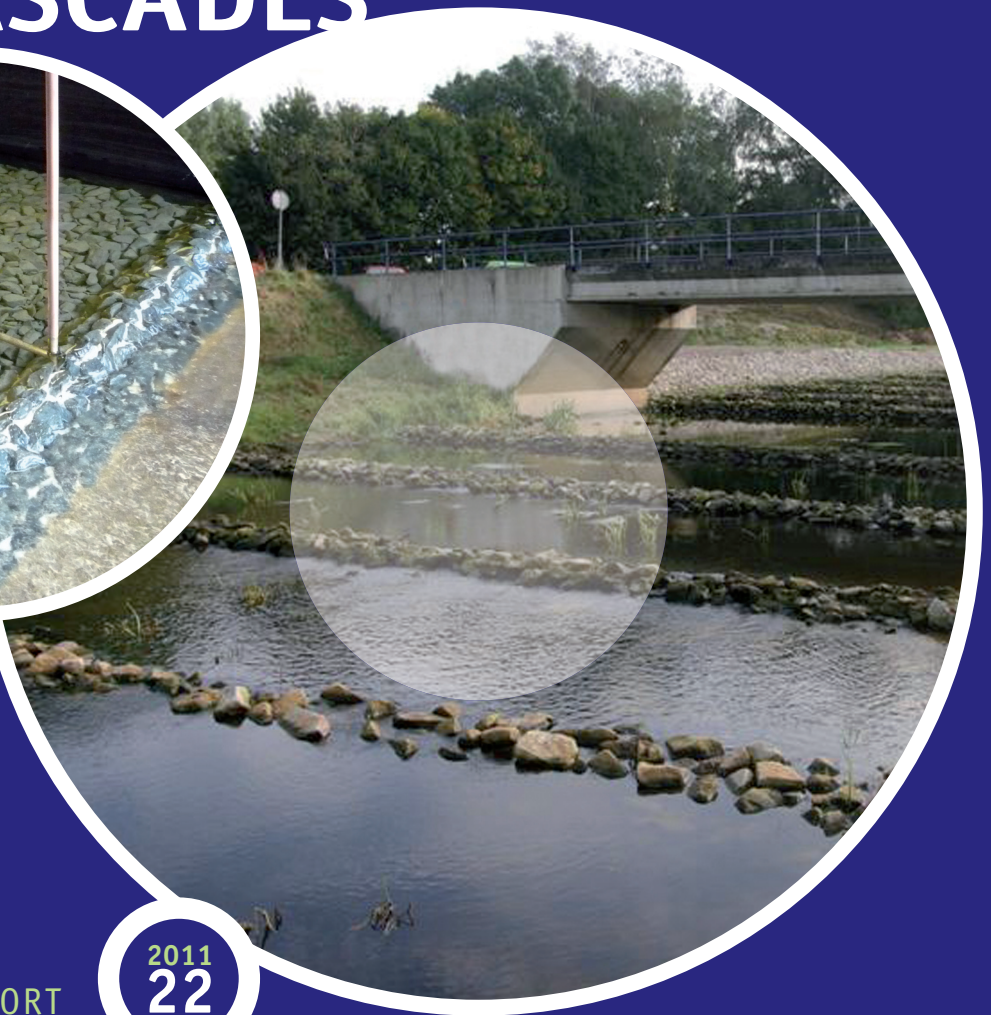


# HYDRAULISCH FUNCTIONEREN VISPASSEERBARE CASCADES



RAPPORT

2011  
22

HYDRAULISCH FUNCTIONEREN  
VISPASSEERBARE CASCADES

**RAPPORT**

2011

**22**

ISBN 978.90.5773.525.7



# COLOFON

UITGAVE Amersfoort, augustus 2011  
STOWA, Amersfoort

## AUTEURS

Matthijs Boersema – Wageningen University  
Bart Vermeulen – Wageningen University  
Paul Torfs – Wageningen University  
Ton Hoitink – Wageningen University, projectleider  
Gerry Roelofs - Waterschap Rijn en IJssel, projectleider  
Gert van den Houten – Waterschap Rijn en IJssel

## OPDRACHTGEVER

Waterschap Rijn en IJssel

## OPDRACHTNEMER

Wageningen University and Research Centre (WUR)  
Environmental Sciences Group  
Hydrology and Quantitative Water Management Group (HWM)

## PROJECTTEAM

Gerry Roelofs - Waterschap Rijn en IJssel, projectleider  
Gert van den Houten – Waterschap Rijn en IJssel  
Frank Weerts – Waterschap De Dommel  
Ton Hoitink – Wageningen University, projectleider  
Paul Torfs – Wageningen University  
Bart Vermeulen – Wageningen University  
Matthijs Boersema – Wageningen University

## LABORATORIUM

Kraijenhoff van de Leur Laboratory for Water and Sediment Dynamics ([www.watersedimentlab.wur.nl](http://www.watersedimentlab.wur.nl))

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA STOWA 2011-22  
ISBN 978.90.5773.525.7

# TEN GELEIDE

In diverse stroomgebieden in Nederland worden in beken en kleine rivieren vispasseerbare kunstwerken aangelegd ter vervanging van stuwen. Dit om vismigratie mogelijk te maken en de ecologie van het systeem te verbeteren. Vispasseerbare kunstwerken zijn er in vele soorten en maten. Een veel voorkomende vispassage is de zogenaamde vispasseerbare stortsteenbekkenpassage. Vanwege het uiterlijk van dit type passage wordt in de praktijk ook wel gesproken over een vispasseerbare cascade, of kortweg cascade vistrap.

Cascade vistrappen kunnen een opstuwende werking hebben die met name bij hoge afvoeren van belang is om te weten, zeker als de passage in de hoofdwaterloop gelegen is. Door waterschappen worden in de regel modelberekeningen uitgevoerd om het hydraulisch functioneren van het kunstwerk vooraf in te kunnen schatten. De wijze waarop dit gebeurt verschilt tussen waterschappen.

Waterschap Rijn en IJssel heeft in samenwerking met Waterschap De Dommel het initiatief genomen om de stortsteen-bekkenpassage (cascade) in een schaalmodel nader te onderzoeken. Het schaalonderzoek is uitgevoerd in het Kraijenhoff van de Leur Laboratory for Water and Sediment Dynamics aan de Wageningen Universiteit.

Het voorliggende rapport doet verslag van een fysisch schaalexperiment gericht op het kwantificeren van de invloed van een cascade vistrap op de waterstand. De laboratoriumresultaten zijn mathematisch beschreven en geparametriseerd zodat het ontwerp op een juiste manier kan worden gemodelleerd.

Vanwege het belang van het onderzoek voor de waterschappen worden de resultaten van de studie als STOWA rapport uitgebracht. We rekenen erop dat de kennis van deze studie de waterschappen ondersteunt bij het modelleren van vispasseerbare stortsteen-bekkenpassages.

Amersfoort, augustus 2011

De directeur van de STOWA  
ir. J.M.J. Leenen

# LIJST MET SYMBOLEN

$A$	doorstroomoppervlak ( $m^2$ )
$B$	breedte (m)
$d$	waterdiepte (m)
$h_1$	waterstand bovenstrooms t.o.v. kruinhoogte (m)
$h_2$	waterstand benedenstrooms t.o.v. kruinhoogte (m)
$h_x$	waterstand t.o.v. referentie op locatie 'x' (m)
$L$	lengte eenheid (m)
$x$	lengte in stroomrichting (m)
$z$	hoogte (m)
$R$	hydraulische straal (m)
$S_0$	bodemhelling (-)
$Q$	debiet totaal ( $m^3/s$ )
$Q_{mg}$	debiet maatgevend ( $m^3/s$ )
$q$	debiet per breedte eenheid ( $m^2/s$ )
$u$	gemiddelde stroomsnelheid in doorstroomoppervlak (m/s)
$g$	gravitatie versnelling ( $m/s^2$ )
$N$	schaalfactor (-)
$Fr$	Froudegetal (-)
$C$	Chézy coëfficiënt ( $m^{1/2}/s$ )
$n$	Manning's n ( $s/m^{1/3}$ )
$1/n$	Strickler coëfficiënt, ook aangeduid met: $kM$ ( $m^{1/3}/s$ )
$C_d$	afvoercoëfficiënt (-)
$C_w$	correctiecoëfficiënt (-)
$f$	reductiefactor voor gestuwde afvoer (-)

Het subscript  $p$ , staat voor *prototype*.

Het subscript  $m$ , staat voor *model*.

# DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstututen en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 033 - 460 32 00.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort.

Email: [stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl).

Website: [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)



# HYDRAULISCH FUNCTIONEREN VISPASSEERBARE CASCADES

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	LIJST MET SYMBOLEN	
	STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
	1.1 Onderzoeksvragen	2
<b>2</b>	<b>PROTOTYPE</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>SCHAALMODEL</b>	<b>4</b>
	3.1 Geometrische schaalfactor	4
	3.2 Froude schaalfactor	4
	3.3 Ontwerp schaalmodel	5
<b>4</b>	<b>METINGEN</b>	<b>7</b>
	4.1 Meetmethode	7
	4.2 Meetlocaties	8
	4.3 Meetplan	9



<b>5</b>	<b>METHODE</b>	<b>11</b>
<b>5.1</b>	<b>Overlaat binnen SOBEK</b>	<b>11</b>
5.1.1	Universal weir (Methode 1)	12
5.1.2	River weir (Methode 2)	13
5.1.3	Vistrap als ruwoppervlak (Methode 3)	13
<b>5.2</b>	<b>Data analyse voor bepaling invoerparameters</b>	<b>14</b>
5.2.1	Universal weir (Methode 1)	14
5.2.2	River weir (Methode 2)	14
5.2.3	Vistrap als ruwoppervlak (Methode 3)	15
<b>6</b>	<b>RESULTATEN</b>	<b>16</b>
<b>6.1</b>	<b>Qh-relaties</b>	<b>16</b>
6.1.1	Qh-relaties voor de verschillende ontwerpen	16
6.1.2	Invloed bodemhelling op Qh-relatie	18
6.1.3	Vergelijking Qh-relaties verschillende ontwerpen	19
<b>6.2</b>	<b>Profielen waterspiegel over vistrappen</b>	<b>22</b>
<b>6.3</b>	<b>Resultaten invoerparameters</b>	<b>22</b>
6.3.1	Effectieve kruinhoogte	22
6.3.2	Cascade vistrap invoerparameters voor SOBEK	23
6.3.3	Enkele rechte drempel invoerparameters voor SOBEK	28
6.3.4	Enkele V-vormige drempel invoerparameters voor SOBEK	30
6.3.5	Samenvatting methodes	32
<b>7</b>	<b>SAMENVATTING EN CONCLUSIES</b>	<b>33</b>
	<b>REFERENTIES</b>	<b>35</b>
	<b>BIJLAGEN</b>	
1	ONTWERP	37
2	MEETPLAN	41
3	Qh-RELATIES PROTOTYPE WAARDEN	43
4	WATERSTANDSPROFIEL IN OVER CONSTRUCTIE, VOOR 12 DEBIETEN (1-120 L/S) EN 5 BENEDENSTROOMSE SCHUIFHOOGTES	47
5	METHODE VOOR DE OMZETTING VAN PROTOTYPE WAARDEN NAAR MODELWAARDE EN OMGEKEERD	57

# 1

## INLEIDING

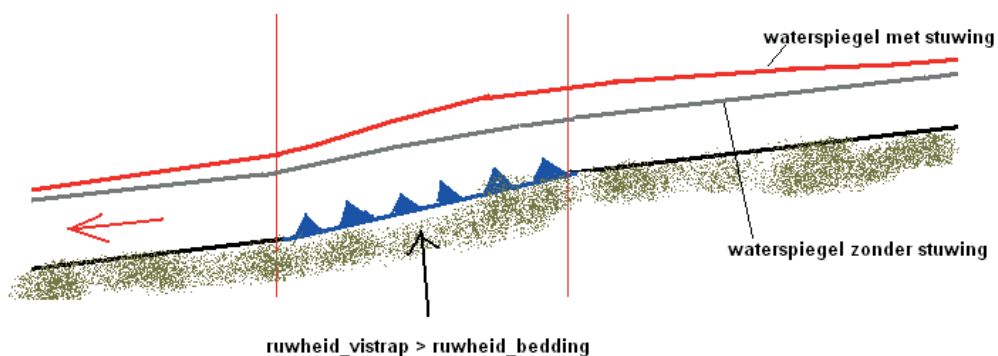
In diverse stroomgebieden worden in beken en kleine rivieren vispasseerbare cascades (vistrappen) aangelegd ter vervanging van stuwen. De cascades worden doorgaans uitgevoerd in stortsteen. Uit herberekeningen van extreem hoge afvoeren die in augustus 2010 zijn opgetreden in Oost Nederland, is gebleken dat modelberekeningen met SOBEK Channel Flow, leiden tot een onrealistische opstuwung bovenstrooms van een cascade. Het Waterschap Rijn en IJssel heeft onvoldoende vertrouwen in de gesimuleerde opstuwung om op basis hiervan een kadeverhoging door te voeren. Er is een gebrek aan kennis omtrent de relatie tussen de waterstand en afvoer, tot 2,5 keer de maatgevende afvoer.

Wanneer de waterstand bovenstrooms en benedenstrooms van een cascade oploopt, als gevolg van een afvoergolf, zal de constructie verdrinken. Dit betekent dat de benedenstroomse waterstand de bovenstroomse waterstand beïnvloed en eventuele opstuwung in de benedenloop ook bovenstrooms van de cascade van invloed is. De stroming over de constructie gaat tijdens de ‘verdrinking’ over van schietend water (Froude getal  $> 1$ ) naar stromend water (Froude getal  $< 1$ ).

In Figuur 1 is schematisch het effect van een vistrap op de waterstand weergegeven. De cascade bestaat uit een serie drempels en heeft een relatief ruw oppervlak wat kan leiden tot bovenstroomse opstuwung. Tijdens laagwater kan alleen de bovenstroomse drempel resulteren in een lichte opstuwung bovenstrooms, aangezien het Froudegetal over de treden groter is dan één (schietend water). Het modeleren van de volledige complexe stroming inclusief turbulentie over deze vistrap zou een toepassing van de drie dimensionale Navier-Stokes vergelijking met vrije randvoorwaarde met zich meebrengen. Omdat dit niet haalbaar is, is er voor gekozen om de globale gevolgen van de vistrap binnen SOBEK te conceptualiseren hetgeen een herinterpretatie van de betrokken parameters met zich meebrengt. Er zijn tot op heden geen algemeen geldende parameterisaties beschikbaar die geïjkt zijn om de ruwheid te kwantificeren, of de bestaande overlaatformules met de juiste correctie factoren aan te passen. Daarom is een schaalexperiment uitgevoerd om voor de specifieke vistrap van deze studie de parameters te bepalen.

FIGUUR 1

SCHEMS VAN VERHANGLIJNEN OVER EEN CASCADE VISTRAP



Het voorliggende rapport doet verslag van een fysisch schaalexperiment gericht op het kwantificeren van de invloed van een cascade vistrap op de waterstand. Het gesimuleerde prototype is een cascade met acht drempels die een hoogteverschil van 0.7 meter overbrugt. De drempels bestaan uit stortsteen en hebben een recht aanstroombroef (de kruin is horizontaal). De cascade bevindt zich in een waterloop met een breedte van 10 meter en een maatgevende afvoer ( $Q_{mg}$ ) van 20 m<sup>3</sup>/s. De maatgevende afvoer is gedefinieerd als de afvoer die gemiddeld één keer per jaar wordt overschreden. De maximale bodemhelling van de waterloop bedraagt 1/1000.

Het schaalexperiment is uitgevoerd in een stroomgoot van 14.9 meter lang en 1.16 meter breed. Op basis van de maten van de stroomgoot en het prototype is een schaalfactor van 1:15 gekozen. Naast de invloed van een cascade vistrap op de waterstand is het tevens een vergelijking gemaakt met een enkele rechte drempel (horizontale kruin) en een enkele V-vormige drempel. Ook voor deze ontwerpen zijn parameters opgesteld voor het gebruik in een hydraulisch model.

### 1.1 ONDERZOEKSVRAGEN

Het doel van het schaalexperiment is tweeledig. Ten eerste verschaffen de meetresultaten kennis over het functioneren van een cascade vistrap, enkele rechte drempel en enkele V-vormige drempel, bij verschillende afvoeren (5%-250% $Q_{mg}$ ) en verschillende benedenstroomse waterstanden. Bovendien is een vergelijking mogelijk tussen de verschillende ontwerpen. Ten tweede heeft het onderzoek als doel om de resultaten mathematisch te beschrijven en te parametriseren, zodat in SOBEK het onderzochte cascade ontwerp op een juiste manier kan worden gemodelleerd. Dit geldt tevens voor de enkele rechte drempel en de V-vormige drempel. Voor het onderzoek zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

- 1 Hoe zien de Qh-relaties eruit van een cascade vistrap, enkele rechte drempel en een enkele V-vormige drempel, bij verschillende benedenstroomse waterstanden en een afvoerbereik van 5%-250%  $Q_{mg}$ ?
- 2 Hoe verschilt de Qh-relatie tussen de cascade vistrap, een enkele rechte drempel en een enkele V-vormige drempel?
- 3 Wat is de invloed van de bodemhelling (helling 1/1000) op de Qh-relaties?
- 4 Welke parameters (zoals in SOBEK worden toegepast) kunnen gebruikt worden om de drie ontwerpen te simuleren?
- 5 Wat is de Manning's  $n$  en Chezy coëfficiënt van het onderzochte cascade vistrap, zodat deze kan worden toegepast in SOBEK.
- 6 Wat is een geschikte kruinhoogte? Aangezien de keuze voor een kruinhoogte van grote invloed is op de gebruikte overlaat formules.



# 2

## PROTOTYPE

De Groenlose Slinge en de Buurserbeek, die benedenstrooms overgaat in de Schipbeek, kunnen beschouwd worden als de prototypebekken voor dit schaalonderzoek. Het prototype wordt gekenmerkt door onderstaande gegevens. Het fysische schaalmodel is gebaseerd op deze maten. De breedte van het prototype is niet op schaal nagebouwd. Voor de cascade vistrap en de rechte drempel levert dit geen probleem op, aangezien het ontwerp zich over de hele breedte van de rivier/beek uitstrekt en het profiel rechthoekig is. De opstuwende werking van een V-vormig overlaat is wel gevoelig voor de breedte, omdat de waterdiepte en de hydraulische ruwheid, breedte afhankelijk zijn.

### WATERLOOP

- Doorstroomprofiel is rechthoekig
- Breedte ( $B$ ) = 10 m
- Bodemhelling ( $S_0$ ) = 0 en 1/1000
- Maatgevende afvoer ( $Q_{mg}$ ) = 20 m<sup>3</sup>/s
- Maatgevende afvoer per breedte eenheid ( $Q_{mg}$ ) = 2.0 m<sup>2</sup>/s

### CASCADE VISTRAP

- Kruinlengte = 0.3 m
- Kruinbreedte = 10 m (gelijk aan breedte waterloop)
- Kruinafstand (in de stromingsrichting) = 10 m
- Drempelhoogte t.o.v. lokale bodem = 1.0 m
- Voetbreedte = 2.3 m
- Talud = 1:1
- Verval cascade vistrap = 1:100
- Totaal hoogte verschil over cascade vistrap = 0.7 m
- Aantal drempels = 8
- Gemiddelde diameter stortsteen = 0.3 m

### ENKELE RECHTE DREMPEL

- Maten drempel identiek aan cascade vistrap
- Aantal drempels = 1

### ENKELE V-VORMIGE DREMPEL

- Kruinlengte = 0.3 m
- Kruinbreedte = 10 m (gelijk aan breedte waterloop)
- Drempelhoogte op diepste punt V-vorm t.o.v. lokale bodem = 1.0 m
- Voetbreedte = 2.3 m
- Talud op diepste punt V-vorm = 1:1
- Helling V-vorm (aanstroomprofiel) = 1:7
- Totaal hoogte verschil over enkele V-vormige drempel = 0.7 m
- Gemiddelde diameter stortsteen = 0.3 m

# 3

## SCHAALMODEL

### 3.1 GEOMETRISCHE SCHAALFACTOR

De schaalexperimenten zijn uitgevoerd in een stroomgoot met een lengte van 14.9 m en een breedte van 1.16 m. Gezien de dimensies van het prototype (Hoofdstuk 2) en de afmetingen van de stroomgoot in het *Kraijenhoff van de Leur Laboratorium* is gekozen voor een geometrische schaalfactor die gelijk is aan 15.

$$N_L = \frac{L_p}{L_m} = 15 \quad [1]$$

$N_L$  geometrische schaalfactor voor de lengte eenheid (-)

$L_p$  lengte-eenheid van het prototype (m)

$L_m$  lengte-eenheid van het model (m)

### 3.2 FROUDE SCHAALFACTOR

In open waterlopen is er onder natuurlijke omstandigheden altijd sprake van een turbulente stroming. De mate van turbulentie wordt uitgedrukt door het Reynoldsgetal (de ratio tussen de traagheidskrachten en de viskeuze krachten). De overgang van een laminaire stroming naar een turbulente stroming in een open waterloop, ligt ongeveer bij een Reynoldsgetal van 800. Onder turbulente omstandigheden wordt de vloeistofbeweging gedomineerd door de zwaartekracht en kan de schaalregel van Froude worden toegepast (Yalin, 1971). Wanneer echter de stroming laminair is spelen ook viskeuze krachten een rol. Dus voor een juiste vergelijking tussen prototype en model moet de stroming in het model turbulent zijn.

Om te voldoen aan dynamische gelijkheid tussen het prototype en het model wordt onder turbulente omstandigheden de stroomsnelheid en afvoer geschaald volgens de Froude schaalregel. Het Froudegetal ( $Fr$ ) geeft aan wanneer er sprake is van stromend ( $Fr < 1$ ) of schietend water ( $Fr > 1$ ). Het Froudegetal moet in model en prototype gelijk zijn:

$$N_{Fr} = \frac{Fr_p}{Fr_m} = 1 \quad [2]$$

$N_{Fr}$  Froude schaalfactor (-)

$Fr_m$  Froudegetal van het model (-)

$Fr_p$  Froudegetal van het prototype (-)

Het Froudegetal kan uitgedrukt worden in de ratio van de stroomsnelheid en de loopsnelheid van een oppervlakte verstoring:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gd}} = \frac{Q}{\sqrt{gd} A} \quad [3]$$

$u$  gemiddelde stroomsnelheid (m/s)

$g$  gravitatie constante (m/s<sup>2</sup>)

$d$  waterdiepte (m)

$Q$  debiet (m<sup>3</sup>/s)

$A$  doorstroomoppervlak (m<sup>2</sup>)

Wanneer voldaan is aan de Froude schaalregel ( $Fr_p = Fr_m$ ) geldt:

$$\frac{u_p}{u_m} = \left( \frac{L_p}{L_m} \right)^{0.5} \quad \& \quad \frac{q_p}{q_m} = \left( \frac{L_p}{L_m} \right)^{1.5} \quad [4]$$

Hierin is  $u$  de gemiddelde stroomsnelheid,  $q$  de afvoer per eenheid van breedte en  $L$  een lengte-maat. Bij een geometrische schaalfactor van 15 geldt:  $u_p = 3.87 u_m$  en  $q_p = 58.1 q_m$ .

Aangezien de breedte van de stroomgoot groter is dan de geschaalde breedte van het prototype geldt voor een berekening van het debiet in het prototype de volgende relatie:

$$Q_p = \left( \frac{L_p}{L_m} \right) \frac{Q_m}{B_m} B_p \quad [5]$$

Hierin is  $Q$  het totale debiet,  $B$  de breedte en  $L$  een lengte maat.

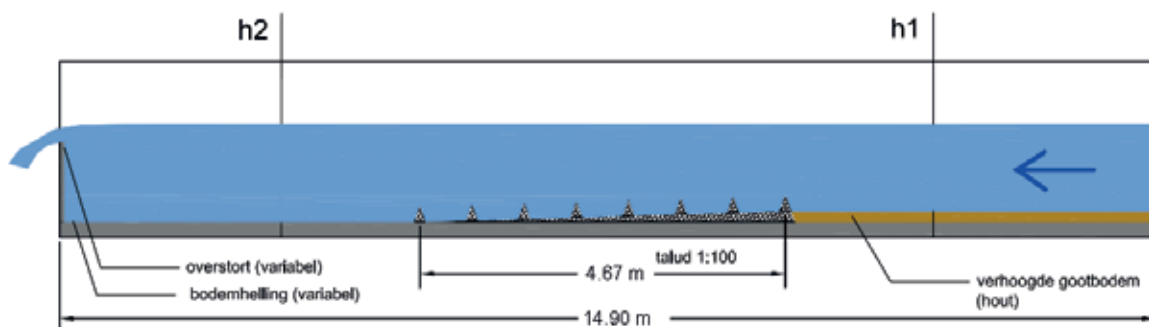
### 3.3 ONTWERP SCHAALMODEL

Binnen het onderzoek wordt het hydraulisch functioneren van drie verschillende ontwerpen onderzocht:

- 1 Cascade vistrap met 8 trappen (ontwerp A)
- 2 Enkele rechte drempel (ontwerp B)
- 3 Enkele V-vormige drempel (ontwerp C)

Een schets van de experimentele opstelling voor cascade vistrap (ontwerp A) is weergegeven in Figuur 2. De enkele drempels van de twee andere ontwerpen (B en C) liggen op dezelfde locatie als de eerste drempel van de cascade vistrap. De kruinhoogte van de enkel rechte drempel is gelijk aan de kruinhoogte van de eerste cascade vistrap. Het diepste punt van de V-vormige drempel is tevens gelijk aan de kruinhoogte van de eerste drempel van de cascade vistrap.

FIGUUR 2 OPSTELLING VAN DE CASCADE VISTRAP IN DE STROOMGOOT. DE TEKENING IS NIET OP SCHAAL: DE VERTICALE SCHAAL IS 4X VERGROOT,  $h_1$  EN  $h_2$  ZIJN RESPECTIEVELIJK BOVENSTROOMSE EN BENEDENSTROOMSE WATERSTANDEN



De bodem van de goot bestaat uit hout beplakt met grof zand ( $D_{50} = 1$  mm). De wanden van de goot zijn bekleed met glad materiaal over de gehele lengte van de goot, waardoor de ruwheid van de wanden verwaarloosd kan worden (Figuur 3). De drempels bestaan uit basaltsplit met diameter 16-32 mm (gemiddelde diameter 24 mm) die vastgeplakt zitten op een houten kern. Ook de bekkens tussen de trappen zijn bekleed met basaltsplit (Figuur 3). Een correct verschaalde diameter van de stortstenen is  $0.3/15 \cdot 1000 = 20$  mm. Het gebruikte basaltsplit is dus iets groter, echter bij de aanleghoogte is rekening gehouden met de gebruikte diameters, zodat de hoogte van de drempels bij benadering overeenkomen met het geschaalde prototype (Figuur 4).

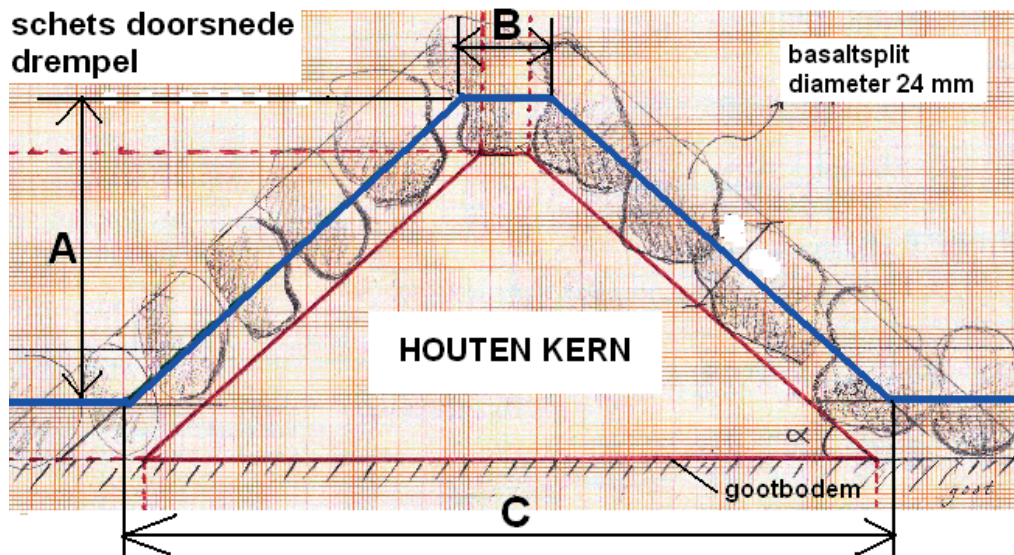
FIGUUR 3

DETAIL CASCADE VISTRAP



FIGUUR 4

DOORSNEDE RECHTE DREMPEL. BLAUWE LIJN GEEFT DE ONTWERPHOOGTE WEER, DEZE LIGT OP DE GEMIDDELDE HARTLIJN VAN HET BASALTSPLIT. ONDER DE DOORSNEDE STAAN DE PROTOTYPEMATEN EN DE MODELMATEN BIJ DE GEOMETRISCHE SCHAALFACTOR 15



hoogte drempel (A) =  $1.0 \text{ m} / 15 = 0.067 \text{ m}$   
 kruinlengte (B) =  $0.3 \text{ m} / 15 = 0.02 \text{ m}$   
 voetbreedte (C) =  $2.3 \text{ m} / 15 = 0.153 \text{ m}$

In BIJLAGE 1 zijn foto's opgenomen van de verschillende ontwerpen. De maten van het model zijn gebaseerd op de prototypematen en schaalfactor 15 (zie Hoofdstuk 2).

# 4

## METINGEN

### 4.1 MEETMETHODE

De waterstand in de stroomgoot wordt gemeten met een *magnetostrictive position sensor*. De sensoren meten buiten de stroomgoot in een peilbuis de waterstand met behulp van een vlotter. In de stroomgoot wordt de waterstand doorgegeven naar de peilbuizen d.m.v. Pitotbuizen, waarin de statische waterdruk wordt gemeten. Het ontwerp van een Pitotbuis zorgt ervoor dat er geen sprake is van opstuwning wanneer de buis in het stromend water wordt geplaatst. Tevens worden de korte golven in de waterspiegel uitgedempt. De meetnauwkeurigheid van meetopstelling bedraagt  $\pm 0.2$  mm.

Om het effect van staande golven uit te middelen, welke ontstaan tussen de drempels, is ervoor gekozen om de waterstand te meten in een vlak. Op vier punten in de lengterichting wordt de waterstand gemiddeld en doorgegeven aan de peilbuis buiten de goot, volgens het principe van communicerende vaten (zie Figuur 5). De waterstanden in de peilbuizen worden gemeten t.o.v. een referentievlak dat 0.5 m onder de gootbodem ligt, bij een horizontale gootbodem (zie Figuur 6).

FIGUUR 5

PITOTBUIZEN IN STROOMGOOT. TUSSEN DE DREMPELS (CASCADE VISTRAP) WORDT DE WATERSTAND GEMIDDELD OVER 4 MEETPUNTEN

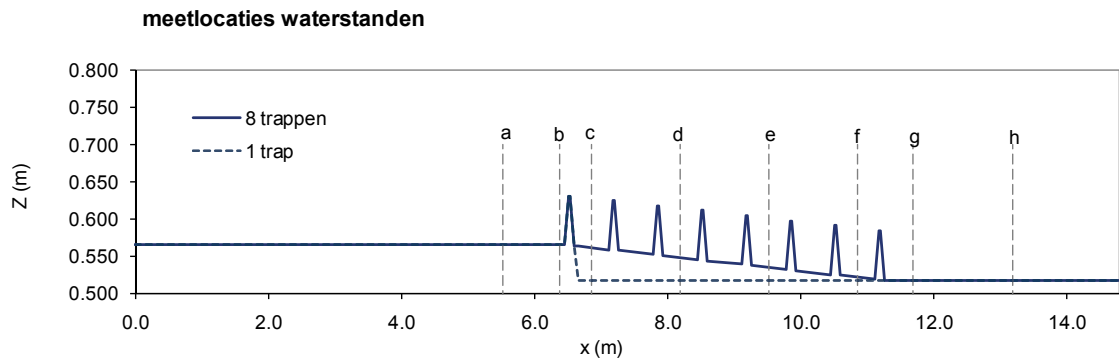




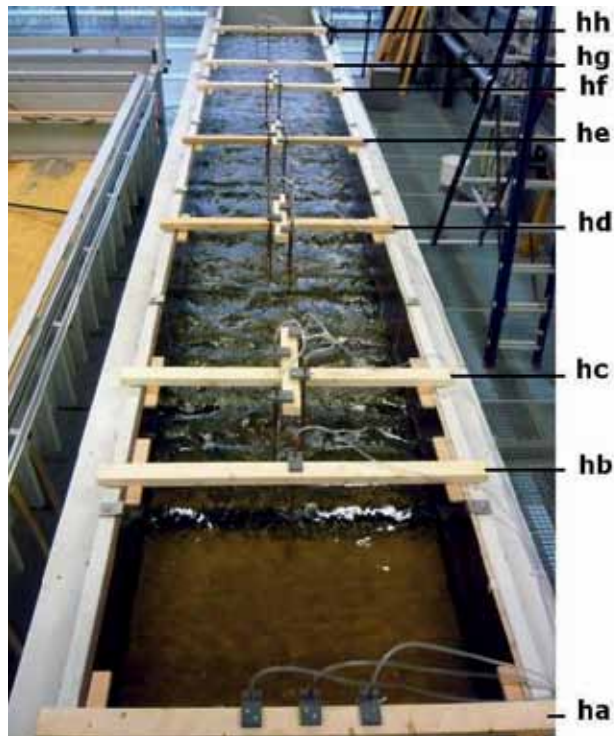
## 4.2 MEETLOCATIES

De meetlocaties in de lengterichting van de stroomgoot zijn voor alle drie de ontwerpen gelijk en weergegeven in Figuur 6 en Figuur 7. De bodemhoogte ( $Z$ ) op de betreffende meetlocaties ( $X$ ) zijn opgenomen in Tabel 1.

FIGUUR 6 MEETLOCATIES a t/m h



FIGUUR 7 MEETLOCATIES a t/m h



TABEL 1 MEETLOCATIES IN DE LENGTERICHTING (X) EN BODEMHOOGTE (Z) VOOR MEETPUNTEN a t/m h. DE MEETLOCATIES VOOR DE V-VORMIGE DREMPEL ZIJN IDENTIEK AAN DE RECHTE DREMPEL

meetpunt	X (m) tov begin goot	cascade helling = 0		cascade helling = 1/1000		enkele trap helling = 0		enkele trap helling = 1/1000	
		Z (m)		Z (m)		Z (m)		Z (m)	
		tov referentie		tov referentie		tov referentie		tov referentie	
a	5.530	0.565	0.560	0.565	0.565	0.560			
b	6.380	0.565	0.559	0.565	0.559				
c	6.863	0.561	0.556	0.518	0.512				
d	8.197	0.548	0.541	0.518	0.511				
e	9.530	0.535	0.526	0.518	0.510				
f	10.863	0.521	0.512	0.518	0.508				
g	11.697	0.518	0.507	0.518	0.507				
h	13.197	0.518	0.506	0.518	0.506				

#### 4.3 MEETPLAN

De Qh-relaties voor de verschillende ontwerpen worden onderzocht binnen het bereik van 5-250% $Q_{mg}$ . Tabel 2 bevat voor verschillende percentages van de maatgevende afvoer, de debieten in het prototype en het model. Om het te onderzoeken bereik ruim te nemen, is ervoor gekozen om het debiet in de stroomgoot te variëren tussen 1 l/s en 120 l/s.

TABEL 2 MAATGEVENDE TOTALE AFVOER ( $Q_{mg}$ ) EN AFVOER PER BREEDTE EENHEID ( $q_{mg}$ )

debiet totaal	PROTOTYPE ( $m^3/s$ )	MODEL ( $m^3/s$ )	debiet per breedte eenheid	PROTOTYPE ( $m^2/s$ )	MODEL ( $m^2/s$ )
0.05 $Q_{mg}$	1	0.0020	0.05 $q_{mg}$	0.1	0.0017
$Q_{mg}$	20	0.0401	$q_{mg}$	2.0	0.0344
1.5 $Q_{mg}$	30	0.0601	1.5 $q_{mg}$	3.0	0.0516
2 $Q_{mg}$	40	0.0801	2 $q_{mg}$	4.0	0.0689
2.5 $Q_{mg}$	50	0.1002	2.5 $q_{mg}$	5.0	0.0861
Breedte (m)	10	1.16			

Voor alle drie de ontwerpen wordt de waterstand gemeten op de acht meetlocaties. Bij elk ontwerp wordt bij een afvoer van 1 t/m 120 l/s de waterstand gemeten over de constructie. Daarnaast wordt per afvoerreeks (1-120 l/s) de schuifhoogte t.o.v. de benedenstroomse bodemhoogte gevarieerd om de verschillende mate van verdrinking te simuleren. De volgende vijf schuifhoogtes zijn tijdens de experimenten toegepast:

Schuifhoogte 1 = 0.06 m

Schuifhoogte 2 = 0.09 m

Schuifhoogte 3 = 0.12 m

Schuifhoogte 4 = 0.16 m

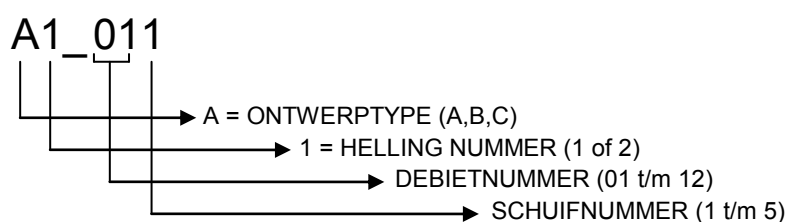
Schuifhoogte 5 = 0.20 m

In onderstaande tabel zijn de verschillende ontwerpen weergegeven bij een helling van 0 en 1/1000.

TABEL 3 ONTWERPEN GECOMBINEERD MET BODEMHELLING

aantal drempels	type drempel	code	helling	
			0%	0.001
			1	2
8	rechte drempel	A	A1	A2
1	rechte drempel	B	B1	B2
1	V-vormig drempel	C	C1	-

Elke meting heeft een eigen meetreeksnummer. Hierin varieert het schuifnummer tussen 1 en 5 (zie de schuifhoogtes hierboven) en het debietnummer varieert tussen 1 en 12; respectievelijk 1 l/s en 120 l/s. In verschillende figuren kan verwezen worden naar het meetreeksnummer of code van het ontwerp. In BIJLAGE 2 is het volledig meetplan opgenomen en Tabel 4 geeft als voorbeeld het meetplan voor A1, hierin is het meetreeksnummer is als volgt opgebouwd:



TABEL 4 VOORBEELD MEETPLAN VOOR CASCADE VISTRAP BIJ EEN HORIZONTALE BODEM

<b>A1</b>	schuif_nr.	1	2	3	4	5
helling = 0	schuifhoogte (cm)	6	9	12	16	20
debiet_nr	Q_model	meetreeksnummer				
	l/s					
1	1	A1-011	A1-012	A1-013	A1-014	A1-015
2	5	A1-021	A1-022	A1-023	A1-024	A1-025
3	10	A1-031	A1-032	A1-033	A1-034	A1-035
4	25	A1-041	A1-042	A1-043	A1-044	A1-045
5	40	A1-051	A1-052	A1-053	A1-054	A1-055
6	50	A1-061	A1-062	A1-063	A1-064	A1-065
7	60	A1-071	A1-072	A1-073	A1-074	A1-075
8	70	A1-081	A1-082	A1-083	A1-084	A1-085
9	80	A1-091	A1-092	A1-093	A1-094	A1-095
10	90	A1-101	A1-102	A1-103	A1-104	A1-105
11	100	A1-111	A1-112	A1-113	A1-114	A1-115
12	120	A1-121	A1-122	A1-123	A1-124	A1-125

# 5

## METHODE

In dit hoofdstuk is beschreven welke methodes en parameters kunnen worden toegepast binnen SOBEK om de effecten van een cascade vistrap te simuleren (of één van de andere twee onderzochte ontwerpen). Ten eerste biedt SOBEK de mogelijkheid om een vistrap te simuleren als één overlaatoobject (*weir*) of meerdere overlaatoobjecten. Daarnaast kan de opstuwende werking van een vistrap worden gesimuleerd door op de locatie van de vistrap, een verhoogde ruwheid toe te kennen aan de bodem. In paragraaf 5.2 is beschreven hoe de verschillende parameters (die als invoer dienen voor het hydraulische model) zijn bepaald op basis van de experimenten. Voor de beschrijving van de methodes binnen SOBEK (paragraaf 5.1) is gebruik gemaakt van: *SOBEK documentation 2.12.002*, deze handleiding is online beschikbaar.

In de onderstaande tekst wordt steeds het doorstroomoppervlak als rechthoekig beschouwd. Bovendien is de overlaat even breed als de waterloop, dus een contractiecoëfficiënt wordt niet toegepast. In de onderstaande methodes wordt de afvoer per eenheid van breedte ( $q$ ) gebruikt, in plaats van de totale afvoer, omdat de breedte van de waterloop als constant is verondersteld. Voor de V-vormige drempel geldt dit niet en is het totale debiet  $Q$  gebruikt in de berekening.

### 5.1 OVERLAAT BINNEN SOBEK

In een waterloop kan binnen SOBEK verschillende objecten (*structures*) worden geselecteerd. Het uitgangspunt is om de cascade trappen te simuleren als één overlaatoobject, dus niet per trede een aparte overlaat.

De waterstand over een overlaat wordt in SOBEK berekend met de standaard overlaatformules voor een lange overlaat, die gebaseerd zijn op de Wet van Bernoulli. Er kunnen zich drie situaties voordoen: niet-verdronken afvoer (*free flow*), verdronken afvoer (*submerged flow*) en een situatie zonder afvoer (*no flow*). In de niet-verdronken situatie heeft de benedenstroomse waterstand ( $h_2$ ) geen invloed op de bovenstroomse waterstand ( $h_1$ ), er is dus sprake van een vrije overstort. In de verdronken situaties wordt  $h_1$  wel beïnvloed door  $h_2$ . Voor beide stromingscondities wordt in SOBEK de waterstand verschillend berekend. Het moment van verdrinking is uit te drukken in een bepaalde verdrinkingsgraad ( $h_2/h_1$ ), die voor elke overlaat verschillend is. De verdrinkingsgraad op het moment van verdrinking wordt het *modular limit* genoemd (*ml*).

In SOBEK kan onder andere gekozen worden tussen de volgende overlaat-objecten: *weir*, *universal weir*, *river weir* en *advanced weir*. De *weir* en *universal weir* gebruiken dezelfde overlaatformules en coëfficiënten, de *river weir* maakt gebruik van de standaard overlaatformule voor een lange overlaat, inclusief een reductiefactor die afhankelijk is van de verdrinkingsgraad. De *advanced weir* wordt in deze studie buiten beschouwing gelaten.

### 5.1.1 UNIVERSAL WEIR (METHODE 1)

De meest eenvoudige manier om een overlaat te simuleren binnen SOBEK is door gebruik te maken van het object *weir* of *universal weir*. Tijdens een niet-verdronken situatie en een rechthoekig doorstroomoppervlak geldt de volgende relatie:

$$q = C_d \sqrt{g} \left( \frac{2}{3} \right)^{3/2} h_1^{3/2} \quad [6]$$

Bij een verdronken situatie geldt:

$$q = C_d h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad [7]$$

$q$	afvoer per breedte eenheid (m <sup>2</sup> /s)
$C_d$	afvoercoëfficiënt (-)
$h_1$	bovenstroomse waterstand t.o.v. kruinhoogte (m)
$h_2$	benedenstroomse waterstand t.o.v. kruinhoogte (m)
$g$	gravitatie versnelling (m/s <sup>2</sup> )

Een verdronken overlaat geldt vanaf:  $h_2/h_1 \geq 2/3$ , deze waarde is als standaardwaarde opgenomen in het model.

Voor een V-vormig doorstroomoppervlak kan binnen SOBEK de *universal weir* methode worden gebruikt, door de hoogte van de overlaat per punt aan te passen. De volgende formulering wordt gebruikt voor een niet-verdronken situatie (SOBEK-manual):

$$Q = C_d A \sqrt{2g(1 - ml)h_1} \quad [8]$$

$$\text{IF: } ml h_1 \leq h_v \rightarrow A = 0.5(ml h_1)^2 (1/h_v)B$$

$$\text{ELSE: } ml h_1 > h_v \rightarrow A = (ml h_1 - 0.5h_v)B$$

Bij een verdronken situatie geldt:

$$Q = C_d A \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad [9]$$

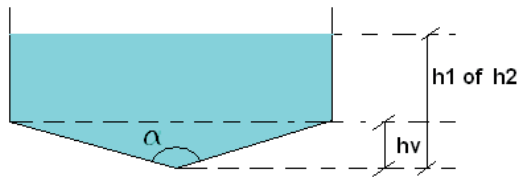
$$\text{IF: } h_2 \leq h_v \rightarrow A = 0.5h_2^2 (1/h_v)B$$

$$\text{ELSE: } h_2 > h_v \rightarrow A = (h_2 - 0.5h_v)B$$

$Q$	afvoer (m <sup>3</sup> /s)
$C_d$	afvoercoëfficiënt (-)
$A$	doorstroomoppervlak (m <sup>2</sup> )
$h_1$	bovenstroomse waterstand t.o.v. kruinhoogte, kruinhoogte ligt op laagste punt V-vorm (m)
$h_2$	benedenstroomse waterstand t.o.v. kruinhoogte, kruinhoogte ligt op laagste punt V-vorm (m)
$ml$	modular limit (-)
$h_v$	verticale hoogte V-vorm (m)
$g$	gravitatie versnelling (m/s <sup>2</sup> )

FIGUUR 8

DOORSTROOMOPPERVLAK V-VORMIGE DREMPEL, 'hv' IS DE HOOGTE VAN DE V-VORM, h1 EN h2 ZIJN DE BOVENSTROOMSE OF BENEDENSTROOMSE WATERSTAND



Belangrijkste invoerparameters in SOBEK:

- kruinbreedte
- kruinhoogte
- afvoercoëfficiënt ( $C_d$ )

### 5.1.2 RIVER WEIR (METHODE 2)

Het object *river weir* kan alleen worden toegepast bij een rechthoekig doorstroomoppervlak. De methode is dus niet toegepast voor de V-vormige overlaat. Voor verdrongen en niet-verdrongen stromingscondities wordt de volgende overlaatformule gebruikt:

$$q = C_w f \sqrt{g} \left( \frac{2}{3} \right)^{3/2} h_1^{3/2} \quad [10]$$

- $q$  afvoer per breedte eenheid ( $m^2/s$ )  
 $C_w$  correctiecoëfficiënt (-)  
 $f$  reductiefactor voor gestuwde afvoer (-)  
 $h_1$  bovenstroomse waterstand t.o.v. kruinhoogte (m)  
 $g$  gravitatie versnelling ( $m/s^2$ )

De reductiefactor ( $f$ ) is tijdens een niet-verdrongen situatie ( $h_2/h_1 < \text{modular limit}$ ), gelijk aan 1 (SOBEK-manual). Wanneer de overlaat wel is verdrongen en er sprake is van gestuwde afvoer, is  $f$  een functie van de verdringsgraad ( $h_2/h_1$ ). Deze relatie is als tabel in SOBEK aanwezig en kan geselecteerd worden door een bepaalde kruinvorm te kiezen (bijvoorbeeld: *broad, sharp, triangular, round*).

Belangrijkste invoerparameters in SOBEK:

- kruinlengte
- kruinhoogte
- modular limit ( $h_2/h_1$ ).
- correctiecoëfficiënt ( $C_w$ )
- reductiefactor ( $f$ )

### 5.1.3 VISTRAP ALS RUWOPPERVLAK (METHODE 3)

De ruwheid van een doorstroomoppervlak kan in SOBEK worden opgegeven, door de Manning's  $n$  aan te passen. Tevens moet over het traject de bodemhelling worden aangepast aan de helling van de vistrap, in dit onderzoek is de helling van de vistrap 1/100. De bodemhoogte wordt opgegeven als een hellend vlak dat 'over de toppen' van de cascadetrappen ligt.

Belangrijkste invoerparameters in SOBEK:

- Manning's  $n$
- bodemhelling van vistrap

## 5.2 DATA ANALYSE VOOR BEPALING INVOERPARAMETERS

De uiteindelijke parameters (kruinhoogte,  $C_d$ ,  $C_w$ ,  $f$ ) zijn een resultaat van de optimalisatie tussen de gemeten- en berekende afvoer. Hiervoor zijn steeds alle meetgegevens gebruikt. Om de prestatie van de verschillende methodes te vergelijken is per meetreeks (1 l/s – 120 l/s) en per schuifhoogte (1 t/m 5) de *Mean Squared Error* (MSE) berekend. In de onderstaande vergelijking is  $N$  het aantal gemeten afvoeren.

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{berekend}[i] - Q_{gemeten}[i])^2}{N}}$$

### 5.2.1 UNIVERSAL WEIR (METHODE 1)

#### KRUINBREEDTE

Bij een overlaat die zich bevindt over de volledige breedte van waterloop, speelt de breedte van de kruin geen rol (er is geen sprake van contractie). De kruinbreedte is altijd afhankelijk van de lokale situatie.

#### KRUINHOOGTE

Uit de vergelijkingen 6 en 10 komt de sterke invloed van de kruinhoogte op de waterstand naar voren,  $h_1$  is immers de waterstand t.o.v. de kruinhoogte. De kruinhoogte is in deze procedure niet meetkundig vastgesteld maar hydraulisch. Het verschil tussen het gemeten debiet en berekende debiet is geminimaliseerd d.m.v. een aanpassing in de kruinhoogte (hiervoor is de kleinste kwadraten methode toegepast). De zo verkregen kruinhoogte wordt de effectieve kruinhoogte genoemd.

#### AFVOERCOËFFICIËNT ( $C_d$ )

De afvoercoëfficiënt van een universal weir is voor niet-verdronken en verdronken afvoer gelijk (vergelijkingen [6] en [7]). Door de afvoer per eenheid van breedte ( $q$ ), uit beide vergelijkingen te vervangen door de gemeten afvoer, kan de  $C_d$ -waarde worden bepaald. Voor de bepaling van  $C_d$  zijn alle gemeten afvoeren gebruikt. Het verschil tussen het gemeten debiet en berekende debiet is geminimaliseerd doormiddel van een optimalisatie van  $C_d$  (kleinste kwadraten methode).

### 5.2.2 RIVER WEIR (METHODE 2)

#### KRUINLENGTE

Zie opmerkingen hierboven.

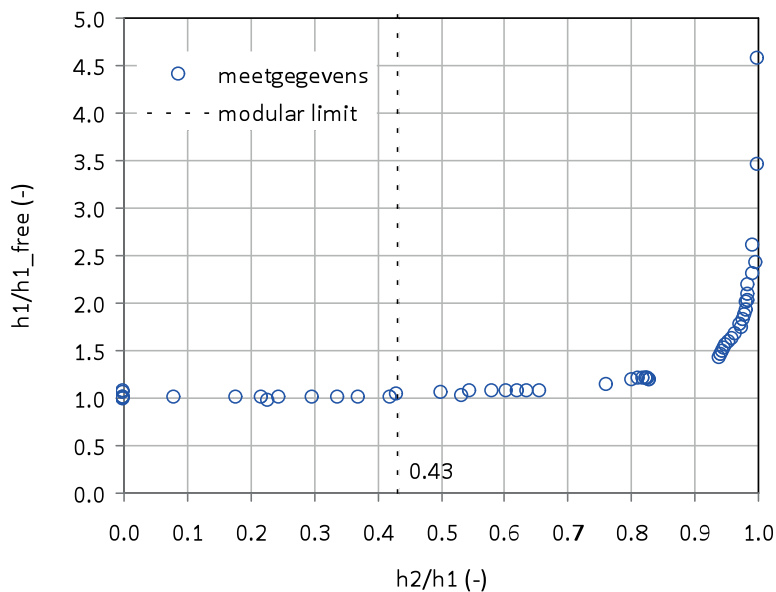
#### KRUINHOOGTE

Zie opmerkingen hierboven.

### MODULAR LIMIT ( $h_2/h_1$ )

Anders dan bij Methode 1, moet bij Methode 2 een modular limit worden opgegeven. Hiervoor is een figuur opgesteld met op de x-as de verdrinkingsgraad ( $h_2/h_1$ ) en op de y-as de ratio tussen de bovenstroomse waterstand  $h_1$  en de bovenstroomse waterstand tijdens een niet-verdronken situatie  $h_{1-free}$ . Omdat bij de laagste schuifhoogte (nr.1) de onderzochte ontwerpen nooit verdronken zijn, geldt voor elke afvoer:  $h_1 = h_{1-free}$ . De waterstanden bij schuifhoogte 1 zijn gebruikt als  $h_{1-free}$ . Wanneer een ontwerp niet-verdronken is geldt:  $h_1/h_{1-free} = 1$  en bij een verdronken situatie geldt:  $h_1/h_{1-free} > 1$ . Figuur 9 geeft een voorbeeld van het hierboven beschreven figuur. Bij het moment dat  $h_1/h_{1-free}$  voor het eerst groter is dan 1, kan op de y-as de bijbehorende  $h_2/h_1$  worden afgelezen. Deze waarde is de 'modular limit'.

FIGUUR 9 VERDRINKINGSGRAAD ALS FUNCTIE VAN  $h_1/h_{1-free}$ . HET MODULAR LIMIT IS 0.43



### CORRECTIECOËFFICIËNT ( $C_w$ )

De correctiecoëfficiënt is op dezelfde manier bepaald als de afvoercoëfficiënt (Methode 1). Het enige verschil is dat de correctiecoëfficiënt gebaseerd is op gegevens van de niet-verdronken afvoer. Dit komt omdat de reductiefactor ( $f$ ) de verdronken afvoer corrigeert (SOBEK-manual). Tijdens niet-verdronken afvoer is  $f$  gelijk aan 1 en corrigeert de correctiecoëfficiënt de berekende afvoer.

### REDUCTIEFACTOR ( $f$ )

De reductiefactor ( $f$ ) is een functie van de verdrinkingsgraad. Wanneer de verdrinkingsgraad kleiner is dan het modular limit, dan is  $f$  gelijk aan 1. Door in vergelijking [10] de afvoer  $q$ , te vervangen door de gemeten afvoer en de reeds vastgestelde waarde voor  $C_w$  toe te passen, kan  $f$  worden berekend. Vervolgens is  $f$  als functie van  $h_2/h_1$  uitgezet (voor  $h_2/h_1 >$  modular limit) en is door de gegevens een functie gefit. Indien  $h_2/h_1$  gelijk is aan 1, dan is  $f$  gelijk aan 0.

#### 5.2.3 VISTRAP ALS RUWOPPERVLAK (METHODE 3)

Door de stroomgoot in SOBEK te modelleren zijn de gemeten en berekende waarden met elkaar vergeleken. De afwijking is geminimaliseerd door de ruwheid van de cascade vistrap aan te passen. Deze methode is alleen uitgevoerd voor de cascade vistrap.



# 6

## RESULTATEN

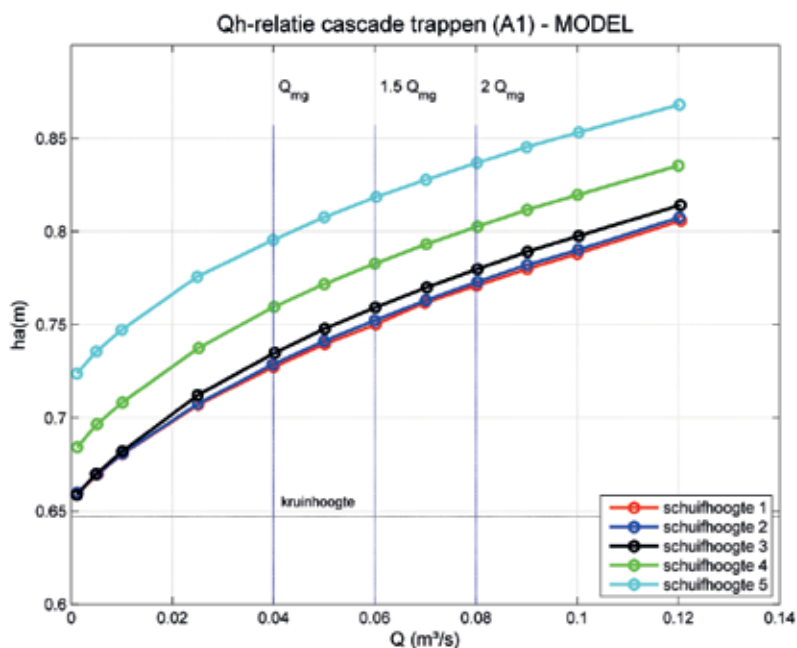
In dit hoofdstuk worden de resultaten van het schaalexperiment gepresenteerd en geanalyseerd. In paragraaf 6.1 wordt ingegaan op de verkregen Qh-relaties, waarin de bovenstroomse waterstand een functie is van het debiet (Q) en de opgelegde schuifhoogte benedenstrooms. Naast de presentatie van de resultaten worden de drie ontwerpen met elkaar vergeleken. In paragraaf 6.2 komen de waterstandprofielen over de cascade vistrappen, de enkele rechte drempel en de V-vormig drempel aan bod, die gebaseerd zijn op de acht meetpunten over de bemeten ontwerpen. Paragraaf 6.3 geeft de gevonden parameters die gebruikt kunnen worden in SOBEK, de gebruikte methodes zijn beschreven in paragraaf 5.2.

### 6.1 Qh-RELATIES

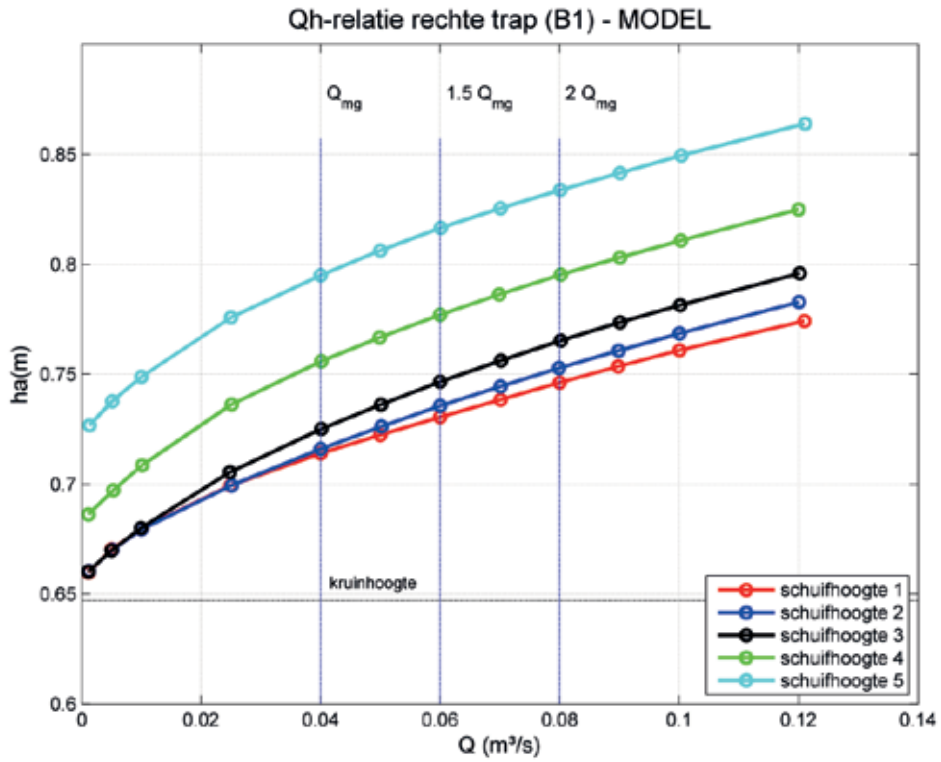
#### 6.1.1 Qh-REALTIES VOOR DE VERSCHILLENDE ONTWERPEN

De relatie tussen de bovenstroomse waterstand ( $ha$ ) en het debiet (Q) voor vijf schuifhoogte, is weergegeven in Figuur 10, Figuur 11 en Figuur 12. Het betreft de modelwaarden voor een horizontale gootbod. A1, B1 en C1 duiden op het type ontwerp en de bodemhelling (Tabel 3). De waterstand  $ha$  is de bovenstroomse waterstand op 1 meter bovenstrooms van de constructie. In de figuren is maatgevende afvoer ( $Q_{mg}$ ,  $1.5Q_{mg}$  en  $2Q_{mg}$ ) van het prototype weergegeven, welke zijn omgerekend naar modelwaarden (Tabel 2). In BIJLAGE 3 zijn dezelfde figuren afgebeeld, echter de modelwaarden zijn vervangen voor prototypewaarden.

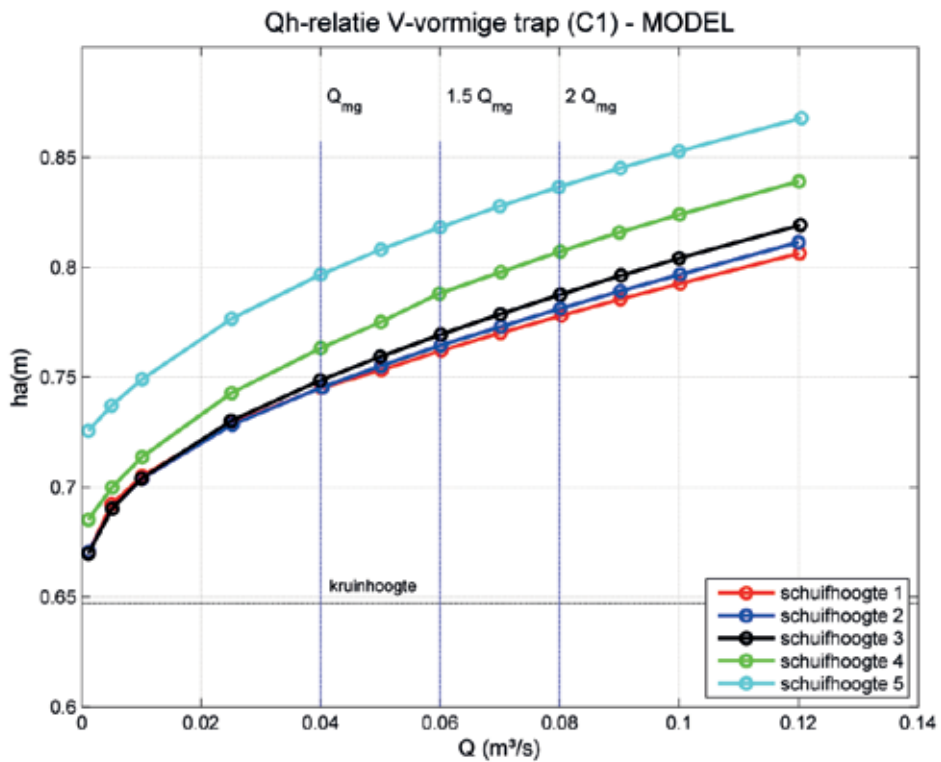
FIGUUR 10 Qh-RELATIE VOOR DE CASCADE VISTRAP BIJ VERSCHILLENDE SCHUIFHOOGTES ( $ha$  IS DE WATERSTAND OP MEETLOCATIE 'a' T.O.V. HET REFERENTIE VLAK) BIJ EEN BODEMHELLING VAN 0



FIGUUR 11 Qh-RELATIE VOOR DE ENKELE RECHTE DREMPEL BIJ VERSCHILLENDE SCHUIFHOOGTES (ha IS DE WATERSTAND OP MEETLOCATIE 'a' T.O.V. HET REFERENTIE VLAK) BIJ EEN BODEMHELLING VAN 0



FIGUUR 12 Qh-RELATIE VOOR DE ENKELE V-VORMIGE DREMPEL BIJ VERSCHILLENDE SCHUIFHOOGTES (ha IS DE WATERSTAND OP MEETLOCATIE 'a' T.O.V. HET REFERENTIE VLAK) BIJ EEN BODEMHELLING VAN 0

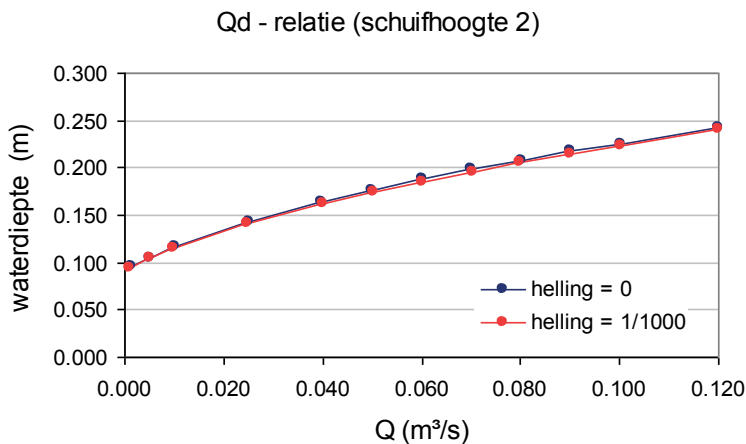


Uit bovenstaande drie figuren blijkt dat voor ontwerp A1 en C1 bij de schuifhoogtes 1 en 2 sprake is van een niet-verdronken situatie, aangezien de Qh-relaties vrijwel identiek zijn. Ontwerp B1 verdrinkt eerder en op het moment dat de Qh-relatie van schuifhoogte 2 voor het eerst afwijkt van schuifhoogte 1, dit is bij  $Q=0.05$  m<sup>3</sup>/s. Voor alle ontwerpen is bij schuifhoogte 4 sprake van een volledig verdronken situatie.

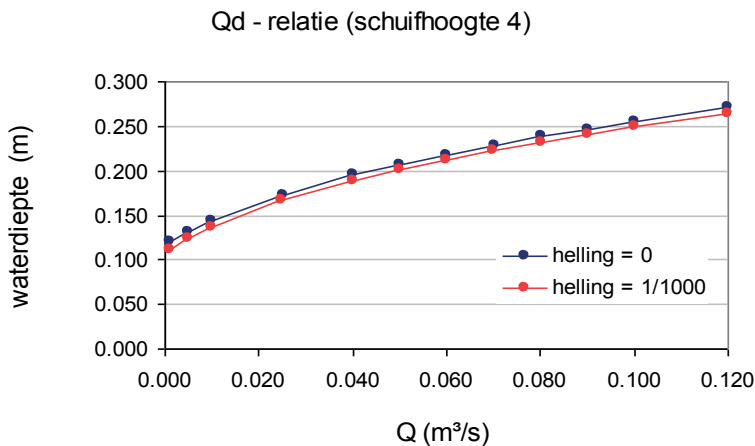
### 6.1.2 INVLOED BODEMHELLING OP Qh-RELATIE

Om de invloed van de bodemhelling op de Qh-relatie te onderzoeken zou idealiter de bodemhoogte op het meetpunt  $h_a$  constant moeten zijn. Dit is echter niet mogelijk omdat het draaipunt van de stroomgoot bovenstrooms ligt van de meetlocatie  $h_a$ . Hoe groter de helling hoe lager de beddinghoogte op het meetpunt  $h_a$ . Om toch een vergelijking te kunnen maken is een Qd-relatie opgesteld. De waterdiepte ( $d$ ) is in Figuur 13 en Figuur 14 uitgezet als functie van de afvoer ( $Q$ ). Uit de figuren blijkt dat de invloed van de bodemhelling op het verloop van de Qd-relatie beperkt is en dit geldt dus tevens voor de Qh-relatie. Bij hogere benedenstroomse waterstanden (grote schuifhoogte) neem het effect van de helling wel toe. Tabel 5 bevat voor de cascade vistrap het gemiddelde verschil in de waterstand per meetreeks (1-120 l/s) en voor alle vijf schuifhoogtes. Hoe groter de mate van verdrinking hoe groter het verschil in waterstand tussen een horizontale bodem en een bodem met helling 1/1000.

FIGUUR 13 Qd-RELATIE VOOR DE CASCADE VISTRAP, BIJ DE SCHUIFHOOGTE 2 = 9 CM BOVEN DE BODEM



FIGUUR 14 Qd-RELATIE VOOR DE CASCADE VISTRAP SCHUIFHOOGTE 4 = 16 CM BOVEN DE BODEM



TABEL 5

GEMIDDELD VERSCHIL IN DE WATERDIEPTE (DELTA d) TUSSEN DE MEETREEKSEN ZONDER EN MET BODEMHELLING. GEGEVENS HEBBEN BETREKKING OP DE CASCADE VISTRAP

schuifhoogte nr.	MODEL		PROTOTYPE	
	schuifhoogte tov bodem m	gemiddelde Delta d m	schuifhoogte tov bodem m	gemiddelde Delta d m
1	0.06	0.001	0.90	0.021
2	0.09	0.002	1.35	0.027
3	0.12	0.003	1.80	0.046
4	0.16	0.007	2.40	0.099
5	0.20	0.007	3.00	0.110

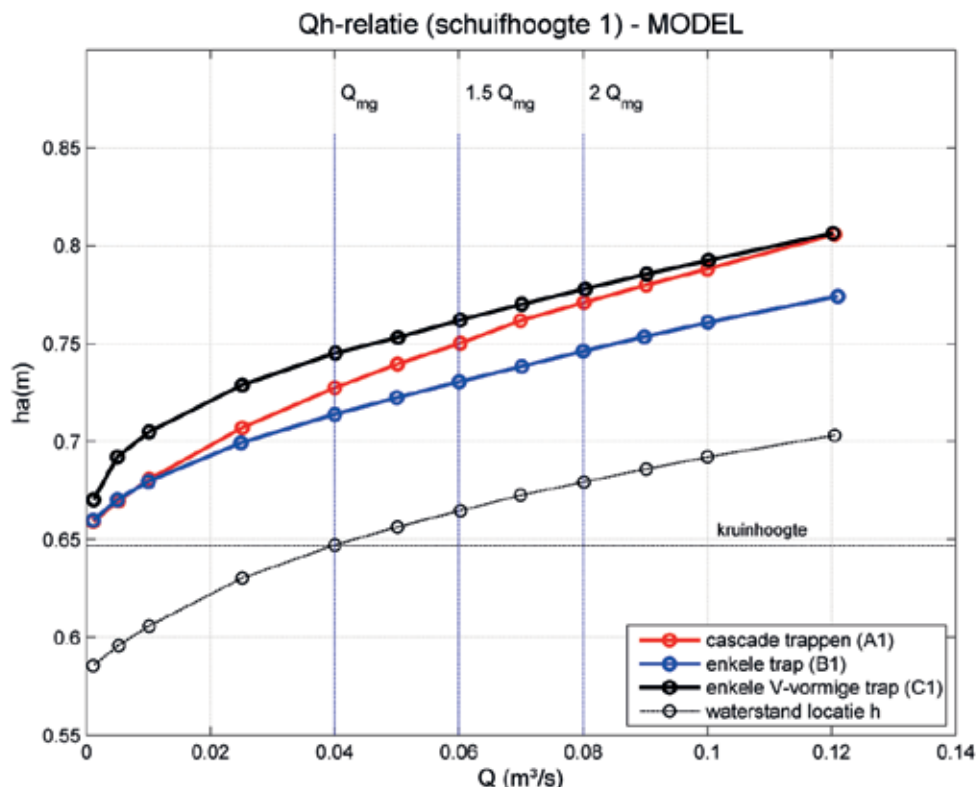
In het vervolg van de data-analyse is alleen gebruik gemaakt van de gegevens die horen bij een horizontale bodem.

### 6.1.3 VERGELIJKING Qh-RELATIES VERSCHILLENDE ONTWERPEN

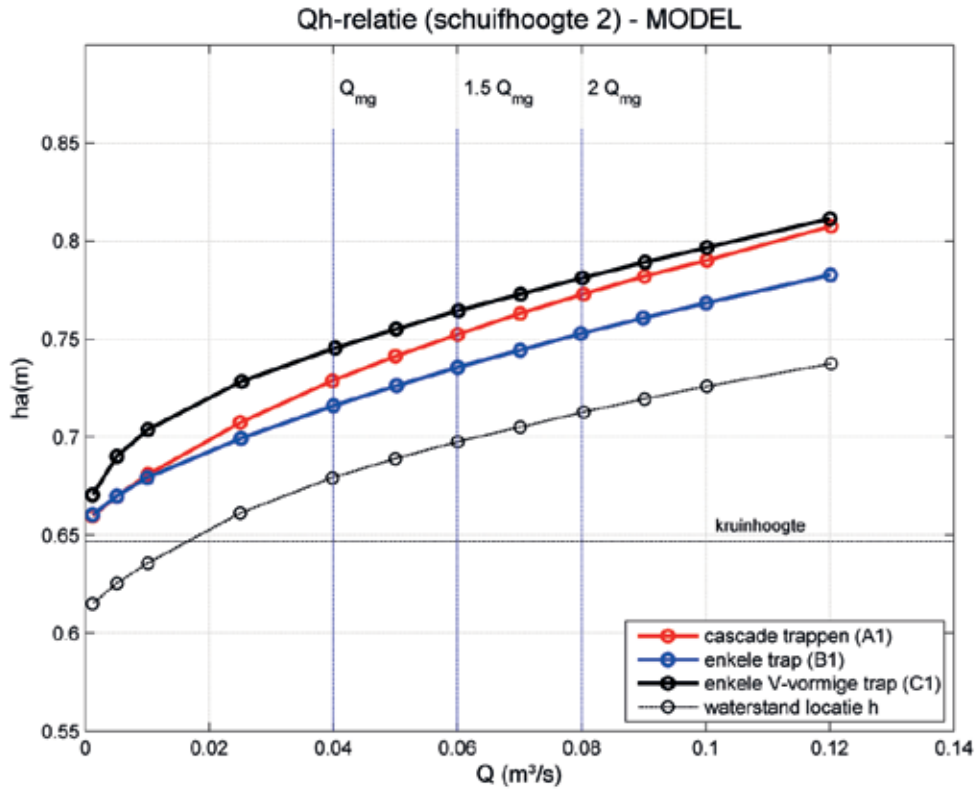
In Figuur 15 t/m Figuur 19 worden de verschillend ontwerpen met elkaar vergeleken. Elke figuur laat de Qh-relaties zien voor de drie ontwerpen bij een gegeven schuifhoogte. Uit de figuren komt naar voren dat een cascade vistrap zorgt voor een grotere opstuwing dan een enkele rechte drempel. Daarnaast resulteert een enkele V-vormige drempel in de grootste opstuwing. Hoe lager de schuifhoogte, hoe groter de verschillen zijn. Dit komt omdat bij een lagere schuifhoogte de stroomsnelheid toeneemt en waardoor ook het effect van de weerstand toeneemt. Indien een hoogwater in een rivier of beek leidt tot opstuwing en een sterke verdrinking van de aanwezige vistrap, dan zal dus de vistrap niet zorgen voor veel extra opstuwing (situatie uit Figuur 19). De kruinhoogte is aangegeven als lijn, het betreft de gemiddelde kruinhoogte.

FIGUUR 15

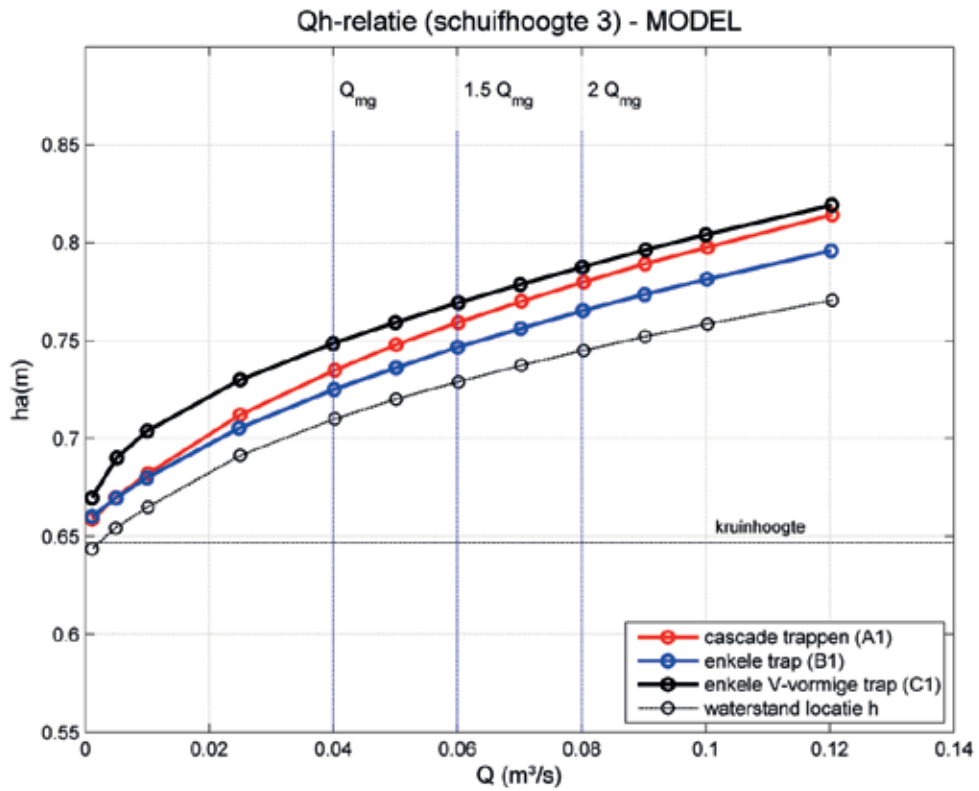
Qh-RELATIE VOOR DE DRIE ONTWERPEN, BIJ SCHUIFHOOGTE 1 = 6 CM BOVEN GOOTBODEM



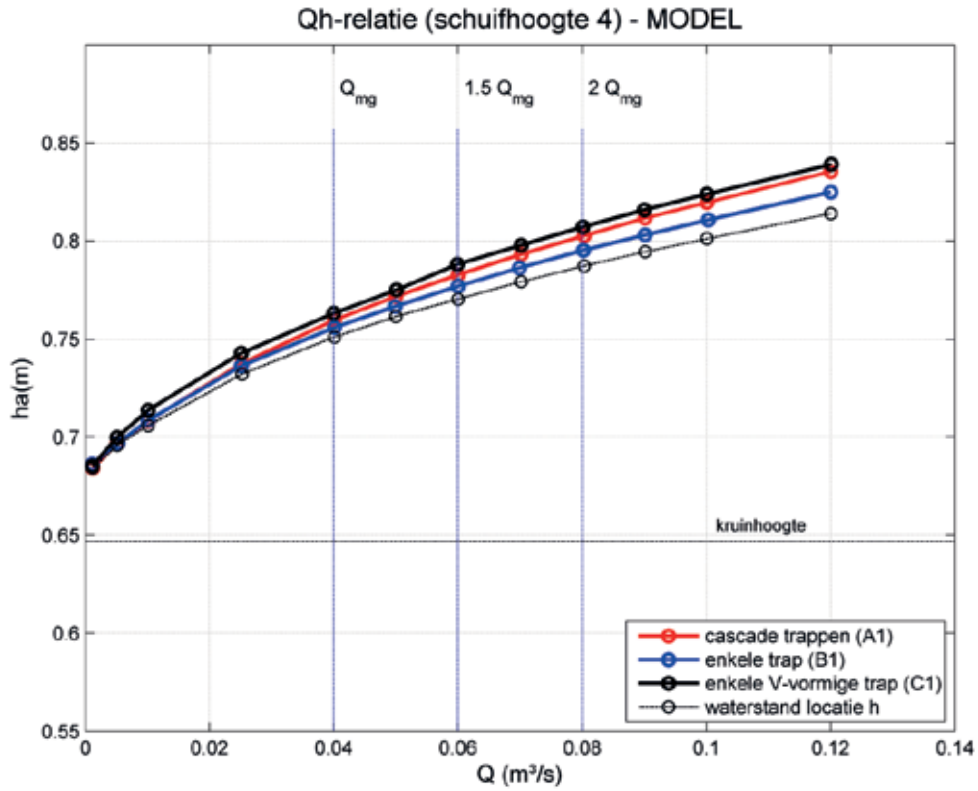
FIGUUR 16 Qh-RELATIE VOOR DE DRIE ONTWERPEN, BIJ SCHUIFHOOGTE 2 = 9 CM BOVEN GOOTBODEM



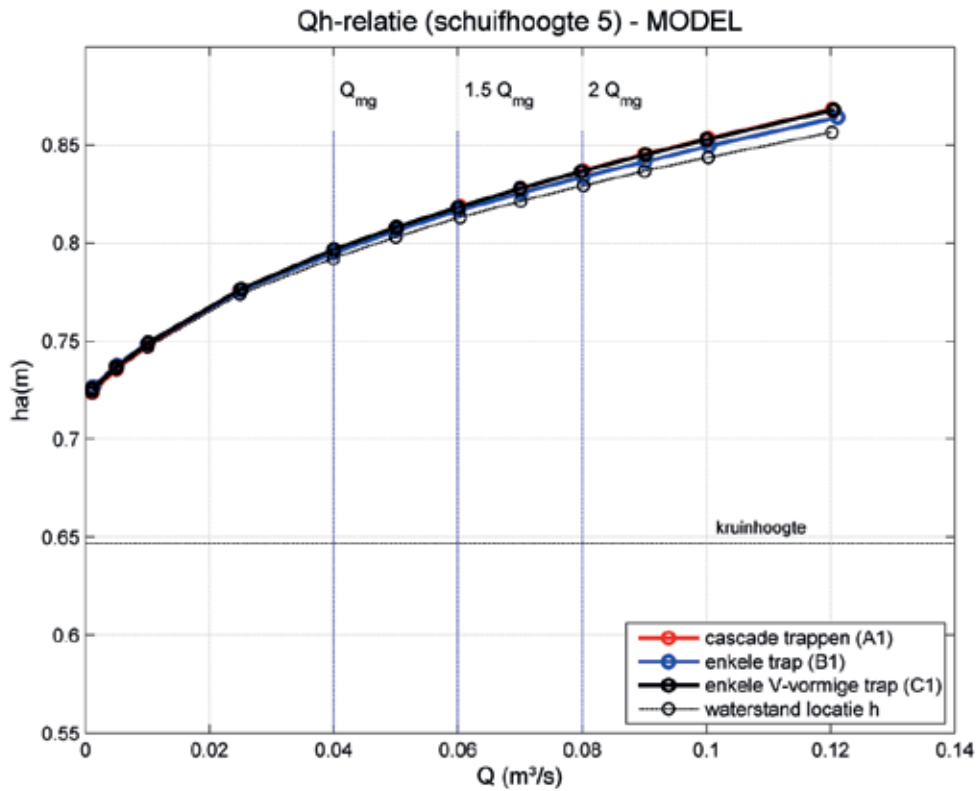
FIGUUR 17 Qh-RELATIE VOOR DE DRIE ONTWERPEN, BIJ SCHUIFHOOGTE 3 = 12 CM BOVEN GOOTBODEM



FIGUUR 18 Qh-RELATIE VOOR DE DRIE ONTWERPEN, BIJ SCHUIFHOOGTE 4 = 16 CM BOVEN GOOTBODEM



FIGUUR 19 Qh-RELATIE VOOR DE DRIE ONTWERPEN, BIJ SCHUIFHOOGTE 5 = 20 CM BOVEN GOOTBODEM



Onderstaande Tabel 6 vat de gegevens uit de Figuur 15 t/m Figuur 19 samen. De tabel geeft aan hoeveel meer opstuwung een cascade vistrap en een V-vormige vistrap geeft t.o.v. een enkele rechte drempel. Het betreft de gemiddelde toename in de opstuwung voor een meetreeks (1-120 l/s).

TABEL 6 PROTOTYPEWAARDEN VAN DE ABSOLUTE TOENAME IN DE WATERSTAND ( $h_a$ ) VOOR DE CASCADE VISTRAP (A1) EN DE V-VORMIGE DREMPEL (C1), T.O.V. DE RECHTE ENKELE DREMPEL

$x Q_{mg}$	ontwerp	schuifhoogte					gemiddeld $\Delta h_a$ (m)
		1	2	3	4	5	
		$\Delta h_a$ (m)	$\Delta h_a$ (m)	$\Delta h_a$ (m)	$\Delta h_a$ (m)	$\Delta h_a$ (m)	
1.0	A1	0.20	0.19	0.15	0.06	0.01	0.12
1.5	A1	0.30	0.25	0.19	0.09	0.03	0.17
2.0	A1	0.37	0.30	0.22	0.11	0.05	0.21
2.5	A1	0.41	0.33	0.24	0.13	0.06	0.23
1.0	C1	0.47	0.44	0.35	0.11	0.03	0.28
1.5	C1	0.48	0.43	0.34	0.17	0.02	0.29
2.0	C1	0.48	0.43	0.33	0.18	0.04	0.29
2.5	C1	0.48	0.42	0.34	0.20	0.05	0.30

## 6.2 PROFIELEN WATERSPIEGEL OVER VISTRAPPEN

De lengteprofielen van de waterspiegel over de constructies zijn opgenomen in Bijlage 4. Uit de profielen van de cascade vistrap komt naar voren dat eerste trede een belangrijke rol speelt in de opstuwung van bovenstroomse waterstand.

## 6.3 RESULTATEN INVOERPARAMETERS

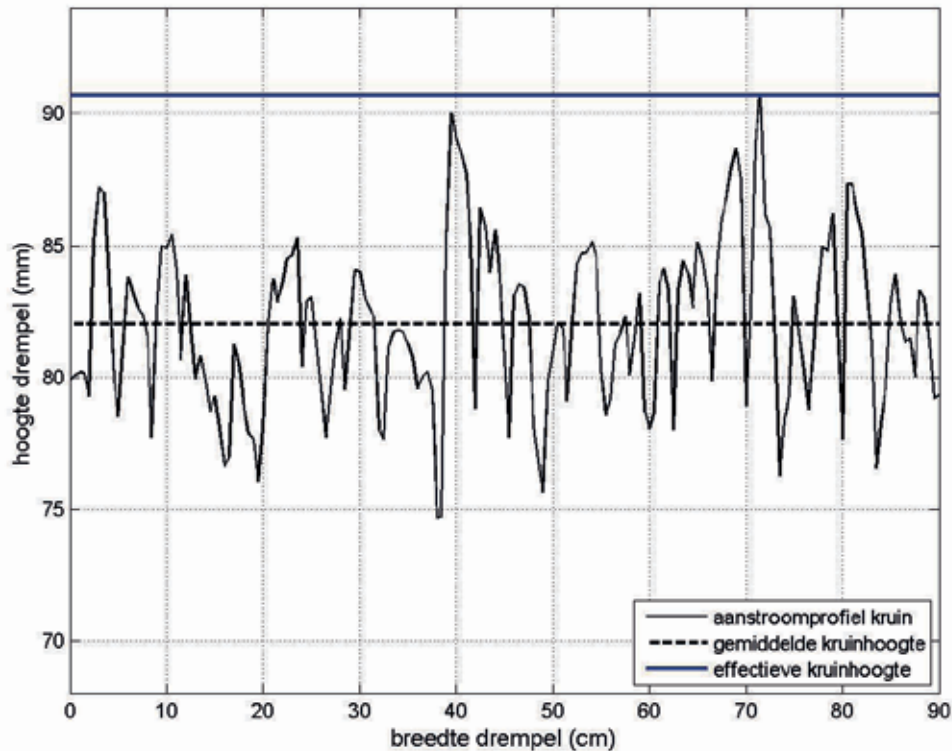
De analyse van de gegevens voor het vaststellen van de verschillende parameters is uitgevoerd volgens de beschreven methodes uit paragraaf 5.2. De vergelijking tussen de gemeten afvoer en berekende afvoer is voor alles schuifhoogtes en ontwerpen weergegeven. Bij onderstaande analyse geldt steeds:  $h_1$  is de waterstand op meetlocatie 'a', en  $h_2$  is de waterstand op meetlocatie 'h'. Deze waterstand heeft als referentie de effectieve kruinhoogte (6.3.1). Als eerste wordt ingegaan op de effectieve kruinhoogte en vervolgens worden de resultaten van de parameterisatie per ontwerp (A1, B1 en C1) en per methode weergegeven. De resultaten zijn gebaseerd op de gegevens zonder bodem helling.

### 6.3.1 EFFECTIEVE KRUINHOOGTE

In Figuur 20 is de kruin van de eerste drempel (beplokt met basaltsplit) afgebeeld. Het figuur laat alleen de middelste 90 cm van de 116 cm lange drempel zien. D.m.v. de beschreven methode in paragraaf 5.2, is de effectieve kruinhoogte vastgesteld. In het figuur is de effectieve kruinhoogte afgebeeld als blauwe lijn die boven de gemiddelde kruinhoogte ligt (stippellijn). De effectieve kruinhoogte ligt ongeveer op de hoogte van de hoogste toppen van de drempel. Dit betekent dat bij een bepaling van een juiste kruinhoogte in het veld, gelet moet worden op de hoogste punten van de drempel. Dit geeft een betere benadering dan de gemiddelde kruinhoogte. De effectieve kruinhoogte voor de rechte drempel en vistrap is 0.091 m (dit is 1.36 m in het prototype).

FIGUUR 20

AANSTROOMPROFIEL VAN DE EERSTE BOVENSTROOMSE DREMPEL VOOR DE CASCADE VISTRAP EN DE ENKELE RECHTE DREMPEL



### 6.3.2 CASCADE VISTRAP INVOERPARAMETERS VOOR SOBEK

#### UNIVERSAL WEIR (METHODE 1) EN RIVER WEIR (METHODE 2)

Belangrijkste invoerparameters in SOBEK (Methode 1):

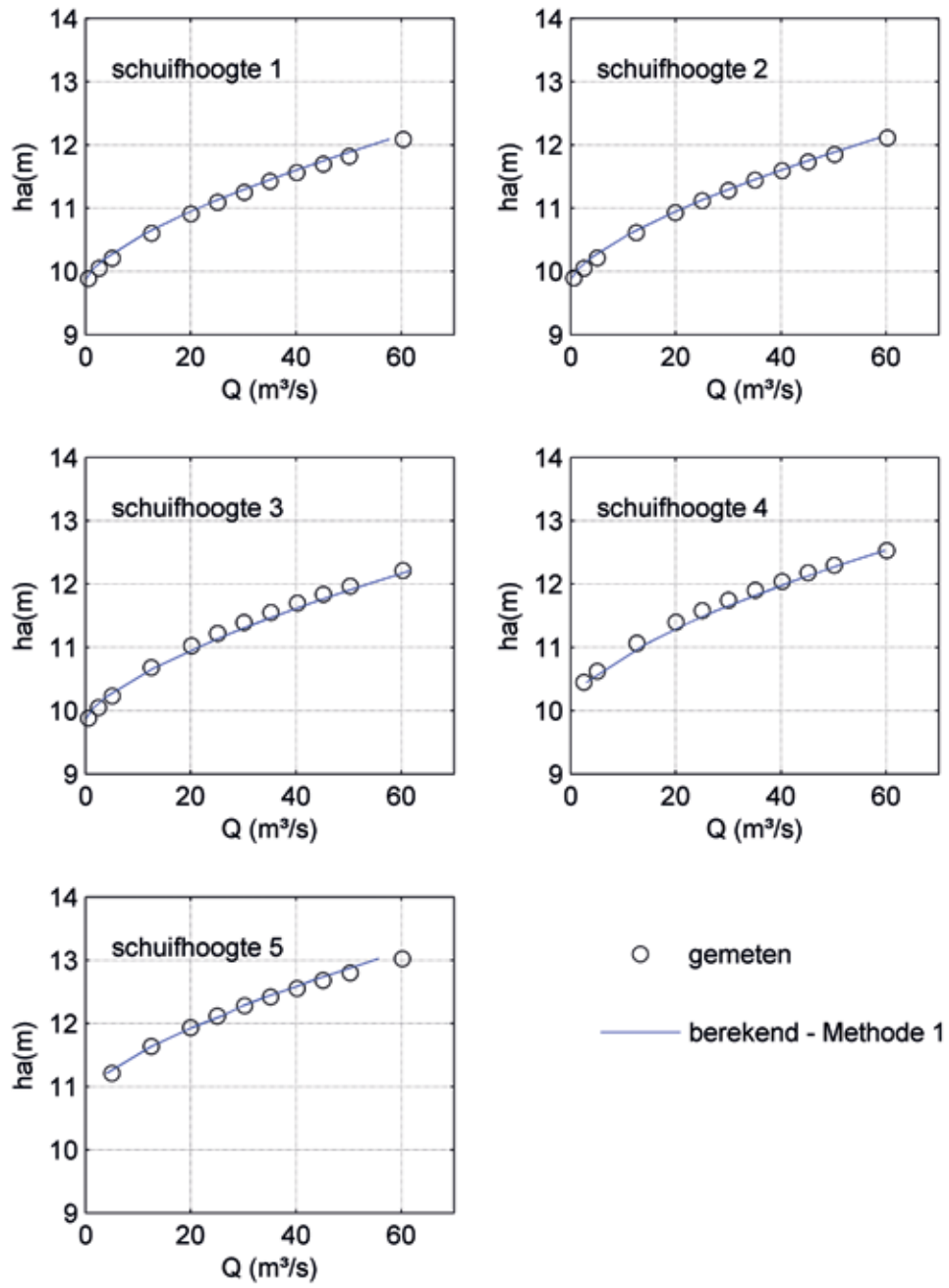
- kruinbreedte = locatie afhankelijk
- kruinhoogte = effectieve kruinhoogte (0.091m boven de bodemhoogte van meetpunt a, zie tabel 1)
- afvoercoëfficiënt ( $C_d$ ) = 1.006

Belangrijkste invoerparameters in SOBEK (Methode 2):

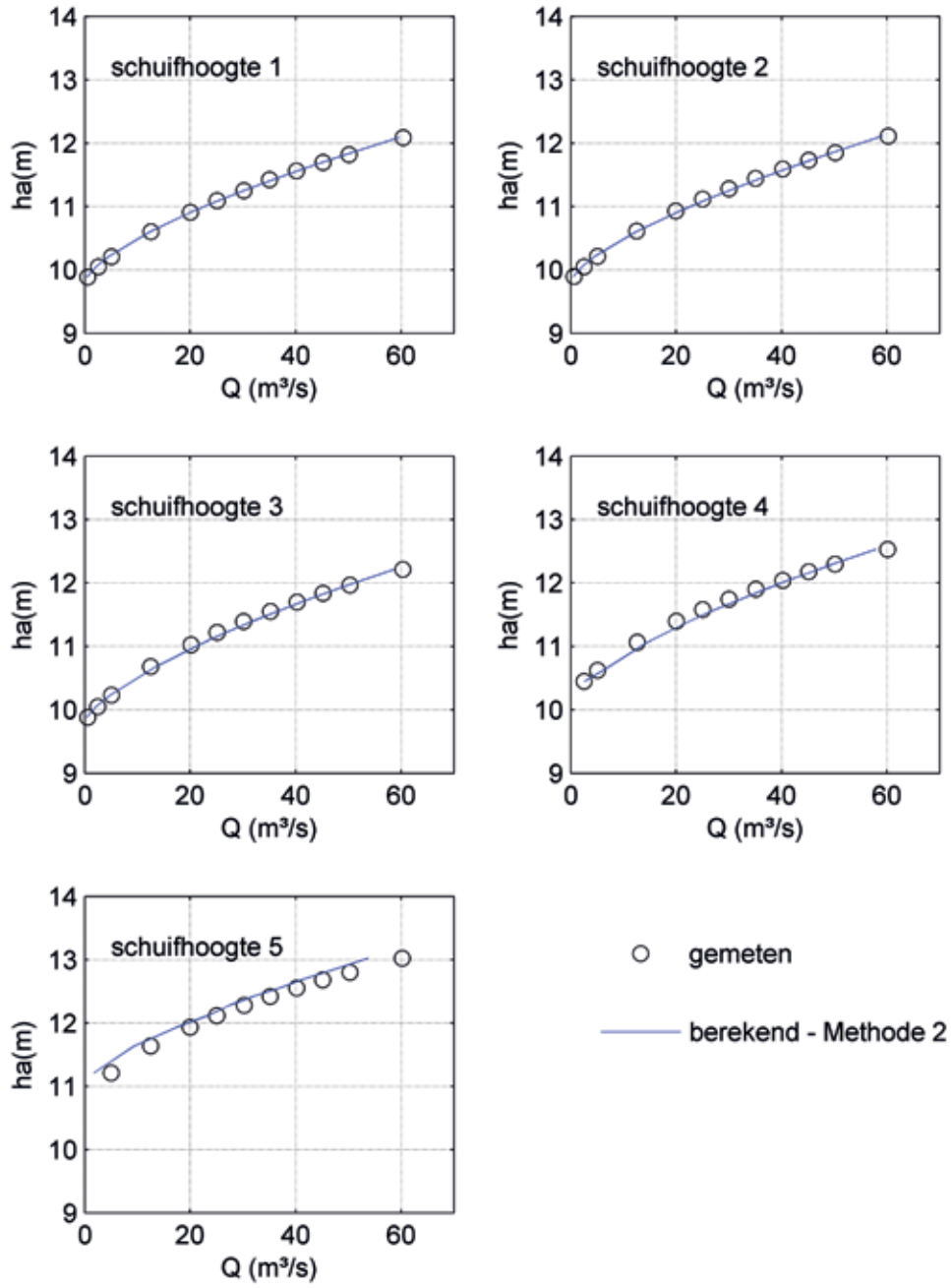
- kruinbreedte = locatie afhankelijk
- kruinhoogte = effectieve kruinhoogte (0.091 m boven de bodemhoogte van meetpunt a, zie tabel 1)
- modular limit ( $h_2/h_1$ ) = 0.42
- correctiecoëfficiënt ( $C_w$ ) = 1.011
- reductiefactor ( $f$ ) = functie uit Figuur 23



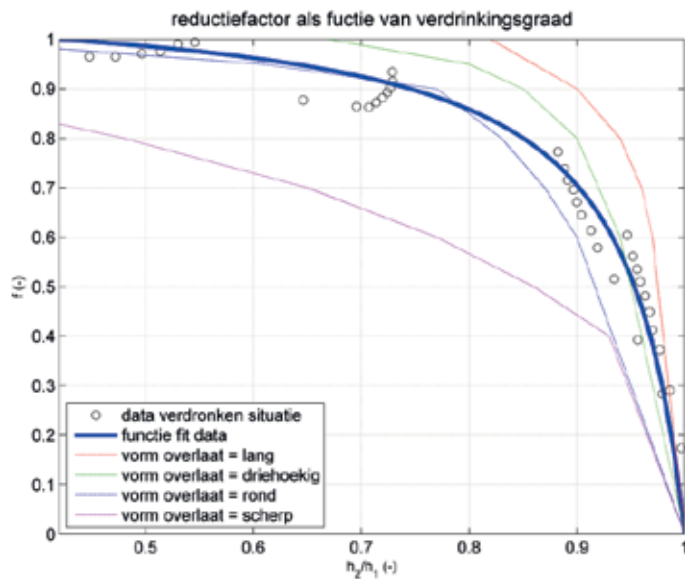
FIGUUR 21 Qh-RELATIE (CASCADE VISTRAP). PROTOTYPEWAARDEN BEREKEND MET METHODE 1



FIGUUR 22 Qh-RELATIE (CASCADE VISTRAP). PROTOTYPEWAARDEN BEREKEND MET METHODE 2



FIGUUR 23 REDUCTIEFACTOR (f) VOOR VERDRONKEN AFVOER. DE VERMELDE OVERLAATTYPEN (VORM OVERLAAT) ZIJN AFKOMSTIG UIT SOBEK



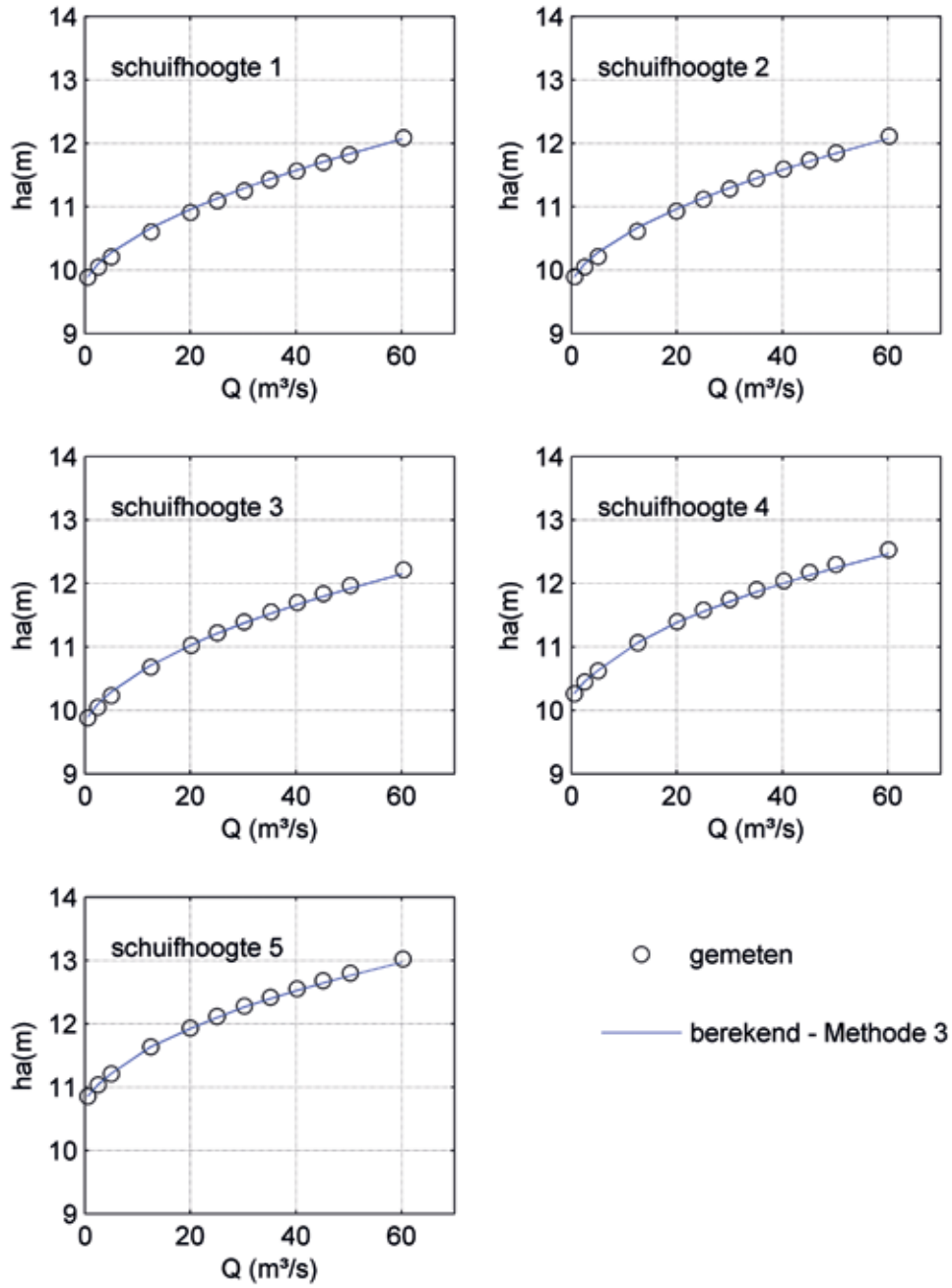
### VISTRAP ALS RUW OPPERVLAK (METHODE 3)

Tabel 7 geeft een overzicht van de berekende ruwheid met behulp van een SOBEK modellering. De beste fit tussen de gemeten data en berekende data is verkregen met een Manning's  $n$  van 0.05 ( $kM = 20$ ). Het omzetten van prototypewaarden naar modelwaarden gaat aan de hand van de schaalregels, zie hiervoor BIJLAGE 5. In onderstaande tabel is de Chézy coëfficiënt berekend bij een model waterdiepte van 0.2 m, dit is de gemiddelde waterdiepte op basis van alle experimenten.

TABEL 7 RUWHEID VAN CASCADE VISTRAP

MODEL			PROTOTYPE		
C	n	1/n = kM	C	n	1/n = kM
$m^{1/2}/s$	$s/m^{1/3}$	$m^{1/3}/s$	$m^{1/2}/s$	$s/m^{1/3}$	$m^{1/3}/s$
15	0.032	31	15	0.050	20

FIGUUR 24 Qh-RELATIE (CASCADE VISTRAP). PROTOTYPEWAARDEN BEREKEND MET METHODE 3



### 6.3.3 ENKELE RECHTE DREPEL INVOERPARAMETERS VOOR SOBEK

#### UNIVERSAL WEIR (METHODE 1) EN RIVER WEIR (METHODE 2)

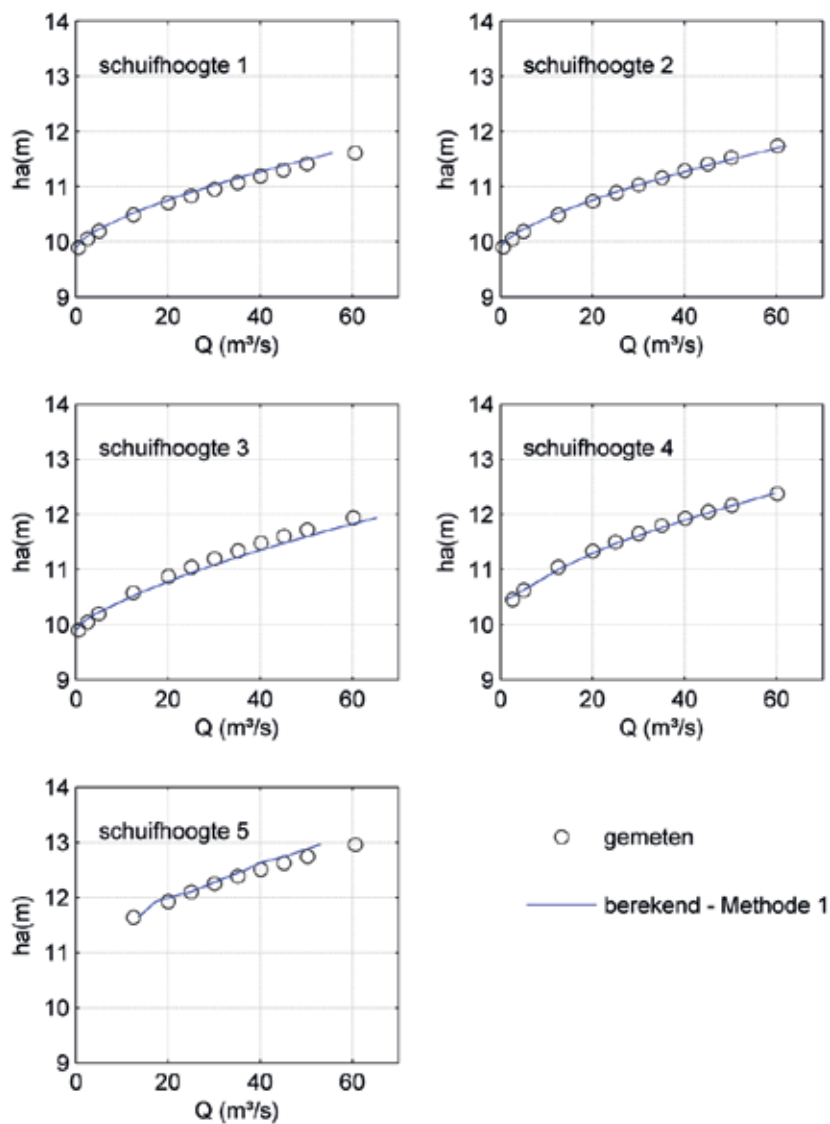
Belangrijkste invoerparameters in SOBEK:

- kruinbreedte = locatie afhankelijk
- kruinhoogte = effectieve kruinhoogte (0.091 m boven de bodemhoogte van meetpunt a, zie tabel 1)
- afvoercoëfficiënt ( $C_d$ ) = 1.445
- 

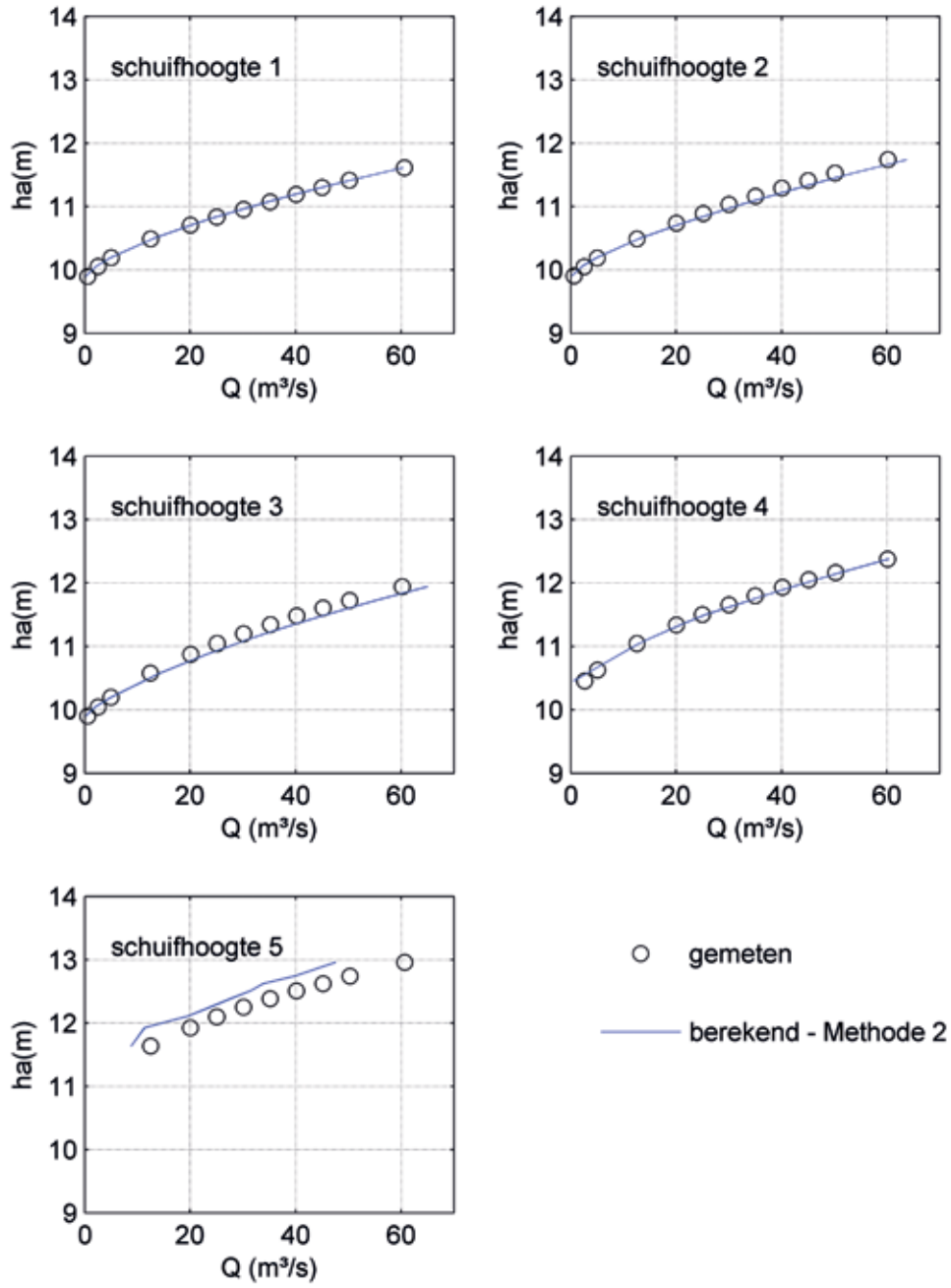
Belangrijkste invoerparameters in SOBEK:

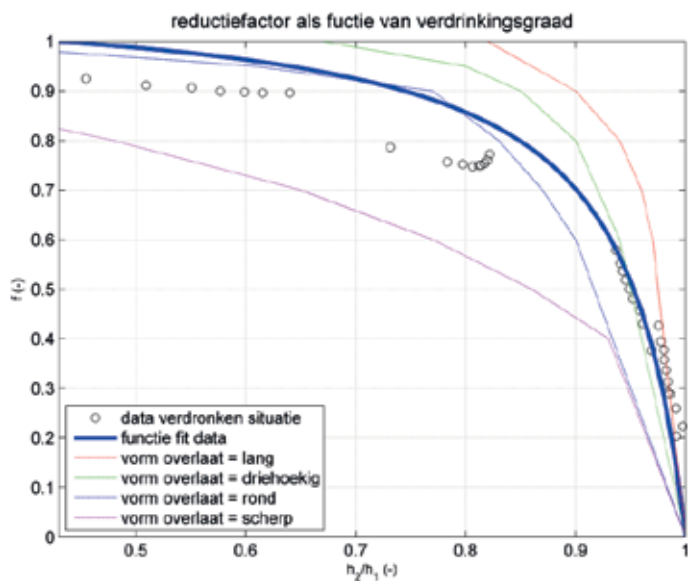
- kruinbreedte = locatie afhankelijk
- kruinhoogte = effectieve kruinhoogte (0.091 m boven de bodemhoogte van meetpunt a, zie tabel 1)
- modular limit ( $h_2/h_1$ ) = 0.43
- correctiecoëfficiënt ( $C_w$ ) = 1.532
- reductiefactor ( $f$ ) = functie uit Figuur 27.

FIGUUR 25 Qh-RELATIE (ENKELE RECHTE DREPEL). PROTOTYPEWAARDEN BEREKEND MET METHODE 1



FIGUUR 26 Qh-RELATIE (ENKELE RECHTE DREMPEL). PROTOTYPEWAARDEN BEREKEND MET METHODE 2



FIGUUR 27 REDUCTIEFACTOR ( $f$ ) VOOR VERDRONKEN AFVOER. DE VERMELDE OVERLAATTYPEN (VORM OVERLAAT) ZIJN AFKOMSTIG UIT SOBEK

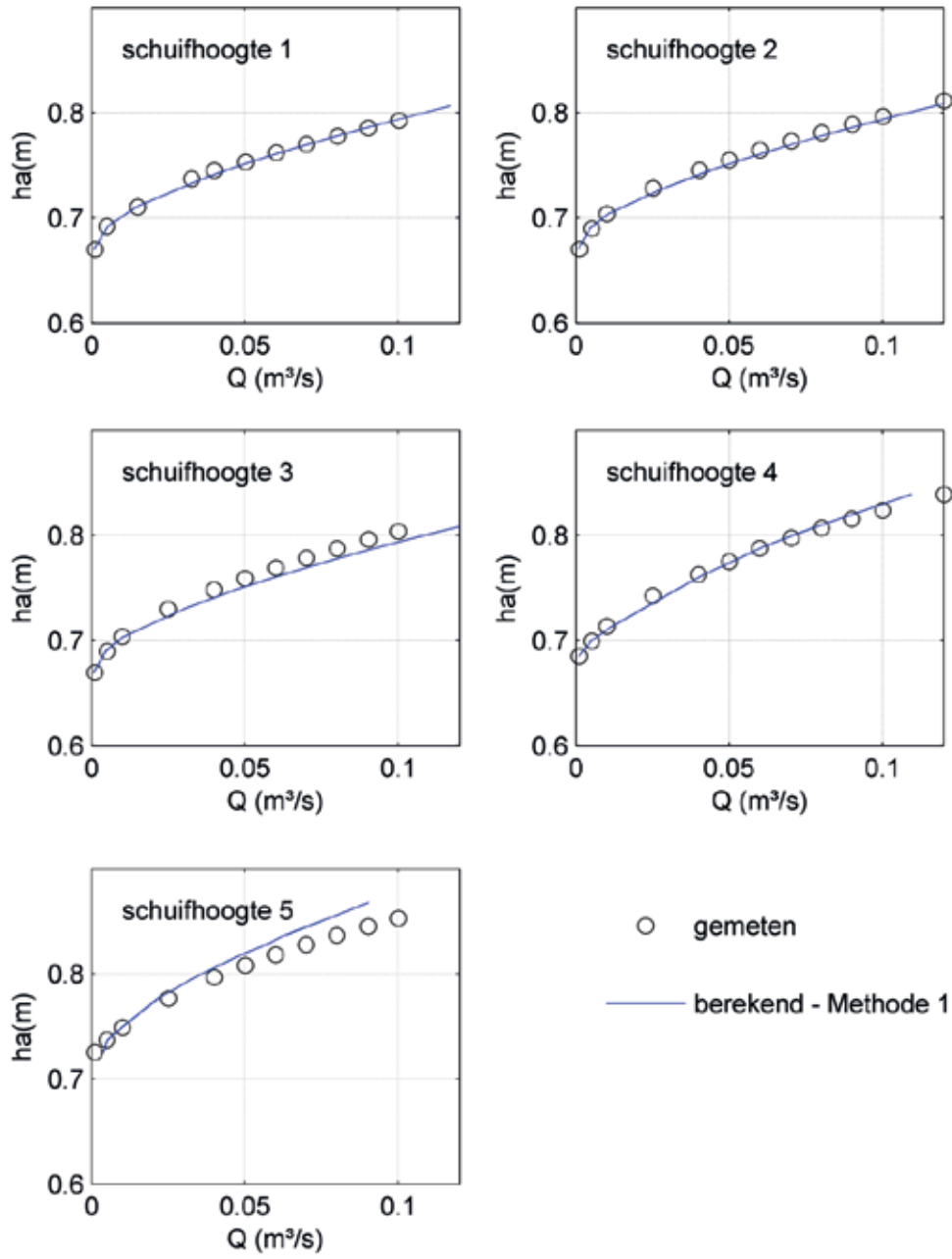
#### 6.3.4 ENKELE V-VORMIGE DREPEL INVOERPARAMETERS VOOR SOBEK

##### UNIVERSAL WEIR (METHODE 1)

Belangrijkste invoerparameters in SOBEK:

- kruinbreedte = locatie afhankelijk
- kruinhoogte = effectieve kruinhoogte (0.064 m boven de bodemhoogte van meetpunt a, zie tabel 1).
- afvoercoëfficiënt ( $C_d$ ) = 1.302

FIGUUR 28 Qh-RELATIE (V-VORMIGE DREMPEL). MODELWAARDEN BEREKEND MET METHODE 1





### 6.3.5 SAMENVATTING METHODES

In onderstaande tabel is de prestatie van de gebruikte methodes weergegeven. De scores representeren de *Mean Squared Error* (MSE) tussen de gemeten en berekende afvoeren in het prototype. Hoe kleiner het getal hoe beter de methode werkt. Methode 3 kan alleen voor de vistrappen worden bepaald en Methode 2 wordt voor een V-vormige overlaat, niet in SOBEM ondersteund en is om die reden niet berekend. Uit de Tabel 8 blijkt dat de cascade vistrap het beste wordt gesimuleerd met Methode 3. Voor zowel de enkele rechte drempel en de vistrap zijn de verschillen tussen Methode 1 en 2 gering. Echter bij een hoge verdrinkingsgraad (schuifhoogte 5) presteert Methode 1 aanzienlijk beter dan Methode 2.

TABEL 8 MSE VOOR 1,2 EN 3 VOOR ALLE ONTWERPEN (PROTOTYPEWAARDEN)

		schuifnr 1	schuifnr 2	schuifnr 3	schuifnr 4	schuifnr 5	<b>gemiddeld</b>
VISTRAP	methode 1	1.50	0.85	2.01	1.88	1.72	<b>1.59</b>
	methode 2	0.43	0.70	1.08	1.62	3.40	<b>1.44</b>
	methode 3	0.17	0.18	0.18	0.17	0.18	<b>0.17</b>
RECHTE DREMPEL	methode 1	2.79	1.01	3.74	0.97	3.33	<b>2.37</b>
	methode 2	0.27	2.32	3.69	1.17	7.67	<b>3.02</b>
V-VORMIGE DREMPEL	methode 1	5.54	3.80	0.84	6.92	12.55	<b>5.93</b>

# 7

## SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Om inzicht te verschaffen in het hydraulisch functioneren van een cascade vistrap bestaande uit stortsteen en met acht trappen, is een schaalexperiment uitgevoerd in een stroomgoot met een schaalfactor van 1:15. De stroomgoot heeft een lengte van bijna 15 m en een interne breedte van 1.16 m. Voor oplopende afvoeren van 1 t/m 120 liter per seconde is bovenstrooms en benedenstrooms van het model de waterstand gemeten, zodat een relatie tussen de afvoer en de waterstand kan worden opgesteld (Qh-relatie). Naast een cascade vistrap is tevens een enkele rechte drempel en een V-vormige drempel bemeaten in de stroomgoot en zijn de Qh-relaties van de verschillende ontwerpen vergeleken.

Om de resultaten te kunnen toepassen binnen een hydraulisch model (SOBEK) zijn voor alle ontwerpen de invoerparameters gekwantificeerd, waarmee de weerstand ten gevolge van de drie ontwerpen, op drie verschillende manieren kan worden gemodelleerd. In Methode 1 wordt de cascade gemodelleerd als *universal weir* en in Methode 2 wordt de cascade gezien als *river weir* (deze methodes zijn keuzemogelijkheden binnen SOBEK). Om beide methodes toe te passen zijn de afvoercoëfficiënt ( $C_d$ ), de correctiecoëfficiënt ( $C_w$ ), de reductiefactor ( $f$ ) en de effectieve kruinhoogte nodig, die zijn afgeleid uit de onderzoeksresultaten. Methode 3 betreft de modellering van de cascade als ruw vlak met een bodem 'over de toppen' van de cascade, waar een Chézy waarde en corresponderende Mannings'  $n$  voor zijn afgeleid. In de analyses zijn de berekende Qh-relaties vergeleken met de gemeten Qh-relaties.

In het onderstaande worden de onderzoeksvragen herhaald en worden conclusies getrokken die betrekking hebben op de prototypewaarden en op de situatie zoals met behulp van het schaalexperiment is bestudeerd.

- 1 Hoe zien de Qh-relaties eruit van een cascade vistrap, enkele rechte drempel en een enkele V-vormige drempel, bij verschillende benedenstroomse waterstanden en een afvoerbereik van 5%-250% Qmg? De Qh-relaties voor de drie ontwerpen zijn weergegeven in de Figuren tien t/m twaalf.
- 2 Hoe verschilt de Qh-relatie tussen de cascade vistrap, een enkele rechte drempel en een enkele V-vormige drempel? De opstuwende werking van een cascade vistrap is groter dan die voor een enkele rechte drempel, maar kleiner dan voor een V-vormig drempel zoals die in het laboratorium is gemeten (Figuur 15 t/m Figuur 19). De extra opstuwung van de V-vormige drempel t.o.v. een rechte enkele drempel, kan bij 2.5x maatgevende afvoer 48 cm bedragen (bij een lage benedenstroomse waterstand zoals gemeten in het laboratorium). Echter wanneer de verdrinkingsraad hoog is, dan is de extra opstuwende werking een aanzienlijk stuk lager (5 cm). De extra opstuwung van een cascade vistrap t.o.v. een rechte enkele drempel kan bij 2.5x maatgevende afvoer 41 cm bedragen (bij een lage benedenstroomse waterstand zoals gemeten in het laboratorium), maar is aanzienlijk kleiner bij een hoge verdrinkingsgraad (6 cm). Een cascade vistrap heeft een grotere opstuwende werking dan een enkele rechte drempel, omdat bij een vistrap sprake is van een ruw oppervlak met een bepaalde lengte, terwijl een

enkele drempel slechts één object is in de stroming. Een V-vormige vistrap zorgt voor meer opstuwing omdat ook laterale contractie een rol speelt en de gemiddelde waterdiepte over het object kleiner is dan bij een rechte constructie.

- 3 *Wat is de invloed van de bodemhelling (helling 1/1000) op de Qh-relaties?* Een bodemhelling van 1/1000 heeft slechts een beperkte invloed op de Qh-relatie, als deze wordt vergeleken met een horizontale bodem. Dit komt omdat deze geringe toename in de helling niet leidt tot een significant hoge stroomsnelheid over de vistrap of enkele drempels.
- 4 *Welke parameters (zoals in SOBEK worden toegepast) kunnen gebruikt worden om de drie ontwerpen te simuleren? En wat is de Manning's n en Chezy coëfficiënt van het onderzochte cascade vistrap, zodat deze kan worden toegepast in SOBEK?* De onderzochte cascade vistrap met 8 trappen kan in SOBEK gemodelleerd worden door middel van de *universal weir methode* en de *river weir methode*. De afvoer coëfficiënt ( $C_d$ ) voor de *universal weir methode* is 1.006 en de correctie coëfficiënt ( $C_w$ ) voor de *river weir methode* 1.011. Uit het onderzoek blijkt dat de beste resultaten worden verkregen door de vistrap als een ruw oppervlak te beschouwen met een bodem die de bovenkant van de drempels volgt en met een Manning's  $n$  van  $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$  of Chezy coëfficiënt van  $15 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . De onderzochte enkele rechte drempel heeft een  $C_d$  waarde van 1.45 (*universal weir methode*) en 1.53 (*river weir methode*). De onderzochte V-vormige drempel heeft een  $C_d$  waarde van 1.30 (*universal weir methode*).
- 5 *Wat is een geschikte kruinhoogte? Aangezien de keuze voor een kruinhoogte van grote invloed is op de gebruikte overlaat formules. Wanneer de cascade vistrap met 8 trappen wordt gemodelleerd met de universal weir of river weir methode dan ligt de effectieve kruinhoogte boven de gemiddelde kruinhoogte. De effectieve kruinhoogte bleek op ongeveer het niveau van de hoogste toppen van de kruin te liggen (Figuur 20).*

# REFERENTIES

SOBEK- manual; online versie; 2.12.002.

Yalin, M.S. (1971); *Theory of Hydraulic Models*; MacMillan Press, London, England.



BIJLAGE 1

# ONTWERP

CASCADE VISTRAP



CASCADE VISTRAP



**ENKELE RECHTE DREMPEL**



**ENKELE RECHTE DREMPEL**



**V-VORMIGE DREMPEL**



**V-VORMIGE DREMPEL**







## BIJLAGE 2

## MEETPLAN

aantal trappen	type trap	code	helling	
			0%	0.001
			1	2
8	rechte trap	A	A1	A2
1	rechte trap	B	B1	B2
1	V-vormig	C	C1	-

<b>A1</b>	schuif_nr.	1	2	3	4	5
helling = 0	schuifhoogte (cm)	6	9	12	16	20
debiet_nr	Q_model l/s	meetnummer				
1	1	A1-011	A1-012	A1-013	A1-014	A1-015
2	5	A1-021	A1-022	A1-023	A1-024	A1-025
3	10	A1-031	A1-032	A1-033	A1-034	A1-035
4	25	A1-041	A1-042	A1-043	A1-044	A1-045
5	40	A1-051	A1-052	A1-053	A1-054	A1-055
6	50	A1-061	A1-062	A1-063	A1-064	A1-065
7	60	A1-071	A1-072	A1-073	A1-074	A1-075
8	70	A1-081	A1-082	A1-083	A1-084	A1-085
9	80	A1-091	A1-092	A1-093	A1-094	A1-095
10	90	A1-101	A1-102	A1-103	A1-104	A1-105
11	100	A1-111	A1-112	A1-113	A1-114	A1-115
12	120	A1-121	A1-122	A1-123	A1-124	A1-125

<b>A2</b>	schuif_nr.	1	2	3	4	5
helling = 1/1000	schuifhoogte (cm)	6	9	12	16	20
debiet_nr	Q_model l/s	meetnummer				
1	1	A2-011	A2-012	A2-013	A2-014	A2-015
2	5	A2-021	A2-022	A2-023	A2-024	A2-025
3	10	A2-031	A2-032	A2-033	A2-034	A2-035
4	25	A2-041	A2-042	A2-043	A2-044	A2-045
5	40	A2-051	A2-052	A2-053	A2-054	A2-055
6	50	A2-061	A2-062	A2-063	A2-064	A2-065
7	60	A2-071	A2-072	A2-073	A2-074	A2-075
8	70	A2-081	A2-082	A2-083	A2-084	A2-085
9	80	A2-091	A2-092	A2-093	A2-094	A2-095
10	90	A2-101	A2-102	A2-103	A2-104	A2-105
11	100	A2-111	A2-112	A2-113	A2-114	A2-115
12	120	A2-121	A2-122	A2-123	A2-124	A2-125

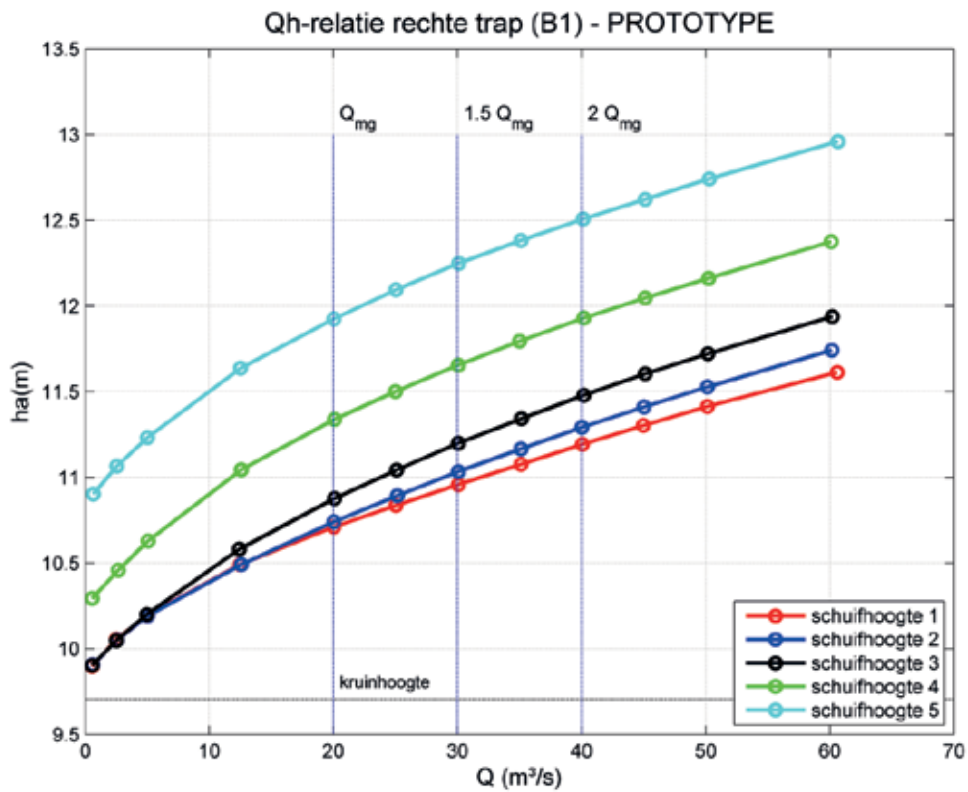
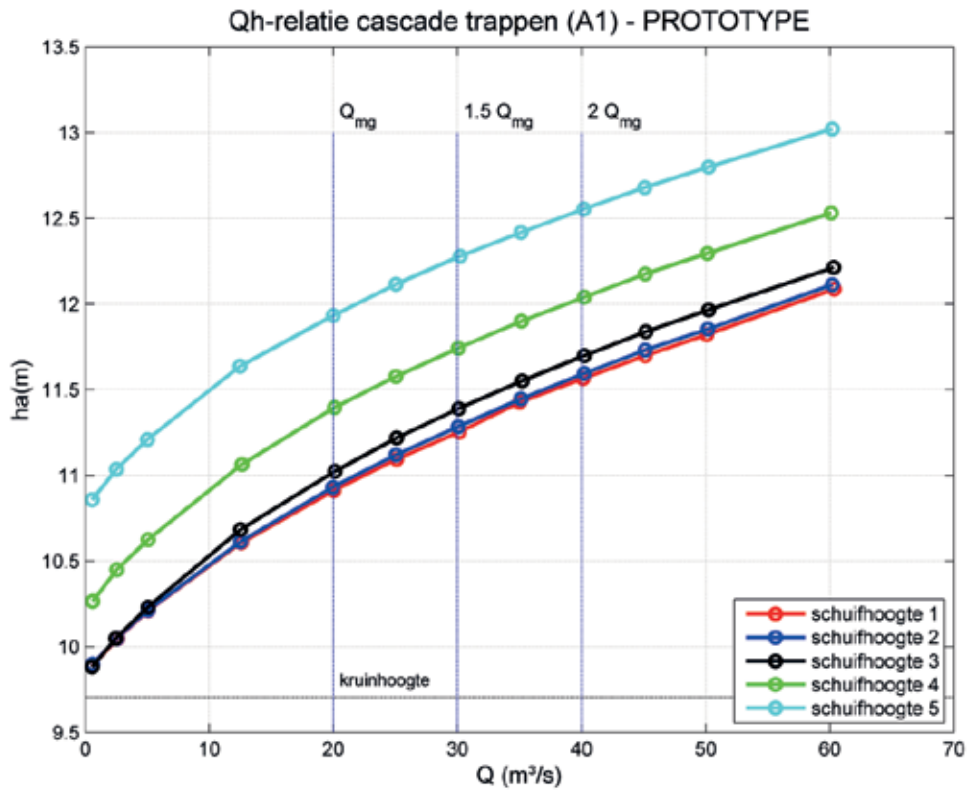
<b>B1</b>	schuif_nr.	1	2	3	4	5
helling = 0	schuifhoogte (cm)	6	9	12	16	20
debiet_nr	Q_model	meetnummer				
	l/s					
1	1	B1-011	B1-012	B1-013	B1-014	B1-015
2	5	B1-021	B1-022	B1-023	B1-024	B1-025
3	10	B1-031	B1-032	B1-033	B1-034	B1-035
4	25	B1-041	B1-042	B1-043	B1-044	B1-045
5	40	B1-051	B1-052	B1-053	B1-054	B1-055
6	50	B1-061	B1-062	B1-063	B1-064	B1-065
7	60	B1-071	B1-072	B1-073	B1-074	B1-075
8	70	B1-081	B1-082	B1-083	B1-084	B1-085
9	80	B1-091	B1-092	B1-093	B1-094	B1-095
10	90	B1-101	B1-102	B1-103	B1-104	B1-105
11	100	B1-111	B1-112	B1-113	B1-114	B1-115
12	120	B1-121	B1-122	B1-123	B1-124	B1-125

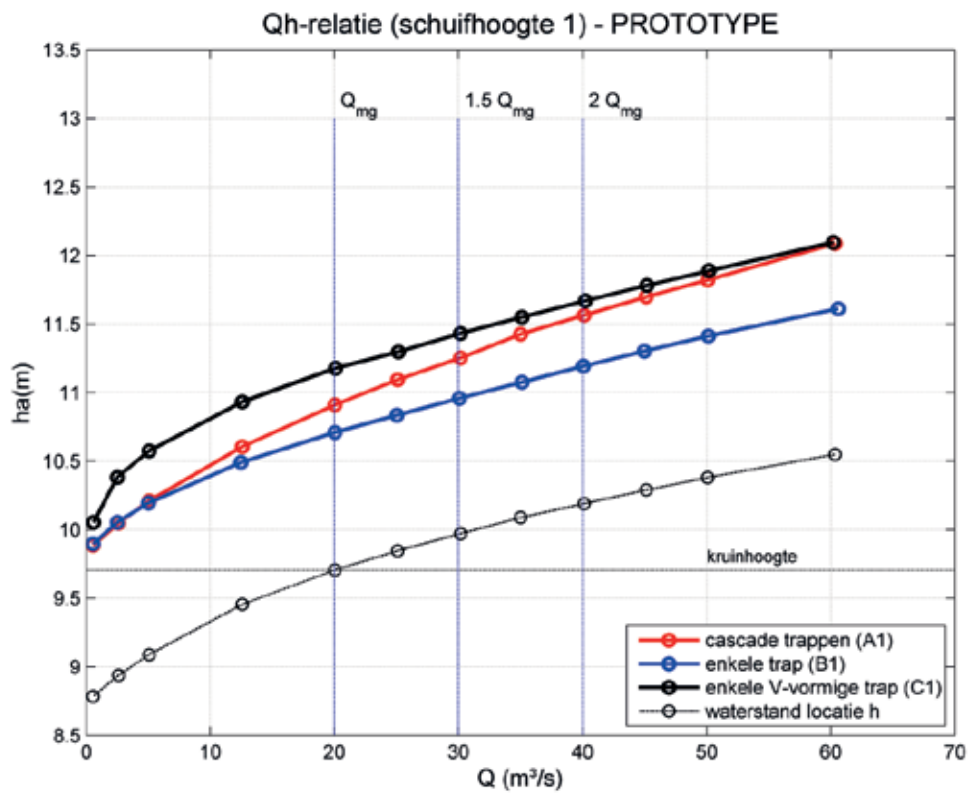
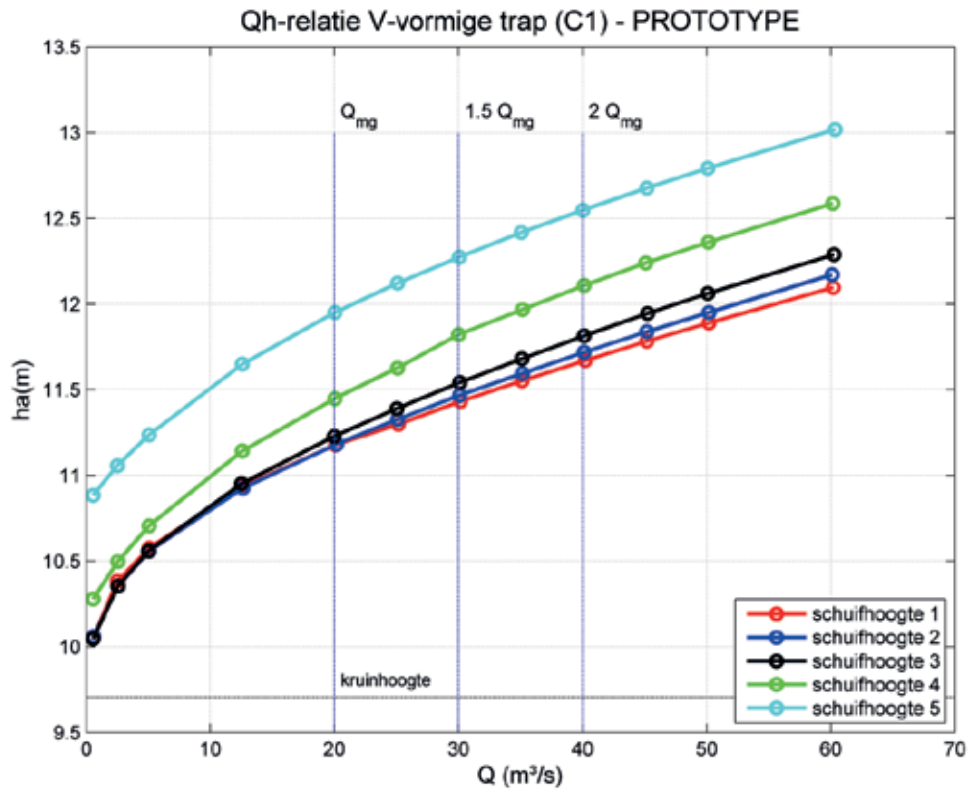
<b>B2</b>	schuif_nr.	1	2	3	4	5
helling = 1/1000	schuifhoogte (cm)	6	9	12	16	20
debiet_nr	Q_model	meetnummer				
	l/s					
1	1	B2-011	B2-012	B2-013	B2-014	B2-015
2	5	B2-021	B2-022	B2-023	B2-024	B2-025
3	10	B2-031	B2-032	B2-033	B2-034	B2-035
4	25	B2-041	B2-042	B2-043	B2-044	B2-045
5	40	B2-051	B2-052	B2-053	B2-054	B2-055
6	50	B2-061	B2-062	B2-063	B2-064	B2-065
7	60	B2-071	B2-072	B2-073	B2-074	B2-075
8	70	B2-081	B2-082	B2-083	B2-084	B2-085
9	80	B2-091	B2-092	B2-093	B2-094	B2-095
10	90	B2-101	B2-102	B2-103	B2-104	B2-105
11	100	B2-111	B2-112	B2-113	B2-114	B2-115
12	120	B2-121	B2-122	B2-123	B2-124	B2-125

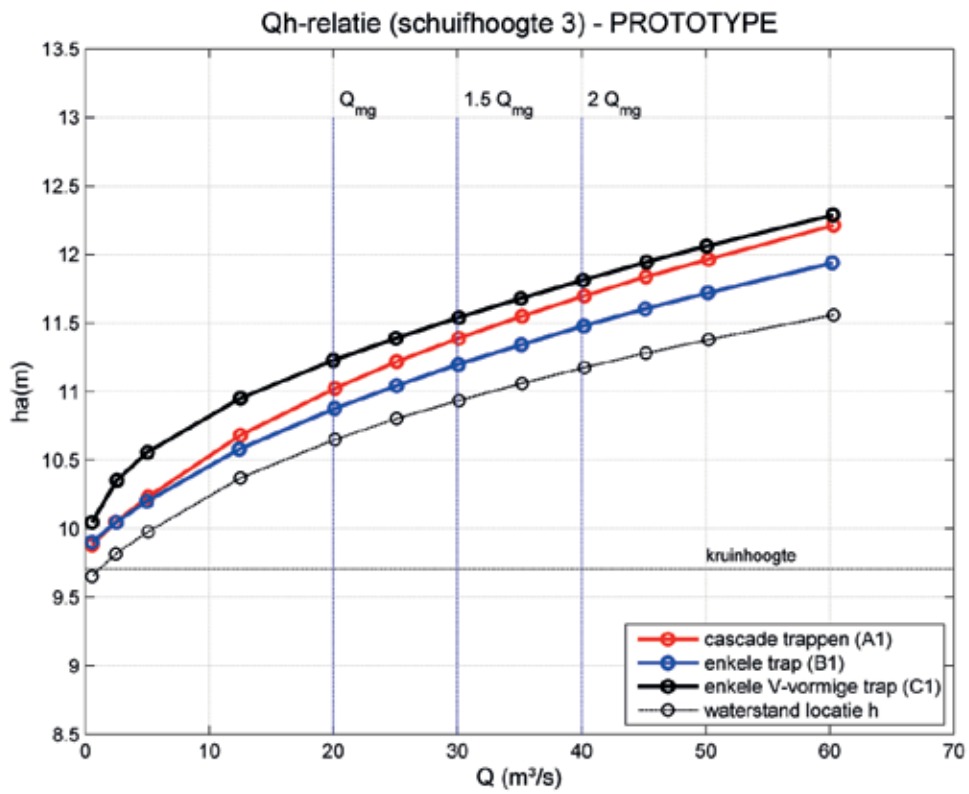
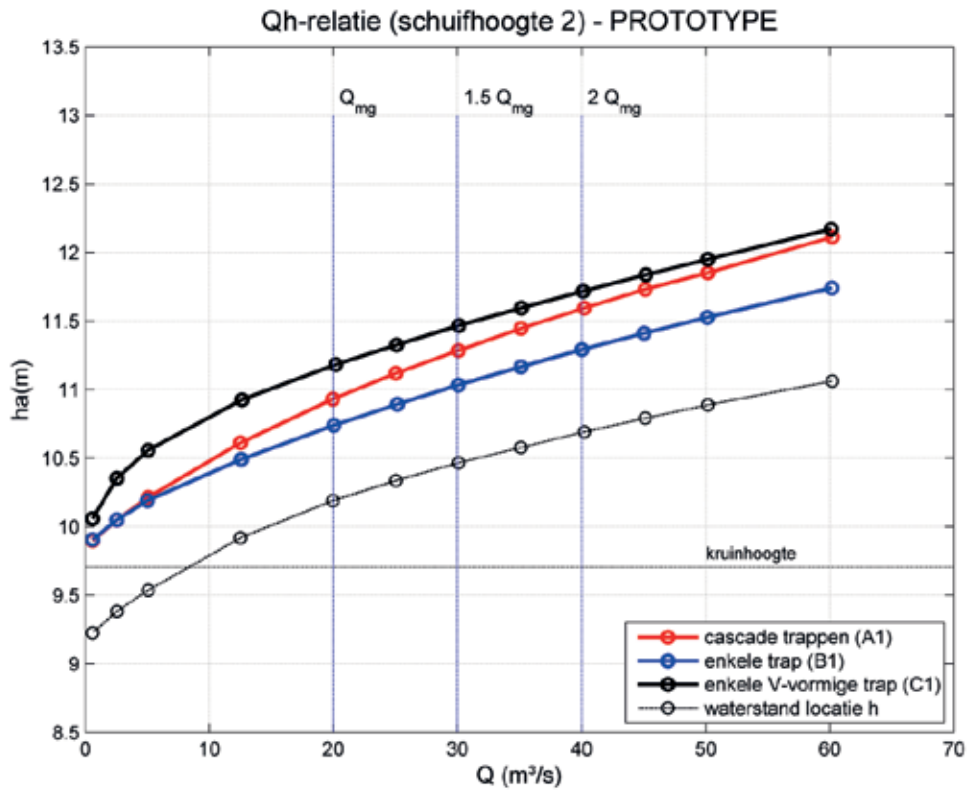
<b>C1</b>	schuif_nr.	1	2	3	4	5
helling = 0	schuifhoogte (cm)	6	9	12	16	20
debiet_nr	Q_model	meetnummer				
	l/s					
1	1	C1-011	C1-012	C1-013	C1-014	C1-015
2	5	C1-021	C1-022	C1-023	C1-024	C1-025
3	10	C1-031	C1-032	C1-033	C1-034	C1-035
4	25	C1-041	C1-042	C1-043	C1-044	C1-045
5	40	C1-051	C1-052	C1-053	C1-054	C1-055
6	50	C1-061	C1-062	C1-063	C1-064	C1-065
7	60	C1-071	C1-072	C1-073	C1-074	C1-075
8	70	C1-081	C1-082	C1-083	C1-084	C1-085
9	80	C1-091	C1-092	C1-093	C1-094	C1-095
10	90	C1-101	C1-102	C1-103	C1-104	C1-105
11	100	C1-111	C1-112	C1-113	C1-114	C1-115
12	120	C1-121	C1-122	C1-123	C1-124	C1-125

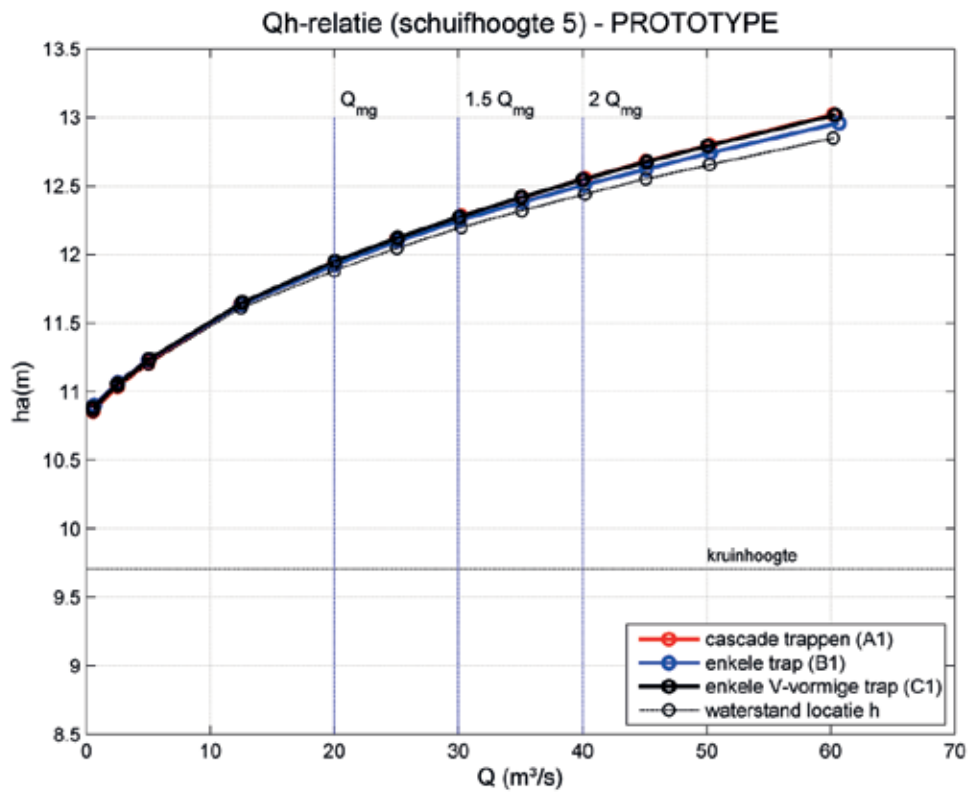
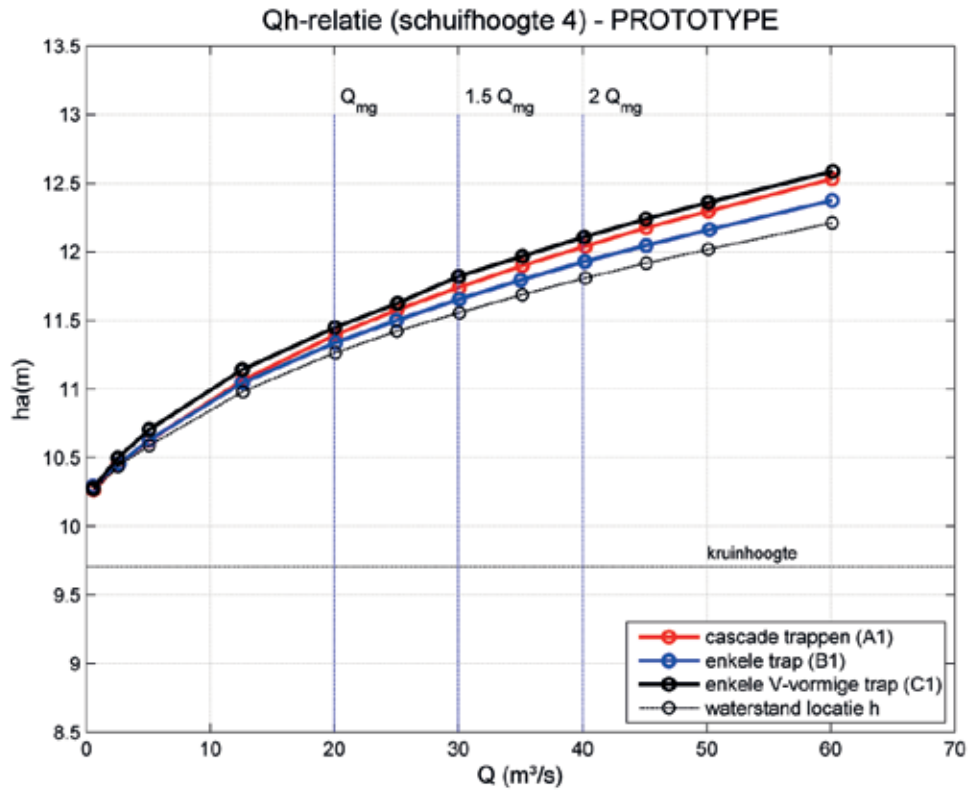
BIJLAGE 3

# Qh-RELATIES PROTOTYPE WAARDEN





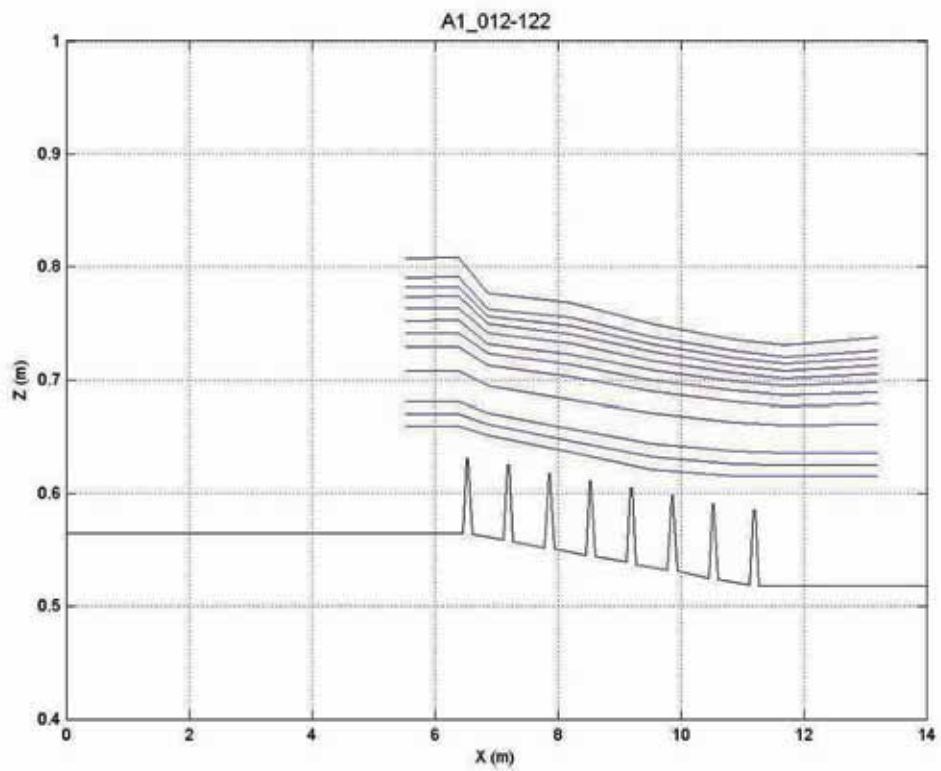
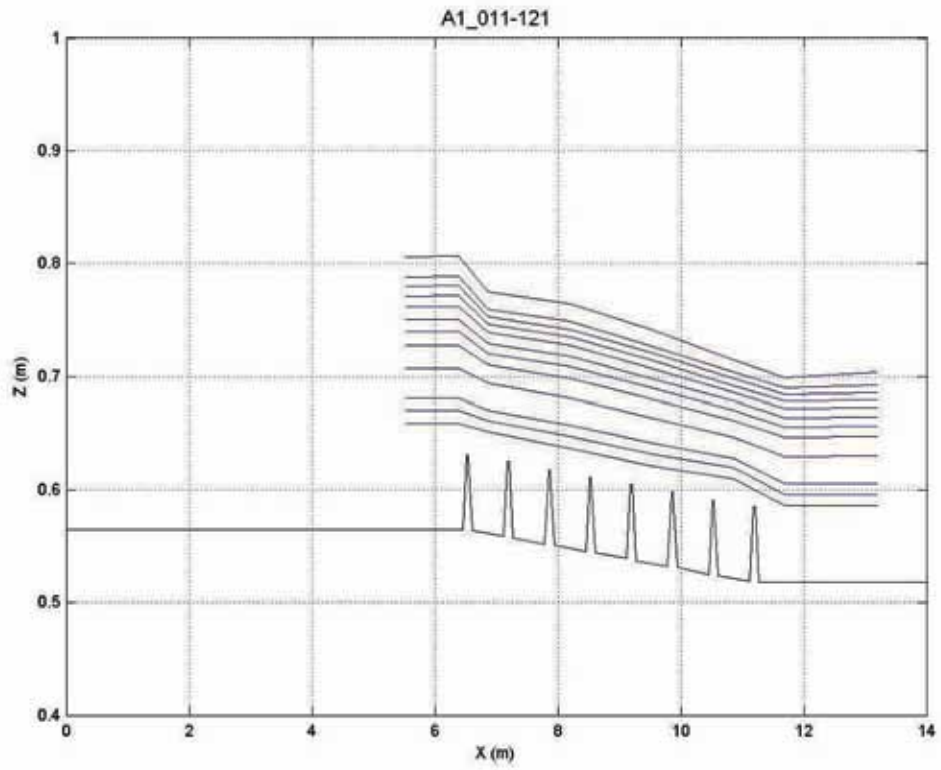


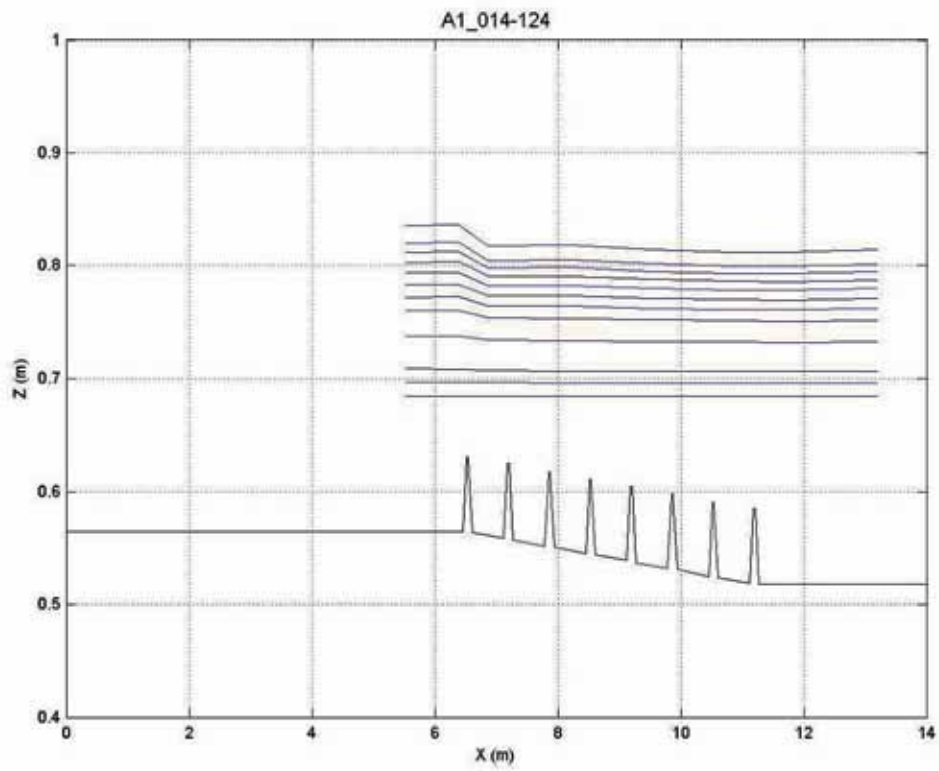
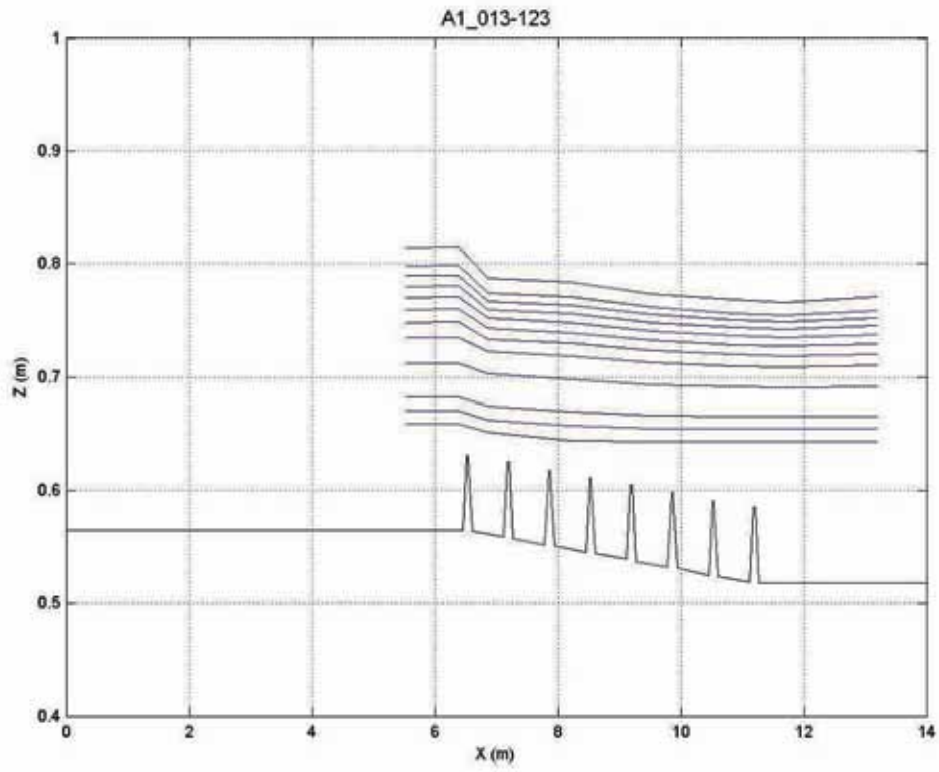


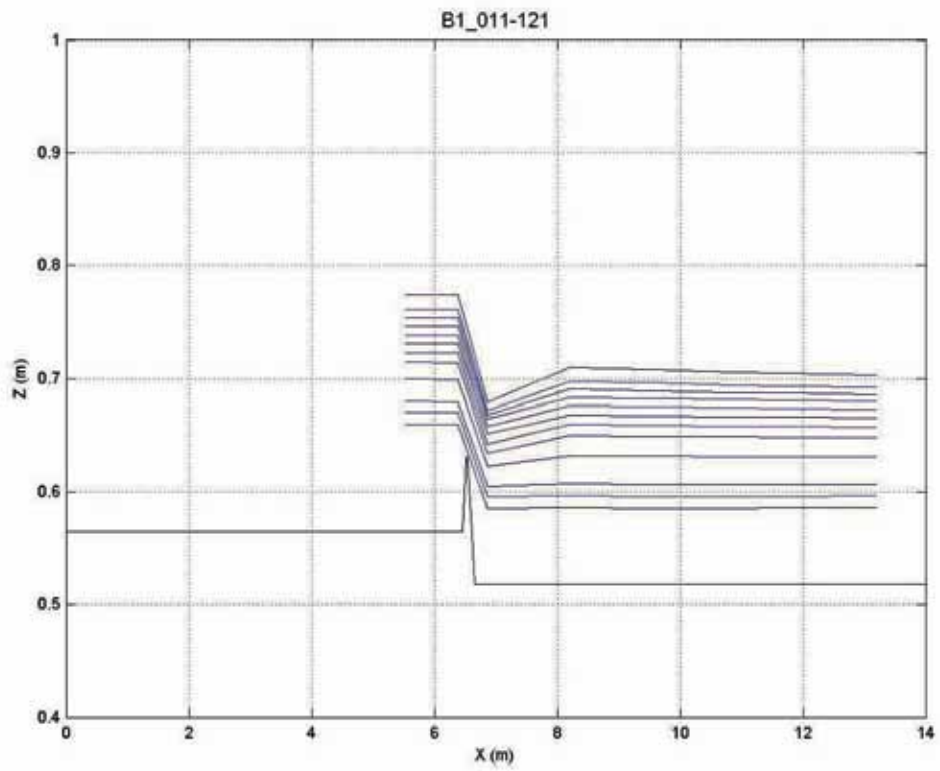
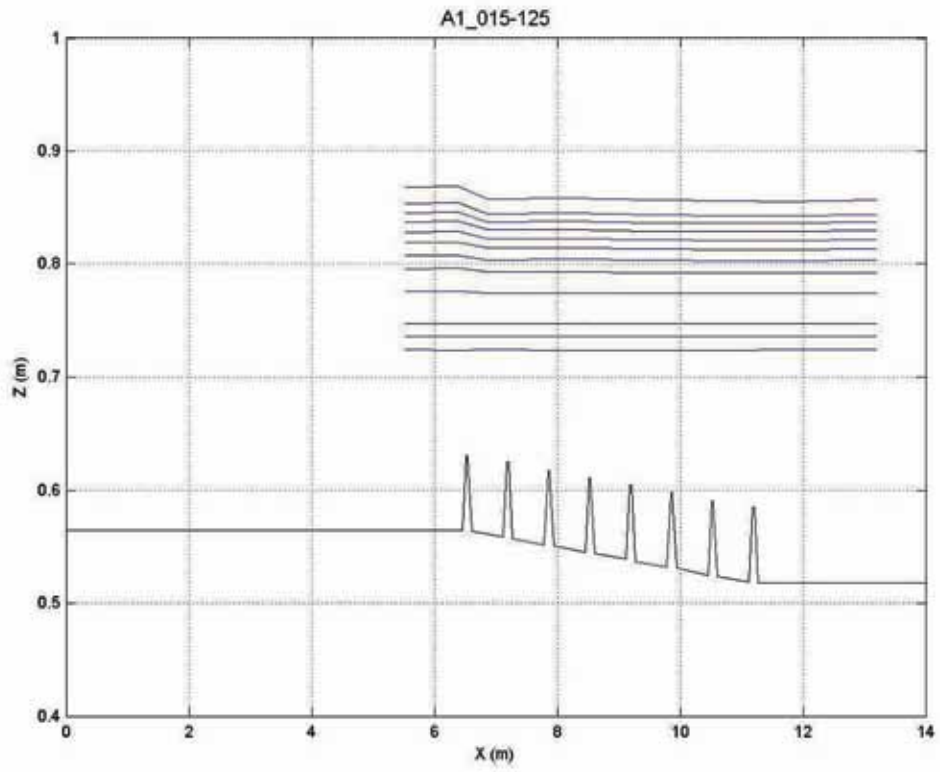
BIJLAGE 4

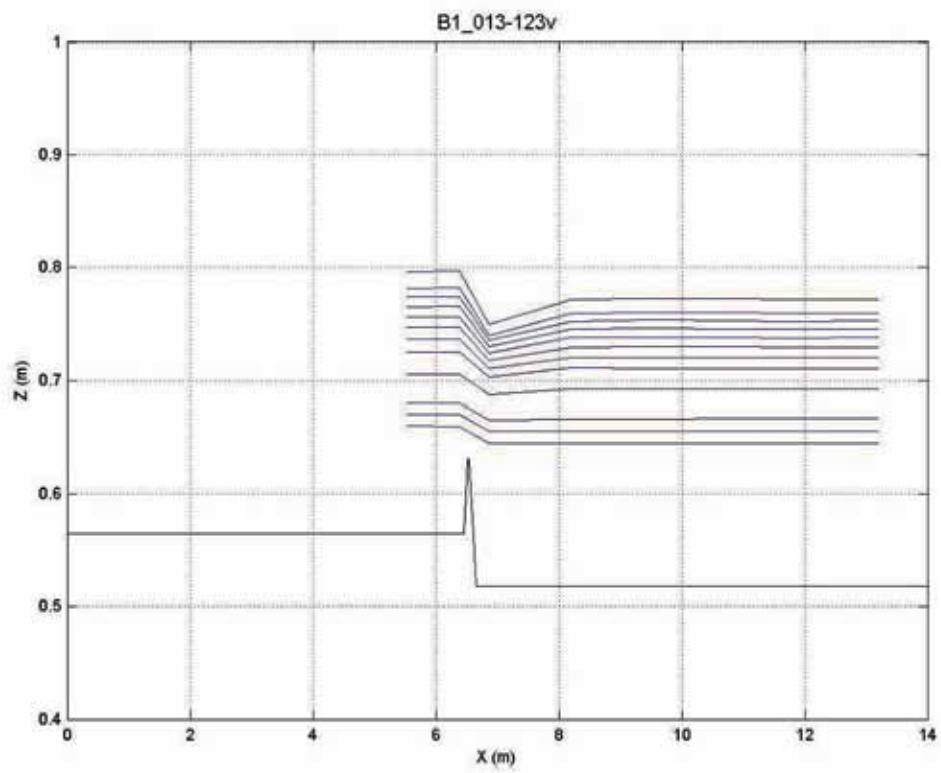
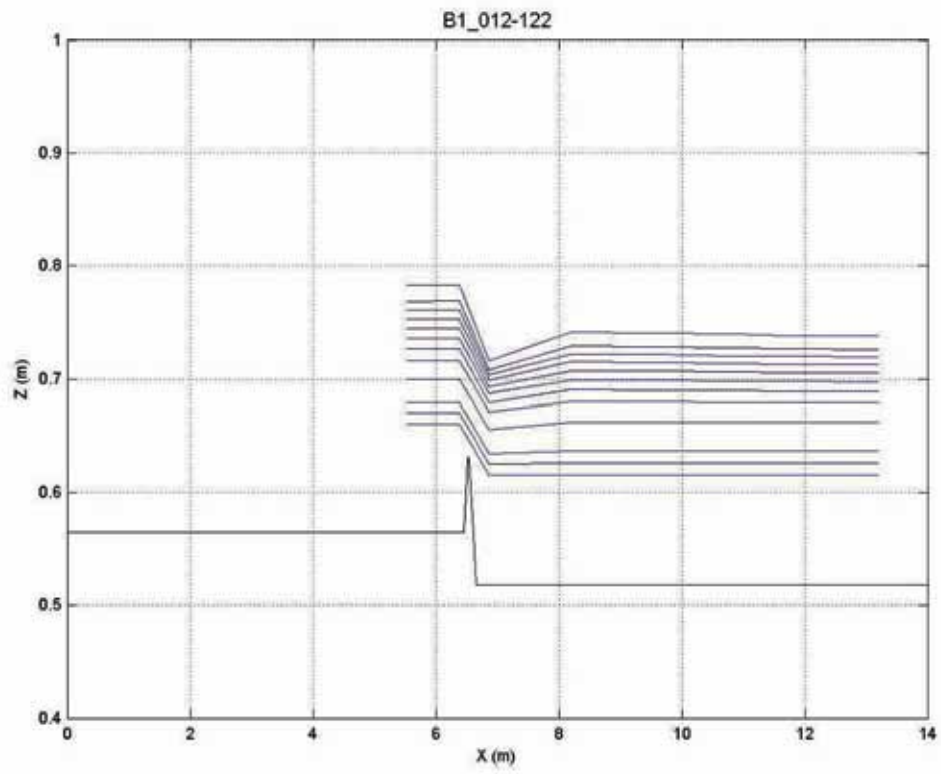
WATERSTANDSPROFIEL OVER CONSTRUCTIE,  
VOOR 12 DEBIETEN (1-120 L/S) EN  
5 BENEDENSTROOMSE SCHUIFHOOGTES

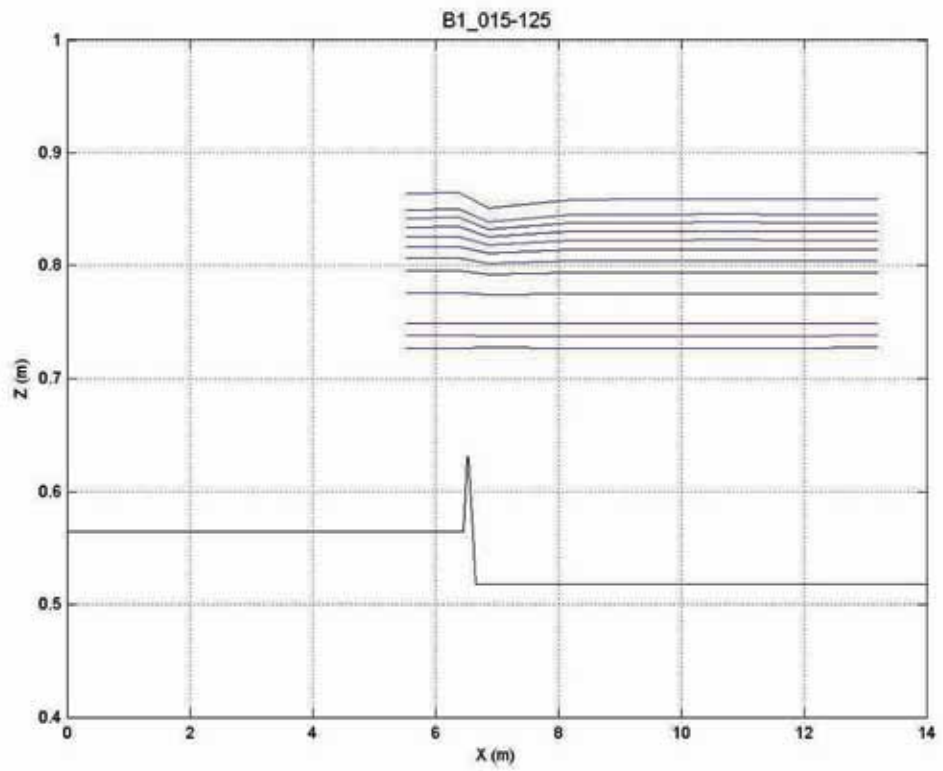
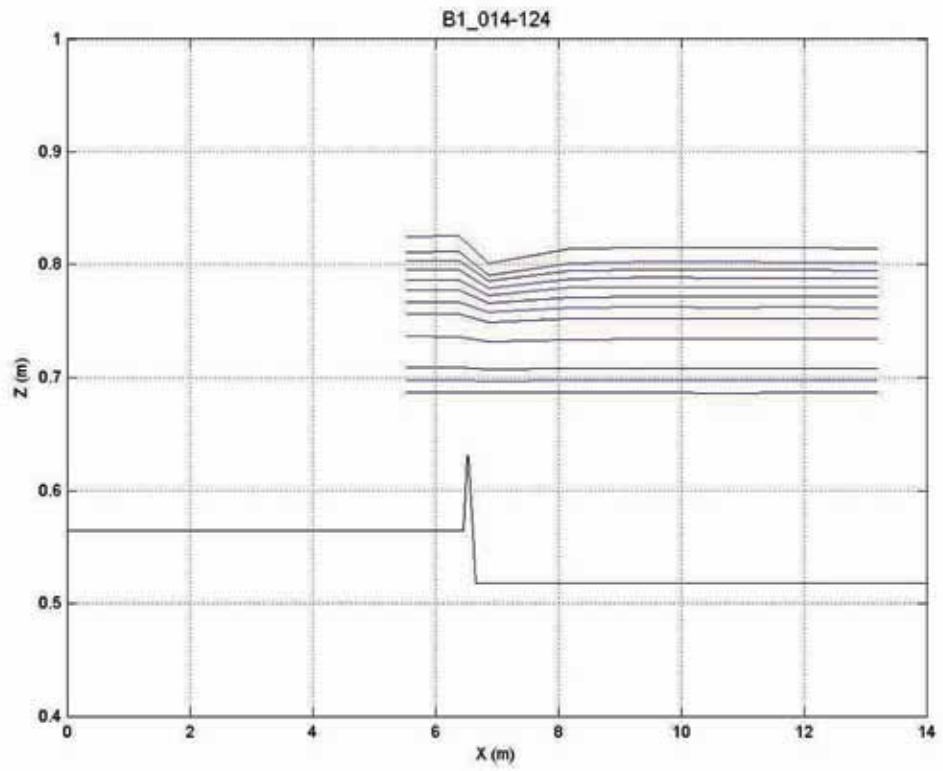


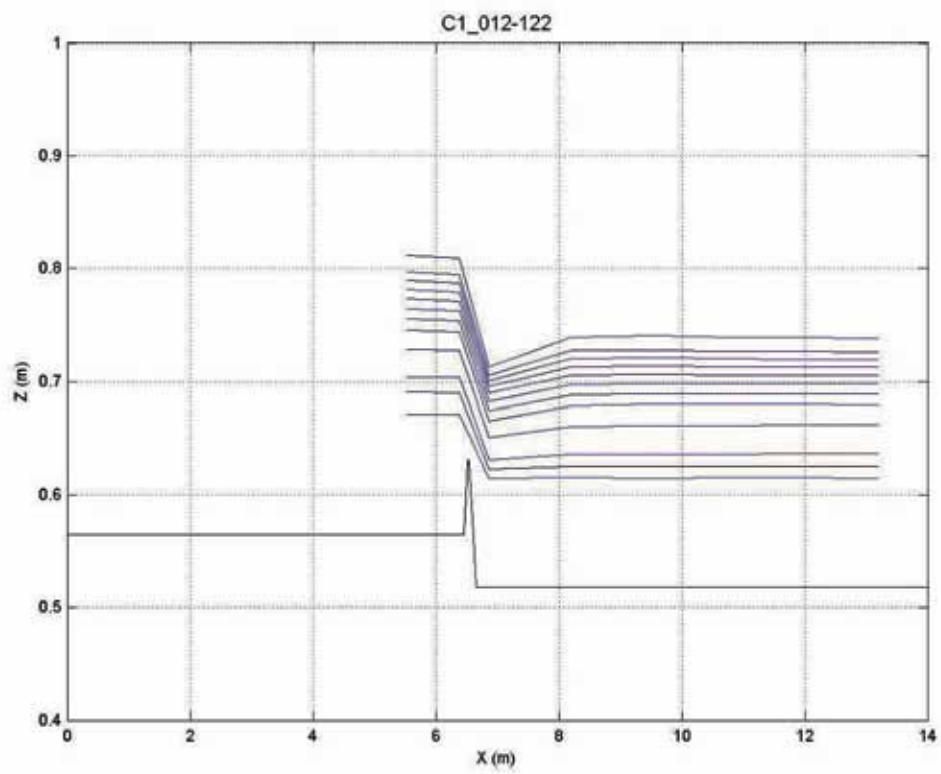
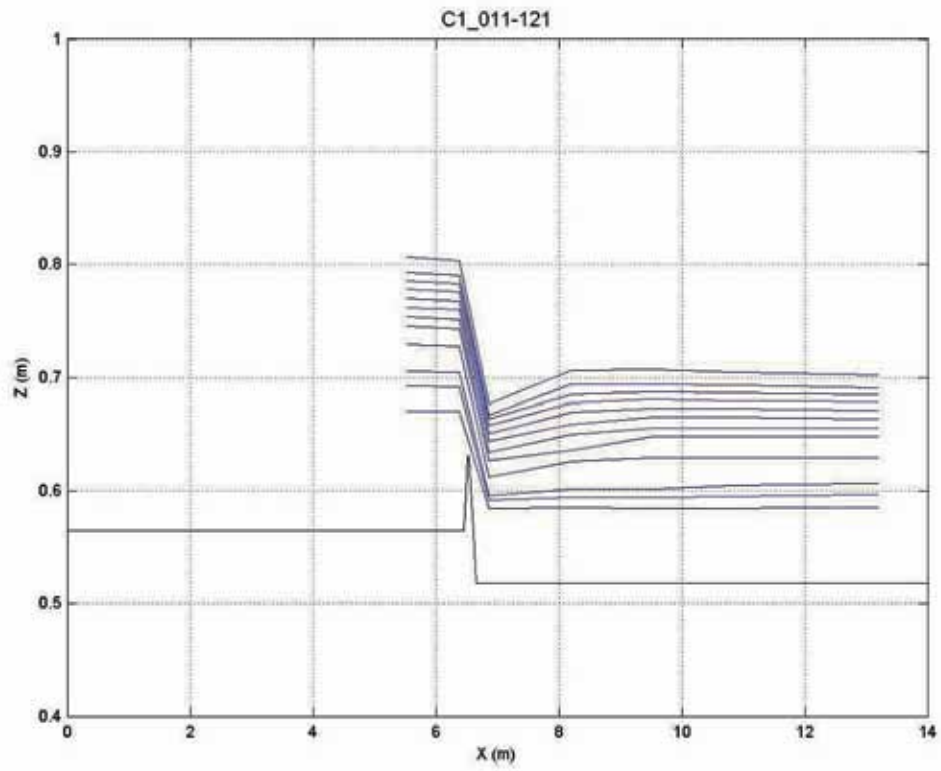


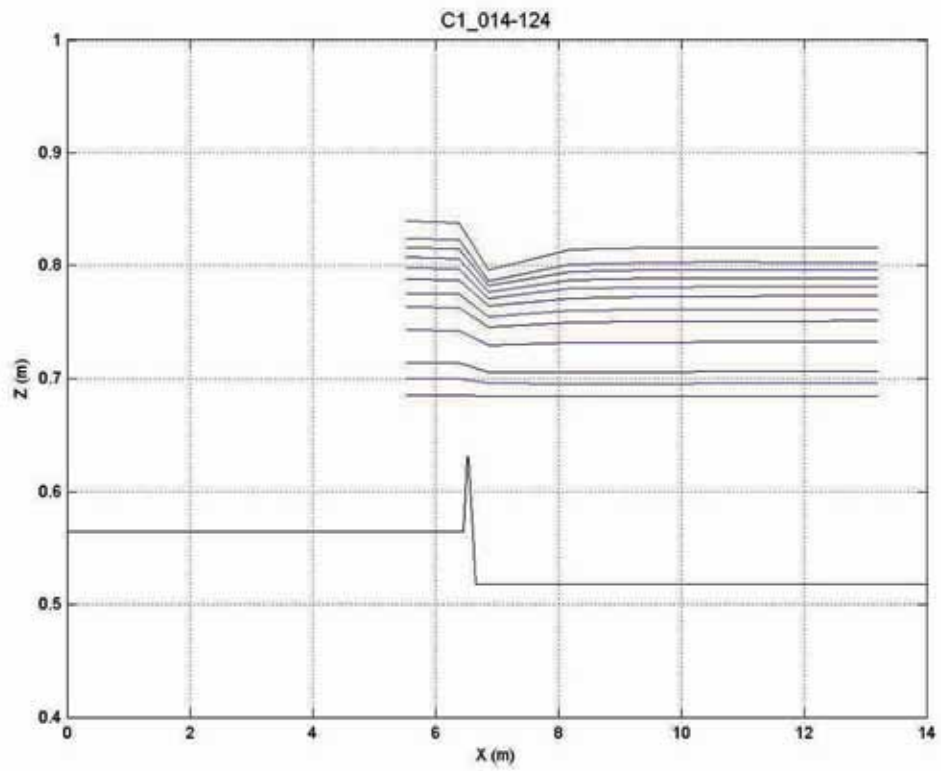
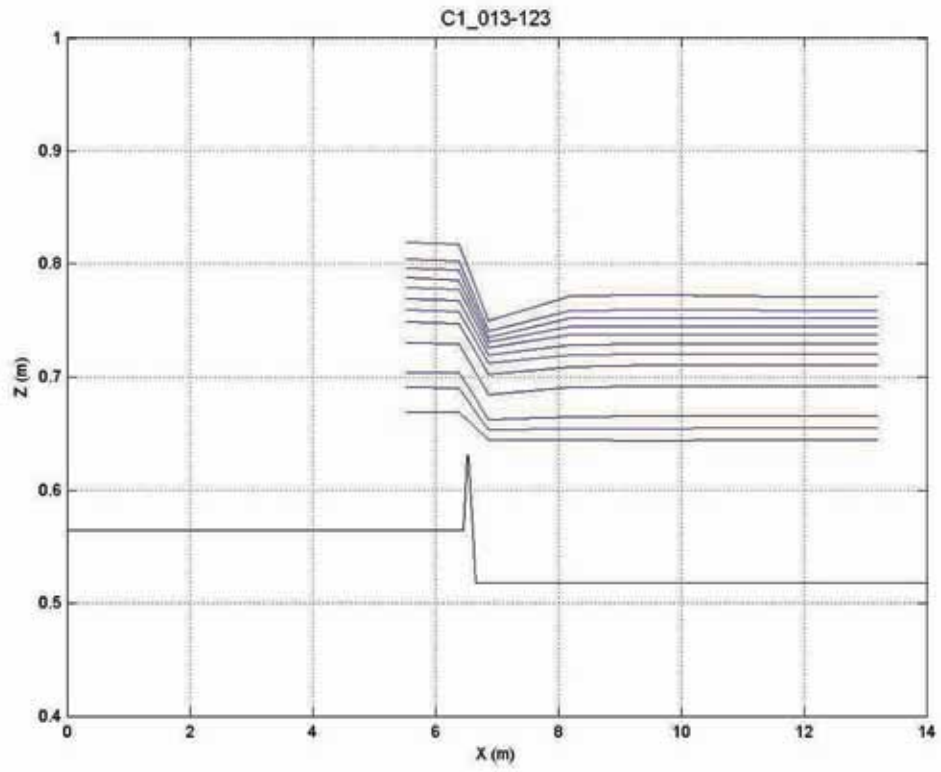


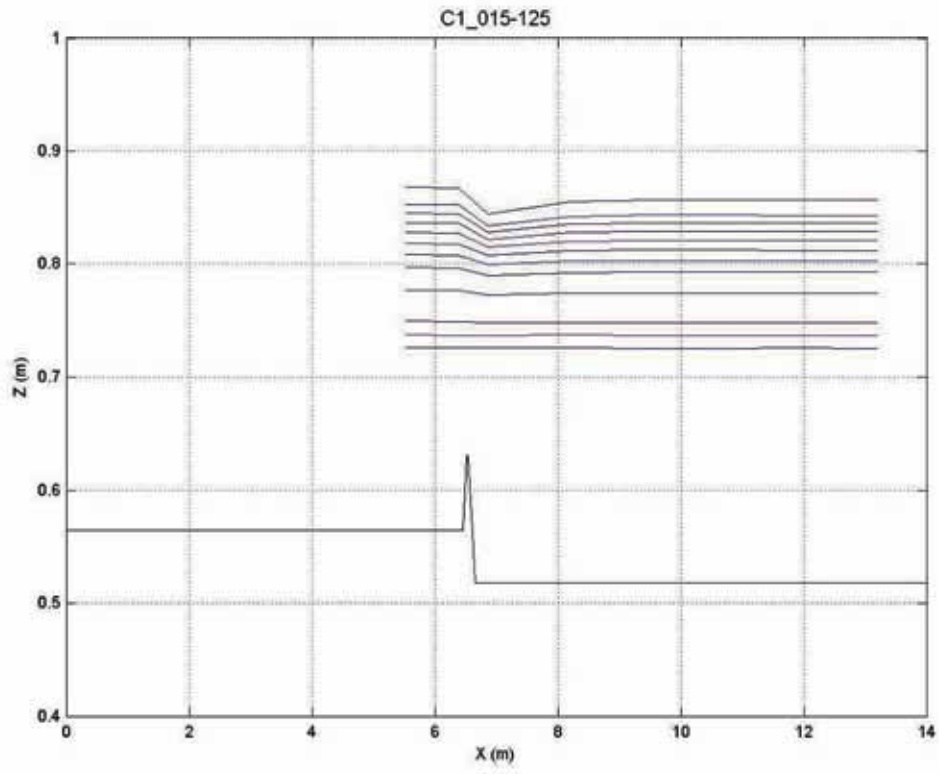
















## BIJLAGE 5

# METHODE VOOR DE OMZETTING VAN PROTOTYPE WAARDEN NAAR MODELWAARDE EN OMGEKEERD

Hieronder is uitgewerkt waarom de Chézy coëfficiënt in het model en prototype gelijk zijn en Manning's  $n$  niet. Hierbij moet opgemerkt worden dat de hydraulische ruwheid  $R$ , is vervangen door de waterdiepte  $d$ , omdat de wanden van de stroomgoot verwaarloosbaar glad zijn en dus de breedte dimensie geen rol speelt. De gebruikte symbolen zijn terug te vinden in de lijst met symbolen.

Chézy vergelijking

$$u = C\sqrt{SR} \rightarrow u = C\sqrt{Sd}$$

Froude schaalregel uitgedrukt in schaalfactoren ( $N$ ).

$$\left. \begin{array}{l} N_{Fr} = \frac{Nu}{\sqrt{N_g N_d}} = 1 \\ N_g = 1 \end{array} \right\} Nu = \sqrt{N_d} = \sqrt{N_L}$$

Chézy vergelijking uitgedrukt in schaalfactoren ( $N$ ) en gecombineerd met de Froude-schaalregel.

$$\left. \begin{array}{l} Nu = N_c \sqrt{N_s N_d} \\ Nu = \sqrt{N_L} \\ N_d = N_L \\ N_s = 1 \end{array} \right\} \sqrt{N_L} = N_c \sqrt{N_L} \rightarrow N_c = 1 \rightarrow C_p = C_m$$

Manning's vergelijking

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \rightarrow u = \frac{1}{n} d^{2/3} S^{1/2}$$

Manning's vergelijking uitgedrukt in schaalfactoren ( $N$ ) en gecombineerd met de Froude-schaalregel.

$$\left. \begin{array}{l} Nu = \frac{1}{N_n} N_d^{2/3} N_s^{1/2} \\ Nu = \sqrt{N_L} \\ N_d = N_L \\ N_s = 1 \end{array} \right\} \sqrt{N_L} = \frac{1}{N_n} N_L^{2/3} \rightarrow N_n = N_L^{1/6} \rightarrow n_p = n_m N_L^{1/6}$$

