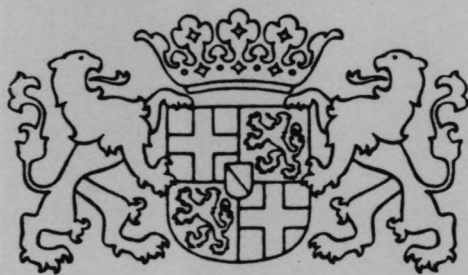


D 78 C

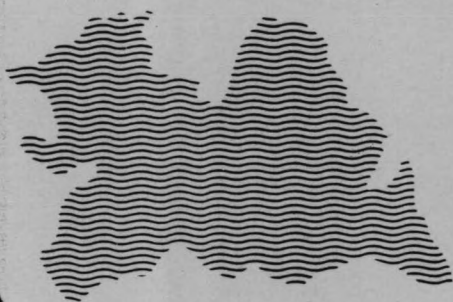
Provinciale Waterstaat Utrecht

Afdeling Natte Waterstaat en Recreatie
Bureau Waterhuishouding



DEBIET INLAATWERK GREBBESLUIS

stageverslag: R.A.Kleijwegt



mei 1987

DEBIET INLAATWERK GREBBESLUIS

Experimentele bepaling van de relatie tussen het inlaatde-
biet en de geregistreerde water- en schuifstanden

door

R.A. Kleijwegt

Delft, mei 1987

Rapport in het kader van:

- Doctoraalstudie TU-Delft, faculteit der Civiele
Techniek

Begeleiders: Prof. dr. ir. M. de Vries
ir. A. van Mazijsk

- Stage uitgevoerd bij de Provinciale Waterstaat
Utrecht

afdeling natte waterstaat en recreatie

- ir. K.H. de Kruijk

bureau waterhuishouding

- dr. ir. H.H. Siebers (stagebegeleider)

VOORWOORD

In dit rapport zijn theorie, experiment en enig pragmatisme samengevoegd om het inzicht in het hydraulisch functioneren van inlaatwerk Grebbesluis te vergroten. Dit heeft geleid tot een model waarmee het debiet door het inlaatwerk berekend kan worden. Het inlaatwerk Grebbesluis is daardoor boven het niveau van "black-box" uitgetild. Hiermee is invulling gegeven aan de opdracht die de provinciale waterstaat Utrecht mij gaf in het kader van een stage en mijn afstudeerwerk aan de Technische Universiteit Delft.

Bij het vooronderzoek is een aantal computerprogramma's geschreven om de verkregen meetresultaten te analyseren. Het doel hiervan was het stromingspatroon beter te leren kennen en zodoende te kunnen beschrijven.

Niet alle programma's leverden bruikbare informatie op. Het is mijn inziens niet zinvol om in dit rapport de lezer in te wijden in de ontworpen software. Dit zou aan het doel van dit werk weinig bijdragen. In dit rapport staan alle wiskundige relaties waarmee de stroming door het werk beschreven kan worden. Indien in de toekomst meer metingen worden geanalyseerd, kan iemand met programmeerervaring met gebruik van deze relaties de benodigde software ontwikkelen. Het voordeel hiervan is dat men de gevoeligheden van het eigen ontwerp in het algemeen beter kent.

De omvang van de studie is groter dan vooraf begroot. De oorzaak hiervan lag in het vele testwerk met de computer, nodig voor een bevredigende analyse van de stroming.

Ik denk erg veel van deze studie te hebben geleerd, niet in de laatste plaats door de mensen die erbij betrokken waren. Daarom wil ik de medewerkers van de provinciale waterstaat van Utrecht die aan deze studie een bijdrage hebben geleverd bedanken. Een bijzonder woord van dank is voor Karst-Jan van Esch voor de hulp bij de metingen.

Rob Kleijwegt

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING		i
Hoofdstuk		page
I.	INLEIDING	1
II.	OVERZICHT GREBBESLUIS	3
	Situatieschets	3
	Geschiedenis van de sluis	3
	Functie Grebbesluis	4
	Constructie	4
	Beheer	5
	Waterstanden	6
III.	ANALYSE AFVOERBEPALING UIT WATERSTANDEN	7
	Inleiding	7
	Afvoerformules voor stroming onder de schuif	9
	Stroming onder de schuif bij superkritische stroming in de koker	9
	Stroming onder de schuif bij subkritische stroming in de koker	13
	Energieverliezen in de constructie	15
	Stroming tussen schacht 1 en 2	15
	Ruwheid in het leidinggedeelte	20
	Stroming in de woelbak	25
IV.	METINGEN	31
	Permanente meetopstelling	31
	Meetinstrumenten	31
	Controlemetingen	31
	Uitgevoerde metingen in 1986	38
	Meetprogramma	38
	Meetinstrumenten	39
	Problemen bij de metingen	40
	Waterstandsmetingen	42
	Debietmetingen	43
	Uitgevoerde metingen in 1980 en 1983	44
V.	RESULTATENBESCHOUWING METINGEN	47
	Verliescoefficient voor stroming tussen schacht 1 en 2	47
	De superkritische afvoercoefficient	49
	De berekening van de afvoercoefficient	49

	Correctie van de afvoercoefficient voor onderdruk onder de schuif	50
	Correctie van de afvoercoefficient voor de verhouding n	53
	Correctie van de afvoercoefficient voor de onderdrukte contractie	55
	De afvoercoefficient en de correctieformules	56
	Ruwheid van de koker	57
	Subkritische afvoercoefficient	59
	Invoer voor de bepaling van de subkritische afvoercoefficient	59
	De gemeten afvoercoefficient	60
	Correctieformules	61
VI.	MODEL VOOR DE AFVOERBEPALING UIT WATERSTANDEN	63
	Modelbouw	63
	Stroomschema model	65
	Bouwstenen voor het model	67
	Correctie van de geregistreeerde schuifstand	67
	Berekening van het energieniveau en de waterstand in schacht 2	67
	De waterstand achter de schuif bij subkritische afvoer	68
	Superkritische afvoerformule	69
	Subkritische afvoerformule	70
	De waterstand aan het eind van de koker bij superkritische afvoer	71
	Berekening van de waterstand in de woelbak	71
	Keuzemomenten in het model	72
	Iteratieve bepaling van het debiet	72
	Keuze super/subkritische stroming	72
VII.	CONCLUSIES	73
VIII.	AANBEVELINGEN	75
IX.	LIJST VAN SYMBOLEN	77
X.	REFERENTIES	79

LIJST VAN FIGUREN

Figuur	page
1. Verbeteringswerken inlaatwerk dwarsdoorsnede	4
2. Meetpunten en energielijn	8
3. Superkritische afvoerformule	10
4. Stroming onder de schuif bij superkritische afvoer	10
5. Contractiecoefficient onder de schuif	11
6. Stromingsbeeld schacht 2	13
7. Stroming onder de schuif bij subkritische afvoer	15
8. Situatieschets schachten	16
9. Maximale doorsnede schacht 2	17
10. Verandering van het stromingspatroon bij verlaging waterstand	18
11. Afname contractie	19
12. Constante c_2 als functie van de waterstand	20
13. Lengte van de stuwkromme	23
14. Vrije overstort.	24
15. Niet vrije overstort	25
16. Stromingspatroon woelbak	26
17. Turbulenties in nissen (bron: Falvey, 1964)	26
18. Energieverliescoefficient voor nissen (bron: Falvey, 1964)	27
19. Verbreding van de woelbak	28
20. Impulsvergelijking woelbak	30
21. Positie vlotter in de uitstroom	32
22. Vlotter in de constructie	34
23. Positie drukopnemer	35

24. Nulstand schuif	36
25. Meetinstrumenten	40
26. Lekkage binnenschuif	41
27. Zelfgebouwd meetinstrument	42
28. Turbulentie in de uitstroom bij het grootste debiet	44
30. Onderdruk onder de schuif	50
31. Scherpe overlaat	52
32. De aandrijvende energiebron	53
33. Situatieschets ten behoeve van berekening n	54
34. Afvoercoëfficiënt in relatie tot n	55
35. hk3 voor grote debieten	58
36. k-waarden	58
37. Situatieschets instroom	60
38. Stroomschema model	66
39. Aanpassing onderkant schuif	76

LIJST VAN BIJLAGEN

- bijlage
- 2.1 kaart van de provincie Utrecht
- 2.2 dwarsdoorsnede inlaatwerk Grebbesluis
- 2.3 horizontale doorsnede inlaatwerk Grebbesluis
- 3.1 viscositeit water
- 4.1 afwijking vlotter in uitstroom
- 4.2 afwijking vlotter in constructie
- 4.3 afwijking drukopnemer
- 4.4 afwijking schuifstandregistratie
- 4.5 meetplaatsen en -resultaten
- 5.1 relatie energieverlies schacht 1 - schacht 2
- 5.2 k-waarden
- 5.3 theoretische benadering stroming onder een schuif met een verdronken watersprong achter de schuif volgens Henderson
- 5.4 theoretische benadering stroming onder een schuif met een verdronken watersprong achter de schuif volgens Henry

SAMENVATTING

Bij het inlaatwerk Grebbesluis worden eens per twintig minuten waterstanden en schuifstanden geregistreerd. Vanuit de behoefte de ingelaten hoeveelheden te kennen is een model ontwikkeld dat met behulp van de huidige waarnemingen het debiet door het inlaatwerk berekend.

Om de relatie tussen de geregistreeerde gegevens en het debiet te kunnen bepalen zijn in het verleden metingen uitgevoerd. Daar deze ten dele onbetrouwbare en ten dele te weinig gedetailleerde informatie opleverden is in het kader van deze studie een aantal metingen uitgevoerd. Deze bleken een eenzijdig beeld te geven omdat in het gedeelte achter de schuif slechts superkritische stroming optrad. De hieraan complementaire subkritische stroming heeft echter een heel andere benadering nodig. Voor dit type stroming is teruggegrepen op "oude" metingen.

Het debiet kan worden bepaald met een afvoerformule. Hiervoor zijn bij superkritische stroming in de koker nodig: kennis van de afvoercoëfficiënt, de waterstand voor de schuif en de schuifstand. Bij subkritische stroming is bovendien de waterstand achter de schuif nodig.

De schuifstanden, de waterstand voor de schuif en het debiet zijn tijdens de metingen bepaald. Voor de "superkritische afvoerformule" zijn hiermee voldoende gegevens bekend om de afvoercoëfficiënt te berekenen. Voor de bepaling van de "subkritische afvoercoëfficiënt" moet de waterstand achter de schuif worden berekend uit de aan het einde van de koker gemeten waterstand. Dit is mogelijk met behulp van een stuwkromme berekening en een bekende ruwheid van de koker. Deze ruwheid is in het superkritische geval berekend.

De afvoercoëfficiënten bleken niet constant, maar afhankelijk van de waterstanden voor de schuif (bij subkritische stroming in combinatie met de waterstand achter de schuif) en van de onderdruk onder de schuif. Deze onderdruk wordt veroorzaakt door het I-profiel aan de onderzijde van de schuif en is in analogie met de scherpe overlaat te beschrijven.

Met het ontworpen model worden eerst de invoergegevens voor de beide afvoerformules bepaald en vervolgens wordt getest welke formule moet worden gebruikt, waarna het debiet te berekenen is.

De invoergegevens worden aan de hand van een stromingsmodel ontleend aan de geregistreeerde gegevens. De afwijking die de meetapparatuur bleek te hebben, laat zich beschrijven met een lineaire afhankelijkheid van de snelheidshoogte en een constante correctie. Alleen de schuifstandregistratie is gecorrigeerd met een linearisering tussen de meetpunten.

Het blijkt nodig ook voor subkritische stroming uitgebreide metingen te verrichten.

Hoofdstuk I

INLEIDING

Het operationele waterbeheer in Nederland gaat uit van peilbeheer. De laatste jaren echter bestaat er een tendens om hoeveelheden te kennen. Voor het inlaatpunt Grebbesluis houdt deze tendens voorlopig in dat water wordt ingelaten op basis van waargenomen waterstanden, maar dat achteraf moet kunnen worden bepaald hoeveel water is ingelaten. Dit komt neer op een regelmatige registratie van gemeten debietwaarden of op een regelmatige registratie van voor een debietberekening noodzakelijke gegevens. Gekozen is voor het laatste waarbij de met de huidige apparatuur geregistreeerde gegevens het uitgangspunt vormen.

De aanwezige apparatuur registreert waterstanden, tijdstip (dit is voldoende voor peilbeheer) en schuifstanden. Het probleem is dat geen algemeen geldend verband tussen deze gegevens en de waarden van het debiet bekend is, dat wil zeggen dat de ingelaten hoeveelheid water daardoor ook niet bekend is.

Het doel van deze studie is een algemeen geldend model te ontwerpen waarmee op basis van de aanwezige registratie-apparatuur het debiet berekend kan worden. Dit model moet vervolgens geïmplementeerd worden in een computersysteem om een automatische gegevensverwerking mogelijk te maken.

Het te ontwerpen model gaat uit van debietregulatie met 1 schuif.

Achter in dit rapport zijn twee uitslagvellen opgenomen met daarop een schets van de constructie (bijlage 2.2 en 2.3). Het gebruik hiervan naast de tekst is aan te bevelen.

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de Grebbesluis. Hierin komen onder andere de ligging en de constructie van het inlaatwerk aan de orde.

In hoofdstuk 3 wordt de mogelijke afvoerbepaling uit waterstanden voor de Grebbesluis geanalyseerd. De eerste paragraaf zet uiteen hoe de afvoerbepaling uitgevoerd kan worden. De volgende paragraaf gaat in op de te gebruiken afvoerformules. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in super- en subkritische stroming achter de schuif. In de laatste paragraaf worden de energieverliezen behandeld.

Hoofdstuk 4 gaat in op metingen bij het inlaatwerk. Allereerst komt de permanente meetopstelling ter sprake. Vervolgens komen de voor deze studie uitgevoerde metingen in december 1986 aan de orde. Deze metingen hadden tot doel informatie te verzamelen over de afvoer- en verliescoëfficiënten in de constructie. Afgesloten wordt met de in 1980 en 1983 uitgevoerde metingen.

In het vijfde hoofdstuk worden de resultaten van de metingen beschouwd. Dit leidt tot een verliescoëfficiënt voor het

energieverlies tussen schacht 1 en 2, afvoercoëfficiënten voor super- en subkritische stroming achter de schuif en een maat voor de ruwheid van de koker.

Het model dat met deze resultaten en op basis van de analyse uit hoofdstuk 3 kan worden opgesteld wordt gepresenteerd in hoofdstuk 6. Over de bijbehorende software verschijnt een apart rapport.

Hoofdstuk II

OVERZICHT GREBBESLUIS

2.1 SITUATIESCHETS

Het inlaatpunt Grebbesluis ligt ruim een kilometer ten oosten van Rhenen nabij de Grebbeberg, in het zuidoostelijk deel van de provincie Utrecht. De aan het waterkwaliteitsplan 1984 ontleende kaart in bijlage 2.1 laat zien dat het inlaatwerk het beginpunt vormt van een drietal secundaire waterwegen tussen de Nederrijn en het Eemmeer. Deze drie, binnen de provincie gelegen wateren, zijn vanaf de Nederrijn bekeken: de Bisschop Davids Grift, het Valleikanaal en de Eem. De volgorde geeft tevens de stroomrichting aan voor zowel de wateraanvoerfunctie in droge tijden als de waterafvoerfunctie in natte tijden.

2.2 GESCHIEDENIS VAN DE SLUIS

Reeds in het midden van de 16e eeuw vervulde de sluis te Grebbe een belangrijke functie ten behoeve van de afvoer van turf per schip vanuit Veenendaal naar de Rijn.

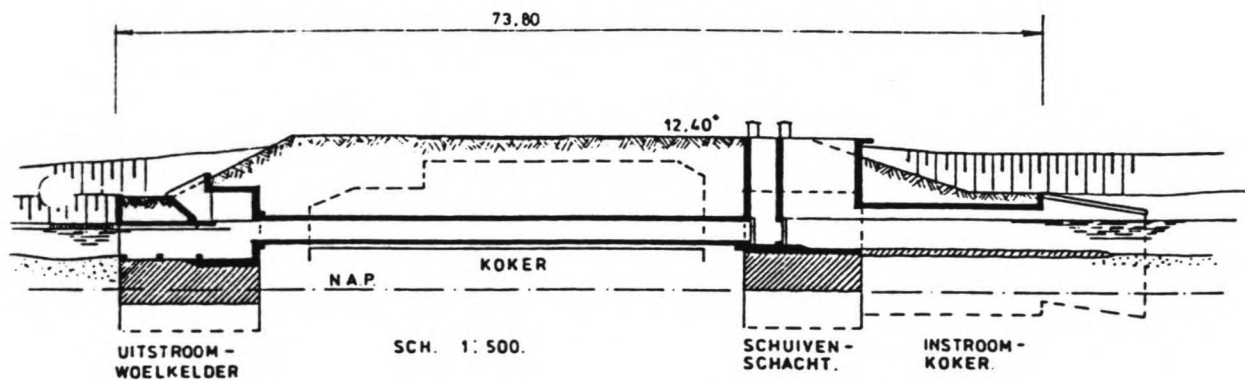
In 1847 heeft het rijk de toen al jaren in gebruik zijnde sluis geheel hersteld en verbeterd als schut- en inlaatsluis en daarna voor inundatiedoeleinden bij het toenmalige Ministerie van Oorlog in eigendom en beheer gebracht. Aan het einde van de jaren zestig (in deze eeuw) is door het rijk in het kader van de overdracht van de zogenaamde Grebbeliniegronden, de sluis aan de provincie in beheer gegeven.

Tot aan de sloop in 1980 was de sluis reeds tientallen jaren niet meer van belang voor de scheepvaart en daartoe overigens ook niet meer geschikt. Sinds 1945 was de sluis niet meer nodig voor inundatie. Ook de functie afwatering verviel door de aanleg van het Valleikanaal. Afwatering geschiedt nu via dit kanaal en de Eem op het Eemmeer.

De sluis bestond uit twee met schotbalken afgesloten kolken. Voor het inlaten van water bevond zich sinds 1937 in een van de schotbalkkeringen een schuif die vooral de laatste jaren van zijn bestaan zeer gebrekkig te noemen was. De kwaliteit van het kunstwerk was ten gevolge van de leeftijd, oorlogsomstandigheden en verkeerstrillingen slecht. Niet in de laatste plaats uit het oogpunt van veiligheid (kunstwerk in hoofdwaterkering) was verbetering gewenst.

De verbeteringswerken uit 1980 omvatten met name:

- het maken van een inlaatwerk, bestaande uit een inlaatgedeelte (instroomkoker), een schuivenschacht, een leidinggedeelte (koker) en een uitlaatgedeelte (uitstroom woelbak) (zie figuur 1 en bijlage 2.2 en 2.3).



Figuur 1: Verbeteringswerken inlaatwerk dwarsdoorsnede

- het uitvoeren van grondwerken en het slopen van een gedeelte van de wanden van de bestaande sluis alsmede van de brug over deze sluis.

De veiligheidseisen die aan dit werk als onderdeel van de rivierwaterkering moesten worden gesteld en het minimaliseren van de kosten speelden een voorname rol in de ontwerp-fase.

2.3 FUNCTIE GREBBESLUIS

Hoewel de benaming "sluis" sinds de verbeteringen in 1980 niet meer van toepassing is, heet het inlaatwerk of inlaatpunt nog steeds "Grebbe sluis".

In paragraaf 2.2 zijn een aantal functies van de Grebbesluis genoemd die in de loop der tijd zijn komen te vervallen. De huidige functies zijn het inlaten en keren van water. Er wordt indien nodig water ingelaten ten behoeve van de aan het Valleikanaal grenzende Gelderse en Utrechtse gronden en ten behoeve van de verversing van dit kanaal. Als waterkering maakt het inlaatwerk onderdeel uit van de rivierwaterkering tussen de hoge gronden aan de voet van de Grebbeberg en de Grebbedijk.

De ontwerp-inlaatcapaciteit is zodanig dat er in droge perioden aan de Nederrijn een hoeveelheid water kan worden onttrokken van 5 a 6 m³/s. Deze behoefte is gebaseerd op een voor de agrarische beregeningsbehoeften aanvaarde norm van 4 mm per etmaal in droge perioden. Daarnaast is ook rekening gehouden met een extra hoeveelheid in te laten water voor de handhaving van een zo goed mogelijke waterkwaliteit, vooral in de benedenloop van het Valleikanaal en in de Eem.

2.4 CONSTRUCTIE

De constructie bestaat uit vier delen. Van bovenstrooms (index bov) naar benedenstrooms (index ben) zijn dit achtereenvolgens:

inlaatgedeelte	index i
schuivenschacht	index s
koker	index k
uitstroom woelkelder	index u

Bijlage 2.2 toont deze situatie in dwarsdoorsnede. Bijlage 2.3 geeft een horizontale doorsnede.

Het inlaatgedeelte vormt een versmalling tussen het bovenstroomse toevoerkanaal en de schuivenschacht. De lengte is bijna 23 meter. De wanden bestaan uit damwandprofielen en de bodem gaat over van een puinbestorting in onderwaterbeton. Aan het begin van de versmalling staat een drukopnemer opgesteld voor de registratie van de waterstand bovenstrooms. In het inlaatgedeelte is ook een krooshek opgenomen.

De schuivenschacht met een lengte van ruim 9 meter bestaat uit twee delen met elk een schuif waarmee het debiet kan worden geregeld. Het bovenstroomse deel (met de zogenaamde buitenschuif) krijgt de index s1, het andere deel (met de binnenschuif) krijgt de index s2. De dwarsdoorsnede tussen beide delen is kleiner dan de dwarsdoorsnede van elk deel afzonderlijk. De constructie, zowel wanden als bodem, is uitgevoerd in beton. In de wanden bevinden zich nissen en in de bodem drempels ten behoeve van een noodkering. Aan het begin van schacht 1 is een vlotter opgesteld. De vlotterbuis is in de constructie opgenomen.

Tussen de schuivenschacht en de woelbak bevindt zich een vierkante betonnen koker van 40 meter lengte en met een breedte van 1,60 meter. De knik in de koker (7 graden) is verwaarloosbaar klein.

De woelbak, grotendeels uitgevoerd in beton, is ruim 11 meter lang. De bodemverlaging tussen de bodem van de koker en de woelbak is 1,50 m. Evenals in de schuivenschacht zijn ook hier nissen en drempels in de constructie opgenomen. Direct achter de woelbak staat een vlotter opgesteld voor de registratie van de benedenstroomse waterstanden.

De totale lengte van de constructie bedraagt ruim 80 meter.

2.5 BEHEER

Zoals bij bestudering van de geschiedenis van de sluis bleek is het beheer van het inlaatwerk sinds het einde van de jaren zestig in handen van de provincie (provinciale waterstaat) gekomen. Naast onderhoud houdt dit beheer het regelen van de in te laten hoeveelheden water op basis van peilbeheer in.

In het inlaatwerk zijn uit veiligheidsoverwegingen twee schuiven achter elkaar aangebracht. Deze schuiven worden motorisch bediend. Alleen de binnenste schuif wordt gebruikt voor het reguleren van het debiet, de buitenste staat dan

geheel open. Een kantonnier opent de binnenste schuif als de benedenwaterstand hierom vraagt.

Het is de bedoeling het beheer uit te breiden met de bepaling van de ingelaten hoeveelheden water opdat waterbalansstudies mogelijk worden. Binnen dat kader valt deze studie.

2.6 WATERSTANDEN

De bovenwaterstanden liggen omstreeks het stuwpeil van Amerongen op N.A.P. +6,00 m. In het voorjaar is dit iets hoger. De benedenwaterstanden fluctueren van ruim N.A.P. +4,00 m tot ruim N.A.P. +5,00 m. Deze fluctuatie is zeer belangrijk voor het stromingsbeeld. Afhankelijk van het debiet en de benedenwaterstand treedt in het leidinggedeelte van de constructie sub- of superkritische stroming op. Dit onderscheid is van groot belang voor de debietbepaling.

Hoofdstuk III

ANALYSE AFVOERBEPALING UIT WATERSTANDEN

3.1 INLEIDING

Het debiet door het inlaatwerk Grebbesluis wordt geregeld met de binnenschuif (in schacht 2). De buitenschuif (in schacht 1) staat normaal gesproken geheel open en dient als reserve. De grootte van het ingestelde debiet is onbekend.

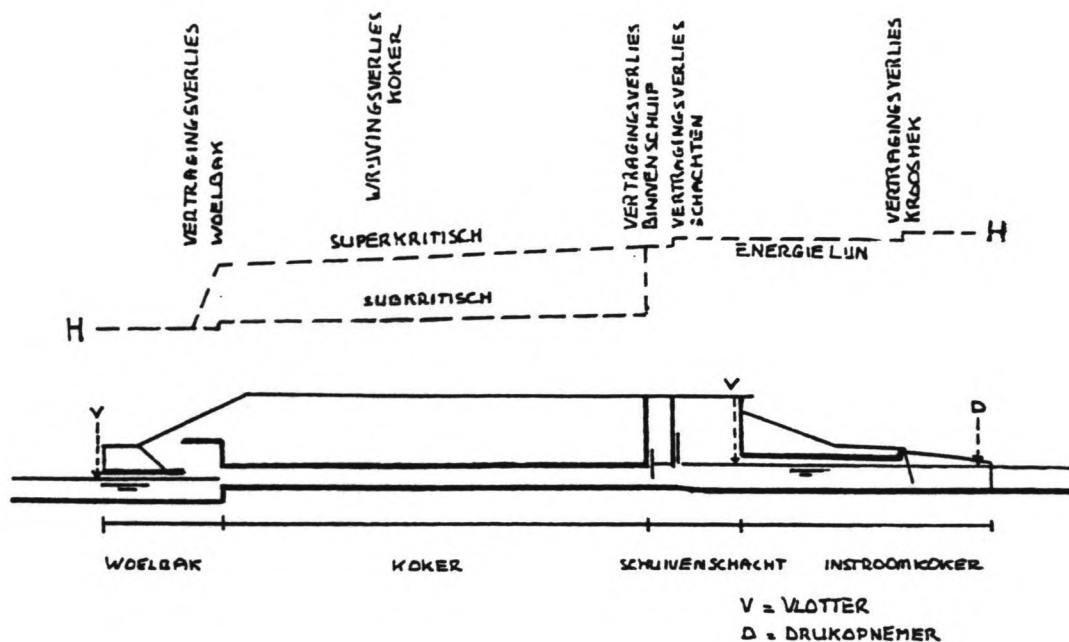
Met de huidige permanent opgestelde apparatuur als uitgangspunt is een afvoerbepaling alleen mogelijk als deze wordt afgeleid met behulp van gemeten water- en schuifstanden. Het debiet wordt namelijk niet rechtstreeks gemeten. Een algemeen geldende relatie tussen de gemeten water- en schuifstanden enerzijds en het debiet anderzijds is niet bekend.

Het debiet door het inlaatwerk kan worden bepaald met een afvoerformule voor stroming onder een schuif. De variabelen in die formule zijn de waterstand voor de schuif h_{s2} en de schuifopening w bij superkritische stroming achter de schuif. Bij subkritische stroming achter de schuif (ofwel een verdronken watersprong achter de schuif) is bovendien de waterstand achter de schuif h_{k1} een in te voeren variabele. Dit onderscheid tussen super- en subkritische stroming achter de schuif is essentieel voor de afvoerbepaling. Aangenomen wordt dat beide situaties complementair zijn. Als er een watersprong in de koker optreedt gebeurt dit als verdronken watersprong achter de schuif met subkritische stroming in de gehele koker, anders is er sprake van superkritische stroming in de koker. In beide afvoerformules komt een afvoercoëfficiënt voor. Specifieke eigenschappen van de constructie, zoals het I-profiel onder de schuif en de drempel in de schuifopening, maken onderzoek naar de waarde van deze afvoercoëfficiënt noodzakelijk.

Van de in de afvoerformules gebruikte variabelen wordt alleen de schuifopening w gemeten. De waterstanden voor en achter de schuif worden niet rechtstreeks gemeten. Figuur 2 laat zien waar de waterstanden gemeten worden.

Door de grootte van de dwarsdoorsnedes ter plaatse kunnen de bovenstrooms (drukopnemer) en benedenstrooms gemeten waterstanden als energiehogten worden aangehouden, de snelheidshogten zijn immers verwaarloosbaar. Het verschil in energiehogte, het totale energieverlies, wordt verdeeld over de verschillende delen van het inlaatwerk. Bij subkritische stroming in de koker zal veel energie in de verdronken watersprong achter de schuif verloren gaan (zie figuur 2).

De waterstand voor de schuif kan worden bepaald door de energieverliezen tussen het bovenstroomse meetpunt en de



Figuur 2: Meetpunten en energielijn

schuif in te schatten. Als de drukopnemer als bovenstrooms meetpunt wordt gebruikt moet het energieverlies over het krooshek worden bepaald. Een verliescoëfficiënt hiervoor is nauwelijks te bepalen omdat deze in sterke mate afhankelijk is van de (onbekende) hoeveelheid vuil voor het krooshek. Daarom wordt als bovenstrooms meetpunt de vlotter in de constructie aangehouden, zodat de onnauwkeurigheid van de verliescoëfficiënt voor het krooshek wordt omzeild. Omdat de vlotter zich in schacht 1 bevindt moet een verliescoëfficiënt tussen schacht 1 en 2 worden bepaald om de waterstand voor de schuif te kunnen bepalen.

De waterstand achter de schuif kan bij subkritische stroming in de koker worden bepaald uit de benedenstrooms gemeten waterstand. Hiertoe zal de ruwheid van de koker moeten worden bepaald ten behoeve van een stuwkromme berekening in de koker. In de woelbak zullen de energieverliezen moeten worden bepaald.

Het kunnen berekenen van de stuwkromme in de koker is tevens van belang om bij superkritische stroming in de koker vanuit de waterstand achter de schuif de waterstand aan het einde van de koker te kunnen berekenen. Dit is nodig om het onderscheid tussen super- en subkritische stroming te bepalen. Het bepalen van dit onderscheid komt aan de orde bij de analyse van de woelbak.

3.2 AFVOERFORMULES VOOR STROMING ONDER DE SCHUIF

3.2.1 Stroming onder de schuif bij superkritische stroming in de koker

Inleiding

Superkritische stroming in de koker treedt op bij lage benedenwaterstanden. Het debiet is dan onafhankelijk van de benedenwaterstand. Het energieniveau voor de schuif en de schuifopening bepalen nu de afvoer. De basisformule hiervoor wordt eerst besproken. De vorm van de schuif en de constructie maken een analyse van het stromingsbeeld nodig voordat het onderzoek naar de afvoercoëfficiënt aan de orde kan komen. In deze paragraaf komt ook de bepaling van de waterstand achter de schuif bij superkritische stroming aan de orde. Deze is in een later stadium nodig.

Basisformule

Indien achter de schuif superkritische stroming optreedt, en dus geen sprake is van een verdronken watersprong, kan het debiet volgens Bos (1976, blz 299) worden afgeleid uit:

$$Q = C_e \cdot b_{sf} \cdot w \cdot \sqrt{2g \cdot ((a_{s2} - a_d) - \mu \cdot w)} \quad 3.2.1.$$

waarin:

C_e	= afvoercoëfficiënt	a_{s2}	= waterdiepte voor de schuif
b_{sf}	= breedte schuif	a_d	= drempelhoogte
w	= schuifopening	μ	= contractiecoëfficiënt

Figuur 3 laat dit nog eens zien.

Volgens de wet van Bernouilli moet in plaats van de waterstand voor de schuif het energieniveau voor de schuif worden genomen, als deze tenminste bekend is. Hiermee wordt de afvoerformule:

$$Q = C_e \cdot b_{sf} \cdot w \cdot \sqrt{2g \cdot ((H_{s2} - z_d) - \mu \cdot w)} \quad 3.2.2.$$

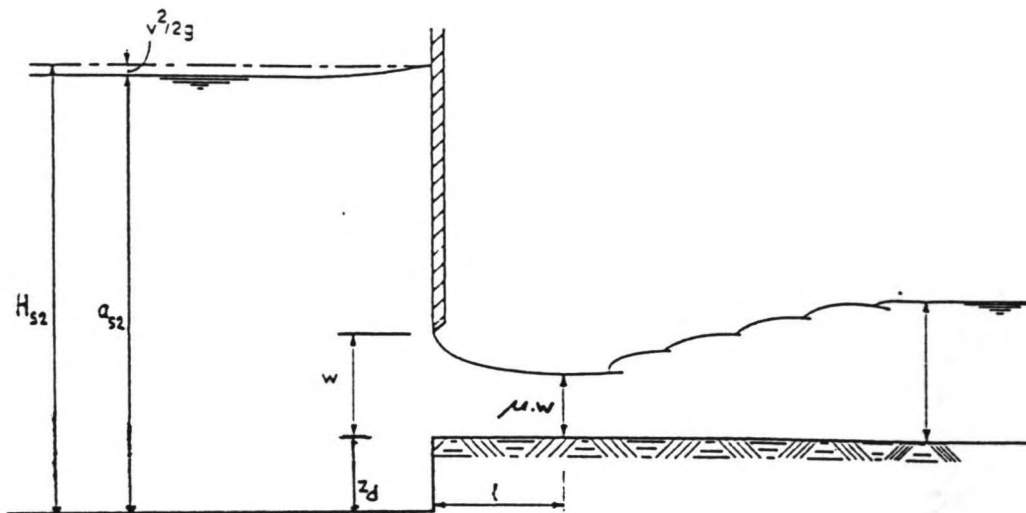
waarin:

H_{s2}	= energiehogte voor de schuif t.o.v. N.A.P.
z_d	= plaatshoogte drempel t.o.v. N.A.P.

Omdat het stromingsbeeld hier afwijkt van het stromingsbeeld bij uit literatuur bekende afvoercoëfficiënten, moet onderzoek worden gedaan naar de waarde van C_e . Als deze bekend is kan met de schuifstand w en met energieniveau H_{s2} als invoer het debiet voor superkritische stroming in de koker worden bepaald.

Stromingsbeeld

In figuur 4 is het stromingspatroon onder de schuif getekend voor superkritische stroming in de koker.



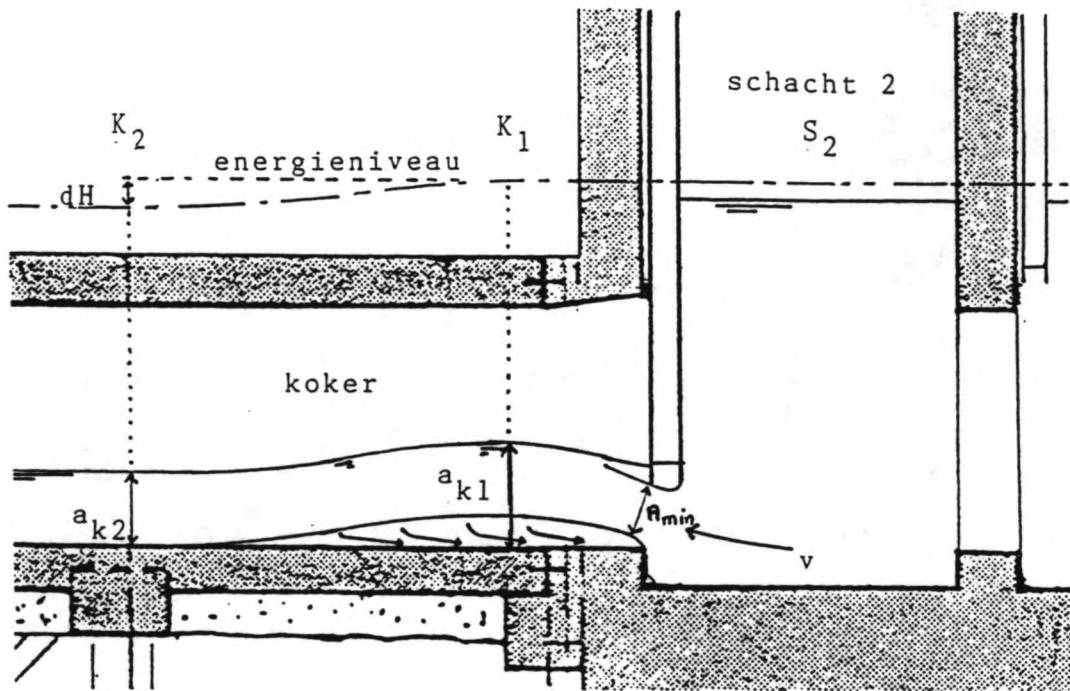
Figuur 3: Superkritische afvoerformule

De stroomlijnen worden door de drempel en de hierdoor veroorzaakte contractie "omhoog gedrukt". De bovenste stroomlijn zal aan de onderzijde van de schuif het I-profiel aan beide flenzen raken. Hierdoor wordt in de ruimte tussen de flenzen een onderdruk gecreëerd die de bovenste stroomlijn verhinderd los te komen van de flenzen.

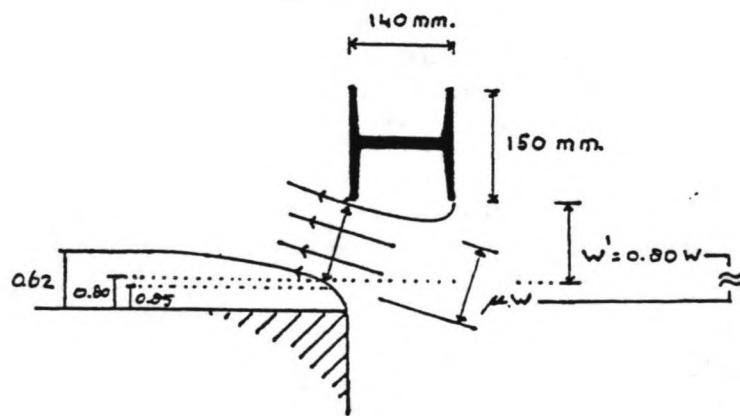
De minimale doorsnede A_{min} staat loodrecht op de buitenste stroomlijnen en wordt gerekend vanaf de tweede flens van het I-profiel. Aangenomen wordt dat deze doorsnede recht is en dat deze zich laat beschrijven als percentage van de totale schuifopening middels een contractiecoëfficiënt. Figuur 5 toont dat deze contractiecoëfficiënt μ tussen de 0,62 en 1,00 moet liggen. De waarde 0,62 is niet haalbaar omdat de plaats waar de de onderste stroomlijn $0,38 \cdot w$ van de bodem verwijderd is te ver achter de schuif ligt terwijl de waarde 1,00 niet haalbaar is door de kromming van de onderste stroomlijn. Derhalve wordt voor de contractiecoëfficiënt een waarde 0,80 aangehouden.

Onderzoek naar de afvoercoëfficiënt

Bij de behandeling van de basisformule is reeds aangehaald dat onderzoek moet worden gedaan naar de waarde van de afvoercoëfficiënt omdat deze niet uit de literatuur kan worden overgenomen. Een van de belangrijkste oorzaken hiervan is de onderdruk onder de schuif. Er was geen literatuur beschikbaar over de invloed van de onderdruk op de afvoer bij stroming onder een schuif.



Figuur 4: Stroming onder de schuif bij superkritische afvoer



Figuur 5: Contractiecoëfficiënt onder de schuif

Onderdruk kan ook voorkomen bij stroming over een scherpe overlaat. Hierover is wel literatuur beschikbaar (Bos, 1976). Daarin wordt de grootte van de onderdruk en de invloed ervan op de afvoer beschreven. Onderzocht moet worden in hoeverre deze beschrijving is toe te passen voor stroming onder een schuif.

Ook de invloed van de verhouding van de waterstand voor de schuif tot de schuifopening en de invloed van de door de onderdruk onderdrukte contractie onder de schuif moet worden onderzocht.

Dit onderzoek moet resulteren in een waarde voor de afvoercoefficient en correctiefactoren voor de genoemde invloeden.

Bepaling van de waterstanden achter de schuif uit het energieniveau voor de schuif

De waterstand achter de schuif is niet gelijk aan $\mu \cdot w$. Bij de behandeling van het stromingsbeeld is er van uitgegaan dat de onderste stroomlijn zich ontwikkelt conform de tekening in figuur 4. De onderste stroomlijn komt hierbij over een hoogte $(1 - \mu) \cdot w$ los van de bodem. De waterstand h_{k1} in deze doorsnede bestaat nu uit de som van deze hoogte en een zogenaamde 'effectieve' waterdiepte. Deze waterdiepte wordt gebruikt bij de berekening van de watersnelheid uit het debiet.

Het energieniveau is nu gelijk aan de genoemde waterstand plus de snelheidshoogte:

$$H_{k1} = h_{k1} + \alpha \cdot \left[\frac{Q}{(a_{k1} - (1 - \mu) \cdot w)} \right]^2 \quad 2g \quad 3.2.3.$$

met:

$$\alpha = 1,1$$

Tussen schacht 2 en deze doorsnede $k1$ in de koker vindt voornamelijk versnelling plaats, waardoor vertragsingsverliezen verwaarloosd kunnen worden. Als bovendien de wrijvingsverliezen over dit korte gedeelte verwaarloosd kunnen worden zijn beide energieniveau's gelijk te stellen:

$$H_{s2} = H_{k1} \quad 3.2.4.$$

Bij een bekende energiehogte in schacht 2 kan met deze relatie de waterstand in doorsnede $k1$ worden berekend:

$$H_{s2} = h_{s2} + \alpha \cdot \left[\frac{Q}{b_{s2} \cdot a_{s2}} \right]^2 / 2g \quad 3.2.5.$$

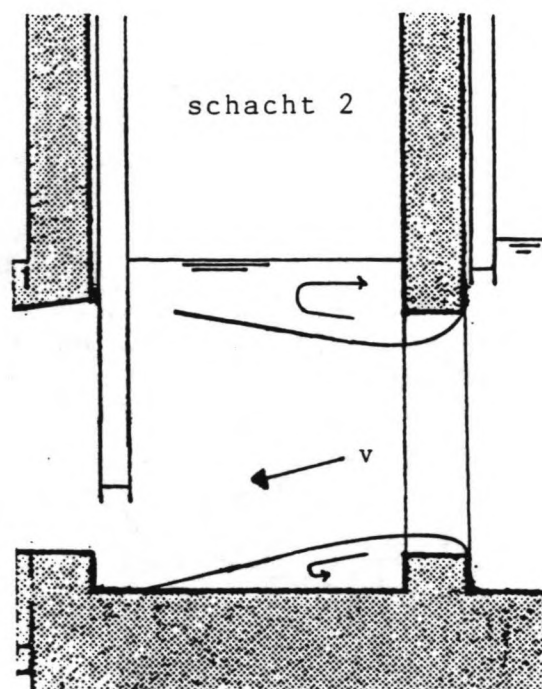
met:

$$\alpha = 1,5$$

b_{s2} = breedte schacht 2

De keuze voor $\alpha = 1,5$ is gebaseerd op het optredende stromingsbeeld in schacht 2 (zie figuur 6).

De invloed van de geschatte α op het energieniveau is gering. Voor $\alpha = 1,3$ of $\alpha = 1,7$ zou het verschil in energiehogte in het ergste geval 1,5 cm zijn. Dit geval, bij grote



Figuur 6: Stromingsbeeld schacht 2

schuifopeningen, treedt echter nauwelijks op. Onder en achter de schuif wordt de correctiefactor α gelijk aan 1,1 gesteld gezien de redelijk uniforme snelheidsverdeling.

De waterstand in de doorsnede k2 kan worden verkregen door van de waterstand in doorsnede k1 de invloed van de contractie af te trekken:

$$a_{k2} = a_{k1} - (1-\mu) \cdot w \quad 3.2.6.$$

Versmalling na de schuif

Direct na de schuif neemt de breedte van de doorsnede af van 1,70 m (schuif) tot 1,60 m. De invloed hiervan op het stromingsbeeld wordt verwaarloosd omdat de hiermee veroorzaakte versnelling nauwelijks consequenties heeft voor het energieniveau.

3.2.2 Stroming onder de schuif bij subkritische stroming in de koker

Inleiding

Subkritische stroming in de koker treedt op bij hoge benedenwaterstanden waarbij achter de schuif een verdonken

watersprong optreedt. De afvoer wordt nu behalve door het energieniveau voor de schuif en de schuifopening bepaald door de waterstand direct achter de schuif. Hierdoor wijkt de basisformule voor de debietbepaling af van de basisformule voor superkritische stroming in de koker. In deze paragraaf komen verder het stromingsbeeld en het onderzoek naar de afvoercoëfficiënt aan de orde.

Basisformule

Indien direct achter de schuif een verdronken watersprong en in de koker dus een subkritische stroming optreedt, kan het debiet worden afgeleid uit:

$$Q = C_e \cdot b_{sf} \cdot w \cdot \sqrt{2g \cdot (H_{s2} - h_{k1})} \quad 3.2.7.$$

waarin:

H_{s2} = energiehogte in schacht 2

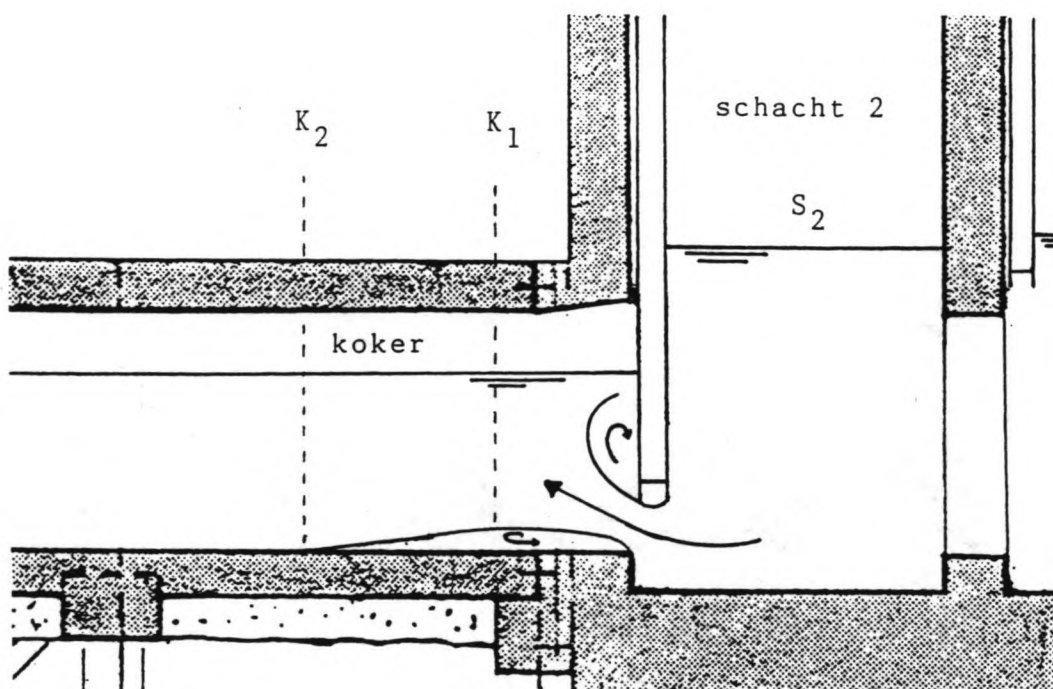
h_{k1} = waterstand achter de schuif

Stromingsbeeld

Het stromingsbeeld komt voor een groot deel overeen met het in de vorige paragraaf behandelde stromingsbeeld voor superkritische stroming in de koker. Ook hier wordt de stroming door de drempel "omhoog gedrukt", ontstaat er onderdruk onder de schuif en kan de contractiecoëfficiënt onder de schuif gelijk worden gesteld aan 0,80. Het verschil is echter dat achter de schuif een verdronken watersprong optreedt (zie figuur 7), waardoor extra vertragsingsverliezen worden geïntroduceerd. Relatief gaat nu meer energie bij de schuif en minder energie in de woelbak verloren.

Onderzoek naar de afvoercoëfficiënt

Het onderzoek moet een waarde opleveren voor de afvoercoëfficiënt in de basisformule opdat bij bekende waterstanden voor en achter de schuif en een bekende schuifstand het debiet te bepalen is. Evenals voor superkritische stroming zal de invloed van de onderdruk onder de schuif, de verhouding van de waterstand voor de schuif tot de schuifopening en de onderdrukte contractie onder de schuif moeten worden onderzocht.



Figuur 7: Strooming onder de schuif bij subkritische afvoer

3.3 ENERGIEVERLIEZEN IN DE CONSTRUCTIE

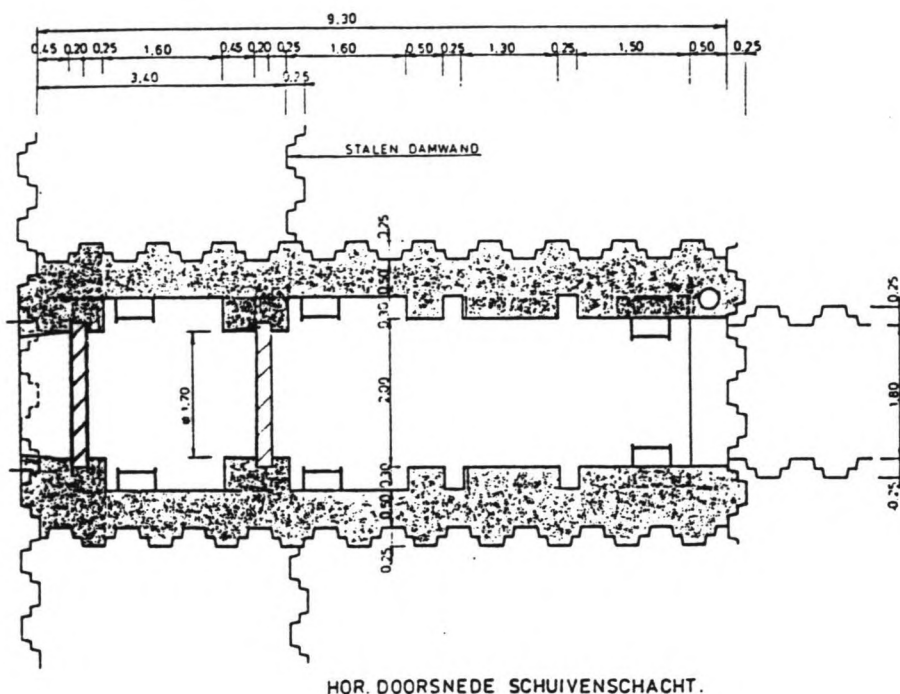
3.3.1 Strooming tussen schacht 1 en 2

Bij de berekening van het debiet wordt als bovenwaterstand de door de vlotter in de constructie gemeten waarde aangenomen (zie paragraaf 3.1). Met een aangenomen debiet is hieruit de energiehogte te berekenen.

De volgende stap in de berekening is de bepaling van de waterstand en het energieniveau in schacht 2. Als de energieverliezen tussen beide schachten berekend kunnen worden, kan uit het energieniveau in schacht 1 het energieniveau in schacht 2 (en vervolgens ook de waterstand) worden berekend.

Het energieverlies tussen beide schachten komt voornamelijk op rekening van vertragsverliezen. Indien de eerste (= buitenste) schuif geheel geopend is wordt de kleinste doorsnede 1,70 m x 1,60 m. Deze stand van de buitenschuif vormt het uitgangspunt voor de gehele berekening. Als deze schuif gedeeltelijk gesloten wordt moet een berekening worden opgezet zoals in dit rapport voor de binnenschuif wordt gedaan.

In de genoemde kleinste doorsnede is de bovenzijde begrensd door een betonrand die op dezelfde hoogte ligt als het "kokerplafond". Aan de onderzijde bevindt zich een drempel op dezelfde hoogte als de bodem van de koker (zie figuur 8 en 9).



Figuur 8: Situatieschets schachten

Omdat bovendien sprake is van een versmalling treedt over alle vier zijden contractie op. De minimale doorsnede is A_{min} . De maximale doorsnede in schacht 2, A_{max} , is zeer moeilijk te bepalen door het stromingsbeeld. Daarom wordt teruggegrepen op meetgegevens en een empirische relatie opgesteld.

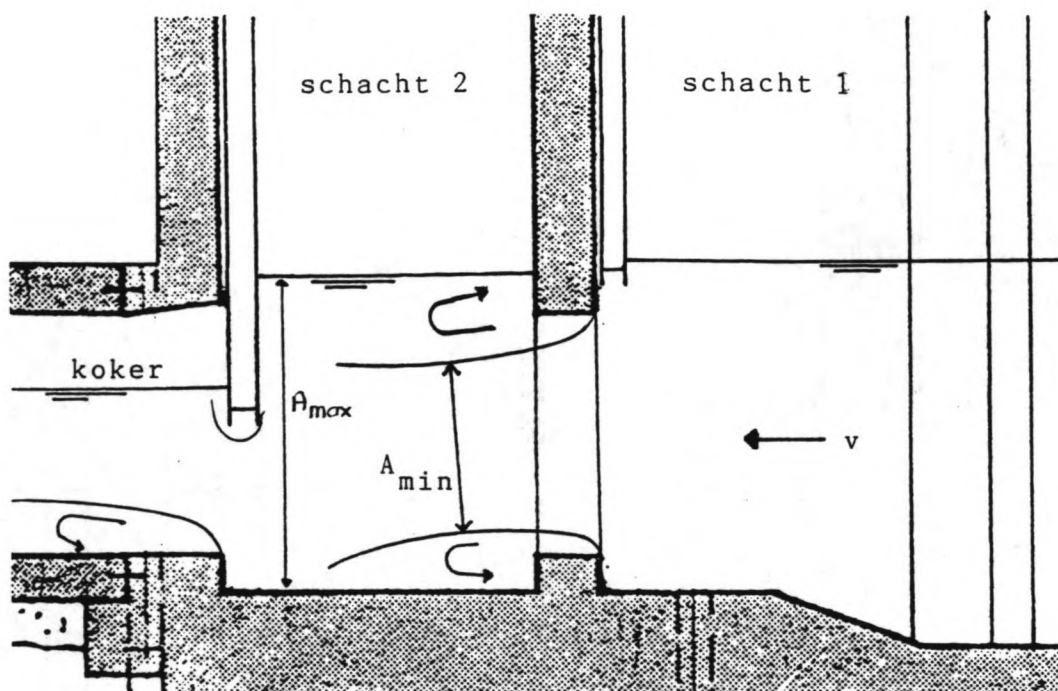
Hoewel "Carnot" door de te korte uitstroming niet toepasbaar is wordt met behulp van deze formule benaderd welke coëfficiënten bepaald kunnen worden.

$$dH = \alpha' \cdot \frac{[\bar{u}_{max} - \bar{u}_{min}]^2}{2g} \quad 3.3.1.$$

met: $u = Q/A$

$$dH = \alpha' \cdot \frac{\left[\frac{1}{A_{min}} - \frac{1}{A_{max}} \right]^2}{2g} \cdot Q^2 \quad 3.3.2.$$

Als de waterstand in schacht 1 hoger is dan de betonrand op N.A.P. + 5,60 m wordt aangenomen dat A_{max} constant is (zie figuur 9). Dit is aannemelijk omdat het streefpeil bovengestroomd op N.A.P. + 6,00 m ligt.



Figuur 9: Maximale doorsnede schacht 2

In dit geval geldt:

$$\alpha' \cdot \left[\frac{1}{A_{\min}} - \frac{1}{A_{\max}} \right]^2 = \text{constant} = c \quad 3.3.3.$$

$$dH = c \cdot Q^2 \quad 3.3.4.$$

Tijdens de metingen moet de constante c worden bepaald. Daartoe moet in beide schachten uit de gemeten waterstanden en het gemeten debiet het energieniveau berekend worden uit:

$$H = h + \alpha \cdot \frac{u^2}{2g} \quad \text{met: } \alpha_{s1} = 1,4 \quad 3.3.5.$$

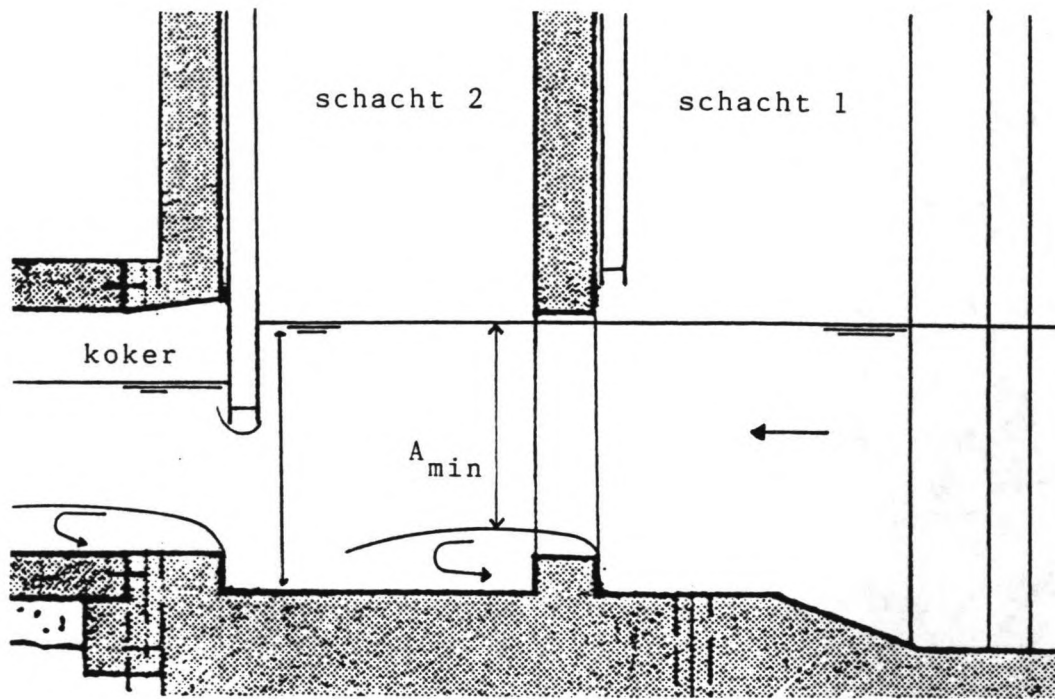
$$\alpha_{s2} = 1,5$$

Voor schacht 1 geldt: $u = Q/(a \cdot bs1)$

Voor schacht 2 geldt: $u = Q/(a \cdot bs2)$

waarin a de waterdiepte en b de breedte van de schacht is. Gezien de nissen in de wanden moet voor de breedte een gemiddelde waarde worden genomen, rekening houdend met het stromingsbeeld. Dit is voor schacht 1 $bs1 = 2,00$ m en voor schacht 2 $bs2 = 2,10$ m.

Als de waterstand in schacht 1 afneemt en lager wordt dan de betonrand zal een ander stromingspatroon gaan optreden (zie figuur 10).



Figuur 10: Verandering van het stromingspatroon bij verlaging waterstand

De relatie

$$dH = c \cdot Q^2 \quad (3.3.4) \quad 3.3.6.$$

wordt herschreven tot:

$$dH = c_2 \cdot \frac{Q^2}{(b \cdot a)^2 \cdot 2g} \quad 3.3.7.$$

met:

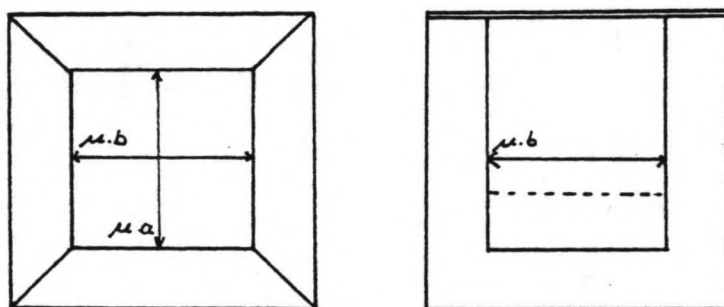
$$\begin{aligned} b &= \text{breedte opening} = 1,70 \text{ m} \\ a &= \text{hoogte opening} = 1,60 \text{ m} \\ C_2 &= (b \cdot a)^2 \cdot 2g \cdot C = 145 \cdot C \end{aligned}$$

Aangenomen wordt dat in de eerste situatie volledige contractie is opgetreden, dat wil zeggen volledig aan zowel onder- als bovenzijde en aan beide zijkanten. Als de water-

stand in schacht 1 het niveau van de betonrand nadert neemt de de contractie aan de bovenzijde af. Hierdoor neemt het vertragsingsverlies af. Aangenomen wordt dat de constante c_2 , die een maat is voor het vertragsingsverlies, hierdoor afneemt met:

$$\frac{\mu \cdot b}{2b + 2a} \cdot 100\% = 16\% \quad (\text{met: } \mu=0,62) \quad 3.3.8.$$

tot $122 \cdot c$ en dat de overgang tussen beide situaties niet abrupt maar parabolisch in de hoogte verloopt. Hiermee wordt voorkomen dat voor grote waterstanden het verlies te veel toeneemt (Zie ook figuur 11).



Figuur 11: Afname contractie

Voor waterstanden hoger dan N.A.P. +5,60 m geldt dan:

$$c_2 = 122 \cdot c + c_3 \cdot (h_{s1} - 5,60)^2 \quad 3.3.9.$$

c_3 hangt hierbij af van de waterstand h_{s1} voor de schuif waarvoor c is bepaald. Als die waterstand wordt gesubstitueerd moet uit deze formule volgen:

$$c_2 = 145 \cdot c \quad 3.3.10.$$

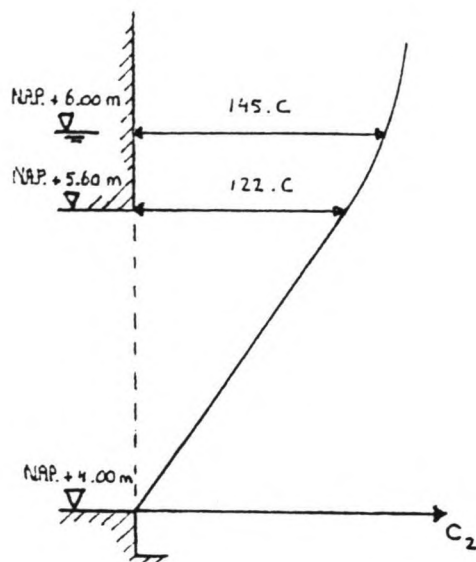
Voor waterstanden lager dan N.A.P. + 5,60 m wordt de hoogte van de opening (1,60 m) vervangen door de waterdiepte boven de drempel, dus:

$$dH = 122 \cdot c \cdot \frac{Q^2}{(b \cdot a_d)^2 \cdot 2g} \quad 3.3.11.$$

waarin:

a_d = waterdiepte boven de drempel

Figuur 12 toont het verloop van c_2 afhankelijk van de waterstand.



Figuur 12: Constante c_2 als functie van de waterstand

3.3.2 Ruwheid in het leidinggedeelte

De ruwheid in de koker is een noodzakelijk gegeven in de relatie tussen de waterstand achter de schuif (doorsnede k_1) en de waterstand aan het einde van de koker (doorsnede k_3), nabij de woelbak. Deze relatie is enerzijds nodig om vanuit de in het superkritische geval bepaalde waterstand achter de schuif de waterstand aan het einde van de koker te bepalen. Hieruit en uit de gemeten benedenwaterstand kan vervolgens worden bepaald of inderdaad sprake is van superkritische stroming of dat van subkritische stroming moet worden uitgegaan. Anderzijds moet voor subkritische stroming in de koker vanuit de waterstand aan het einde van de koker de waterstand achter de schuif worden bepaald.

Afleiding basisformule

Indien wordt uitgegaan van een rechte koker ("open channel") en van een niet evenwijdige bodem en waterspiegel kan er geen sprake zijn van uniforme stroming. Dit betekent dat de snelheid u plaatsafhankelijk is: $u = u(x)$ en dat de vergelijking van Chezy:

$$u = C \cdot \sqrt{R \cdot i}$$

3.3.12.

niet opgaat. Het verwaarlozen van de knik in de leiding is acceptabel omdat de hoek erg klein is.

De bewegingsvergelijking kan nu worden gevormd door de algemene bewegingsvergelijking van Euler te middelen over de verticaal. Doordat de stroming geleidelijk verandert mogen de stroomlijnen als recht worden aangenomen en mag worden uitgegaan van een hydrostatische drukverdeling. Als instelverschijnselen worden verwaarloosd en een constante benedenwaterstand wordt aangenomen kan de stroming stationair worden genoemd.

De waterbeweging kan in het stationaire geval worden beschreven door een gewone differentiaalvergelijking:

$$\alpha \cdot u \cdot \frac{du}{dx} + g \cdot \frac{da}{dx} = g \cdot i_b - \frac{g \cdot u^2}{C^2 \cdot R} \quad 3.3.13.$$

waarin a de waterdiepte, x de plaats in de koker en i_b de bodemhelling is. Voor de continuïteitsvergelijking geldt:

$$\frac{dq}{dx} = u \cdot \frac{da}{dx} + a \cdot \frac{du}{dx} = 0 \quad 3.3.14.$$

Deze twee differentiaalvergelijkingen voor de afhankelijke variabelen $u(x)$ en $a(x)$ geven na eliminatie van du/dx :

$$g \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot u^2}{g \cdot a}\right) \cdot \frac{da}{dx} = g \cdot i_b - \frac{g \cdot u^2}{C^2 \cdot R} \quad (\text{de Vries, 1981}) \quad 3.3.15.$$

Omdat de bodemhelling hier gelijk is aan nul wordt deze vergelijking:

$$g \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot u^2}{g \cdot a}\right) \cdot \frac{da}{dx} = - \frac{g \cdot u^2}{C^2 \cdot R} \quad 3.3.16.$$

Met $q = Q/b$ kan het verhang van de waterspiegel worden geschreven als:

$$\frac{da}{dx} = \frac{\frac{q^2}{C^2 \cdot a^2 \cdot R}}{1 - \frac{\alpha_2 \cdot q^2}{g \cdot a^3}} \quad 3.3.17.$$

Hiermee kan de stuwkromme in de koker worden berekend. Omdat begin- en eindpunt van de stuwkromme (gerekend tegen de stroom in) bekend zijn (de eerste ,hk3, moet worden gemeten, de tweede ,hk2, kan worden berekend) kan door verschillende k-waarden te kiezen op indirecte wijze de Chezy-waarde worden berekend en daarmee de juiste stuwkromme worden bepaald. Het resultaat van deze berekening is dus een maat voor de ruwheid ofwel voor de k-waarde. De k-waarde is de equivalente zandruwheid volgens Nikuradse. In bovenstaande afleiding van de vergelijking voor de stuwkromme is uitgegaan van de Chezy-waarde C als maat voor de ruwheid. De volgende paragraaf komt terug op de relatie tussen de Chezy-waarde en de k-waarde.

De eerste orde gewone differentiaalvergelijking voor de stuwkromme kan worden geïntegreerd met een predictor-corrector-

tor methode. Hierbij is gebruik gemaakt van de formules van Heun (zie Almering et al, 1980):

$$\begin{aligned} \text{predictor } a_p &= a_i + dx \cdot f(a_i) \\ \text{corrector } a_c &= a_i + \frac{1}{2} \cdot dx \cdot (f(a_p) + f(a_i)) \end{aligned} \quad 3.3.18.$$

$$a_{i+1} = a_c$$

$$f(a) = \frac{\frac{q^2}{C^2 \cdot a^2 \cdot R}}{1 - \frac{\alpha_2 \cdot q^2}{g \cdot a^3}}$$

Te beginnen met $i = 0$ wordt dit proces n keer herhaald. n is het aantal intervallen waarin de koker is verdeeld ($n = 16$). De dx is dus de intervallengte. Dit rekenproces levert 17 punten op van de stuwkromme, waarvan de eerste en de laatste van belang zijn.

De lengte waarover de stuwkromme berekend moet worden is in principe kleiner dan de lengte van de koker. In figuur 13 is een gedeelte van het superkritische stromingmodel weergegeven. De lengte L' is afhankelijk van de schuifopening en wordt berekend volgens:

$$L' = \left(8 \cdot a + \frac{w}{u} \right) = 4,65 \cdot w \quad 3.3.19.$$

met:

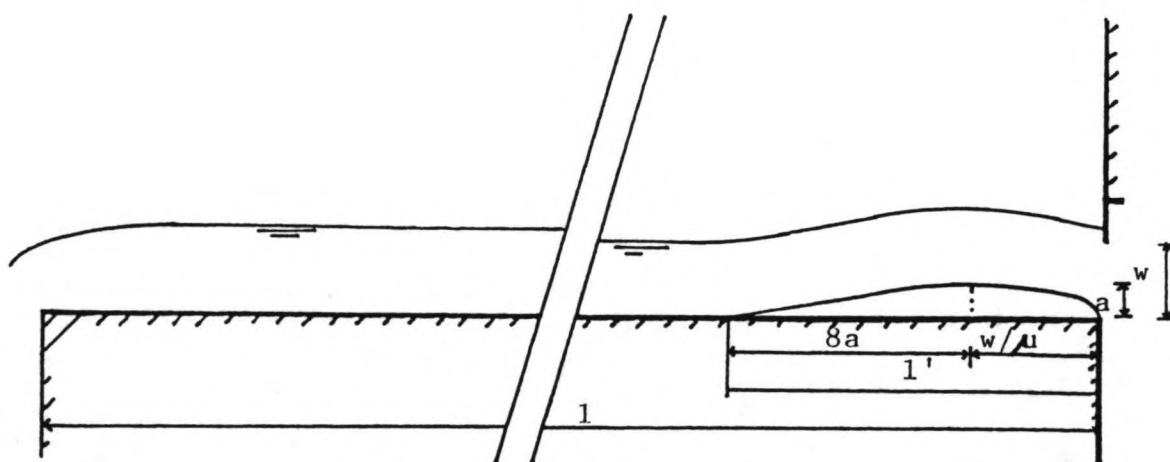
$$\begin{aligned} \mu &= 0,62 \\ a &= 0,38 \cdot w \end{aligned}$$

De onzekerheid in L' is groot vanwege de coefficient $8a$. Deze is afgeleid van de lengte die de stroming na verbreding a van een buis of kanaal nodig heeft om te gaan aanliggen. Het blijkt nauwelijks uit te maken of er met een lengte L dan wel $(L-L')$ wordt gerekend. L' is namelijk maximaal 7,1 % van L bij een toch al ongebruikelijke schuifopening van 0,60 m. Als maatgevende lengte wordt daarom eenvoudigshalve de gehele lengte van de koker genomen.

Chezy-waarde

De equivalente zandruwheid volgens Nikuradse is een constante waarde. De Chezy-waarde hangt af van onder andere de k -waarde en de waterstand. Daarom moet de equivalente zandruwheid worden bepaald.

In de stuwkromme berekening wordt echter de Chezy-waarde als enige onbekende bepaald. Deze kan volgens White-Cole-



Figuur 13: Lengte van de stuwkromme

brook worden beschreven met:

$$C = 18. \log\left(\frac{12.R}{k + d/3,5}\right) \quad 3.3.20.$$

Hierin staat d voor de dikte van de viskeuze sublaag:

$$d = \frac{11,6.v}{\sqrt{9,8.R.i}} \quad 3.3.21.$$

waarin v de viscositeit, R de hydraulische straal en i het verhang is. Bijlage 3.1 geeft de waarde van de viscositeit bij verschillende temperaturen.

Bovenstaande relatie geeft het verband weer tussen de gewenste maat voor de ruwheid k en de in de stuwkromme gebruikte maat voor de ruwheid C.

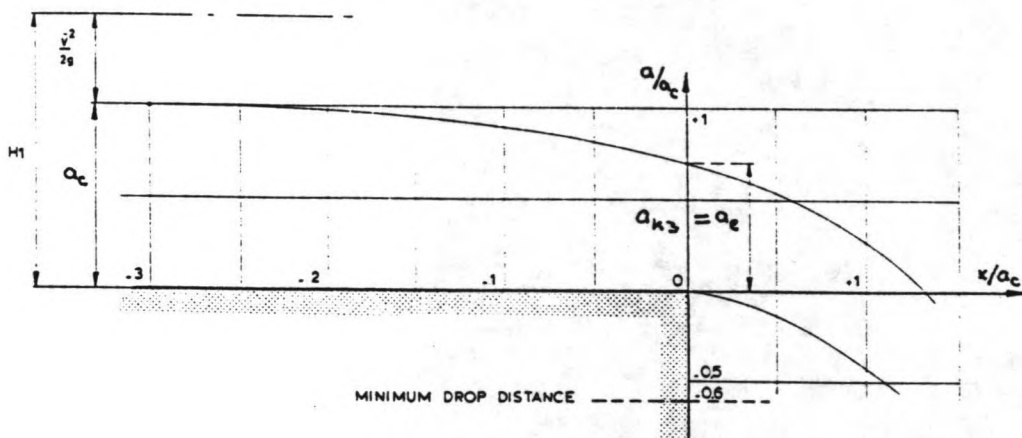
De overstort

Ten behoeve van de bepaling van de ruwheid in de koker middels de stuwkromme berekening is het nodig de waterstand aan het einde van de koker te meten. Deze gemeten waterstand bij de uitstroom van de koker in de woelbak moet echter worden gecorrigeerd voor afbuiging van de stroming bij lagere waterstanden in de woelbak. Dit is een bekend verschijnsel bij subkritische stroming die overstort. Volgens Bos (1976, blz 364) komt dit ook voor bij superkritische stroming. Het effect van de overstort kan zich ver in de koker voortzetten. Dit effect behelst een waterstandsverlaging ten opzichte van de theoretische stuwkromme. Dit betekent voor superkritische stroming dat de waterstand in de stroomrichting minder toeneemt en in het uiterste geval constant

blijft. Afname zou namelijk energiewinst betekenen. Bos hanteert hierbij de volgende formule:

$$\frac{a_e}{a_e} = \frac{\text{waterdiepte}}{\text{grensdiepte}} = 0,715 \quad 3.3.22.$$

Een eis die Bos stelt voor het gebruik van zijn formules is dat de waterstand in de woelbak 60% van de grensdiepte lager moet zijn dan de bodem van de koker. (Zie figuur 14). Aan deze eis wordt niet voldaan, maar uit gebrek aan beter wordt de correctie hier op een zelfde wijze vorm gegeven.



Figuur 14: Vrije overstort.

Naar aanleiding van Bos (1976, blz 366) wordt aangenomen dat $ak_3 = 0,715 \cdot a$ -gecorrigeerd bij een vrije overstort. Dit betekent dat de gemeten ak_3 met 40% van zijn eigen waarde moet worden vergroot: a -gecorrigeerd = $1,40 \cdot ak_3$

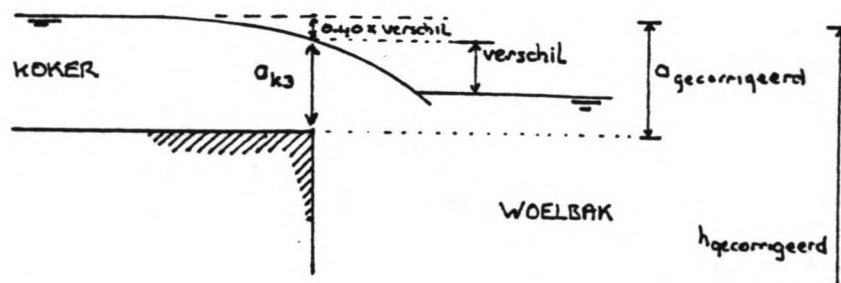
Een vrije overstort is dan gedefinieerd als een overstort bij een waterstand in de woelbak die lager is dan het niveau van de kokerbodem. Als er volgens deze definitie geen sprake is van een vrije overstort, wordt de gemeten waterstand gecorrigeerd met 40% van het verschil tussen beide meetpunten ofwel (zie figuur 15):

$$0,40 \cdot (h_{k3} - h_{\text{woelbak}}) \quad \text{met:} \quad h_{k3} = z_{k3} + a_{k3} \quad 3.3.23.$$

dus:

$$h_{k3, \text{gecorrigeerd}} = h_{k3} + 0,40 \cdot (h_{k3} - h_{\text{woelbak}}) \quad 3.3.24.$$

Voor de bepaling van de k -waarde middels de stuwkromme bleek het nodig hk_3 te meten. Omdat in de stuwkromme geen rekening



Figuur 15: Niet vrije overstort

wordt gehouden met beïnvloeding door de overstort moet de bij deze berekening te gebruiken waterstand de gecorrigeerde waterstand zijn.

3.3.3 Stroming in de woelbak

Stromingsbeeld

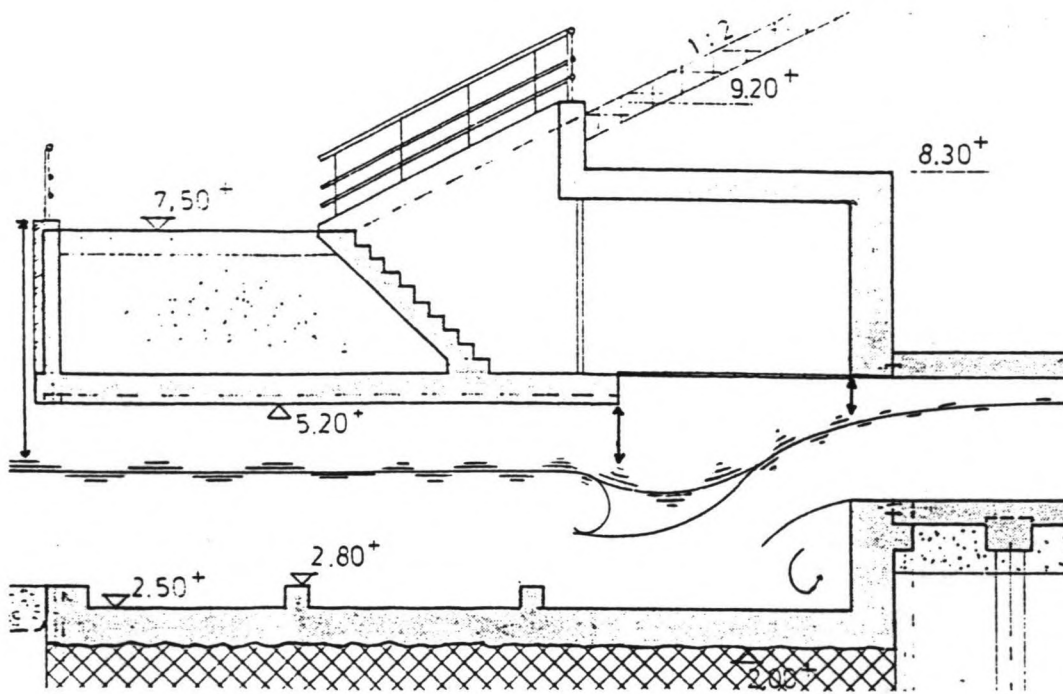
De voornaamste functie van de woelbak is "overtollige energie kwijt raken", opdat achter de constructie geen ontgroningen optreden. Dit geldt met name voor superkritische stroming in de koker. Deze stroming gaat gepaard met zeer onrustig water waarin metingen slechts een indicatieve waarde kunnen hebben. Figuur 16 geeft hiervan een situatieschets.

Door de kleine verschillen in waterstand achter de woelbak en de grote onnauwkeurigheid van metingen in de woelbak kunnen nauwelijks conclusies uit dergelijke metingen worden getrokken ten aanzien van de energieverliezen in de trapsgewijs breder wordende woelbak. Daarom is gekozen voor een theoretische benadering waarmee met behulp van de benedenstrooms gemeten waterstanden de waterstand in de woelbak wordt berekend.

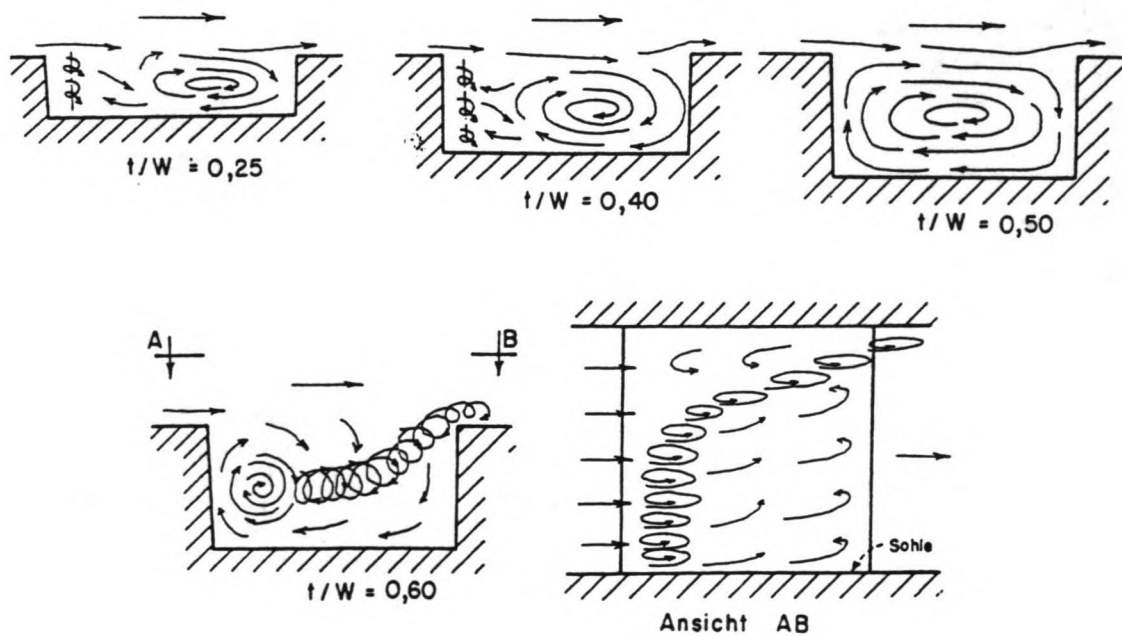
Deze waterstand is van belang voor het onderscheid tussen sub- en superkritische stroming en als tussenstap voor de berekening van de waterstand achter de schuif bij subkritische stroming.

Energieverlies ten gevolge van nissen

Volgens Falvey (1964) worden de energieverliezen in nissen bij buisstroming veroorzaakt door turbulenties (zie figuur 17) en bovendien zouden deze verliezen rechtevenredig met de snelheidshoogte zijn.

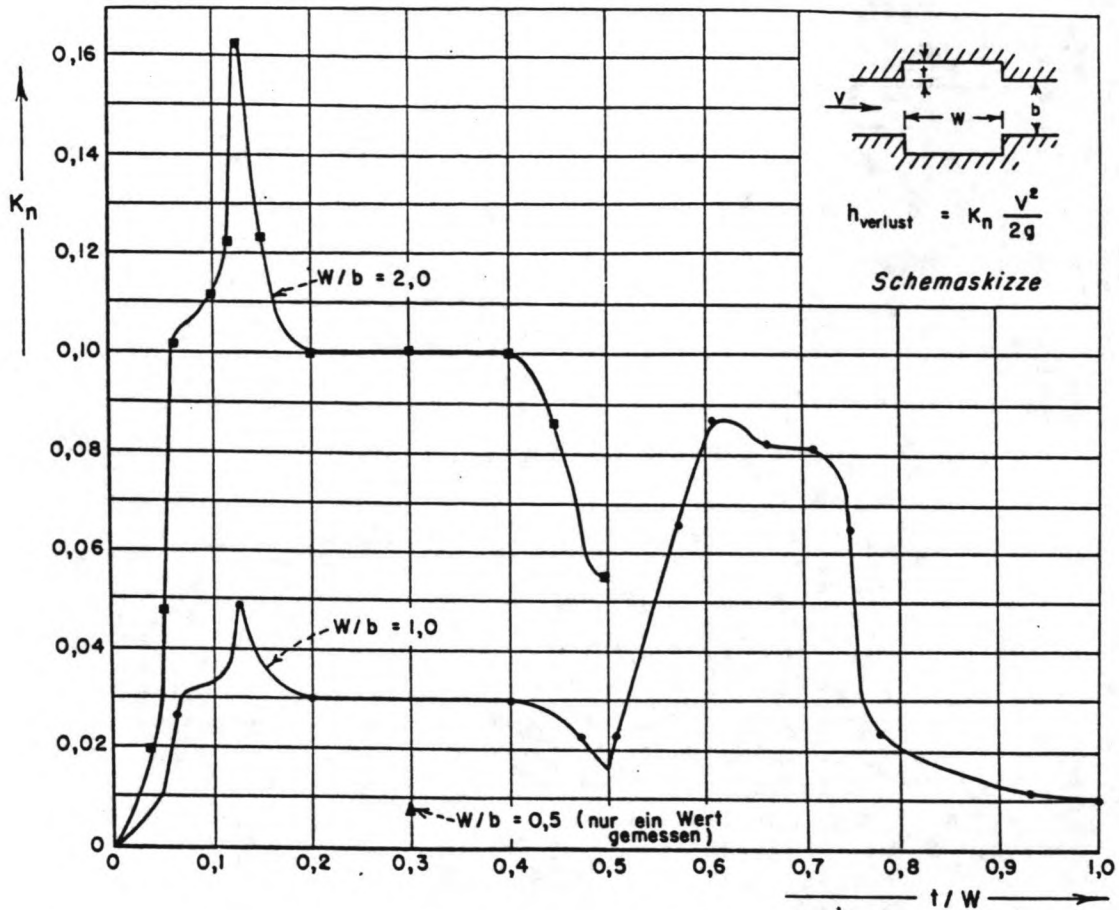


Figuur 16: Stromingspatroon woelbak



Figuur 17: Turbulenties in nissen (bron: Falvey, 1964)

De evenredigheidscoëfficiënt K_n hangt af van de afmetingen van de nissen en de afstanden van de wanden (zie figuur &energi).

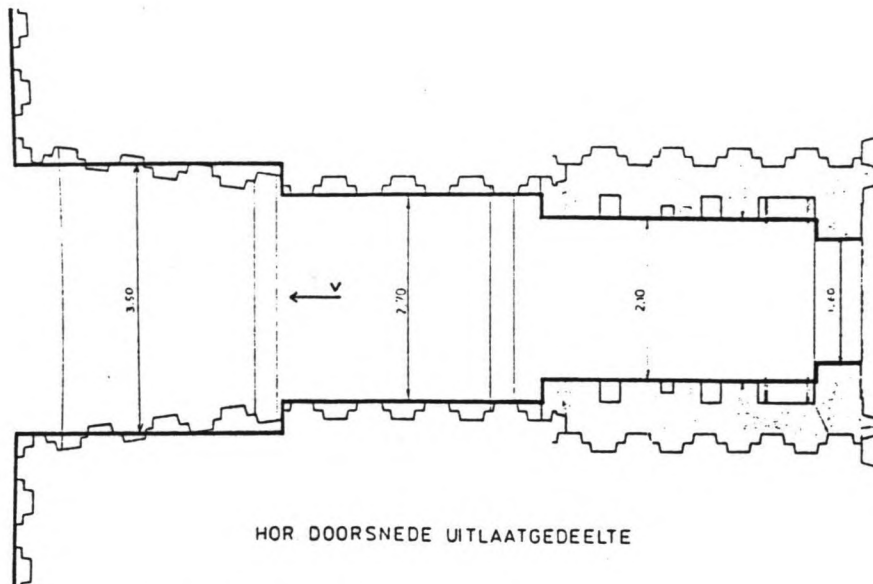


Figuur 18: Energieverliescoëfficiënt voor nissen (bron: Falvey, 1964)

De verhouding w/b uit de figuur is hier ongeveer 0,15. Dit betekent dat het energieverlies voor buisstroming verwaarloosbaar klein is. Hoewel er hier geen sprake is van buisstroming wordt deze conclusie overgenomen voor deze situatie omdat de snelheidshoogte hier maximaal 10 cm zal zijn. De combinatie van een te verwachten lage K_n en een kleine snelheidshoogte maakt deze verwaarlozing aannemelijk.

Berekening van het waterstandsverloop in de uitstroom

De waterstand in de woelbak wordt berekend uit de gemeten waterstand in de Grift. In de vorige paragraaf is uiteengezet dat bij de berekening wordt uitgegaan van vertragsverliezen tussen de verschillende dwarsdoorsnedes. In figuur 19 is te zien hoe de woelbak breder wordt. Deze verbreding kan stapsgewijs worden berekend omdat de lengte van elk segment groter is dan 8 maal de verbreding aan een zijde bovenstrooms van het segment. De stroom kan dan namelijk weer gaan aanliggen aan de wand. Dit aanliggen kan niet letterlijk worden genomen door de nissen in de wanden en de damwandprofielen.



Figuur 19: Verbreding van de woelbak

De uitstroom kan dus geschematiseerd worden tot een aantal segmenten met verschillende breedten en in sommige gevallen verschillende diepten. Er wordt tegen de stroomrichting in gerekend. Dit betekent dat de Grift in feite het eerste segment is. Hierin is de waterstand gemeten. Deze wordt gelijkgesteld aan het energieniveau omdat de snelheidshoogte ten gevolge van het grote dwarsprofiel verwaarloosbaar is.

Door het vertragsingsverlies tussen twee segmenten te berekenen kan uitgaande van het bekende energieniveau in het benedenstroomse segment n het energieniveau in het bovenstroomse segment $n+1$ worden bepaald:

$$H_n = h_{n+1} + \alpha \cdot \frac{u_{n+1}^2}{2g} - \underbrace{\alpha \cdot \frac{(u_n - u_{n+1})^2}{2g}}_{\text{vertragsingsverlies}} \quad 3.3.25.$$

$$h_{n+1} = z_{n+1} + a_{n+1}$$

Na enig omrekenen ontstaat de volgende kwadratische vergelijking voor de waterdiepte a in doorsnede $n+1$:

$$a_{n+1}^2 + (z_{n+1} - H_n - \alpha \cdot \frac{u_n^2}{2g}) \cdot a_{n+1} + \alpha \cdot u_n \cdot \frac{Q}{g \cdot b_{n+1}} = 0 \quad 3.3.26.$$

met:

$z(n+1)$ = bodemniveau t.o.v. N.A.P. in doorsnede $n+1$

$b(n+1)$ = breedte doorsnede $n+1$

Het uitgangspunt was subkritische stroming, dus de grootste

wortel is maatgevend. Met de abc-formule:

$$\begin{aligned} a &= 1 \\ b &= z_{n+1} - H_n - \alpha \cdot \frac{u_n^2}{2g} \\ c &= \alpha \cdot u_n \cdot \frac{Q}{g \cdot b_{n+1}} \end{aligned} \quad 3.3.27.$$

is de waterdiepte a in het bovenstroomse segment dus:

$$a_{n+1} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad 3.3.28.$$

Hiermee kan het energieniveau in doorsnede n+1 worden bepaald, waarna de procedure kan worden herhaald voor het volgende bovenstroomse segment.

De waterstand in het segment met een breedte van 2,10 m geldt als de waterstand in de woelbak die onderdeel uitmaakt van de impulsvergelijking (volgende paragraaf). De impulsvergelijking wordt gebruikt om te onderzoeken of superkritische stroming kan optreden in de koker. Indien blijkt dat sprake is van subkritische stroming wordt nog een berekeningsstap gemaakt om de waterstand in het laatste segment, dit is het einde van de koker, te berekenen. Dit is dan de invoerwaarde voor de stuwkrommeberekening in de koker die moet leiden tot de waterstand achter de schuif.

Het onderscheid tussen sub- en superkritische stroming

In het uiteindelijke model wordt uitgegaan van superkritische stroming in het leidinggedeelte. Het debiet wordt met de superkritische afvoercoëfficiënt bepaald. Met behulp van een stuwkromme berekening wordt vanuit de waterstand achter de schuif de waterstand aan het einde van de koker bepaald.

Conform de vorige paragraaf wordt de waterstand in de woelbak berekend. Er ontstaat een situatie zoals in figuur 20 is weergegeven. Naast de waterdiepten a_1 en a_2 is ook het debiet bekend. Zolang a_1 nu kleiner is dan a_2 is er sprake van superkritische stroming. Zodra a_1 groter is dan a_2 treedt er subkritische stroming op en kan het debiet opnieuw bepaald worden, maar dan met de subkritische afvoercoëfficiënt.

De waarde van a_1 kan worden berekend met de impulsvergelij-

king:

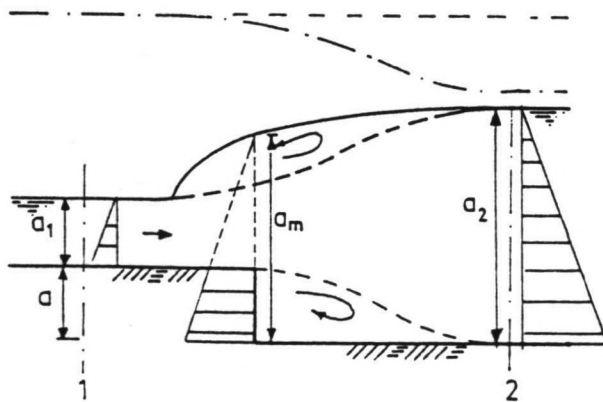
$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot b_1 \cdot a_1^2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot b_2 \cdot a_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot b_2 \cdot (a_m - a)^2 \quad 3.3.29$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot b_2 \cdot a_2^2$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot b_1 \cdot a_1^2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot b_2 \cdot (a_m^2 - (a_m - a)^2) - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot b_2 \cdot g \cdot a_2^2 =$$

$$-\rho \cdot Q \cdot u_1 + \rho \cdot Q \cdot u_2$$

$$a_m = \frac{1}{2a} \cdot \left(a^2 + a_2^2 - \frac{b_1}{b_2} \cdot a_1^2 + \frac{2 \cdot Q}{b_2 \cdot g} \cdot (u_2 - u_1) \right)$$



Figuur 20: Impulsvergelijking woelbak

Hoofdstuk IV

METINGEN

4.1 PERMANENTE MEETOPSTELLING

4.1.1 Meetinstrumenten

De registratie van gegevens (waterstanden, schuifstanden en tijd) leent zich in principe voor een automatische verwerking. Eens per 20 minuten worden alle gegevens vastgelegd op een ter plaatse aanwezig cassettebandje. Dit gebeurt in het hexadecimale stelsel. De volgende gegevens worden vastgelegd:

- dag
- seconde
- schuifstand binnen
- schuifstand buiten
- waterstand Grift (= uitstroom, gemeten met behulp van een vlotter)
- waterstand Rijn binnen (= in constructie, gemeten met behulp van een vlotter)
- waterstand Rijn buiten (= in instroom, gemeten met behulp van een drukopnemer).

De positie van de meetinstrumenten is weergegeven in bijlagen 2.2, 2.3 en 4.5. Het uitlezen van de gegevens op het bandje neemt de provincie in eigen hand zodat vrij snel over de gegevens beschikt kan worden. Het is dus niet mogelijk op deze wijze het debiet te bepalen op het moment van registratie.

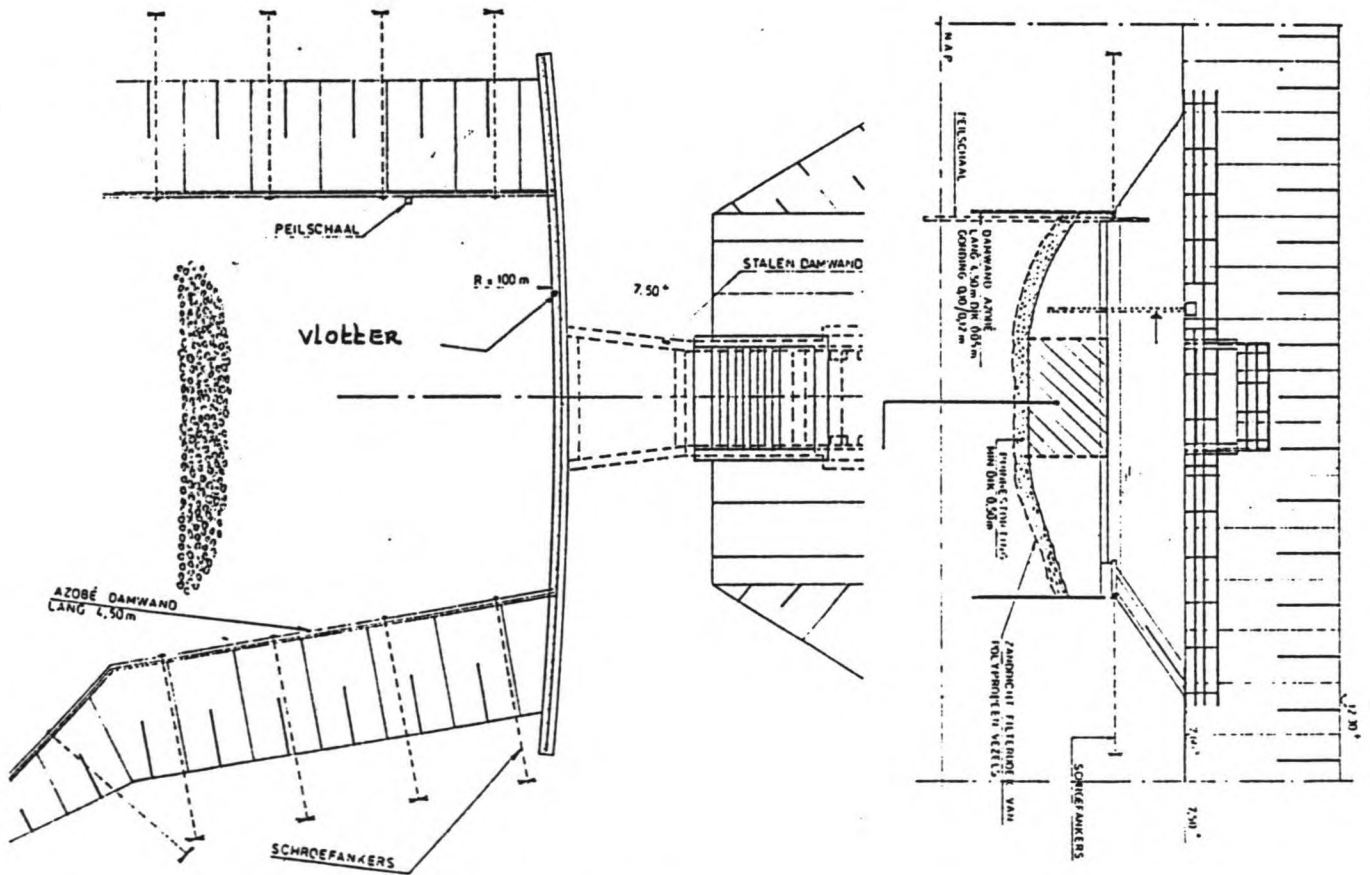
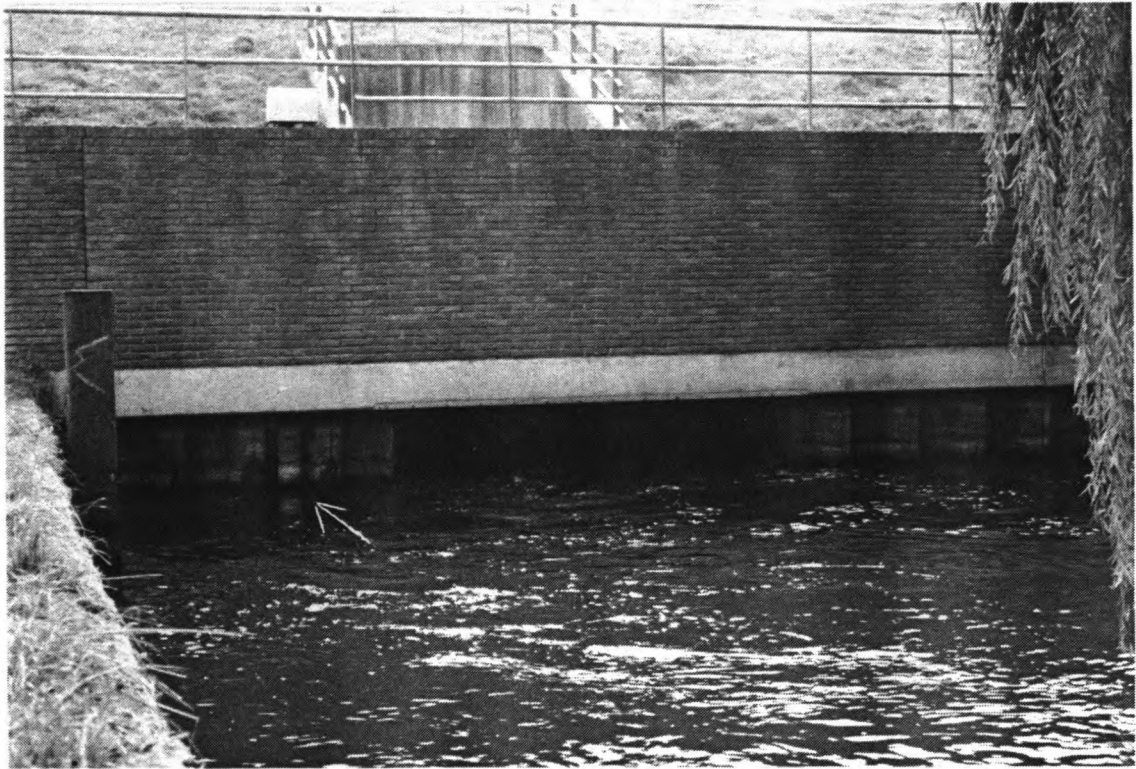
4.1.2 Controlemetingen

Vlotter in de uitstroom

Direct na de uitstroom in het kanaal staat een vlotter opgesteld die de waterstand in het kanaal registreerd (zie figuur 21).

Deze vlotter bevindt zich in een neer. Vooral bij grote debieten is het waterniveau niet constant. Dit bemoeilijkte de controlemetingen van december 1986 met name voor de debieten groter dan 3 m³/s. Als deze controlemetingen worden vergeleken met de metingen op 2,4 en 10 meter achter het inlaatwerk zien we dat deze waarden statistisch gezien gelijk zijn. Op de plaats van de vlotter is dus niets aan te merken.

De controlemetingen toonden aan dat de door de vlotter geregistreerde waterstand afwijkt van de werkelijke water-



Figuur 21: Positie vlotter in de uitstroom

stand. In de situatie zonder stroming moet reeds een nulpuntscorrectie worden aangebracht waaruit geconcludeerd kan worden dat de vlotter verkeerd is afgesteld. Bij het toenemen van het debiet nam de benodigde correctie af. Aannemelijk is dat deze afname afhangt van de snelheidshoogte in de neer. Omdat de maatgevende breedte niet bekend is, is een relatie met $(Q/a)^2$ onderzocht waarbij ter voorkoming van een iteratie voor de a de "door de vlotter geregistreeerde waterdiepte" wordt genomen. Dit resulteert in de volgende relatie:

$$a_w = a_m - 0,01 \cdot (-1,22 \cdot (Q/a_m)^2 + \text{nulpuntscorrectie}) \quad 4.1.1.$$

waarin:

a_w = werkelijke waterdiepte
 a_m = gemeten waterdiepte
 nulpuntscorrectie in m

Deze relatie heeft een standaardafwijking van 1,11 cm voor de debieten kleiner dan $3\text{m}^2/\text{s}$ en 1,94 voor nagenoeg alle meetwaarden. De nulpuntscorrectie is op basis van de controlemetingen bepaald op 9,6 cm. Het verdient aanbeveling deze waarde periodiek te controleren, waarbij aangetekend wordt dat die meting niet zo'n nauwkeurig resultaat oplevert dan de hier uitgevoerde bepaling.

Bijlage 4.1 geeft de meetpunten en de daaruit afgeleide relatie grafisch weer.

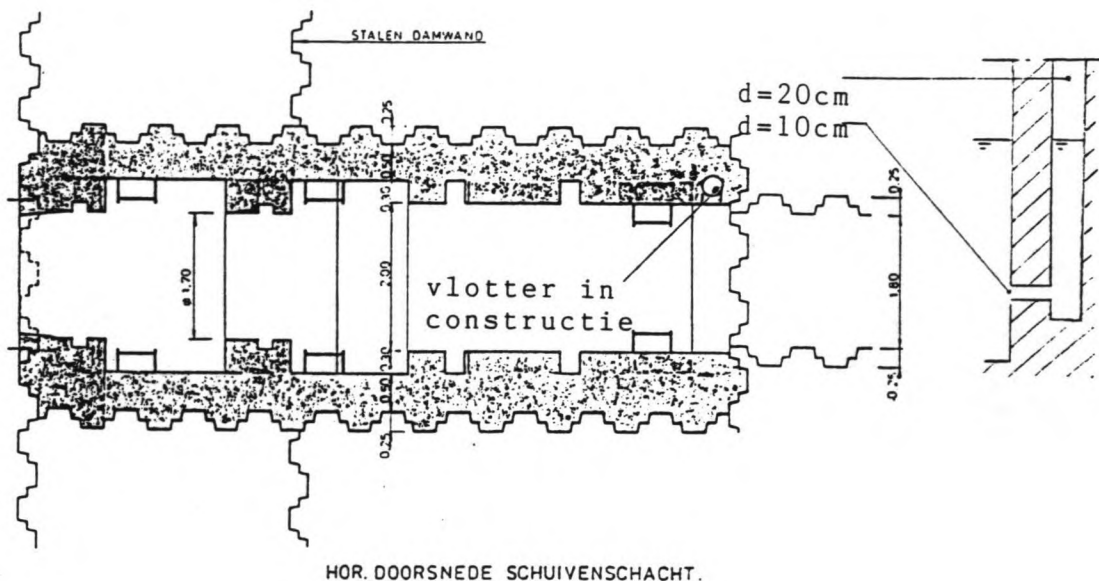
Vlotter in de constructie

In de eerste schacht, gezien vanaf de Rijnzijde, staat een in de wand ingebetonnerde vlotterbuis (zie figuur 22). De controlemetingen (1986) duiden ook hier op een benodigde nulpuntscorrectie, de correctie in de toestand zonder stroming. Ook deze vlotter is dus verkeerd afgesteld. Afwijkingen ten gevolge van stroomsnelheden kunnen worden verwacht: leegzuigen of opstuwung in de buis hangt af van de positie en de vorm van de opening. Uit de meetgegevens wordt duidelijk dat hier sprake is van opstuwung.

Het is zeer waarschijnlijk dat de afwijking van de waterstand in de vlotterbuis ten opzicht van de waterstand in de stroombaan wordt veroorzaakt door een van de stroomsnelheid afhankelijk opstuwung. Deze stroomsnelheid is in feite de snelheid van het water bij de opening. Gezocht is echter naar een verband met de snelheidshoogte $v^2/2g$ waarin v de gemiddelde snelheid is. Dit maakt geen verschil als aangenomen wordt dat er een lineair verband bestaat tussen de gemiddelde snelheid in de dwarsdoorsnede en de plaatselijke snelheid.

De gezochte relatie laat zich op basis van de controlemetingen beschrijven door:

$$a_w = a_m - 0,01 \cdot (92,9 \cdot \frac{u^2}{2g} + \text{nulpuntscorrectie}) \quad 4.1.2.$$



Figuur 22: Vlotter in de constructie

waarin:

aw = werkelijke waterdiepte
 am = gemeten waterdiepte
 nulpuntscorrectie in m

met een standaardafwijking van 1,5 cm. Bijlage 4.2 geeft de meetpunten en de relatie weer. De nulpuntscorrectie bedraagt 8,4 cm. Evenals voor de vlotter in de uitstroom geldt dat deze waarde regelmatig moet worden gecontroleerd.

Ook bij de vlotter in de uitstroom wordt in de correctieformule gerekend met de gemeten waterstand in plaats van de werkelijke: in dit geval bij de berekening van de snelheidshoogte. De fout die hierdoor ontstaat is marginaal.

De drukopnemer

In het toestromingskanaal staat bij de inlaat een drukopnemer. De hiermee gemeten waterstanden worden niet gebruikt bij deze studie (zie paragraaf 3.1). Voor een eventueel gebruik in een later stadium is ook voor de drukopnemer een controlemeting uitgevoerd. Bijlagen 2.2 en 2.3 en figuur 23 tonen de plaats van de drukopnemer.

Omdat het maaiveld hier bij hoge waterstanden onder water staat kan geen vlotter worden geplaatst.

De gemeten waterstand wijkt enkele tientallen centimeters af van de werkelijke. Indien hier een verband wordt gelegd tussen de afwijking en het debiet ontstaat een relatie met een



Figuur 23: Positie drukopnemer

standaardafwijking van 1,9 cm:

$$a_w = a_m + 0,01 \cdot (-0,3 \cdot Q^2 + \text{nulpuntscorrectie}) \quad 4.1.3.$$

waarin:

aw = werkelijke waterdiepte
 am = gemeten waterdiepte
 nulpuntscorrectie in m

Bijlage 4.3 geeft deze relatie grafisch weer. De nulpunts-correctie is bepaald op 36,7 cm. Regelmatige controle hiervan is bij gebruik van met de drukopnemer gemeten gegevens gewenst.

Een wellicht interessant gebruik van de drukopnemer, dat in principe buiten het kader van deze studie valt, is het bepalen van de hoeveelheid vuil voor het rooster. Deze hoeveelheid die een maat is voor de weerstand over het vuilrooster kan worden gerelateerd aan het waterstandsverschil tussen de drukopnemer en de vlotter in de constructie en het debiet. Vanzelfsprekend moeten de gecorrigeerde waarden worden gebruikt. Het debiet zal met behulp van de waterstand moeten worden omgerekend naar de snelheid omdat het weerstandsverlies over het krooshek (vertragingverlies) volgens de gangbare theorieën (Fraanje, 1972) afhankelijk is van de snelheidshoogte. Indien de cassettebandjes frequent worden uitgelezen kan in het computerprogramma een waarschuwing

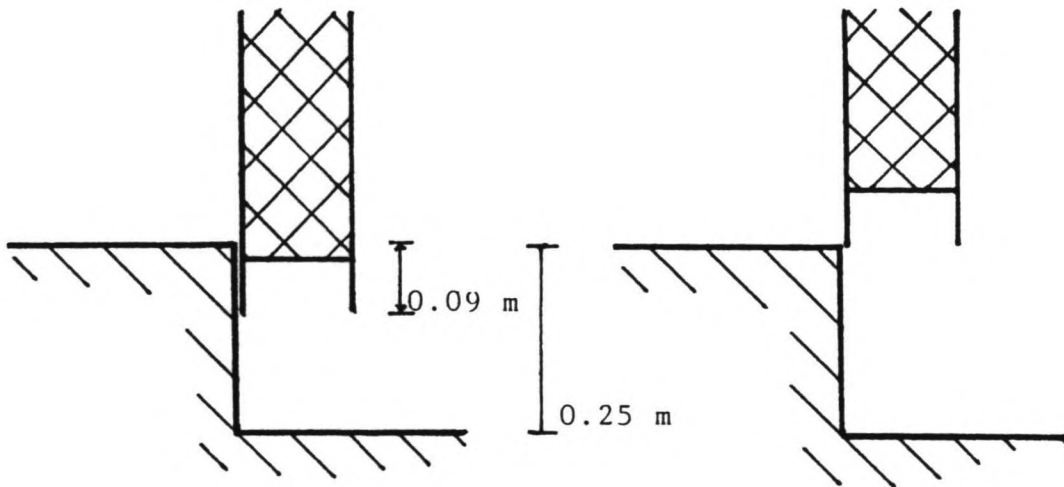
worden ingebouwd voor een ontoelaatbare vuillast. Dit moet dan leiden tot een verwijdering van het vuil. Deze uitbreiding van de software heeft geen zin als op het moment van uitlezen de informatie ouder dan bijvoorbeeld een maand is, omdat dan reeds een maand geleden het vuil had moeten worden verwijderd.

Registratie van de schuifopening

De registratie van de schuifopening moet worden aangepast omdat:

- de nulstand van de registratie niet overeenkomt met de tijdens de metingen bepaalde nulstand,
- het verschil tussen de werkelijke en geregistreerde opening toeneemt bij een groter wordende opening.

De enige methode om de nulstand van de schuif te bepalen is auditief. Door de schuif steeds iets op te trekken is in de koker achter de schuif een duidelijk omslagpunt te horen tussen stilstand en stroming. Deze stilstand is betrekkelijk door de aanwezige lekverliezen. Omdat er sprake is van een duidelijk omslagpunt kan worden geconcludeerd dat de lekverliezen marginaal zijn. Figuur 24 geeft de situatie bij het bepalen van de nulstand weer. Als de schuif wordt opgetrokken maar de onderkant blijft nog onder de drempel, blijft de werkelijke schuifopening nul, terwijl een groter schuifopening wordt geregistreerd.



Figuur 24: Nulstand schuif

Elke tijdens de metingen aangehouden schuifstand is ten opzichte van een "vast punt" nagemeten. Gebleken is dat de

afwijking tussen geregistreeerde en werkelijke nulstand niet als constante afwijking kan worden gebruikt. Dit is uitermate vervelend gezien de invloed van de schuifopening bij de debietbepaling. Een afwijking van 10% betekent een afwijking van bijna 10% in het debiet:

$$Q = C_e \cdot b_{sf} \cdot w \cdot \sqrt{2g \cdot (H_{s2} - h_{k1})} \quad 4.1.4.$$

Geconcludeerd kan worden dat de bepaling van de schuifopening een grote bron van onnauwkeurigheid kan zijn. In deze paragraaf zal een correctie worden bepaald, het verdient echter aanbeveling de mogelijkheden voor een juiste registratie te onderzoeken, desnoods met een bekende constante afwijking.

De correctie wordt bepaald naar aanleiding van de metingen. Tussen de meetpunten wordt een lineair verloop aangenomen, (zie bijlage 4.4). Het resultaat van de linearisering is dan:

geregistreeerd (x)	afwijking (y)
0 - 12 cm	9 cm
12 - 16 cm	9 + (x-12) * 0,25 cm
16 - 30 cm	10 cm
30 - 41 cm	10 + (x-30) * 0,09 cm
> 41 cm	11 + (x-41) * (2/15) cm

De afwijking y moet van de geregistreeerde x worden afgetrokken om de werkelijke schuifopening te krijgen. Gezien het belang van een goede registratie van de schuifopening w is dit geen ideale situatie.

4.2 UITGEVOERDE METINGEN IN 1986

Om een algemeen geldende relatie tussen het debiet en de water- en schuifstanden op te stellen zonder onbekende afhankelijkheden zijn in december 1986 uitgebreide metingen gehouden. Het aantal meetpunten is uitgebreid en er zijn controlemetingen uitgevoerd.

Helaas leverden deze metingen slechts een eenzijdig stromingsbeeld op: superkritische stroming in de koker. Gezien het wezenlijke verschil in benadering bestond behoefte aan meetgegevens van het andere stromingsbeeld: subkritische stroming in de koker. Daarom is voor dit geval teruggegrepen op oudere meetresultaten, die wel afkomstig zijn van subkritische stroming in de koker (zie paragraaf 4.3).

4.2.1 Meetprogramma

Metingen uit vroegere jaren hebben geen bevredigende resultaten opgeleverd omdat:

- a. deze een eenzijdig stromingsbeeld gaven (alleen subkritische stroming in de koker)
- b. de voor een algemene benadering benodigde uitspraken over de grootte van de energieverliezen in de verschillende gedeeltes van het kunstwerk niet af te leiden zijn uit enkel boven- en benedenstroomse waterstandsmetingen
- c. de afwijking van de vlotter in de constructie nooit bepaald is terwijl gebruik van de met deze vlotter gemeten waterstand voordelig blijkt te zijn
- d. de metingen nooit gecontroleerd zijn door een tweede of zondig een derde meting
- e. geen onderzoek is gedaan naar het niet constant zijn van de afvoercoëfficiënten in afvoerformules.

Om met deze studie een onder verschillende omstandigheden betrouwbare relatie te vinden bleek dus extra informatie nodig te zijn over de stroming in de constructie en de betrouwbaarheid van met name de debietmetingen. Het doel van de metingen in december 1986 kan dan ook worden geformuleerd als het leveren van extra informatie door

- zo mogelijk in sub- en superkritische stroming te meten
- op verschillende meetpunten in de constructie te meten
- controlemetingen uit te voeren.

Bij elk van de gekozen schuifstanden zijn twee debietmetingen gedaan. Als de gemeten debieten te veel (meer dan 10%) afweken, is een derde debietmeting uitgevoerd om de onjuiste meting te kunnen onderscheiden. Tegelijkertijd met elke debietmeting zijn waterstandsmetingen uitgevoerd. Een volledige meting nam een half uur in beslag. Dit betekent dat geen momentopnames mogelijk waren.

Door op verschillende punten in de constructie (zie bijlage 4.5 voor de meetpunten) de waterstand te meten kan met behulp van het gemeten debiet het energieniveau worden bepaald in die punten. Zodoende kunnen de energieverliezen tussen de meetpunten worden bepaald waardoor inzicht wordt verkregen in het stromingspatroon. Uit zowel de debietmetin-

gen als de waterstandsmetingen zo dicht mogelijk bij de schuif wordt inzicht verkregen in de afvoercoëfficiënten.

Er is gemeten voor verschillende binnenschuifstanden bij een volledig geopende buitenschuif. Gezien de beschikbare hoeveelheid tijd, de duur van de meting en het geplande aantal metingen per schuif is slechts met een schuif het debiet ingesteld. Omdat normaal gesproken de buitenschuif geheel open staat en het debiet met de binnenste schuif wordt geregeld is gekozen voor regulatie met de binnenschuif.

Een nadeel van de keuze voor de binnenste schuif is dat de waterstanden achter de schuif niet gemeten kunnen worden terwijl in het ander geval in schacht 2 de waterstand wel direct achter de schuif gemeten kan worden. Dit zou een belangrijke extra controlemogelijkheid voor eventuele berekeningen zijn. Omdat er in principe geen noodzaak is een bepaalde schuif te gebruiken voor debietregulatie is het bij eventueel verder onderzoek het overwegen waard om de buitenschuif te gebruiken. Als op basis van dit onderzoek een nauwkeuriger relatie tussen schuif en waterstanden en debiet is te vinden dan met deze studie verdient het aanbeveling de buitenschuif te gaan gebruiken voor debietregulatie. Hoewel de situaties ten dele identiek zijn kunnen de relaties gevonden voor de ene schuif niet zonder meer worden gebruikt voor de andere schuif.

Omdat de waterstand achter de binnenschuif dus niet gemeten kan worden moet deze worden berekend. Voor superkritische stroming kan dit uit het energieniveau voor de schuif onder aanname dat geen energieverliezen optreden onder de schuif. Aan het einde van het leidinggedeelte is de waterstand gemeten zodat het energieverval en dus de ruwheid (als oorzaak van het energieverval) berekend kon worden. De grootte van de ruwheid is op basis van visuele inspectie tevens geschat.

De metingen zijn uitgevoerd conform het meetprogramma. De uitvoering nam 16 mandagen in beslag, exclusief de voorbereidingen. Deze laatste bestonden voornamelijk uit:

- organisatorische werkzaamheden
- het uitzetten van hoogten ten behoeve van de waterstandsmetingen
- het leidinggedeelte controleren op vuil
- het inschatten van de ruwheid van de koker.

4.2.2 Meetinstrumenten

De instrumenten waarmee tijdens de metingen gemeten is, zijn een meetlint met peillood voor de waterstanden en een ottmolen voor de debieten (zie figuur 25).

Het peillood bevatte een "oogje" waarin zich een waterfilmpje vormde bij contact met de waterspiegel. Om met een meetlint waterstanden te kunnen meten zijn ter plaatse van de meetpunten referentiepunten vastgelegd met een bekende hoogte ten opzichte van N.A.P. Deze hoogten zijn met een waterpasinstrument bepaald vanaf een vast punt. Afgezien van schommelingen in de waterstand kon zodoende met een nauwkeurigheid van 0.5 cm worden gemeten.



Figuur 25: Meetinstrumenten

Het debiet wordt bepaald uit gemeten watersnelheden in een bekende dwarsdoorsnede waarin bij benadering sprake is van rechte stroomlijnen. De stroomsnelheden zijn gemeten met een zogenaamde ott-molen. De dwarsdoorsnede met een breedte van 2.97 m is verdeeld in 5 verticalen. In de diepte wordt om de 30 cm gemeten. Zo ontstaat een net van rechthoekjes in de dwarsdoorsnede. Het debiet is nu de sommatie van de producten van de gemeten snelheid en de oppervlakte van een rechthoek.

Doordat met 1 ott-molen op verschillende plaatsen in de dwarsdoorsnede is gemeten, is geen sprake van een momentopname van het debiet. Hetzelfde geldt voor de waterstandsmetingen. Voor een goede meting is dan ook stationaire stroming vereist, hetgeen vraagt om een lange insteltijd van de stroming. Uit tijdsoverwegingen was dit niet te realiseren. In het algemeen zal daardoor de tweede meting bij een schuifstand beter zijn dan de eerste.

4.2.3 Problemen bij de metingen

Krooshek

De metingen moesten twee maal gestaakt worden door een belemmering van de doorstroomopening. Beide keren lag vuil voor het krooshek: een forse boomstam en een schot van ongeveer twee bij drie meter. Deze stukken hout waren te groot om onder het krooshek door te stromen, echter ingewaterd

hout kan in principe onder het krooshek door in de constructie komen en vervolgens een van de schuiven blokkeren. Hiernaast viel het op dat veel smalle planken door het krooshek in de beide schachten terecht waren gekomen. Gezien de lengte van soms enkele meters is het niet denkbeeldig dat ook deze planken sluiting van de schuiven kunnen verhinderen of schade toebrengen aan de constructie.

Deze planken zijn hoogst waarschijnlijk door de mazen van het krooshek gekomen. Het verdient derhalve aanbeveling dit en de ruimte onder het krooshek te wijzigen. De maaswijdte dient verkleint te worden en het krooshek moet doorgetrokken worden tot op de bodem. De weerstandverhoging die dit met zich meebrengt is acceptabel omdat er voldoende verval over de schuiven resteert en omdat dit niet van invloed is op de nauwkeurigheid van de debietbepaling. Daarin is het energieverlies tengevolge van het krooshek namelijk niet opgenomen.

Lekkage

Tijdens de inspectie van de koker viel de lekkage van de binnenste schuif op (zie figuur 26), met name de lekkage vanaf de zijkanten van de schuif.



Figuur 26: Lekkage binnenschuif

Tijdens de metingen viel vanuit de tweede schacht op dat zodra de bovenkant van de schuif onder de waterspiegel kwam,

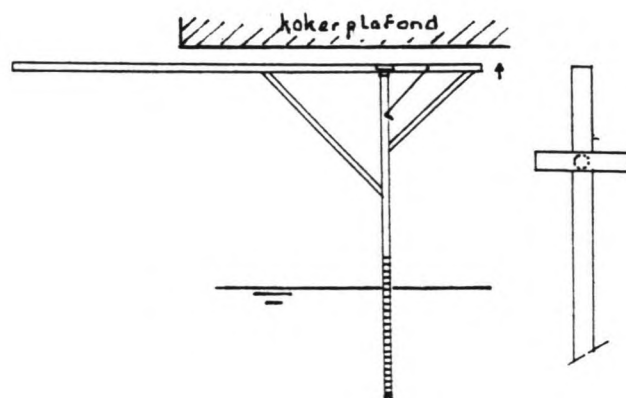
water over de schuif lekte. De invloed van deze lekkage op het debiet is nauwelijks kwantitatief vast te stellen. De lekkage trad ook op bij een geheel gesloten schuif, waardoor in principe sprake is van stroming in de koker. In paragraaf 4.1.2 bleek dat bij het openen van de schuif een duidelijk omslagpunt hoorbaar was van de stromingsloze situatie naar de stromingssituatie. Hieruit kon reeds geconcludeerd worden dat de lekkage marginaal is.

4.2.4 Waterstandsmetingen

Er was sprake van enige deining van de waterspiegel bovengestrooms van de schuif. Dit werd voornamelijk veroorzaakt door de wind die in de lengterichting van het toestromingskanaal stond. Ook kan de scheepvaart op de Nederrijn hier debet aan zijn. Om de invloed hiervan op de resultaten zoveel mogelijk te beperken is een aantal malen kort na elkaar gemeten en daaruit een gemiddelde genomen als waterstand. Toch is de invloed van de deining merkbaar in de resultaten: soms is een gemeten waterstand hoger of lager dan op grond van andere metingen mogelijk is. Dit betekent tevens dat kleine waterstandsverschillen tussen twee punten nauwelijks zijn waar te nemen. Om goede uitspraken ten aanzien van bijvoorbeeld verliescoëfficiënten te doen moet de studie zich richten op grotere verschillen. Het heeft dus geen zin verliescoëfficiënten voor een nis of een drempel uit waterstandmetingen af te leiden.

Dit heeft consequenties voor de uiteindelijke modellering: tussen punten waar weinig verschil in de waterstand of energieverlies optreedt wordt dit verschil of verlies gelijk aan nul gesteld terwijl de verschillen of verliezen geconcentreerd over de andere delen worden aangenomen.

De metingen in de uitstroom worden bemoeilijkt door de aanwezige turbulentie. Aan het einde van de koker is



Figuur 27: Zelfgebouwd meetinstrument

getracht met een zelfgebouwd "meetinstrument", dat tegen het kokerplafond werd geplaatst, (zie figuur 27) een eventuele kromming in de waterspiegel te meten. Er bleek geen

kromming meetbaar, hetgeen in overeenstemming is met de theorie. Er was namelijk sprake van superkritische stroming. Deze meting was slechts globaal en indicatief van karakter.

4.2.5 Debietmetingen

De debietmetingen zijn in principe tweemaal uitgevoerd bij elke schuifstand. Als het resultaat van de tweede meting meer dan 10% afweek van de eerste meting is een derde meting uitgevoerd. Dit kwam alleen voor bij de opening van 15 cm. Voor de opening van 3 cm is, naar achteraf bleek ten onrechte, geen derde meting uitgevoerd. Een meting is viermaal uitgevoerd met het oog op het vaststellen van de instelverschijnselen van de stroming. Door problemen met het krooshek (zie paragraaf 4.2.3) zijn hieruit geen conclusies te trekken.

Als het verschil tussen de metingen die het best overeenstemmen wordt gerelateerd aan de laatst gedane meting ontstaat het volgende beeld:

schuifopening w (m)	procentueel verschil
0,03	21,1
0,06	0,3
0,10	1,5
0,15	6,2
0,20	8,9
0,30	0,6
0,45	0,6
0,60	8,3

Controle van de instroom-debietmeting door gelijktijdige meting aan de uitstroomzijde bleek niet mogelijk doordat de stroming daar zeer turbulent was (zie figuur 28).



Figuur 28: Turbulentie in de uitstroom bij het grootste debiet

4.3 UITGEVOERDE METINGEN IN 1980 EN 1983

Curve-fitting

Om de relatie tussen de gemeten waterstanden en schuifstanden enerzijds en het debiet anderzijds te bepalen zijn vroeger ook al metingen uitgevoerd, namelijk in 1980 en 1983. Deze "oudere" metingen betreffen debietmetingen in combinatie met metingen van de boven- en benedenwaterstand en de schuifopening (zie bijlage 4.5). De interpretatie van de meetresultaten bleef meestal beperkt tot het opstellen van de relatie tussen het debiet en de schuifopening voor een bepaald verschil tussen de boven- en benedenwaterstand. Dit verschil is in een maal gemiddeld over alle meetresultaten en als constante meegenomen in de berekeningen. De gezochte relatie werd bepaald met "curve-fitting". Elke meting leverde echter een andere curve op, hetgeen logisch is, omdat de ligging niet onafhankelijk is van de waterstanden. Deze methode levert dus geen algemeen geldende relatie op.

Na de eerste metingen van het kunstwerk (september 1980) werd reeds geconcludeerd dat:

- a. verschillende metingen nodig zijn voor de bepaling van de gezochte relatie

b. voor de afvoercoëfficiënt C_e in de formule

$$Q = C_e \cdot b_{sf} \cdot w \cdot \sqrt{2g \cdot (h_{bov} - h_{ben})} \quad 4.3.1.$$

waarin:

h_{bov} = waterstand bovenstrooms gemeten

h_{ben} = waterstand benedenstrooms gemeten

zeker geen gemiddelde waarde mag worden aangehouden. Een relatie met waterstanden en schuifstanden zal dus moeten worden bepaald.

Deze laatste aanbeveling wordt in dit rapport uitgewerkt. Er zal blijken dat voor de afvoercoëfficiënt inderdaad geen gemiddelde waarde mag worden aangehouden.

Gebruik metingen bij bepaling subkritische afvoercoëfficiënt.

Voor de bepaling van de "subkritische afvoercoëfficiënt" moet een beroep worden gedaan op de "oude" metingen, omdat bij de metingen uit december 1986, uitgevoerd in het kader van deze studie, geen subkritische stroming in de koker optrad. Deze "oude" metingen waren echter niet zo uitgebreid als de metingen uit december 1986. Zo werden bijvoorbeeld alleen de boven- en benedenwaterstand, de schuifstand en het debiet gemeten. Dit betekent dat de waterstanden vlak voor en vlak achter de schuif (nodig als invoer voor de basisformule) berekend moeten worden uit respectievelijk de boven- en de benedenwaterstand. Dit kan met behulp van de resultaten van de metingen van december 1986. Deze berekening vergroot de onnauwkeurigheid. Voor de bepaling van de waterstand voor de schuif moeten bijvoorbeeld het verval over het krooshek en het energieverlies tussen beide schachten worden geschat, terwijl deze rechtstreeks gemeten hadden kunnen worden.

Ook zijn de debietmetingen van 1980 en 1983 minder betrouwbaar dan de metingen uit 1986. Per schuifstand is namelijk in het algemeen slechts een meting gedaan. Bij een enkele meetserie bleek onder gelijk blijvende omstandigheden het debiet af te nemen voor een grotere schuifopening. Bovendien kende de dwarsdoorsnede in horizontale zin minder meetpunten.

Bij de metingen van 1980 en 1983 is uitgegaan van een constante afwijking in de schuifstandregistratie. Dit is niet gecontroleerd. De meest recente metingen toonden een niet constante, zoals blijkt uit de vorige paragraaf. De destijds gecorrigeerde schuifstanden zullen opnieuw gecorrigeerd moeten worden, als aangenomen wordt dat de afwijking destijds ook niet constant zal zijn geweest.

Het mag duidelijk zijn dat de "subkritische afvoercoëfficiënt" niet zo nauwkeurig kan worden bepaald als de "superkritische afvoercoëfficiënt". Als een grotere nauwkeurigheid gewenst wordt dan op grond van bovenstaande mag worden verwacht, moet men opnieuw metingen organiseren. De benedenwa-

terstand moet dan wel zo hoog zijn dat subkritische stroming
in de koker kan worden verwacht.

Hoofdstuk V

RESULTATENBESCHOUWING METINGEN

5.1 VERLIESCOEFFICIENT VOOR STROMING TUSSEN SCHACHT 1 EN 2

Uit de meetresultaten (zie bijlage 4.5) blijkt dat de waterstand in schacht 1 tijdens alle metingen hoger was dan N.A.P. +5,60 m, het niveau van de betonrand aan de bovenzijde van de opening.

Uit de analyse van de verliezen tussen beide schachten (hoofdstuk 3) bleek dat voor dit geval de verliescoëfficiënt uit de volgende relatie kan worden bepaald:

$$dH = c \cdot Q^2 \quad (3.3.4.) \quad 5.1.1.$$

Het debiet is gemeten. Het energieverlies kan uit de gemeten waterstanden in beide schachten en het gemeten debiet worden bepaald conform paragraaf 3.3.1. De metingen resulteren in een constante $c = 0,0023$ (zie bijlage 5.1) Nu deze waarde bekend is kan de relatie conform de analyse van paragraaf 3.3.1. worden uitgewerkt tot een algemeen geldende relatie. In deze relatie is de waarde van constante c_2 essentieel.

Voor waterstanden in schacht 1 hoger dan de betonrand aan de bovenzijde van de opening (N.A.P. +5,60 m) geldt:

$$dH = c_2 \cdot \frac{Q^2}{(b \cdot a)^2 \cdot 2g} \quad (3.3.7.) \quad 5.1.2$$

met: $a = 1,60$ m (hoogte opening)
 $b = 1,70$ m (breedte opening)

Voor c_2 geldt:

$$\begin{aligned} c_2 &= 122 \cdot c + c_3 \cdot (h_{s1} - 5,60)^2 \\ &= 0,28 + c_3 \cdot (h_{s1} - 5,60)^2 \end{aligned} \quad (3.3.9.) \quad 5.1.3.$$

Tijdens de metingen was de gemiddelde waterstand in schacht 1 N.A.P. +6,00 m. Voor deze waarde moet c_2 gelijk zijn aan de uit de metingen afgeleide c_2 :

$$\begin{aligned} c_2 &= 145 \cdot c \\ &= 0,33 \end{aligned} \quad (3.3.10.) \quad 5.1.4.$$

Dit betekent dat C_3 gelijk is aan 0,33 en dat voor het energieverlies bij een waterstand in schacht 1 hoger dan N.A.P.

+5,60 m geldt:

$$dH = c_2 \cdot \frac{Q^2}{(1,60 \cdot 1,70)^2 \cdot 2g} \quad 5.1.5.$$

$$c_2 = 0,28 + 0,31 \cdot (h_{s1} - 5,60)^2$$

Voor waterstanden in schacht 1 lager dan N.A.P. +5,60 m geldt dan:

$$dH = 0,28 \cdot \frac{Q^2}{(1,70 \cdot a_d)^2 \cdot 2g} \quad 5.1.6.$$

waarin: a_d = waterdiepte boven de drempel

5.2 DE SUPERKRITISCHE AFVOERCOEFFICIENT

5.2.1 De berekening van de afvoercoefficient

Bij de bepaling van de "superkritische" afvoercoefficient is uitgegaan van formule 3.2.2. Deze kan worden herschreven tot:

$$C_e = Q / (b_{sf} \cdot w \cdot \sqrt{2g \cdot ((H_{s2} - z_d) - \mu \cdot w)}) \quad 5.2.1.$$

De afvoercoefficient C_e is nu voor elke meting te berekenen omdat de variabelen Q en w gemeten zijn en de variabele H_{s2} uit de gemeten waterstand h_{s2} en het gemeten debiet te berekenen is.

De berekende afvoercoefficienten (elke meting levert een afvoercoefficient) worden gesommeerd. Vervolgens worden het gemiddelde en de standaardafwijking bepaald. Dit is op twee manieren gedaan:

1. alle berekende afvoercoefficienten zijn ingecalculleerd (=volledig)
2. de sterk afwijkende afvoercoefficienten zijn niet ingecalculleerd (=gereduceerd)

Dit resulteerde in de volgende gemiddelde afvoercoefficienten en standaardafwijkingen:

$C_e = 1,09$; standaardafwijking 0,10 (= 9,3%) -volledig-
 $C_e = 1,07$; standaardafwijking 0,08 (= 7.8%) -gereduceerd-

In het vervolg wordt onderzocht of bepaalde invloeden op de afvoercoefficient in rekening kunnen worden gebracht in de vorm van correctiefactoren. Deze correctiefactoren vermenigvuldigd met de zogenaamde basiswaarde van de afvoercoefficient geven de actuele afvoercoefficient, dit is de in formule 5.2.1. te gebruiken coefficient.

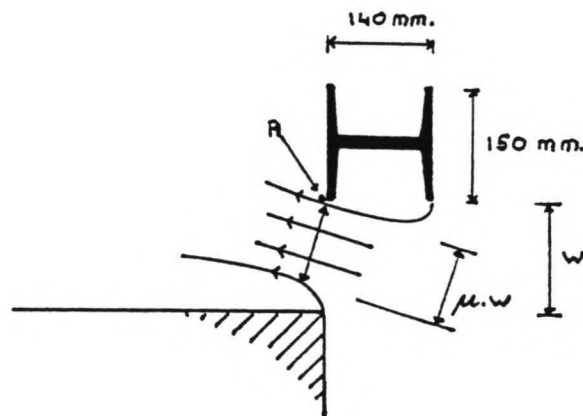
De waarde van de te onderzoeken correctiefactor wordt per meting bepaald en gedeeld op de voor die meting gevonden actuele afvoercoefficient. Dit geeft voor elke meting een basiswaarde. Vervolgens worden uit de sommatie van de basiswaarden het gemiddelde en de standaardafwijking bepaald. Als deze standaardafwijking procentueel kleiner is dan de standaardafwijking van de actuele afvoercoefficient, is de correctie geslaagd. Met computerprogramma's is getracht de verkleining van de standaardafwijking te maximaliseren.

Achtereenvolgens worden correctiefactoren voor de onderdruk (cor_1), voor de verhouding van de waterstand voor de schuif tot de schuifopening (cor_2) en voor de onderdrukcontractie onder de schuif (cor_3) behandeld. Correctiefactor 1 wordt zoals hierboven beschreven onderzocht. Daarna wordt het produkt van correctiefactoren 1 en 2 en het produkt van correctiefactoren 1, 2 en 3 onderzocht. Elke toegevoegde correctiefactor zal de standaardafwijking van de afvoercoefficient, procentueel gezien, blijken te verkleinen.

5.2.2 Correctie van de afvoercoëfficiënt voor onderdruk onder de schuif

Grootte van de onderdruk

De onderzijde van de schuif bestaat uit een I-profiel, zie figuur 30



Figuur 30: Onderdruk onder de schuif

Door de opwaartse component van de snelheid, veroorzaakt door de drempel, raakt de bovenste stroomlijn punt A. Hierdoor ontstaat een afgesloten ruimte onder de schuif waarin zich een onderdruk zal ontwikkelen.

Deze gedachte werd bevestigd door de metingen. Indien het energieniveau onder de schuif werd bepaald als:

$$H_{\text{schuif}} = h_{\text{schuif}} + \alpha \cdot \left(\frac{Q}{\mu \cdot w \cdot b_{\text{sf}}} \right)^2 / 2g \quad 5.2.2.$$

$$h_{\text{schuif}} = z_{\text{bodem}} + w \quad 5.2.3.$$

(dus met maximale opening: $u = 1,0$; b_{sf} = breedte schuif; zelfs met $\alpha = 1,0$) bleek het groter te zijn dan het energieniveau voor de schuif. Dit is fysisch onmogelijk.

De enige mogelijkheid die resteert is een onderdruk p ;

$$H_{\text{schuif}} = h_{\text{schuif}} + \alpha \cdot \left(\frac{Q}{\mu \cdot w \cdot b_{\text{sf}}} \right)^2 / 2g + \frac{p}{\rho \cdot g} \quad 5.2.4.$$

met p negatief. Dan kan worden verklaard dat het energieniveau voor, onder en achter de schuif constant is.

Er zijn twee manieren gebruikt om de onderdruk te beschrijven met als doel de beste te kiezen:

1. afhankelijkheid van de waterstand voor de schuif in combinatie met de schuifstand w (voor verschillende combinaties)
2. afhankelijkheid van de snelheidshoogte onder de schuif.

Beide manieren zijn doorgerekend tot en met de bepaling van de afvoercoëfficiënt. Hierbij bleek de tweede manier veruit de beste resultaten te geven. In het vervolg van dit rapport zal daarom aan de eerste manier geen aandacht meer worden geschonken.

De afhankelijkheid in de tweede methode is lineair verondersteld:

$$\frac{p}{\rho \cdot g} = -c \cdot \left(\frac{Q}{\mu \cdot w \cdot b_{sf}} \right)^2 / 2g \quad 5.2.5.$$

Hiermee wordt het energieniveau onder de schuif:

$$H_{\text{schuif}} = h_{\text{schuif}} + (\alpha - c) \cdot \left(\frac{Q}{\mu \cdot w \cdot b_{sf}} \right)^2 / 2g \quad 5.2.6.$$

De laatste term kan ook worden geschreven als:

$$\left(\frac{Q}{c' \cdot \mu \cdot w \cdot b_{sf}} \right)^2 / 2g \quad \text{met: } (\alpha - c) = \left(\frac{1}{c'} \right)^2 \quad 5.2.7.$$

Door nu gebruik te maken van de vergelijking $H_{\text{schuif}} = H_{s2}$ volgt het produkt $\mu \cdot c'$ als enige onbekende. Dit leverde met $\alpha_{\text{schuif}} = 1,1$ het volgende produkt op:

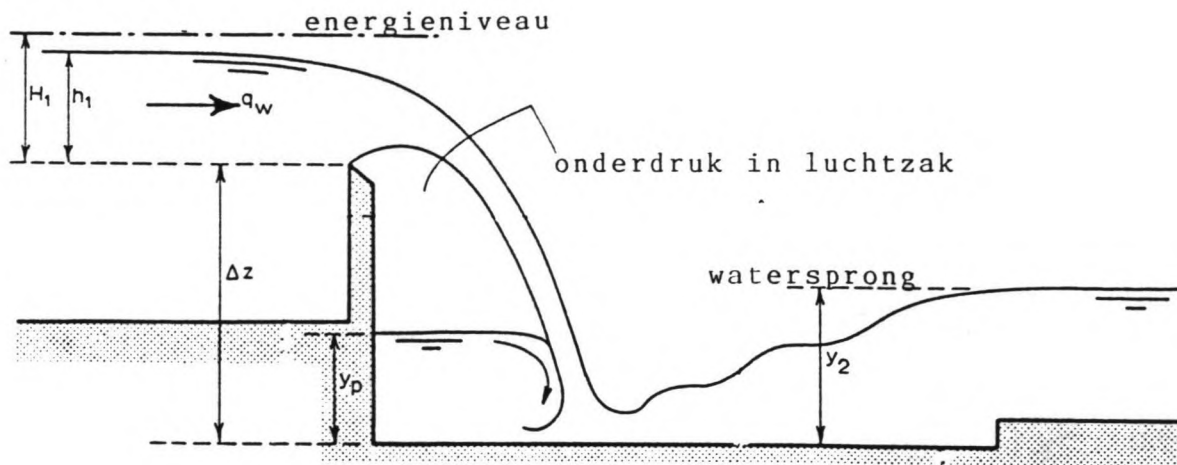
$\mu \cdot c' = 1,106$ met een variantie $0,097$ (= 8,8%) volledig of $0,059$ (= 5,3%) gereduceerd.

Als de contractiecoëfficiënt bekend is kan de onderdruk beschreven worden. Eerder is in in paragraaf 3.2.1. de contractiecoëfficiënt gelijk aan $0,80$ gesteld. Het resultaat is dan:

$$c' = 1,38; c = 0,58$$

Invloed van de onderdruk op de afvoercoëfficiënt

Nu de grootte van de onderdruk bekend is, moet de invloed ervan op de afvoercoëfficiënt worden gekwantificeerd. Een beschrijving van stroming onder een schuif in combinatie met onderdruk is niet in de literatuur gevonden. Blijkbaar is deze combinatie niet gebruikelijk. Daarom is geprobeerd aan de hand van een bekend geval met onderdruk een wetmatigheid te vinden voor de onderdruk onder een schuif. Als bekend geval is een scherpe overlaat genomen (figuur 31).



Figuur 31: Scherpe overlaat

Bij onvoldoende beluchting ontstaat onderdruk in de luchtzak waarvan de lucht wordt verplaatst door het overstortende water. Hierdoor neemt de kromming van de stroomlijnen toe waardoor ook de afvoercoëfficiënt toeneemt. Voor de korte overlaat is de toename in procenten:

$$XQ = 20. \left(\frac{p}{\rho \cdot g \cdot h_1} \right)^{0,92} \quad 5.2.8.$$

waarin $(p/\rho \cdot g)$ de onderdruk in meters is (Bos, 1976). h_1 kan gezien worden als "de aandrijvende energiebron".

In analogie met bovenstaande wordt dezelfde formule voor de toename van de afvoercoëfficiënt toegepast op de stroming onder de schuif. De grootte van de onderdruk is bekend. De vraag is welke waarde voor h_1 , "de aandrijvende energiebron", moet worden gesubstitueerd. In figuur 32 zijn twee mogelijkheden aangegeven.

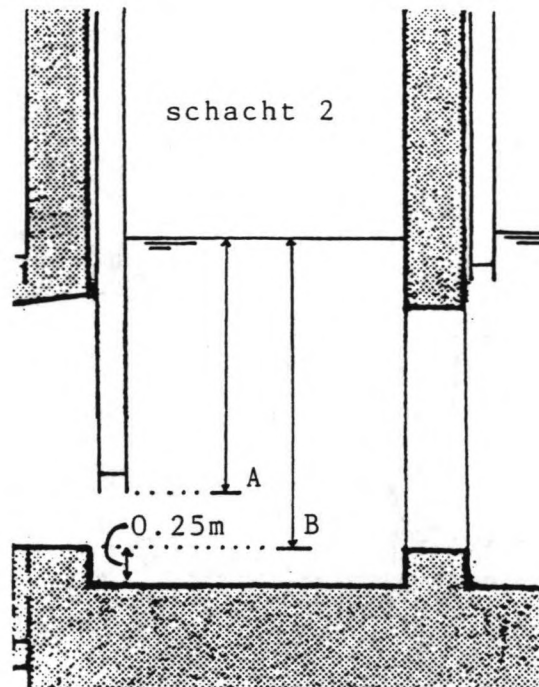
Beide methoden zijn doorgerekend. De beschrijving van h_1 volgens methode A gaf uiteindelijk de kleinste standaardafwijking in de afvoercoëfficiënt.

Hiernaast is nog geëxperimenteerd met de exponent in de formule voor de toename van de afvoercoëfficiënt. Verandering van de waarde 0,92 leverde echter geen verbetering op.

Uit de beschouwingen over de onderdruk onder de schuif resulteert de volgende correctieformule voor de afvoercoëfficiënt waarin met de absolute waarde van de onderdruk wordt gerekend:

$$\frac{p}{\rho \cdot g} = c. \left(\frac{Q}{\mu \cdot w \cdot b_{sf}} \right)^2 / 2g \quad 5.2.9.$$

$$XQ = 0,20. \left[c. \left(\frac{Q}{\mu \cdot w \cdot b_{sf}} \right)^2 / (2g \cdot (h_{s2} - z_d - w)) \right]^{0,92} \quad 5.2.10.$$



Figuur 32: De aandrijvende energiebron

Als C_e de afvoercoëfficiënt zonder correctie en C_e' met correctie voor onderdruk is, dan geldt:

$$C_e' = (1 + XQ) \cdot C_e \quad 5.2.11.$$

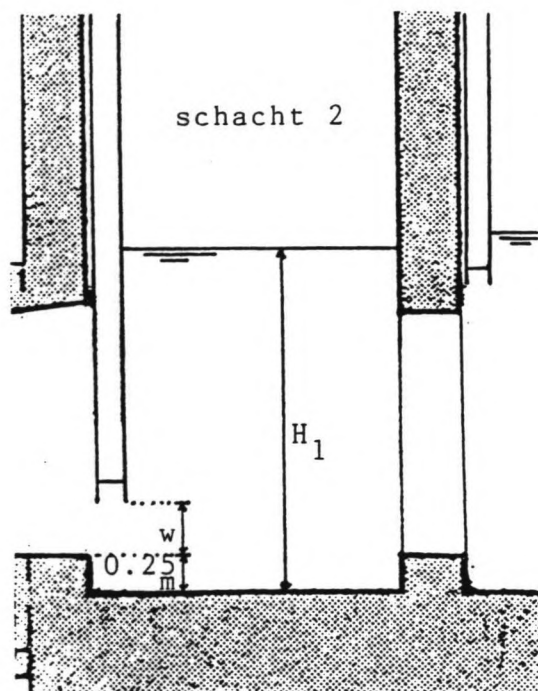
Deze correctie levert een afvoercoëfficiënt op van:

- 0,89; standaardafwijking 0,06 (= 6,8%) -volledig- en
- 0,88; standaardafwijking 0,06 (= 6,1%) -gereduceerd-.

Ten opzichte van het resultaat zonder correctie is dit een verbetering. De percentages voor de standaardafwijking waren respectievelijk 9.3% en 7.8%.

5.2.3 Correctie van de afvoercoëfficiënt voor de verhouding n

De verhouding tussen de waterstand voor de schuif en de schuifopening blijkt van invloed te zijn op de afvoercoëfficiënt (Bos, 1976; blz. 301). De waterstand wordt berekend ten opzichte van de kokerbodem omdat de schuifopening ook ten opzichte van de kokerbodem wordt bepaald (zie figuur 33).



Figuur 33: Situatieschets ten behoeve van berekening n

Voor de factor n geldt dan het volgende:

$$n = \frac{h_{s2} - z_d}{w} \quad 5.2.12.$$

Het aan Bos ontleende figuur 34 geeft het verband tussen n en de afvoercoëfficiënt C_e grafisch weer. In deze paragraaf is de "free discharge" interessant en met name de reductie van de C_e voor kleine waarden van n ten opzichte van een erg grote n.

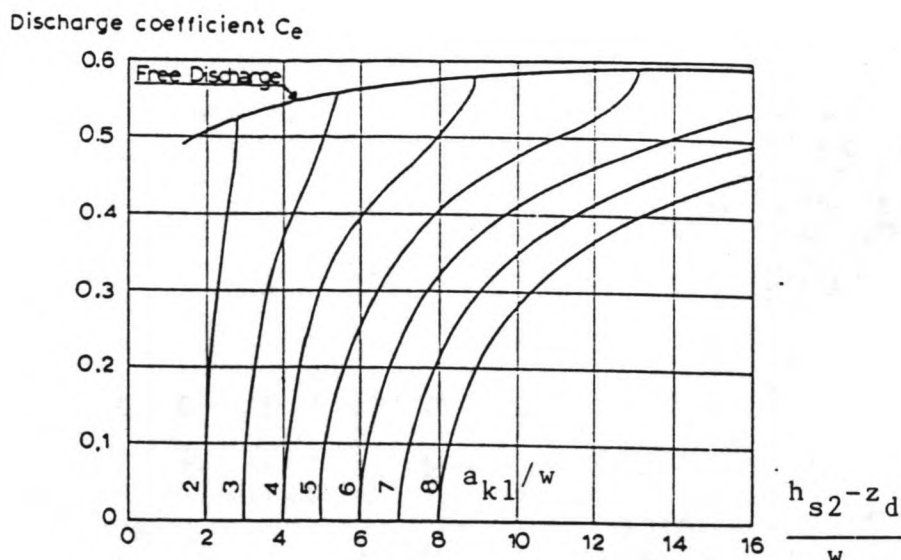
Bos legt deze relatie niet vast in een vergelijking, maar het grafisch weergegeven verband laat zich goed beschrijven door:

$$C_e'' = \left(1 - \frac{0,80}{n^{1,5}}\right) \cdot C_e' \quad 5.2.13.$$

waarin C_e' de waarde voor zeer grote n is, gecorrigeerd voor de onderdruk. C_e'' is dus zowel voor onderdruk als voor n gecorrigeerd. Beide correcties leveren een basiswaarde, waar beide correcties op toegepast moeten worden, op van:

0,93; standaardafwijking 0,04 (4,6%) -volledig-
 0,93; standaardafwijking 0,02 (2,1%) -gereduceerd-

De correctie voor n is dus zinvol omdat de standaardafwijking procentueel gezien wordt teruggebracht, in vergelijking met de situatie zonder correctie voor n. De percentages waren respectievelijk 6,8% en 6,1%.



Figuur 34: Afvoercoëfficiënt in relatie tot n

5.2.4 Correctie van de afvoercoëfficiënt voor de onderdrukte contractie

De onderdruk onder de schuif trekt de stroomlijnen naar de schuif toe. Hierdoor kan de contractie zich onder de schuif niet ontwikkelen. Bos (1976) geeft voor de C_d (die onderdeel uitmaakt van de $C_e (=C_d \cdot C_v)$, waardoor hetzelfde voor de C_e geldt):

$$C_d = 0,61 \cdot (1 + 0,15 \cdot r) \quad 5.2.14.$$

waarin r gelijk is aan het quotiënt van de lengte van de perimeter waar de contractie onderdrukt is en de totale perimeter. Omdat naast de drempel ook de zijwanden contractie tot gevolg hebben geldt.

$$r = \frac{b_{sf}}{2b_{sf} + 2w} \quad 5.2.15.$$

waarin b in dit geval de breedte van de schuifopening is. Dit betekent dat de afvoercoëfficiënt zal toenemen door de onderdrukte contractie. De vraag is of dit verschijnsel niet is inbegrepen bij de correctie voor de onderdruk waar immers uit een sterkere kromming van de stroomlijnen ook een toename van de afvoercoëfficiënt resulteerde. Als antwoord op deze vraag is de correctie uit deze paragraaf toegepast op de gecorrigeerde afvoercoëfficiënten uit de voorgaande paragrafen om te onderzoeken of de nauwkeurigheid nog vergroot kan worden.

Als C_e'' de waarde van de afvoercoëfficiënt is nadat de twee correcties uit de beide vorige paragrafen zijn toegepast, en C_e''' de waarde na bovendien gecorrigeerd te zijn voor de onderdrukte contractie, resulteert voor de C_e waarde (ongecorrigeerd, maar waarop voor gebruik drie correcties moeten worden toegepast):

0,87; standaardafwijking 0,04 (4,6%) -volledig-
 0,87; standaardafwijking 0,02 (1,8%) -gereduceerd-

Alleen voor het gereduceerde geval treedt een lichte verbetering op. De percentages voor de standaardafwijking waren respectievelijk 4,6% en 2,1%. Hoewel het effect van deze correctie niet zo groot is (door de relatie met de correctie voor de onderdruk) wordt deze correctie toch meegenomen gezien zijn eenvoud en toch positieve inbreng.

5.2.5 De afvoercoëfficiënt en de correctieformules

Een belangrijke conclusie uit dit hoofdstuk is dat geen sprake kan zijn van een enkele afvoercoëfficiënt voor superkritische stroming. Dit zou een onnodig grote onnauwkeurigheid met zich meebrengen. In dit hoofdstuk zijn drie afhankelijkheden geïntroduceerd en middels correctiefactoren in rekening gebracht:

- de correctiefactor voor de onderdruk:

$$\text{cor}_1 = 1 + 0,20 \cdot \left[c \cdot \left(\frac{Q}{\mu \cdot w \cdot b_{sf}} \right)^2 / (2g \cdot h_1) \right]^{0,92} \quad 5.2.16.$$

- de correctiefactor voor n:

$$\text{cor}_2 = 1 - 0,80 / \left(\frac{h_s^2 - z_d}{w} \right)^{1,5} \quad 5.2.17.$$

- de correctiefactor voor de onderdrukte contractie:

$$\text{cor}_3 = 1 + 0,15 \cdot \left(\frac{b_{sf}}{2b_{sf} + 2w} \right) \quad 5.2.18.$$

De te corrigeren "basiswaarde" van de afvoercoëfficiënt is 0,87. Hiermee wordt de bruikbare afvoercoëfficiënt:

$$C_e = \text{cor}_1 * \text{cor}_2 * \text{cor}_3 * 0,87$$

5.3 RUWHEID VAN DE KOKER

Bij de afleiding van de basisformules is uitgegaan van stationaire stroming. Hiervoor is een constante benedenwaterstand vereist. Gedurende de metingen bleek de benedenwaterstand constant te zijn voor kleinere debieten, de debieten die onder normale omstandigheden te verwachten zijn. Onder gebruiksomstandigheden is dus voor subkritische stroming een stationaire stuwkrommeberekening mogelijk. Voor de grote debieten tijdens de metingen was de benedenwaterstand niet constant. Omdat in de koker sprake was van superkritische stroming gedurende de metingen van december 1986, was de benedenwaterstand niet van invloed, dus ook de variaties bij de grote debieten niet.

Omdat gedurende de metingen superkritische stroming optrad, wordt de stuwkromme berekend vanaf de schuif in de stroomrichting. De berekende waterstand achter de schuif vormt dan de beginvoorwaarde op $x = 0$. Op $x = L$ geldt dat de met de stuwkromme berekende waterstand gelijk moet zijn aan de gecorrigeerde waterstand bij de overstort, hk_3 .

Als het verschil groter is dan 0,5 cm wordt de k -waarde (ruwheid) aangepast en de berekening herhaald totdat het verschil kleiner is dan 0,5 cm. Als een te grote hk_3 wordt gevonden, wordt de k -waarde verkleind met 0,1 mm en vice versa. Deze iteratieve berekening resulteert in een k -waarde.

De gecorrigeerde waarde van hk_3 levert, in tegenstelling tot de gemeten waarde, een redelijk constante waarde op van de zandruwheid volgens Nikuradse. De gemeten waarde leverde resultaten die een factor 100 of meer verschilden. De nauwkeurigheid waarmee hk_3 is gemeten en vervolgens gecorrigeerd nam af bij toenemend debiet (zie figuur 35) Dit moet worden meegenomen omdat de bepaling van de ruwheid gevoelig blijkt voor dit invoergegeven. Door het rekenproces nu voor drie waarden uit te voeren, te weten een onder- en bovengrens en de gecorrigeerde waarde, ontstaat een interval waarbinnen de zandruwheid volgens Nikuradse moet liggen. De onder- en bovengrens zijn gelijk aan de gecorrigeerde waarde plus of min een maat voor de onnauwkeurigheid. Deze maat is afhankelijk gesteld van de schuifopening (en indirect van het debiet):

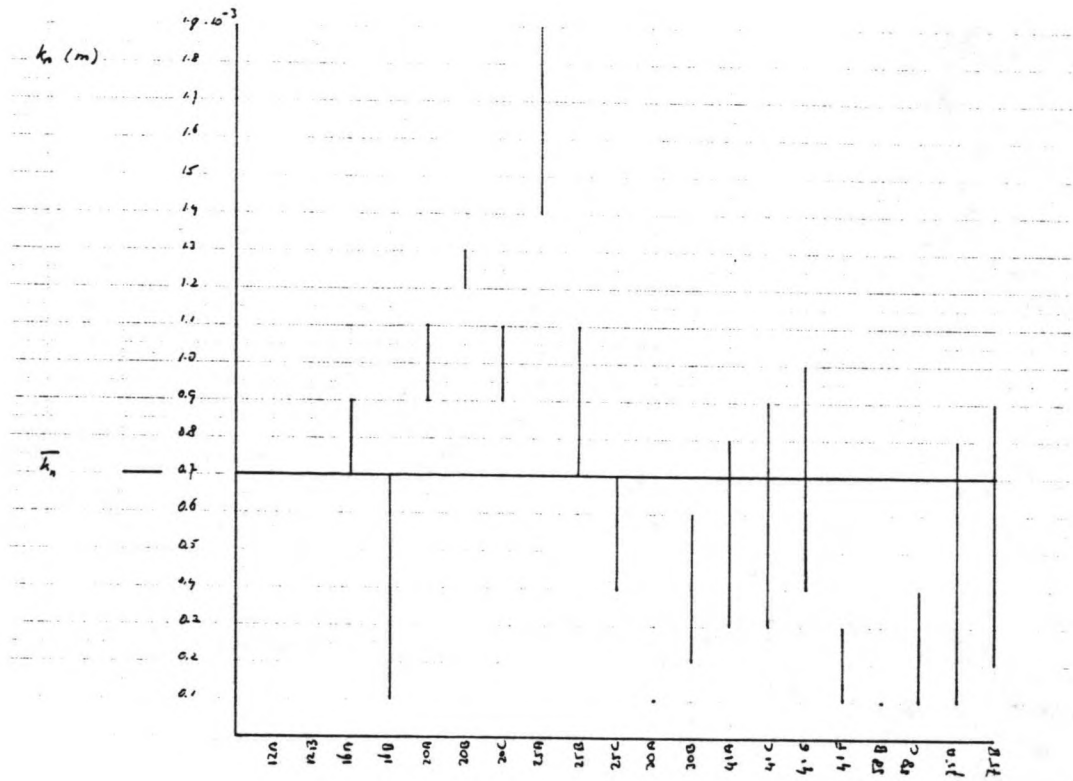
W (m)	maat voor de onnauwkeurigheid (m)
0,03	0,005
0,06	0,005
0,10	0,005
0,15	0,010
0,20	0,015
0,30	0,020
0,45	0,030
0,60	0,040

In figuur 36 zijn de resultaten van de k -waarde berekening weergegeven in de vorm van intervallen per meting. Deze intervallen worden gevormd door de drie berekende k -waarden. De horizontale lijn, die de beste k -waarde representeert, is zodanig gekozen dat de gesommeerde afstand tot de grenzen van de niet gesneden intervallen minimaal is. Dit levert een



Figuur 35: hk3 voor grote debieten

equivalente zandruwheid volgens Nikuradse van 0,7 mm. Inspectie van de koker leidde tot een schatting van 2 mm op basis van de tabel in bijlage 5.2.



Figuur 36: k-waarden

5.4 SUBKRITISCHE AFVOERCOEFFICIENT

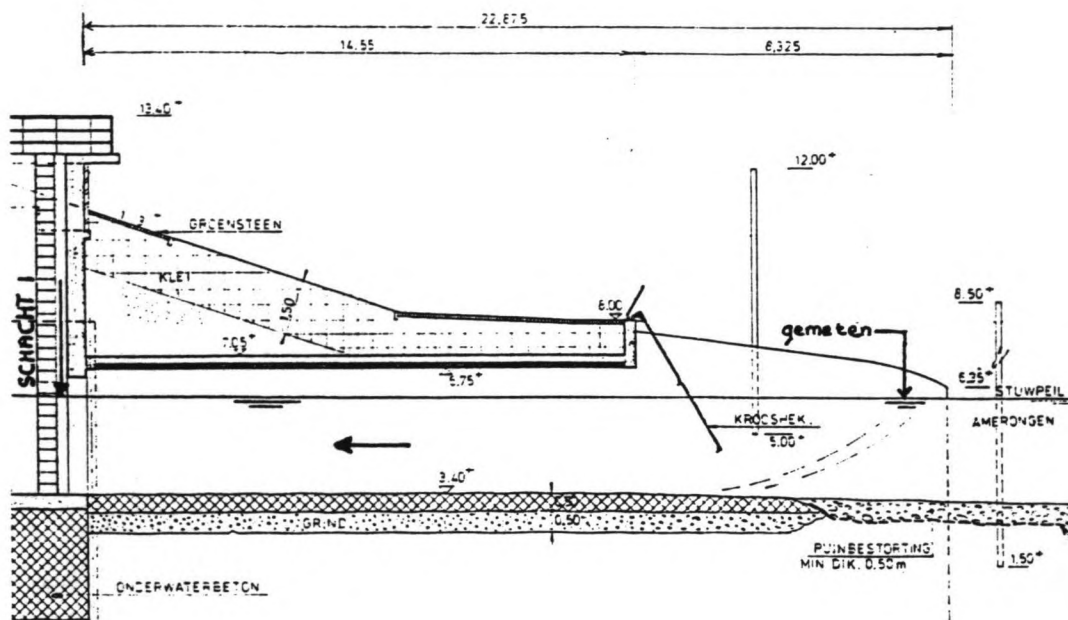
5.4.1 Invoer voor de bepaling van de subkritische afvoercoefficient

De dwarsdoorsnede op de plaats waar de bovenwaterstand wordt gemeten is zo groot dat de snelheidshoogte verwaarloosd mag worden. De gemeten bovenwaterstand is dus gelijk aan het energieniveau. Tussen dit meetpunt en de eerste schacht worden alle energieverliezen verwaarloosd, dus ook de verliezen over het krooshek. Uit de metingen van december 1986 (zie bijlage 4.5) blijkt dat de hiermee geïntroduceerde fout maximaal enkele centimeters bedraagt. Figuur 37 schetst deze situatie.

Uit het nu bekende energieniveau kan de waterstand h_{s1} in schacht 1 worden bepaald door de volgende derdegraads vergelijking in h_{s1} op te lossen:

$$H_{s1} = h_{s1} + \alpha \cdot \left(\frac{Q}{b_{s1} \cdot a_{s1}} \right)^2 / 2g \tag{5.4.1.}$$

Met de in paragraaf 3.3.1. beschreven methode kunnen nu het energieniveau en de waterstand in schacht 2 worden bepaald.



Figuur 37: Situatieschets instroom

Met de in paragraaf 3.3.3. beschreven methode kan vanuit de gemeten benedenwaterstand de waterstand in de woelbak bepaald worden. Omdat de stroming in het leidinggedeelte subkritisch is, kan op dezelfde wijze de waterstand aan het einde van het leidinggedeelte worden bepaald. Met een stuwkromme (zie paragraaf 3.3.2.) kan nu de waterstand achter de schuif worden bepaald.

5.4.2 De gemeten afvoercoëfficiënt

Met de omrekening van de gemeten boven- en benedenwaterstand naar het energieniveau voor en de waterstand achter de schuif zijn alle gegevens bekend om de afvoercoëfficiënt te berekenen. De schuifstand en het debiet waren reeds bekend. De afvoercoëfficiënt wordt bepaald met de formule:

$$C_e = Q / (b_{sf} \cdot w \cdot \sqrt{2g \cdot (H_{s2} - h_{k1})}) \quad 5.4.2.$$

Deze berekening is uitgevoerd voor de eerder genoemde vier meetseries.

Opvallend hierbij was de sterke variatie van de C_e : voor toenemende schuifopeningen (of afnemende verhoudingen h_{s2}/w en h_{k1}/w) neemt C_e af. Bovendien blijkt het "gemiddelde" van de C_e -waarden voor de verschillende meetseries te verschillen.

Er zijn verschillende methoden geprobeerd om deze verschijnselen te beschrijven, echter zonder succes. De afname van C_e blijkt op een zeer pragmatische wijze nog wel in kaart te brengen (zie paragraaf 5.4.3).

Gekozen is voor een bepaling van de afvoercoëfficiënt en correctiefactoren uit de meetseries van 23-6-1983 en 4-7-1983. Deze metingen komen redelijk met elkaar overeen, in tegenstelling tot de metingen van 10-9-1980 en 24-5-1983. Bovendien geven de gekozen meetseries de hoogste afvoercoëfficiënten, waardoor het aannemelijk wordt dat, als zich vuil voor de schuif of voor het rooster bevond (uit de metingen van 1986 bleek dat dit niet zichtbaar hoeft te zijn), het niet bij deze maar bij de meetseries met de lagere afvoercoëfficiënten het geval was.

5.4.3 Correctieformules

Evenals bij superkritische stroming in de koker zal ook voor subkritische stroming in de koker de afvoercoëfficiënt van de schuif afhankelijk zijn van de onderdruk onder de schuif, de onderdrukte contractie en de verhouding tussen de waterstand voor de schuif en de schuifopening. Figuur 34 toont dat deze laatste afhankelijkheid voor een verdronken watersprong achter de schuif anders is dan voor de zogenaamde "free discharge" die voor superkritische stroming geldt. Naast de verhouding tussen de waterstand voor de schuif ($a_2 - a_d$) en de schuifopening w is nu ook de verhouding tussen de waterstand achter de schuif a_{k1} en de schuifopening w van belang. Dit is op drie manieren benaderd.

- Henderson (1966; blz. 208-209) leidt de afhankelijkheid van het debiet af uit de waterstanden voor en achter de schuif en de schuifstand. Hiertoe gaat hij in het gedeelte waar versnelling optreedt uit van behoud van energie. In het gedeelte waar vertraging optreedt past hij de impulsvergelijking toe. Hierbij worden wrijvingsverliezen verwaarloosd. Deze theoretische benadering blijkt de meetresultaten niet te kunnen verklaren (zie bijlage 5.3). Oorzaken hiervan kunnen de optredende onderdruk en de aanwezigheid van een drempel zijn. Om dat te ondervangen is in de vergelijkingen de onderdruk gesubstitueerd nadat deze conform paragraaf 5.2 lineair afhankelijk is gesteld van de snelheid onder de schuif. Ook dit leidt niet tot bevredigende resultaten.
- De in figuur 34 beschreven relatie tussen de afvoercoëfficiënt C_d en de verhoudingen $(a_2 - a_d)/w$ en a_{k1}/w is gebaseerd op experimenten van H.R. Henry. Omdat de C_e lineair afhankelijk is van C_d ($C_e = C_d \cdot C_v$) geldt de relatie ook voor C_e . Getracht is via een wiskundige beschrijving van de lijnen uit de grafiek de procentuele correctie voor C_e te vinden als functie van de genoemde verhoudingen. Dit heeft niet tot bevredigende resultaten geleid. (zie bijlage 5.4).
- De derde manier om te komen tot een correctieformule is zeer pragmatisch. Een aanbeveling is dan ook dat, gezien

de wisselende resultaten, verdergaand onderzoek op dit punt nodig is. Uitgaande van de correctieformules voor de onderdruk en de onderdrukte contractie ten gevolge van onderdruk, zoals deze in paragraaf 5.2 zijn bepaald, geldt als C_e de gemeten afvoercoëfficiënt is:

$$C_e' = C_e / [(1+XQ).(1+0,15.r)] \quad 5.4.3.$$

C_e' blijkt te kunnen worden beschreven als een lineaire functie van $(H_{s2} - H_{k1})/w$:

$$C_e' = 1,05 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{h_{s2} - h_{k1}}{w} \right) + 0,84 \quad 5.4.4.$$

met een variantie van 0,07.

De subkritische afvoercoëfficiënt C_e laat zich voorlopig (inclusief correctieformules) beschrijven door:

$$C_e = (1+XQ).(1+0,15).C_e' \quad 5.4.5.$$

met:

$$XQ = 0,20 \cdot \left[0,58 \cdot \left(\frac{Q}{\mu \cdot w \cdot b_{sf}} \right)^2 / (2g \cdot (H_{s2} - z_d - \mu \cdot w)) \right]^{0,92} \quad 5.4.6.$$

$$r = \frac{b_{sf}}{2b_{sf} + 2w} \quad 5.4.7.$$

Het debiet wordt dan:

$$Q = C_e \cdot b_{sf} \cdot w \cdot \sqrt{2g(H_{s2} - h_{k1})} \quad 5.4.8.$$

Hoofdstuk VI

MODEL VOOR DE AFVOERBEPALING UIT WATERSTANDEN

6.1 MODELBOUW

De hydraulische berekeningen uit de voorgaande hoofdstukken vormen het uitgangspunt voor de modelbouw. Het model moet onder wisselende omstandigheden betrouwbare resultaten geven. Door de constructie niet als "black-box" te beschouwen maar te splitsen in onderdelen waaraan gemeten en gerekend kan worden, is een algemeen geldend model mogelijk geworden. Deze onderdelen zijn veelal niet onafhankelijk, de output van het ene deel is vaak bepalend voor de input van het andere deel.

De rode draad in het model is het te bepalen debiet. Doordat correcties en energieverliezen afhankelijk zijn van het debiet, moet voordat het debiet met een van de afvoerformules berekend kan worden, een debiet worden aangenomen. Met dit aangenomen debiet kan dan de input voor de afvoerformule worden opgesteld. Deze formule zal een debiet opleveren dat al dan niet toelaatbaar afwijkt van het aangenomen debiet. In een iteratief proces zal het aangenomen debiet worden bijgesteld totdat de afwijking tussen het aangenomen en berekend debiet toelaatbaar is.

De input van de afvoerformules (inclusief correctiefactoren) bestaat uit de gecorrigeerde schuifstand, het aangenomen debiet en de waterstand voor de schuif. Bij subkritische stroming komt hier nog de waterstand achter de schuif bij.

De correctie van de geregistreeerde schuifstand staat op zichzelf en is onafhankelijk van het debiet.

Voor de berekening start, wordt zoals gezegd een debiet aangenomen. Dit debiet wordt gedurende de berekening bijgesteld.

De waterstand voor de schuif wordt bepaald uit de correctie van de geregistreeerde waterstand in schacht 1, afhankelijk van het debiet, en de debietafhankelijke vertraging-verliezen tussen beide schachten.

Aan het begin van de berekening wordt altijd uitgegaan van superkritische stroming in de koker. Voor dit geval zijn nu voldoende gegevens beschikbaar om het debiet te berekenen en iteratief het verschil tussen aangenomen en berekend debiet terug te brengen tot een acceptabele grootte. Vervolgens moet worden gecontroleerd of de superkritische stroming zich kan handhaven, bij de waterstand in de woelbak die berekend kan worden uit de geregistreeerde benedenwaterstand, of dat achter de schuif een verdronken watersprong op zal treden. Hiertoe moet eerst de waterstand achter de schuif worden berekend voor superkritische stroming en vervolgens de waterstand aan het einde van de koker. Het "superkritisch bere-

kende debiet" wordt zowel bij de berekening van de waterstand in de woelbak als bij de impulsvergelijking gebruikt, die voor de controle wordt toegepast.

Als door een te hoge benedenwaterstand geen superkritische stroming in de koker op kan treden, moet het debiet worden berekend voor subkritische stroming in de koker. Ook dit is een iteratief proces, alleen uitgebreider. Bij het aangenomen debiet moet nu niet alleen de waterstand voor de schuif, maar ook de waterstand achter de schuif worden berekend. Als blijkt dat het berekende debiet te veel afwijkt van het aangenomen debiet, moeten beide waterstanden opnieuw worden berekend, nu met een bijgestelde aanname voor het debiet.

Met het hierboven omschreven model is het dus mogelijk om het debiet te bepalen op basis van geregistreeerde water- en schuifstanden. Dit model geldt algemeen: super- en subkritische stroming zijn als complementair aangenomen en kunnen beide opgelost worden. Afhankelijkheden van verschillende waterstanden zijn ingecalculeerd evenals afwijkingen in de apparatuur.

6.2 STROOMSCHEMA MODEL

Als tussenstap naar een wiskundige beschrijving van het model wordt een stroomschema ontworpen. Het stroomschema wordt opgebouwd uit zo te noemen bouwstenen en keuzemomenten.

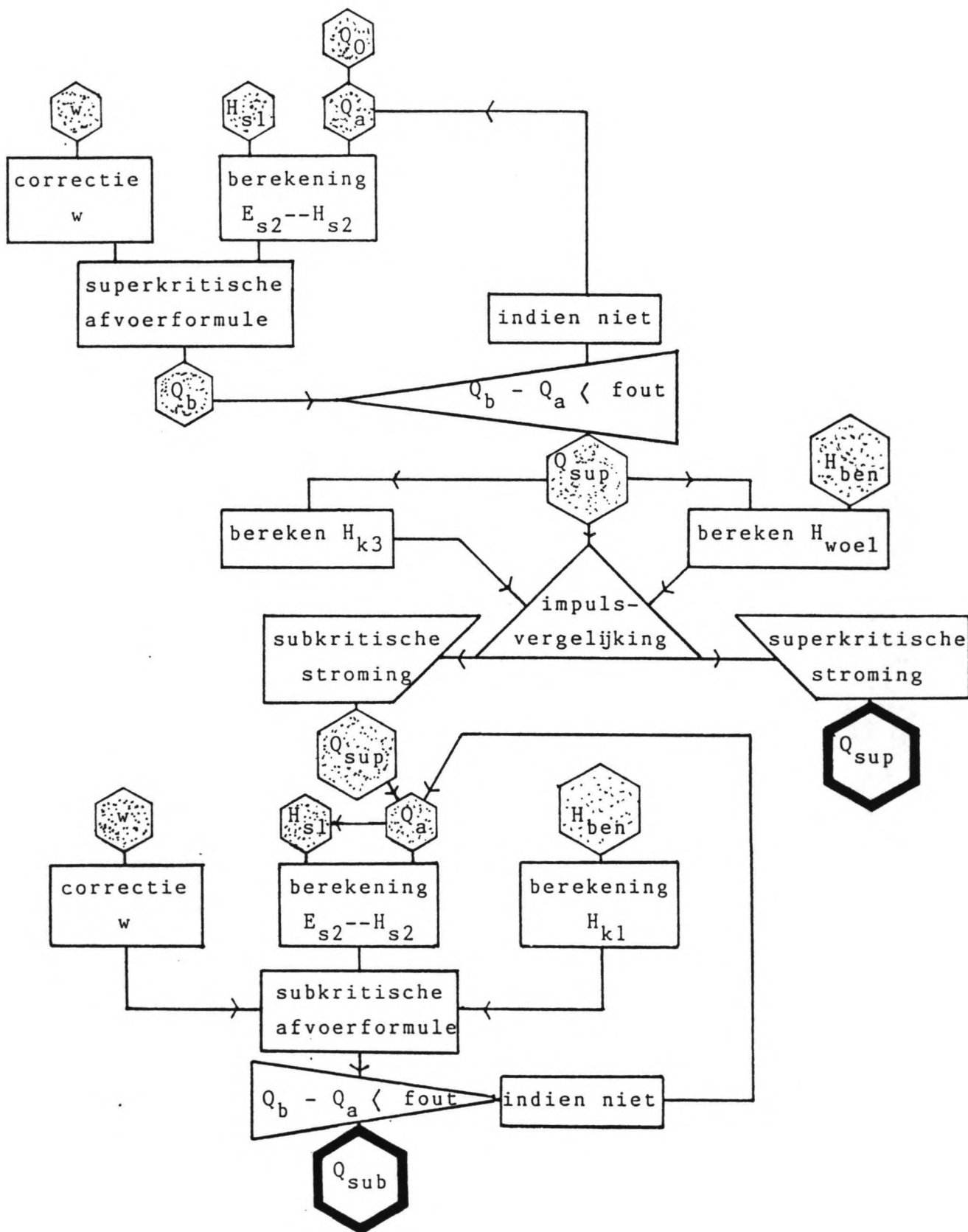
In figuur 38 staat het ontworpen stroomschema. De toelichting hierop is reeds in de vorige paragraaf gegeven. De uitwerking van de bouwstenen en de keuzemomenten wordt in de volgende paragrafen gegeven. In feite bevatten deze paragrafen weinig nieuwe informatie: de resultaten uit de voorgaande hoofdstukken worden samengevat en met elkaar in verband gebracht via een stroomschema.

De bouwstenen, die een specifiek deel van de berekening impliceren, zijn:

- correctie van de geregistreeerde schuifstand
- berekening van het energieniveau en de waterstand in schacht 2
- berekening van de waterstand achter de schuif bij subkritische stroming in de koker
- "superkritische" afvoerformule
- "subkritische" afvoerformule
- berekening van de waterstand aan het einde van de koker bij superkritische stroming
- berekening van de waterstand in de woelbak.

De keuzemomenten die de berekening sturen, zijn:

- iteratief bepalen van het debiet (zowel super- als subkritisch)
- keuze super- of subkritische stroming.



Figuur 38: Stroomschema model

6.3 BOUWSTENEN VOOR HET MODEL

De in deze paragraaf behandelde bouwstenen maken onderdeel uit van het stroomschema uit de vorige paragraaf. De bouwstenen bevatten elk een deel van de berekening die moet leiden tot een waarde voor het debiet. De berekeningsstappen zullen hier beknopt worden weergegeven. Een uitgebreide toelichting staat in de hoofdstukken waarin de berekeningen zijn afgeleid.

Bij de invoer van elke bouwsteen worden alleen de variabelen genoemd. Constanten zoals de afmetingen van de constructie worden op alle momenten beschikbaar verondersteld.

6.3.1 Correctie van de geregistreeerde schuifstand

(invoer: geregistreeerde w)

registratie x (in m)	correctieformule	
x = 0 - 0,12	w = 0,09	m
x = 0,12 - 0,16	w = 0,09 + (x - 0,12) * 0,25	m
x = 0,16 - 0,30	w = 0,10	m
x = 0,30 - 0,41	w = 0,10 + (x - 0,30) * 0,09	m
x = 0,41 -	w = 0,11 + (x - 0,41) * (2/15)	m

6.3.2 Berekening van het energieniveau en de waterstand in schacht 2

(invoer: geregistreeerde h_{s1}, Q, nulpuntscorrectie vlotter in schacht 1)

Bij deze bouwsteen is uitgegaan van een volledig geheven buitenschuif. De nulpuntscorrectie van de vlotter in schacht 1 is bepaald op 8,4 cm maar kan zich wijzigen en wordt daarom als variabele ingevoerd. De geregistreeerde waterstand in schacht 1 moet nu iteratief worden gecorrigeerd, omdat de voor de correctie benodigde waterstand tevens moet worden bepaald:

$$a_m = h_{\text{geregistreeerd}} - z_{\text{bodem,s1}}$$

$$a_w = a_m$$

$$a_{s1} = a_w$$

$$u = (Q / (b_{s1} \cdot a_{s1}))$$

$$y = 0,01 \cdot (92,9 \cdot u^2 / 2g + \text{nulpuntscorrectie})$$

$$a_w = a_m - y$$

als $\text{abs}(a_{s1} - a_w)$ groter dan toelaatbare fout, dan

Het energieniveau in schacht 1 wordt nu:

$$H_{s1} = z_{s1} + a_{s1} + \alpha \cdot (Q / (b_{s1} \cdot a_{s1}))^2 / 2g$$

Nu het energieniveau in schacht 1 bekend is kan het energieniveau in schacht 2 worden bepaald:

Als $h_{s1} \geq \text{N.A.P.} + 5,60 \text{ m}$:

$$dH = (0,28 + 0,31 \cdot (h_{s1} - 5,60)^2) \cdot \frac{Q^2}{(1,60 \cdot 1,70)^2 \cdot 2g}$$

als $h_{s1} < \text{N.A.P.} + 5,60 \text{ m}$:

$$dH = 0,28 \cdot \frac{Q^2}{(1,70 \cdot a_d)^2 \cdot 2g}$$

$$H_{s2} = H_{s1} - dH$$

De waterstand in schacht 2 kan het eenvoudigst iteratief worden bepaald:

$$h_{s2} = H_{s2}$$

$$a_{s2} = h_{s2} - z_{s2}$$

$$\text{zolang } H_{s2} - z_{s2} + a_{s2} + \alpha \cdot (Q / (b_{s2} \cdot a_{s2}))^2 / 2g > 0$$

$$a_{s2} = a_{s2} - 0,01$$

einde

6.3.3 De waterstand achter de schuif bij subkritische afvoer

(invoer: geregistreeerde benedenwaterstand, Q, nulpuntscorrectie vlotter in de uitstroom)

Allereerst moet de door de vlotter geregistreeerde benedenstroomse waterstand worden gecorrigeerd. De nulpuntscorrectie is hier voorlopig 9,63 cm.

$$a_w = a_m - 0,01 \cdot (-1,22 \cdot (Q/a_m)^2 + \text{nulpuntscorrectie}) \quad 4.1.1.$$

Aangenomen wordt dat dit ook het energieniveau is. In de, tegen de stroomrichting in steeds smaller wordende, segmenten wordt gerekend met de index n voor de brede en de index

n+1 voor de smalle doorsnede:

$$H_n = h_{n+1} + \alpha \cdot \frac{u_{n+1}^2}{2g} - \underbrace{\alpha \cdot \frac{(u_n - u_{n+1})^2}{2g}}_{\text{vertragingverlies}} \quad 3.3.25.$$

$$h_{n+1} = z_{n+1} + a_{n+1}$$

$$a = 1 \quad 3.3.27.$$

$$b = z_{n+1} - H_n - \alpha \cdot \frac{u_n^2}{2g}$$

$$c = \alpha \cdot u_n \cdot \frac{Q}{g \cdot b_{n+1}}$$

$$a_{n+1} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad 3.3.28.$$

Dit kan worden herhaald voor volgende versmallingen. Nu de waterstand aan het einde van de koker bekend is kan met behulp van een stuwkrommeberekening en de methode van Heun in 16 stappen de waterstand achter de schuif worden bepaald:

$$\begin{aligned} \text{predictor } a_p &= a_i + dx \cdot f(a_i) \\ \text{corrector } a_c &= a_i + \frac{1}{2} \cdot dx \cdot (f(a_p) + f(a_i)) \end{aligned} \quad 3.3.18.$$

$$a_{i+1} = a_c$$

$$f(a) = \frac{\frac{q^2}{C^2 \cdot a^2 \cdot R}}{1 - \frac{\alpha_2 \cdot q^2}{g \cdot a^3}}$$

De laatst berekende corrector is de benodigde waterstand achter de schuif.

6.3.4 Superkritische afvoerformule

(invoer: Hs2, hs2, gecorrigeerde w, Q)

$$\text{cor}_1 = 1 + 0,20 \cdot \left[c \cdot \left(\frac{Q}{\mu \cdot w \cdot b_{sf}} \right)^2 / (2g \cdot h_1) \right]^{0,92} \quad 5.2.16.$$

$$\text{cor}_2 = 1 - 0,80 / \left(\frac{h_{s2} - z_d}{w} \right)^{1,5} \quad 5.2.17.$$

$$\text{cor}_3 = 1 + 0,15 \cdot \left(\frac{b_{sf}}{2b_{sf} + 2w} \right) \quad 5.2.18.$$

met $C = 0,58$ en $u = 0,80$ is:

$$C_e = \text{cor}_1 * \text{cor}_2 * \text{cor}_3 * 0,87$$

Het debiet wordt dan:

$$Q = C_e \cdot b_{sf} \cdot w \cdot \sqrt{2g \cdot ((H_{s2} - z_d) - \mu \cdot w)} \quad 3.2.2.$$

6.3.5 Subkritische afvoerformule

(invoer: H_{s2} , h_{s2} , h_{k1} , gecorrigeerde w , Q)

$$C_e' = 1,05 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{h_{s2} - h_{k1}}{w} \right) + 0,84 \quad 5.4.4.$$

$$C_e = (1 + XQ) \cdot (1 + 0,15) \cdot C_e' \quad 5.4.5.$$

$$XQ = 0,20 \cdot \left[0,58 \cdot \left(\frac{Q}{\mu \cdot w \cdot b_{sf}} \right)^2 / (2g \cdot (H_{s2} - z_d - \mu \cdot w)) \right]^{0,92} \quad 5.4.6.$$

$$r = \frac{b_{sf}}{2b_{sf} + 2w} \quad 5.4.7.$$

$$Q = C_e \cdot b_{sf} \cdot w \cdot \sqrt{2g(H_{s2} - h_{k1})} \quad 5.4.8.$$

6.3.6 De waterstand aan het eind van de koker bij superkritische afvoer

(invoer: Hs2, Q)

De waterstand aan het einde van de koker kan met een stuwkrommeberekening worden bepaald als de waterstand achter de schuif bekend is. Onder de aanname dat geen energieverlies optreedt onder de schuif geldt:

$$H_{k1} = z_{k1} + a_{k1} + \alpha \cdot (Q / (b_{k1} \cdot a_{k1}))^2 / 2g$$

Deze derdegraads vergelijking is op te lossen met bijvoorbeeld de "regula falsi" (Almering, 1980). Met een stuwkrommeberekening en de methode van Heun kan de waterstand aan het einde van de koker worden bepaald.

$$\begin{aligned} \text{predictor } a_p &= a_i + dx \cdot f(a_i) \\ \text{corrector } a_c &= a_i + \frac{1}{2} \cdot dx \cdot (f(a_p) + f(a_i)) \end{aligned} \quad 3.3.18.$$

$$a_{i+1} = a_c$$

$$f(a) = \frac{\frac{q^2}{C^2 \cdot a^2 \cdot R}}{1 - \frac{\alpha_2 \cdot q^2}{g \cdot a^3}}$$

6.3.7 Berekening van de waterstand in de woelbak

(invoer: geregistreeerde benedenwaterstand, Q, nulpuntcorrectie vlotter in uitstroom)

Door in subparagraaf 3 het rekenproces te onderbreken bij de tussenstap van de berekening van de waterstand in de woelbak verkrijgt men het resultaat dat deze bouwsteen moet leveren.

6.4 KEUZEMOMENTEN IN HET MODEL

6.4.1 Iteratieve bepaling van het debiet

De iteratieve bepaling van het debiet houdt een keuzemoment in: wanneer wordt het iteratieproces beëindigd? Gekozen is voor een acceptabel verschil van 0,01 m³/s tussen het aangenomen en het met de afvoerformules berekende debiet.

6.4.2 Keuze super/subkritische stroming

Het onderzoek naar de bestaansmogelijkheden van superkritische stroming wordt afgesloten met een belangrijke IF-THEN-ELSE statement. Als de superkritische stroming bij het superkritisch berekende debiet niet kan bestaan, volgt een "subkritische berekening".

Als ak3 de waterstand aan het einde van de koker en awoel de waterstand in de woelbak is, beide berekend bij het "superkritische" debiet, dan kan superkritische stroming slechts bestaan als:

$$a^2 + a_2^2 - \frac{b_1}{b_2} \cdot a_1^2 + 2 \cdot Q \cdot (u_2 - u_1) / (b_2 \cdot g) - a_2 < 0 \quad (3.3.29)$$

waarin a het verschil in bodemniveau, b1 de breedte van de koker en b2 de breedte van de woelbak is. Wordt niet aan deze voorwaarde voldaan, dan zal er geen superkritische stroming optreden en moet een "subkritische berekening" worden uitgevoerd. Wordt er wel aan voldaan, dan is het "superkritisch berekende" debiet het werkelijke debiet.

Hoofdstuk VII

CONCLUSIES

De huidige functies van het inlaatwerk Grebbesluis zijn waterinlaat en waterkering. Alleen de waterinlaat komt in dit rapport aan de orde.

Waterinlaat geschiedt op basis van peilbeheer. De huidige registratie-apparatuur voldoet hierbij, mits de meetfouten kunnen worden bepaald door regelmatige controle.

Het debiet wordt alleen gereguleerd met de binnenschuif, de buitenschuif waarborgt de veiligheid in de functie waterkering.

Met de huidige apparatuur is het niet mogelijk direct (online) over de waarde van het debiet te beschikken. Gegevens over debieten kunnen slechts na het uitlezen van een data-cassettebandje, waarop gegevens over water- en schuifstanden staan, worden verkregen. Dit verhindert in principe een vorm van hoeveelhedenbeheer als vervanging van peilbeheer.

Alle waterstandsregistraties moeten worden gecorrigeerd voor een afwijking van de waarneming bij stilstaand water en voor een afwijking ten gevolge van stroming. Deze afwijkingen laten zich beschrijven als een lineaire functie van de snelheidshoogte.

Uit de benodigde snelheidsafhankelijke correcties blijkt dat de situering van de apparatuur niet ideaal is. Gezien de omstandigheden en de mogelijkheid om de correcties te kwantificeren bestaat echter geen behoefte aan verplaatsing van de apparatuur.

De vuillast voor het krooshek is een bron van onnauwkeurigheid. Door uit te gaan van de door de ingebetonnerde vlotter geregistreeerde "bovenwaterstand" is deze onnauwkeurigheid uit te schakelen. De drukopnemer kan dan nog van nut zijn in combinatie met de vlotter in schacht 1 en het berekende debiet als indicatie voor de grootte van de vuillast.

De geregistreeerde schuifopening bevat een moeilijk te beschrijven afwijking. De schuifopening heeft een grote invloed op het debiet. De onnauwkeurigheid in de bepaling van de werkelijke schuifopening werkt dus sterk door in de nauwkeurigheid van de debietbepaling.

Er is sprake van lekverliezen bij de binnenschuif. Deze verliezen zijn echter marginaal.

Het is niet uit te sluiten dat sluiting van de schuiven wordt verhinderd door vuil. De kans dat dit bij beide schuiven tegelijkertijd optreedt is niet groot maar wel aanwezig.

Het is mogelijk om uit de geregistreerde informatie het debiet te bepalen. Een betrouwbaar model hiervoor vraagt om betrouwbare metingen. De metingen in december 1986 voldoen aan deze kwalificatie, de oudere metingen in mindere mate.

De metingen uit december 1986 gaven een eenzijdig beeld, namelijk alleen superkritische stroming in de koker. Er is behoefte aan dergelijke metingen bij subkritische stroming.

De deining bovenstrooms en de turbulenties benedenstrooms bij hogere debieten hebben een negatieve invloed gehad op de nauwkeurigheid van de waterstandsmetingen. Een nauwkeurige bepaling van afvoer- en verliescoëfficiënten was derhalve niet mogelijk. De debietmetingen zijn gecontroleerd, waarbij een acceptabele marge van 10% is aangehouden.

De schatting en de berekening van de ruwheid in de koker kwamen goed overeen: 2 mm.

Voor de afvoercoëfficiënt kan geen gemiddelde worden aangehouden. Er is sprake van twee verschillende afvoercoëfficiënten, voor super- en subkritische stroming achter de schuif. Beide coëfficiënten dienen, afhankelijk van waterstanden, debiet en schuifopening, te worden gecorrigeerd voor de onderdruk, de invloed van de verhouding waterstand/schuifopening en de onderdrukte contractie. Door de beschikbare meetresultaten is de "superkritische" afvoercoëfficiënt nauwkeuriger bepaald dan de "subkritische".

De vorm van de onderkant van de schuif veroorzaakt onderdruk onder de schuif. Deze onderdruk blijkt afhankelijk van de snelheidshoogte onder de schuif. De afvoercoëfficiënt neemt ten gevolge van die onderdruk toe. Deze toename kan afgeleid worden uit een overeenkomstige situatie bij een scherpe overlaat.

De aan het einde van de koker gemeten waterstand moet worden gecorrigeerd voor de afvlakking van de stuwkromme ten gevolge van de overstort.

Het ontworpen model geldt slechts voor debietregulatie met de binnenschuif bij een volledig geopende buitenschuif.

Het ontworpen model voldoet aan het gestelde doel: een algemeen geldend model voor de bepaling van het debiet op basis van de bestaande informatieverzameling.

Hoofdstuk VIII

AANBEVELINGEN

De metingen van december 1986 waren qua resultaten redelijk succesvol. Helaas is slechts gemeten bij superkritische stroming in de koker. Het verdient aanbeveling dergelijke metingen ook te organiseren voor subkritische stroming. Hiervoor moet de benedenwaterstand hoog genoeg zijn. De meetresultaten voor subkritische stroming lieten qua hoeveelheid en nauwkeurigheid te wensen over.

Uitgangspunt voor dit onderzoek was een debietregulatie met de binnenschuif. Het is te overwegen bij volgende metingen de buitenste schuif te gebruiken. Het voordeel hiervan is dat een indicatie van de waterstand achter de schuif kan worden verkregen. Dergelijke metingen worden echter pas zinvol als onder normale omstandigheden ook wordt overgegaan tot het gebruik van de buitenste schuif.

Het verdient aanbeveling het krooshek door te trekken tot op de bodem en de maaswijdte te verkleinen. Hiermee wordt voorkomen dat groot vuil in de constructie komt. Vuil in de constructie kan leiden tot beschadiging, verstopping en belemmering van de schuifafsluiting.

Het verdient aanbeveling te onderzoeken in hoeverre de lekkage van de schuiven structureel of een onderhoudskwestie is. Met andere woorden: kan de lekkage meer dan marginaal worden?

Het verdient aanbeveling periodiek de nulstandscorrecties (bij stilstaand water) van de meetapparatuur te controleren. De gewenste periode hangt af van de snelheid van verandering, deze is nog niet bekend.

De afwijking in de schuifstand-registratie dient nauwkeuriger in beeld te worden gebracht, omdat de schuifstand sterk bepalend is voor het debiet. Deze afwijking kan eenvoudig met het meetlint worden bepaald.

Het plaatsen van een I-profiel onder een schuif is af te raden, tenzij men bij een bepaalde schuifstand het maximaal mogelijke debiet wenst. De onderdruk die ontstaat vergroot het debiet. Indien via een afvoerformule het debiet moet worden bepaald, veroorzaakt de onderdruk (het I-profiel) een extra onnauwkeurigheid. Bovendien worden extra krachten in de schuif opgewekt.

De nauwkeurigheid van het ontworpen model zou vergroot kunnen worden door een aanpassing van de vorm van de onderzijde van de schuif. Zo'n aanpassing impliceert wel een nieuwe

serie metingen. De onderdruk wordt voorkomen indien de holle ruimte onder de schuif wordt vermeden, bij voorkeur door de oplossing in figuur 39



Figuur 39: Aanpassing onderkant schuif

Deze oplossing is eenvoudig aan te brengen. Het ontworpen model moet dan op basis van nieuwe metingen worden aangepast.

Een nauwkeuriger relatie kan wellicht ook worden verkregen door laboratorium-onderzoek. Dit is echter een arbeids- (en kapitaal-)intensieve methode.

Het ontworpen model dient vertaald te worden in software. Het verdient aanbeveling deze software in een groter software-pakket op te nemen, waarmee na uitlezen van de cassettebandjes direct over de gewenste informatie kan worden beschikt.

Hoofdstuk IX

LIJST VAN SYMBOLEN

In dit hoofdstuk vindt u de meest algemene symbolen en indices. Specifieke symbolen en indices worden verklaard op de plaats waar ze worden gebruikt.

		eenheid
a	waterdiepte	m
b	breedte	m
c	constante	-
C	Chezy-waarde	m ^{0,5} /s
Cd	afvoercoëfficiënt	-
Ce	afvoercoëfficiënt	-
cor1	correctiefactor voor de onderdruk	-
cor2	correctiefactor voor de n	-
cor3	correctiefactor voor de onderdrukte contractie	-
g	versnelling zwaartekracht	m/s ²
h	waterstand t.o.v. N.A.P.	m
H	energiehoogte t.o.v. N.A.P.	m
i	verhang (energie of waterspiegel)	-
kn	equivalente zandruwheid volgens Nikuradse	m
L	lengte	m
n	verhouding waterstand/schuifopening	-
p	druk	kg/m.s ²
q	afvoer (debiet) per breedte-eenheid	m ² /s
Q	afvoer (debiet)	m ³ /s
R	hydraulische straal	m
u	stroomsnelheid	m/s
w	schuifopening	m
z	bodemniveau t.o.v. N.A.P.	m
α	correctiefactor voor energie	-
μ	contractiecoëfficiënt	-
ρ	dichtheid water	kg/m ³

indices

bov bovenstrooms
ben benedenstrooms
i instroom
k1 koker 1e doorsnede (direct na de schuif)
k2 koker 2e doorsnede (na schuif)
k3 koker 3e doorsnede (overstort)
sf schuif
s1 schacht 1
s2 schacht 2
u uitstroom
woel woelbak

Zie bijlage 2.2 en 2.3 voor plaatsaanduiding doorsneden.

Hoofdstuk X

REFERENTIES

Almering, J.H.J., Analyse (deel 1 en 2), 3e druk, Delft, 1980.

Bos, M.G. Discharge Measurement Structures, Wageningen, 1976.

Laboratorium voor hydraulica en afvoerhydrologie. Rapport 4 van "The working group on small hydraulic structures".

Chow, Ven te, Open-channel hydraulics, New York, 1959.

Falvey, H.Th., Energieverluster und stromungsvergange bei Nischen, Karlsruhe, 1964.

Fraanje, M.J., Vloeistofmechanica (deel 2), Amsterdam, 1972.

Henderson, F.M., Open-channel flow, New York, 1966.

Merchant, M.J., Fortran-77. Language and style, Belmont, California, 1981.

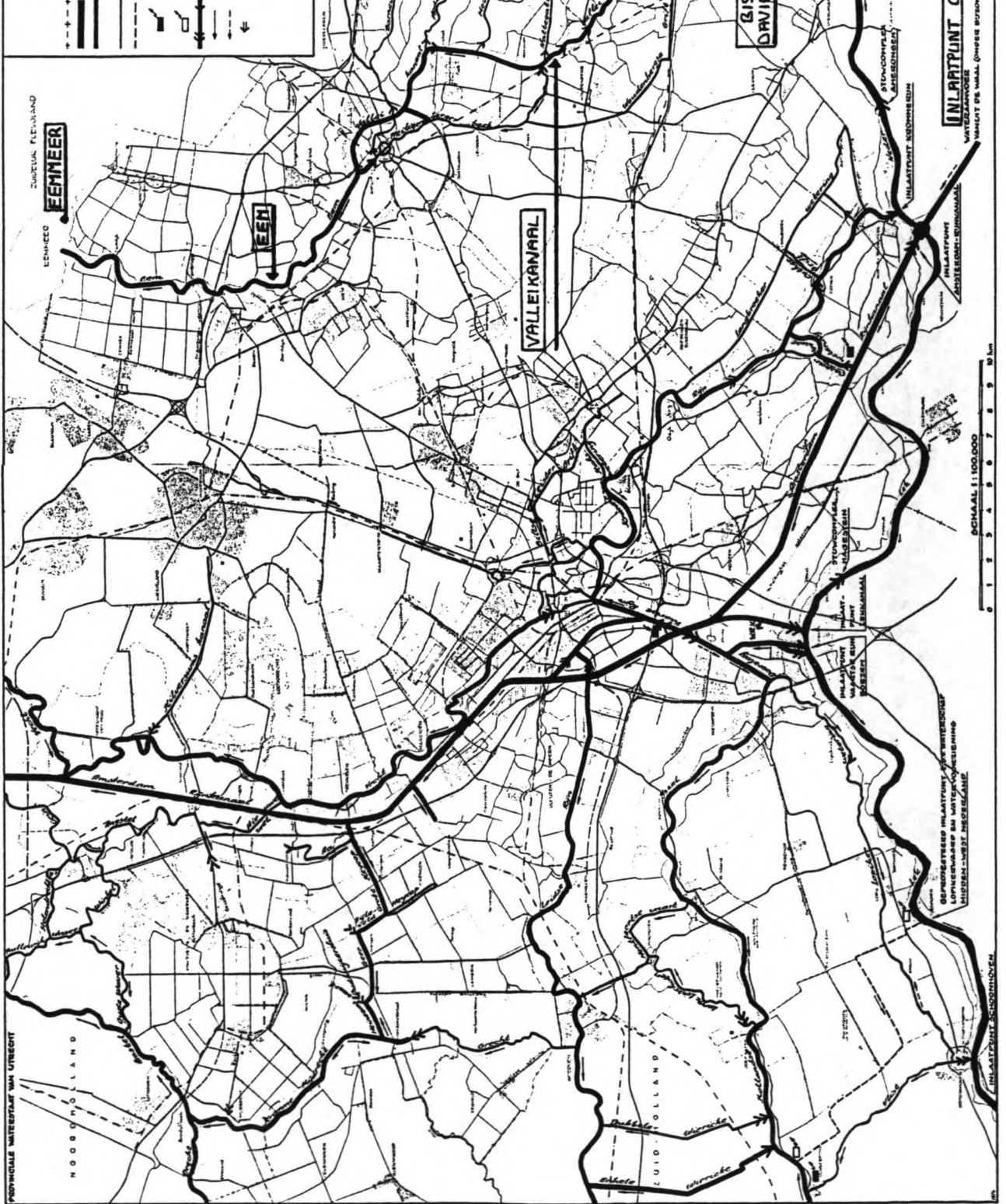
Soest, J. van, Elementaire statistiek, 6e druk, Delft, 1981.

Vries, M. de, Inleiding vloeistofmechanica (handleiding college b71), Delft, 1981.

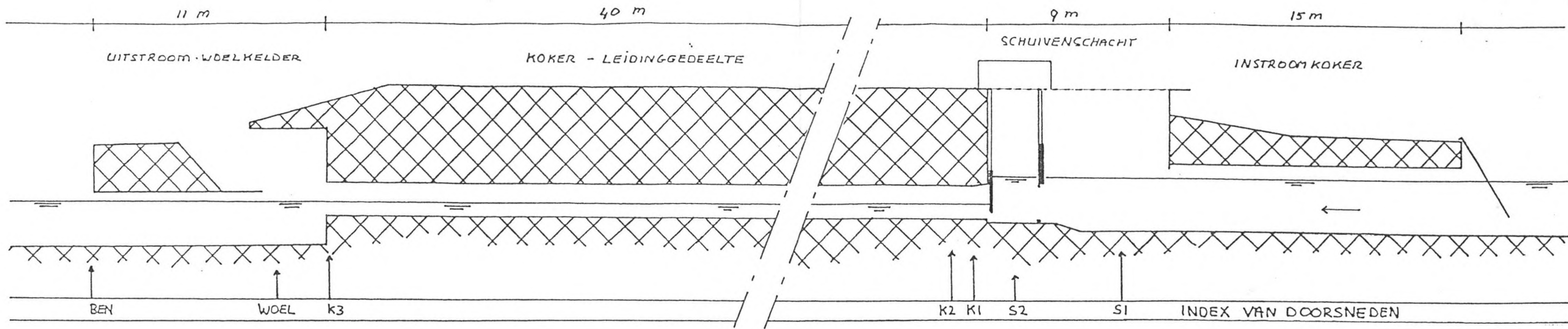
2.1 kaart van de provincie Utrecht

PROVINCIE UTRECHT
LEGENDA WATERAANVOER

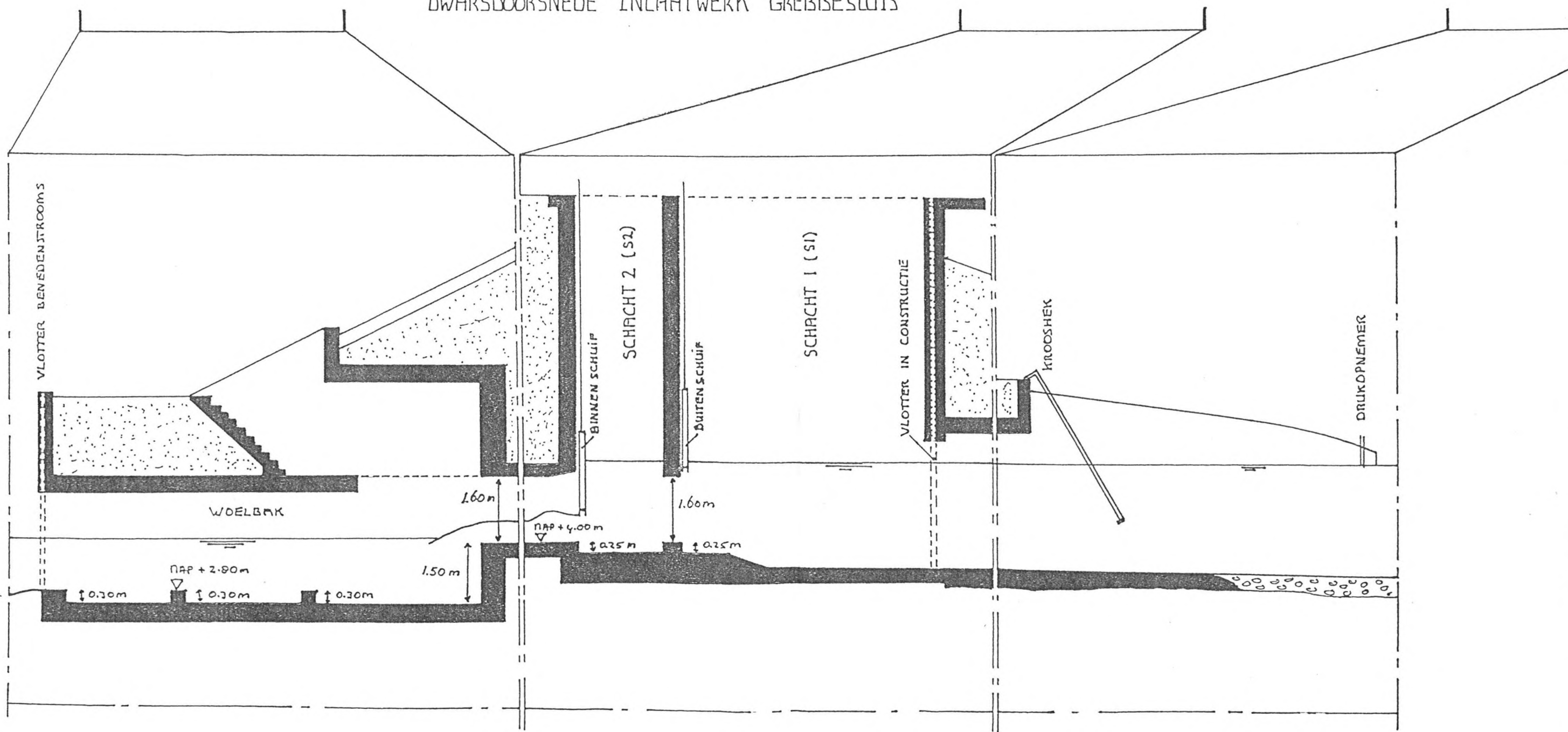
PROVINCIEGRANS
 PRIMAIRE WATERVEEGH
 ZEGUNDAIRE WATERVEEGH; WATERVEEGH VAN BELANG VOOR DE WATERDROEVING
 ANDERE (HOOPE BELANGRIJKE) WATERVEEGH
 GEFORDETERDE WATERAANVOERLID
 GODE DE LONINGEN
 GEHALEN VAN BELANG VOOR DE WATERDROEVING EN DE WATERDROEVING
 WERK GEFORDETERDE
 OLIZEN; STON; INLAATKUNSTVEEK
 DROEDRICHTING; WATERAANVOER
 DROEDRICHTING; ALTERNATIEVE WATERAANVOER
 WATERVOORZIENING EEN-KENNENDELIJND



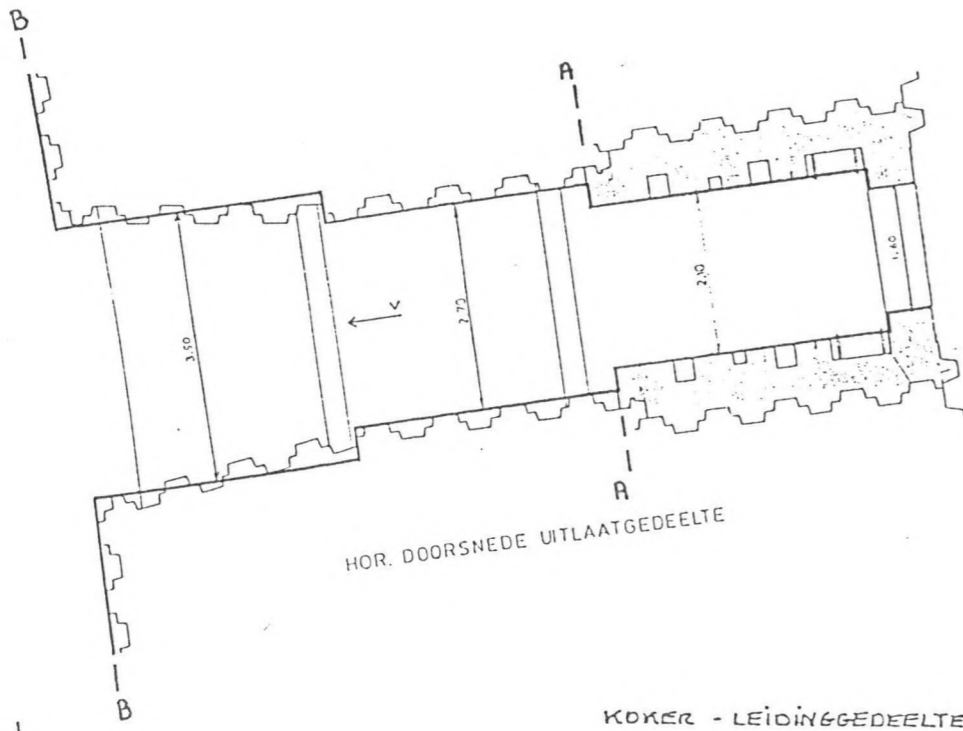
2.2 dwarsdoorsnede inlaatwerk Grebbesluis



DWARSDOORSNEDE INLAATWERK GREBBESLUIS



2.3 horizontale doorsnede inlaatwerk Grebbesluis



HORIZONTALA DOORSNEDE
INLAATWERK GREBBESLUIS

KOKER - LEIDINGGEDEELTE

VLOTTER IN DE CONSTRUCTIE

SCHUIVENSCHACHT

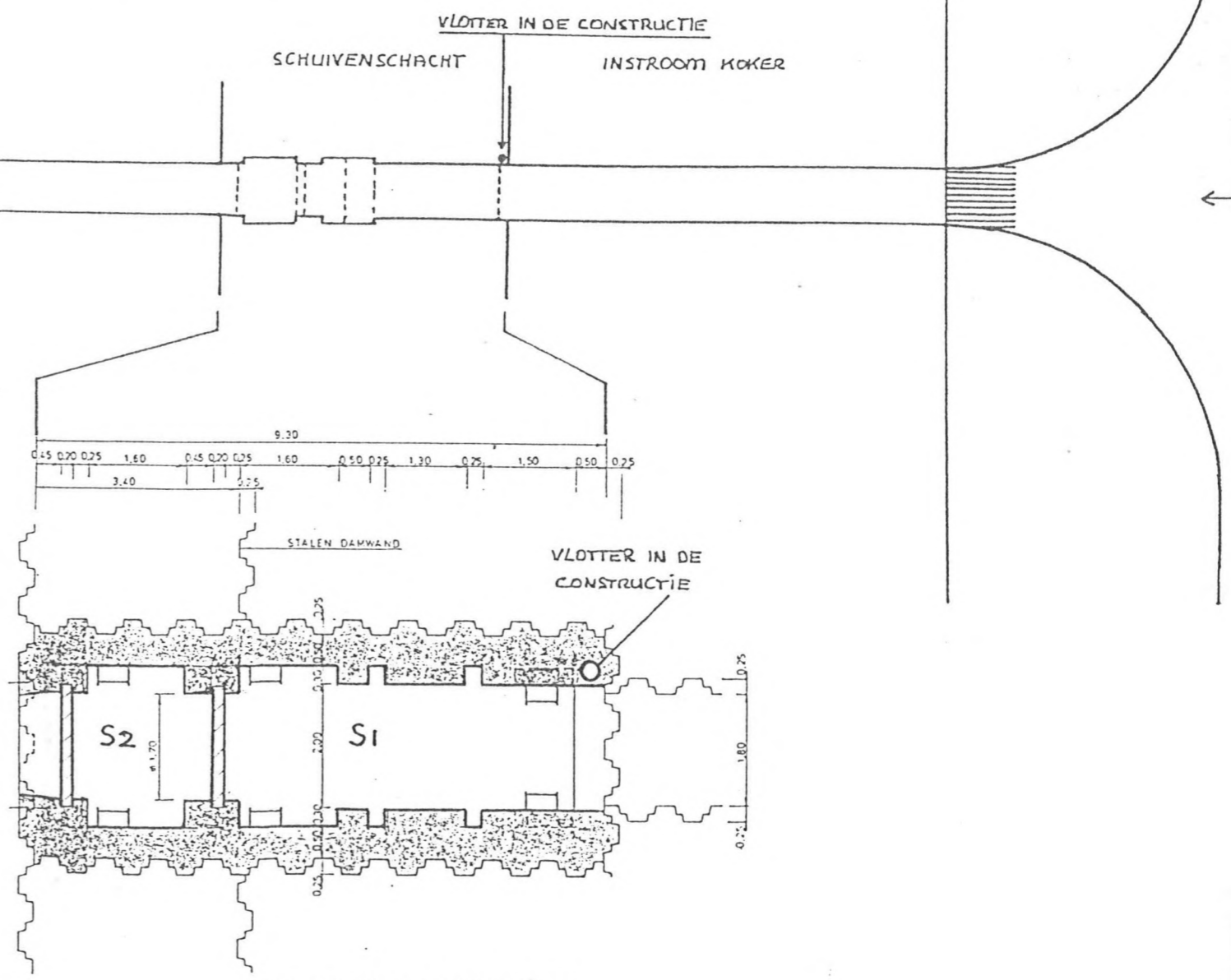
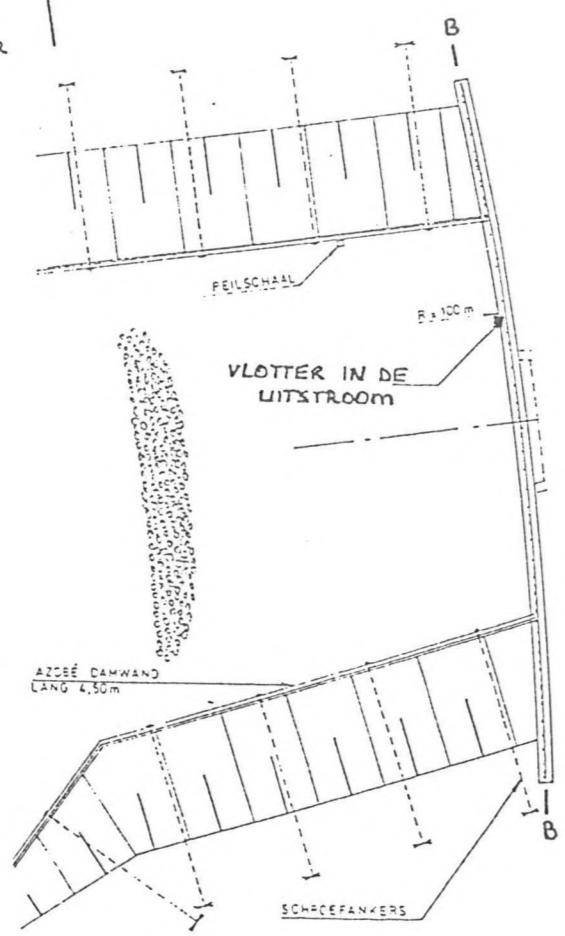
INSTROOM KOKER

DRUKOPNEMER

1.60 m

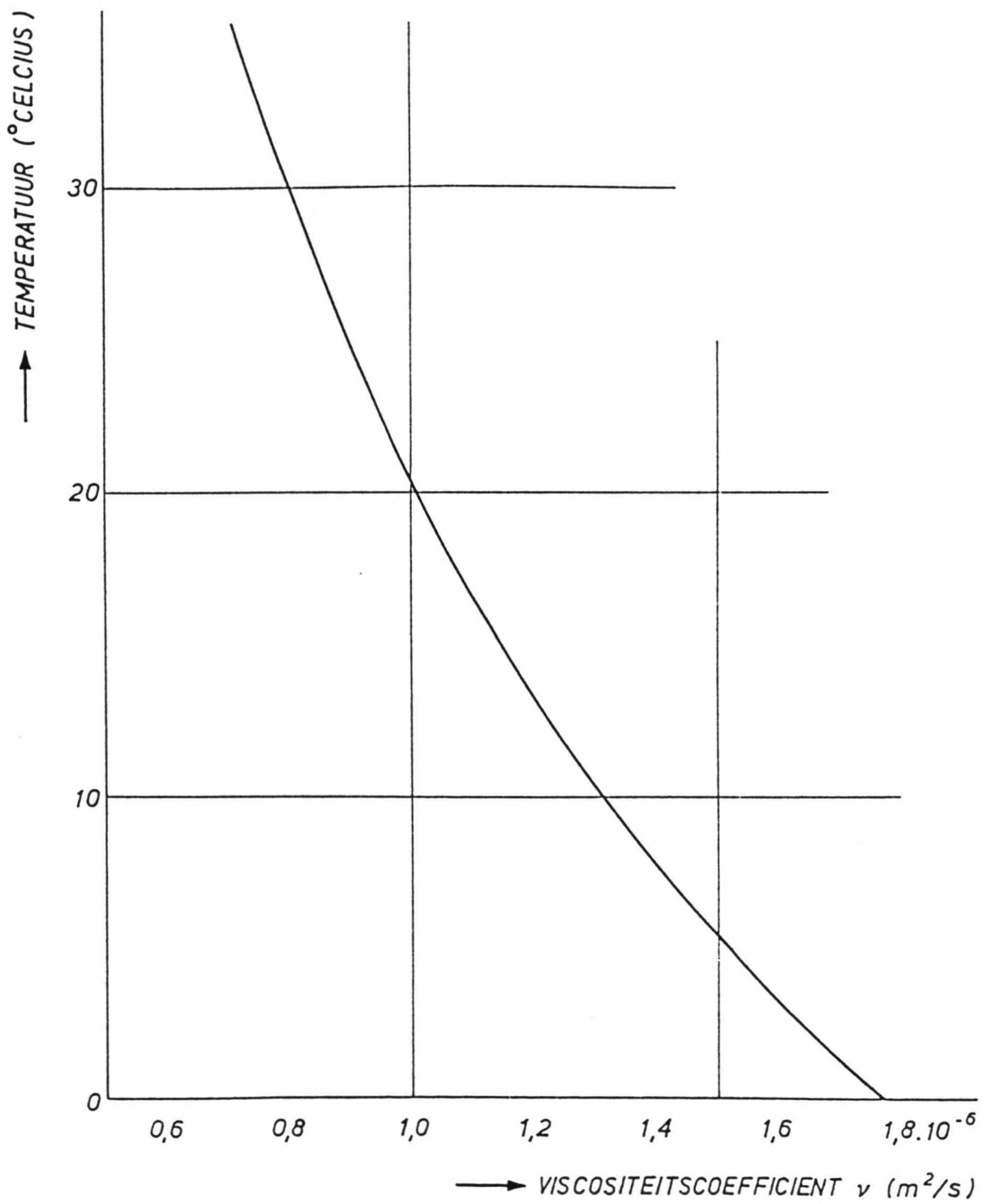
UITSTROOM -
VOELKELDER

175°



HOR. DOORSNEDE SCHUIVENSCHACHT.

3.1 viscositeit water



KINEMATISCHE VISCOSITEIT VAN ZUIVER WATER

K_M

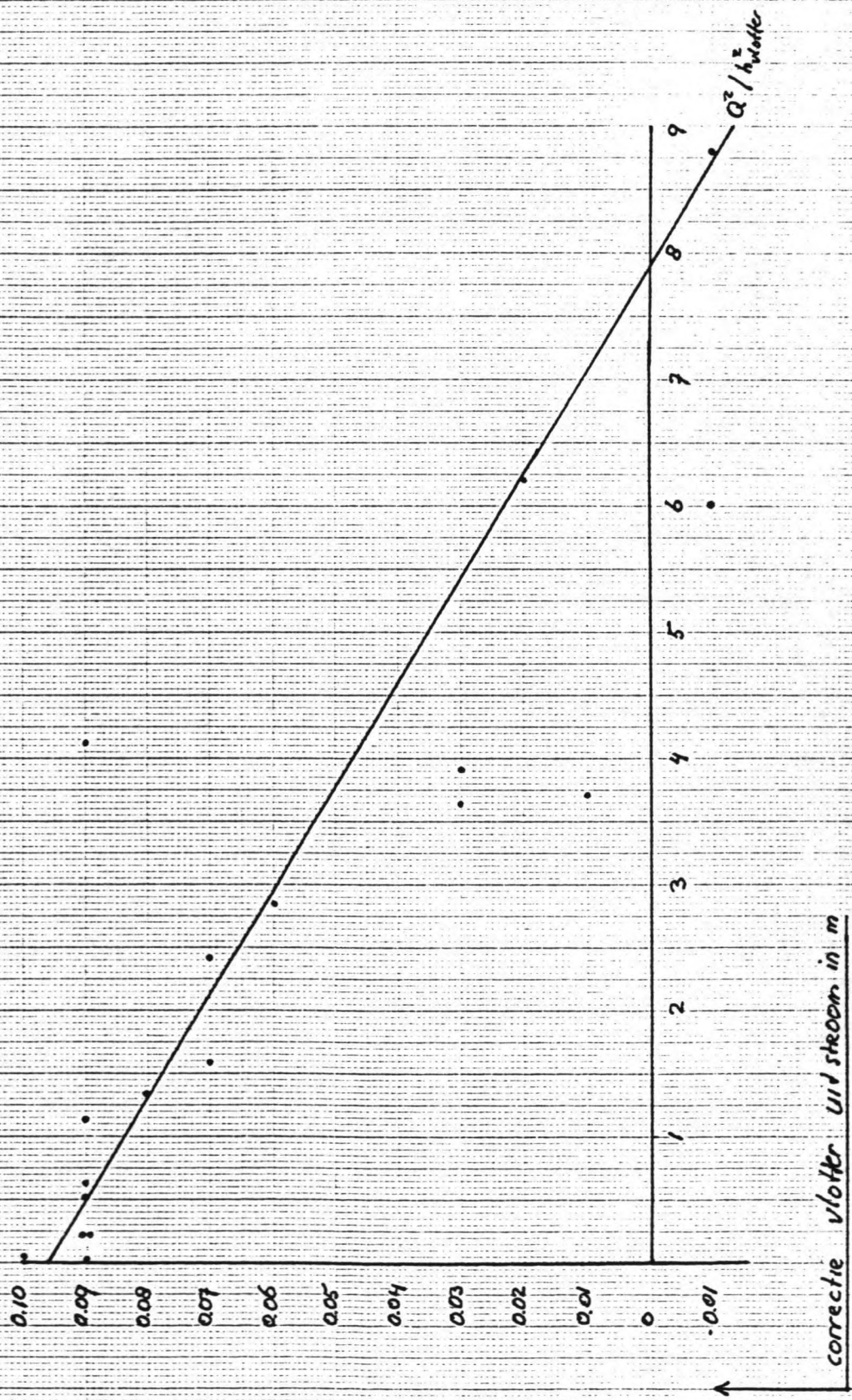
A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

S.170-V-1010

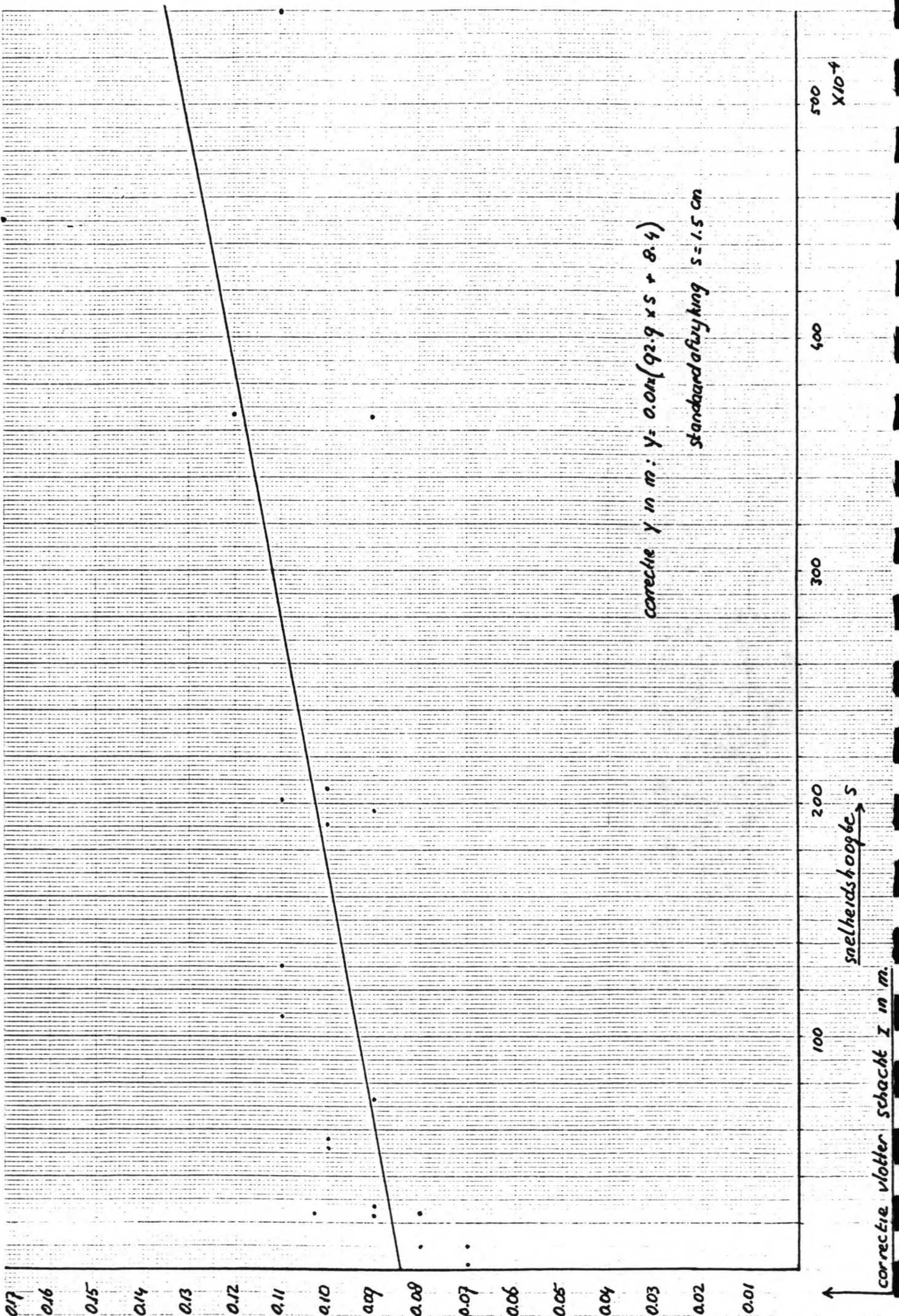
FIG. 1

4.1 afwijking vlotter in uitstroom



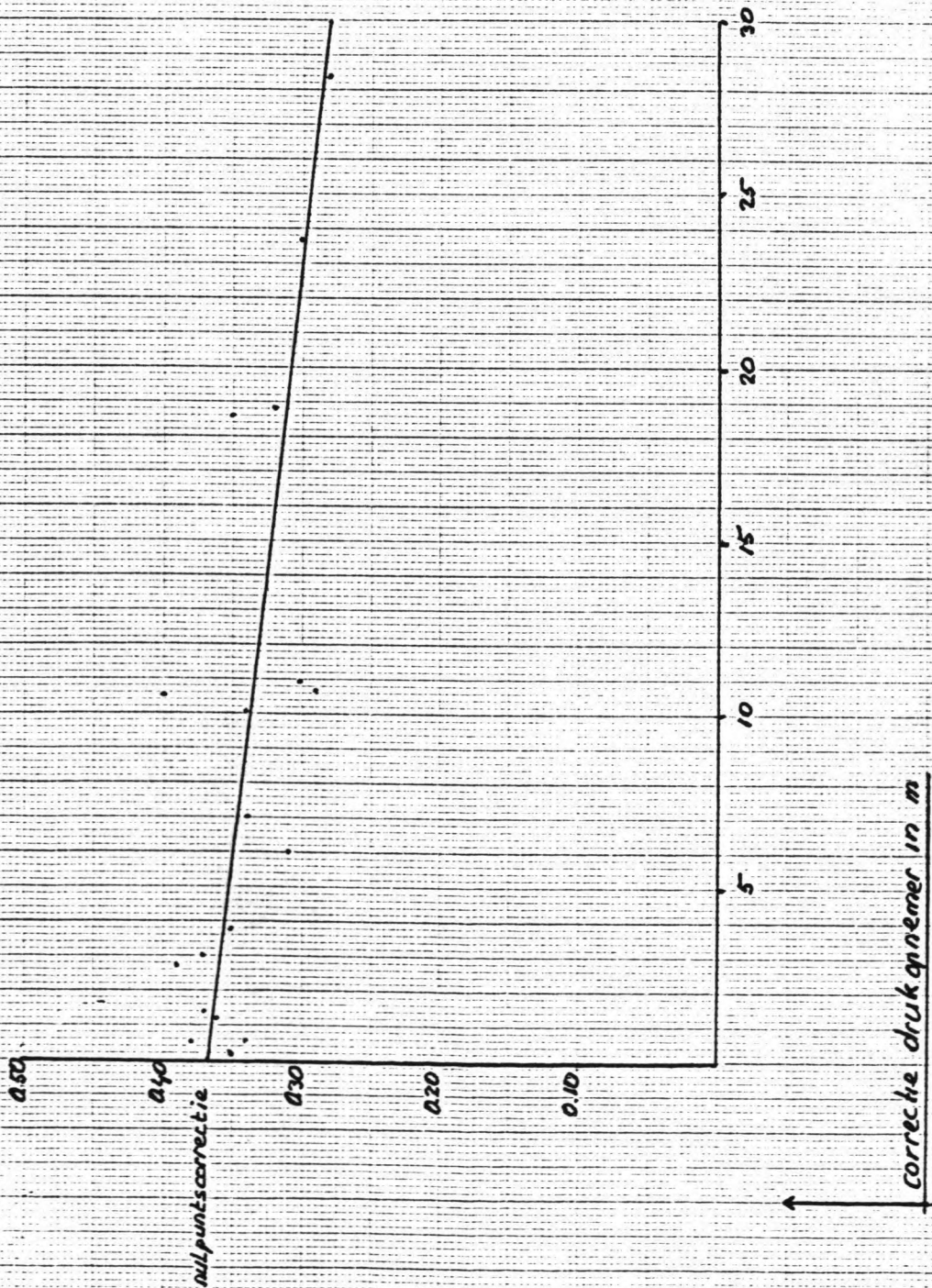
correctie $y = 0.01(-1.22(x/8))^2 + 9.63$

4.2 afwijking vlotter in constructie



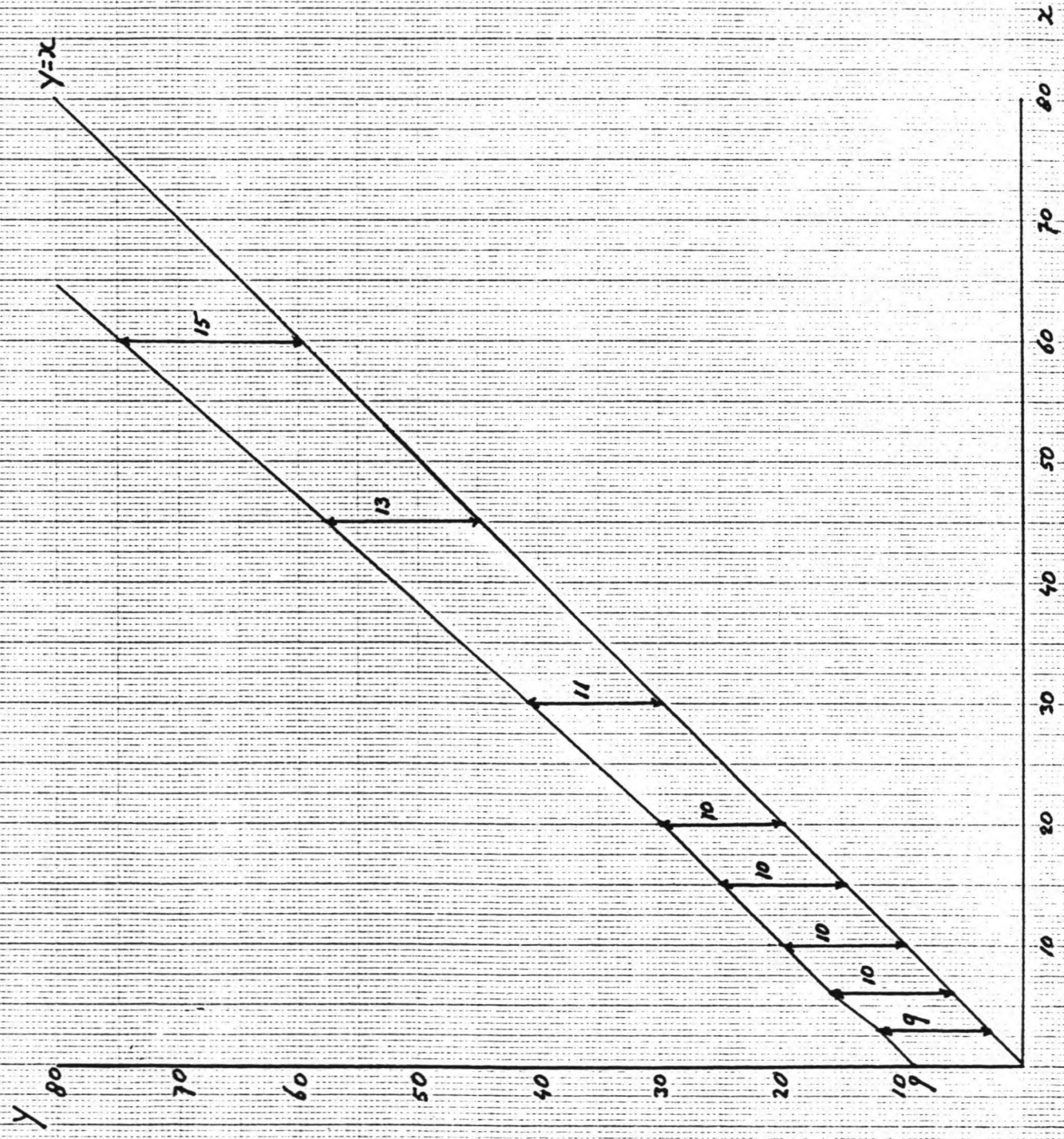
4.3 afwijking drukopnemer

Correctie drukopname



correctie $y = 0.01 (36.7 - 0.3 Q^2)$

4.4 afwijking schuifstandregistratie

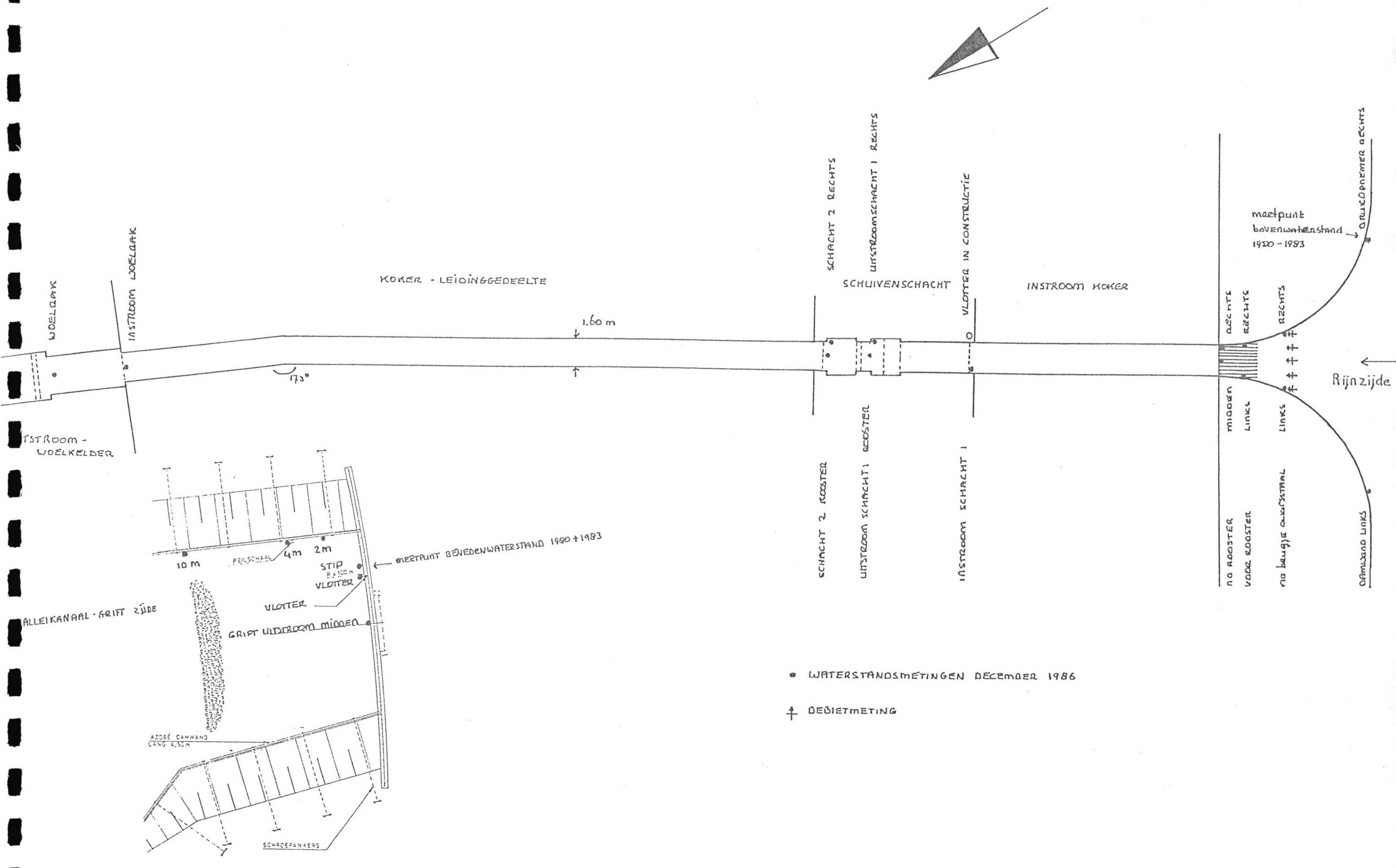


display
schussopening
binnenschweif

maßen in cm

gemeter opening

4.5 meetplaatsen en -resultaten



• WATERSTANDSMETINGEN DECEMBER 1986

‡ DEBIETMETING

Overzicht debietmetingen Grebbesluis d.d. 8-9 en 10 dec 1986.

datum	begin- tijd deb. meting.	nr. van. deb. meting.	app. displey. schuif- opening.	werkelijke schuif- opening. S	gem/ber. Q in $m^3/s.$	gemeten boven w.s. $m^+HAP.$	gemeten beneden w.s. $m^+HAP.$	ber. H. m.
8 dec. 86	11.15	1	0.12 ⁺	0.03	0.229	5.97	4.27	1.70
	12.05	2	"	"	0.379	5.98	"	1.71
	12.38	3	0.16	0.06	0.718	6.00	4.28	1.72
	13.20	4	"	"	0.716	5.98	4.28	1.70
	13.48	5	0.20	0.10	1.181	5.96	4.30	1.66
	14.18	6	"	"	1.092	6.00	"	1.70
	14.50	7	0.25	0.15	1.945	5.99	4.35	1.64
	15.25	8	"	"	1.641	"	4.34	1.65
9 dec 86	9.00	9	0.25	0.15	1.749	6.07	4.32	1.75
	9.55	10	0.30	0.20	2.656	6.06	4.32	1.74
	10.15	11	"	"	2.438	6.05	4.37	1.68
	11.10	12	0.40	0.30	3.266	6.05	4.41	1.64
	12.45	13	"	"	3.305	6.05	4.46	1.59
	13.10	14	"	"	3.186	6.06	4.47	1.59
	13.58	15	"	"	3.245	6.05	4.49	1.56
	14.28	16	0.58	0.45	4.342	6.05	4.52	1.53
15.05	17	"	"	4.317	5.99	4.54	1.45	
10 dec. 86	9.59	18	0.21	0.10	1.163	6.06	4.30	1.76
	11.35	19	0.75	0.60	4.868	6.05	4.44	1.61
	12.08	20	"	"	5.310	6.05	4.51	1.54

16.12.86 *de*

DEBIETMETINGEN

KLINSTWERK 0

Grebbealuis - / - Rhenen

wk. nr.	datum	boven w.s. N.A.R.	klep- stand N.A.R.	benader w.s. N.A.R.	h. m.	gemeten m ³ /sec.	A m ²	gem. m/sec.	apparatuur
	04-07-1983								
	10.13 h	6.15	bi 0.16 b4 0.30	5.00		-		-	
	10.56 h	6.11	bi 0.20 b4 1.83	4.95		1.23	8.61	0.14	
	11.20 h	6.10	bi 30 b4 1.83	5.01		2.11	8.68	0.24	
	11.39 h	6.11	bi 0.40 b4 1.83	5.06		2.66	8.63	0.31	
	11.59 h	6.10 ^s	bi 0.50 b4 1.83	5.15		3.19	8.60	0.37	
	13.38 h	6.11	bi 0.70 b4 1.83	5.18 ^s		4.25	8.60	0.49	
	13.59 h	6.07	bi 0.80 b4 1.83	5.25 ^s		4.85	8.60	0.56	
	14.11 h	6.07 ^s	bi 0.60 b4 1.83	5.02		3.80	8.77	0.43	
	15.01 h	6.11	bi 0.16 b4 0.30	5.17 ^s		-		-	

DEBIETMETINGEN

KUNSTWERK

Grebbe sluis / Rhenen

wk. nr.	datum 23-06-1983	boven w.s. N.A.R.	klep- stand N.A.R.	benader w.s. N.A.R.	h. m.	gemeten $m^3/sec.$	A m^2	gem. v. $m/sec.$	apparatuur
	8.45 h	6.18	B _i 0.25	5.06		1.10	8.30	0.13	
			B _u 0.28						
	9.40 h	6.17	B _i 0.30	5.11		1.83	8.28	0.22	
			B _u 1.83						
	10.10 h	6.04	B _i 0.40	5.15		2.36	8.29	0.28	
			B _u 1.83						
	10.35 h	6.16	B _i 0.50	5.23		2.94	8.06	0.37	
			B _u 1.83						
	11.08 h	6.15	B _i 0.60	5.27		3.53	8.13	0.43	
			B _u 1.83						
	11.31 h	6.11	B _i 0.70	5.32		4.00	8.15	0.49	
			B _u 1.83						
	13.08 h	6.14 ⁵	B _i 0.15	5.08		0.67	8.28	0.08	
			B _u 1.83						
	13.29 h	6.15	B _i 0.25	-		1.46	8.30	0.18	
			B _u 1.83						
	14.05 h	6.16	B _i 0.25	5.10		-	-	-	
			B _u 0.28						

DEBIETMETINGEN

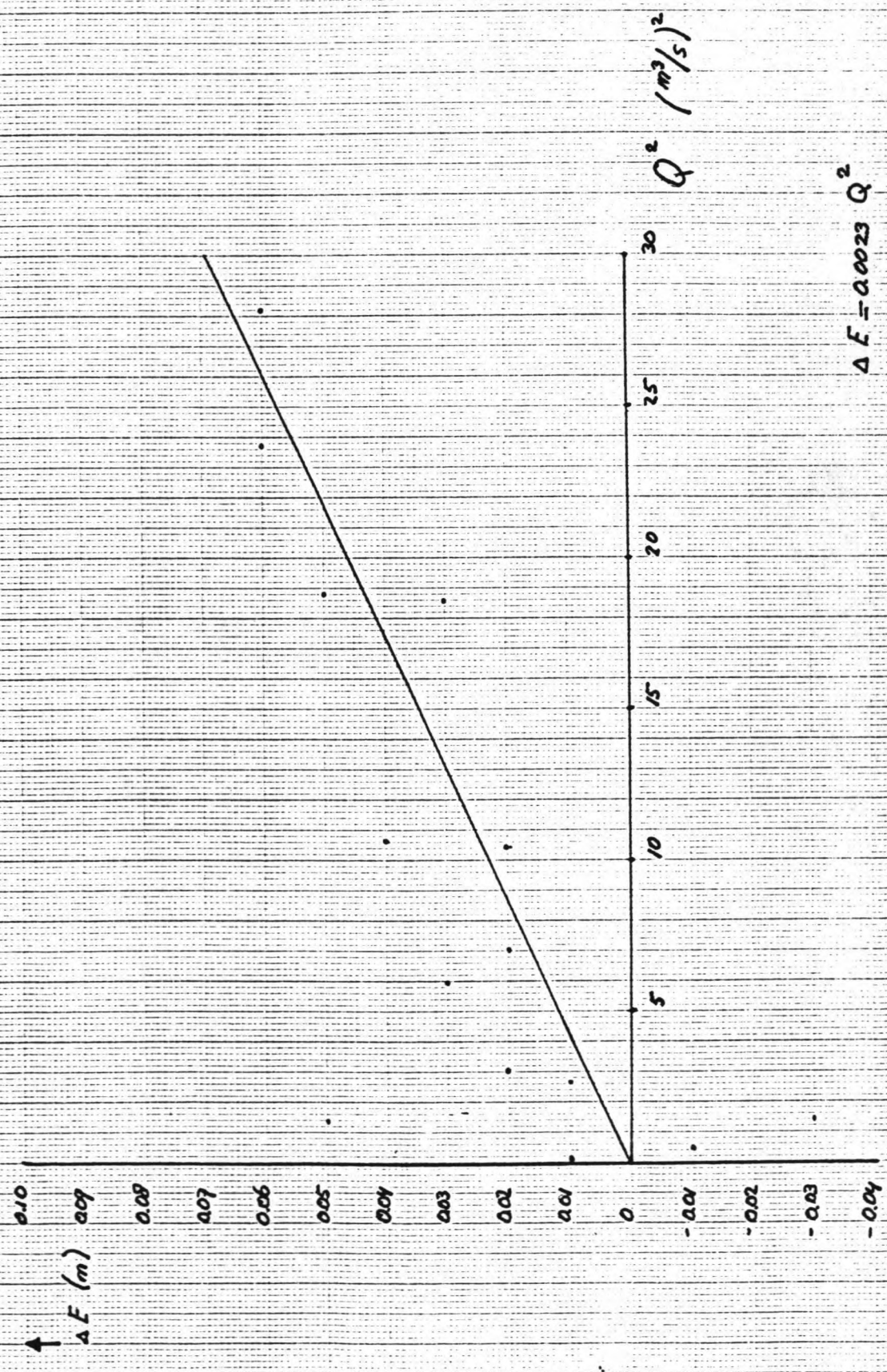
KUNSTWERK ° — Grebbesluis / Rhenen

wk. nr.	datum	boven w.s. N.A.R.	klepstand N.A.R. display	beneder w.s. N.A.R.	h. m.	gemeten m ³ /sec.	A m ²	gem. v. m/sec.	apparatuur
	10.25 h	6.38	b1 002	4.715		-	-	-	
			b4 003						
	12.05 h	6.39	b1 020	4.79		1.13	8.45	0.13	
			b4 182						
	13.00 h	-	b1 30	4.86		1.93	8.30	0.23	
			b4 181						
	13.25 h	6.36	b1 040	4.91		2.38	8.60	0.28	
			b4 172						
	14.00 h	6.39	b1 050	4.96		2.66	8.48	0.31	
			b4 182						
	14.30 h	6.35	b1 060	(5.03)		3.64	8.91	0.41	
			b4 181						
	15.22 h	6.35	b1 002	4.89		-	-	-	
			b4 003						

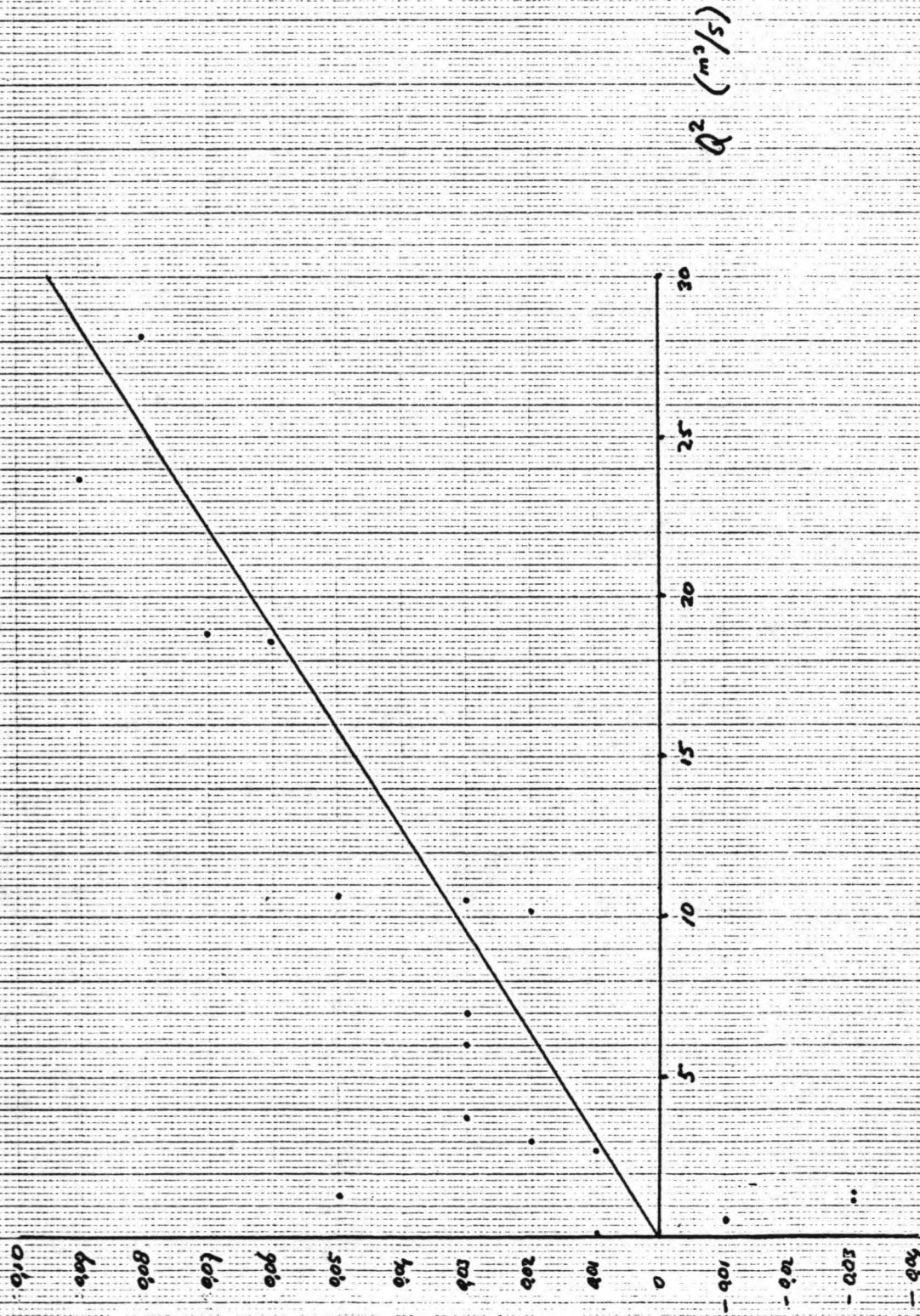
1	2	3	4	5	6	7
datum	tijd	Rijn m t.o.v. NAP	hoogte door- stroom- opening m	Vallei- kanaal t.o.v. NAP	profiel instro- ming m ²	debiet m ³ /sec
10-9-'80	13.45	6.14	0,05	4,74	10,55	0,41
	15.50	6.14	0,05	4,75	10,63	0,42
11-11-'80	8.35	6.18	0,05	4,75	10,54	0,14
	9.50	6.18	0,20	4,81	10,64	1,01
	10.40	6.17	0,10	4,86	10,36	0,62
	13.10	6.17	0,15	4,90	10,54	0,71
	14.45	6.16	0,15	4,94	10,54	0,96
	15.08	6.16	0,25	4,96	10,48	0,95
	16.00	6.16	0,25	5,02	10,43	1,23
12-11-'80	9.15	6.15	0,20	4,77	10,53	1,31
	10.30	6.14	0,30	4,91	10,41	1,61
	11.02	6.14	0,40	4,97	10,61	2,08
	11.54	6.14	0,50	5,06	10,48	2,13
	12.07	6.14	0,60	5,11	10,48	2,23

5.1 relatief energieverlies schacht 1 - schacht 2

Energie verlies tussen schacht I en II



gemeten waterstand schacht 1 minus
 gemeten waterstand schacht 2
 in m



5.2 k-waarden

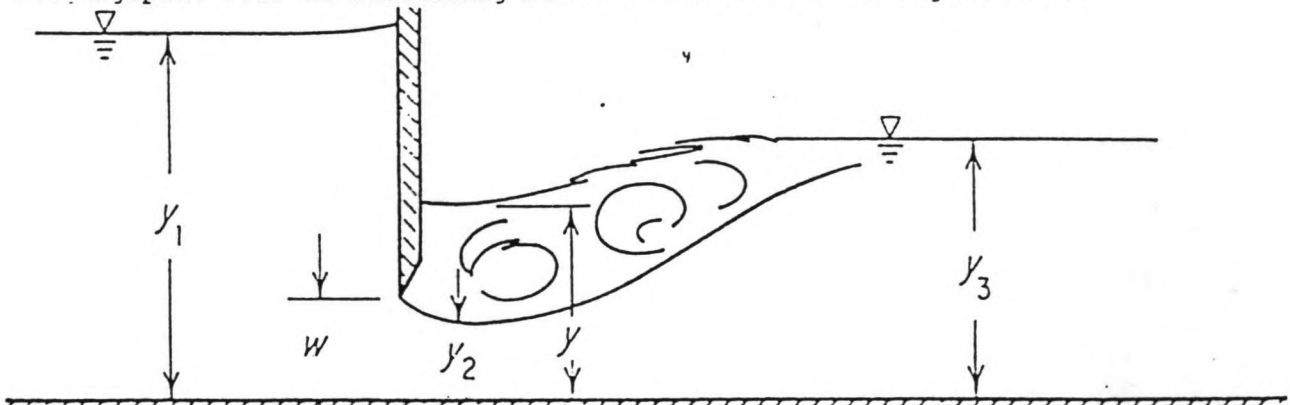
1 m						1 m
0,5 m			grond			0,5 m
0,2 m			terrein met - hindernissen		steen	0,2 m
0,1 m			bedding met sediment-transport (zie college f10)		blokken } globaal diameter bij stenen } mengsels ongeveer D ₉₀ (zonder transport)	0,1 m
5		glad				5
2		beton			grind	2
10 ⁻²		oud				10 ⁻²
5		niet afge- werkt			slecht metsel- werk van bak- steen	5
2			staal	hout	bewerkte natuur- steen	2
10 ⁻³			sterk gecorro- deerd	oud		10 ⁻³
5		afgestre- ken	geklonken	niet ge- schaafd	goed metselwerk van baksteen	5
2		zeer glad afgestre- ken	geklonken met verzonken koppen	geschaafd		2
10 ⁻⁴		gecentri- fugeerd	vlak gelast			10 ⁻⁴
5			geasfalteerd	glas		5
2						2
10 ⁻⁵						10 ⁻⁵

Tabel 4.1. Gegevens k-waarden (equivalente zandruwheid volgens Nikuradse)

5.3 theoretische benadering stroming onder een schuif met
een verdronken watersprong achter de schuif volgens
Henderson

Theoretische benadering stroming onder een schuif met een verdronken watersprong achter de schuif volgens Henderson.

Uitgangspunt voor de berekening is de schematisatie in figuur b.9.1



figuur b.9.1: schematisatie volgens Henderson.

Hierin is de vorm van de onderkant van de schuif (= veroorzaker onderdruk) verwaarloosd. Henderson gaat uit van behoud van energie tussen doorsnede 1 en 2 en de impuls vergelijking tussen doorsnede 2 en 3. Alle energieverlies treedt dus op tussen doorsnede 2 en 3. Tussen doorsnede 1 en 2 geldt nu $E_1 = E_2$:

$$y_1 + \frac{q^2}{2g \cdot y_1^2} = y + \frac{q^2}{2g \cdot y^2}$$

Tussen doorsnede 2 en 3 geldt nu $M_2 = M_3$:

$$\frac{q^2}{g \cdot y_2} + \frac{y^2}{2} = \frac{q^2}{g \cdot y_3} + \frac{y_3^2}{2}$$

Hierin is: $q = Q/\text{breedte schuif}$

$$y_1 = H_{s2}$$

$$y_3 = H_{k1}$$

Aangezien $y_2 = 0.80 \cdot w$ en H_{s2} en H_{k1} , uit de meetresultaten berekend kunnen worden hebben we te maken met een stelsel van twee vergelijkingen met twee onbekenden: q en y .

Berekeningen van q leverden sterk van de gemeten debieten afwijkende debieten op. De oorzaak hiervan is de genoemde verwaarlozing van de onderdruk.

Vervolgens is evenals bij de superkritische stroming de onderdruk afhankelijk gesteld van de snelheidshoogte onder de schuif:

$$\frac{p}{\rho \cdot g} = C \cdot \frac{q^2}{2g \cdot y_2^2}$$

De basis vergelijkingen worden dan:

$$y_1 + \frac{q^2}{2g \cdot y_1^2} = y + (1 - C) \cdot \frac{q^2}{2g \cdot y_2^2}$$

en

$$\frac{y^2}{2} + \frac{q^2}{g \cdot y_2} - a \cdot \frac{q^2}{2g \cdot y_2} = \frac{y_3^2}{2} + \frac{q^2}{g \cdot y_3}$$

In dit stelsel vergelijkingen is de q als bekende (het gemeten debiet gedeeld door de breedte) ingebracht waardoor 2 vergelijkingen ontstaan met 2 onbekenden: y en c .

Oplissing van dit stelsel vergelijkingen voor de verschillende metingen leverde ten aanzien van de waarde van c geen bevredigende resultaten: er was geen sprake van enige regelmaat.

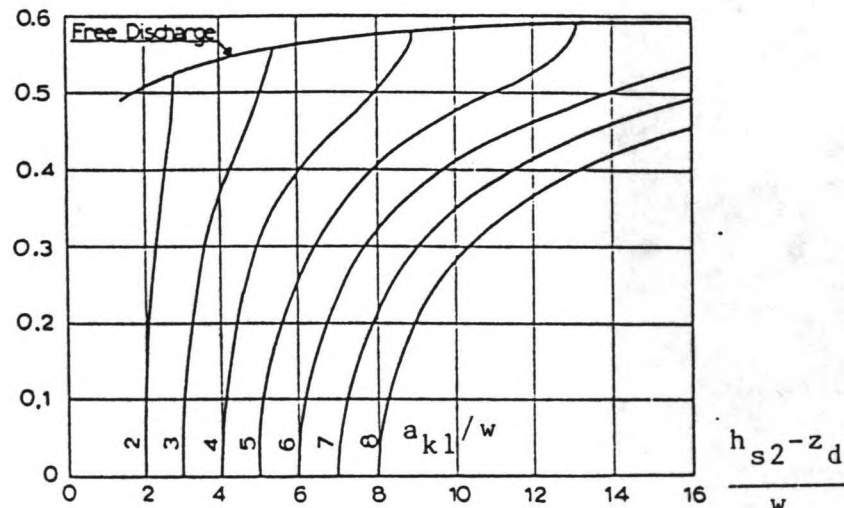
Deze benadering is bij gebrek aan resultaat gestaakt. Het is niet uitgesloten dat meer uitgebreide metingen wel tot resultaat leiden.

5.4 theoretische benadering stroming onder een schuif met
een verdronken watersprong achter de schuif volgens
Henry

Theoretische benadering stroming onder een schuif met een verdronken watersprong achter de schuif volgens de experimenten van Henry.

Een op experimenten gebaseerde methode om de afvoercoëfficiënt C_d te bepalen is afkomstig van Henry (Henderson, 1966). Omdat de C_d en C_e lineair afhankelijk zijn, zijn de resultaten van de experimenten van Henry in principe ook voor de C_e toepasbaar. In dat geval moet worden gerekend met percentages van de maximale afvoercoëfficiënt voor een vrije afvoer. Figuur b.9.2 geeft de experimenteel gevonden relatie weer. De gestippelde lijn is de theoretisch volgens bijlage 9.1 bepaalde relatie.

Discharge coefficient C_e



figuur b.9.2: Experimentele afvoercoëfficiënt.

De experimentele relatie laat zich als H_{s2}/w kleiner is dan 0.4 wiskundig beschrijven door:

$$C_e = C_e' \cdot \left(\frac{H_{s2} - H_{k1}}{w} \right)^{1/3} \cdot \frac{1}{0.3 \cdot H_{k1} / w + 0.72}$$

en anders door

$$C_e = C_e' \cdot \left(\frac{H_{s2} - H_{k1}}{w} \right)^{1/3} \cdot \frac{1}{0.18 \cdot H_{k1} / w + 1.20}$$

waarin C_e' de afvoercoëfficiënt voor vrije afvoer is (superkritische stroming na de schuif) is.

De combinatie van onderdruk en drempel blijkt ook hier bevredigende resultaten in de weg te staan. Evenals de voorgaande bijlage is deze bijlage opgenomen om eventuele toekomstige metingen te analyseren. Dit zal vooral zinvol zijn als door een wijziging van de vorm van de constructie de invloed van de onderdruk en de drempel afneemt.

