906	belucht	1,213	0,249	1,144
10	60,35	0,1029	0,1034	dicht	1,514	0,284	1,172
11	75,21	0,1172	0,1179	dicht	1,886	0,324	1,199
12	93,72	0,1334	0,1344	dicht	2,351	0,370	1,227
13	115,84	0,1510	0,1525	dicht	2,906	0,419	1,255
14	144,78	0,1723	0,1745	dicht	3,361	0,480	1,282
15	177,99	0,1951	0,1982	dicht	4,464	0,545	1,302
model	oppervlakte dwarsprofiel $A = (h_1 + 0,60) \times 0,9091 \text{ (m}^2\text{)}$						
	snelheidshoogte $v^2 / 2g = (Q / A)^2 / 2g \text{ (m)}$						
	energiehoogte $H_m = h_1 + v^2 / 2g \text{ (m)}$						
prototype	debiet $Q = (2,75)^{2,5} \times 2Q_m \text{ (m}^3/\text{s)}$						
	energiehoogte $H_1 = 2,75H_m \text{ (m)}$						
	afvoercoëfficiënt $C = Q / 1,705 \times 5,00 \times H_1^{1,50}$						

Tabel A-II Metingen en analyse naar het prototype, detailmodel

Figuur A-I geeft de afvoercoëfficiënt C als functie van H_1 , detailmodel. De onnauwkeurigheid in de bepaling van C bedraagt $X_C = 2\%$.



Figuur A-I Afvoercoëfficiënt C als functie van H_1 , detailmodel

2. Overzichtsmodel, $n_t = 10$

Het overzichtsmodel is gebouwd op basis van een revisietekening van het Technisch bureau van de Unie van Waterschapsbonden N.V., gedateerd oktober 1965. De exacte vormgeving van de schuif, inclusief stooreslementen en ophanging, is ter plaatse opgemeten.

In verband met de beschikbare capaciteit in het Hydraulica Laboratorium werd de lengteschaal $n_l = 10$.

Het doel van de metingen in dit overzichtsmodel was het vinden van waarden voor de afvoercoëfficiënt C als functie van de energiehogte H_1 in het bereik van de hoge afvoeren $0,300 < H_1 < 2,400$ m bij de volgende randvoorwaarden:

- benedenwaterstand NAP +10,000 m onder alle omstandigheden
- bovenwaterstand NAP +11,780 m (streefpeil) tot een minimale kruinhogte NAP +10,080 m. Voor energiehogtes $H_1 > 1,70$ (debieten $Q > 22,4$ m³/s) blijft de kruinhogte op NAP +10,080 m en zal het streefpeil worden overschreden.

Tabel A-III geeft een overzicht van alle metingen.

Er zijn 60 metingen uitgevoerd in het model, waarbij de debieten ook nu volumetrisch zijn bepaald, en de waterstanden bovenstrooms en benedenstrooms met peilnaalden zijn gemeten.

Er zijn metingen uitgevoerd bij negen – min of meer willekeurig gekozen – kruinhogtes variërend van NAP +10,080 m (de laagste denkbare stand) tot NAP +11,478 m.

Van de 60 metingen zijn er slechts 26 in tabel A-III vermeld. De overige hebben er hoofdzakelijk toe gediend om na te gaan of er voor kruinhogtes tussen NAP +10,400 m en NAP +10,080 m toch wellicht enige opstuwing zou zijn als de benedenwaterstand enkele decimeters hoger staat dan de gewenste NAP +10,00 m: achteraf is gebleken dat dit effect verwaarloosbaar klein is.

In tabel A-III is:

- H_1 de energiehogte bovenstrooms op circa 15 m vóór de landhoofden
- $WS1 = H_1 + h_k$ (energiehogte plus kruinhogte)
- $WS2 = h_2 + h_k$ (waterhogte plus kruinhogte)
- h_2 waterstand benedenstrooms t.o.v. de kruin
- afvoercoëfficiënt $C = Q / (1,705 \times 5,00 \times H_1^{1,50})$

De metingen in tabel A-III kunnen in de volgende twee groepen worden onderscheiden.

- metingen 16 t/m 24

kruinstanden $h_k \geq \text{NAP} + 10,080 \text{ m}$

Benedenwaterstanden WS2 in de buurt van $\text{NAP} + 10,000 \text{ m}$ (geen opstuwing)

Steeds twee debieten ingesteld, zó dat WS1 iets lager en iets hoger wordt dan de gewenste $\text{NAP} + 11,780 \text{ m}$.

Afvoercoëfficiënt C geïnterpoleerd voor $\text{WS1} = \text{NAP} + 11,780 \text{ m}$

- metingen 25 t/m 28

kruinstand $h_k = \text{NAP} + 10,080 \text{ m}$

Slechts één debiet ingesteld, waarbij $\text{WS1} > \text{NAP} + 11,780 \text{ m}$

Steeds twee benedenwaterstanden ingesteld, zó dat WS2 iets lager en iets hoger wordt dan de gewenste $\text{NAP} + 10,000 \text{ m}$.

Afvoercoëfficiënt C geïnterpoleerd voor $\text{WS2} = \text{NAP} + 10,000 \text{ m}$.

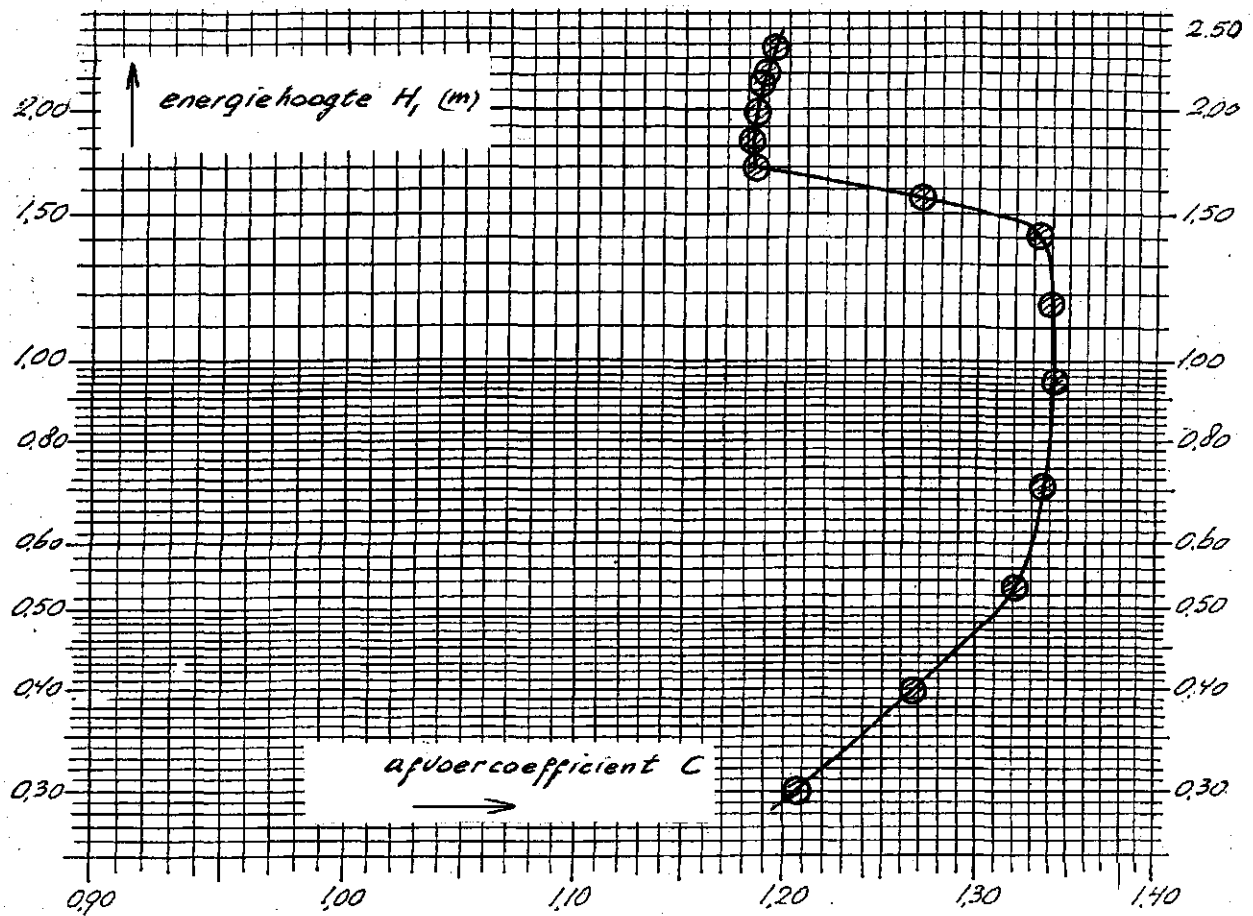
metingen in het model, omgerekend naar het prototype en verdere analyse							
meting no.	kruinhoogte h_k (m NAP)	Q (m ³ /s)	h_1 (m)	H_1 (m)	WS1 (m NAP)	WS2 (m NAP)	C (-)
16	11,478	1,221	0,248	0,248	11,726	9,977	1,160
		1,768	0,308	0,308	11,786	9,980	1,214
	geïnterpoleerd		0,302	0,302	11,780		1,208
17	11,382	2,204	0,351	0,351	11,733	9,989	1,243
		2,744	0,401	0,401	11,783	9,995	1,267
	geïnterpoleerd			0,398	11,780		1,266
18	11,248	4,008	0,504	0,504	11,752	9,955	1,314
		4,853	0,567	0,568	11,816	9,990	1,330
	geïnterpoleerd			0,532	11,780		1,321
19	11,072	5,949	0,650	0,651	11,723	10,013	1,328
		7,119	0,729	0,730	11,802	10,062	1,339
	geïnterpoleerd		0,707	0,708	11,780		1,336
20	10,807	10,630	0,949	0,952	11,756	9,994	1,342
		11,410	0,994	0,997	11,801	9,993	1,344
	geïnterpoleerd		0,970	0,973	11,780		1,343
21	10,612	14,293	1,159	1,165	11,777	9,990	1,333
		15,543	1,218	1,224	11,836	10,021	1,346
	geïnterpoleerd		1,162	1,168	11,780		1,334
22	10,375	17,465	1,320	1,329	11,704	9,988	1,337
		19,035	1,401	1,411	11,786	9,972	1,332
	geïnterpoleerd		1,395	1,405	11,780		1,333

Table A-III Metingen en analyse naar het prototype overzichtsmodeel

metingen in het model, omgerekend naar het prototype en verdere analyse							
meting no.	kruinhoogte h_k (m NAP)	Q (m ³ /s)	h_1 (m)	H_1 (m)	WS1 (m NAP)	WS2 (m NAP)	C (-)
23	10,216	18,997	1,433	1,444	11,660	10,008	1,284
		21,406	1,562	1,575	11,791	9,950	1,270
	geïnterpoleerd		1,554	1,564	11,780		1,269
24	10,080	20,221	1,570	1,583	11,663	10,029	1,191
		22,592	1,698	1,712	11,792	9,998	1,183
	geïnterpoleerd		1,686	1,700	11,780		1,184
25	10,080	28,326	1,972	1,988	12,068	9,991	
			1,979	1,995	12,075	10,183	
	geïnterpoleerd		1,972	1,988	12,068	10,000	1,185
26	10,080	31,665	2,120	2,138	12,218	9,934	
			2,123	2,140	12,220	10,059	
	geïnterpoleerd		2,122	2,139	12,219	10,000	1,187
27	10,080	33,076	2,181	2,199	12,279	9,952	
			2,185	2,203	12,283	10,145	
	geïnterpoleerd		2,182	2,200	12,280	10,000	1,189
28	10,080	37,327	2,357	2,376	12,456	9,943	
			2,363	2,382	12,462	10,104	
	geïnterpoleerd		2,359	2,378	12,458	10,000	1,194

Vervolg Tabel A-III

Figuur A-2 geeft de afvoercoëfficiënt C als functie van H_1 , overzichtsmodel. De onnauwkeurigheid in de bepaling van C bedraagt $X_C = 2\%$.

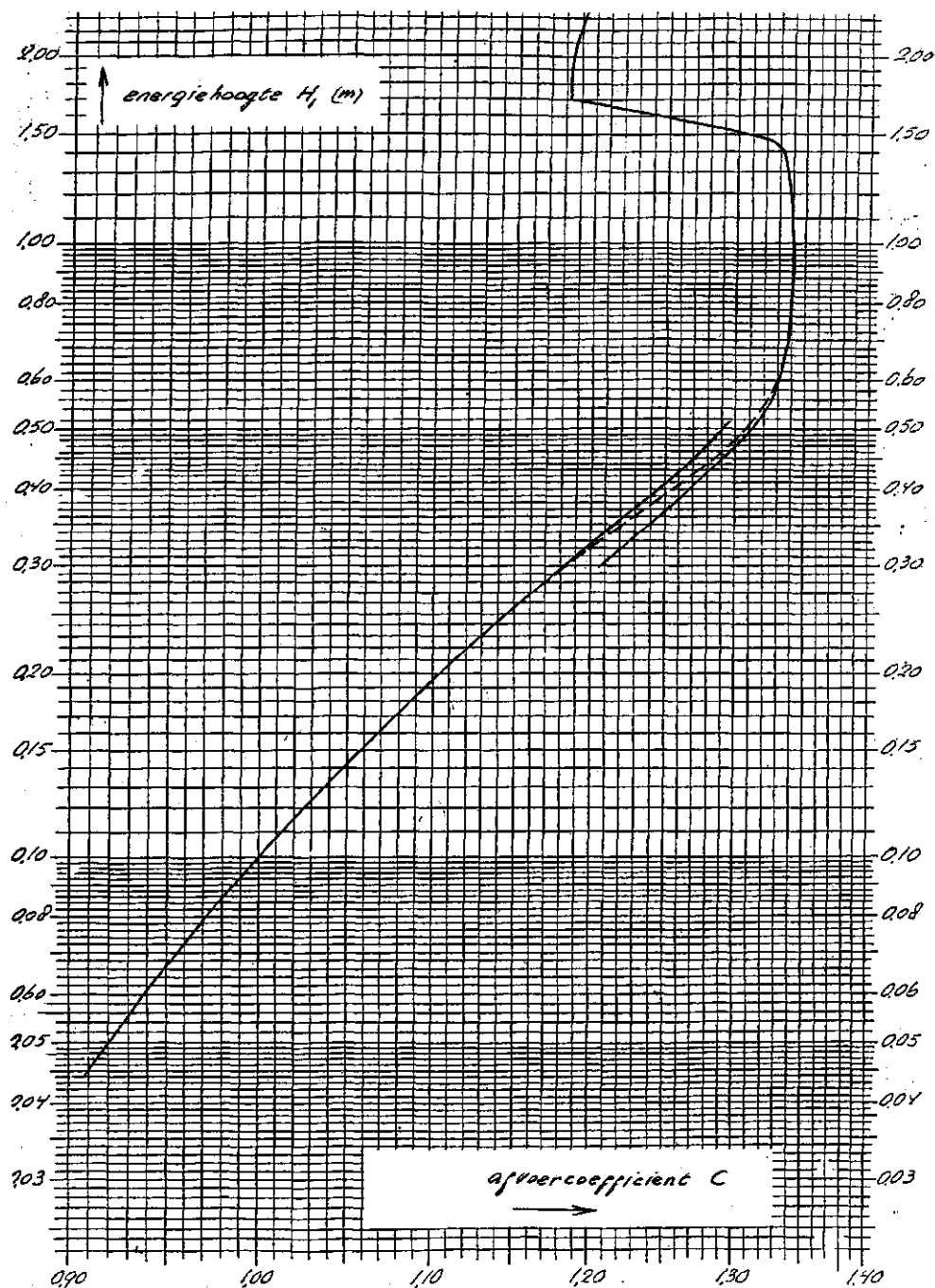


Figuur A-2 Afvoercoëfficiënt C als functie van H_1 , overzichtsmodel

3. Koppeling resultaten van beide modellen

Figuur A-3 toont de relatie $C = f(H_1)$ van beide modellen, het detailmodel in het bereik $0,048 \leq H_1 \leq 0,545$ m en het overzichtsmodel in het bereik $0,302 \leq H_1 \leq 2,378$ m.

In de overlap $0,302 \leq H_1 \leq 0,545$ m verschillen de C -waarden ca. 2%. In dit gebied zijn deze verschillen handmatig zó vereffend dat de resultaten van beide modellen goed op elkaar aansluiten.



Figuur A-3 Koppeling $C = f(H_1)$ van beide modellen.