Opdrachtgever:

RWS - Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Stroming over een kribsectie

Nadere analyse afvoermetingen Wirken & Van Bladel

rapport bureaustudie

november 2005

Q4052

WL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

RWS - Dienst Weg- en Waterbouwkunde

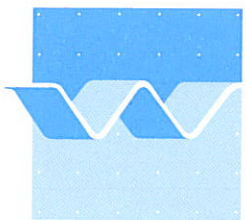
Stroming over een kribsectie

Nadere analyse afvoermetingen Wirken & Van Bladel

T.H.G. Jongeling

rapport bureaustudie

november 2005



WL | delft hydraulics

WL | delft hydraulics

OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde
TITEL:	Stroming over een kribsectie. Nadere analyse afvoermetingen Wirken en Van Bladel.

SAMENVATTING:

In het kader van het onderzoeksprogramma 'WBKI-Kribben' van Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW), is door een tweetal studenten, Wirken en Van Bladel, experimenteel onderzoek uitgevoerd aan de stroming over een sectie van een rivierkrib. Het onderzoek was met name gericht op het effect van de vormgeving en de ruwheid van de krib op de afvoer. Het schaalmodel was opgebouwd in een stroomgoot van WL | Delft Hydraulics.
Naderhand zijn door WL | Delft Hydraulics in hetzelfde schaalmodel, in het kader van een speurwerkprogramma gericht op de numerieke berekening van de stroming rond waterbouwkundige constructies, stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd bij verschillende kribgeometrieën en kribbekledingen.
DWW heeft WL | Delft Hydraulics gevraagd om de resultaten van het schaalmodelonderzoek van Wirken en Van Bladel nader te bestuderen en tevens, om de resultaten van de door WL | Delft Hydraulics uitgevoerde stroomsnelheidsmetingen in de analyse te betrekken.

De belangrijkste conclusie die, na herbeschouwing, uit het door Wirken & Van Bladel uitgevoerde onderzoek voor een *kribsectie* kan worden getrokken is dat bij een zeer glad kriboppervlak in het algemeen een geringer stromingsverlies ontstaat dan bij een hoge kribruwheid; dit bij een boventaludhelling van 1:4 en een benedentaludhelling van 1:8, kleine vervallen, en zowel een hoge als een lage waterstand. De lagere weerstand lijkt samen te hangen met een 'diep' afstromen bij de zeer gladde kribsectie. De (detail)vormgeving van de kribsectie is daarbij overigens van invloed; met name een afronding van de kruin van de krib is van belang bij een gladde kribhuid.
Mogelijk is een zeer gladde krib in de werkelijkheid niet te realiseren. De ruwheid van een *reële* krib ligt in de range van licht ruw tot zeer ruw, en het effect van de ruwheid op de stromingsweerstand is dan naar verwachting minder groot. De vorm van een krib (helling van boventalud en benedentalud, kruinbreedte en kruinvorm) lijkt vooralsnog de belangrijkste grootheid als het er om gaat de stromingsweerstand van een *reële* rivierkrib te beïnvloeden.

Aanbevolen wordt om in het kader van het onderzoek naar innovatieve kribben vooral aandacht te besteden aan de effecten van de vormgeving van de krib (met name ook de vormgeving van de kruin).

REFERENTIES:

Offertebrief WL | Delft Hydraulics dd 28 september 2005, kenmerk ZWS-13756/Q4052.95/sh
Opdrachtbrief RWS-DWW dd 13 oktober 2005, kenmerk AB/054025

VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
01	T.H.G. Jongeling	23 november 2005	concept	H.J. Verheij	
02	T.H.G. Jongeling	30 november 2005	definitief	H.J. Verheij	C.A. Bons

PROJECTNUMMER:	Q4052
TREFWOORDEN:	Rivierkrib, stromingsweerstand, ruwheid, vormgeving, afvoer, hoogwaterstand, MHW, experimenteel onderzoek, schaalmodel
AANTAL BLADZIJDEN:	50
VERTROUWELIJK:	☐ JA ☒ NEE
STATUS:	☐ VOORLOPIG ☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF

Inhoud

1 Inleiding ..... 1—1

1.1 Opdracht ..... 1—1

1.2 Probleemstelling en werkwijze ..... 1—1

1.3 Conclusies en aanbevelingen ..... 1—2

2 Stroming over een kribsectie ..... 2—1

2.1 Kribben in rivieren ..... 2—1

2.2 Stroming over een sectie van een krib ..... 2—3

2.3 Fysische verschijnselen bij stroming over een kribsectie ..... 2—5

2.4 Effect van de viscositeit ..... 2—7

3 Herbeschouwing onderzoek Wirken & Van Bladel ..... 3—1

3.1 Experimentele studie Bloembergen ..... 3—1

3.2 Experimenten van Wirken & Van Bladel ..... 3—6

3.3 Meetresultaten van Wirken & Van Bladel ..... 3—12

3.3.1 Ongestuwde afvoer ..... 3—12

3.3.2 Gestuwde afvoer ..... 3—15

3.3.3 Combinatie van ruwheden ..... 3—20

3.3.4 Resultaten als functie van het verval ..... 3—24

3.4 Stroomsnelheidsmetingen WL | Delft Hydraulics ..... 3—26

3.4.1 Proevenprogramma ..... 3—26

3.4.2 Afvoercoëfficiënt ..... 3—28

3.4.3 Stroomsnelheidsprofielen ..... 3—28

3.5 Bevindingen voor stroming over kribsectie ..... 3—35

3.6 Betekenis van de bevindingen voor een werkelijke rivierkrib ..... 3—38

Literatuur

1 Inleiding

1.1 Opdracht

In het tweede kwartaal van 2004 is door twee studenten van de Avans Hogeschool te Tilburg, in het kader van hun afstudeerwerk, onderzoek gedaan betreffende de stroming over een rivierkrib. Het onderzoek is als onderdeel van het onderzoeksprogramma 'WBKI-Kribben' van Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, uitgevoerd. Een belangrijk deel van het onderzoek betrof een experimentele studie in een schaalmodel van een sectie van een krib. Het schaalmodel was opgebouwd in een stroomgoot van WL | Delft Hydraulics. De studenten, Huub Wirken en Stijn van Bladel, hebben zich bij hun onderzoek met name gericht op het effect van de vormgeving van de krib en van de ruwheid van de stortsteen bekleding op de afvoer. De resultaten en conclusies van het experimentele onderzoek van de twee studenten zijn vastgelegd in een afstudeerverslag [Wirken & Van Bladel, 2004].

Naderhand zijn door WL | Delft Hydraulics in hetzelfde schaalmodel, in het kader van een speurwerkprogramma gericht op de numerieke berekening van de stroming rond waterbouwkundige constructies, stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd bij verschillende kribgeometrieën en kribbekledingen.

Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW), heeft WL | Delft Hydraulics gevraagd om de resultaten van het schaalmodelonderzoek van Wirken en Van Bladel nader te bestuderen en de bevindingen in een rapport weer te geven. Met name de conclusie van Wirken & Van Bladel aangaande het potentieel gunstige effect van een gladde kribbekleding op de maatgevende hoogwaterstand (MHW) van een rivier is interessant en vraagt om een nadere verkenning. Door DWW is tevens gevraagd om de resultaten van de door WL | Delft Hydraulics uitgevoerde stroomsnelheidsmetingen in de analyse te betrekken.

Opdracht tot de nadere analyse is gegeven door middel van brief AB/054025 van Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, gedateerd 13 oktober 2005. De analyse is uitgevoerd door ir. T.H.G. Jongeling van WL | Delft Hydraulics in de periode november 2005. ir. M van der Wal heeft het project namens DWW begeleid.

1.2 Probleemstelling en werkwijze

Met het oog op een verlaging van de MHW zou het gunstig kunnen zijn als de kribben in een rivier bij grote rivierafvoer en hoge waterstand een lage weerstand veroorzaken. Dit zou enerzijds kunnen worden bereikt door de kribben zo laag en kort mogelijk uit te voeren (resulterend in een geringere blokkade van het doorstroomprofiel), maar anderzijds zou ook (enige) winst kunnen worden behaald wanneer de stromingsverliezen bij overstroming van de kribben worden geminimaliseerd.

De eis blijft evenwel dat de kribben bij normale rivierafvoer en lagere waterstanden goed blijven functioneren. Dit betekent dat herprofilering van de kribben niet tot een aanmerkelijke verandering van de bodemligging in de hoofdgeul mag leiden en ook dient de waterdiepte in de hoofdgeul voldoende groot te blijven voor de scheepvaart. De rivierafvoer moet daarom in normale omstandigheden grotendeels door de hoofdgeul blijven gaan en het debiet over de kribben dient beperkt te blijven. Om dit laatste te bereiken dient de stromingsweerstand van de kribben bij geringe overstroming bij voorkeur zo hoog mogelijk te zijn.

Er zijn nu – op het oog – twee tegenstrijdige eisen geformuleerd: hoge stromingsweerstand en gering overstromingsdebiet bij lage waterstand versus lage stromingsweerstand en hoog overstromingsdebiet bij hoge waterstand. Wirken & Van Bladel hebben gepoogd uit te zoeken of dit inderdaad twee conflicterende eisen zijn. Ze hebben dit gedaan door middel van onderzoek in een schaalmodel van een sectie van een krib. Zo'n sectiemodel (met sectiebreedte gelijk aan de breedte van de stroomgoot) representeert niet het driedimensionale stromingspatroon bij overstroomde rivierkribben, nog de uitwisseling tussen kribvak en hoofdstroming. Niettemin kan het sectiemodel worden gebruikt om de effecten van kribvorm en ruwheid van de krib op de weerstand bij overstroming te onderzoeken; het onderzoek dient zich daarbij te richten op kleine tot zeer kleine vervallen over de krib.

In dit verslag worden de resultaten van het onderzoek van Wirken & Van Bladel herbeschouwd. Daarbij worden de resultaten van de door WL | Delft Hydraulics uitgevoerde stroomsnelheidsmetingen meebeschouwd en wordt er ook teruggekeken naar een eerder onderzoek van Bloemberg aan de TUD [Bloemberg, 2001], dat voor een sectie van een kade werd uitgevoerd.
De stromingsweerstand wordt uitgedrukt door middel van de afvoercoëfficiënt C_d; deze coëfficiënt wordt in de huidige studie afgeleid van het debiet en de bovenstroomse energiehoogte. Een hoge afvoercoëfficiënt duidt op een lage stromingsweerstand.

1.3 Conclusies en aanbevelingen

De belangrijkste conclusie die, na herbeschouwing, uit het door Wirken & Van Bladel uitgevoerde onderzoek voor een kribsectie kan worden getrokken is dat bij een zeer glad kriboppervlak in het algemeen een geringer stromingsverlies ontstaat dan bij een hoge kribruwheid; dit bij een boventaludhelling van 1:4 en een benedentaludhelling van 1:8, kleine vervallen, en zowel een hoge als een lage waterstand. De C_d-waarde ligt bij een zeer gladde kribsectie 10% – 20% hoger dan bij een zeer ruwe kribsectie.
De lagere weerstand lijkt samen te hangen met een 'diep' afstromen bij de zeer gladde kribsectie. De (detail)vormgeving van de krib is daarbij overigens van invloed; met name de in het onderzoek toegepaste afronding van de kruin van de krib bleek van belang.

Geconcludeerd kan ook worden dat bij ruwheden variërend tussen matig ruw en zeer ruw geen belangrijke verschillen zullen bestaan tussen benedentaludhellingen van 1:15 en 1:8 voor wat betreft de stromingsweerstand. Deze conclusie is in lijn met een door Wirken & Van Bladel geformuleerde conclusie ten aanzien van het effect van de benedentaludhelling.

De conclusie van Wirken & Van Bladel dat ‘combinatiekribben’ met ruw boventalud (met helling 1:4), ruwe kruin, en zeer glad benedentalud (met helling 1:8) meer afvoeren bij hoge waterstand dan een ‘standaard’ krib (met dezelfde vorm maar met matige ruwheid) en minder afvoeren bij lage waterstand dan een ‘standaard’ krib, kan niet op basis van de meetresultaten worden waargemaakt. Er lijkt ook geen reden voor te bestaan, omdat de wijze van afstromen die het verschil zou kunnen uitmaken, bij *kleine vervallen* niet van de waterstand lijkt af te hangen.

Uit de herbeschouwing is naar voren gekomen dat de C_d-waarden in het onderzoek van Wirken & Van Bladel in overeenkomstige omstandigheden (waterstanden, ruwheid, taludhelling) 10% à 20% hoger waren dan in het onderzoek van Bloemberg. De oorzaak van dit verschil moet waarschijnlijk worden gezocht in geometrische parameters. Bij het onderzoek van Bloemberg bedroeg de verhouding van kruinbreedte en kribhoogte 0,5, bij het onderzoek van Wirken & Van Bladel was deze verhouding 0,38 en was de kruin afgerond (geen gehoekte vorm).

Een zeer glad kriboppervlak, zoals is toegepast in het schaalmodel, kan in werkelijkheid niet worden gerealiseerd, ook niet wanneer de stenen bekleding wordt nabehandeld met gietasfalt. Dit maakt dat we in werkelijkheid te maken hebben met een licht ruw tot zeer ruw oppervlak. Bij deze ruwheden is de wijze van afstromen bij een benedentaludhelling van 1:8 niet sterk verschillend: de stroming houdt contact met het benedentalud, maar de afstroming vindt toch voornamelijk in het hogere deel van het benedenwater plaats, zowel bij lage als bij hoge waterstand. Het effect van de ruwheid is daarom naar verwachting bij een reële krib niet erg groot.
Er komt bij dat de vervallen over de krib bij hoge waterstand in werkelijkheid kleiner zullen zijn dan de vervallen die zijn onderzocht in het schaalmodel van de kribsectie. Ook zijn er in werkelijkheid, vooral bij lagere waterstanden, effecten te verwachten van de uitwisseling tussen kribvak en hoofdstroom. Dit maakt dat de modelresultaten voor de kribsectie niet zonder meer van toepassing kunnen worden verklaard op een *reële* rivierkrib.

De stromingsweerstand van een *reële* krib wordt naar verwachting het sterkst beïnvloed door de vorm van de krib (helling van boventalud en benedentalud, kruinbreedte en kruinvorm). Bij een steil benedentalud van 1:4 bijvoorbeeld en reële ruwheid, ontstaat er een duidelijke bodemneer, hetgeen ongunstig is in verband met de stromingsweerstand. Bij een flauw benedentalud is deze bodemneer er niet.

Aanbevolen wordt om in het kader van het onderzoek naar innovatieve kribben vooral aandacht te besteden aan de effecten van de vormgeving van de krib, met name ook van de kruin. Vanwege de uitwisseling en relaties tussen kribvak en hoofdstroom dient onderzoek in schaalmodellen bij voorkeur in een brede goot te worden uitgevoerd, waarin zowel de hoofdgeul als kribvakken kunnen worden gemodelleerd. De beste aanpak is dan om een vergelijkende studie van varianten uit te voeren, waarbij ten opzichte van een referentiegeometrie de verschillen in de verhanglijn van het totale beschouwde rivierdeel worden gemeten. Dit vereist een zeer nauwkeurige en betrouwbare meting van waterstandsverschillen en debiet. In zo’n model kunnen ook detailmetingen bij de kribben worden uitgevoerd.

2 Stroming over een kribsectie

2.1 Kribben in rivieren

Kribben worden in de Nederlandse rivieren toegepast om de bevaarbaarheid bij lage rivierafvoer te verbeteren. Bij lage afvoer komen de kribben boven het water uit en wordt het doorstroomprofiel effectief vernauwd. De waterdiepte blijft daardoor groter en er treedt minder aanzanding op. Kribben verminderen tevens de directe stroomaanval op de oevers, met name in de bochten, en voorkomen daarmee dat de bodem uitschuurt en de oever wordt ondermijnd.



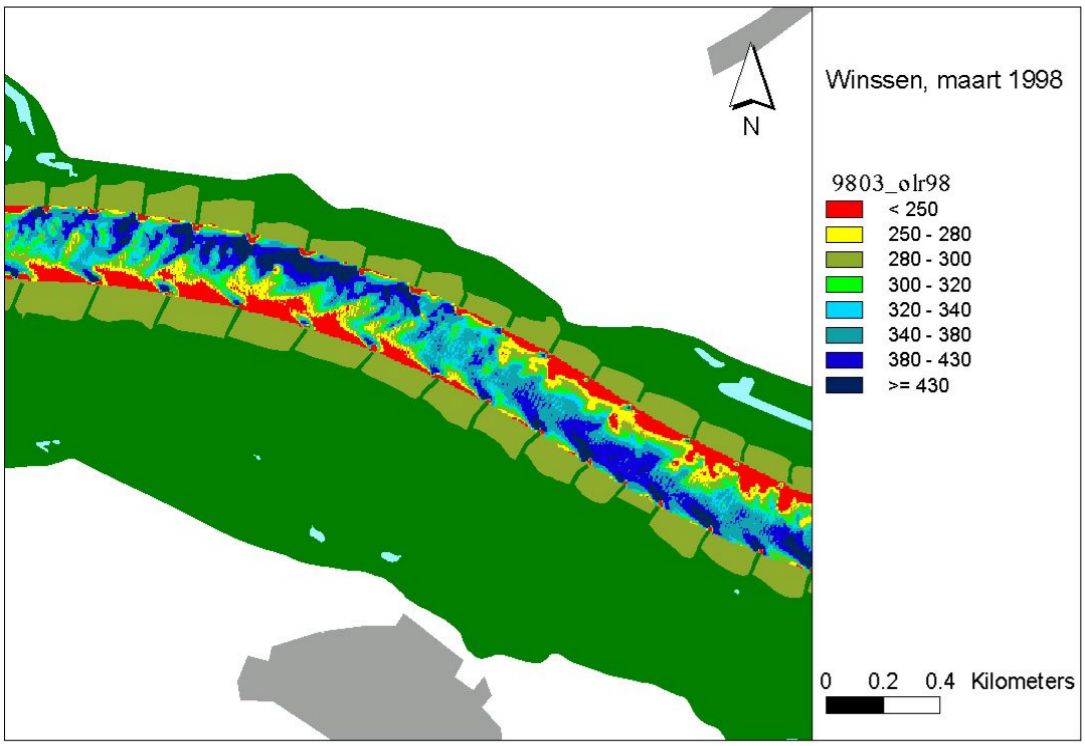
Figuur 2-1 Toepassing kribben

De nieuwere kribben in de Nederlandse rivieren bestaan uit een klei- of zandkern die wordt afgedekt met gezette of gestorte steen op een ondergrond van filterlagen en geotextiel. De zijtaluds hebben een helling van ca 1:3; bij bouw ‘in de droge’ kunnen steilere taluds worden gerealiseerd. Door zetting kunnen de taluds in de loop van de tijd enigszins verflauwen. Oudere kribben zijn veelal laagsgewijs opgebouwd uit zinkstukken met stortsteen, die zijn ingewassen met zand. De zijtaluds hebben dan een helling van ca 1:2. De breedte van de kruin van een krib is 2 m à 3 m, maar soms ook veel breder. Veelal loopt de kruin in lengterichting van de krib vanaf de oever enigszins af (helling 1:100). Kribben worden haaks op de oever of onder een kleine hoek met de normaal aangelegd (tegen de stroomrichting in, ‘happend’, of met de stroomrichting mee ‘geleidend’).

De afstand tussen de kribben is zodanig groot dat de stroming geen gelegenheid krijgt om geheel terug te buigen naar de oever; de stroming blijft bij lage rivierafvoer dus geforceerd op afstand van de oever. De stroming laat van een kribkop los en maakt de oversteek naar de volgende kribkop.
Bij het loslaten buigt de stroming veelal enigszins naar binnen (contractie richting rivier-as) en buigt vervolgens weer terug tot in het kribvak.

Op de begrenzing van de hoofdstroming en het gebied met rustig water tussen de kribben ontstaan wervels, met name in het gebied vanaf de kop van de krib. In de kribvakken zelf ontstaan, afhankelijk van de geometrie van het kribvak en het algehele rivierverloop, één of twee neren met verticale as. Tussen de hoofdstroming en het kribvak vindt uitwisseling van water en stoffen plaats, waaronder sediment. Er heerst daarbij een zeker dynamisch evenwicht. Golven en waterbewegingen opgewekt door passerende schepen spelen daar een belangrijke rol in. De kribvakken in met name Waal en Bovenrijn zijn in sterke mate aangezand; bij laag water komen de ‘zandstranden’ boven water.

Lokaal bij de kribkoppen treedt als gevolg van de contractie enige snelheidsverhoging op; samen met de lokaal hogere turbulentie geeft dit veelal aanleiding tot uitschuring van de bodem in een gebied achter de kribkop. Zich uitstrekkend vanuit de kribvakken zijn er ook gebieden met hogere bodemligging, de zogenaamde kribvlammen. Deze netto sedimentatiegebieden bevinden zich naast de hoofdstroming op de begrenzing met het rustige water. Het sediment wordt hier vanuit de hoofdstroming ingevangen in de wervels, en is deels afkomstig uit de ontgrondingskuil bij de kribkop.



Figuur 2-2 Kribvlammen, Waal bij Winssen

Bij hogere rivierafvoeren stroomt het water over de kribben heen; naarmate het overstroomdebiet toeneemt, wordt de stroming in de kribvakken sterker en verandert de stroming rond de kribkoppen alsmede de uitwisseling van water en sediment tussen hoofdstroming en kribvakken.
Bij zeer grote rivierafvoeren vormen de kribben in feite vervelende obstakels: ze blokkeren een deel van het doorstroomprofiel en hebben daardoor een verhogend effect op de maatgevende hoogwaterstand (MHW).
Het aandeel van de kribben in de MHW is overigens aanmerkelijk geringer of zelfs vrijwel verwaarloosbaar wanneer de rivier brede stroomvoerende uiterwaarden heeft.

Met het oog op de MHW zou het gunstig kunnen zijn als de rivierkribben bij hoge waterstand een lage weerstand geven bij overstroming. Dit zou enerzijds kunnen worden bereikt door de kribben zo laag en kort mogelijk uit te voeren (resulterend in een geringere blokkade van het doorstroomprofiel), maar anderzijds zou ook (enige) winst kunnen worden behaald wanneer de stromingsverliezen bij overstroming worden geminimaliseerd.
De eis blijft evenwel dat de kribben bij normale rivierafvoer en lagere waterstanden goed blijven functioneren. Dit betekent dat herprofilering van de kribben niet tot een aanmerkelijke verandering van de bodemligging in de hoofdgeul mag leiden en ook dient de waterdiepte in de hoofdgeul voldoende groot te blijven voor de scheepvaart. De rivierafvoer moet dus grotendeels door de hoofdgeul blijven gaan en het debiet over de kribben dient beperkt te blijven. Om dit laatste te bereiken dient de stromingsweerstand van de kribben bij geringe overstroming bij voorkeur zo hoog mogelijk te zijn.

Er zijn nu – op het oog – twee tegenstrijdige eisen geformuleerd: hoge stromingsweerstand en gering overstromingsdebiet bij lage waterstand versus lage stromingsweerstand en hoog overstromingsdebiet bij hoge waterstand. Wirken & Van Bladel hebben gepoogd uit te zoeken of dit inderdaad twee conflicterende eisen zijn. Ze hebben dit gedaan door middel van onderzoek in een schaalmodel van een sectie van een krib. Zo'n sectiemodel (met sectiebreedte gelijk aan de breedte van de stroomgoot) representeert niet het driedimensionale stromingspatroon bij overstroomde rivierkribben: de omstroming rond de kribkop, de toestroming naar en de afstroming van de krib, de secundaire stroming in het kribvak en de uitwisseling tussen kribvak en hoofdstroming worden niet of niet goed gesimuleerd. Het sectiemodel kan niettemin dienen om de effecten van kribvorm en kribruwheid op de weerstand bij overstroming te onderzoeken.

2.2 Stroming over een sectie van een krib

De stroming over een kribsectie in een stroomgoot is dus een nogal kunstmatige situatie: doordat er geen omstroming is, is de benedenwaterstand onafhankelijk van de bovenwaterstand (te regelen) en bestaat er een sterke gelijkenis met een overlaat. Echter, het verval over een overlaat kan zeer groot zijn terwijl het verval bij een rivierkrib als regel gering is. Bij het onderzoek in een sectiemodel van een krib dient daarom vooral aandacht te worden besteed aan de kleine vervallen, met orde van grootte zoals optredend bij het verhang in de rivier.

In Nederlandse rivieren bedraagt het bodemverhang gemiddeld ca 10^{-4}. Het verhang van de waterspiegel is ongeveer hetzelfde of wat groter, tot ca 5.10^{-4}. In een kribvak ontwikkelt zich bij lagere rivierwaterstanden een neer, die zich bij niet al te grote kribvaklengte over het gehele kribvak uitstrekt (dit is de gewenste optimale situatie). Om deze neer met langs de oever terugdraaiende stroming te laten ontstaan, dient er een voldoende groot drukverschil te bestaan in het kribvak. In berekeningen wordt daarom wel aangenomen dat de waterlijn nabij de oever horizontaal is.

Uitgaande van de ontwikkeling van een enkele neer in het kribvak kan voor het bepalen van de kribvaklengte L de volgende formule worden gehanteerd:

$$L < \alpha \frac{C^2 h}{2g}$$

met:

C = Chézy coëfficiënt ($m^{0.5}/s$)
h = waterdiepte (m)
g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
α = coëfficiënt < 0,6

Met bijvoorbeeld C = 40 $m^{0.5}/s$, h = 5 m en α = 0,5 wordt gevonden: L = 200 m. De vereiste kribvaklengte is evenwel ook afhankelijk van de kriblengte in relatie tot de rivierbreedte. In praktijkformules worden daarom veelal de kriblengte L_{krib} en de rivierbreedte B (hoofdgeul) gebruikt als variabelen, bijvoorbeeld [Ghani & Gill, 1963]:

$$L \leq (3 \text{ `a } 5).L_{krib}$$

of [Mosselman, 2000]:

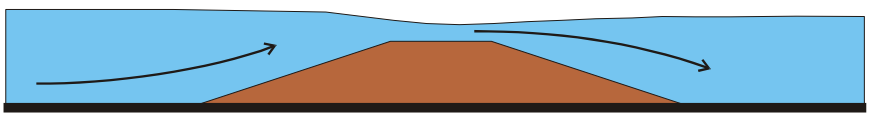
$L \leq 2,5.k_1.k_2.k_3.B$ met k_i = geometrie- of functieafhankelijke factor ≤ 1,0

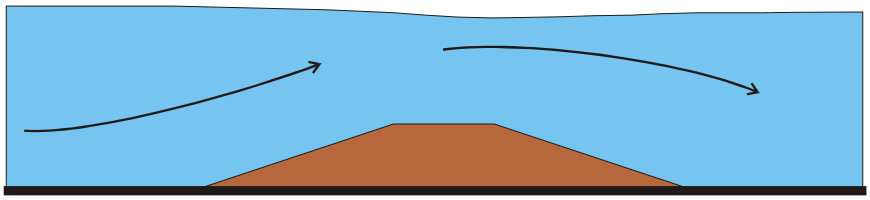
In buitenbochten wordt een kleinere kribvaklengte aangehouden. In de praktijk blijkt de kribvaklengte flink te variëren (Waal: rond 200 m, Nederrijn: rond 100 m, IJssel: 50 – 70 m).

Kiezen we een lengte van 100 m à 200 m als representatieve maat voor de kribvaklengte dan zal het verschil tussen de verhanglijn met helling 5.10^{-4} en de horizontale lijn langs de oever maximaal 0,05 m à 0,1 m kunnen bedragen. Dit is tevens de bovengrenswaarde voor het lokale waterstandsverschil over de krib bij lagere rivierwaterstanden. Bij hogere rivierwaterstanden en flinke stroming over de krib zal de bovengrenswaarde voor het lokale waterstandsverschil overigens aanzienlijk kleiner zijn, dit vanwege de sterkere relatie met de verhanglijn in de hoofdstroom.

Vanwege het relatief kleine verval is de stroming over een krib te karakteriseren als ‘gestuwde afvoer’, dit wil zeggen, de benedenwaterstand heeft invloed op de grootte van het overstromingsdebiet (in termen van een overlaat: onvolkomen overlaat). Alleen bij kleine overstromingsdiepte, met de bovenwaterstand ca 0,1 m boven de kruin van de krib, kan er wellicht sprake zijn van een ‘ongestuwde afvoer’ (volkomen overlaat). Het overstromingsdebiet is hierbij echter nog betrekkelijk gering en het effect op de hoofdstroming langs de kribben beperkt, zodat dit mogelijk een wat minder relevante situatie is voor het onderzoek.

Samenvattend kan worden gesteld dat de van belang zijnde stromingssituaties voor het onderzoek in een sectiemodel van de krib zijn: situaties met een overstromingsdiepte boven de kruin van de krib in de range van 0,1 m tot 5 à 10 m bij een verval van maximaal ca 0,1 m.





Figuur 2-3 Relevante stromingssituaties

Bij lage rivierwaterstanden en geringe overstromingsdiepte boven de kruin van de krib zal de aanstroming naar de krib, als gevolg van secundaire stromingen in het kribvak, niet parallel aan de oever zijn. Aannemelijk is ook dat de toestroming niet over de volledige waterdiepte in het kribvak plaats vindt (mogelijk alleen in een deel nabij het wateroppervlak). Dit zou kunnen betekenen dat de vorm en ruwheid van de krib aan aanstroomzijde minder van belang zijn bij lage rivierwaterstanden. De afstroming vanaf de krib wordt mogelijk beïnvloed door secundaire stromingen in het benedenstroomse kribvak.
Bij toename van de rivierwaterstand zal meer water over de kribben gaan stromen en worden de kribvakken meer en meer in de rivierafvoer betrokken. De toestroming naar de krib vindt in toenemende mate over de gehele waterdiepte in het kribvak plaats en is ook in toenemende mate parallel aan de oever gericht. Dit laatste geldt ook voor de afstroming.

De toestroming naar het sectiemodel van de krib in de stroomgoot (slechts één kribsectie) vindt steeds over de gehele waterdiepte en loodrecht op de kribas plaats. Deze wijze van toestromen sluit het beste aan bij de situatie in het prototype met hogere rivierwaterstanden, maar is minder of niet representatief voor de situatie in het prototype met lagere rivierwaterstanden. De afstroming in het sectiemodel is eveneens vooral representatief voor de de situatie in het prototype met hogere rivierwaterstanden (en niet te kleine kribtussenafstanden van 100 m – 200 m). De afstroming is representatief voor de situatie in het prototype met lagere rivierwaterstanden wanneer het effect van secundaire stromingen in het kribvak gering is. Omdat de secundaire stromingen als regel zwak zijn kan hier mogelijk wel vanuit worden gegaan.

2.3 Fysische verschijnselen bij stroming over een kribsectie

Bij het onderzoek in het sectiemodel van de krib gaat het om het bepalen van het energieverlies van de stroming als functie van kribvorm en ruwheid van de kribbekleding. Het energieverlies wordt veroorzaakt door wrijving langs wanden en bodem en door interne wrijving in het water, beiden als gevolg van de viskeuze eigenschappen van het water. Interne wrijving ontstaat op plaatsen waar stroomsnelheidsgradiënten loodrecht op de stroomrichting bestaan.

De wrijvingsverliezen zijn groter naarmate de snelheidsgradiënten groter zijn; bij een Newtonse vloeistof (zoals water bij benadering) heeft de schuifkracht (of wrijvingskracht) τ een lineaire relatie met de snelheidsgradiënt:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial n}$$

met:

- u = stroomsnelheid (m/s)
- n = coördinaat loodrecht op stroomrichting (m)
- μ = dynamische viscositeitscoëfficiënt (Ns/m^2) = $\nu.\rho$
- ν = kinematische viscositeitscoëfficiënt (m^2/s)
- ρ = soortelijke massa (kg/m^3)

De interne wrijving geeft aanleiding tot vervorming van de stroomlijnen en het ontstaan van wervels (turbulentie). Wervels ontwikkelen zich, groeien, kunnen samen gaan, verplaatsen zich met de stroming mee en ook dwars op de stroming, en dempen weer uit. Ze dragen bij aan een (her)verdeling van kinetische energie over het stroomprofiel (een vereffening van snelheidsverschillen door impulsuitwisseling) en spelen aldus een rol in loslating van stroming van constructieoppervlakken, verwijding van stralen, en gaan aanliggen van stroming tegen bodems, wanden enz. Bij het uitdempen van wervels wordt een deel van de kinetische energie omgezet in warmte.

In de toestroming naar de kribsectie in de stroomgoot ontstaan energieverliezen voornamelijk door bodemwrijving en wandwrijving, maar deze verliezen zijn relatief gering. In het convergerende deel met versnellende stroming naar de kruin van de krib zijn verliezen eveneens voornamelijk het gevolg van bodemwrijving en wandwrijving. De mate van ruwheid van de krib is van invloed op de aanpassing / ontwikkeling van de grenslaag op het boventalud en tevens op de turbulentie-intensiteit in de stroomlaag direct boven het talud. De stroomsnelheid bereikt boven de kruin een maximum; bij een korte kruin (zoals in het onderzoek van Wirken & Van Bladel) is de stroming naar boven gekromd en ontstaat als gevolg daarvan een drukverlaging in het gebied direct boven de kruin; de stroomsnelheid is dicht bij het kruinoppervlak daarom veelal het hoogst. De helling van het boventalud is bij korte kruin van invloed op de mate van kromming. De turbulentie-intensiteit boven de kruin heeft effect op de stroomsnelheidsverdeling in de verticaal en op de wijze van afstromen. In samenhang met de hoge stroomsnelheid boven de kruin treedt een lokale waterspiegeldaling op.

In het afstroomgedeelte direct na de kruin van de kribsectie moet de stroming zich aan het hogere doorstroomprofiel gaan aaanpassen. Dit kan globaal gezien op twee manieren. De eerste manier is dat de stroming het benedentalud blijft volgen tot aan de benedenstroomse bodem. De verwijding en impulsuitwisseling vindt plaats naar boven toe, naar het wateroppervlak. Dit proces van verwijden hoeft overigens niet over de volle breedte van de stroomgoot in dezelfde mate plaats te vinden: het is ook mogelijk dat de stroming bij afstromen eerst nog concentreert (overgang van platte straal op de kruin naar een meer ronde doorsnede) en vervolgens pas verwijdt. Bij lage benedenwaterstand en voldoende afvoer zal een watersprong optreden; de watersprong draagt zeer effectief bij aan het over korte afstand herverdelen en aanpassen van de stroming over het beschikbare doorstroomprofiel.
Bij de tweede manier van afstromen laat de stroming los op de kruin van de krib; de straal blijft bij het wateroppervlak en verwijdt zich naar de bodem toe.

Onder de straal, direct achter de krib, ontstaat een bodemneer. Door kromming van de stroomlijnen in de straal boven de neer kan de druk in de neer lager zijn dan bij een hydrostatische drukverdeling. Dit heeft een aanzuigend effect: de straal zal dichter achter de krib dan bij 'geventileerde' afstroming de bodem raken. De bodemneer draagt net als de neer in de watersprong op effectieve wijze bij aan het verwijden van de stroming.
Tussenvormen waarbij de stroming niet op de kruin maar op het benedentalud loslaat zijn ook mogelijk.

De helling en ruwheid van het boven- en benedentalud, de hoogte van het benedenwater ten opzichte van de kruin, het verval, de turbulentie-intensiteit boven de kruin, en de aanwezigheid van zijwanden zijn allemaal grootheden die de wijze van afstromen beïnvloeden. In het onderzoek van Wirken & Van Bladel zijn daarom de helling van het benedentalud en de ruwheid van boventalud, kruin en benedentalud alsmede de benedenwaterstand en het verval gevarieerd.

Bij het verwijden wordt veel stromingsenergie omgezet in turbulentie en gaat dan grotendeels via omzetting in warmte verloren; een deel van de stromingsenergie wordt ook omgezet in potentiële energie (de waterspiegel komt weer wat omhoog). Gesteld kan worden dat het energieverlies aan de afstroomzijde met expanderende stroming altijd aanzienlijk groter is dan het energieverlies aan aanstroomzijde met convergerende stroming. In het algemeen kan ook worden gesteld: hoe geleidelijker de verwijding aan afstroomzijde plaats vindt hoe kleiner het energieverlies. Gezien de vraagstelling van het onderzoek zou de verwijding bij hogere rivierwaterstanden dus bij voorkeur zeer geleidelijk moeten verlopen en bij lage waterstanden abrupt.

2.4 Effect van de viscositeit

Een stroming verliest voornamelijk energie als gevolg van wandwrijving en interne wrijving. Wrijving ontstaat doordat het water viskeuze eigenschappen heeft. De viscositeit van water is een functie van de temperatuur, zoals blijkt uit het volgende staatje:

Tabel 2-1 Viscositeit water als functie van temperatuur

temperatuur	*dynamische viscositeit* μ *(Ns/m^2)*	*kinematische viscositeit* ν *(m^2/s)*
10^o C	$1{,}33.10^{-3}$	$1{,}33.10^{-6}$
20^o C	$1{,}00.10^{-3}$	$1{,}00.10^{-6}$
30^o C	$0{,}80.10^{-3}$	$0{,}80.10^{-6}$

De watertemperatuur is bij het onderzoek van Wirken & Van Bladel vrijwel constant geweest (ca 15^o C). Niettemin is het in verband met een vergelijking met ander onderzoek en in verband met opschaling van modelwaarden naar prototypewaarden van belang om na te gaan in welke mate de hydraulische verliezen bij stroming over de kribsectie worden beïnvloed door een variatie van de viscositeit van het water. Dit zal worden gedaan aan de hand van een tweetal karakteristieke stromingsgevallen, namelijk stroming door een zogenaamde orifice (contractie en vervolgens verwijding met vrije grenslaag in het water) en stroming door een buis met zekere wandruwheid.

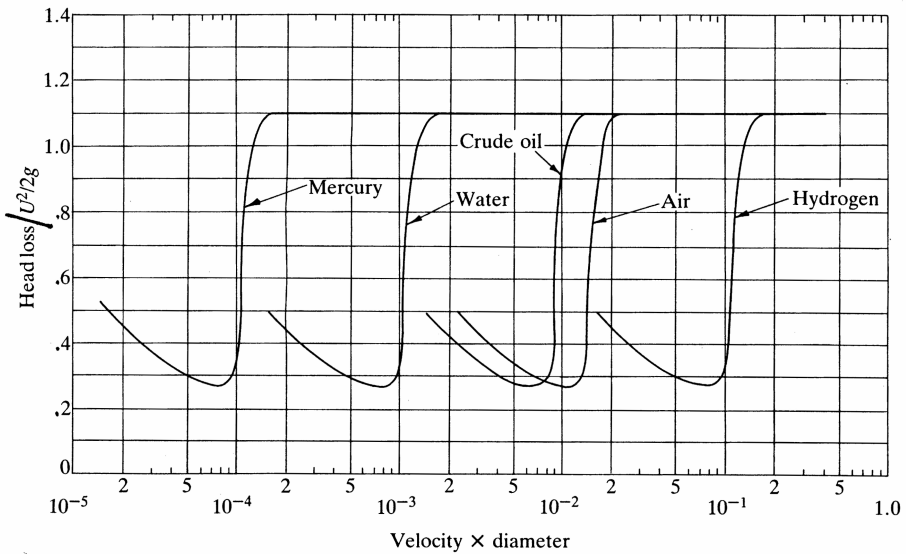
Stroming door orifice

In "Internal Flow Systems" [Miller, 1990] wordt een experiment beschreven, waarbij het energieverlies ΔH is gemeten over een schot met gat, dat in een gladde buis met diameter D is geplaatst. Er zijn vijf verschillende vloeistoffen / gassen gebruikt met kinematische viscositeit ν in de range $1{,}1.10^{-4} - 1{,}1.10^{-7}$:

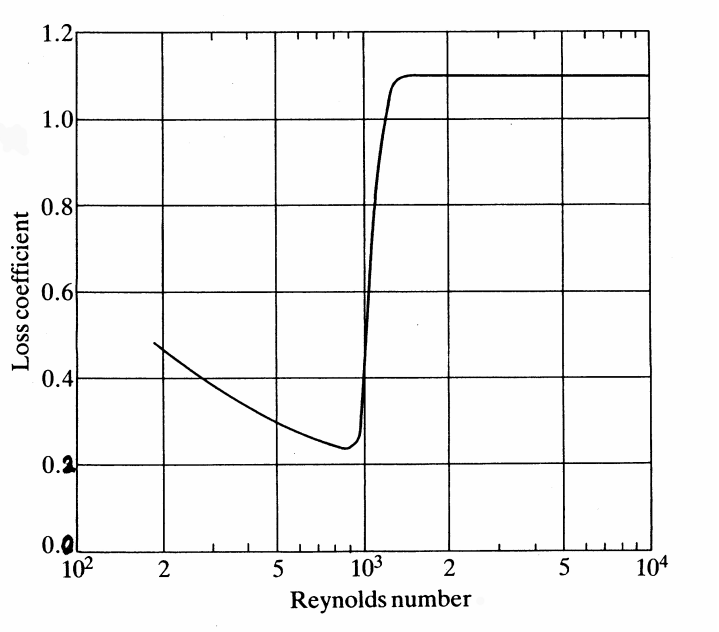
Tabel 2-2 Dichtheid en viscositeit van enkele vloeistoffen / gassen

stof	*dichtheid* *(kg/m³)*	*kinematische viscositeit ν* *(m²/s)*
waterstof	0,09	$1{,}1.10^{-4}$
lucht	1,2	$1{,}5.10^{-5}$
ruwe olie	860	$1{,}0.10^{-5}$
water	1000	$1{,}1.10^{-6}$
mercury	13600	$1{,}1.10^{-7}$

De stroomsnelheid U in de buis (gedefinieerd als de ongestoorde, doorsnede-gemiddelde aanstroomsnelheid vóór het schot) is gevarieerd. Het gemeten relatieve energieverlies $\Delta H/(U^2/2g)$ wordt voor elk van de vijf stoffen in Figuur 2-4 als functie van het product UD (U = stroomsnelheid) getoond (lineair-log schaal). Het verloop van de krommen blijkt hetzelfde te zijn en tevens blijkt (zie Figuur 2-5) dat alle krommen samen vallen wanneer het relatieve energieverlies (in de grafiek 'loss coefficient' genoemd) wordt uitgezet als functie van UD/ν (= getal van Reynolds). De plotselinge sprong bij $Re = 10^3$ hangt samen met een verandering van het karakter van de stroming: links van de sprong betreft laminaire stroming, rechts turbulente stroming. Ook het stroombeeld ter plaatse van de orifice verandert bij deze sprong: er ontstaat een sterkere contractie bij turbulente stroming. De verandering vindt bij het zeer 'vloeibare' mercury bij een factor 1000 lagere stroomsnelheid plaats dan bij het 'stroperige' waterstof. Het blijkt dus dat de viscositeit bepalend is voor de vraag bij welke stroomsnelheid de omslag van laminaire naar turbulente stroming plaats vindt. Na de overgang is het energieverlies ΔH evenredig met U^2, vóór de overgang is het energieverlies ΔH evenredig met $U\sqrt{U}$. De grootte van het energieverlies is, wanneer de stroming turbulent is geworden, niet meer afhankelijk van de kinematische viscositeit ν.



Figuur 2-4 Orifice: verwijdingsverlies als functie van product van stroomsnelheid U en buisdiameter D [Miller, 1990]



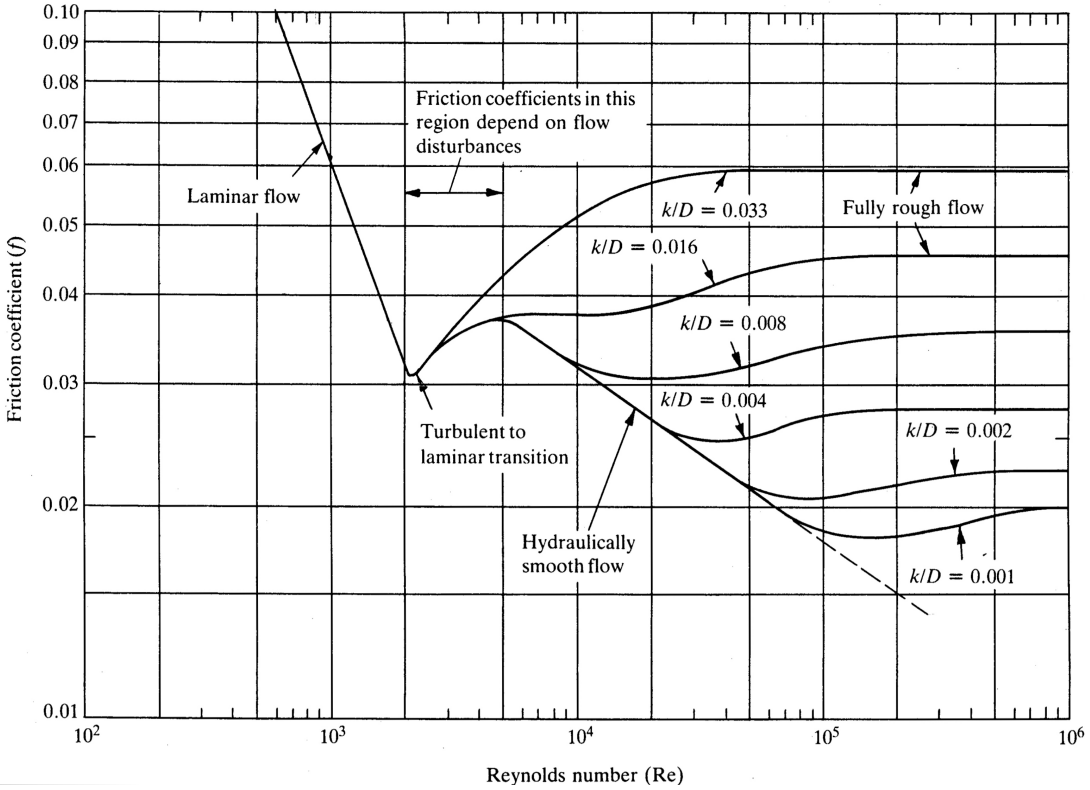
Figuur 2-5 Orifice: verwijdingsverlies als functie van Re [Miller, 1990]

Buisstroming

Figuur 2-6 toont het energieverlies bij stroming van water door buizen met verschillende ruwheid k (log-log schaal). Het relatieve energieverlies (in de vorm van de dimensieloze weerstandscoëfficiënt $f = \Delta H/\{(L/D).(U^2/2g)\}$, met L = buislengte, D = buisdiameter) is uitgezet als functie van UD/ν (= getal van Reynolds). De stroming is alleen laminair in gladde buizen en bij lage Reynolds waarden; vanaf Re = ca 2.10^3 wordt de stroming turbulent en wordt de stroomsnelheidsverdeling meer uniform over de buisdoorsnede. Ook bij de buisstroming geldt dat boven een zekere waarde van Re, afhankelijk ook van de wandruwheid k, het energieverlies ΔH evenredig is met U^2 (horizontale lijnen in de grafiek). In het gebied met laminaire stroming is het energieverlies evenredig met U. Het energieverlies is in de volledig turbulente toestand niet meer afhankelijk van de kinematische viscositeit ν. Deze toestand wordt eerder, dit wil zeggen bij lagere stroomsnelheid, bereikt naarmate de wandruwheid groter is.

Conclusies stroming door orifice en buisstroming

De kinematische viscositeit ν bepaalt bij welke stroomsnelheid U een verandering optreedt in het karakter van de stroming (turbulent of laminair). In geval van turbulente stroming is het stroombeeld anders dan bij laminaire stroming (bij turbulente stroming: sterkere contractie bij stroming door een opening en meer uniforme stroomsnelheidsverdeling bij stroming door een ruwe pijp); bij turbulente stroming is het energieverlies evenredig met U^2 en het energieverlies is niet meer afhankelijk van de kinematische viscositeit ν.



Figuur 2-6 Stroming door buis: wrijvingsverlies als functie van Re [Miller, 1990]

Stroming langs objecten

Bij stroming rond of langs gladde objecten is de viscositeit van invloed op het loslaten van de stroming vanaf het object. Het viscositeitseffect doet zich voornamelijk voor bij constructies met gekromde vorm. De viscositeit heeft invloed heeft op de ontwikkeling van turbulentie in de grenslaag, en omdat de mate van turbulentie in de grenslaag bepalend is voor de plaats van loslaten van de stroming op het gekromde oppervlak, beïnvloedt de viscositeit ook de stromingsweerstand. De turbulentieontwikkeling in de grenslaag wordt overigens ook beïnvloed door het turbulentieniveau van de aanstroming. Bij een ronde gladde paal is het viscositeitseffect bij hogere Reynoldswaarden ($Re > 2.10^5$) goed merkbaar doordat er bij toename van de stroomsnelheid een vrij plotselinge verandering optreedt in de wijze van afstromen (er ontstaat een smaller zog) en als gevolg hiervan vermindert de stromingsweerstand van de paal.

In geval van een hydraulisch ruw oppervlak is het viscositeitseffect vrijwel geheel ondergeschikt aan het effect van de wandruwheid, en wordt de turbulentieontwikkeling in de grenslaag en de plaats van loslating van de stroming, en daarmee ook de stromingsweerstand, voornamelijk door de ruwheid bepaald.

Bij hoekige vormen speelt de viscositeit eveneens geen of nauwelijks een rol in de stromingsweerstand, omdat de stroming loslaat van de hoekpunten en het stroombeeld dus voornamelijk wordt bepaald door de vormgeving van de constructie.

Stroming over kribsectie

Voor de stroming over de kribsectie kan worden gesteld dat de stroming zowel in het aanstroomdeel als in het afstroomdeel turbulent van karakter is (de optredende stroomsnelheid is voldoende hoog; bodem en krib zijn hydraulisch ruw in realistische situaties).

Energieverliezen ontstaan voornamelijk door wrijving met krib en bodem en door interne wrijving in vrije grenslagen bij verwijding na afstroming van de kruin; de stromingsverschijnselen hierbij zijn vergelijkbaar met de verschijnselen die optreden bij stroming langs een wand (buisstroming), stroming door een opening (orifice met vrije grenslagen in het benedenwater) of stroming om een hoekig of ruw object. De grenslaagontwikkeling op boventalud en kruin en de vorm van de kruin kunnen daarbij effect hebben op de lokale stroomsnelheidsverdeling boven de kruin en op de wijze van afstromen, maar de mate van kromming van de stroomlijnen is bij een krib met relatief geringe kruinbreedte een dominante factor.

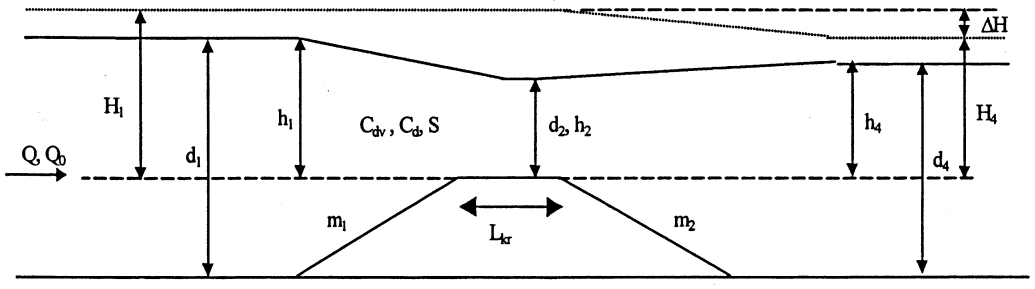
We kunnen nu concluderen dat de stromingsverliezen van de *turbulente* stroming over de kribsectie grotendeels door ruwheid en vormgeving van de krib worden bepaald en nauwelijks afhankelijk zijn van de viscositeit van het water. Dit betekent dat modelresultaten zonder problemen onderling kunnen worden vergeleken, ook wanneer de temperatuur van het water niet hetzelfde was bij de proeven, en ook kunnen schaalmodelresultaten (Froudegeschaald) in het algemeen zonder correctie (voor het niet schalen van de viscositeit van het water in het schaalmodel) naar het prototype worden vertaald, vooropgesteld dat de stroomsnelheid (en dus het getal van Reynolds) voldoende hoog is.

3 Herbeschouwing onderzoek Wirken & Van Bladel

Het onderzoek van Wirken & Van Bladel is een vervolg op het experimentele onderzoek van Bloemberg [Bloemberg, 2001]. Het werk van Bloemberg was gericht op het effect van de benedenstroomse helling van een zomerkade op het overstromingsdebiet. Voordat het onderzoek van Wirken & Van Bladel wordt herbeschouwd zullen eerst de resultaten van de studie van Bloemberg worden besproken. In de herbeschouwing zullen ook de resultaten van stroomsnelheidsmetingen worden meegenomen.

3.1 Experimentele studie Bloembergen

De experimentele studie is uitgevoerd in een stroomgoot met breedte 0,4 m, hoogte 0,4 m en lengte 14 m. Het water in de goot wordt via een afzonderlijk reservoir met vrij wateroppervlak rondgepompt. De goot is benedenstrooms voorzien van een instelbare overstortrand. Het debiet wordt gemeten met behulp van een Rehbock overlaat in de retourgoot.
In het onderzoek is de vorm van de kade (een sectiemodel met breedte gelijk aan de gootbreedte) gevarieerd: de benedenstroomse helling was achtereenvolgens verticaal, 1:4, 1:7 en 1:15. Het boventalud had steeds een helling van 1:4. De kade en de bodem van de goot waren belegd met stenen 5 – 6 mm. De hoogte a van de kade boven de met stenen belegde bodem bedroeg 0,2 m, de kruinbreedte L_k bedroeg 0,1 m (verhouding van kruinbreedte en kruinhoogte: 0,5). In Figuur 3-1 is de gebruikte terminologie aangegeven.



Figuur 3-1 Benaming van grootheden in onderzoek Bloemberg; Q_s = debiet bij gestuwde afvoer, Q_o = debiet bij ongestuwde afvoer [Bloemberg, 2001]

De proeven zijn uitgevoerd bij stationaire stromingsomstandigheden. Het debiet werd ingesteld op waarden van ca 50, 40, 30, 20 en 10 l/s. De benedenwaterstand werd in stapjes van ca 0,01 m verlaagd van de initiële waarde van 0,35 m tot een waarde waarbij men dacht dat de situatie met vrije, ongestuwde afvoer was bereikt (laagste ingestelde benedenwaterstand: 0,24 m, 0,04 m boven kruinniveau). De situatie met ongestuwde afvoer is per definitie de situatie waarbij de benedenwaterstand zo laag is dat deze geen effect meer heeft op de grootte van het overstortdebiet. In de situatie met ongestuwde afvoer leidt een verlaging van de benedenwaterstand niet tot een verandering van het overstortdebiet of de bovenwaterstand.

Bloemberg heeft het effect van de helling van het benedentalud op de afvoer over de kadesectie geanalyseerd door te kijken naar de verandering in de afvoercoëfficiënt C_d. De afvoercoëfficiënt werd als volgt gedefinieerd:

$$C_d = \frac{Q_{gemeten}}{\frac{2}{3} H_1 B \sqrt{2g \frac{H_1}{3}}}$$

met:

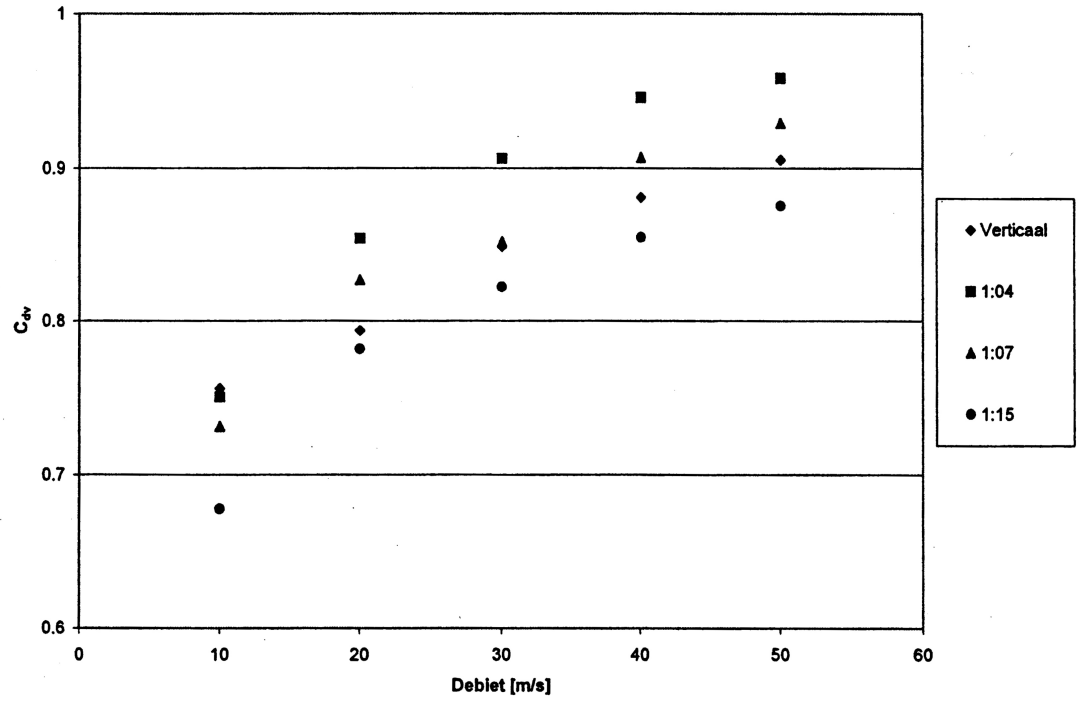
B = gootbreedte (m)
g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
Voor overige grootheden zie Figuur 3-1.

De formule sluit aan bij de formules die gebruikt worden voor brede overlaten, en is zowel bruikbaar voor gestuwde als ongestuwde afvoer.

Bij een horizontale overlaat met voldoende breedte (in stroomrichting gezien) ontstaan er horizontale, parallelle stroomlijnen, en is de maximale waarde van C_d bij *vrije*, *ongestuwde* afvoer en bij verwaarlozing van wrijvingsverliezen gelijk aan: $C_{dv} = 1{,}0$ (de waterdiepte is gelijk aan $2H_1/3$ en de snelheidshoogte is gelijk aan $H_1/3$).
De verhouding van bovenstroomse energiehoogte H_1 en kruinbreedte L_{kr} is van invloed op de grootte van het overstortdebiet bij ongestuwde afvoer: bij kleine waarde van H_1/ L_{kr} (zeer brede overlaat) kan de wrijving niet meer worden verwaarloosd en is C_{dv} kleiner dan 1,0, bij grote waarde van H_1/ L_{kr} gaat de overlaat over in een zogenaamde korte overlaat en gaat de kromming van de stroomlijnen een rol spelen in de afvoer, en met name ook de hoogte van de overlaat in relatie tot de bovenstroomse waterdiepte; de afvoercoëfficiënt C_{dv} kan nu groter dan 1,0 worden.

We zien dus dat het debiet over een kadesectie bij *vrije, ongestuwde* afvoer en bij gelijke bovenwaterstand ten opzichte van de kruin niet voor ieder kade-ontwerp hetzelfde hoeft te zijn, want de afvoer is afhankelijk van de geometrie van de kade en ook van de ruwheid van de bekleding. Anders gezegd: bij iedere kadevorm hoort een unieke C_{dv}-waarde, die in het algemeen ook afhankelijk kan zijn van de bovenwaterstand (en dus van het debiet) en van de ruwheid van de kade.

In onderstaande grafiek (Figuur 3-2), die is overgenomen uit het rapport van Bloemberg, is voor de onderzochte kadesecties C_{dv} uitgezet als functie van het debiet voor de verschillende onderzochte hellingen van het benedentalud. Uit de grafiek blijkt inderdaad dat het debiet, dus de bovenwaterstand, effect heeft op de C_{dv}-waarde bij ongestuwde afvoer. Overigens merkt Bloemberg op dat de situatie met vrije, ongestuwde afvoer mogelijk niet altijd werd gehaald in de proeven, met name niet bij kleinere afvoer en bij verticaal ‘benedentalud’. Het is dus mogelijk dat sommige van de C_{dv}-waarden in onderstaande grafiek hoger hadden moeten zijn (nb: gezien het feit dat de benedenwaterstand bij de proeven niet verder werd verlaagd dan een peil van 0,24 m boven de bodem, 0,04 m boven de kruin, is het zeer waarschijnlijk dat de situatie met vrije, ongestuwde afvoer niet altijd werd gehaald).



Figuur 3-2 Gemeten C_{dv} als functie van afvoer en helling benedentalud [Bloemberg, 2001]

Uit de grafiek blijkt het volgende: de afvoercoëfficiënt C_{dv} bij vrije, ongestuwde afvoer neemt flink toe met het debiet, of beter gezegd met H_1, en dus met de geometrische parameters H_1/L_k en H_1/a (de kruinbreedte L_k en de kadehoogte a waren constant bij het onderzoek). Mogelijk wordt deze toename van de C_{dv}-waarde veroorzaakt door een groter gebied van kromming van de stroomlijnen boven de kade bij toename van H_1 (een grote krommingsgebied van de stroomlijnen gaat gepaard met een sterkere drukverlaging direct boven de kruin, hetgeen de afvoer doet toenemen). Ook is het effect van wrijving geringer bij grotere waterdiepte (en dus bij grotere H_1), hetgeen mogelijk bijdraagt aan de grotere afvoer.

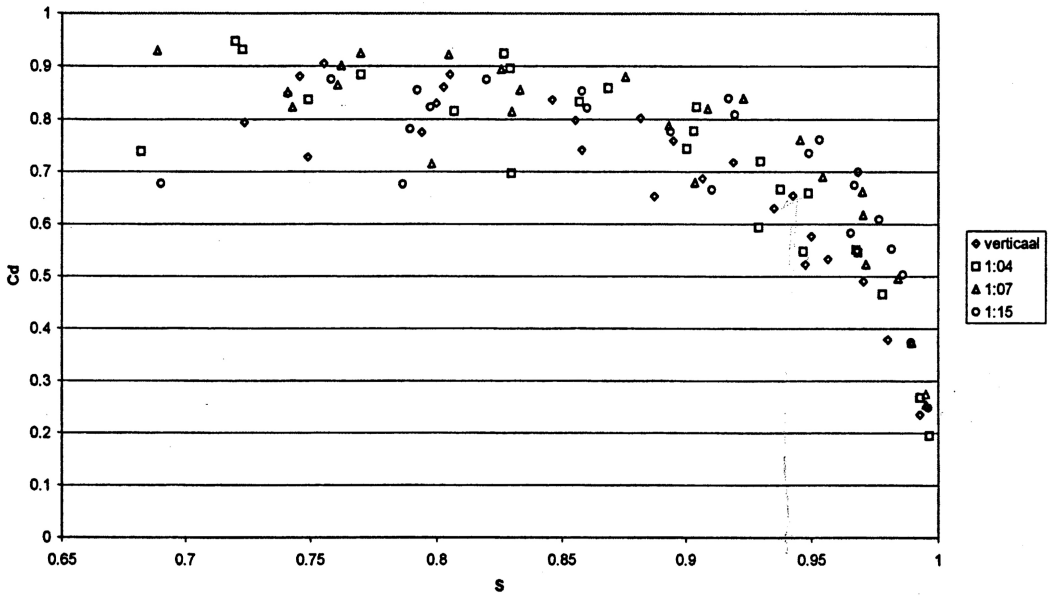
De helling van het benedentalud blijkt, volgens de grafiek, eveneens een significant effect te hebben: de C_{dv}-waarde is groter naarmate de helling steiler is. De C_{dv}-waarden voor een verticale beëindiging van de kade vallen uit de toon, maar zoals gezegd hadden deze waarden waarschijnlijk hoger moeten zijn (evenals de overige C_{dv}-waarden bij klein debiet).
De vraag is nu hoe het komt dat de helling van het benedentalud effect heeft op de vrije afvoer. We gaan er van uit dat in de meeste proefsituaties in het onderzoek van Bloemberg daadwerkelijk een vrije, ongestuwde afvoer was bereikt. Bij vrije afvoer (en dus lage benedenwaterstand) zal de overstortende straal naar beneden duiken en niet aan het wateroppervlak blijven. Er geldt dan dat een steiler benedentalud gepaard gaat met een sterkere kromming van de stroomlijnen vanaf de kruin naar beneden toe. Hierdoor ontstaat een lagere druk boven met name de kruin en het bovenste deel van het benedentalud, met als gevolg een hogere afvoer over de kadesectie. Dit zou de hogere C_{dv}-waarde bij steiler benedentalud kunnen verklaren.

Door stijging van de benedenwaterstand ontstaat de situatie met gestuwde afvoer en reduceert het debiet. De uit de metingen afgeleide afvoercoëfficiënt C_d bij gestuwde afvoer is in Figuur 3-3 (uit het rapport van Bloemberg) weergegeven als functie van de verdrinkingsgraad S. Deze is als volgt gedefinieerd (zie ook Figuur 3-1):

$$S = \frac{h_4}{h_1} \qquad (h_4 > 0)$$

$$S = 0 \qquad (h_4 \leq 0)$$

De C_d-waarden zijn in Figuur 3-3 door middel van verschillende symbolen naar de helling van het benedentalud onderscheiden.



Figuur 3-3 Afvoercoëfficiënt C_d als functie van verdrinkingsgraad S voor verschillende helling benedentalud [Bloemberg, 2001]

De C_d-waarden vertonen een brede band. Jammer genoeg zijn de waarden niet afzonderlijk per taludhelling gefit, waardoor het eventuele effect van de taludhelling op het debiet bij gestuwde afvoer niet duidelijk is. Algehele tendens is wel dat de C_d-waarde afneemt naarmate de verdrinkingsgraad S toeneemt (bij S =1 is er geen afvoer meer en moet C_d de waarde 0 aannemen). Opgemerkt zij dat het verval bij kleine afvoer gering was (enkele mm), zodat de mogelijke fout in de verdrinkingsgraad S als gevolg van meetonnauwkeurigheden in de waterstanden dan het grootst is.

In [Bijman & Akkerman, 2002] is een aantal proeven uit het onderzoek van Bloemberg geselecteerd in het gebied $0,7 < S < 1,0$ (*gestuwde* afvoer), bij verschillende waarden van H_1/L_k ($0,6 < H_1/L_k < 1,7$), en met verschillende benedentaludhelling. Voor deze geselecteerde proeven is de afvoercoëfficiënt berekend (de definitie van de afvoercoëfficiënt was anders dan bij Bloemberg, want gebaseerd op de benedenwaterstand; zie ook bij Wirken en Van Bladel, Paragraaf 3.2).

Uit de vergelijking van resultaten van de geselecteerde proeven blijkt dat een flauwere benedentaludhelling bij *hogere* bovenstroomse waterstand en *gestuwde* afvoer tot een grotere afvoercoëfficiënt leidt. De hogere afvoercoëfficiënt wordt toegeschreven aan het geringere stromingsverlies bij flauwere benedentaludhelling (helling van 1:7 en 1:15): de stroming blijft bij afstroming vanaf de kruin contact met het benedentalud houden en verwijdt bij flauwere helling meer geleidelijk over de gehele verticaal. Er wordt daardoor ook relatief weinig turbulentie opgewekt (dus relatief gering energieverlies). Bij steilere helling (verticale beëindiging en helling 1:4) blijft de stroming los van het benedentalud en wordt er op de vrije grenslaag in de bodemneer veel turbulentie opgewekt, hetgeen leidt tot een groter energieverlies dan bij flauwere benedentaludhelling. Deze overwegingen gelden dus voor *gestuwde* afvoer en worden ondersteund door de resultaten van stroomsnelheidsmetingen, die Bloemberg voor enkele situaties heeft uitgevoerd. Deze metingen laten zien dat er bij flauw talud contact blijft tussen de afstroming en het benedentalud (geen bodemneer), maar de afstroming is toch vooral in het hogere deel van het benedenstroomse water geconcentreerd.

Bij *lagere* bovenstroomse waterstand en *gestuwde* afvoer is de afvoercoëfficiënt niet afhankelijk van de benedentaludhelling, zo wordt geconcludeerd in [Bijman & Akkerman, 2002]. De afvoercoëfficiënt is laag, vergelijkbaar met de waarde bij steil benedentalud en hoge bovenwaterstand. Dit zou er op kunnen duiden dat bij *lage* bovenwaterstand en gestuwde afvoer, en bij de toegepaste ruwheid met steentjes 5 – 6 mm, de afstroming steeds los blijft van het benedentalud, ongeacht de helling (tot 1:15), waardoor in de bodemneer relatief veel energie verloren gaat. Voor deze situaties zijn in het rapport van Bloemberg geen snelheidsmetingen beschikbaar. Het eventueel losblijven van de stroming van het benedentalud bij lage bovenwaterstand en gestuwde afvoer zou te maken kunnen hebben met de vorm van de kruin (hoekige vorm), de mate van kromming van de stroomlijnen boven de kruin, en met de ruwheid van de kadesectie. In Paragraaf 3.4.3 wordt hier op terug gekomen.

Bij overlaten is het gebruikelijk om het reducerende effect van de benedenwaterstand aan te geven met de reductiefactor C_s; deze factor is een functie van de verdrinkingsgraad S (zie ook Figuur 3-1):

$$C_S = f(S) = \frac{Q}{Q_o} = \frac{C_d}{C_{dv}}$$

$$S = \frac{h_4}{h_1} \qquad (h_4 > 0)$$

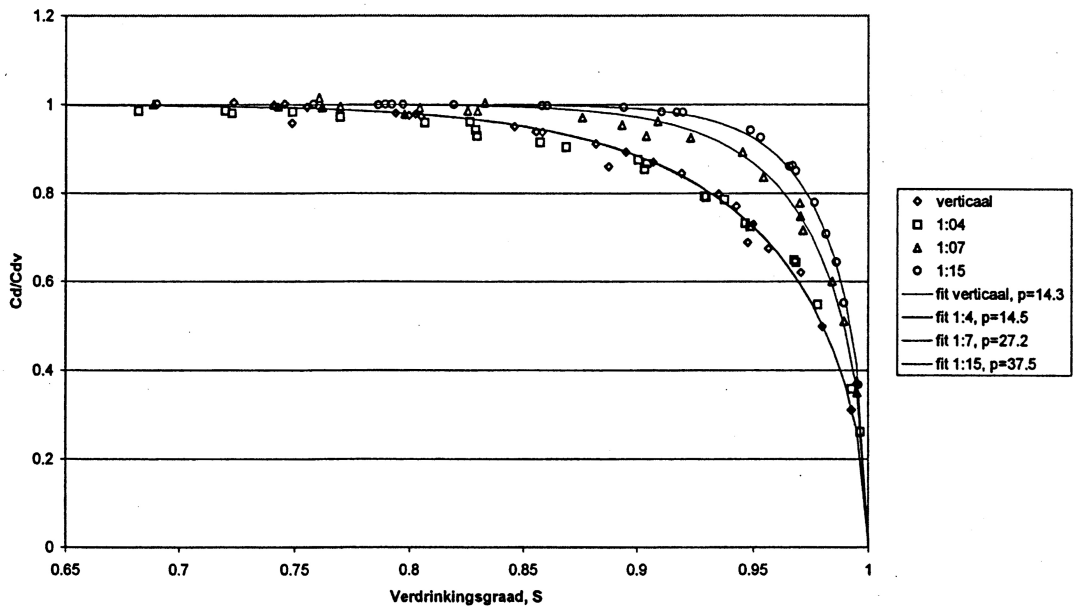
$$S = 0 \qquad (h_4 \leq 0)$$

met:

Q = debiet bij gestuwde afvoer (m^3/s)
Q_o = debiet bij vrije, ongestuwde afvoer (m^3/s)

Bloemberg heeft de reductiefactor C_s bepaald voor de kadesectie bij gestuwde afvoer. De resultaten van deze exercitie zijn in Figuur 3-4 weergegeven als functie van de verdrinkingsgraad S.
De resultaten zijn per benedentaludhelling gefit. Uit de grafiek blijkt dat bij flauwere benedentaludhelling (1:7 en 1:15) een geringere reductie (grotere C_s-waarde) optreedt als functie van de verdrinkingsgraad dan bij steilere benedentaludhelling (verticaal en 1:4).

Nb: mogelijk zouden de C_{dv}-waarden bij de verticale beëindiging wat groter moeten zijn, zie hiervoor, en de C_s-waarden in de grafiek daardoor nog wat kleiner.



Figuur 3-4 Reductiefactor $C_s = C_d/C_{dv}$ bij gestuwde afvoer [Bloemberg, 2001]

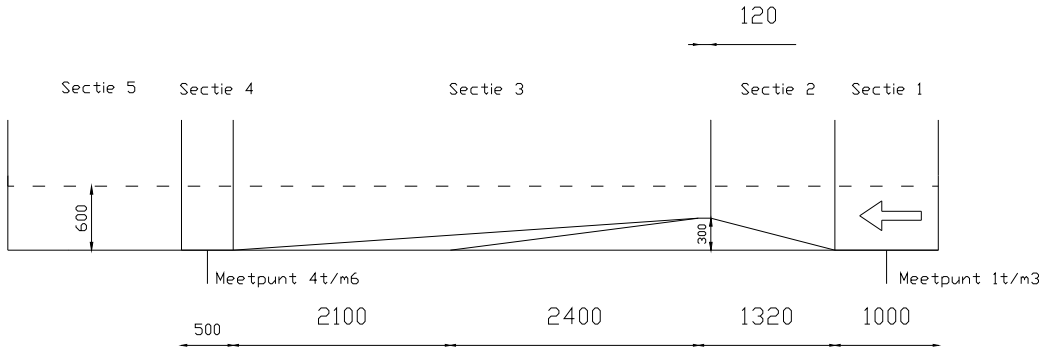
Houden we de bovenwaterstand constant, dan correspondeert het oplopen van de benedenwaterstand met een vergroting van de verdrinkingsgraad S. De grafiek, geldig voor *gestuwde* afvoer, geeft nu aan dat een oplopende benedenwaterstand bij een steilere benedentaludhelling een sterker effect heeft op de afvoer dan bij een flauwere benedentaludhelling. Omdat de stroming bij steilere benedentaluds en gestuwde afvoer los blijft van het talud is het effect van een oplopende benedenwaterstand waarschijnlijk vooral merkbaar in de wijze van afstromen vanaf de kruin van de kadesectie: mogelijk blijft de straal langer hoog. Dit zou gepaard kunnen gaan met de vorming van een grotere bodemneer en daardoor met groter energieverlies.

3.2 Experimenten van Wirken & Van Bladel

De experimenten van Wirken & Van Bladel voor een sectie van een krib zijn in een stroomgoot met hoogte van 0,7 m, breedte van 0,5 m en lengte van 27 m uitgevoerd. Het water wordt in een gesloten circuit, via een retourleiding onder de goot, rondgepompt. De goot is voorzien van een elektro-magnetische debietmeter in de retourleiding.

De vorm van de kribsectie is in het onderzoek gevarieerd; de helling van het boventalud was constant 1:4, de helling van het benedentalud was 1:8 of 1:15; het merendeel van de proeven is evenwel uitgevoerd voor een benedentalud van 1:8. (Opmerking: er was ook een helling van 1:4 voor het benedentalud voorbereid, maar helaas is deze helling wegens tijdgebrek niet onderzocht).
De globale maten van de kribsectie zijn in Figuur 3-5 aangegeven (hoogte kruin ca 0,32 m boven de bodem, kruinbreedte 0,12 m, maximale benedenstroomse waterstand ca 0,57 m boven de bodem).

De verhouding van kruinbreedte en kruinhoogte bedraagt 0,38; deze waarde is kleiner dan de waarde van 0,5 bij het onderzoek van Bloemberg (dus kortere overlaat). Ook is de kruin van de kribsectie in tegenstelling tot de kribsectie bij het onderzoek van Bloemberg afgerond, zie Figuur 3-7. De maten van de kribsectie corresponderen met de maten van een realistische krib wanneer een lengteschaal van ca 1:25 wordt toegepast.



Figuur 3-5 Verticale doorsnede kribsectie [Wirken & Van Bladel, 2004]

De ruwheid van boventalud, kruin en benedentalud is gezamenlijk en in verschillende combinaties gevarieerd, zie het proevenprogramma in Tabel 3-2. De aansluitende bodem aan boven- en benedenstroomse zijde bestond steeds uit pvc platen en had een lage ruwheid, vergelijkbaar met de laagste toegepaste ruwheid van de krib. De ruwheid wordt in het proevenprogramma aangeduid met een cijfer 1,.. 5. De betekenis van deze cijfers is als volgt:

Tabel 3-1 Toegepaste ruwheid in model Wirken & Van Bladel

Ruwheid	Materiaal	schatting van k_s (mm)	$u^* k_s/\nu$ boven kruin (-)
1	breuksteen 22 – 40 mm	55	5600
2	breuksteen 11 – 14 mm	20	1400
3	breuksteen 5 – 8 mm	7	380
4	dakleer op bitumen	0,5	17
5	geschuurd en geverfd multiplex; aluminium kruin	0,2	6
	pvc bodemplaten	0,2	0,85 in aanstroming / begin krib

Bij een aantal proeven is op boventalud, kruin en benedentalud een verschillende ruwheid toegepast. Dit wordt aangeduid met een cijfercombinatie, bijvoorbeeld 1,1,5 (boventalud: ruwheid 1, kruin: ruwheid 1, benedentalud: ruwheid 5).

De stenen aangeduid met ruwheid 1 en 2 zijn los, in een laagdikte van $2.D_{50}$, neergelegd, zij het dat horizontale ribben zijn toegepast om afschuiven tegen te gaan.

De ruwheid k_s bedraagt ca $2.D_{n50} = 1{,}7.D_{50}$. De stenen aangeduid met ruwheid 3 zijn in een enkele laag geplakt; k_s bedraagt ca D_{50}.
Ruwheid 3 komt overeen met de ruwheid van de kadesectie in het onderzoek van Bloemberg. De k_s-waarden van de gladde bekleding aangeduid met ruwheid 4 en ruwheid 5 zijn geschat op basis van literatuurgegevens.

In de tabel is de ruwheidsgrootheid u^*k_s/ν aangegeven. Deze ruwheidsmaat is relevant voor de ontwikkeling van turbulentie in de grenslaag en voor de mate van energieverlies door wrijving op de bodem, en heeft daarmee invloed op de stroomsnelheidsverdeling in de verticaal. De schuifspanningssnelheid u^* is gedefinieerd als:

$$u^* = \frac{U}{C}\sqrt{g}$$

$$C = 18\log\frac{12R}{k_s + \delta/3{,}5}$$

met:

- U = diepte- en tijdgemiddelde stroomsnelheid (m/s)
- C = Chèzy coëfficiënt ($m^{0,5}/s$)
- g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
- R = hydraulische straal (m)
- δ = dikte laminaire grenslaag (m)

De maat δ is alleen van belang bij een hydraulisch gladde bodem. De boven gedefinieerde schuifspanningssnelheid u^* geldt in feite voor uniforme stroming met ontwikkelde grenslaag en ontwikkeld snelheidsprofiel. Deze situatie doet zich voor in de aanstroming naar de kribsectie. Bij een relevante *lage* aanstroomsnelheid van ca 0,1 m/s wordt een waarde van 0,005 m/s voor u^* gevonden en een waarde van 0,85 voor de ruwheidsgrootheid u^*k_s/ν. De karakterisering 'hydraulisch glad' (kriterium: $u^*k_s/\nu < 5$) is daarmee van toepassing op de aanstroming boven de pvc platen. Dit geldt ook voor een *hoge* aanstroomsnelheid (maximale aanstroomsnelheid in het model ca 0,4 m/s).

Bij de stroming over de kribsectie moet de toestroming zich aanpassen aan de andere ruwheid van het kriboppervlak en dit vraagt om een zekere aanpassingslengte. Bovendien moet de stroming versnellen naar de kleinere doorstroomhoogte boven de krib. Boven de kruin, aan het eind van het versnellingsgebied, zal de grenslaag nog in ontwikkeling zijn en niet corresponderen met stationaire evenwichtscondities. Niettemin is als ruwe indicatie de ruwheidsgrootheid u^*k_s/ν met bovenstaande formules uitgerekend voor een stroomsnelheid van ca 0,7 m/s boven de kruin van de krib bij een waterdiepte van 0,05 m boven de krib (overeenkomend met een *lage* aanstroomsnelheid van 0,1 m/s), en in Tabel 3-1 aangegeven. De berekende waarden geven aan dat veelal van een hydraulisch ruwe kruin kan worden gesproken (kriterium: $u^*k_s/\nu > 70$), behalve bij de gladdere kribuitvoeringen (ruwheid 5 met geverfde multiplex taluds en aluminium kruinplaat, en ruwheid 4 met taluds bekleed met dakleer en aluminium kruinplaat). Overigens is de stroomsnelheid bij de meeste proeven hoger en daarmee ook de ruwheidsmaat u^*k_s/ν.

De vraag is nu hoe belangrijk het effect van de ruwheid is op de stroomsnelheidsverdeling boven de kruin, op het energieverlies en op de wijze van afstromen.

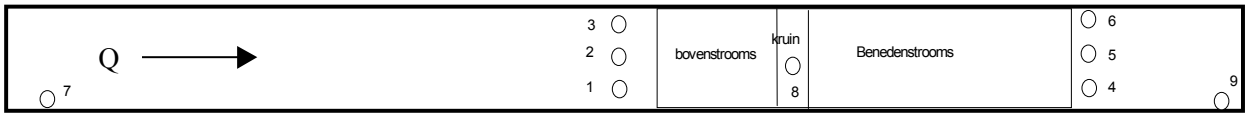
In ieder geval geldt dat de stroomsnelheidsverdeling boven de kruin ook in belangrijke mate wordt gedicteerd door de versnelling van het water naar de kruin toe en door de kromming van de stroombanen boven de kruin.
Bij de interpretatie van de resultaten voor de kribsecties met lage ruwheid (ruwheden 4 en 5) moet er rekening mee worden gehouden dat een hydraulisch gladde kribbekleding in werkelijke situaties niet voorkomt.

Tabel 3-2 Proevenprogramma Wirken & Van Bladel [Wirken & Van Bladel, 2004]

Proevenprogramma													
benedenwaterstand tov de kruin (cm)	benedentalud 1:8 gelijke ruwheid van boventalud, kruin en benedentalud					benedentalud 1:15 gelijke ruwheid		combinatie kribben; benedentalud 1:8 ongelijke ruwheid van boventalud, kruin en benedentalud					
	ruwheid 1	ruwheid 2	ruwheid 3	ruwheid 4	ruwheid 5	ruwheid 3	ruwheid 5	ruwheid 1,1,5	ruwheid 1,5,5	ruwheid 5,1,1	ruwheid 5,5,1	ruwheid 3,3,5	ruwheid 5,3,5
-0.9	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	
3.4	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	
8.4	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	
18.4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
22.4	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	

Bij de proeven zijn vijf verschillende waterstanden aan benedenstroomse zijde van de kribsectie ingesteld (zie Tabel 3-2), variërend van een peil even onder de kruin van de krib tot een peil ruim boven de krib, en daarbij is het debiet stapsgewijs opgevoerd (2 à 4 debietstappen) met instandhouding van de benedenwaterstand.

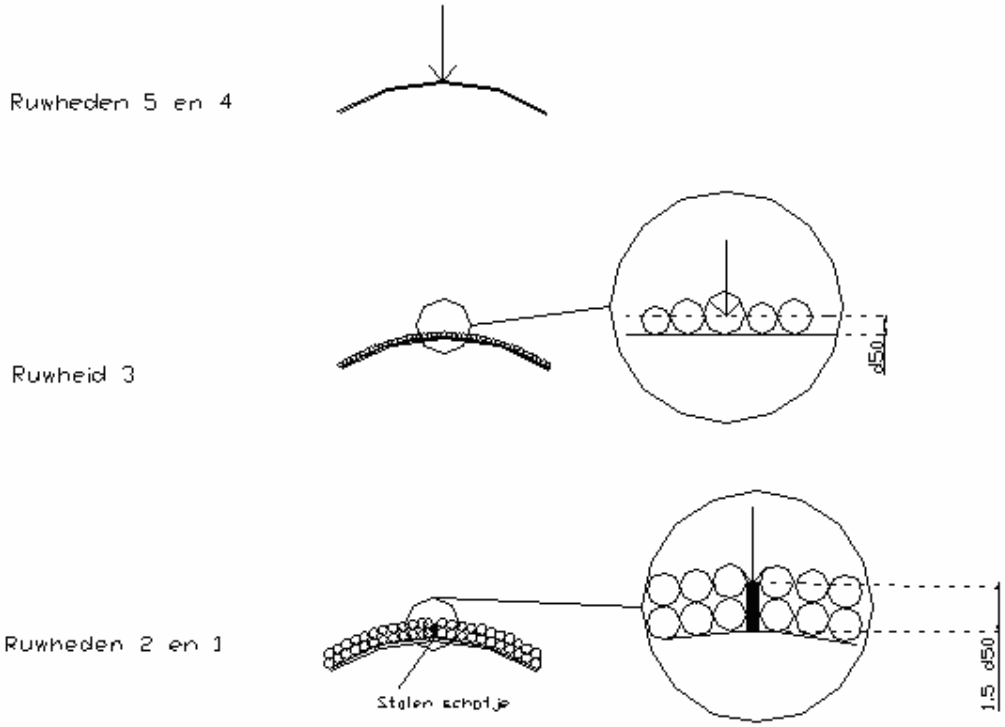
De bovenwaterstand en benedenwaterstand zijn gemeten in de hartlijn van de goot, op locaties 2 en 5 (zie Figuur 3-6). De waterstanden zijn gemeten met behulp van drukaansluitingen in de bodem en met peilnaalden in stijgbuizen afgelezen. De drukmetingen geven een zekere uitmiddeling van de ligging van de waterspiegel zowel in de tijd als in een gebiedje om het meetpunt. In dwarsrichting van de goot, naast meetpunten 2 en 5, zijn op identieke wijze waterstanden gemeten; uit deze metingen bleek dat de variatie van de waterspiegel in dwarsrichting verwaarloosbaar is.



Figuur 3-6 Bovenaanzicht kribsectie en meetpunten [Wirken & Van Bladel, 2004]

De positie van de kruin van de kribsectie en de waterspiegel boven de kruin zijn gemeten met een vaste peilnaald (meetpunt 8). De kruinhoogte is afhankelijk van de ruwheid van de bekleding op de kruin en is gedefinieerd als aangegeven in Figuur 3-7. Bij ruwheden 1 en 2 is op de kruin een lekbeperkende strip toegepast; de bovenkant van deze strip met hoogte $1{,}5.D_{50}$ werd gedefinieerd als de kruinhoogte van de kribsectie. Stenen op de kruin staken boven deze strip uit.

De kruin was in stroomrichting gezien niet horizontaal: de stenen waren volgens een vloeiende, gebogen lijn neergelegd; de ondergrond was enigszins hoekig gezet, zoals in Figuur 3-7 aangegeven. Bij ruwheid 3 werd geen lekbeperkende strip toegepast. De kruin van de kribsectie werd gedefinieerd als de positie van de ondergrond verhoogd met D_{50}. Bij de gladste krib, ruwheden 4 en 5, bestond de kruin uit een gebogen, dunne aluminium plaat, die vloeiend aansloot op boven- en benedentalud.
De definitie van de kruin is van belang omdat waterstanden in afvoerberekeningen ten opzichte van de kruin worden gekozen. Gezien de arbitraire definitie van de kruinpositie bij ruwheden 1, 2 en 3, zal aan de gevolgen van deze keuze aandacht worden besteed in de analyse.



Figuur 3-7 Definitie kruinhoogte [Wirken & Van Bladel, 2004]

De kribsectie zelf was volledig waterdicht uitgevoerd. In stationaire condities was het debiet gemeten in de retourleiding van de goot dus gelijk aan het debiet over de kruin van de kribsectie.

De meetresultaten (debiet, boven- en benedenwaterstand) zijn vertaald in een afvoercoëfficiënt, waarna deze afvoercoëfficiënt is gepresenteerd als functie van ruwheid, kribvorm, benedenwaterstand, en verdrinkingsgraad. De door Wirken & Van Bladel gebruikte benamingen voor de verschillende variabelen zijn hetzelfde als in het rapport van Bloemberg (zie Figuur 3-1).

Wirken & Van Bladel hebben de afvoercoëfficiënt C_d als volgt gedefinieerd:

$$C_d = \frac{Q_{gemeten}}{Bh_4\sqrt{2g(H_1 - h_4)}}$$

met:

$Q_{gemeten}$ = gemeten debiet
B = gootbreedte (m)
g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
H_1 = energiehoogte bovenstrooms tov de kruin van de kribsectie (meetlocatie 2)
h_4 = waterstand benedenstrooms tov de kruin van de kribsectie (meetlocatie 5)

Ongelukkigerwijs wordt met deze formule een negatieve afvoercoëfficiënt C_d berekend bij een benedenwaterstand lager dan de kruin en neemt C_d zeer hoge waarden aan bij kleine h_4 en/of klein verval (H_1-h_4). De waarde van C_d wordt daardoor ook zeer gevoelig voor de nauwkeurigheid waarmee de waterstanden ten opzichte van de kruin zijn gemeten. Bij *ongestuwde* afvoer is de formule principieel onjuist omdat de C_d-waarde verandert bij verandering van de benedenwaterstand terwijl het debiet niet verandert.

Om deze redenen en omdat we juist in het gebied met kleine h_4 en kleine (H_1-h_4) zijn geïnteresseerd, is bovenstaande formulering niet geschikt en zullen we hier de formulering van Bloemberg gebruiken:

$$C_d = \frac{Q_{gemeten}}{\frac{2}{3} H_1 B \sqrt{2g \frac{H_1}{3}}}$$

met:

$Q_{gemeten}$ = gemeten debiet (m^3/s)
B = gootbreedte (m)
g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
H_1 = energiehoogte bovenstrooms tov de kruin van de kribsectie (meetlocatie 2)

Deze keuze maakt ook de onderlinge vergelijking met de resultaten van Bloemberg eenvoudiger.
Wirken & Van Bladel hebben zowel stromingssituaties met vrije, ongestuwde afvoer onderzocht als situaties met gestuwde afvoer. De afvoerformule van Bloemberg kan op beide situaties worden toegepast. De verdrinkingsgraad S wordt gedefinieerd als:

$$S = \frac{h_4}{h_1} \qquad (h_4 > 0)$$
$$S = 0 \qquad (h_4 \leq 0)$$

met:

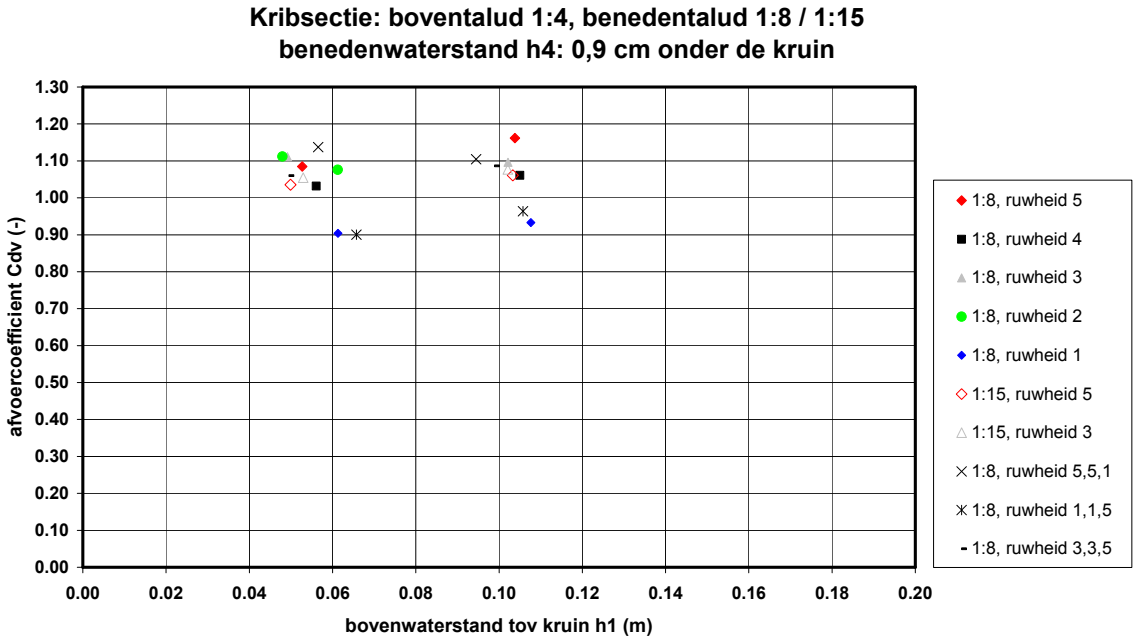
h_1 = waterstand bovenstrooms tov de kruin van de kribsectie (meetlocatie 2)
h_4 = waterstand benedenstrooms tov de kruin van de kribsectie (meetlocatie 5)

3.3 Meetresultaten van Wirken & Van Bladel

Wirken & Van Bladel hebben zich in hun onderzoek beperkt tot een relatief flauwe benedentaludhelling van 1:8 en 1:15. De benedenwaterstand is gevarieerd van een positie onder de kruin van de krib tot een positie ruim boven kribniveau (vijf waterstanden: -0,9 cm, +3,4 cm, +8,4 cm, +18,4 cm en +22,4 cm). Het debiet is bij alle benedenwaterstanden stapsgewijs vergroot (2 à 4 debietstappen; grootste debiet bij enkele proeven ca 100 l/s). Voorts is de ruwheid van de kribbekleding gevarieerd. Voor een overzicht van de proeven zie Tabel 3-2.

3.3.1 Ongestuwde afvoer

In de analyse worden nu eerst de meetresultaten bij vrije, ongestuwde afvoer geselecteerd. Dit betreft de situatie met lage benedenwaterstand (-0,9 cm). De berekende C_{dv}-waarde is in onderstaande Figuur 3-8 als functie van de bovenwaterstand voor verschillende combinaties van benedentaludhelling en ruwheid aangegeven. De laagste bovenwaterstand van ca 0,05 m correspondeert met een afvoer van ruwweg 10 l/s, de hoogste bovenwaterstand van ca 0,10 m correspondeert met een afvoer van ruwweg 30 l/s.



Figuur 3-8 Afvoercoëfficiënt bij ongestuwde afvoer, resultaten Wirken & Van Bladel

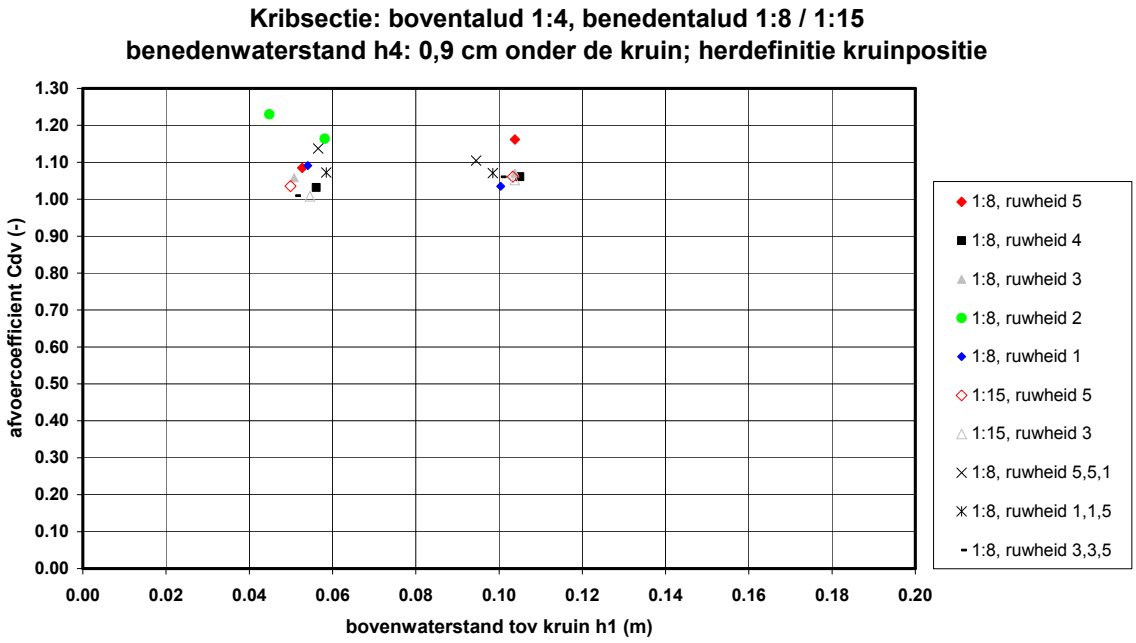
Uit de grafiek blijkt dat de bovenwaterstand geen relevante invloed heeft op de C_{dv}-waarde; bij het onderzoek van Bloemberg was die invloed er wel (vergelijk met Figuur 3-2). Ook zijn de C_{dv}-waarden in het onderzoek van Wirken & Van Bladel aanmerkelijk hoger.

Zeer waarschijnlijk moet de oorzaak van deze verschillen gezocht worden in geometrische factoren: de kribsectie van Bloemberg had een grotere kruinbreedte-kruinhoogte verhouding (relatief bredere, lagere overlaat) en was in tegenstelling tot de kribsectie van Wirken & Van Bladel niet 'gestroomlijnd'. Dit betekent dat het ontstaan van een gebied met doorgaande gekromde stroomlijnen boven de kruin van de kribsectie van Bloemberg mede afhankelijk was van de hoogte van de bovenwaterstand; bij de kribsectie van Wirken & Van Bladel is die afhankelijkheid er niet of nauwelijks. De vergelijking met Bloemberg maakt duidelijk dat geometrische factoren een dominant effect kunnen hebben op de afvoer over een kribsectie.

Uit Figuur 3-8 blijkt voorts dat de helling van het benedentalud (1:8 of 1:15) in de situatie met vrije ongestuwde afvoer geen belangrijk effect heeft op de grootte van de afvoer.
Er is wel een tendens dat een gladde kribsectie (ruwheid 5) meer afvoert dan een ruwe kribsectie (ruwheid 1). Daarbij lijkt de ruwheid van boventalud en kruin meer van invloed te zijn dan de ruwheid van het benedentalud, zo komt uit de resultaten van de proeven met gecombineerde ruwheid naar voren.

Zoals gezegd, zie Paragraaf 3.2, is de definitie van de kruinpositie van belang voor de bepaling (via H_1) van de afvoercoëfficiënt C_d. We zullen daarom nagaan wat het effect is van een andere definitie van de kruinpositie bij ruwheden 1, 2 en 3. Bij ruwheden 1 en 2 zijn de stenen op de kruin neergelegd in een laagdikte van $2D_{50}$ en is ter beperking van de lek door de steenlaag heen een strip met hoogte van $1{,}5D_{50}$ aangebracht. Wirken & Van Bladel hebben de bovenkant van de strip als kruinpositie gedefinieerd. De vrij grote stenen steken echter flink boven de strip uit en blokkeren daarmee effectief een deel van het doorstroomprofiel. Het lijkt daarom beter om de doorstroomhoogte wat kleiner te kiezen. We doen dit door de kruinpositie wat hoger te definiëren, namelijk op $0{,}25D_{50}$ boven de bovenkant van de strip.
Bij ruwheid 3 is een enkele steenlaag op de onderplaat aangebracht met behulp van cementpoeder. Wirken & Van Bladel hebben de kruinpositie bij ruwheid 3 gekozen als de positie van de onderplaat vermeerderd met de D_{50} van de steensortering. Omdat er water door het bovenste deel van de steenlaag heen stroomt (hoogte vergelijkbaar met de maat van $0{,}5D_{50}$ boven de lekbeperkende strip bij ruwheden 1 en 2), is het effectieve doorstroomprofiel wat groter, en we kiezen er voor om de kruinpositie te definiëren op $0{,}75D_{50}$ boven de onderplaat. Met deze herdefinitie van de kruinpositie (bij alle drie ruwheden $0{,}25D_{50}$ onder de nominale bovenkant van de steenlaag) wordt meer consistentie verkregen. De definitie van de kruinpositie blijft evenwel arbitrair.

Met als uitgangspunt de geherdefinieerde kruinpositie bij ruwheden 1, 2 en 3 zijn de waterstanden h_1 en h_4 ten opzichte van de kruin en de energiehoogte H_1 gecorrigeerd en de afvoercoëfficiënt C_d en de verdrinkingsgraad $S = h_4 / h_1$ opnieuw berekend. De grafiek van Figuur 3-8 verandert nu als aangegeven in Figuur 3-9.
Het blijkt dat met deze herdefinitie van de kruinpositie hogere C_d-waarden worden verkregen voor ruwheden 1 en 2, en iets lagere C_d-waarden voor ruwheid 3. Met deze andere C_d-waarden valt niet langer meer een tendens waar te nemen van een toenemende afvoercoëfficiënt met afnemende ruwheid van de kribsectie.



Figuur 3-9 Afvoercoëfficiënt bij ongestuwde afvoer; kruinpositie geherdefinieerd (vergelijk met Figuur 3-8)

Het stroombeeld aan benedenstroomse zijde was in de onderzochte situaties met vrije afvoer bij de gladde kribsectie (ruwheid 5) veelal anders dan bij de ruwe kribsectie (ruwheid 1). Bij de gladde kribsectie ontstond bij ongeveer gelijke hydraulische condities een watersprong, bij de ruwe kribsectie vaak nog niet. Vergelijk bijvoorbeeld de foto's in Figuur 3-10; de hydraulische condities (debiet Q, bovenwaterstand h_1, benedenwaterstand h_4) zijn respectievelijk 11,25 l/s, +5,3 cm, en -0,7 cm bij de gladde kribsectie (foto links) en 11,75 l/s, +5,4 cm, en -1,6 cm bij de ruwe kribsectie (foto rechts). Definitie van de kruin als hierboven aangegeven. De wijze van afstromen over de kruin is in beide situaties hetzelfde. Het feit dat bij de gladde kribsectie een watersprong ontstaat, wijst er op dat de afstroomsnelheid langs het benedentalud hoger is (ondanks het wat lagere debiet). Hieruit kunnen we concluderen dat bij de gladde kribsectie minder energie door wrijving op het benedentalud verloren gaat in de situatie met vrije, ongestuwde afvoer, en waarschijnlijk meer door middel van de watersprong.

De situaties met vrije ongestuwde afvoer over de kribsectie zijn voor de praktijk niet relevant. We zullen ons daarom gaan richten op gestuwde afvoer bij klein verval, waarbij met name zal worden gekeken naar de mogelijke verschillen tussen lagere waterstanden en hogere waterstanden wat betreft de afvoer en stroombeelden.
Het reducerende effect van de benedenwaterstand op de afvoer zal niet, zoals Bloemberg heeft gedaan, worden omgerekend naar een reductiefactor $C_s = C_d / C_{dv}$, omdat de C_{dv}-waarde per kribvorm en kribruwheid kan variëren.

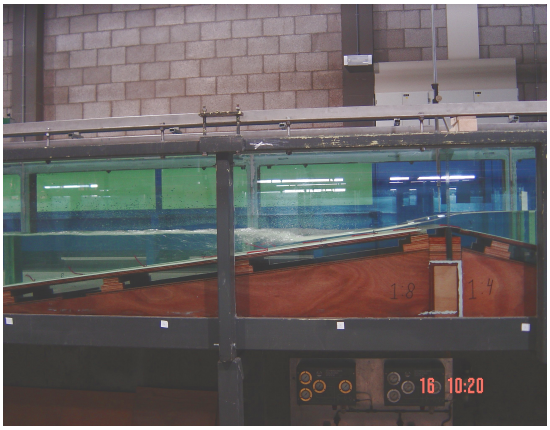


foto proef 1

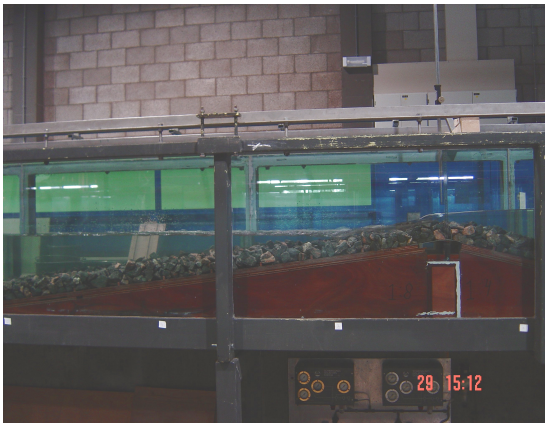
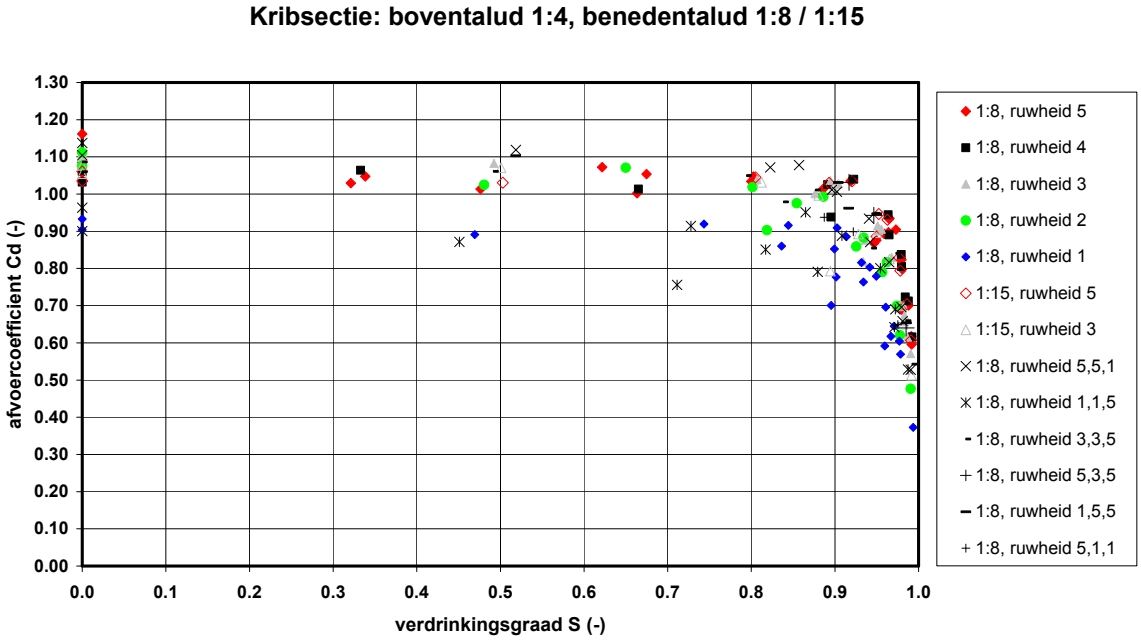


foto proef 60

Figuur 3-10 Ongestuwde afvoer; benedentaludhelling 1:8, verschil tussen ruwheid 5 (glad, links) en ruwheid 1 (ruw, rechts), resultaten Wirken & Van Bladel

3.3.2 Gestuwde afvoer

In onderstaande Figuur 3-11 zijn de berekende C_d-waarden voor alle door Wirken & Van Bladel onderzochte situaties als functie van de verdrinkingsgraad $S = h_4 / h_1$ weergegeven. In deze berekening is uitgegaan van de definitie van de kruin volgens Wirken & Van Bladel.



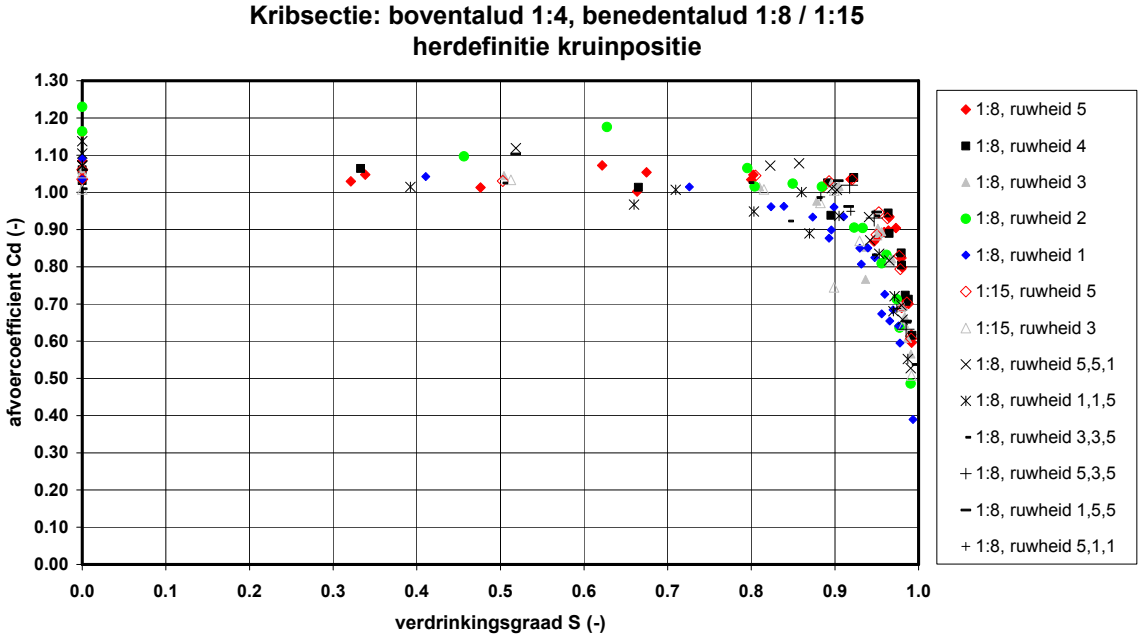
Figuur 3-11 Berekende afvoercoëfficiënt C_d als functie van verdrinkingsgraad S voor alle proefsituaties van Wirken & Van Bladel

De C_d-waarden zijn vervolgens opnieuw berekend, nu uitgaande van de herdefinitie van de kruinpositie bij ruwheden 1, 2 en 3. Er ontstaat dan de grafiek van Figuur 3-12.

Opmerkelijk is dat de resultaten nu in een veel smallere band samen komen. Het wordt daarmee duidelijk dat we voorzichtig moeten zijn met de interpretatie van de meetresultaten.

In het onderzoek van Bloemberg is steeds dezelfde ruwheid toegepast (op de kade: stenen 5 – 6 mm, gelijmd in een enkele laag, bodem: stenen 5 – 6 mm ingestort in cement). Er zijn in het onderzoeksrapport geen aanwijzingen te vinden hoe de kruinpositie is gedefinieerd. Omdat de ruwheid niet is gevarieerd kunnen de meetresultaten van Bloemberg onderling goed worden vergeleken. Bij de vergelijking met andere onderzoeken speelt de definitie van de kruinpositie wel een rol, maar bij een enkellaags steenbekleding van 5 – 6 mm werkt de definitie van de kruinpositie nog niet sterk door in de C_d-waarden (vergelijk met ruwheid 3 bij Wirken & Van Bladel).

We zullen in de verdere analyse van de resultaten van Wirken & Van Bladel uitgaan van de geherdefinieerde kruinpositie met resultaten als weergegeven in Figuur 3-12. De resultaten bij een verdrinkingsgraad S = 0 betreffen de proeven bij vrije ongestuwde afvoer; deze zullen niet verder worden beschouwd. In vergelijking met de resultaten van Bloemberg (zie Figuur 3-3) zijn de C_d-waarden van Wirken & Van Bladel significant hoger. Bij vergelijkbare omstandigheden (ruwheid 3, benedentaludhellingen van 1:7 / 1:8 en 1:15, S-waarden in de range 0,8 – 1,0) liggen de C_d-waarden van Wirken & Van Bladel 10% à 20% hoger. Dit kan het gevolg zijn van de betere 'stroomlijning' van de kribsectie in het onderzoek van Wirken & Van Bladel.



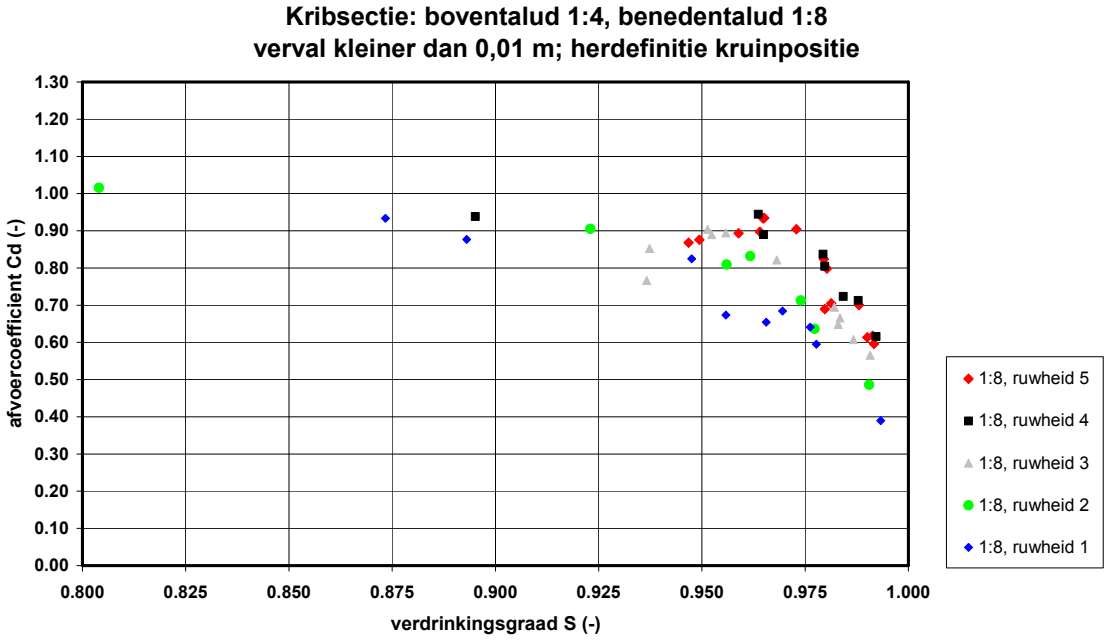
Figuur 3-12 Berekende afvoercoëfficiënt C_d als functie van verdrinkingsgraad S voor alle proefsituaties van Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd

We richten ons eerst op de resultaten voor de kribsectie met benedentaludhelling 1:8 en laten de combinatiekribben (kribsecties met verschillende ruwheid op boventalud, kruin en benedentalud) nog even buiten beschouwing.

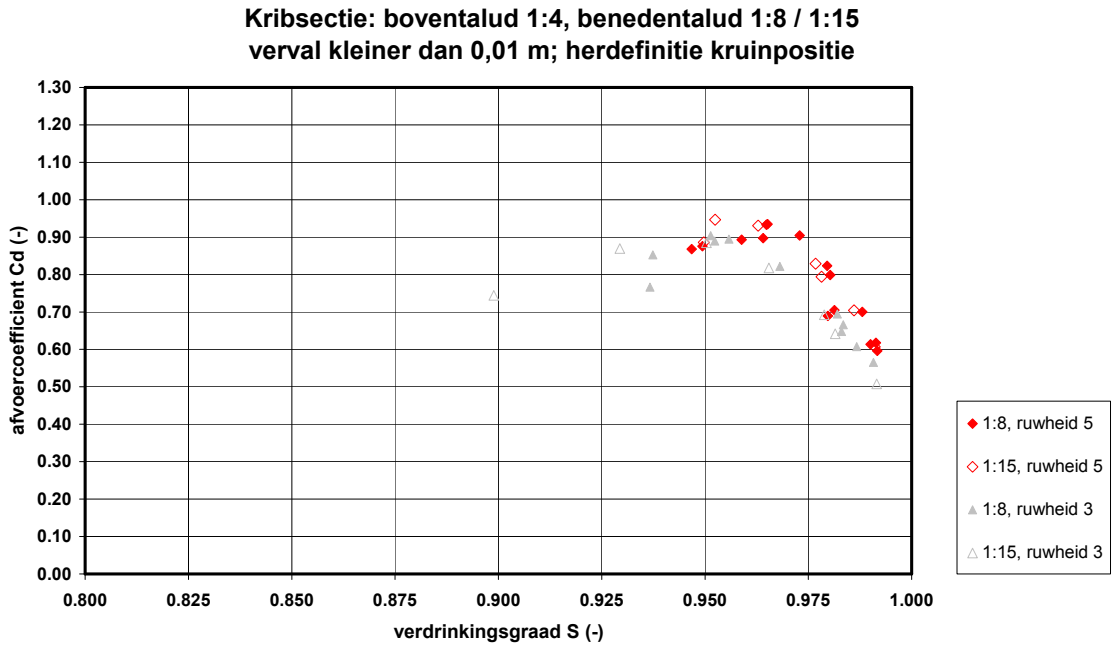
Voorts beschouwen we alleen de proefresultaten bij klein verval; we kiezen voorlopig een verval ≤ 1 cm, wat bij lengteschaal 1:25 overeen komt met een verval ≤ 25 cm (opmerking: in werkelijkheid zal een verval van 25 cm over een krib niet optreden). De berekende C_d-waarden voor deze situaties zijn in Figuur 3-13 als functie van de verdrinkingsgraad S weergegeven (nb: S is nu steeds groter dan 0,8).

Uit Figuur 3-13 blijkt dat bij gestuwde afvoer, klein verval, en benedentaludhelling van 1:8, een tendens bestaat dat de afvoercoëfficiënt C_d toeneemt met een afname van de ruwheid. Er bestaat een zeer markant verschil tussen de C_d-waarden bij ruwheid 5 (zeer glad) en de C_d-waarden bij ruwheid 1 (zeer ruw), en ook de resultaten bij tussenruwheden passen in het beeld.

We kijken nu of er verschil bestaat tussen een helling van het benedentalud van 1:8 en een helling van 1:15. In onderstaande Figuur 3-14 zijn de overeenkomstige proefsituaties bij een benedentaludhelling van 1:8 en 1:15 bij elkaar gezet. Alleen ruwheid 3 (stenen 5-8 mm) en ruwheid 5 (glad) zijn bij een benedentaludhelling 1:15 onderzocht. De grafiek laat zien dat de C_d-waarden van beide benedentaludhellingen zowel bij ruwheid 3 als bij ruwheid 5 dicht op elkaar liggen. Een belangrijk kenmerkend verschil tussen een benedentaludhelling van 1:8 en 1:15 lijkt daarom niet aanwezig te zijn. De C_d-waarden zijn bij de gladde kribsectie (ruwheid 5) opnieuw wat hoger dan bij de ruwere kribsectie (ruwheid 3).

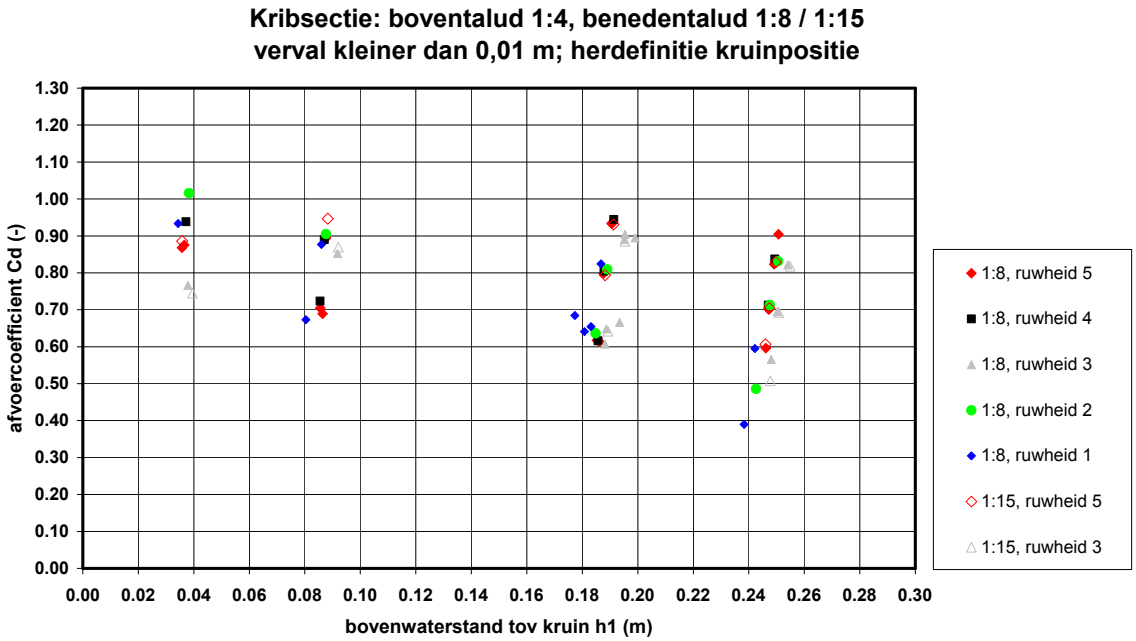


Figuur 3-13 Afvoercoëfficënt C_d als functie van verdrinkingsgraad S, gestuwde afvoer, verval in model < 0,01 m, benedentalud 1:8, resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd



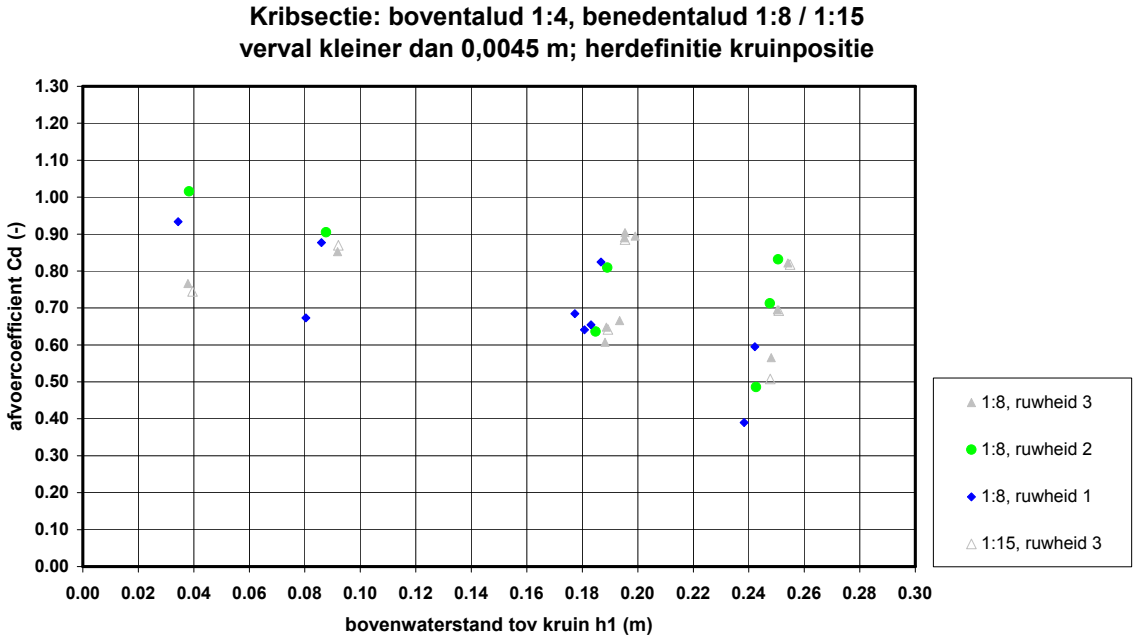
Figuur 3-14 Afvoercoëfficënt C_d als functie van verdrinkingsgraad S, benedentalud 1:8 en 1:15, gestuwde afvoer, verval in model < 0,01 m, resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd

Het is nu zinvol om na te gaan of er verschillen bestaan tussen een hoge en een lage waterstand. Alle berekende C_d-waarden voor een verval $\leq$ 1 cm in model zijn daartoe in Figuur 3-15 uitgezet als functie van h_1.



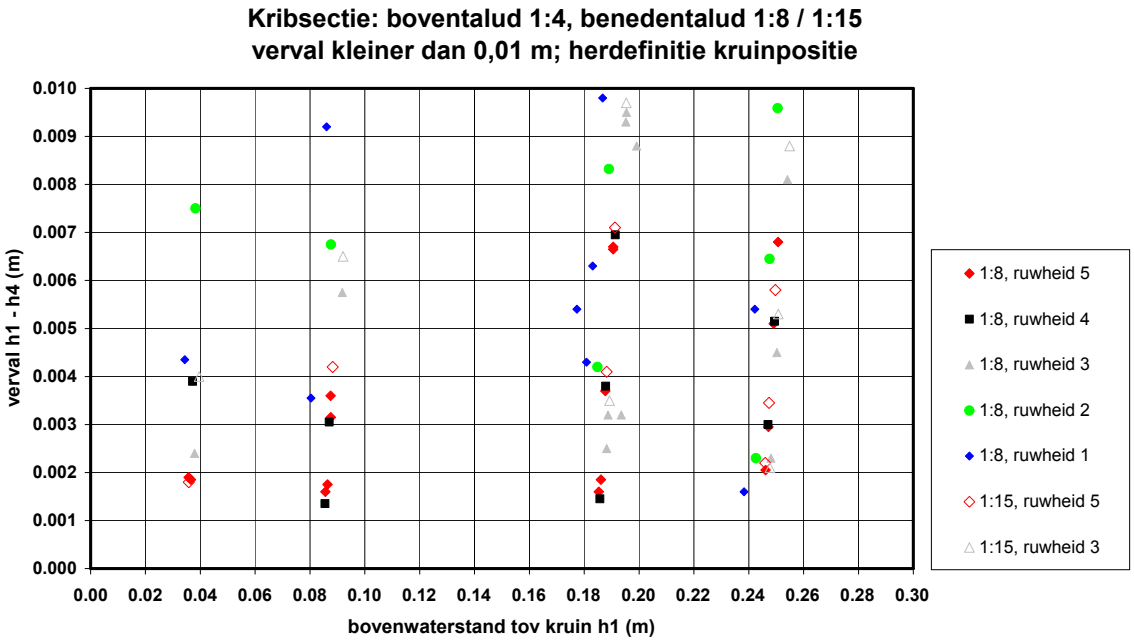
Figuur 3-15 Afvoercoëfficënt C_d als functie van de bovenwaterstand h_1, benedentalud 1:8 en 1:15, gestuwde afvoer, verval in model < 0,01 m, resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd

Omdat vervallen rond 1 cm modelwaarde op prototypeschaal niet realistisch zijn (verval ca 0,25 m), zijn in Figuur 3-16 alleen de C_d-waarden voor vervallen ≤ 0,45 cm (proto ≤ ca 0,11 m) opgenomen. Ook zijn de C_d-waarden voor lage ruwheden 4 en 5 nu weggelaten; deze ruwheden zijn voor bestaande kribben niet realistisch.



Figuur 3-16 Afvoercoëfficënt C_d als functie van de bovenwaterstand h_1, benedentalud 1:8 en 1:15, gestuwde afvoer, verval in model < 0,0045 m, gladde kribsecties niet beschouwd, resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd

Bij de beschouwde kleine vervallen lopen de berekende C_d-waarden per ruwheid bij alle waterstanden sterk uiteen, zo blijkt uit Figuur 3-15 en Figuur 3-16. Dit wijst op een sterke afhankelijkheid van het verval. In Figuur 3-17 is aangegeven hoe het verval is gevarieerd bij de betreffende proeven (verval < 0,01 m).



Figuur 3-17 Ingesteld verval $h_1 - h_4$ als functie van de bovenwaterstand h_1, benedentalud 1:8 en 1:15, gestuwde afvoer, verval in model < 0,01 m, resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd

De grafieken in Figuur 3-15 en Figuur 3-16 laten vanwege de relatief grote variatie in het kleine verval geen conclusies toe over de invloed van de waterstand h_1 op de C_d-waarden. De invloed van de waterstand lijkt echter beperkt te zijn bij de benedentaludhellingen 1:8 en 1:15. Gezien de relatief grote variatie van het waterstandsverschil $h_1 - h_4$, zie Figuur 3-17, mag hier de grootste invloed van worden verwacht. Op het effect van het waterstandsverschil wordt in Paragraaf 3.3.4 nader ingegaan.

Opgemerkt zij dat de nauwkeurigheid van de C_d-waarden bij kleine vervallen niet minder is dan bij grote vervallen (de nauwkeurigheid is gerelateerd aan de nauwkeurigheid waarmee de waterdiepte d_1 en het debiet zijn gemeten); wel is de mogelijke fout in de C_d-waarden groter naarmate h_1 kleiner is, met name bij bij ruwheden 1, 2 en 3, dit vanwege de onzekerheid in de (definitie van de) kruinpositie bij deze steenbekledingen.

Onderzocht zal nu worden of er bij kleine vervallen over de kribsectie verband bestaat tussen de grootte van het kleine verval, de afvoercoëfficiënt C_d en de kribruwheid. Eerst beschouwen we evenwel nog de resultaten voor de kribsecties met gecombineerde ruwheid.

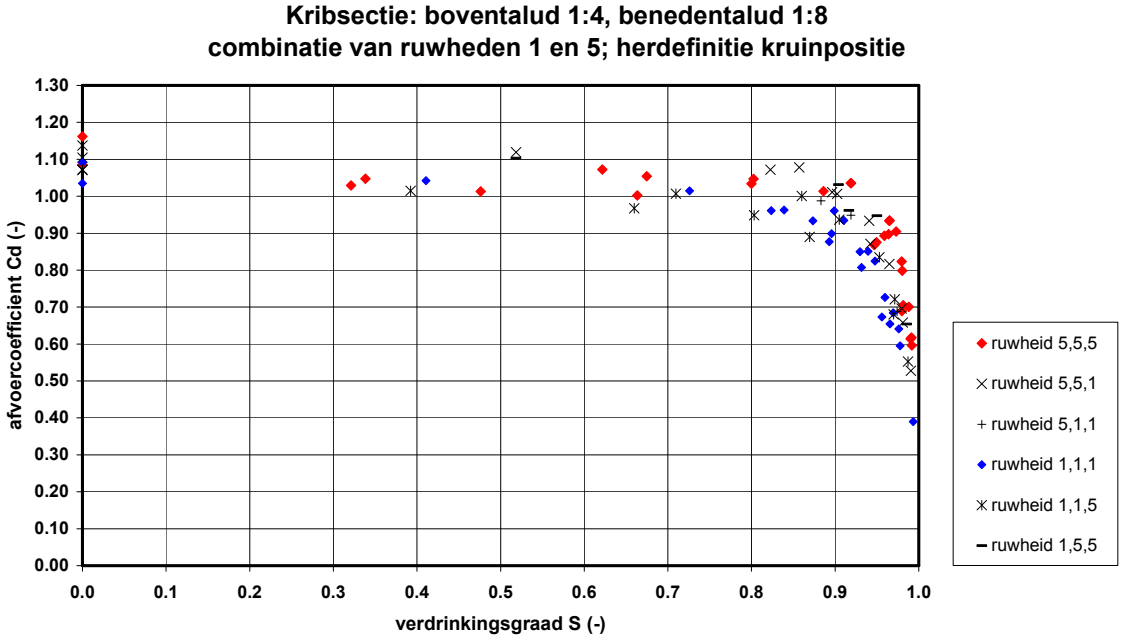
3.3.3 Combinatie van ruwheden

Wirken & Van Bladel hebben proeven uitgevoerd, waarbij de ruwheid van boventalud, kruin en benedentalud van de kribsectie op verschillende manieren zijn gevarieerd (zie Tabel 3-2).

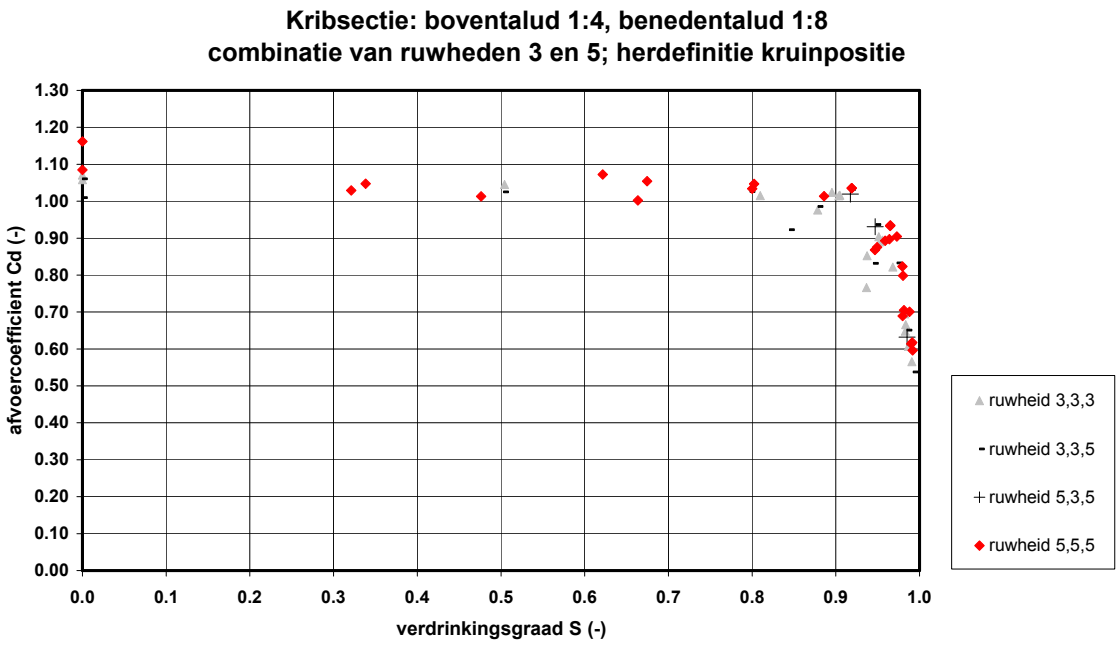
De ruwheidscombinaties worden met drie cijfers aangeduid; het eerste cijfer geeft de ruwheid van het boventalud, het tweede cijfer de ruwheid van de kruin, en het derde cijfer de ruwheid van het benedentalud. De proeven met combinatie van de ruwheid zijn alleen voor een benedentaludhelling van 1:8 uitgevoerd.
In Figuur 3-18 zijn de berekende C_d-waarden voor alle combinaties met ruwheid 1 (zeer ruw) en ruwheid 5 (zeer glad) als functie van de verdrinkingsgraad weergegeven. In Figuur 3-19 zijn de C_d-waarden voor alle combinaties met ruwheid 3 (matig ruw) en ruwheid 5 (zeer glad) weergegeven. De resultaten van de proeven met uniforme ruwheid van de kribsectie zijn eveneens in de grafieken opgenomen.

Zoals eerder gezegd, bestaat er een tendens dat de afvoercoëfficiënt C_d bij lage ruwheid (ruwheid 5) groter is dan bij hoge ruwheid (ruwheid 1), zie Figuur 3-13 en Figuur 3-14. Deze tendens is ook zichtbaar in Figuur 3-18 en Figuur 3-19. Het blijkt nu dat de resultaten van de combinatiekribben ruwweg vallen in de band gevormd door hoge en lage ruwheid bij uniforme kribben. Alle proefresultaten betreffen een benedentaludhelling van 1:8.

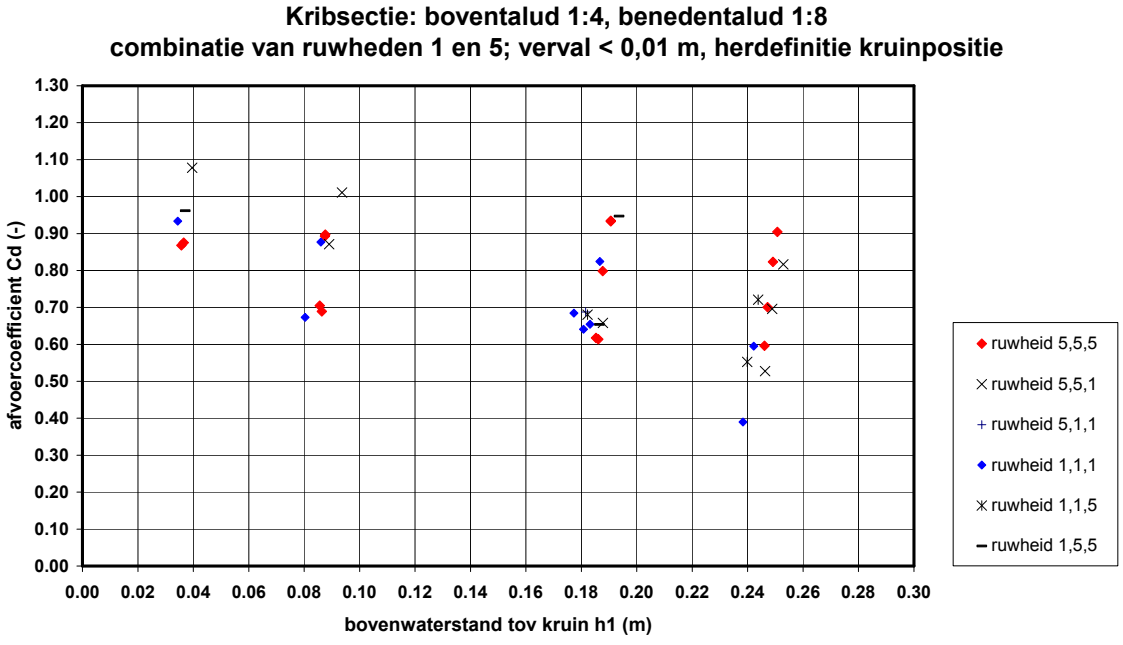
Omdat grotere vervallen over de kribsectie niet relevant zijn, beperken we ons nu tot de proefresultaten bij een verval ≤ 1 cm in model (gestuwde afvoer). De berekende C_d-waarden voor deze situaties zijn als functie van de bovenwaterstand h_1 in Figuur 3-20 (combinaties van ruwheden 1 en 5) en Figuur 3-21 (combinaties van ruwheden 3 en 5) weergegeven. Opnieuw zien we veel variatie in de berekende C_d-waarden; deze variatie is waarschijnlijk gerelateerd aan de variatie in het kleine verval $h_1 - h_4$, en niet aan de waterstand h_1. De variatie in het kleine verval bij de proeven voor de combinatiekribben is in Figuur 3-22 weergegeven.



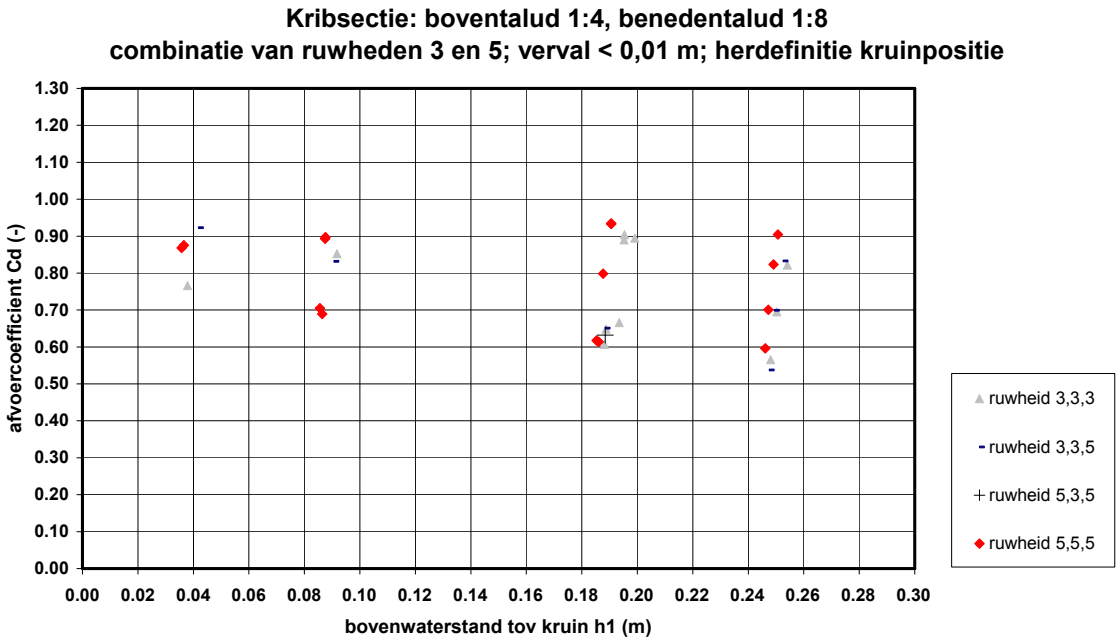
Figuur 3-18 Afvoercoëfficënt C_d als functie van verdrinkingsgraad S, benedentalud 1:8, combinaties van ruwheid 1 (zeer ruw) en ruwheid 5 (zeer glad); resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd



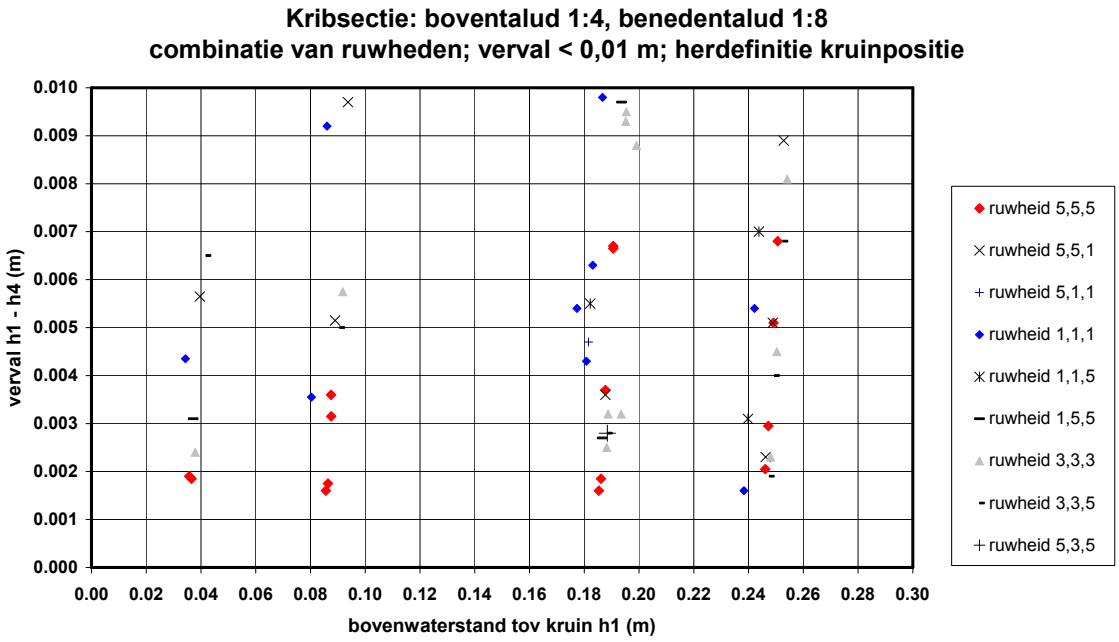
Figuur 3-19 Afvoercoëfficënt C_d als functie van verdrinkingsgraad S, benedentalud 1:8, combinaties van ruwheid 3 (matig ruw) en ruwheid 5 (zeer glad); resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd



Figuur 3-20 Afvoercoëfficënt C_d als functie van de bovenwaterstand h_1, benedentalud 1:8, gestuwde afvoer, verval in model < 0,01 m, combinaties van ruwheid 1 (zeer ruw) en ruwheid 5 (zeer glad); resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd



Figuur 3-21 Afvoercoëfficënt C_d als functie van de bovenwaterstand h_1, benedentalud 1:8, gestuwde afvoer, verval in model < 0,01 m, combinaties van ruwheid 3 (matig ruw) en ruwheid 5 (zeer glad); resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd

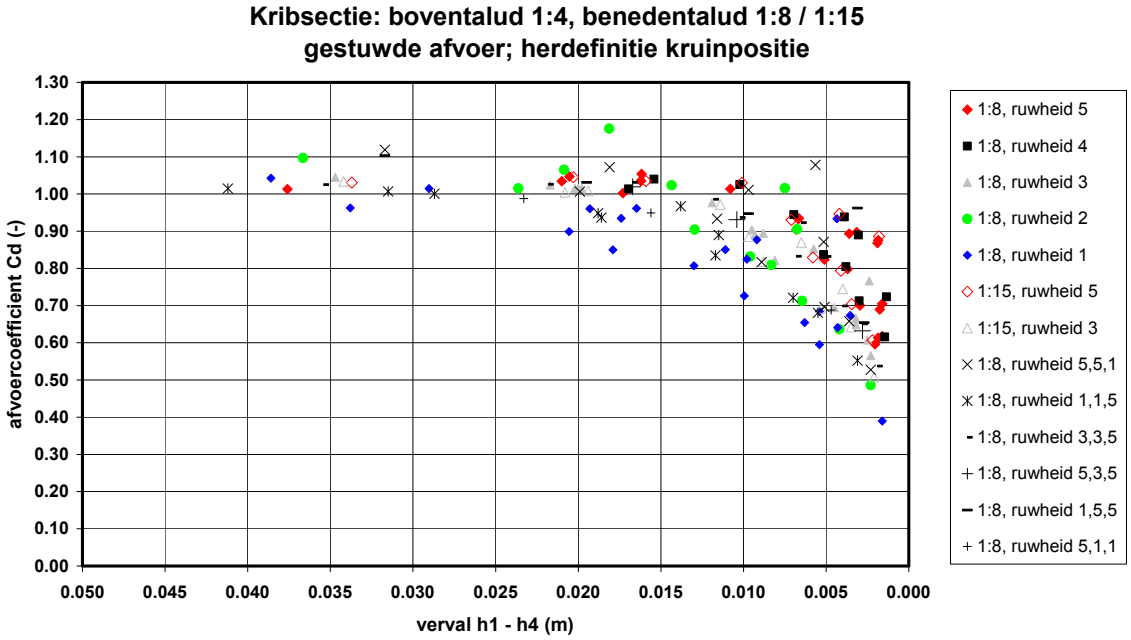


Figuur 3-22 Ingesteld verval $h_1 - h_4$ als functie van de bovenwaterstand h_1, benedentalud 1:8, gestuwde afvoer, verval in model < 0,01 m, combinaties van ruwheden, resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd

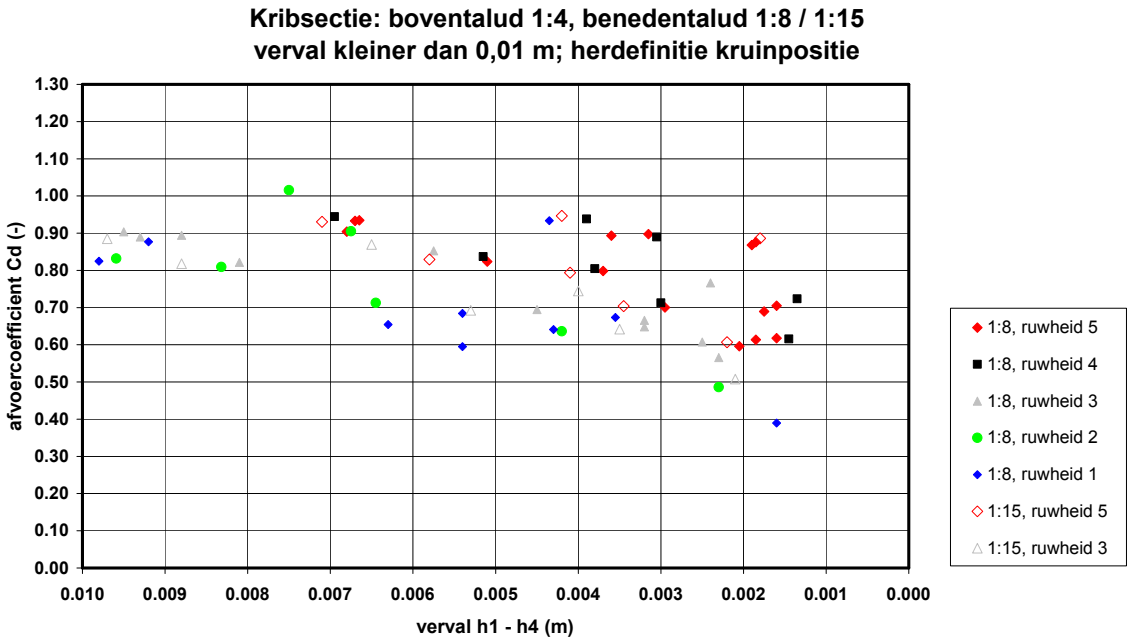
Door Wirken & Van Bladel wordt in [Wirken & Van Bladel, 2004] geconcludeerd dat een combinatiekrib met ruw boventalud, ruwe kruin, en glad benedentalud (bedoeld wordt ruwheidscombinatie 3,3,5) bij hoogwater meer afvoert dan een standaardkrib (bedoeld wordt ruwheidscombinatie 3,3,3), en daarentegen minder dan de standaardkrib afvoert bij laagwater. Het blijkt dat deze conclusie niet door de hier gepresenteerde resultaten (beperkt tot kleine vervallen en gestuwde afvoer) wordt gerechtvaardigd.
De resultaten van de proeven met andere combinaties van ruwheden laten voorts op geen enkele wijze een conclusie toe dat bij kleine vervallen, een boventaludhelling van 1:4, en een benedentaludhelling van 1:8 of 1:15, grotere C_d-waarden ontstaan bij hogere waterstanden, en lagere C_d-waarden bij lagere waterstanden.

3.3.4 Resultaten als functie van het verval

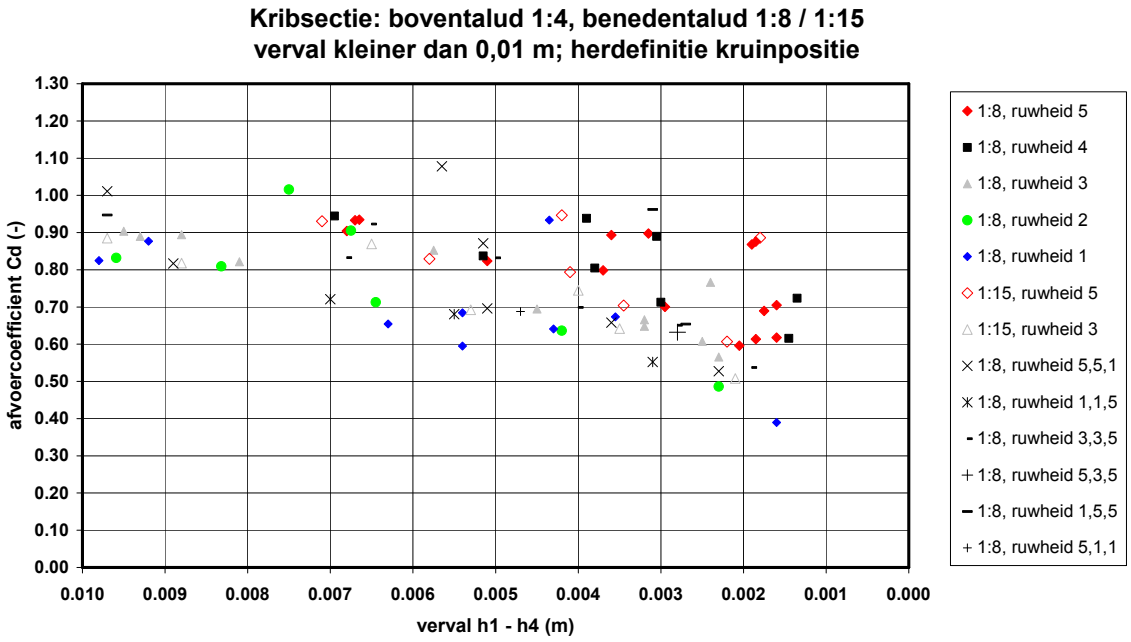
Als laatste zijn de C_d-waarden van alle proeven bij gestuwde afvoer uitgezet als functie van het lokale verval $h_1 - h_4$, zie Figuur 3-23 (nb: horizontale as met aflopende waarden!). De C_d-waarden bij vervallen kleiner dan 0,01 m in model zijn apart en uitvergroot weergegeven in Figuur 3-24 (kribsecties met uniforme ruwheid) en Figuur 3-25 (combinatiekribben toegevoegd).



Figuur 3-23 Afvoercoëfficënt C_d als functie van het verval h_1-h_4, benedentalud 1:8 en 1:15, gestuwde afvoer, alle ruwheidscombinaties; resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd



Figuur 3-24 Afvoercoëfficënt C_d als functie van het verval h_1-h_4, benedentalud 1:8 en 1:15, gestuwde afvoer, verval in model < 0,01 m, uniforme ruwheid kribsectie; resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd



Figuur 3-25 Afvoercoëfficënt C_d als functie van het verval h_1-h_4, benedentalud 1:8 en 1:15, gestuwde afvoer, verval in model < 0,01 m, alle ruwheidscombinaties; resultaten Wirken & Van Bladel, kruinpositie geherdefinieerd

Het verloop van C_d als functie van het verval $h_1 – h_4$, zoals is weergegeven in Figuur 3-23, is ruwweg hetzelfde als het verloop van C_d als functie van de verdrinkingsgraad $S = h_1 / h_4$ (vergelijk met Figuur 3-12). Uit Figuur 3-23 blijkt dat C_d het sterkst verloopt bij kleinere waarden van het verval $h_1 – h_4$: de C_d-waarde neemt af naarmate het verval kleiner wordt, en dus maarmate het debiet en ook de impuls van het overstromende water kleiner wordt. Bij grotere waarden van het verval tendeert C_d naar een waarde die binnen een relatief smalle band ligt, onafhankelijk van de ruwheid. Het klaarblijkelijke effect van de ruwheid, namelijk een hogere C_d-waarde bij lagere ruwheid, komt voornamelijk bij de kleinere waarden van het verval $h_1 – h_4$ naar voren.

Figuur 3-24 laat zien dat de variatie van de C_d-waarden per ruwheid relatief groot is bij kleinere waarden van het verval $h_1 – h_4$. Mogelijk hangt dit samen met een afname van de nauwkeurigheid van de verschilgrootheid $h_1 – h_4$ bij kleinere vervallen. Niettemin bestaat er een significant verschil in C_d-waarden tussen met name de hoogste ruwheid 1 en de laagste ruwheid 5. Dit verschil zou kunnen samenhangen met een andere wijze van afstromen over de kribsectie. Het is daarom goed om meer in detail naar de stroming over de kribsectie te kijken.

Uit Figuur 3-25 lijkt naar voren te komen dat de ruwheid van boventalud en kruin meer bepalend zijn voor de C_d-waarde dan de ruwheid van het benedentalud: de resultaten van ruwheidscombinatie 5,5,1 hebben meer overeenkomst met de resultaten van ruwheid 5 dan met de resultaten van ruwheid 1, terwijl de resultaten van ruwheidscombinatie 1,1,5 dichter bij de resultaten van ruwheid 1 dan bij de resultaten van ruwheid 5 liggen.

3.4 Stroomsnelheidsmetingen WL | Delft Hydraulics

Na afloop van het onderzoek door Wirken & Van Bladel zijn door WL | Delft Hydraulics stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd in het schaalmodel van de kribsectie. Deze metingen vonden plaats in het kader van een nog (2005) lopend speurwerkprogramma, dat gericht is op het nagaan van de mogelijkheden om standaard numerieke rekenprogramma's te gebruiken voor het berekenen van de 3D-stroming rond constructies. De stroomsnelheidsmetingen dienen daarbij voor validatie. De snelheidsmetingen zijn gerapporteerd in [Stolker, 2005].

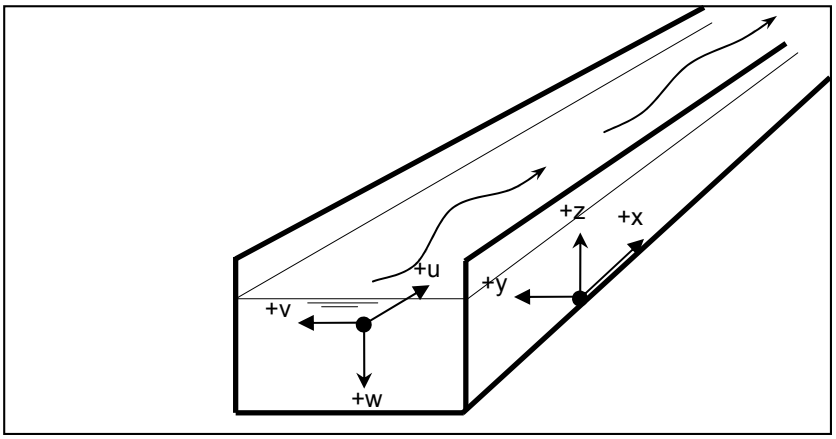
3.4.1 Proevenprogramma

Het door WL | Delft Hydraulics uitgevoerde proevenprogramma is in Tabel 3-3 weergegeven. Alle proeven zijn uitgevoerd voor een boventeludhelling van 1:4. De helling van het benedentalud is gevarieerd: 1:8 en 1:4.
De kruin van de kribsectie was, net als in het onderzoek van Wirken & Van Bladel, afgerond en de kruinbreedte bedroeg eveneens 0,12 m (in stroomrichting gezien).
De ruwheid van de kribsectie is gevarieerd: ruwheden 5 (glad multiplex), 3 (stenen 5 – 8 mm) en 1 (stenen 22 – 40 mm) zijn toegepast. De gebruikte materialen en de codering van de ruwheden zijn hetzelfde als bij het onderzoek van Wirken & Van Bladel.
De proeven zijn uitgevoerd bij relatief klein verval. De meeste proeven betreffen een hoge waterstand; alleen proef T1 en proef T2 (dit was een herhaling van T1 en gaf gelijke resultaten) zijn uitgevoerd bij lagere waterstand.

Tabel 3-3 Proevenprogramma stroomsnelheidsmetingen kribsectie, WL | Delft Hydraulics

Proef	taludhelling		Ruw-heid	Kruin-hoogte (m)	Debiet (l/s)	Bovenwater-stand d1 (m)	Benedenwa-terstand d4 (m)
	boven	beneden					
T1	1:4	1:8	5	0,320	20,6	0,411	0,408
T2	1:4	1:8	5	0,320	21,3	0,414	0,411
T3	1:4	1:8	5	0,320	50,9	0,507	0,504
T8	1:4	1:8	3	0,318	50,3	0,510	0,503
T4	1:4	1:8	1	0,327	51,8	0,509	0,496
T6	1:4	1:4	5	0,310	50,3	0,508	0,503
T7	1:4	1:4	3	0,318	50,3	0,512	0,497
T5	1:4	1:4	1	0,327	51,9	0,510	0,496

Stroomsnelheidsmetingen zijn verricht in een langsraai in het hart van de goot en veelal ook in twee parallelle langsraaien op een ¼ en ¾ van de gootbreedte. De stroomsnelheid is gemeten in drie, onderling loodrechte richtingen (componenten u, v en w, zie Figuur 3-26). De stroomsnelheid is steeds in een flink aantal punten in de verticaal gemeten.



Figuur 3-26 Gehanteerde tekenafspraak stroomsnelheidscomponenten [Stolker, 2005]

De stroomsnelheidscomponenten u en w zijn met LDS (Laser-Doppler Stroomsnelheidsmeter) gemeten, de componenten u (opnieuw) en v met EMS (Elektro-Magnetische Stroomsnelheidsmeter).
Na de meting zijn tijdgemiddelde waarden bepaald en is de standaardafwijking van de drie snelheidscomponenten berekend. Vervolgens is de grootheid k (turbulente kinetische energie, eenheid m^2/s^2) berekend; deze grootheid is relevant voor numerieke stromingsberekeningen. De gehanteerde definitie van k is:

$$k = 0,5.(\sigma_u^{\ 2} + \sigma_v^{\ 2} + \sigma_w^{\ 2})$$

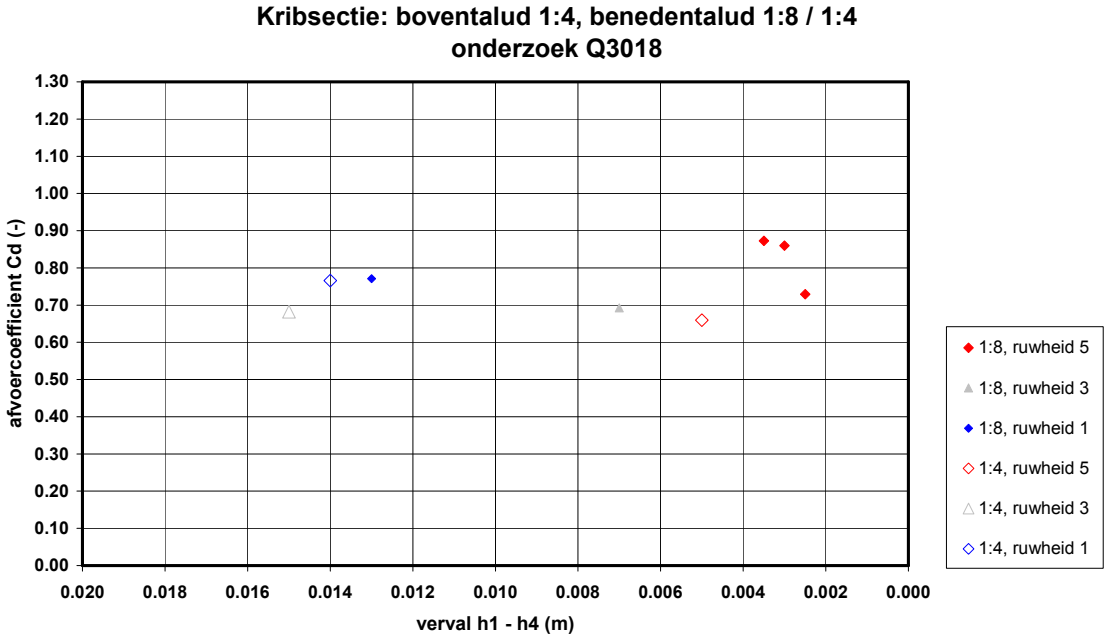
met:

σ_i = standaardafwijking stroomsnelheidscomponent i (m/s)

Voor een volledige beschrijving van de meetresultaten wordt verwezen naar [Stolker, 2005]. In het voorliggende verslag worden slechts de van belang zijnde metingen aangehaald en besproken.

3.4.2 Afvoercoëfficiënt

Op dezelfde wijze als is gedaan voor de resultaten van Wirken & Van Bladel is de afvoercoefficiënt C_d berekend voor de proeven in het overzicht van Tabel 3-3. De C_d-waarden zijn als functie van het lokale verval $h_1 - h_4$ in Figuur 3-27 weergegeven en passen in de range van C_d-waarden van Wirken & Van Bladel. Onderscheid is gemaakt in resultaten voor een helling van het benedentalud van 1:8 en van 1:4. Gezien het geringe aantal verschillende proefsituaties kunnen geen conclusies ten aanzien van het effect van een steilere benedentaludhelling op de C_d-waarde worden getrokken.



Figuur 3-27 Afvoercoëfficënt C_d als functie van het verval h_1-h_4, benedentalud 1:8 en 1:4, gestuwde afvoer, resultaten WL | Delft Hydraulics

3.4.3 Stroomsnelheidsprofielen

De gemeten stroomsnelheidsprofielen zullen voor de volgende combinaties van proefsituaties worden vergeleken:

A Benedentaludhelling 1:8
Gladde krib (ruwheid 5)
Lage waterstand (proef T1) versus hoge waterstand (proef T3)

B Benedentaludhelling 1:8
Hoge waterstand

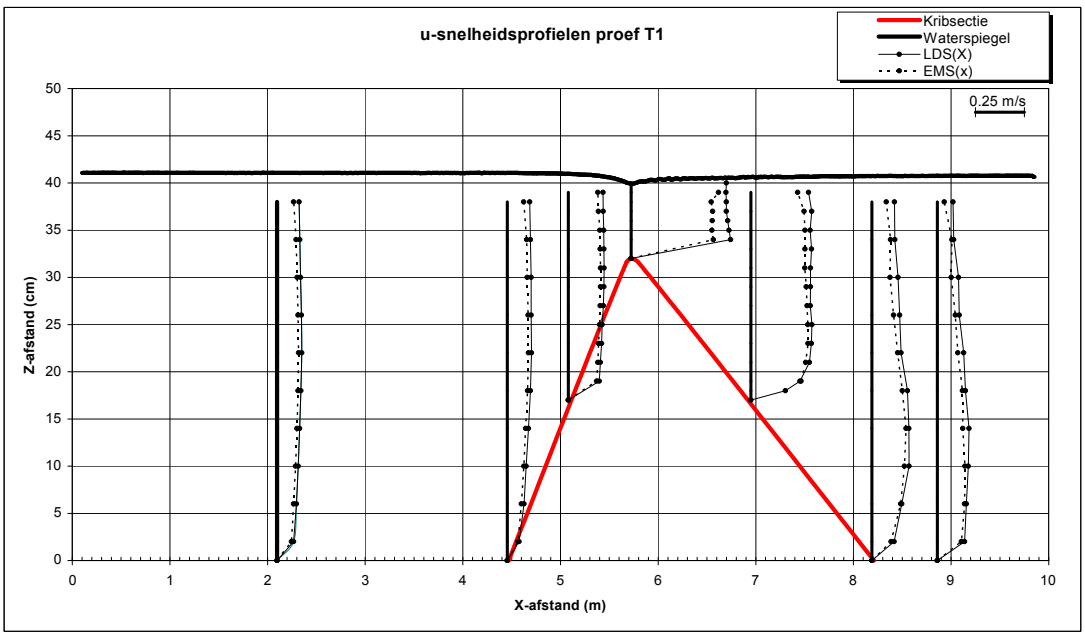
Gladde krib (ruwheid 5, proef T3) versus middelruwe krib (ruwheid 3, proef T8) versus ruwe krib (ruwheid 1, proef T4)

C Benedentaludhelling 1:4
Hoge waterstand
Gladde krib (ruwheid 5, proef T6) versus middelruwe krib (ruwheid 3, proef T7) versus ruwe krib (ruwheid 1, proef T5)

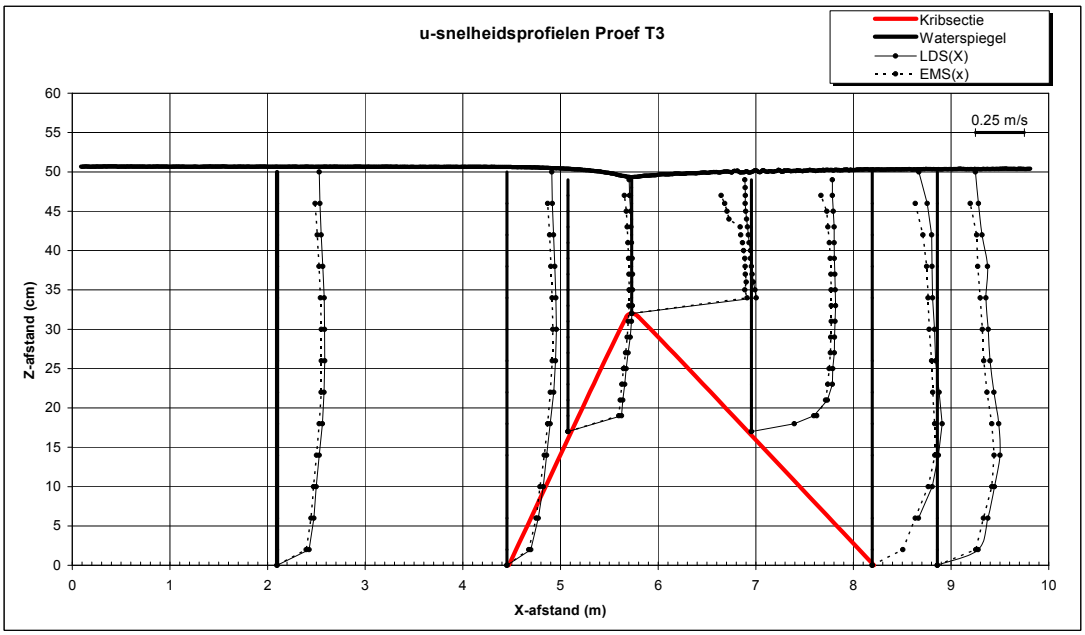
D Benedentaludhelling 1:8 (proeven T3, T8, T4) versus benedentaludhelling 1:4 (proeven T6, T7, T5)

Ad A
Benedentaludhelling 1:8
Gladde krib (ruwheid 5)
Lage waterstand (proef T1) versus hoge waterstand (proef T3)

De u-component van de stroomsnelheid bij proeven T1 en T3 is in Figuur 3-28 respectievelijk Figuur 3-29 weergegeven. De metingen zijn verricht in de langs-as van de goot.

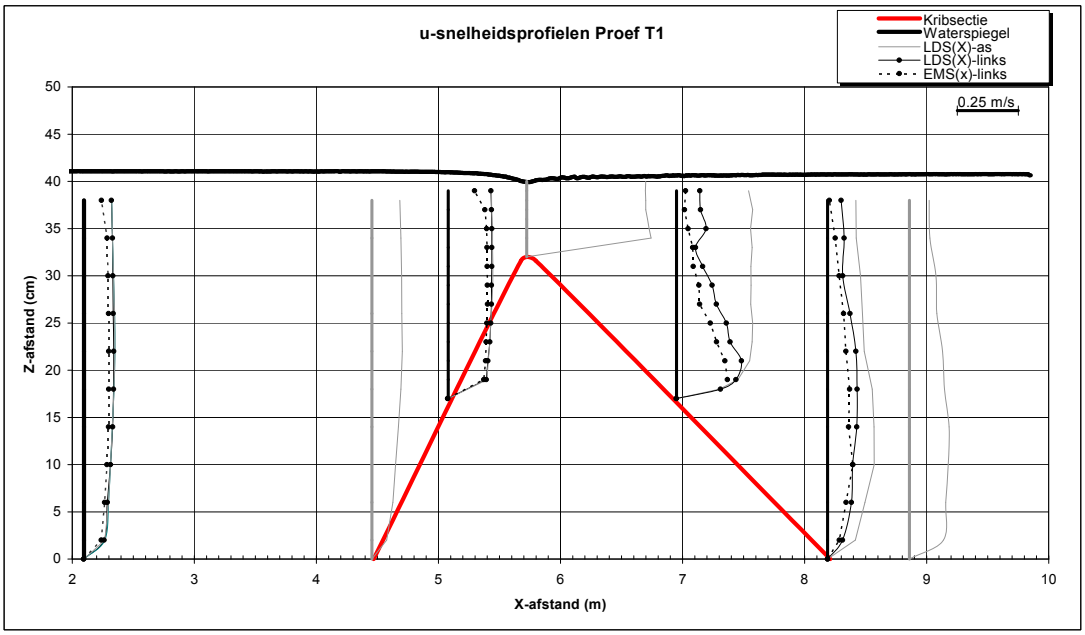


Figuur 3-28 Proef T1: u-component stroomsnelheidsprofielen in de as van de goot [Stolker, 2005]



Figuur 3-29 Proef T3: u-component stroomsnelheidsprofielen in de as van de goot [Stolker, 2005]

De stroming blijkt bij de gladde kribsectie met afgeronde kruin zowel bij lage als bij hoge waterstand op het benedentalud met helling 1:8 te blijven aanliggen (de w-component is naar beneden gericht, hetgeen wil zeggen dat de stroming schuin naar beneden, evenwijdig aan het talud is gericht). De stroming zet achter de kribsectie eerst nog het sterkst door in de onderste helft van de waterdiepte. Dit alles geldt voor de stroming in de langs-as van de goot.
Bij proef T1 zijn enkele metingen verricht in een langsraai op ¼ van de gootbreedte (zie Figuur 3-30; de grijze lijnen gelden voor de langs-as).

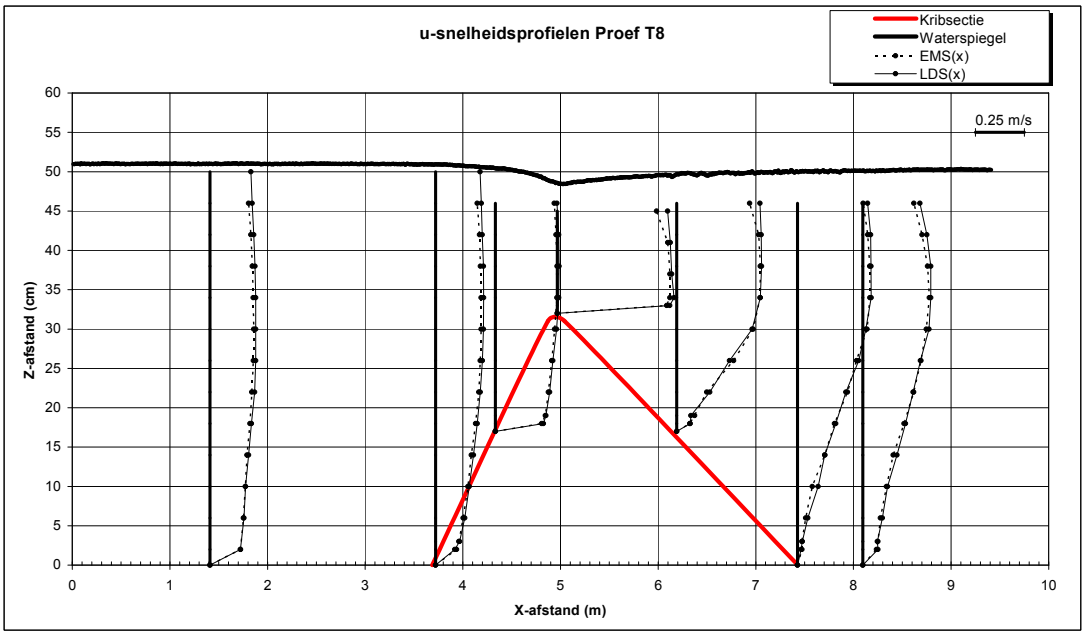


Figuur 3-30 Proef T1: u-component stroomsnelheidsprofielen in raai op ¼ gootbreedte; grijze lijnen gelden voor as van de goot [Stolker, 2005]

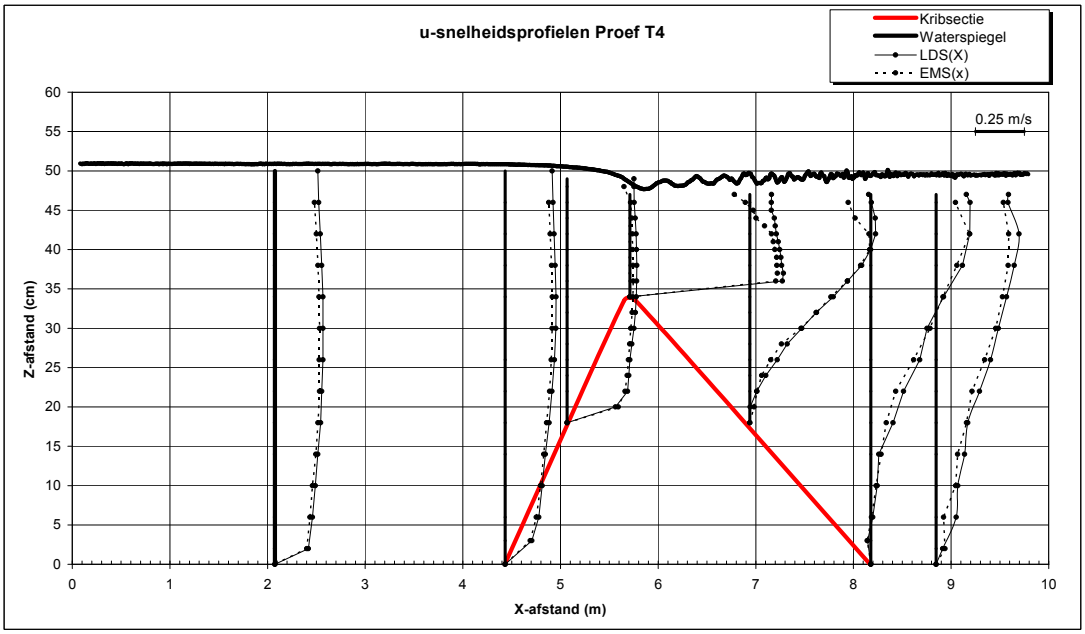
Uit Figuur 3-30 blijkt dat de stroming zich boven het benedentalud vooral concentreert in de langs-as; op ¼ van de gootbreedte is de stroming het sterkst direct boven het talud en minder sterk in het hogere deel van het water. Soortgelijke metingen zijn niet bij proef T3 verricht, maar uit het verloop van de turbulentie-profielen in de langs-as kan worden opgemaakt dat zich hier mogelijk een soortgelijke stromingsconcentratie voordoet, zij het – vanwege de grotere impuls – iets verder weg van de kruin.
We zien nu dat het proces van verwijding van de stroming, na het passeren van de kruin van de kribsectie, niet uniform over de breedte hoeft op te treden bij klein verval. Bij de lage waterstand gaat de platte straal boven de kruin over in een straal met meer driehoekige vorm of trapeziumvorm boven het benedentalud; deze aangepaste straal verwijdt zich vervolgens in hoogte- en breedterichting. Mogelijk doet dit verschijnsel van stromingsconcentratie zich ook voor bij de hogere waterstand. Ongetwijfeld wordt dit fenomeen beïnvloed door de zijwanden van de goot, die immers wrijving uitoefenen. Wanneer hetzelfde experiment in een zeer brede goot zou worden uitgevoerd, zou de concentratie van de stroming minder zijn en zou de straal waarschijnlijk meer uniform en in contact met het benedentalud afstromen.

Ad B
Benedentaludhelling 1:8
Hoge waterstand
Gladde krib (ruwheid 5, proef T3) versus middelruwe krib (ruwheid 3, proef T8) versus ruwe krib (ruwheid 1, proef T4)

De u-component van de stroomsnelheid bij proeven T8 en T4 is in onderstaande figuren (Figuur 3-31 en Figuur 3-32) weergegeven. Proef T3 is weergegeven in Figuur 3-29. De metingen zijn verricht in de langs-as van de goot.



Figuur 3-31 Proef T8: u-component stroomsnelheidsprofielen in de as van de goot [Stolker, 2005]



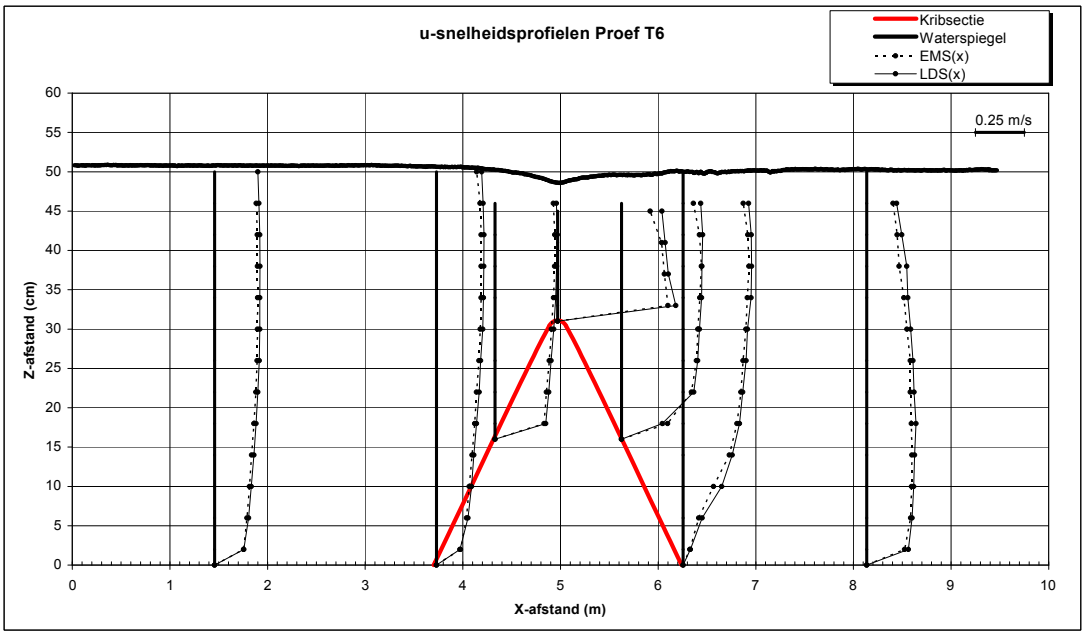
Figuur 3-32 Proef T4: u-component stroomsnelheidsprofielen in de as van de goot [Stolker, 2005]

Kijken we achtereenvolgens naar de u-snelheidsprofielen in Figuur 3-29 (gladde krib), Figuur 3-31 (matig ruw, steentjes 5 – 8 mm) en Figuur 3-32 (zeer ruw, stenen 22 – 40 mm), dan zien we een duidelijke verandering in de wijze van afstromen optreden: de stroming concentreert zich bij toename van de ruwheid hoger in de verticaal. In dwarsrichting gezien is er in toenemende mate sprake van uniforme afstroming naarmate de ruwheid toeneemt (dit blijkt uit de metingen in langsraaien op ¼ en ¾ van de gootbreedte bij proeven T8 en T4). Dit betekent ook dat het effect van de zijwanden van de goot op de stroming afneemt bij hogere kribruwheid.
Bij proef T8 houdt de stroming nog contact met het benedentalud, maar bij proef T4 gaat het contact verloren (in het gebied direct boven het talud wordt de u-component van de snelheid nul en is de w-component omhoog gericht, hetgeen wijst op een stagnatiegebied).
We kunnen dus concluderen dat de ruwheid bij een benedentaludhelling van 1:8 en enigszins afgeronde kruin een wezenlijk effect heeft op de afstroming bij klein verval en hoge waterstand: bij toenemende ruwheid heeft de stroming de neiging langs het wateroppervlak af te stromen en het contact met het talud te verliezen.

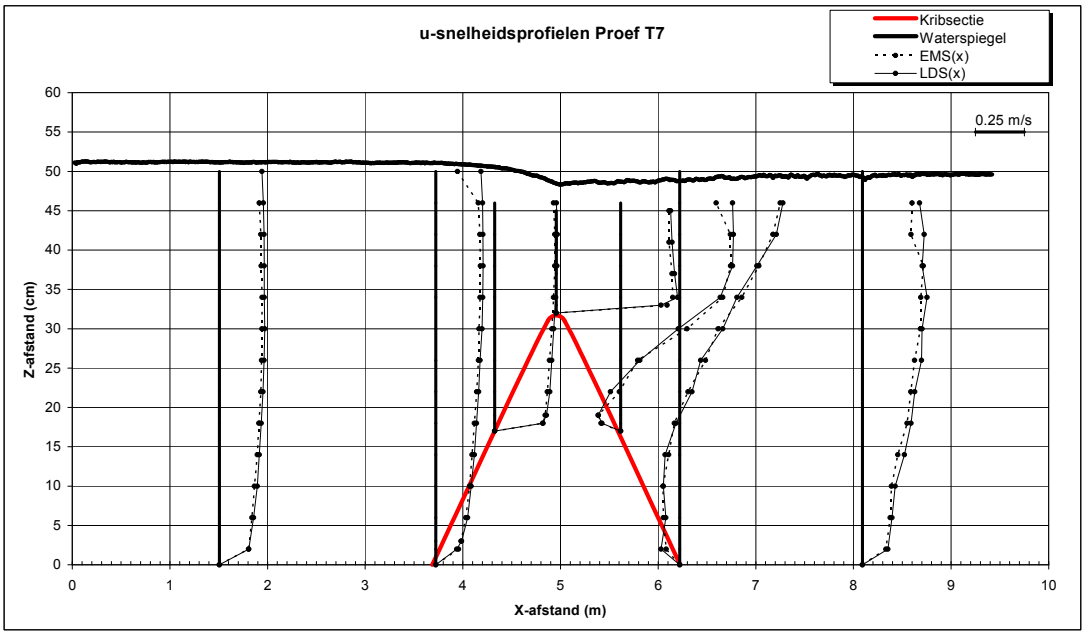
Ad C
Benedentaludhelling 1:4
Hoge waterstand
Gladde krib (ruwheid 5, proef T6) versus middelruwe krib (ruwheid 3, proef T7) versus zeer ruwe krib (ruwheid 1, proef T5)

De u-component van de stroomsnelheid bij proeven T6, T7 en T5 is in onderstaande figuren (Figuur 3-33, Figuur 3-34 en Figuur 3-35) weergegeven.
Interessant bij proef T6 is dat de gladde kribhuid in combinatie met een enigszins afgeronde kruin er voor zorgt dat de stroming, ondanks het relatief steile benedentalud met helling van 1:4, toch aan blijft liggen tegen het talud. Dit gebeurt over de gehele breedte van de goot (zo blijkt uit de metingen in raaien op ¼ en ¾ van de gootbreedte). Uit de w-component blijkt dat de stroming steeds schuin naar beneden is gericht, parallel aan het talud.

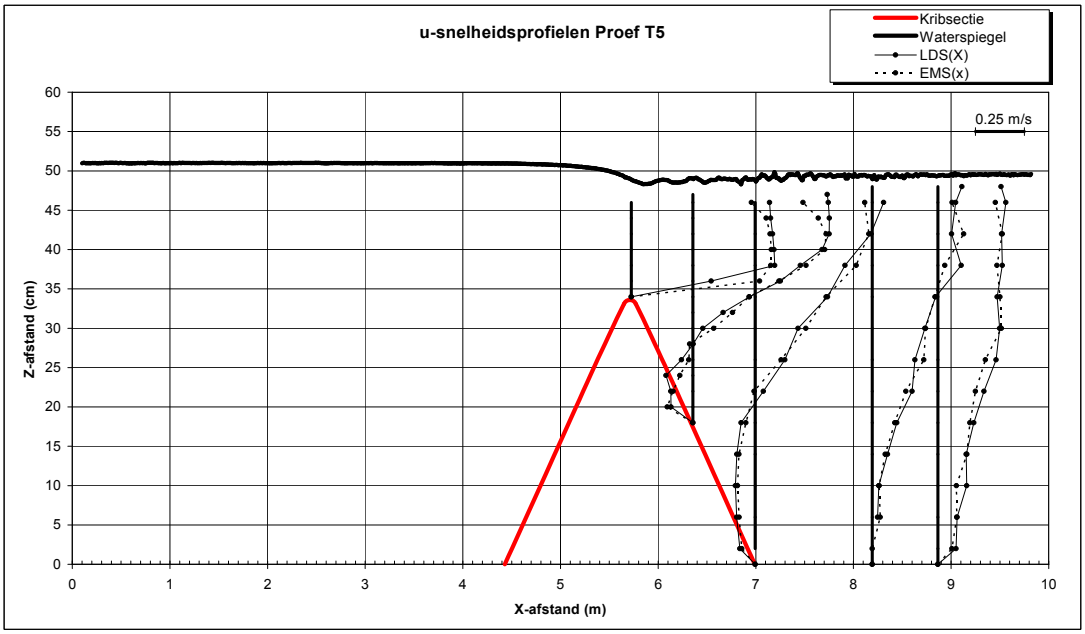
Benedenstrooms van het talud zet de stroming zich aanvankelijk nog het sterkst door in het onderste deel van de waterdiepte.
Bij proef T7 (middelruwe krib) verliest de stroming het contact met het talud en ontstaat er een bodemneer. Het loslaten van de stroming gebeurt over de gehele breedte van de goot, zo laten de metingen in raaien op ¼ en ¾ van de gootbreedte zien; de stromingsverschijnselen zijn nagenoeg uniform in breedterichting.
Bij proef T5 (zeer ruwe krib) stroomt het water nog sterker langs het wateroppervlak af en is de bodemneer groter van omvang.



Figuur 3-33 Proef T6: u-component stroomsnelheidsprofielen in de as van de goot [Stolker, 2005]



Figuur 3-34 Proef T7: u-component stroomsnelheidsprofielen in de as van de goot [Stolker, 2005]



Figuur 3-35 Proef T5: u-component stroomsnelheidsprofielen in de as van de goot [Stolker, 2005]

Het blijkt dus dat de ruwheid van de kribhuid ook bij een benedentaludhelling van 1:4 en enigszins afgeronde kruin een sterk effect heeft op de afstroming bij klein verval en hoge waterstand. Bij een gladde krib blijft het overstromende water de relatief steile helling volgen en zet zich vervolgens het sterkst over het onderste deel van de waterdiepte door. Bij hogere, meer realistische ruwheid laat de stroming los na de kruin; er ontstaat een bodemneer boven het talud en het water stroomt aanvankelijk in het bovenste deel van het benedenwater, nabij het wateroppervlak, af. De bodemneer is groter bij grotere ruwheid van de krib.

Ad D

Benedentaludhelling 1:8 (proeven T3, T8, T4) versus benedentaludhelling 1:4 (proeven T6, T7, T5)

Uit de vergelijking van bovenstaande proeven bij *klein* verval en *hoge* waterstand kunnen we het volgende concluderen:

- bij een gladde kribsectie (ruwheid 5) en afgeronde kruin blijft de stroming op het benedentalud aanliggen, zowel bij een relatief steile helling van 1:4 als bij een flauwere, en daardoor stabielere helling van 1:8 (nb: ook bij *lage* waterstand, gladde kribsectie, benedentaludhelling 1:8, bleef de stroming aanliggen); de afstroming en verwijding vindt vervolgens in belangrijke mate in het lagere deel van het benedenwater plaats;
- bij een meer realistische, hogere ruwheid van een stortstenen bekleding (ruwheden 3 en 1) laat de stroming bij een helling van 1:4 los van het benedentalud en vormt zich een bodemneer boven het talud; bij een helling van 1:8 en matige ruwheid (ruwheid 3) houdt de stroming nog contact met het benedentalud, maar bij hogere ruwheid (ruwheid 1) verliest de stroming het contact met het talud; de afstroming en verwijding vindt bij grotere ruwheden in belangrijke mate in het hogere deel van het benedenwater plaats.

Eerder, in Paragraaf 3.3.4, hebben we bij de bespreking van resultaten van Wirken & Van Bladel opgemerkt, dat de tendens van een hogere C_d-waarde bij een lagere ruwheid van de kribsectie voornamelijk naar voren komt bij kleine vervallen (bij grotere vervallen tendeert C_d naar een min of meer constante waarde, onafhankelijk van de ruwheid). Het ging daarbij om benedentaludhellingen van 1:8 en 1:15. Het blijkt dus nu dat er bij *kleine* vervallen en *hoge* waterstand, benedentaludhelling 1:8, sprake is van verschillende manieren van afstromen van de kruin van de kribsectie: bij een *gladde* krib blijft de stroming op het benedentalud aanliggen, bij *zeer hoge* kribruwheid laat de stroming los en stroomt hoger in de verticaal af. De tweede manier van afstromen gaat mogelijk gepaard met een groter energieverlies, hetgeen de lagere C_d-waarde bij hogere ruwheid zou kunnen verklaren, naast het mogelijke effect van een hogere wrijving op het boventalud. Het blijkt dus ook dat men er niet van uit kan gaan dat de stroming bij een benedentalud met flauwe helling van 1:8 altijd contact blijft houden met het benedentalud.

Opgemerkt zij dat de afgeronde, relatief smalle kruin van de kribsectie van Wirken & Van Bladel een belangrijke rol speelt in de afstroming in het geval van een *gladde* kribuitvoering. Bij een benedentaludhelling van 1:4 zorgt deze afronding er voor dat de stroming tegen het benedentalud aan blijft liggen en ook bij een helling van 1:8 bevordert de ronding het afstromen in het lagere deel van het benedenwater. Bij een ruwe krib is het effect van de afronding gering of verwaarloosbaar. Dit alles geldt voor kleine vervallen en hoge waterstand.

Er zijn geen stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd bij klein verval, lage waterstand en ruwe krib. Bij een ruwe tot zeer ruwe kribsectie is het in het geval van een klein verval over de krib en lage waterstand zeer wel denkbaar dat de stroming altijd hoog in de verticaal afstroomt en weinig tot geen contact heeft met het benedentalud, ook niet bij een flauw benedentaludhelling van 1:8. Dit zou ook bij de proeven van Bloemberg, zie Paragraaf 3.1, het geval geweest kunnen zijn, gezien de lage afvoercoëfficiënten.

3.5 Bevindingen voor stroming over kribsectie

De aanleiding voor de heranalyse van de resultaten van het experimentele onderzoek van Wirken & Van Bladel was de conclusie [Wirken & Van Bladel, 2004] dat bij een krib met zeer gladde bekleding een hogere afvoer over de krib ontstaat dan bij een ‘standaard’ krib, met ruwe bekleding (een bekleding zoals bij de gangbare kribben met een toplaag bestaande uit gestorte of gezette steen). Tevens werd geconcludeerd dat een ‘combinatiekrib’ met zeer glad uitgevoerd benedentalud en overigens ‘normale’ ruwheid van boventalud en kruin bij hogere waterstanden meer afvoert dan een ‘standaard’ krib, maar daarentegen bij lagere waterstanden minder afvoert dan een ‘standaard’ krib. Deze conclusies zijn gebaseerd op proeven voor een sectie van een krib met een boventaludhelling van 1:4 en een benedentaludhelling van 1:8. Een laatste conclusie was dat een krib met benedentaludhelling van 1:15 niet beter is in termen van afvoer dan een krib met benedentaludhelling van 1:8.
De proeven van Wirken & Van Bladel waren een vervolg op het onderzoek van Bloemberg [Bloemberg, 2001], waarin de benedentaludhelling werd gevarieerd, maar de ruwheid constant werd gehouden.
De conclusies van Wirken & Van Bladel zijn interessant omdat ze uitzicht lijken te bieden op een mogelijkheid tot verlaging van de MHW, zonder dat op nadelige wijze de hoofdgeul wordt beïnvloed bij lagere rivierafvoer en waterstand.

De heranalyse van de resultaten van Wirken & Van Bladel, die in het bijzonder was gericht op *kleine vervallen* over de krib, levert met gebruikmaking van de door WL | Delft Hydraulics uitgevoerde stroomsnelheidsmetingen het volgende beeld op:

Boventaludhelling 1:4, benedentaludhelling 1:8
Hoge waterstand
Zeer gladde kribsectie:

De stroming blijft aanliggen op het benedentalud; de afstroming en verwijding vindt vervolgens in belangrijke mate in het lagere deel van het benedenwater plaats.

Zeer ruwe kribsectie:

De stroming houdt geen contact meer met het benedentalud; de afstroming en verwijding vindt in belangrijke mate in het hogere deel van het benedenwater plaats.

We zien dus een verandering in de wijze van afstromen optreden bij toename van de ruwheid: de stroming concentreert zich hoger in de verticaal. De verandering is overigens geleidelijk, niet abrupt. Bij de gladde kribsectie speelt de afronding van de kruin een rol: de afronding bevordert het aanliggen op het benedentalud en het afstromen in het lagere deel van het benedenwater. Bij een ruwe krib is het effect van de afronding waarschijnlijk gering of verwaarloosbaar.
De C_d-waarde blijkt bij kleine vervallen flink te kunnen variëren, en wel sterker naarmate het verval kleiner is. Mogelijk is de nauwkeurigheid van de vervalmetingen hier (deels) oorzaak van. Er is niettemin een tendens waarneembaar dat de C_d-waarde groter is naarmate de kribsectie gladder is. Deze tendens komt voornamelijk naar voren bij kleine vervallen; bij grotere vervallen tendeert C_d naar een min of meer constante waarde, onafhankelijk van de ruwheid. Een hogere C_d-waarde bij zeer lage ruwheid zou samen kunnen hangen met het 'diep' afstromen en verwijden in het benedenwater, naast het directe effect van een lagere wrijvingsweerstand.

Boventaludhelling 1:4, benedentaludhelling 1:8
Lage waterstand
Bij de zeer gladde kribsectie blijft de stroming op het benedentalud aanliggen, vergelijkbaar met de situatie bij hoog water. Voor de zeer ruwe kribsectie zijn geen stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd. Het is zeer wel denkbaar dat de afstroming bij een ruwe tot zeer ruwe kribsectie altijd hoog in de verticaal plaats vindt bij kleine vervallen, en weinig tot geen contact houdt met het benedentalud, ook niet bij een relatief flauwe benedentaludhelling van 1:8.

De tendens van een hogere C_d-waarde bij gladdere kribsectie is niet aantoonbaar aan de waterstand gekoppeld en lijkt zowel bij hoge als lage waterstand aanwezig te zijn.

De constatering van Wirken & Van Bladel dat een zeer gladde kribsectie meer afvoert dan een ruwe kribsectie lijkt in zijn algemeenheid bij *kleine vervallen* op te gaan, onafhankelijk van de waterstand. De C_d-waarde ligt bij een zeer gladde kribsectie (ruwheid 5) 10% – 20% hoger dan bij een zeer ruwe kribsectie (ruwheid 1). Het verschil tussen een licht tot matig ruwe kribsectie (ruwheid 2 of 3) en een zeer ruwe kribsectie zal mogelijk ca 5% kunnen bedragen.

De conclusie van Wirken & Van Bladel dat 'combinatiekribben' met ruw boventalud, ruwe kruin en zeer glad benedentalud meer afvoeren bij hoge waterstand dan een 'standaard' krib en minder afvoeren bij lage waterstand dan een 'standaard' krib kan niet op basis van de meetresultaten worden waargemaakt. Er lijkt ook geen reden voor te bestaan, omdat de wijze van afstromen die het verschil zou kunnen uitmaken, bij kleine vervallen niet van de waterstand lijkt af te hangen.

Boventaludhelling 1:4, benedentaludhelling 1:15

Er zijn door Wirken & Van Bladel bij een benedentaludhelling van 1:15 geen metingen verricht voor een zeer gladde kribsectie. De C_d-waarden bij een matig ruwe (ruwheid 3) en zeer ruwe kribsectie (ruwheid 1) vertonen evenwel geen significante verschillen vergeleken met de C_d-waarden bij een benedentaludhelling van 1:8. Deze constatering wordt ondersteund door de resultaten van de metingen van Bloemberg voor een ruwe kribsectie.
Geconcludeerd kan worden dat bij 'normale' ruwheden geen belangrijke verschillen zullen bestaan tussen benedentaludhellingen van 1:15 en 1:8. Deze conclusie is in lijn met de conclusie van Wirken & Van Bladel.

Boventaludhelling 1:4, benedentaludhelling 1:4

Wirken & Van Bladel hebben geen metingen verricht voor een benedentaludhelling van 1:4. Door WL | Delft Hydraulics zijn voor een helling van 1:4 wel stroomsnelheidsmetingen verricht bij hoge waterstand en klein verval, en voor een zeer gladde, een ruwe en een zeer ruwe kribsectie. Bij de ruwe kribsecties liet de stroming vanaf de kruin los en vormde zich een bodemneer. Bij de zeer gladde kribsectie bleef de stroming in contact met het benedentalud, maar zeer waarschijnlijk werd dat in de hand gewerkt door de afronding van de kruin.
Voor een lage waterstand zijn geen meetgegevens voorhanden, maar het is aannemelijk dat zich hierbij soortgelijke stromingsverschijnselen zullen voordoen.
Uit het onderzoek van Bloemberg voor een ruwe kribsectie blijkt dat de C_d-waarde bij een verticale beëindiging van de kribsectie of bij een benedentaludhelling van 1:4 hoger is dan bij een benedentaludhelling van 1:8 of 1:15. Dit zou samen kunnen hangen met het ontstaan van de bodemneer.
In het algemeen kan nu voor kleine vervallen en reële ruwheidswaarden worden gezegd dat bij een benedentaludhelling van 1:4 stromingsloslating zal optreden in combinatie met een bodemneer, ongeacht de ruwheid. De stromingsweerstand zal daardoor in het algemeen hoger zijn dan bij een benedentaludhelling van 1:8.

Geometrische parameters

Gebleken is dat de C_d-waarden in het onderzoek van Wirken & Van Bladel in overeenkomstige omstandigheden (waterstanden, ruwheid, taludhelling) 10% à 20% hoger waren dan in het onderzoek van Bloemberg. De oorzaak van dit verschil moet waarschijnlijk worden gezocht in geometrische parameters. Bij het onderzoek van Bloemberg bedroeg de verhouding van kruinbreedte en kribhoogte 0,5, bij het onderzoek van Wirken & Van Bladel was deze verhouding 0,38 en was de kruin afgerond (geen gehoekte vorm). De andere vorm bij het onderzoek van Wirken & Van Bladel kan oorzaak zijn geweest van anders gekromde, doorgaande stroomlijnen boven de kruin, andere drukken boven de kruin en boven het bovenste deel van het benedentalud, en als gevolg daarvan een hogere afvoer in overigens gelijke omstandigheden.

3.6 Betekenis van de bevindingen voor een werkelijke rivierkrib

De belangrijkste conclusie die, na herbeschouwing, uit het door Wirken & Van Bladel uitgevoerde onderzoek voor een kribsectie kan worden getrokken is dat bij een zeer glad kriboppervlak in het algemeen een geringer stromingsverlies ontstaat dan bij een hoge kribruwheid; dit bij een boventaludhelling van 1:4 en een benedentaludhelling van 1:8, kleine vervallen, en zowel een hoge als een lage waterstand.
De lagere weerstand lijkt samen te hangen met een ‘diep’ afstromen bij de zeer gladde kribsectie. De (detail)vormgeving van de krib is daarbij overigens van invloed; met name een afronding van de kruin van de krib is van belang bij een gladde kribhuid.

Een zeer glad kriboppervlak, zoals is toegepast in het schaalmodel, kan in werkelijkheid niet worden gerealiseerd, ook niet wanneer de stenen bekleding wordt nabehandeld met gietasfalt. Dit maakt dat we in werkelijkheid te maken hebben met een licht ruw (vergelijkbaar met ruwheid 4 à 3) tot zeer ruw oppervlak (vergelijkbaar met ruwheid 1). Bij deze ruwheden is de wijze van afstromen bij een benedentaludhelling van 1:8 niet sterk verschillend: de stroming houdt contact met het benedentalud, maar de afstroming vindt toch voornamelijk in het hogere deel van het benedenwater plaats, zowel bij lage als bij hoge waterstand. Het effect van de ruwheid is daarom naar verwachting bij een reële krib niet erg groot.
Er komt bij dat de vervallen over de krib bij hoge waterstand in werkelijkheid kleiner zullen zijn dan de vervallen die zijn onderzocht in het schaalmodel; ook zijn er vooral bij lagere waterstanden effecten te verwachten van de uitwisseling tussen kribvak en hoofdstroom. Dit maakt dat de modelresultaten voor de kribsectie niet zonder meer van toepassing kunnen worden verklaard op een rivierkrib.

De stromingsweerstand van een *reële* krib wordt naar verwachting het sterkst beïnvloed door de vorm van de krib (helling van boventalud en benedentalud, kruinbreedte en kruinvorm). Bij een steil benedentalud van 1:4 bijvoorbeeld en reële ruwheid, ontstaat er een duidelijke bodemneer, hetgeen ongunstig is in verband met de stromingsweerstand. Bij een flauw benedentalud is deze bodemneer er niet.

Aanbevolen wordt om in het kader van het onderzoek naar innovatieve kribben vooral aandacht te besteden aan de effecten van de vormgeving van de krib, met name ook van de kruin. Vanwege de uitwisseling en relaties tussen kribvak en hoofdstroom dient onderzoek in schaalmodellen bij voorkeur in een brede goot te worden uitgevoerd, waarin zowel de hoofdgeul als kribvakken kunnen worden gemodelleerd. De beste aanpak is dan om een vergelijkende studie van varianten uit te voeren, waarbij ten opzichte van een referentiegeometrie de verschillen in de verhanglijn van het totale beschouwde rivierdeel worden gemeten. Dit vereist een zeer nauwkeurige en betrouwbare meting van waterstandsverschillen en debiet. In zo’n model kunnen ook detailmetingen bij de kribben worden uitgevoerd.

Literatuur

Bijman, W.B.G., Akkerman, G.J. (2002)
'Onderzoeksproject WBKI. Relatie taludhelling en waterstandsverschil kribben'
Royal Haskoning, Nijmegen, rapport, november 2002.

Bloemberg, G. (2001)
'Stroomlijnen van zomerkaden'
Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, afstudeerrapport, september 2001.

Ghani, B.A., Gill, S.A. (1963)
'River training'
West Pakistan Engineering Conngress, pp 273 – 296, 1963

Miller, D.S. (1990)
'Internal flow systems'
BHRA, The Fluid Engineering Centre, Cranfield, 2nd edition, 1990

Mosselman, E. (2000)
'Technical memorandum on groyne length and spacing'
Personal communication, Delft, 2000

Sieben, J. (2001)
'Gestroomlijnde zomerkaden: de invloed van het dwarsprofiel op energieverliezen bij overlaten'
Rijkswaterstaat- RIZA, werkdocument 2001.113x, september 2001.

Stolker, C. (2005)
'Stroombeelden bij recht aangestroomde kribben'
WL | Delft Hydraulics, verslag schaalmodelonderzoek Q3018, januari 2005 (vervolgverslag Q3018 van december 2005 is in voorbereiding)

Wirken, H., Bladel, S. van (2004)
'Innovatieve kribben: modelonderzoek naar het effect van de hydraulische ruwheid op kribben'
Avans Hogeschool Tilburg, Faculteit Techniek en Natuur, afstudeerverslag, juni 2004.



WL | Delft Hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

