

Opdrachtgever:

Dienst Weg-en Waterbouwkunde

## Anticiperend onderzoek kribben

rekenen rondom kribben met HLES

RAPPORT  $\Phi$  2973

Simone van Schijndel en Bert Jagers

10 8 MRT 2002

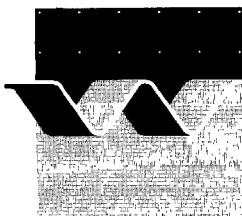
Verslag

februari 2002

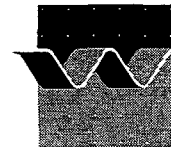
**B I D O C**  
(bibliotheek en documentatie)



Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
Postbus 5044, 2600 GA Delft  
Tel. 015 - 2518 363/364



**wl | delft hydraulics**



OPDRACHTGEVER: Dienst Weg- en Waterbouwkunde

TITEL: Anticiperend onderzoek kribben; rekenen rondom kribben met HLES

## SAMENVATTING:

In het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft worden metingen uitgevoerd aan kribben. Het doel van deze metingen is om beter inzicht te krijgen in de dynamische aspecten (turbulentie) van de stroming in kribvakken en rondom kribkoppen voor zowel de niet-overstroomde als de overstroomde situatie. De nadruk ligt op het meten van stroomsnelheden, en de fluctuaties daarin, in zowel het horizontale als het verticale vlak.



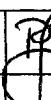
In de experimenten komen twee kribkophellingen (1:3 en 1:6) aan de orde. Voor de kribkop met helling 1:3 wordt naar de niet-overstroomde en de volledig overstroomde situatie gekeken. Vervolgens zijn flankerende 2D en 3D berekeningen gemaakt met Delft3D in combinatie met HLES. Voor het gebruik van rekenmodellen bij het onderzoek naar kribben en hun werking is het belangrijk inzicht te hebben in de voorspellende waarde van het desbetreffende rekenmodel. Daarom wordt in deze studie gekozen voor een opzet waarbij eerst een tweetal berekeningen wordt gemaakt om pas daarna een gedetailleerde kwantitatieve vergelijking te maken met de resultaten van de metingen in het schaalmodel. Voor de derde berekening kunnen dan, indien nodig, nog parameters worden aangepast.

Op basis van deze studie kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Delft3D met HLES is in staat het globale stroombeeld in een kribvak bij een niet-overstroomde krib te berekenen;
- het berekenen van het stroombeeld in de overstroomde situatie levert problemen op door sterk driedimensionale effecten; het aanpassen van de ruwheid van de krib levert weinig tot geen verbetering op; het toepassen van meerdere lagen levert wel een verbetering op.

## REFERENTIES:

ZWS 3051/01, brief d.d. 7 augustus 2001

VER.	AUTEUR		DATUM	OPMERK.	REVIEW		GOEDKEURING	
1.0	S.A.H. van Schijndel en H.R.A. Jagers		22/02/2002		dr.ir. R.E. Uittenbogaard <i>voor aan de v. dr. L. POSTMA</i>		mr.drs.P.C.G. Glas	
PROJECTNUMMER:			Q2973					
TREFWOORDEN:			Kribben, Delft3D en HLES, schaalmodel					
INHOUD:	TEKST	38	TABELLEN	3	FIGUREN	58	APPENDICES	5
STATUS:		<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1-1</b>
1.1	Kader van de studie.....	1-1
1.2	Doelstelling .....	1-2
1.3	Opzet van de studie .....	1-2
1.4	Leeswijzer .....	1-4
<b>2</b>	<b>Schaalmodel.....</b>	<b>2-1</b>
2.1	Globale beschrijving schaalmodel .....	2-1
2.2	Opzet metingen .....	2-3
<b>3</b>	<b>Numeriek model.....</b>	<b>3-1</b>
3.1	Beschrijving numeriek model .....	3-1
3.2	Numerieke parameters en randvoorwaarden .....	3-3
<b>4</b>	<b>Vergelijking resultaten .....</b>	<b>4-1</b>
4.1	Criteria voor de vergelijking van resultaten.....	4-1
4.2	Niet-overstroomde situatie met krib 1:3 .....	4-3
4.3	Overstroomde situatie met krib 1:3 .....	4-7
4.4	Niet-overstroomde situatie met krib 1:6 .....	4-10
4.5	Bespreking 3D berekeningen.....	4-13
<b>5</b>	<b>Stromingsbelasting op een krib .....</b>	<b>5-1</b>
5.1	Definitie van stromingsbelasting .....	5-1
5.2	Vergelijking kribvormen .....	5-1
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>6-1</b>
	Referenties .....	Lit.-1

## Appendices

<b>A</b>	<b>Figuren hoofdstuk 3.....</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Figuren niet-overstroomde situatie krib 1:3 .....</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Figuren overstroomde situatie krib 1:3 .....</b>	<b>C-1</b>
<b>D</b>	<b>Figuren niet-overstroomde situatie krib 1:6 .....</b>	<b>D-1</b>
<b>E</b>	<b>Figuren 3D berekeningen .....</b>	<b>E-1</b>



# I Inleiding

## I.1 Kader van de studie

In de afgelopen twee jaar is in een samenwerkingsverband met DWW, onder de titel '3D rekenen rondom constructies', onderzoek gedaan naar de stroming rondom kribben. Daarbij is grote vooruitgang geboekt met het berekenen van de stroming rondom niet-overstroomde kribben. Met behulp van de combinatie van Delft3D en HLES is het gelukt om het 2D-stroombeeld dat optreedt in het schaalmodel redelijk tot goed te reproduceren. De aandacht is met name uitgegaan naar vergelijking van tijdsgemiddelde stroombeelden aan de oppervlakte en karakteristieke stromingsparameters, zoals ligging van de stroomscheidingslijn en afmetingen van de neren. Voor details over deze eerdere studie wordt verwezen naar [Schijndel, 2000].

Naast een kwantitatieve vergelijking is in de genoemde studie een kwalitatieve analyse gemaakt van de dynamische aspecten van de stroming. Zo is gekeken naar fluctuaties van de snelheden in zowel u- als v-richting op diverse locaties in de stroming en op de kribkop. Het blijkt dat de optredende snelheden en fluctuaties het verwachte beeld kwalitatief ondersteunen, maar dat meer experimenteel onderzoek nodig is om daadwerkelijk te kunnen vaststellen of de dynamica van de stroming rondom kribben goed kan worden beschreven door de combinatie van Delft3D en HLES. Verder is in eerder onderzoek alleen de niet-overstroomde situatie aan bod gekomen in zowel schaalmodel als rekenmodel. Voor de overstroomde situatie is enkel een oriënterende berekening gemaakt. Vanuit het oogpunt van hoogwaterbeheersing bestaat echter ook grote interesse voor het berekenen van het stroombeeld bij overstroomde kribben. Omdat in deze situatie driedimensionale effecten een rol kunnen spelen, is het interessant te zien of Delft3D in combinatie met HLES in staat is het tijdsgemiddelde stroombeeld en de optredende fluctuaties te simuleren.

Voorgaande is aanleiding geweest om in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft metingen uit te voeren aan kribben en daarnaast wederom berekeningen uit te voeren ter vergelijking. Het doel van de metingen is om beter inzicht te krijgen in de dynamische aspecten (turbulentie) van de stroming in kribvakken en rondom kribkoppen voor zowel de niet-overstroomde als de overstroomde situatie. De nadruk ligt op het meten van stroomsnelheden, en de fluctuaties daarin, in zowel het horizontale als het verticale vlak.

In de experimenten komen twee kribkophellingen (1:3 en 1:6) aan de orde. Voor de kribkop met helling 1:3 wordt naar de niet-overstroomde en de volledig overstroomde situatie gekeken. De wens om naar alternatieve kribvormen te kijken komt uit de praktijk. Kribben verhogen de weerstand tijdens hoogwater, maar beschermen op hetzelfde moment ook de oevers en houden de vaargeul op diepte. Het idee is dat door een andere kribkophelling aan te brengen en tegelijkertijd het doorstroomoppervlak gelijk te houden, de kribben hun functie tijdens lage afvoeren behouden en de weerstand tijdens hoogwater vermindert. Experimenten moeten uitwijzen of dat ook daadwerkelijk het geval is.

Voor de numerieke studie ligt de nadruk op het reproduceren van het stroombeeld voor de verschillende experimenten. Wel worden de resultaten voor de twee kribvormen aan het einde met elkaar vergeleken.

## 1.2 Doelstelling

Het is belangrijk de waterbeweging rondom verschillende geometriën goed te kunnen berekenen zodat in de toekomst gebruik gemaakt kan worden van rekenmodellen om bijvoorbeeld langere trajecten door te rekenen.

De doelstelling van deze studie is meerledig:

- Het vergelijken van de rekenresultaten met resultaten van de metingen in het schaalmodel teneinde te beoordelen of Delft3D in combinatie met HLES de dynamische aspecten van de stroming goed kan berekenen, zodat het inzicht in de stromingsbelasting op een krib kan worden vergroot. Hiermee kan het ontwerp van de toplaag van een krib worden verbeterd;
- Het vaststellen wat de voorspellende waarde is van het numerieke model.

## 1.3 Opzet van de studie

Voor het gebruik van rekenmodellen bij het onderzoek naar kribben en hun werking is het belangrijk inzicht te hebben in de voorspellende waarde van het desbetreffende rekenmodel. Daarom wordt in deze studie gekozen voor een opzet waarbij eerst een tweetal berekeningen wordt gemaakt om pas daarna een gedetailleerde kwantitatieve vergelijking te maken met de resultaten van de metingen in het schaalmodel. Voor de derde berekening kunnen dan, indien nodig, parameters worden aangepast.

Voor de bouw van het numerieke model zijn de geometrie en ruwheidsgegevens van het schaalmodel aangeleverd door de opdrachtgever. Evenals de randvoorwaarden voor de boven- en benedenstroomse rand. Deze gegevens in combinatie met ervaringen op het gebied van rekenen met de combinatie van Delft3D en Horizontal Large Eddy Simulation (HLES) vormen de basis voor het numerieke model.

De berekeningen worden in onderstaande volgorde uitgevoerd:

1. krib met kribkop 1:3, niet-overstroomde situatie;
2. krib met kribkop 1:3, volledig overstroomde situatie.

Vervolgens vindt de vergelijking met het schaalmodel plaats waarna in de tweede fase van de studie de laatste berekening wordt uitgevoerd:

3. krib met kribkop 1:6, niet-overstroomde situatie.

De hier genoemde berekeningen 1, 2 en 3 vormen het uitgangspunt van deze studie. De vergelijking met het schaalmodel geschiedt in eerste instantie op basis van deze berekeningen. Indien het nodig blijkt randvoorwaarden of parameters te wijzigen voor de eerste twee berekeningen worden deze berekeningen aangegeven met 1a, 1b, enz..

Voor het vergelijken van de resultaten moet onderscheid gemaakt worden tussen het tijdsgemiddelde beeld en de tijdsafhankelijke registraties. In de studie in 2000 is veel aandacht besteed aan het tijdsgemiddelde beeld. De locatie van de centra van de neren in het kribvak en het verschil in grootte en richting van de vectoren van het tijdsgemiddelde stroombeeld zijn hier belangrijk. Nu gaat de aandacht met name uit naar de dynamische aspecten van de stroming: een vergelijking van de fluctuaties van stroomsnelheden, zowel in grootte als frequentie en vergelijking van turbulente structuren in de menglaag en op de kribkop.

## **1.4 Leeswijzer**

Dit rapport beschrijft de vergelijking van resultaten van metingen in een schaalmodel met resultaten van een numeriek model.

Hoofdstuk 2 beschrijft het schaalmodel zoals dat in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft aanwezig is en de opzet van de metingen die in dat model zijn gedaan.

In hoofdstuk 3 komt het numerieke model en de gebruikte parameters aan de orde.

Hoofdstuk 4 vergelijkt de resultaten van beide modellen met elkaar en gaat dieper in op de verschillen die geconstateerd worden.

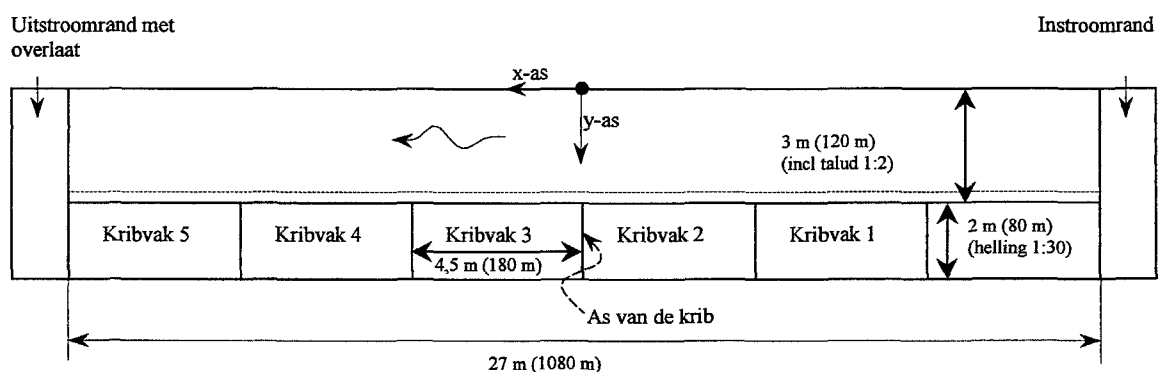
Hoofdstuk 5 vat alles samen en beschrijft de conclusies.

De studie is uitgevoerd door ir. H.R.A. Jagers en ir. S.A.H. van Schijndel, waarbij de laatste projectleider was. Als specialist op het gebied van turbulentie is dr.ir. R.E. Uittenbogaard geraadpleegd. Hij was ook samen met ir. H.J. Verheij verantwoordelijk voor de kwaliteitsborging van de studie. Vanuit DWW waren ir. M. van der Wal en drs. N.M. Kruyt betrokken bij het project. Tijdens de studie is nauw contact onderhouden met dr.ir. W.S.J. Uijttewaal van de Technische Universiteit Delft met betrekking tot het schaalmodelonderzoek.

## 2 Schaalmodel

### 2.1 Globale beschrijving schaalmodel

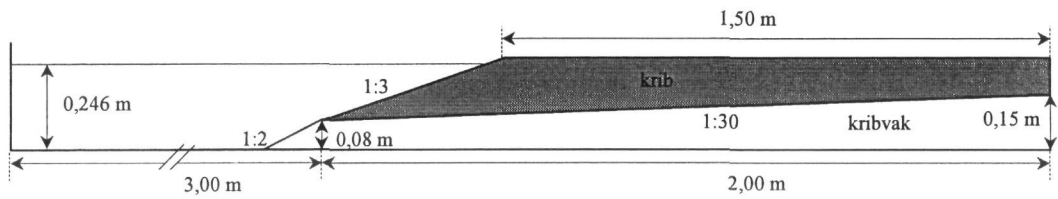
Het schaalmodel ligt in de brede, ondiepe goot van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft. Het model is gebaseerd op de afmetingen van kribben in de Waal en heeft een schaal van 1:40. De maximale waterdiepte in de hoofdgeul is 0,4 m en de kribben zijn gebouwd op het ondiepe deel van de goot. De gehele goot is gemaakt van beton en de ruwheid hiervan is bepaald door de hoofdgeul af te sluiten en het verhang over het model te bepalen. Figuur 2-1 toont een overzicht van het schaalmodel. In het schaalmodel is slechts de helft van de rivier gemodelleerd. Het vak na de instroomrand wordt niet als kribvak beschouwd. Het eerste kribvak komt na de eerste krib.



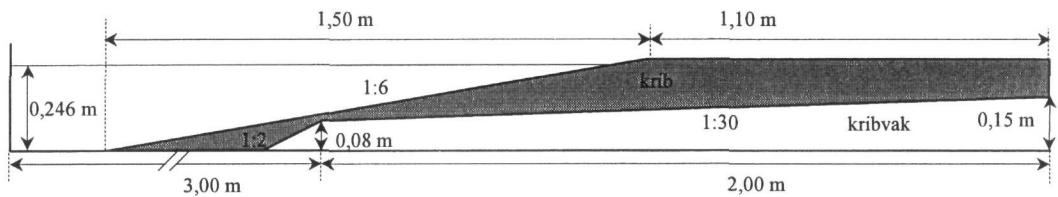
Figuur 2-1 Globaal overzicht schaalmodel (modelafmetingen; schaal 1:40)

De gemiddelde waterdiepte bij niet-overstroomde kribben is circa 0,25 m en de stroomsnelheid in de hoofdgeul is 0,35 m/s. Dit komt overeen met een stroomsnelheid van 2,2 m/s in het prototype. Onder de genoemde condities is in de hoofdgeul het Froude-getal 0,2 en het Reynolds getal 60.000. In het kribvak is het Reynolds-getal 10.000 en dus nog steeds voldoende groot om te garanderen dat de stroming turbulent blijft. Op de bovenstroomse rand van het model zijn voorzieningen aangebracht om ervoor te zorgen dat het stroombeeld zich snel ontwikkelt. Het streven is om na twee kribvakken een volledig ontwikkeld stroombeeld te realiseren, omdat de metingen worden uitgevoerd in het derde kribvak. De gemiddelde snelheid tijdens de overstroomde situatie is 0,28 m/s. Hoe de verdeling van de snelheid over de dwarsraai is, is niet bekend.

Er zijn twee kribvormen beschouwd met een verschillende helling. De geometrie van de krib is zo bepaald dat het (loodrecht op de hoofdstroom geprojecteerde) doorstroomoppervlak in beide gevallen gelijk is. Figuur 2-2 en Figuur 2-3 tonen de twee kribvormen.

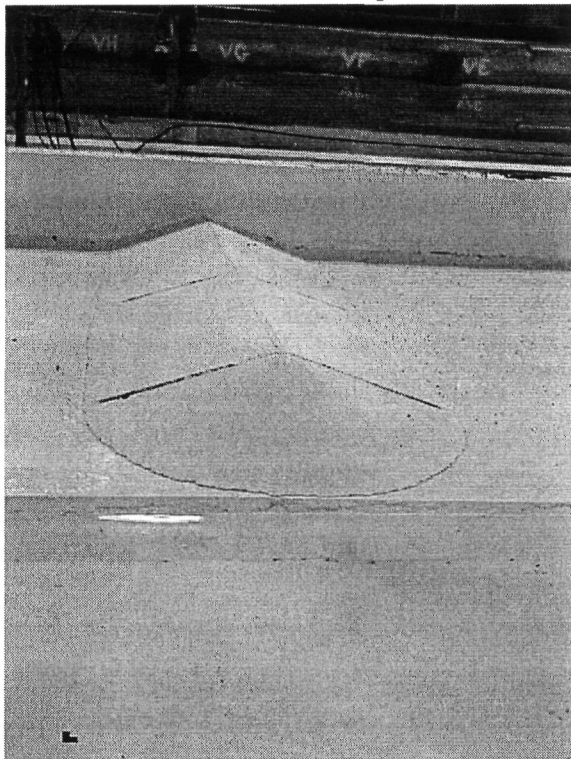


Figuur 2-2 Doorsnede van de derde krib in het schaalmodel met een kribkophelling van 1:3

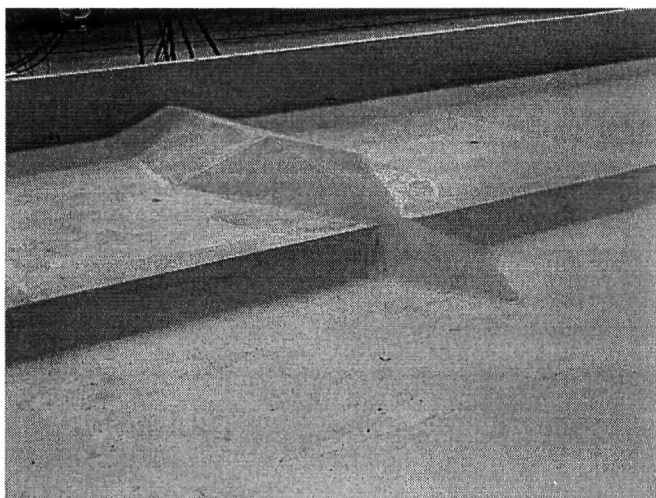


Figuur 2-3 Doorsnede van de derde krib in het schaalmodel met een kribkophelling van 1:6

In bovenaanzicht is de kop van de krib met helling 1:3 een doorsnijding van een kegel en het schuin aflopende kribvak. Deze vorm komt duidelijk naar voren in de figuren bij de beschrijving van het numerieke model. Daarnaast tonen Figuur 2-4 en Figuur 2-5 een foto van het schaalmodel met de respectieve kribben.



Figuur 2-4 Foto van de derde krib in het schaalmodel met een kribkophelling van 1:3



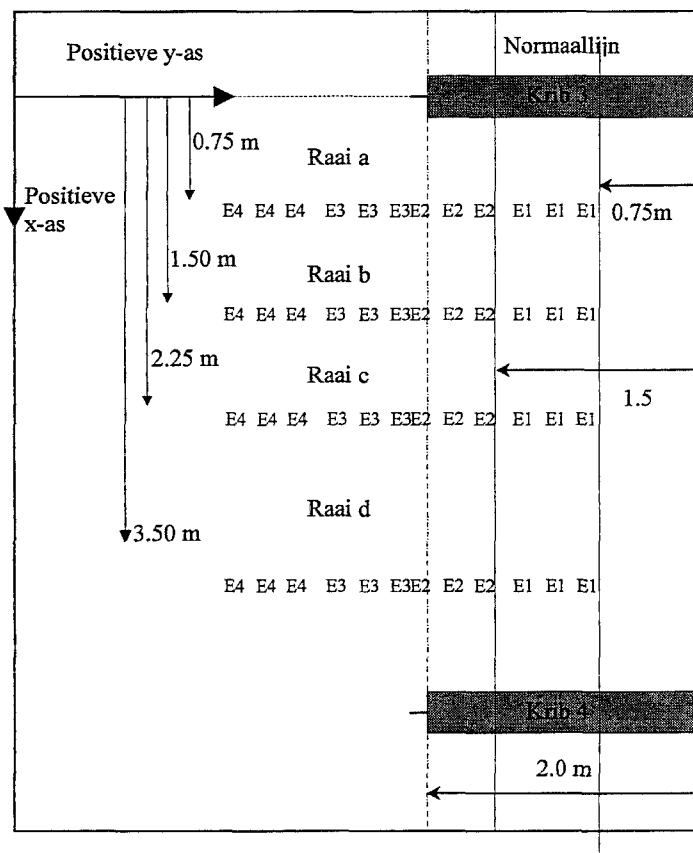
Figuur 2-5 Foto van de derde krib in het schaalmodel met een kribkophelling van 1:6

## 2.2 Opzet metingen

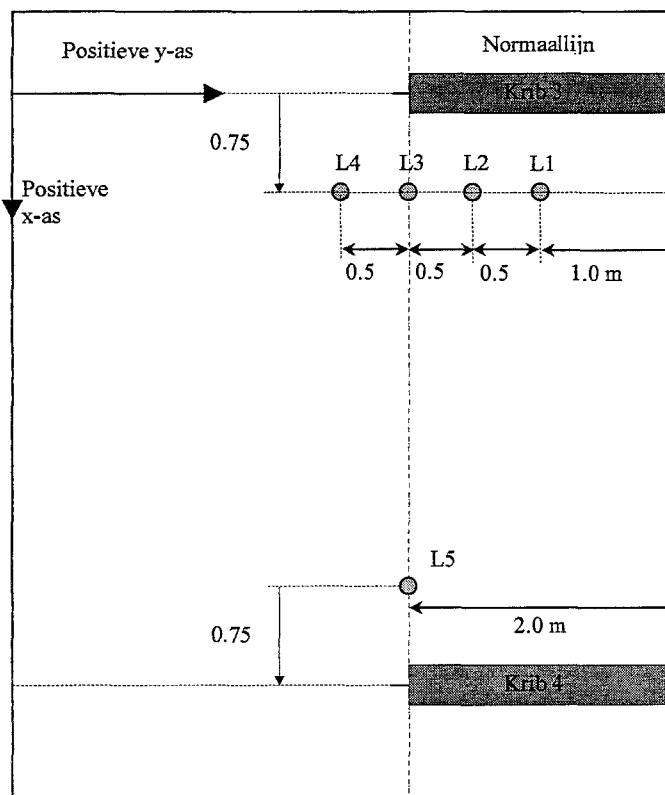
Bij de metingen ligt de nadruk op het meten van de stroomsnelheden in de menglaag en in de omgeving van de kribkop. In het schaalmodel zijn vier soorten metingen uitgevoerd:

- Particle Tracking Velocimetry (PTV): met behulp van grote hoeveelheden kunststof bolletjes zijn in delen van het derde kribvak de grootschalige stroombeelden in de tijd gemeten. Het gaat hier uiteraard om metingen aan de oppervlakte;
- Laser Doppler Anemometry (LDA): in twee punten, L2 ( $x = 0,75$  m en  $y = 3,0$  m) en L5 ( $x = 3,75$  m en  $y = 3,0$  m) zijn met een frequentie van 100 Hz op twee plaatsen in de verticaal tijdseries van de twee horizontale snelheidscomponenten gemeten. De ene locatie bevindt zich 3 cm onder het wateroppervlak en de andere halverwege de waterdiepte. Het doel van deze metingen is een energiedichtheidsspectrum te maken;
- Elektro Magnetische Stroommetingen (EMS): op vier verschillende plaatsen langs de x-as ( $x = 0,75$  m,  $x = 1,5$  m,  $x = 2,25$  m en  $x = 3,5$  m) zijn in dwarsraaien snelheden gemeten aan de oppervlakte en de bodem met een frequentie van 10 Hz. Van deze snelheden is het gemiddelde en de standaardafwijking bepaald;
- golfhoogtemetingen: op twee locaties in de hoofdstroom, H1 ( $x = -4,5$  m en  $y = 1,5$  m) en H2 ( $x = 9,0$  m en  $y = 1,5$  m), en drie locaties in het tweede kribvak, H3 ( $x = -4,0$  m en  $y = 3,5$  m), H4 ( $x = -2,25$  m en  $y = 3,5$  m) en H5 ( $x = -0,5$  m en  $y = 3,5$  m), zijn tijdseries gemaakt van de waterdiepte.

Figuur 2-6 en Figuur 2-7 geven aan waar de metingen zijn uitgevoerd.



Figuur 2-6 Ligging van EMS en profielen



Figuur 2-7 Locaties van LDA meters



## 3 Numeriek model

### 3.1 Beschrijving numeriek model

#### Delft3D en HLES

Delft3D is het numerieke model van WL waarin de ondiepwatervergelijkingen worden opgelost onder aanname van hydrostatische drukverdeling. Het is mogelijk het model zowel voor tweedimensionale als driedimensionale toepassingen te gebruiken. In eerste instantie ligt in deze studie de nadruk op de tweedimensionale toepassing. Voor het beschrijven van het stroombeeld in kribvakken is Delft3D in combinatie met Horizontal Large Eddy Simulation (HLES) gebruikt.

Het concept van HLES is gebaseerd op het feit dat de grote energierijke, tweedimensionale wervels rechtstreeks op het rooster worden uitgerekend, terwijl het effect van de kleinere wervels wordt benaderd door een Sub Grid Scale model. Daarnaast wordt een turbulentiemodel toegepast voor de bijdrage van de driedimensionale turbulentie. Deze aanpak is geoorloofd omdat er in de stroming weliswaar driedimensionale variaties optreden, maar de grootschalige patronen, die de meeste energie bevatten, zijn voornamelijk tweedimensionaal. Zie voor een uitgebreide beschrijving [Uittenbogaard, 1992].

Het numerieke model, zoals hier beschreven, vormt de basis van deze studie. Op details kan deze schematisatie nog wijzigen door het vergelijken van de rekenresultaten met de metingen. Indien van toepassing beschrijft hoofdstuk 4 deze wijzigingen en de gevolgen ervan voor de rekenresultaten.

#### Rooster en geometrie

Voor de bouw van het rekenmodel zijn de afmetingen van het schaalmodel bepalend geweest. Op basis van de geometrie van de kribben is gekozen voor een fijn rechthoekig rooster. Door de roostercellen voldoende klein te kiezen, kan de geometrie van de kribben goed benaderd worden. Het voordeel hiervan is dat het uitrekenen van afgeleide grootheden eenvoudiger is dan wanneer een kromlijinig rooster wordt gebruikt [Schijndel, 2000]. Daarnaast is het op deze manier eenvoudig het rooster zo te kiezen dat de meetpunten in de experimenten overeenkomen met locaties in het numerieke model. Dit voorkomt interpolatie bij het verwerken van de resultaten.

Ter hoogte van de kribben zijn de afmetingen van de roostercellen ongeveer een factor 4 kleiner dan in de hoofdgeul. Dit komt neer op roostercellen op de kribben van 0,025 m in zowel x- als y-richting. Omdat in het schaalmodel een afgeronde krib gecombineerd wordt met een rechte hoofdgeul is het ook met een kromlijinig rooster niet mogelijk om exact de ronde vorm van de krib te volgen. Daardoor zijn kartelranden niet te vermijden, maar door

een fijn rooster te kiezen is de invloed van deze kartelranden minimaal. Figuur A-1 toont een detail van het rooster in de omgeving van het derde kribvak. Figuur 2-1 toont de coördinatenoorsprong. De positieve z-richting is (verticaal) naar boven toe gericht.

De geometrie van de kribben en het kribvak is verwerkt in de bodem. Figuur A-2 en figuur A-3 tonen de schematisatie van de bodem ter plaatse van de derde krib voor beide kribkoppen (1:3 en 1:6). In deze figuren is ook het rooster zichtbaar.

Omdat de waterstand in het benedenstroomse meetpunt in het schaalmodel juist onder de kruin van de kribben staat is er voor gekozen om in het numerieke model voor de niet-overstroomde situatie niet-doorlatende wanden op de kruin van de krib te plaatsen. Zo wordt vermeden dat zeer kleine debieten over de kruin dusdanig hoge snelheden veroorzaken dat het numerieke model instabiel wordt. Dit is toegestaan omdat verwacht wordt dat in het schaalmodel de waterbeweging niet sterk beïnvloed wordt door deze kleine debieten over de kruin.

Voor de overstroomde situatie zijn de niet-doorlatende wanden vanzelfsprekend niet geplaatst. Dat is ook niet nodig omdat in dat geval de waterdiepte boven de kruin van de krib voldoende groot is.

### Bodemruwheid

De bodemruwheid van het schaalmodel is gegeven door de opdrachtgever. In het schaalmodel is bij een aantal waterstanden een ruwheid gemeten. Hierin is de vormruwheid van de kribben niet meegenomen. Deze metingen zijn gedaan in de vaargeul met een muurtje tussen de vaargeul en de kribvakken. In Tabel 3-1 staan de verschillende waterstanden, stroomsnelheden en bijbehorende Chézy-waarden en Nikuradse ruwheid. De gemiddelde Chézy-waarde is  $62,07 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  en de Nikuradse ruwheid  $k_s$  is gemiddeld  $0,0006 \text{ m}$ . De stroomsnelheid tijdens de experimenten wordt gelijk gehouden op  $0,3 \text{ m/s}$  door bij hogere waterstanden het debiet te vergroten.

Tabel 3-1 Gegevens ruwheidsmeting, waterstand, diepte en tijds gemiddelde snelheid, Chézy-waarde en Nikuradse ruwheid  $k_s$ .

Waterstand (cm)	gemiddelde snelheid (m/s)	Chézy ( $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ )	$k_s$ (m)
16	0,33	60,73	0,00056
24	0,31	61,98	0,00068
30	0,29	63,49	0,00064
gemiddelde		62,07	0,00062

Bij berekeningen met Delft3D gaat de voorkeur uit naar het definiëren van de ruwheid in de vorm van een  $k_s$ -waarde, omdat op deze manier de Chézy-waarde wordt berekend als functie van de waterdiepte en deze  $k_s$ -waarde. Op basis van de gegeven  $k_s$ -waarden is voor dit model gekozen voor een  $k_s$ -waarde van  $0,6 \text{ mm}$ . Deze  $k_s$ -waarde wordt zowel in de hoofdgeul als voor de kribben toegepast.

## Wandwrijving

Bij deze berekeningen is gebruik gemaakt van de optie om wandwrijving toe te passen. Deze wandwrijving heeft enkel invloed op de verticale wanden van het rekenmodel. In het verleden is vaker gebleken dat wandwrijving bij laboratoriumexperimenten niet verwaarloosd mag worden [WL | Delft Hydraulics, 1997].

In Delft3D bestaat de mogelijkheid wrijving op de wand te definiëren. De tangentiële schuifspanning  $\tau_{\eta\xi}$  of  $\tau_{\xi\eta}$  wordt dan berekend op basis van een logaritmische 'law of the wall'.

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \rho u_*^2$$

waarbij:

$\rho$  dichtheid water [kg/m<sup>3</sup>]

waarin de schuifspanningssnelheid  $u_*$  bepaald wordt door:

$$u(\Delta x_s) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( 1 + \frac{\frac{1}{2} \cdot \Delta x_s}{z_{0v}} \right)$$

waarbij:

$z_{0v}$  ruwheidslengte [m]

$\kappa$  Von Karman constante  $\approx 0,41$  [-]

$\Delta x_s$  roosterafstand loodrecht op de wand [m]

Voor de berekeningen in deze studie is gebruik gemaakt van een ruwheidslengte van 0,0003 m.

## 3.2 Numerieke parameters en randvoorwaarden

### Tijdstap

Op basis van de gemiddelde snelheid en de gemiddelde afmetingen van het rooster is gekozen voor een tijdstap van 0,1 s. Op deze manier wordt voldaan aan de voorwaarde dat het Courant getal kleiner dan 1 moet zijn. Dit moet gelden voor alle locaties in het model.

Voor het Courant getal voor advectie geldt:

$$C = \frac{u \Delta t}{\Delta x}$$

waarbij:

$u$  de gemiddelde snelheid ter plaatse [m/s]

$\Delta t$  de tijdstap [s]

$\Delta x$  de bijbehorende gemiddelde roosterafstand [m]

In de hoofdstroom is de snelheid 0,35 m/s, de tijdstap 0,1 s en de afmeting van het rooster 0,1 m. Dit resulteert in een Courantgetal van 0,35.

## Afsnijgolfgetal ( $f_p$ [-])

HLES is erop gebaseerd dat een deel van de wervels expliciet op het rooster worden uitgerekend. Het afsnijgolfgetal bepaalt vervolgens voor welke wervelafmetingen het subgrid model moet worden toegepast. Hier is voor beide berekeningen een afsnijgolfgetal van 0,3 toegepast. Dit betekent dat de wervels die groter zijn dan  $6\Delta x$  alleen op het rooster worden uitgerekend. Voor de kleinere wervels wordt het Sub Grid Scale model toegepast. De keuze van het afsnijgolfgetal is afhankelijk van de roosterafmetingen en het toegepaste numerieke schema. Bij een ideaal numeriek schema worden de wervels groter dan  $2\Delta x$  op het rooster opgelost. Maar bij het numerieke schema van Delft3D, dat geschikt is voor complexe geometriën, vertonen de berekende snelheden afwijkingen zodra de wervels kleiner zijn dan  $6\Delta x$  ( $f_p = 0,3$ ).

Eerdere ervaringen met berekeningen aan kribvakken ondersteunen de keuze voor een afsnijgolfgetal van 0,3. In [Schijndel, 2000] is ook gekeken naar afsnijgolfgetallen van 0,2 en 0,5 en de één resulteerde in een te dynamische oplossing en de ander was niet dynamisch genoeg. Andere studies, voor bijvoorbeeld havens, geven ook aan dat een afsnijgolfgetal van 0,3 goede oplossingen geeft.

## Randvoorwaarden

Bij het toepassen van Delft3D voor het berekenen van waterbeweging in schaalmodellen is gebleken dat het opleggen van een snelheidsrand aan de bovenrand goede, dat wil zeggen stabiele, resultaten oplevert. Daarom is hier gekozen voor een snelheidsrand. Bij een dergelijke rand kan per cel worden opgegeven wat de instroomsnelheid is. Op deze manier is het mogelijk aan te geven dat op de instroomrand de snelheid op het talud afneemt met afnemende waterdiepte, terwijl in de hoofdstroom de snelheid over de hele breedte constant is. Voor de benedenrand is de waterstand lager gekozen (orde 1 mm) dan de opgegeven waterstand, omdat de rand circa 5 m verder benedenstrooms ligt dan het punt waar de waterstand gemeten is. Dit geeft de volgende randvoorwaarden voor de berekeningen:

### 1. krib met kribkop 1:3, niet-overstroomde situatie; $u_{\text{gem.schaalmodel}} = 0,35$ m/s

bovenrand hoofdstroom	$u = 0,35$ m/s
bovenrand talud	van $u = 0,35$ m/s naar $u = 0$ m/s bij de kribkruin
debiet door model	$Q = 0,260$ m <sup>3</sup> /s
benedenrand	$h = 0,245$ m

### 2. krib met kribkop 1:3, volledig overstroomde situatie; $u_{\text{gem.schaalmodel}} = 0,28$ m/s

bovenrand hoofdstroom	$u = 0,275$ m/s
bovenrand talud	van $u = 0,275$ m/s naar $u = 0,379$ m/s bij de kribkruin
bovenrand kribkruin	$u = 0,379$ m/s
debiet door model	$Q = 0,306$ m <sup>3</sup> /s
benedenrand	$h = 0,3085$ m

**3. krib met kribkop 1:6, niet-overstroomde situatie;  $u_{\text{gem.schaalmodel}} = 0,35 \text{ m/s}$**

bovenrand hoofdstroom	$u = 0,35 \text{ m/s}$
bovenrand talud	van $u = 0,35 \text{ m/s}$ naar $u = 0 \text{ m/s}$ bij de kribkruin
debiet door model	$Q = 0,260 \text{ m}^3/\text{s}$
benedenrand	$h = 0,245 \text{ m}$

## 4 Vergelijking resultaten

### 4.1 Criteria voor de vergelijking van resultaten

De metingen en berekeningen worden op onderstaande punten vergeleken.

- I. Grootte en richting van het gemiddelde stroombeeld voor het gehele derde kribvak;
- II. Ruimtelijk beeld van de gemiddelde snelheid en de fluctuaties van de snelheid in het derde kribvak en op de derde kribkop;
- III. Tijdseries en vermogensdichtheidsspectrum van de snelheid in u-richting op twee locaties in het derde kribvak;
- IV. Verloop van de waterstand op enkele punten in het tweede kribvak en in het midden van de hoofdgeul (ook verhang over het gehele model). Pas op: de waterstandsmetingen vinden plaats in het **tweede** kribvak;
- V. Gemiddelde waterstand in het derde kribvak en afwijkingen ten opzichte van deze gemiddelde waterstand.

Voor het bepalen van het gemiddelde en de standaardafwijking zijn onderstaande formuleringen gebruikt voor de losse componenten:

Gemiddelde	$\mu_u = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n}$
Standaardafwijking	$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \mu)^2}{n-1}}$

waarbij:

$\mu_v$  gemiddelde waarde van de snelheid in x-richting [m/s]

$\sigma_v$  standaardafwijking van de snelheid in x-richting [m/s]

$u_i$  momentane snelheid in x-richting [m/s]

$n$  het aantal trekkingen waarover het gemiddelde en de standaardafwijking wordt bepaald

Voor de totale gemiddelde snelheid en standaardafwijking van de totale gemiddelde snelheid is onderstaande formulering gebruikt, overeenkomstig de gebruikte rekenmethode voor de resultaten van het schaalmodel:

Totale gemiddelde snelheid

$$\mu_s = \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \right)^2 + \left( \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \right)^2}$$

Standaardafwijking van de totale gemiddelde snelheid

$$\sigma_s = \sqrt{\left( \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \mu)^2}{n-1}} \right)^2 + \left( \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \mu)^2}{n-1}} \right)^2}$$

Alle figuren hebben betrekking op het derde kribvak, omdat daar ook de metingen in het schaalmodel worden verricht. Iedere figuur wordt gemaakt voor het gehele derde kribvak. Daarnaast zijn de metingen digitaal beschikbaar, zodat een kwantitatieve vergelijking mogelijk is.

Bij het vergelijken van de metingen met de rekenresultaten is een aantal punten van belang:

- zijn de locaties van de centra van de primaire en de secundaire neer in het tijdsgemiddelde stroombeeld gelijk?
- verschillen de vectoren in het tijdsgemiddelde stroombeeld in grootte en richting?
- verschilt het ruimtelijk beeld van de fluctuaties in grootte en vorm en dan met name in de menglaag en bovenstroms van de krib?
- is het mogelijk met het rekenmodel het verloop van de snelheid in de gemeten dwarsraaien te reproduceren?
- lijken de tijdseries van de snelheden qua grootte én gedrag van de fluctuaties op elkaar?

In de berekeningen worden met een frequentie van 10 Hz de resultaten bewaard, terwijl in de metingen een frequentie van 100 Hz is gehanteerd. Vanwege beperkingen in opslagruimte was het niet mogelijk met eenzelfde frequentie berekeningsresultaten op te slaan. Het resulterend aantal samples is echter voldoende groot om betrouwbare conclusies te kunnen trekken.

In dit rapport wordt niet op voorhand aangegeven wat de kwantitatieve criteria zijn om te concluderen dat de rekenresultaten goed of slecht zijn. Wel zal bij de vergelijking in detail worden ingegaan op verschillen in grootte en het gevolg van dit verschil voor de kwaliteit van de berekeningen.

Bij het beschrijven van het stroombeeld in het schaalmodel wordt verwezen naar figuren waarin ook al de rekenresultaten zijn opgenomen. Bij de vergelijking van de resultaten zullen dezelfde figuren gebruikt worden.

In § 4.2, 4.3 en 4.4 wordt alleen gesproken over tweedimensionale berekeningen. Naar aanleiding van de bevindingen tijdens het vergelijken van deze berekeningen met de metingen zijn ook driedimensionale berekeningen gemaakt. Deze komen in § 4.5 aan bod.

## 4.2 Niet-overstroomde situatie met krib 1:3

### Beschrijving stroombeeld in schaalmodel

In de niet-overstroomde situatie ontstaat in de kribvakken het verwachte stroombeeld met twee grootschalige neren. Daarnaast is een aantal kleine neren in de hoeken van het kribvak zichtbaar. Figuur B-1 toont in rood het stroombeeld aan de oppervlakte zoals dat gemeten is in het schaalmodel. De snelheden in de primaire neer zijn niet gemeten, maar op basis van de metingen in de hoofdstroom kan een globale inschatting worden gemaakt van de locatie van de primaire neer. Het centrum van de secundaire neer ligt 0,75 m benedenstrooms van de hartlijn van de derde krib. Figuur B-2 heeft alleen betrekking op het rekenmodel en wordt later besproken.

Figuur B-3 toont, eveneens in rood, de tijdsgemiddelde snelheden in u-richting ter plaatse van drie dwarsraaien zowel aan de bodem (stippellijn) als aan de oppervlakte. In deze profielen is duidelijk zichtbaar waar het centrum van de neer zich bevindt. Daarnaast valt het op dat de snelheden in de menglaag hoger liggen dan in de hoofdgeul en dat de snelheden aan de bodem op sommige plekken groter zijn dan aan de oppervlakte.

Figuren B-4 en B-5 laten het ruimtelijk beeld zien van de snelheid in u- en v-richting in het kribvak in het schaalmodel. De gemiddelde u-snelheid is met name hoog in de hoofdgeul en wordt snel kleiner in de richting van het kribvak. De gemiddelde v-snelheid is hoog aan de bovenstroomse zijde van de krib. Het naar binnen draaien van de wervels is hier de oorzaak van. Figuur B-6 laat de totale gemiddelde snelheid zien.

De fluctuaties van de snelheden in beide richtingen zijn zichtbaar in figuur B-7 en B-8 onderin. Met name in de menglaag varieert de u-snelheid sterk, terwijl de v-snelheid grote variaties vertoont aan de bovenstroomse zijde van de krib. Het naar binnen draaien van de wervels veroorzaakt dus niet alleen relatief hoge snelheden, maar ook grote fluctuaties. Figuur B-9 laat duidelijk onderscheid zien in de grootte van de fluctuaties in de menglaag en aan de bovenstroomse zijde van de krib.

Figuur B-10 toont de verschillen tussen schaalmodel en rekenmodel voor de totale gemiddelde snelheid en bijbehorende standaardafwijking. Deze figuur wordt meer in detail besproken bij het vergelijken van de berekeningen met de metingen.

Om de snelheden in u-richting in detail te kunnen vergelijken tonen figuur B-11 en B-12 voor twee punten (L2 en L5) het verloop van de snelheid gedurende een bepaalde periode. In figuur B-11 is voor de metingen de snelheid aan de oppervlakte en de bodem zichtbaar. De figuur waarin 10 minuten zichtbaar is, is geschikt om de gemiddelde waarden te vergelijken, terwijl het detail beter laat zien of de grootschalige fluctuaties overeenkomen. Dezelfde tijdsregistraties leveren de energiedichtheidsspectra voor de twee punten L2 en L5 in figuur B-13 en de histogrammen met corresponderende Gauss-krommes in figuur B-14.



Figuur B-15 geeft het verloop van de waterstand in de tijd in twee punten in de hoofdstroom. Door de gemiddelde waarde van deze twee tijdsregistraties te bepalen is het mogelijk het verhang te bepalen,  $1,41 \cdot 10^{-4}$ . Figuur B-16 geeft het verloop van de waterstand in de tijd in het tweede kribvak op de overgang van rivier naar kribvak. In het schaalmodel is het verhang over het tweede kribvak opmerkelijk groot,  $6,6 \cdot 10^{-3}$ . Het is niet duidelijk wat hier de verklaring voor is. Beide figuren laten de variaties ten opzichte van de oorspronkelijke waterspiegel zien. De oorspronkelijke waterstand is gedefinieerd als de waterstand behorende bij een diepte van 0,246 m in de hoofdgeul.

### Vergelijking van rekenresultaten met metingen

De vergelijking van het stroombeeld vindt in eerste instantie plaats op basis van figuur B-1. De grootte en de richtingen van de snelheden in de secundaire neer komen zeer goed overeen, maar de overeenkomst in de primaire neer is duidelijk minder. De grootte van de snelheid komt nog wel overeen, maar met name de richting wijkt af; waar in het schaalmodel de stroming rechtdoor gaat, buigt deze in het rekenmodel al het kribvak in. Op enkele locaties in de primaire neer wijken de richtingen van de stromingen  $30^\circ$  à  $40^\circ$  van elkaar af. In de niet-overstroomde situatie met een kribkophelling van 1:3 zijn geen metingen beschikbaar in het benedenstroomse deel van het kribvak, zodat niet goed kan worden vastgesteld wat de afwijking is van de locatie van het centrum van de primaire neer. Het is echter duidelijk dat deze neer in berekeningen en metingen niet op dezelfde plek zal liggen. Dit in tegenstelling tot de resultaten van de eerdere vergelijking waar de ligging van de primaire neer wel overeenkwam. Figuur B-2 toont de totale gemiddelde snelheid en de bijbehorende standaardafwijking voor het gehele rekenmodel. Dit om te laten zien dat het stroombeeld volledig ontwikkeld is en dat het patroon in de middelste kribvakken onderling sterke overeenkomsten vertoont.

Figuren B-4 en B-5 lijken aan te geven dat de grootte van de gemiddelde snelheden correct wordt berekend. De patronen komen grotendeels met elkaar overeen, maar zijn ten opzichte van elkaar enigszins verschoven. Ditzelfde beeld komt naar voren in figuur B-6 waarin de totale gemiddelde snelheid zichtbaar is. Een nadere analyse van de snelheden in figuur B-3 laat echter zien dat de snelheid in u-richting in een dwarsraai weliswaar dezelfde trend vertoont, maar dat de snelheden in het schaalmodel in de menglaag duidelijk hoger liggen. Bovendien zijn de snelheden in de menglaag aan de bodem groter dan aan het oppervlakte. Figuren B-11 ondersteunt dit beeld.

In het gebied rondom de kribkop en net bovenstrooms van de kribkruin zijn de verschillen het grootst. In de menglaag lopen de richtingen in sommige gevallen  $180^\circ$  uiteen (zie ook figuur B-1) en figuren B-7 en B-8 laten verschillen in fluctuaties zien voor de verschillende richtingen. In de u-richting zijn de fluctuaties in de menglaag voor het rekenmodel groter, terwijl voor de v-richting de fluctuaties aan de bovenstroomse zijde van de krib duidelijk kleiner zijn en het maximum van de fluctuaties in de v-richting ligt niet op de goede locatie. Dit wordt extra duidelijk in figuur B-9 waarin de standaardafwijking van de totale gemiddelde snelheid zichtbaar is. Blijkbaar is het rekenmodel wel in staat de trend van de snelheden te berekenen, maar wijken de absolute grootheden op sommige locaties af van het schaalmodel. Dit zou kunnen verklaren waarom de grootte en richtingen in de primaire

neer niet goed worden berekend. Het is dan wel verwonderlijk dat de gemeten en berekende snelheden en richtingen in de secundaire neer zo goed op elkaar aansluiten.

Figuur B-10 laat het verschil zien tussen rekenmodel en schaalmodel voor de totale gemiddelde snelheid en bijbehorende standaardafwijking. De snelheden in het schaalmodel zijn gedeeld door de snelheden van het rekenmodel. Zoals verwacht kon worden, treden de grootste verschillen op in de menglaag en aan de bovenstroomse zijde van de krib. In sommige gevallen zijn de snelheden in het schaalmodel een factor 2 groter of kleiner. Hierbij moet wel de kanttekening worden gemaakt dat dat met name gebeurt in gebieden met lage snelheden, zoals bijvoorbeeld net benedenstrooms van de kribkop. Bij het rekenmodel bevindt het maximum zich direct bovenstrooms van de kruin van de krib, terwijl in het schaalmodel de snelheden op de helling van de krib nog relatief klein zijn. Het maximum bevindt zich daar op de overgang van de helling van de krib naar het vlakke kribvak. Bovendien is nu duidelijk zichtbaar dat de menglaag in het rekenmodel iets verschoven is ten opzichte van het schaalmodel. Ook de standaardafwijkingen verschillen bovenstrooms van de krib en in de menglaag het meest van elkaar.

Door het berekenen van energiedichtheidsspectra is getracht een beeld te krijgen van de frequentie van loslaten van wervels. Figuur B-13 toont deze spectra voor de punten L2 en L5. Het spectrum van de metingen heeft een te verwachten helling van  $-5/3$ . De spectra van de berekeningen hebben echter een dusdanige helling dat geconcludeerd moet worden dat het niet zinvol is conclusies te trekken op basis van deze figuren. Deze helling is het gevolg van het feit dat de hier gebruikte code (Delft3D) voor kleine, maar nog op het rooster opgeloste lengteschalen, te dissipatief is.

In figuur B-14 staan voor zowel het rekenmodel als het schaalmodel histogrammen voor de punten L2 en L5. Ook hieruit blijkt weer dat de snelheden in het schaalmodel gemiddeld hoger liggen dan die in het rekenmodel worden berekend. Bovendien verschilt de spreiding tussen beide modellen.

In figuren B-15 en B-16 is het verloop in de tijd van de variatie ten opzichte van de referentiewaterstand weergegeven. Om de waarden van rekenmodel en schaalmodel te kunnen vergelijken toont Tabel 4-1 de gemiddelde waterstanden en de bijbehorende standaardafwijkingen. In deze tabel is in procenten eveneens aangegeven wat de afwijking is tussen rekenmodel en schaalmodel.

Tabel 4-1 Gemiddelde waterstanden en bijbehorende standaardafwijkingen voor rekenmodel en schaalmodel, niet-overstroomd met helling 1:3

	Rekenmodel		Schaalmodel		Afwijking in %	
	gemiddelde [m]	standaardafwijking	gemiddelde [m]	standaardafwijking	gem	std
H1	0.2473	0.0006	0.2478	0.0007	-0.20%	-14%
H2	0.2454	0.0004	0.2459	0.0006	-0.21%	-21%
H3	0.2470	0.0011	0.2469	0.0011	0.04%	0%
H4	0.2461	0.0012	0.2456	0.0010	0.20%	22%
H5	0.2473	0.0009	0.2446	0.0011	1.10%	-21%

Het verhang in de hoofdstroom in het rekenmodel is  $1,42 \cdot 10^{-4}$ . Dit is nagenoeg gelijk aan het gemeten verhang in het schaalmodel. Het verhang in het tweede kribvak is in het

rekenmodel negatief en duidelijk kleiner dan in het schaalmodel,  $-8,6 \cdot 10^{-5}$ . De standaardafwijkingen voor de waterstand wijken enigszins af. Gezien het feit dat bij het bouwen van het rekenmodel enkel de waterstand ter hoogte van de vijfde krib bekend was en daarom een schatting is gemaakt voor de waterstand op de rand, zijn de verschillen beperkt te noemen (tot 25 % in de standaardafwijking).

Het ruimtelijk beeld van de waterstand in figuur B-17 lijkt te kloppen met hetgeen verwacht wordt. De waterstand in de hoofdgeul vertoont weinig afwijkingen ten opzichte van de gegeven waarde van 0,246 m. Daarnaast is in geringe mate opstuwing te zien tegen de krib en is er een kleine daling van de waterstand in het midden van de primaire neer. De waterstand vertoont de grootste variatie in de menglaag en in de omgeving van de kribkop. Het is niet mogelijk de gemiddelde waterstand te vergelijken met de metingen, want daar zijn geen resultaten van.

### Concluderend

De verschillen tussen rekenmodel en schaalmodel zijn voornamelijk te wijten aan de verschillen in fluctuaties. De snelheden in de menglaag en bovenstrooms van de krib worden niet goed uitgerekend en dit heeft vanzelfsprekend invloed op het hele stroombeeld. De patronen van de gemiddelde snelheden komen echter wel goed overeen met het schaalmodel en de locatie van de secundaire neer wordt opvallend goed berekend. Bovendien is de trend van de snelheden, in bijvoorbeeld een dwarsraai, gelijk aan die in het schaalmodel.

Tot nu toe is aangenomen dat de waterbeweging in kribvakken voornamelijk tweedimensionaal is. Voor de grootschalige neren in het kribvak is dit waarschijnlijk ook het geval, maar op de overgang van rivier naar kribvak en rondom de kribkop zullen zeker driedimensionale structuren voorkomen. Daardoor vertoont het rekenmodel afwijkingen ten opzichte van het schaalmodel. Op de meeste plaatsen zijn deze afwijkingen niet groter dan 0,02 m/s (10 tot 20 %) met uitzondering van de eerder genoemde menglaag en bovenstrooms van de kribkruin, waar de verschillen kunnen oplopen tot 0,1 m/s. Dit betekent dat het rekenmodel bruikbaar is om in de niet-overstroomde situatie met een kribkophelling van 1:3 voorspellingen te doen voor de algemene waterbeweging, maar dat terughoudend moet worden omgegaan voor toepassingen waarbij de absolute berekende snelheden in de omgeving van de krib van belang zijn.

De vergelijking van metingen met berekeningen geeft geen aanleiding tot het aanpassen van de schematisatie.

### 4.3 Overstroomde situatie met krib 1:3

#### Beschrijving stroombeeld in schaalmodel

In tegenstelling tot de niet-overstroomde situatie ontstaat bij overstroomde kribben niet het grootschalige nerenpatroon. Door de hoge waterstand wordt de vorming van neren in het stroombeeld aan de oppervlakte onderdrukt. Wel is in figuur C-1 zichtbaar dat de stroming in de omgeving van de krib afbuigt. Bovendien neemt de snelheid boven de kribben iets toe ten opzichte van de snelheid in het kribvak. Figuur C-2 heeft alleen betrekking op het rekenmodel en wordt later besproken.

Figuur C-3 laat zien dat op de bodem de snelheid in u-richting weliswaar klein, maar positief is. Dit ondersteunt het beeld dat de grootschalige neren zich niet vormen. Het is opvallend dat over de hele lengte van het kribvak de snelheid het hoogst is op  $y = 2,5$  m en dat de snelheid aan de bodem hoger is in het gebied dat in het verlengde ligt van de kribkop. Blijkbaar heeft de kribkop nog veel invloed op de stroming.

Zoals in figuur C-4 te zien is, is het patroon van de snelheid in u-richting duidelijk asymmetrisch ten opzichte van de krib. Dit is het gevolg van loslating van stroming aan de benedenstroomse zijde van de krib. De relatief steile helling van de krib (1:3) zorgt ervoor dat in het verticale vlak een neer ontstaat. Het patroon van de snelheid in v-richting in figuur C-5 laat zien dat de stroming wordt beïnvloed door de aanwezigheid van de krib. Juist boven de kribkop bevindt zich het gebied waarin de richting van de v-snelheid verandert. Aan de andere kant toont figuur C-6 dat de totale gemiddelde snelheid hier niet sterk door wordt beïnvloed. Dit patroon komt meer overeen met de gemiddelde snelheid in u-richting.

De fluctuaties in u-richting bevinden zich met name boven de kribkop, terwijl de fluctuaties in v-richting het grootst zijn in de menglaag. Figuren C-7 en C-8 laten zien dat de orde grootte van beide wel gelijk is (let op: verschillende schalingen). Omdat de orde-grootte in beide richtingen gelijk is, is de bijdrage van beide componenten duidelijk terug te vinden in de standaardafwijking van de totale gemiddelde snelheid in figuur C-9.

Figuur C-10 toont de verschillen tussen schaalmodel en rekenmodel voor de totale gemiddelde snelheid en bijbehorende standaardafwijking. Deze figuur wordt meer in detail besproken bij het vergelijken van de berekeningen met de metingen.

Figuren C-11 en C-12 geven aan dat de snelheden in de punten L2 en L5 variëren met een periode van 15 tot 30 seconden. Dergelijke fluctuaties zijn waarschijnlijk het gevolg van de wisselwerking tussen de stroming over de krib en het mechanisme dat in het kribvak horizontaal uitwisselt via de menglaag die nog steeds aanwezig is aan de bodem. In de histogrammen in figuur C-13 komen deze fluctuaties tot uiting in de relatief grote spreiding.

De waterstandsvariaties in de hoofdstroom in figuur C-14 laten een verhang over het model van  $6,8 \cdot 10^{-5}$ . Figuur C-15 laat zien dat het verhang over het tweede kribvak in het

schaalmodel -0,001 is. Dit is een opvallend groot verhang en bovendien is het negatief! De oorspronkelijke waterstand is gedefinieerd als de waterstand behorende bij een diepte van 0,309 m in de hoofdgeul.

### Vergelijking rekenresultaten met metingen

De oorspronkelijke berekening voor de overstroomde situatie blijkt slecht overeen te komen met de metingen. Dit is deels te wijten aan de randvoorwaarden. Voor berekening 2 is in de hoofdstroom een lagere snelheid gedefinieerd dan voor de stroming boven de kribkop. Dit is niet in overeenstemming met hetgeen geconstateerd is in het schaalmodel. De nadruk bij de vergelijking ligt op de toepasbaarheid van het numerieke model. Daarom is een nieuwe berekening gemaakt met beter passende randvoorwaarden alvorens de metingen en berekeningen in detail te vergelijken. De nieuwe randvoorwaarden staan hieronder vermeld:

bovenrand hoofdstroom	$u = 0,31 \text{ m/s}$
bovenrand talud	van $u = 0,31 \text{ m/s}$ naar $u = 0,125 \text{ m/s}$ bij de kribkruin
bovenrand kribkruin	$u = 0,125 \text{ m/s}$

Het blijkt dat het wijzigen van de randvoorwaarden niet het gewenste berekende stroombeeld tot gevolg heeft. Figuur C-1 toont dat met name de snelheden op de kop van de krib in het rekenmodel veel groter zijn dan in het schaalmodel. Daarnaast wijken ook de richtingen op de kop af. In tegenstelling tot de niet-overstroomde situatie laat figuur C-2 zien dat het stroombeeld in het rekenmodel nog wel kleine variaties vertoont in de elkaar opvolgende kribvakken, maar deze variaties zijn zo klein dat de resultaten wel gebruikt kunnen worden voor de vergelijking. In figuur C-3 is te zien dat de verhoging van de snelheid in de hoofdstroom in het verlengde van de kribkop in het rekenmodel niet optreedt.

In het ruimtelijke beeld van de gemiddelde snelheid in figuur C-4 is het belangrijkste verschil dat de berekening een symmetrisch patroon rondom de kribkruin laat zien, waar het schaalmodel duidelijk asymmetrisch is. Blijkbaar spelen driedimensionale structuren hier een grote rol. Hetgeen ook te verwachten was. Diezelfde symmetrie komt terug in de gemiddelde v-snelheid in figuur C-5 en de totale gemiddelde snelheid in C-6. Dit wijkt sterk af van het stroombeeld in het schaalmodel.

Figuren C-7, C-8 en C-9 laten zien dat ook de fluctuaties geen goede overeenkomst vertonen met het schaalmodel. In figuur C-10 wordt het beeld dat naar voren komt uit de vorige figuren nogmaals bevestigd. De verschillen zijn groot.

In figuren C-11 en C-12 komen de gemiddelde snelheden redelijk overeen, maar de grote fluctuaties die in het schaalmodel aanwezig zijn, komen niet terug in de berekeningen. Bovendien laten de histogrammen in figuur C-13 zien dat de verdeling van de snelheid in u-richting sterk verschilt tussen rekenmodel en schaalmodel. Deze figuren ondersteunen dus de eerder opgemerkte verschillen tussen schaalmodel en rekenmodel.

De gemiddelde waterstanden in figuur C-14 komen goed met elkaar overeen, maar de fluctuaties zijn in het schaalmodel groter. Dit is in lijn met de snelheden waarbij de fluctuaties in het schaalmodel ook groter zijn. Het verhang over het model in de

hoofdstroom is  $4,1 \cdot 10^{-5}$  ten opzichte van  $6,8 \cdot 10^{-5}$  in het schaalmodel. De waterstanden in het kribvak, zichtbaar in figuur C-15, worden minder goed gereproduceerd. Het grote negatieve verhang over het tweede kribvak in het schaalmodel is overigens wel opvallend. Het is niet duidelijk waar dit door wordt veroorzaakt.

In Tabel 4-2 staan de gemiddelde waterstanden en bijbehorende standaardafwijkingen voor zowel rekenmodel als schaalmodel. Bovendien is in percentages aangegeven wat het verschil is.

Tabel 4-2 Gemiddelde waterstanden en bijbehorende standaardafwijkingen voor rekenmodel en schaalmodel, overstroomd met helling 1:3

	rekenmodel		schaalmodel		Afwijking in %	
	gemiddelde	standaardafwijking	gemiddelde	standaardafwijking	gem	std
H1	0.3091	0.0002	0.3094	0.0005	-0.10%	-61%
H2	0.3086	0.0002	0.3085	0.0005	0.01%	-61%
H3	0.3091	0.0003	0.3063	0.0009	0.90%	-61%
H4	0.3092	0.0004	0.3075	0.0008	0.54%	-51%
H5	0.3091	0.0004	0.3099	0.0007	-0.26%	-44%

## Concluderend

Het is met een tweedimensionaal rekenmodel met een constante ruwheid niet goed mogelijk om het stroombeeld voor overstroomde kribben te berekenen. De bijdrage van driedimensionale structuren is zo groot en complex dat deze niet kunnen worden benaderd door een model met een logaritmisch snelheidsprofiel en aanname van hydrostatische drukverdeling. Daarnaast blijkt dat de definitie van randvoorwaarden zeer nauw komt. Zeker als het snelheidsranden betreft.

Op basis van de resultaten van de vergelijking is een aantal nieuwe berekeningen gemaakt voor de overstroomde situatie.

- verhogen van de ruwheid van de kribben tot respectievelijk 0,002 m, 0,004 m en 0,01 m (in plaats van 0,0006 m);
- het aantal lagen uitbreiden van 1 tot 10.

De berekeningen met meerdere lagen komen aan de orde in § 4.5. Figuur C-16 laat zien dat het verhogen van de ruwheid van de krib weinig tot geen invloed heeft op het stroombeeld. Voor het verhogen van de ruwheid is er vanuit gegaan dat deze enigszins realistisch moet blijven. Het is mogelijk de ruwheid een dusdanige waarde te geven dat het stroombeeld sterk beïnvloed wordt, maar dan wordt de k-waarde orde meters.

## 4.4 Niet-overstroomde situatie met krib 1:6

### Beschrijving stroombeeld in schaalmodel

Het stroombeeld in de situatie met de kribkophelling van 1:6 is duidelijk een combinatie van twee voorgaande gevallen. Omdat de kribben niet overstroomd zijn, ontstaat wel het grootschalige nerenpatroon in het kribvak, maar tegelijkertijd is ook het asymmetrische patroon op de helling van de kribkop zichtbaar. Door de flauwe helling is een groot deel van de krib wel overstroomd. In figuur D-1 is zichtbaar dat de stroming sterk afbuigt op het punt waar de kribkophelling begint. Doordat in dit geval wel metingen beschikbaar zijn voor het gehele kribvak is duidelijk vast te stellen waar de centra van de twee neren zich bevinden. Het centrum van de primaire neer ligt op ongeveer 1 m uit de oever en 2 m benedenstrooms van de derde krib. De secundaire neer ligt 0,75 m uit de oever en 0,5 m benedenstrooms van de krib. Dit betekent dat de secundaire neer 0,25 m in bovenstroomse richting verschoven is ten opzichte van de secundaire neer bij de krib met helling 1:3. Hij is ook iets platter van vorm.

Figuur D-2 heeft alleen betrekking op het rekenmodel en wordt later besproken.

In figuur D-3 is ook weer de relatief hoge snelheid in de menglaag zichtbaar. Bovendien is duidelijk te zien dat de menglaag breder is dan bij de krib met helling 1:3.

De flauwere helling van de kribkop heeft tot gevolg dat de snelheden in u-richting een asymmetrisch patroon vertonen, zoals te zien in figuur D-4 en dat de snelheden in v-richting kleiner zijn dan voorheen, hetgeen zichtbaar is in figuur D-5. In figuur D-6 is weer het asymmetrische patroon zichtbaar en zijn de centra van de neren terug te vinden. Figuren D-7 en D-8 laten zien dat de fluctuaties in u-richting groter zijn en dan met name in de omgeving van de kribkop. Figuur D-9 laat zien dat de grootste fluctuaties zich in de menglaag bevinden.

Figuur D-10 toont de verschillen tussen schaalmodel en rekenmodel voor de totale gemiddelde snelheid en bijbehorende standaardafwijking. Deze figuur wordt meer in detail besproken bij het vergelijken van de berekeningen met de metingen.

Het verloop van de snelheid in de punten L2 en L5 vertoont met name in de u-richting grote schommelingen. Zie hiervoor figuren D-11 en D-12. In figuur D-13 is in lijn met voorgaande opmerking een grote spreiding zichtbaar in de histogrammen voor het schaalmodel.

Figuur D-14 geeft het verloop van de waterstand in de tijd in twee punten in de hoofdstroom. Door de gemiddelde waarde van deze twee tijdsregistraties te bepalen is het mogelijk het verhang te bepalen,  $1,0 \cdot 10^{-4}$ . Figuur D-15 geeft het verloop van de waterstand in het tweede kribvak op de overgang van rivier naar kribvak. In het schaalmodel is het verhang over het tweede kribvak  $1,1 \cdot 10^{-3}$ . Wederom is dit verhang opvallend groot. Beide figuren laten de variaties ten opzichte van de oorspronkelijke waterspiegel zien. De

oorspronkelijke waterstand is gedefinieerd als de waterstand behorende bij een diepte van 0,246 m in de hoofdgeul.

### **Vergelijking rekenresultaten met metingen**

Op basis van de eerste vergelijking met de metingen is besloten de berekening met gewijzigde kribkophelling te maken met de oorspronkelijke instellingen. Dit betekent dat geen rekening wordt gehouden met het feit dat het berekenen van overstroomde kribben niet de goede resultaten oplevert. Uiteindelijk komt dit ook tot uitdrukking in de resultaten. Met name op de kribkophelling wijken metingen en berekeningen af. Figuur D-1 laat zien dat de stroming aan de bovenstroomse zijde van de krib grotendeels de goede richting en grootte heeft. De secundaire neer is in het rekenmodel echter groter dan in het schaalmodel, zodat de locatie van de centra van beide neren niet geheel correct wordt berekend. Ten opzichte van de oever is de afstand wel goed, maar ten opzichte van de kribkruin ligt de secundaire neer in het rekenmodel 0,25 m verder benedenstrooms. De centra van de primaire neer zijn 0,75 m verschoven ten opzichte van elkaar.

Figuur D-2 toont de totale gemiddelde snelheid en de bijbehorende standaardafwijking voor het gehele model. Dit om te laten zien dat het stroombeeld volledig ontwikkeld is en dat het patroon in de middelste kribvakken onderling sterke overeenkomsten vertoont. Voor de totale gemiddelde snelheid is dat inderdaad het geval. De standaardafwijking vertoont echter nog kleine verschillen tussen de onderlinge kribvakken. Dit is te wijten aan waterstandsverschillen over de lengte van het model.

De snelheden in de dwarsraaien in figuur D-3 vertonen in rekenmodel en schaalmodel grotendeels dezelfde trend, maar wijken wederom af in de menglaag. Daar is de snelheid in het schaalmodel duidelijk hoger. In het kribvak is de overeenkomst wel goed.

Figuren D-4 en D-5 laten zien dat het ruimtelijke beeld van de grootte van de snelheid in het kribvak overeenkomt, maar dat de verschillen met name optreden op de helling van de kribkop. De stroming laat los op de helling waardoor de snelheden net benedenstrooms van de krib hoger zijn. Eerder was al geconstateerd dat het rekenmodel dit niet berekent. Figuur D-6 geeft aan dat deze verschillen wel grote invloed hebben op de locaties van de neren in het kribvak, zoals ook al was geconstateerd uit de vectoren in figuur D-1.

De standaardafwijking vertoont in beide richtingen aanzienlijke verschillen, met name in grootte, zoals te zien is in figuur D-7 en D-8. De combinatie van beide standaardafwijkingen in figuur D-9 bevestigt dit.

De verschillen tussen beide modellen zijn zichtbaar in figuur D-10. Het valt op dat op locaties waar de gemiddelde snelheid redelijk tot goed overeenkomt de standaardafwijking juist verschillen vertoont. Met name de dynamische componenten in de menglaag vertonen grote afwijkingen. Dit is in overeenstemming met de conclusies uit § 4.3 waarin gesteld is dat het berekenen van overstroomde situaties niet goed gaat met een tweedimensionaal model.



Figuren D-11 en D-12 tonen dat de snelheden in de menglaag gemiddeld goed worden berekend, maar dat de fluctuaties niet overeenkomen. Dit komt tot uiting in het verschil in spreiding in de histogrammen in figuur D-13.

In figuren D-14 en D-15 is het verloop in de tijd van de variatie ten opzichte van de referentiewaterstand weergegeven. Om de waarden van rekenmodel en schaalmodel te kunnen vergelijken toont Tabel 4-3 de gemiddelde waterstanden en de bijbehorende standaardafwijkingen. In deze tabel is in procenten eveneens aangegeven wat de afwijking is tussen rekenmodel en schaalmodel. Het blijkt dat de waterstanden in het schaalmodel structureel hoger liggen dan in het rekenmodel. Dit is op te lossen met het verhogen van de randvoorwaarden, maar dat is in het kader van deze studie niet meer gedaan, omdat het de conclusies niet wezenlijk zou veranderen.

Tabel 4-3 Gemiddelde waterstanden en bijbehorende standaardafwijkingen voor rekenmodel en schaalmodel, niet-overstroomd met helling 1:6

	rekenmodel		schaalmodel		Afwijking in %	
	gemiddelde	standaardafwijking	gemiddelde	standaardafwijking	gem	std
H1	0.3095	0.0002	0.3106	0.0005	-0.34%	-65%
H2	0.3082	0.0002	0.3091	0.0004	-0.32%	-56%
H3	0.3093	0.0002	0.3154	0.0006	-1.93%	-62%
H4	0.3093	0.0002	0.3108	0.0006	-0.49%	-67%
H5	0.3095	0.0002	0.3116	0.0006	-0.67%	-66%

Het verhang in de hoofdstroom in het rekenmodel is  $1,0 \cdot 10^{-4}$ . Dit is gelijk aan het gemeten verhang in het schaalmodel. Het verhang in het tweede kribvak is negatief en kleiner dan in het schaalmodel,  $-5,9 \cdot 10^{-5}$ . Hoe het grote verhang,  $1,0 \cdot 10^{-3}$  in het schaalmodel te verklaren is, is onduidelijk. De standaardafwijkingen voor de waterstand wijken af.

## Concluderend

Het blijkt dat het stroombeeld voor de krib met kribkophelling 1:6 in grote lijnen goed wordt berekend; het globale stroombeeld met twee neren treedt op. De exacte locatie van de centra van deze neren wordt echter niet goed berekend. Bij de kribkophelling 1:6 ligt een groot deel van de krib onder water, zodat dat kan worden beschouwd als een overstroomde krib. In de vorige paragraaf bleek al dat het rekenmodel niet goed in staat is de stroming rondom een dergelijke krib te berekenen. Ook hier blijkt dat invloed te hebben op het berekenen van het stroombeeld.

Omdat de aanpassingen in het tweedimensionale model voor de overstroomde situatie geen verbetering opleverden, is de berekening voor de kribkophelling 1:6 verder niet aangepast.

## 4.5 Bespreking 3D berekeningen

Op basis van de ervaringen die zijn opgedaan in deze studie is besloten voor alle situaties een berekening te maken met meerdere lagen in combinatie met een verhoogde ruwheid van de krib ( $k = 0,01$  m). Met name voor de overstroomde situatie moet dit een verbetering opleveren voor het totale stroombeeld. Het is echter belangrijk in de gaten te houden dat Delft3D bij meerdere lagen nog steeds uitgaat van hydrostatische drukverdeling. Dat wil zeggen dat er wel verticale snelheden worden uitgerekend, maar geen verticale versnellingen. Voor de verticaal wordt een  $k$ - $\epsilon$  turbulentiemodel toegepast en alvorens het toepassen van HLES voor het horizontale vlak wordt eerst een dieptegemiddelde snelheid bepaald op basis van de snelheden in de afzonderlijke lagen.

Een bijkomend voordeel van de berekeningen met meerdere lagen is dat voor de niet-overstroomde situaties de snelheden aan de oppervlakte met de PTV-metingen vergeleken kunnen worden.

Voor beide niet-overstroomde situaties zijn berekeningen gemaakt met 10 lagen en een ruwere krib. In de niet-overstroomde situatie met een kribkophelling 1:3 leverde het gebruik van meerdere lagen echter weinig verschil op in vergelijking met de tweedimensionale berekening. Derhalve wordt deze berekening hier niet in detail besproken.

Voor de overstroomde situatie is een berekening gemaakt met 20 lagen.

### overstroomde krib met helling 1:3

De verschillen tussen berekeningen met dieptegemiddelde snelheden en meerdere lagen komen met name tot uitdrukking in de overstroomde situatie. In de oorspronkelijke berekening was het patroon boven de krib min of meer symmetrisch, terwijl in het schaalmodel een duidelijk asymmetrie zichtbaar was door loslaten op de kribkruin. Door het gebruik van 20 lagen is het beter mogelijk dit stroombeeld te reproduceren. Figuren E-1 en E-2 laten een duidelijke verbetering zien ten opzichte van figuren C-6 en C-9. Hoewel de absolute groottes van de gemiddelde snelheden nog afwijken, komen de patronen beter overeen met het schaalmodel. Voor wat betreft de fluctuaties is eveneens een duidelijke verbetering van de patronen zichtbaar, maar de fluctuaties zijn nu groter dan in het schaalmodel. Vergelijking van figuur E-3 met figuur C-10 toont dat de verschillen kleiner zijn geworden.

De berekening met meerdere lagen laat eveneens zien dat het gebruik van meerdere lagen noodzakelijk is om de complexe stroming te beschrijven. Zoals verwacht lopen de richtingen aan de oppervlakte en aan de bodem sterk uiteen. In figuur E-4 is voor het tijdsgemiddelde snelheidsbeeld dit verschil duidelijk zichtbaar. Terwijl aan de oppervlakte de stroming min of meer rechtdoor gaat, buigt benedenstrooms van de krib aan de bodem de stroming het kribvak uit. In het momentane snelheidsbeeld zijn deze verschillen zelfs nog groter. Los van het feit of deze richtingen overeenkomen met het schaalmodel geeft dat aan dat een tweedimensionale berekening niet toereikend is om het stroombeeld goed te berekenen.

Het blijkt dat de berekeningen gevoelig zijn voor het aantal toe te passen lagen. Het gebruik van 20 lagen (evenredig over de diepte verdeeld) levert een significant beter resultaat op dan 10 lagen. Dit is het gevolg van het toepassen van een  $k-\epsilon$  model voor de verticale turbulentie. Dit turbulentiemodel heeft een hoge resolutie nodig aan de bodem en met 10 lagen wordt waarschijnlijk niet voldoende aan die eis voldaan.

### **niet-overstroomde krib met helling 1:6**

Ook voor de niet-overstroomde situatie met een kribkophelling van 1:6 zijn de verschillen minimaal als wordt overgegaan naar een berekening met 10 lagen. De vergelijking van figuren E-5 en E-6 met respectievelijk D-6 en D-9 laat dat zien. In de berekening met meerdere lagen is een lichte asymmetrie zichtbaar boven het talud van de krib, maar nog niet voldoende om te kunnen constateren dat het goed mogelijk is de stroming te beschrijven. Figuur E-7 laat zien dat de verbetering met name optreedt in de menglaag, maar dat benedenstrooms van de krib en rondom de kribkop de verschillen zelfs groter worden.

Het is zinvol om deze berekening nogmaals met een groter aantal lagen uit te voeren. Door het flauwe talud van de krib zal hier in werkelijkheid ook loslating optreden, wat van invloed is op het stroombeeld.

## 5 Stromingsbelasting op een krib

### 5.1 Definitie van stromingsbelasting

In de berekeningen die tot nu toe zijn uitgevoerd is duidelijk naar voren gekomen dat de stroming rondom de kribkop een sterk dynamisch karakter heeft. Wervels laten los op de kop van de krib en vormen een menglaag tussen rivier en kribvak. Als gevolg van deze dynamische stroming zullen belastingen op de kribkop ontstaan, die variëren als functie van plaats en tijd. In het project 'Steenstabiliteit' is reeds genoemd dat in een dergelijke stroming de belasting gekarakteriseerd kan worden door een gemiddelde component van de snelheid in combinatie met een fluctuerende component van de snelheid.

De fluctuerende component wordt veelal bepaald door de mate van turbulentie die ter plaatse optreedt. Oftewel de afmetingen van de wervels en de frequentie waarmee ze loslaten van de kribkop. De gemiddelde component is meer een maat voor de snelheid waarmee de wervels zich verplaatsen in de ruimte. De momentane snelheid in een punt op één bepaald moment bestaat uit de gemiddelde component plus de fluctuerende component:

$$u(t) = \bar{u} + u'(t)$$

(1) (2)

- 1) verplaatsing in de ruimte
- 2) turbulente component

De standaardafwijking is een maat voor de fluctuerende component en voor nu is het uitgangspunt dat de belasting het grootst is op de locatie waar de standaardafwijking het grootst is.

### 5.2 Vergelijking kribvormen

In deze studie zijn twee kribvormen aan de orde gekomen. Een kribkop met een helling 1:3 en een met een helling 1:6. In beide gevallen is het aanstroomoppervlak in de richting loodrecht op de stromingsrichting gelijk. Doordat het debiet in de hoofdgeul bij laagwater gelijk blijft, zal de krib zijn functie van het op diepte houden van de vaargeul behouden. Bij de 1:6 krib ligt een groter deel in de onderste waterlagen waar de snelheid lager is, waardoor de resulterende kracht kleiner is. Verwacht wordt dat de krib hierdoor minder weerstand levert tijdens hoogwater. Bovendien is uit eerdere studies gebleken dat een flauw talud de turbulentie in de menglaag reduceert. Voor de vergelijking van beide kribvormen wordt uitgegaan van de berekeningen. Let hierbij op de verschillen schalingen voor de standaardafwijkingen.

Een van de eerste dingen die opvalt bij vergelijking van de kribkop 1:3 en 1:6 is het verschil in breedte van de menglaag. Dit is zowel in figuren B-3 en D-3 als in figuren B-4 en D-4 zichtbaar. Figuren B-5 en D-5 laten zien dat er grote verschillen optreden in de snelheid in

v-richting aan de bovenstroomse zijde van de krib. Blijkbaar beïnvloedt de kribvorm de uitwisseling aan de bovenstroomse zijde van de krib zeer sterk.

Dit komt ook tot uiting in de standaardafwijking van de snelheid in v-richting. In de niet-overstroomde situatie bij een kribkophelling van 1:3 zijn de fluctuaties van de v-component in absolute zin het grootst aan de bovenstroomse zijde van de kribkop. Daar zijn de fluctuaties van dezelfde orde grootte als de gemiddelde snelheid. Bij de krib met helling 1:6 zijn deze fluctuaties aanzienlijk kleiner. Vergelijk figuur B-8 en D-8. Bovendien is het gebied waar de fluctuaties relatief groot zijn bij de 1:6-krib een stuk kleiner. Dat leidt tot een kleinere belasting op de kribkop. In beide gevallen ligt het maximum van de fluctuaties wel op dezelfde locatie ten opzichte van de kribkop.

De standaardafwijking van de u-component van de snelheid, representatief voor de turbulentie in de menglaag, is in beide gevallen van dezelfde orde-grootte. Door het flauwere talud bij de kribkophelling 1:6 is de gradiënt over de menglaag een stuk kleiner, maar blijkbaar heeft dit weinig invloed op de standaardafwijking.

In Tabel 4-1 en Tabel 4-3 is aangegeven wat de waterstanden zijn in beide situaties. Het verhang in het geval van een kribkophelling 1:3 is  $1,4 \cdot 10^{-4}$  en bij de 1:6 krib is dat  $1,0 \cdot 10^{-4}$ . Het neemt dus af door het toepassen van een flauwer talud. Daarnaast zijn de fluctuaties in de waterstand bij de 1:3-krib duidelijk groter dan bij de 1:6-krib.

Concluderend kan worden gesteld dat de krib met een flauwere helling een rustiger stroombeeld tot gevolg heeft. De standaardafwijkingen aan de bovenstroomse zijde van de krib zijn kleiner, waardoor de belasting op de krib in een niet-overstroomde situatie kleiner is.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

Uit de analyse uitgevoerd door Haskoning en WL kan geconcludeerd worden dat voor de situatie met niet-overstroomde kribben beide pakketten (Finel en Delft3D met HLES) vergelijkbare resultaten opleveren. Er zijn enige verschillen ten aanzien van de exacte positie en vorm van de primaire en secundaire neren waar te nemen indien men de uitkomsten van de modellen onderling en de modeluitkomsten met de meetdata vergelijkt.

Over het algemeen is de reproductie van het stroombeeld voor de krib met een kribkophelling van 1:3 goed te noemen en een tweedimensionale benadering van het probleem is geoorloofd. Voor toepassingen waarbij de belasting op de kribkop in detail aan de orde komt, moet enige voorzichtigheid worden betracht met de absolute snelheden.

Het stroombeeld voor de situatie met de kribkophelling 1:6 wijkt in sterkere mate af van hetgeen zichtbaar is in het schaalmodel. De exacte locatie van de centra van de neren verschilt en de fluctuaties in de menglaag zijn in het rekenmodel duidelijk kleiner. Deze verschillen worden veroorzaakt doordat bij deze kribvorm een relatief groot deel onder water ligt, zodat daarachter loslating kan optreden. Een vergelijking van beide kribvormen voor zowel rekenmodel als schaalmodel laat zien dat beide modellen dezelfde tendens te zien geven.

In de situatie met overstroomde kribben is de stroming rond de kribben complexer. De stroming over de krib gaat gepaard met een aanpassing van het verticale snelheidsprofiel waardoor een asymmetrie ontstaat in het snelheidsbeeld nabij het wateroppervlak. Deze asymmetrie is alleen te reproduceren met een driedimensionaal stromingsmodel (zowel hydrostatisch als niet-hydrostatisch). De stroming aan de benedenstroomse kant van de overstroomde krib laat echter los; hierbij ontstaat een complex stroombeeld dat niet volledig gereproduceerd wordt door de numerieke modellen. Hierbij spelen de volgende elementen een rol:

- Het aantal lagen in de verticaal dat gebruikt wordt voor de schematisatie dient groot gekozen te worden (minstens 10-20). Dit resulteert in een aanzienlijke toename van de rekeninspanning, maar is alleen niet voldoende voor het correct reproduceren van de lokale stroming;
- Algebraïsche en standaard  $k-\epsilon$  turbulentiemodelleringen zijn niet voldoende om de lokale turbulentie voldoende goed te modelleren;
- Numerieke testen uitgevoerd door Haskoning laten zien dat, zoals verwacht mocht worden, niet-hydrostatische effecten lokaal boven en direct benedenstrooms van de overstroomde krib een rol spelen;
- De metingen hebben hoofdzakelijk alleen gegevens bij het wateroppervlak opgeleverd. Van de 3D stroming aan de benedenstroomse zijde van de krib is onvoldoende bekend;
- Aanpassen van de ruwheidswaarde voor de krib (binnen reële marges) is niet toereikend om de invloed van de krib te reproduceren.
- Het definiëren van de randvoorwaarden door middel van een snelheidsrand heeft grote invloed op het stroombeeld. Het model blijkt gevoelig te zijn voor de verdeling van het debiet op de bovenrand.

Uit het project is gebleken dat een verandering van de calibratieparameters, zoals bijvoorbeeld ruwheid en afsnijgolfgetal, geen noemenswaardige invloed heeft gehad op de voorspellende waarde van het rekenmodel. Indien verschillen optraden, waren deze het gevolg van fysische processen die nog niet geheel correct worden beschreven. Zoals in de overstroomde situatie. Ook de invloed van de randvoorwaarden kan hierbij een rol gespeeld hebben.

Het is aan te bevelen onderzoek te doen naar de wisselwerking tussen stroming over de krib en stroming langs de krib en welke invloed dat heeft op het totale stroombeeld. Zo is bijvoorbeeld de relatief hoge snelheid in de menglaag opvallend en is het nog onbekend welk fysisch mechanisme hieraan ten grondslag ligt.

In dit onderzoek is duidelijk gebleken dat het van belang is de gerealiseerde randvoorwaarden in het schaalmodel nauwkeurig vast te leggen door middel van metingen. Het stroombeeld in het rekenmodel blijkt gevoelig te zijn voor de randvoorwaarden. Daarnaast is het aan te bevelen het schaalmodel nog beschikbaar te hebben nadat de rekenresultaten bekend zijn, zodat eventueel onduidelijke punten alsnog opgehelderd kunnen worden.

Voor wat betreft de numerieke aspecten van de studie moet onderscheid gemaakt worden tussen oplossingen voor het niet correct weergeven van de fluctuaties en oplossingen voor het driedimensionale karakter van de stroming. Als oplossing voor het eerste probleem kan gedacht worden aan het minder dissipatief maken van de code door een variantie-behoudend advection-schema in te bouwen. Daarnaast zou het optellen van kinematische turbulentie bijdragen bij de gemiddelde snelheid op de instroomrand een oplossing kunnen zijn. Recentelijk zijn bij andere toepassingen goede resultaten behaald met deze in ontwikkeling zijnde aanpak.

De oplossing voor het tweede probleem ligt wat ingewikkelder. In de afgelopen jaren is in de zijlijn onderzoek verricht naar het gebruik van niet-hydrostatische codes. Ten tijde van het schrijven van dit rapport is het nog onduidelijk op welke termijn een bruikbare versie van een dergelijke code beschikbaar komt, maar in de context van een andere studie is de ontwikkeling wel in volle gang. Hierbij zou het onderzoek naar stroming rondom kribben kunnen aansluiten.

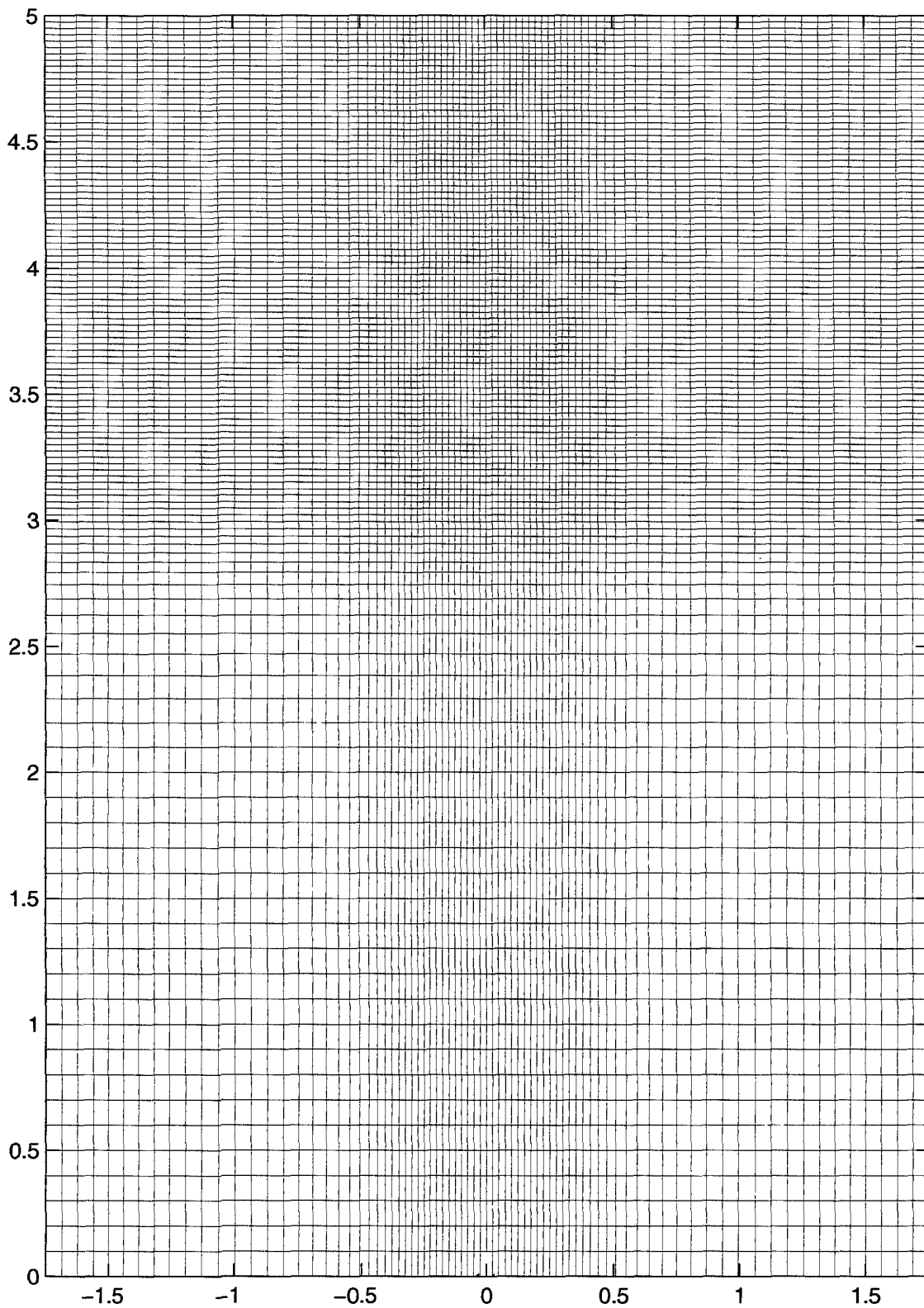
## Referenties

- Schijndel, S.A.H. van 1999 *3D rekenen rondom constructies. Berekeningen met het integrale modellensysteem Delft3D*. WL | Delft Hydraulics en DWW, Q2487, Delft, december 1999.
- Schijndel, S.A.H. van, Jagers, H.R.A. 2000 *3D rekenen rondom constructies. Rapportage 2000*. WL | Delft Hydraulics en DWW, Q2487, Delft, december 2000.
- Schijndel, S.A.H. van & Kranenburg, C. 1998 *Reducing the siltation of a river harbour*. Journal of Hydraulic Research, Volume 36, p. 803-814, maart 1998.
- Uittenbogaard, R.E. 1992 *Large Eddy Simulation and long term computation of shallow, free surface flows with 3D models*. WL | Delft Hydraulics, rapport Z162, Delft, 1992.
- WL | Delft Hydraulics (1997). Delft3D-FLOW User Manual, release 3.00. Delft, september 1997

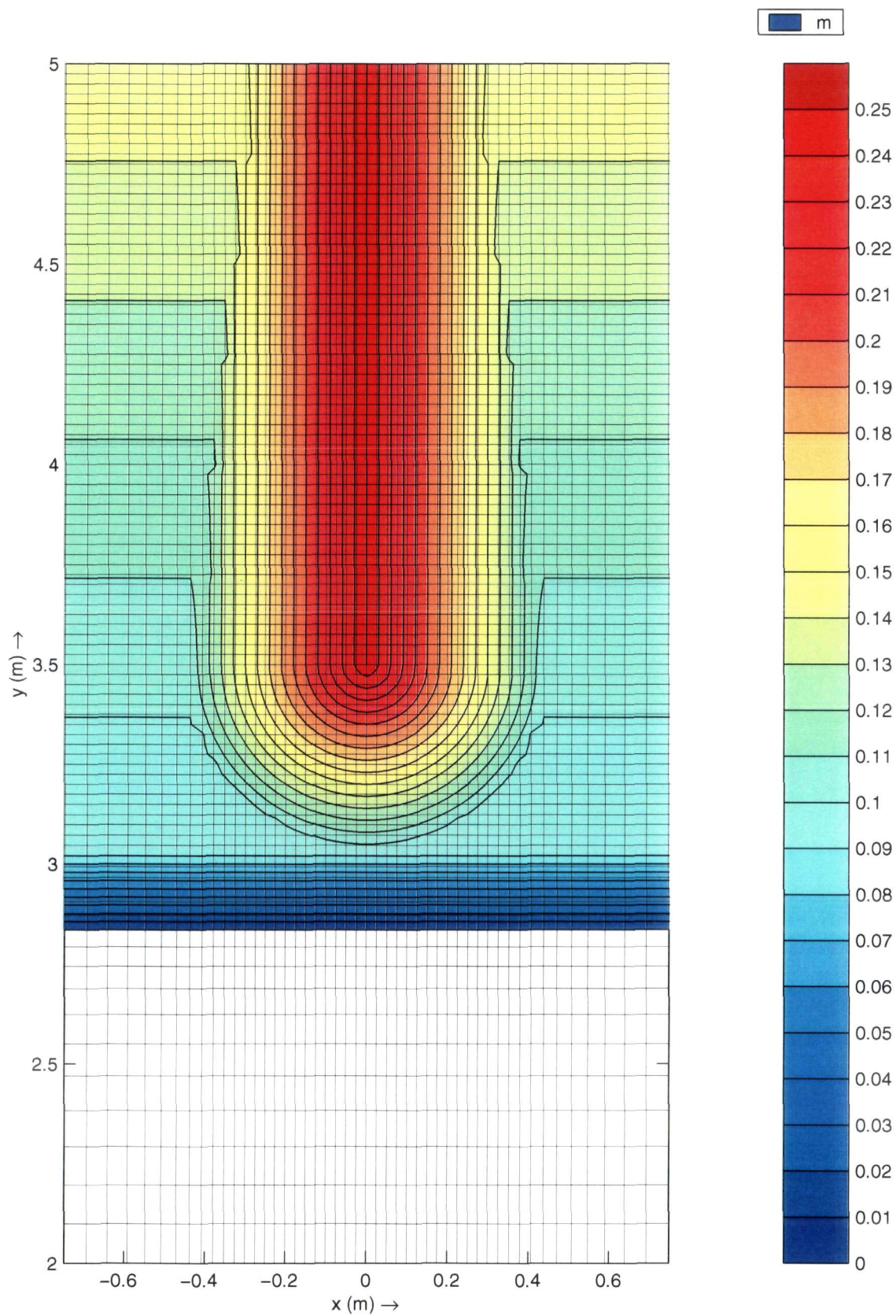


## **A    Figuren hoofdstuk 3**

- A-1    Detail van het rooster in omgeving derde krib
- A-2    Bodemligging en rooster rondom derde krib voor kribkop met helling 1:3
- A-3    Bodemligging en rooster rondom derde krib voor kribkop met helling 1:6

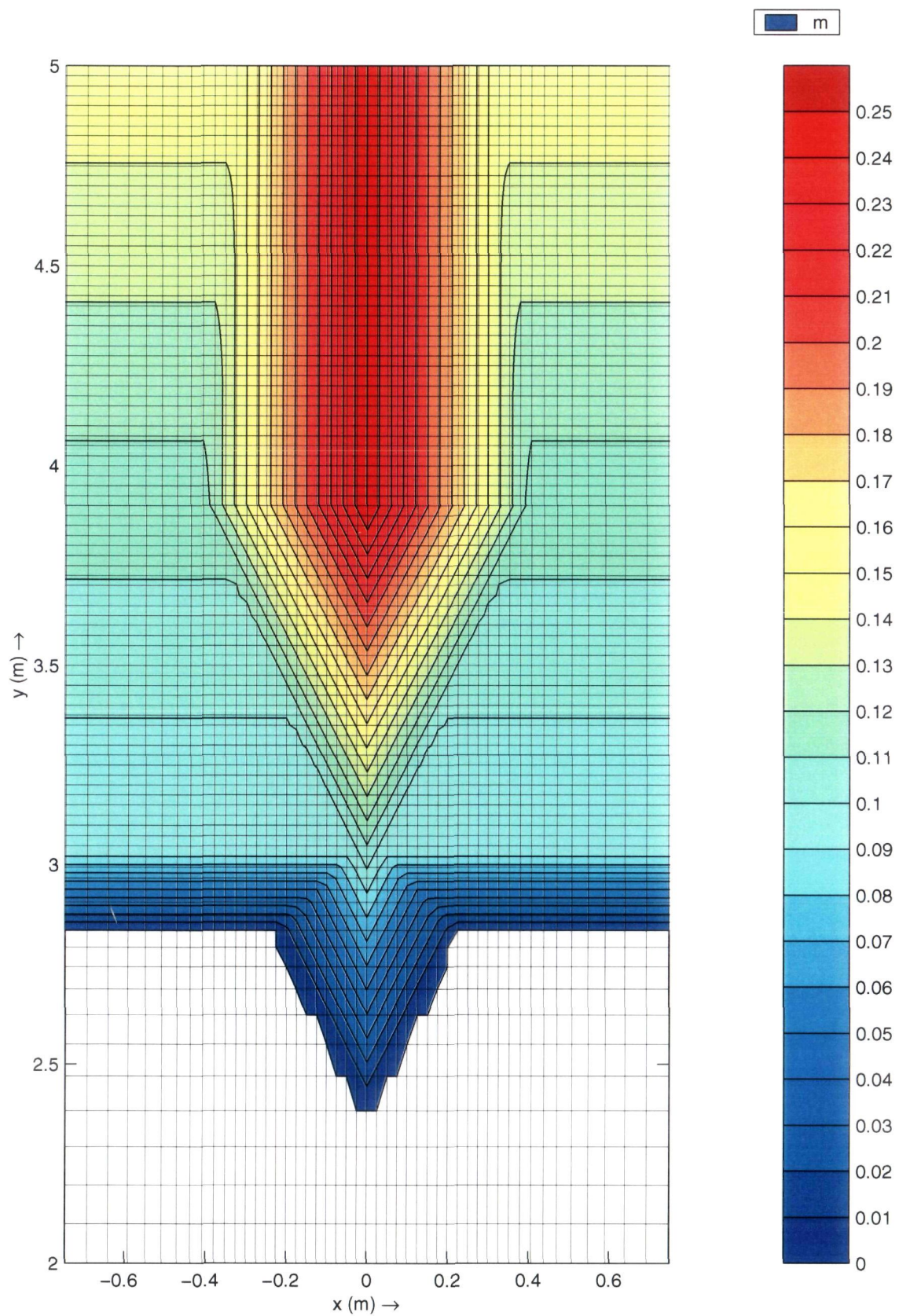


Detail van het rooster in omgeving derde krib



Bodemligging en rooster rondom derde krib  
voor kribkop met helling 1:3



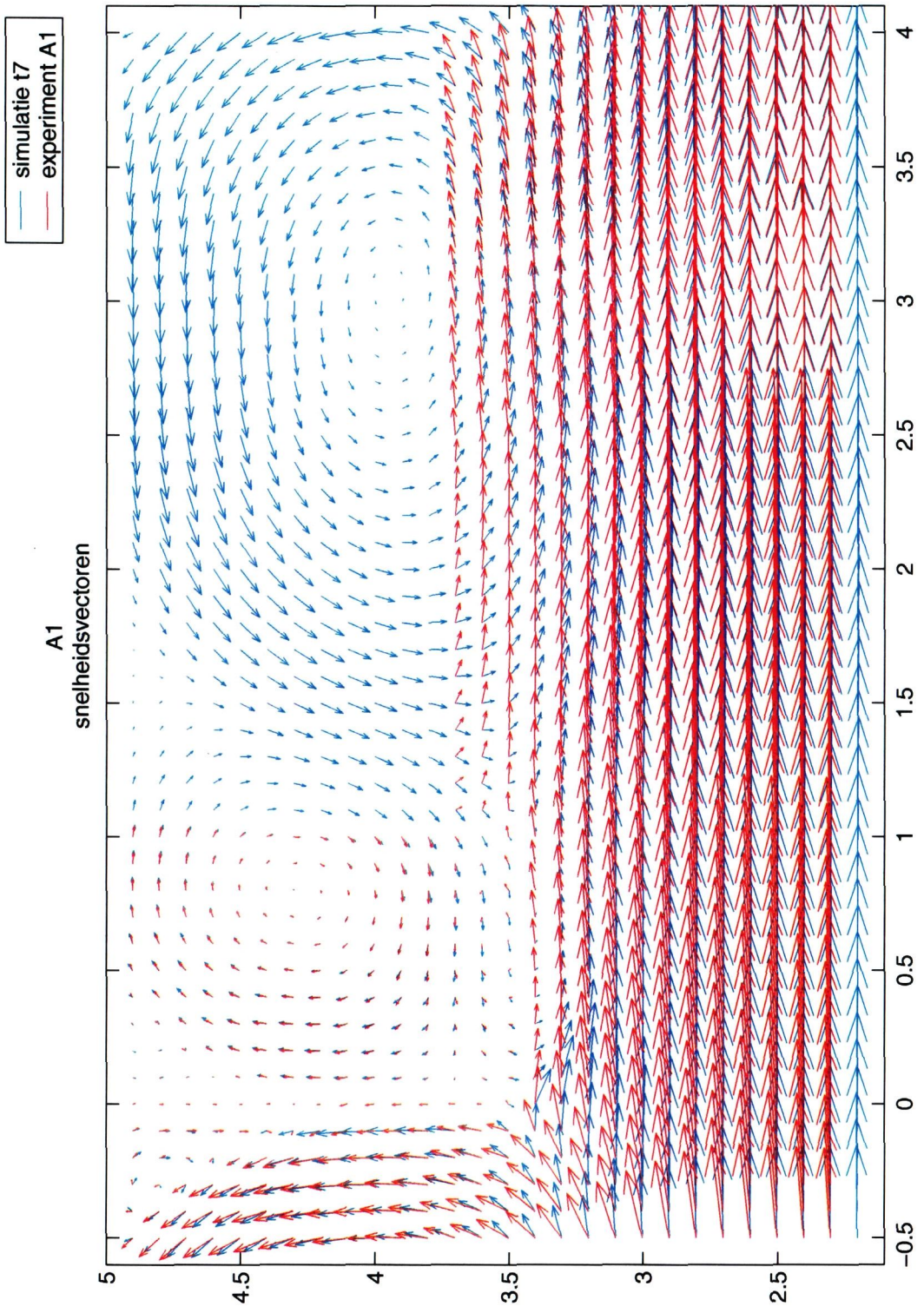


Bodemligging en rooster rondom derde krib  
voor kribkop met helling 1:6

## **B Figuren niet-overstroomde situatie krib 1:3**

- B-1 Tijdsgemiddeld stroombeeld voor metingen en berekeningen
- B-2 Totale gemiddelde snelheid en bijbehorende standaardafwijking voor het gehele model
- B-3 Tijdsgemiddelde snelheden in u-richting in dwarsraaien
- B-4 Gemiddelde snelheid in u-richting in het derde kribvak; rekenmodel en schaalmodel
- B-5 Gemiddelde snelheid in v-richting in het derde kribvak; rekenmodel en schaalmodel
- B-6 Totale gemiddelde snelheid in het derde kribvak, rekenmodel en schaalmodel
- B-7 Standaardafwijking van de snelheid in u-richting in het derde kribvak: rekenmodel en schaalmodel
- B-8 Standaardafwijking van de snelheid in v-richting in het derde kribvak: rekenmodel en schaalmodel
- B-9 Standaardafwijking van de totale gemiddelde snelheid in het derde kribvak: rekenmodel en schaalmodel
- B-10 Verschil tussen schaalmodel en rekenmodel voor totale gemiddelde snelheid en bijbehorende standaardafwijking
- B-11 Tijdsregistratie van de snelheid in punt L2
- B-12 Tijdsregistratie van de snelheid in punt L5
- B-13 Energiedichtheidspectra voor punten L2 en L5
- B-14 Histogrammen voor snelheid in u-richting in punten L2 en L5
- B-15 Waterstandsvariatiën ten opzichte van de waterspiegel in H1 en H2 in de hoofdstroom
- B-16 Waterstandsvariatiën ten opzichte van de waterspiegel in H3, H4 en H5 in het tweede kribvak
- B-17 Gemiddelde waterstand en variatiën in de waterstand voor het gehele model

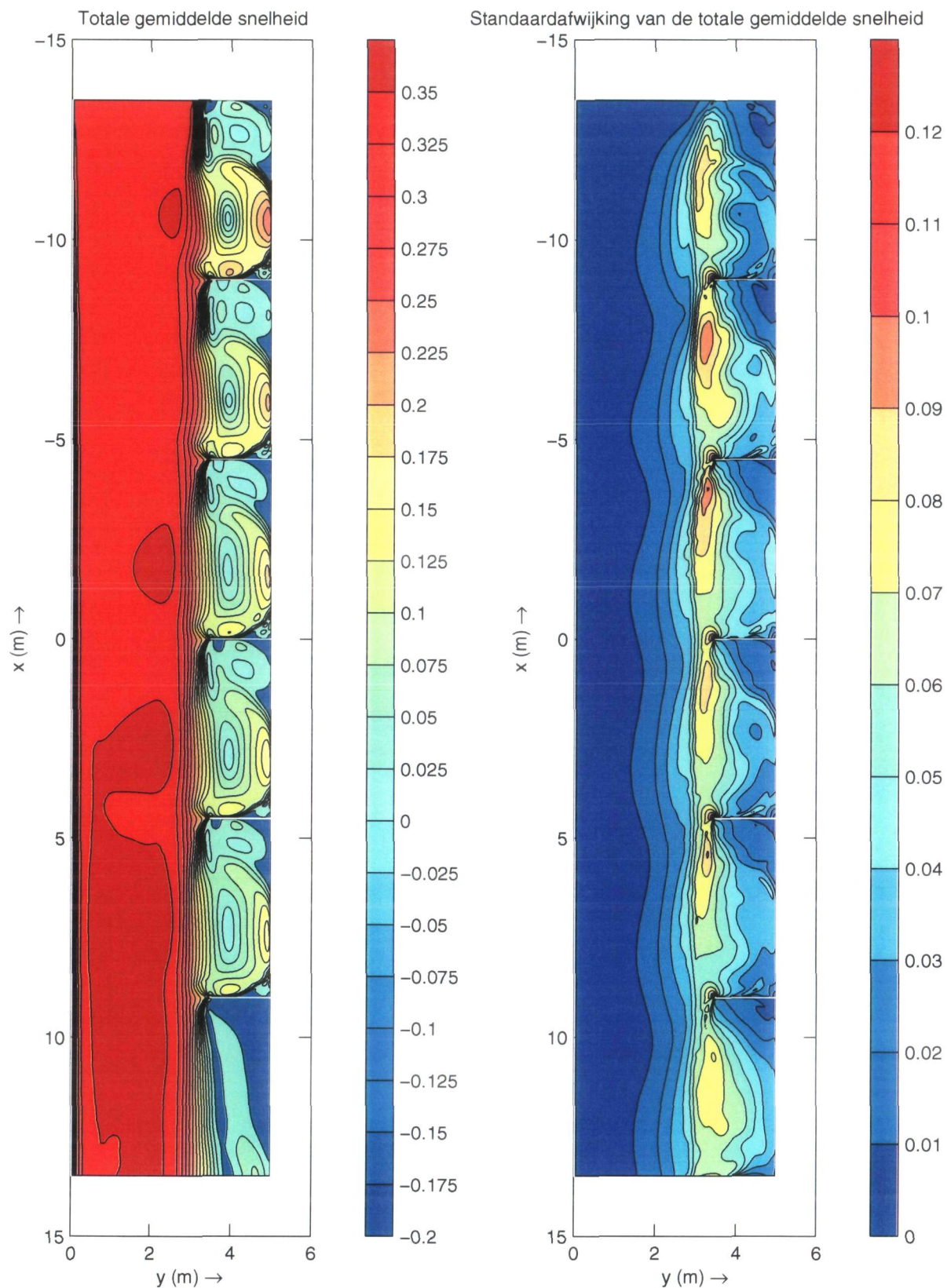




Tijdsgemiddeld stroombeeld voor metingen en berekeningen

t7

niet-overstroomd 1:3



Totale gemiddelde snelheid en bijbehorende standaard-  
afwijking voor het gehele model

t7

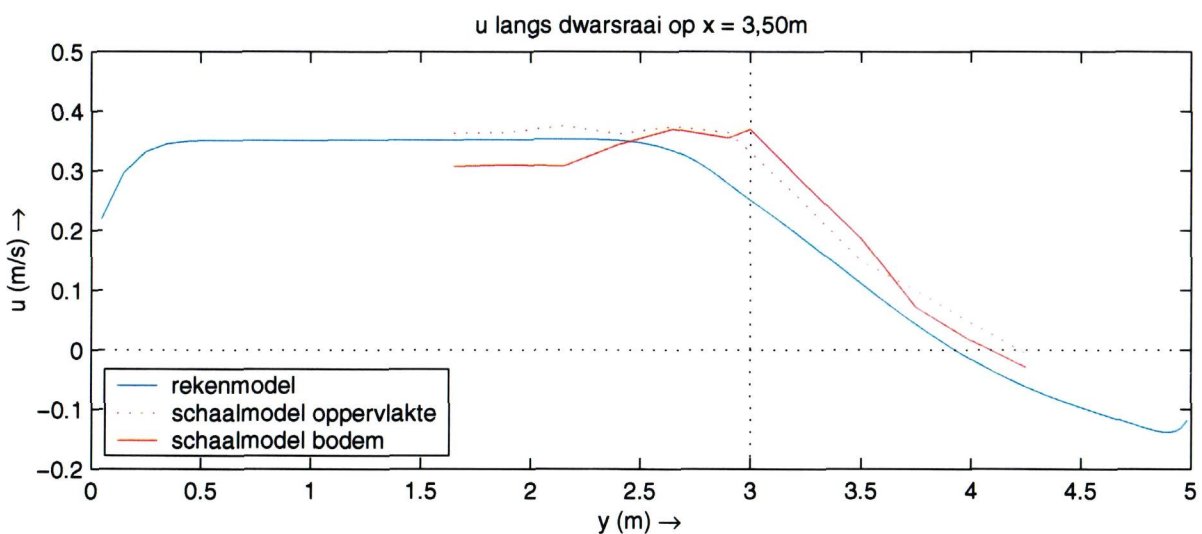
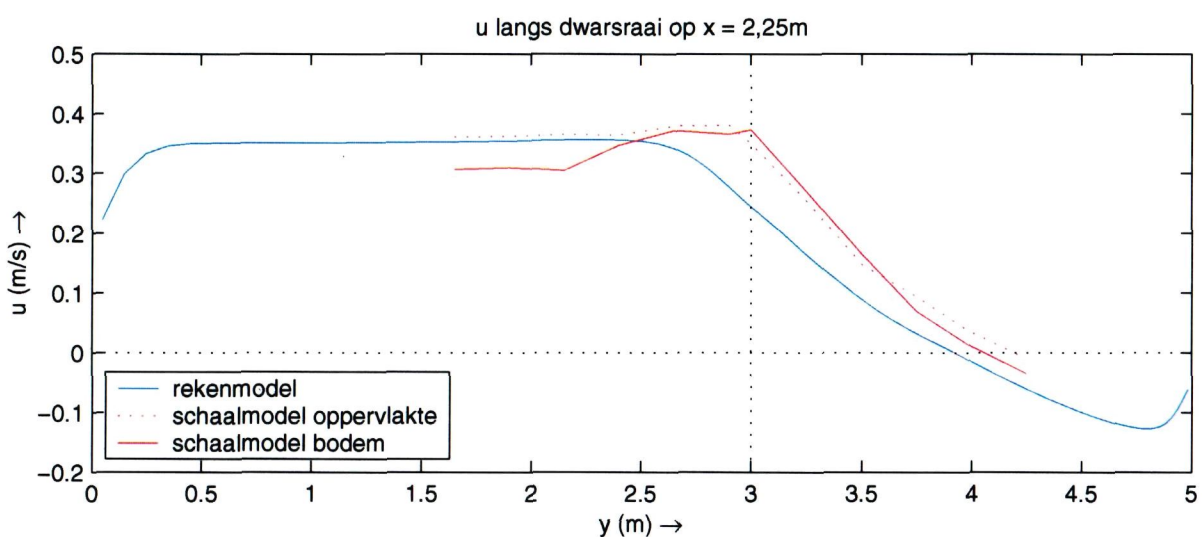
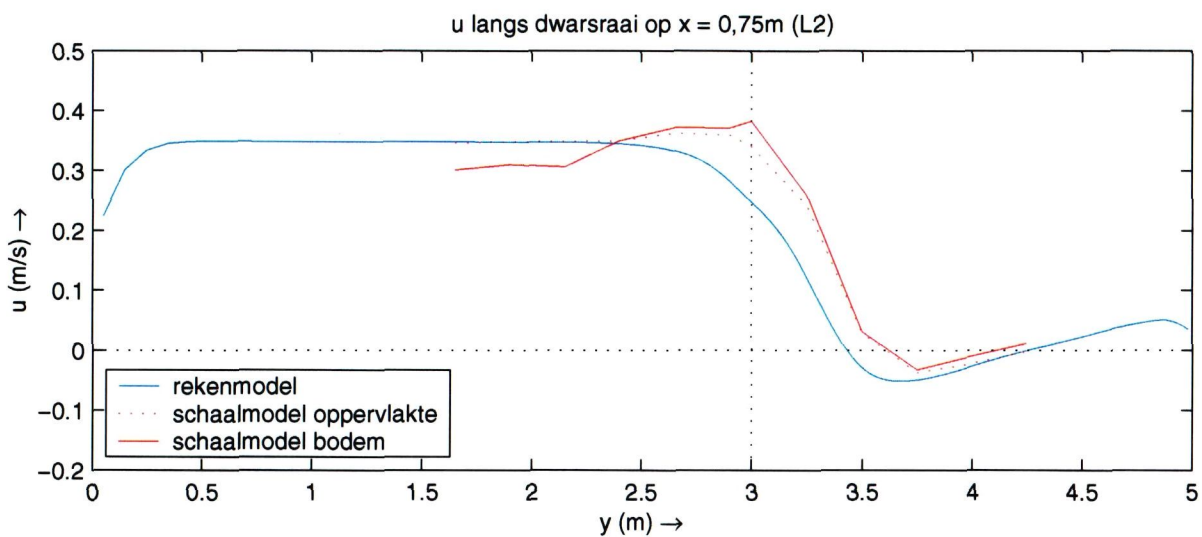
niet-overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

B-2



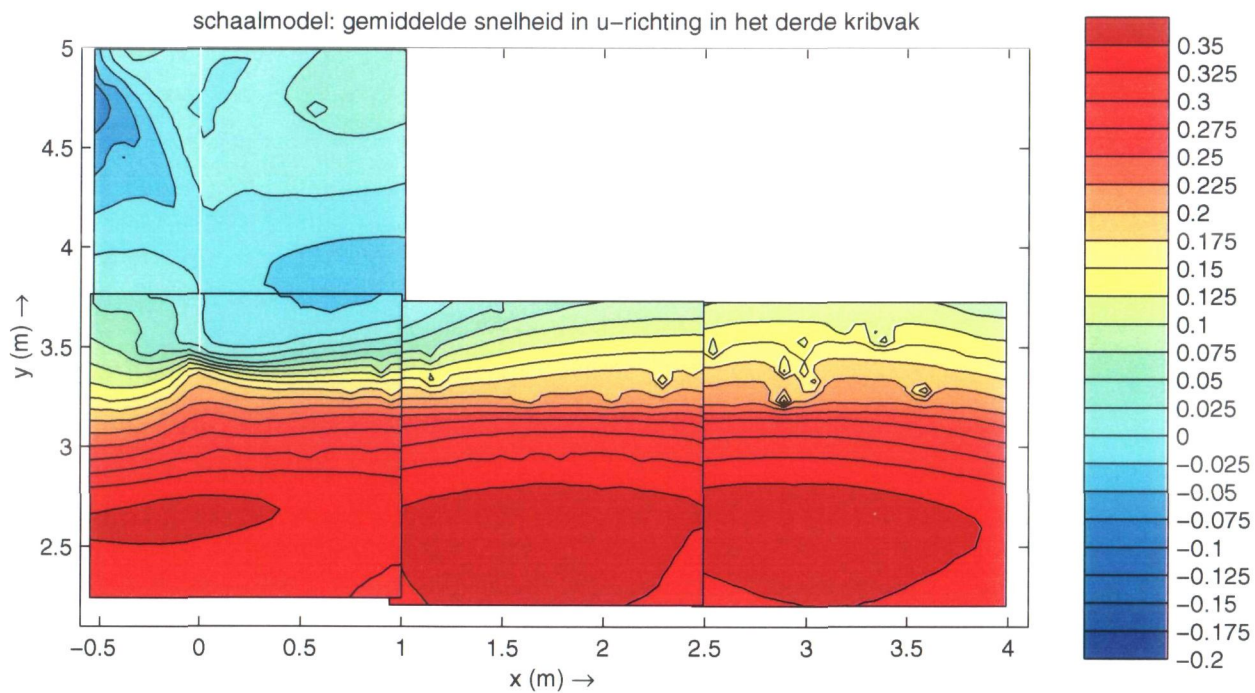
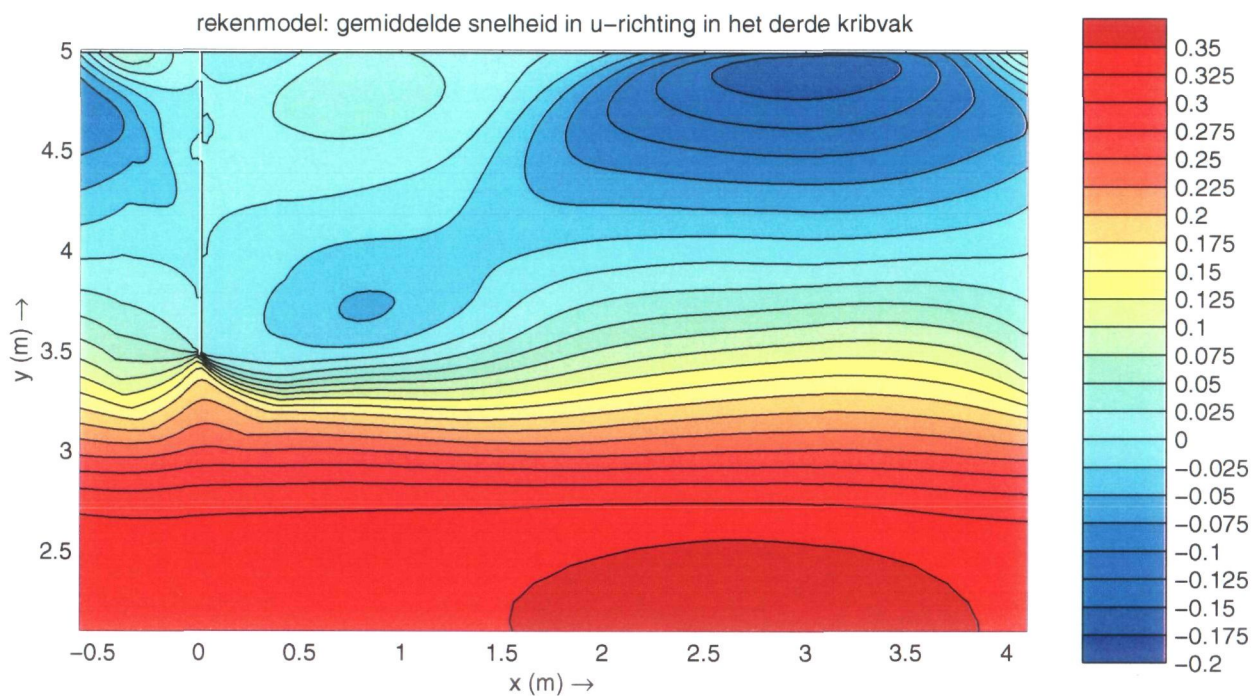


Tijds gemiddelde snelheden in u-richting in dwarsraaien

t7

niet-overstroomd 1:3





Gemiddelde snelheid in u-richting in het derde kribvak

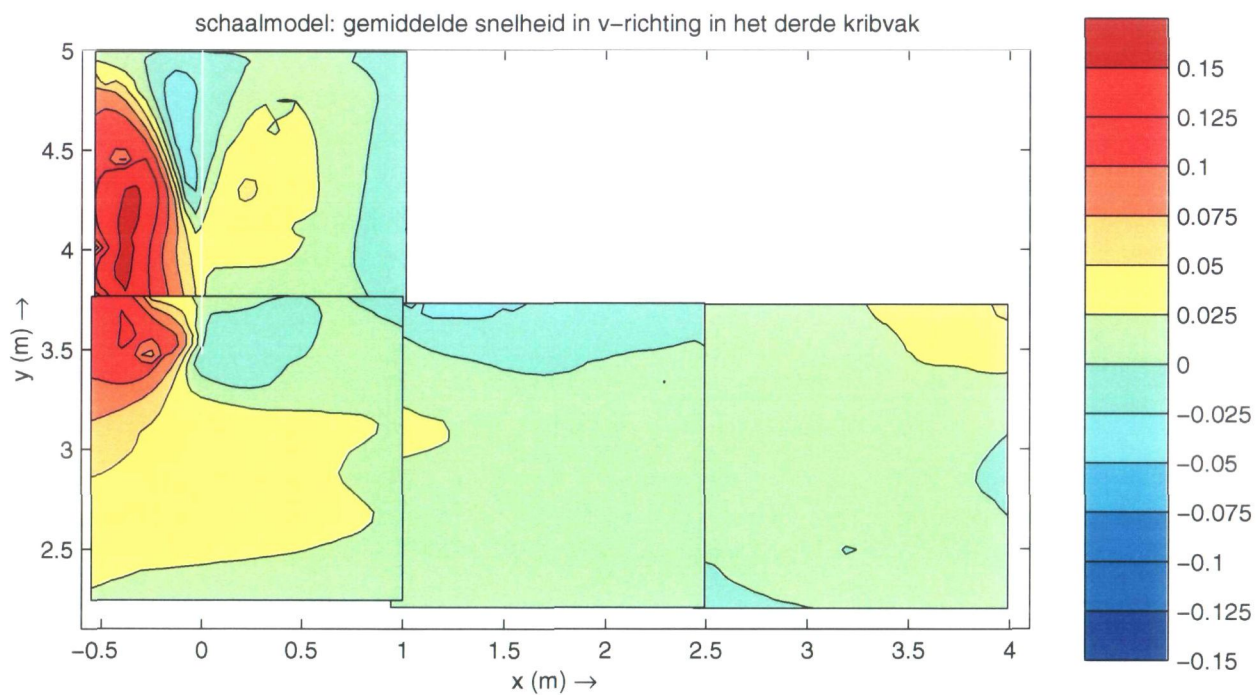
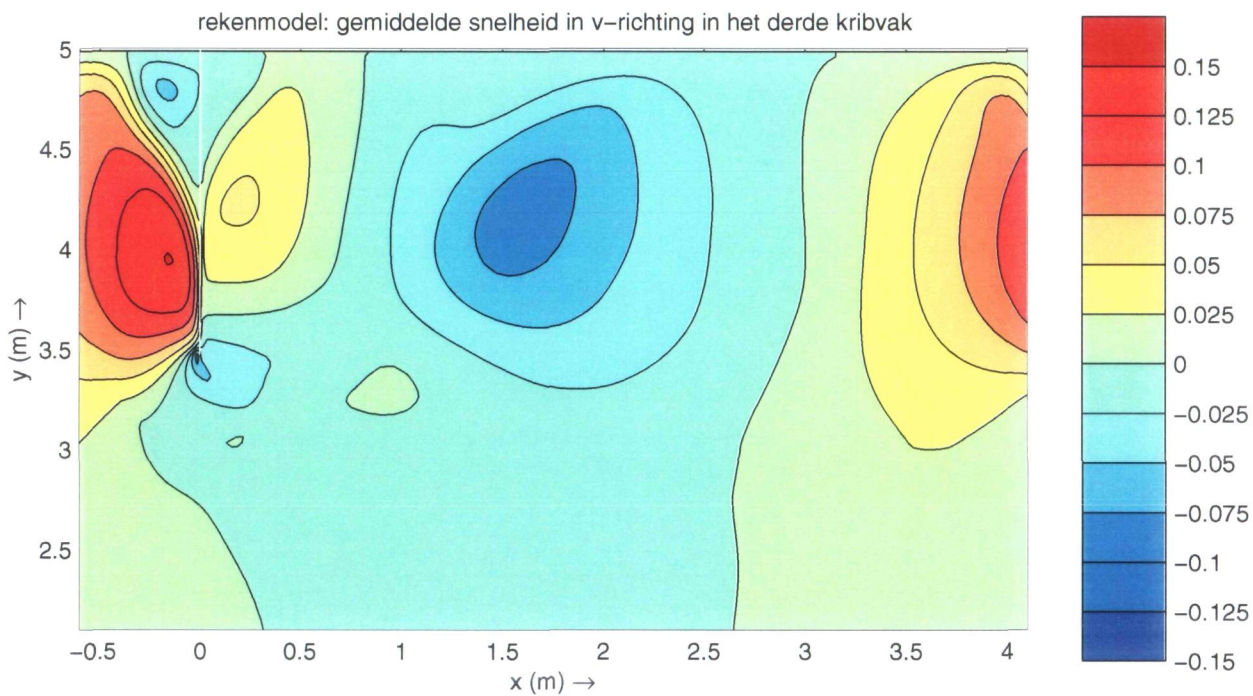
t7

niet-overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

B-4

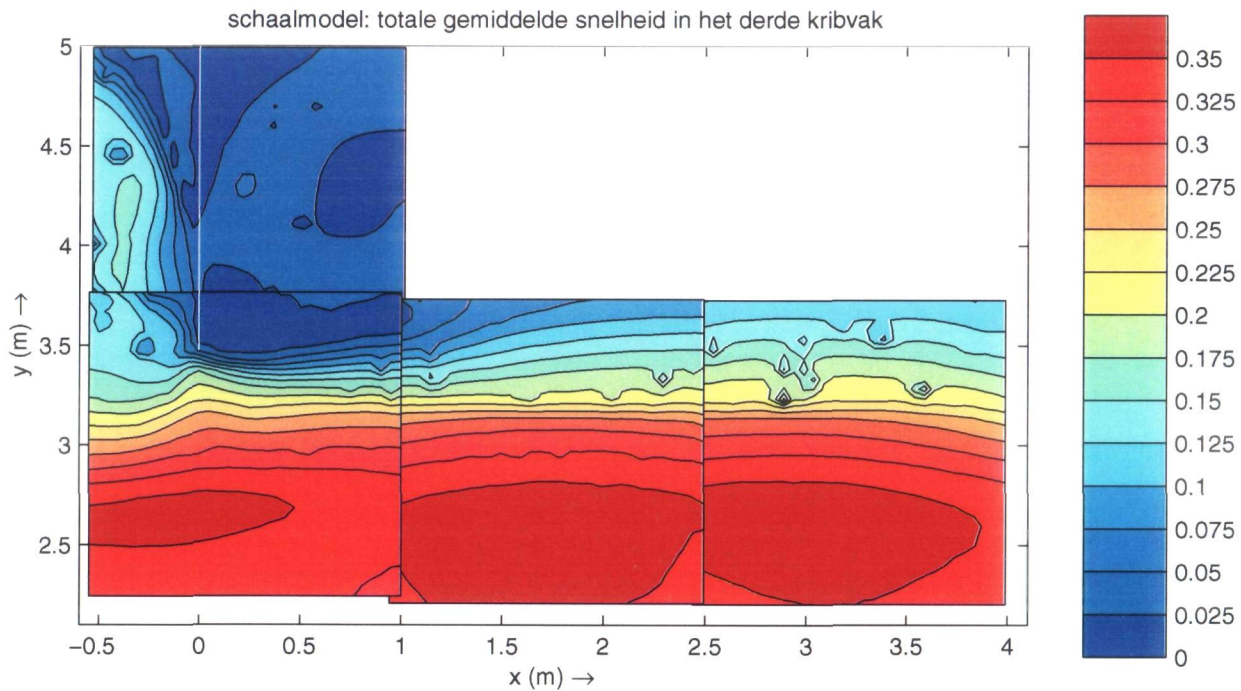
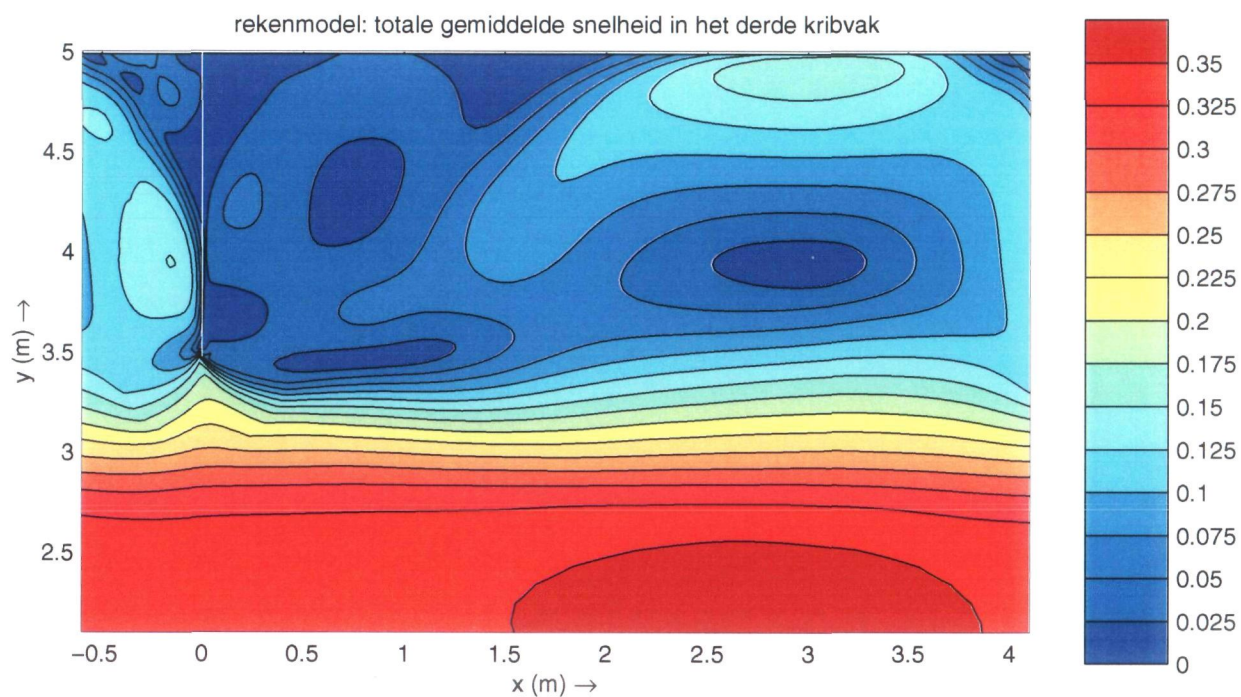


Gemiddelde snelheid in v-richting in het derde kribvak

t7

niet-overstroomd 1:3





Totale gemiddelde snelheid in het derde kribvak

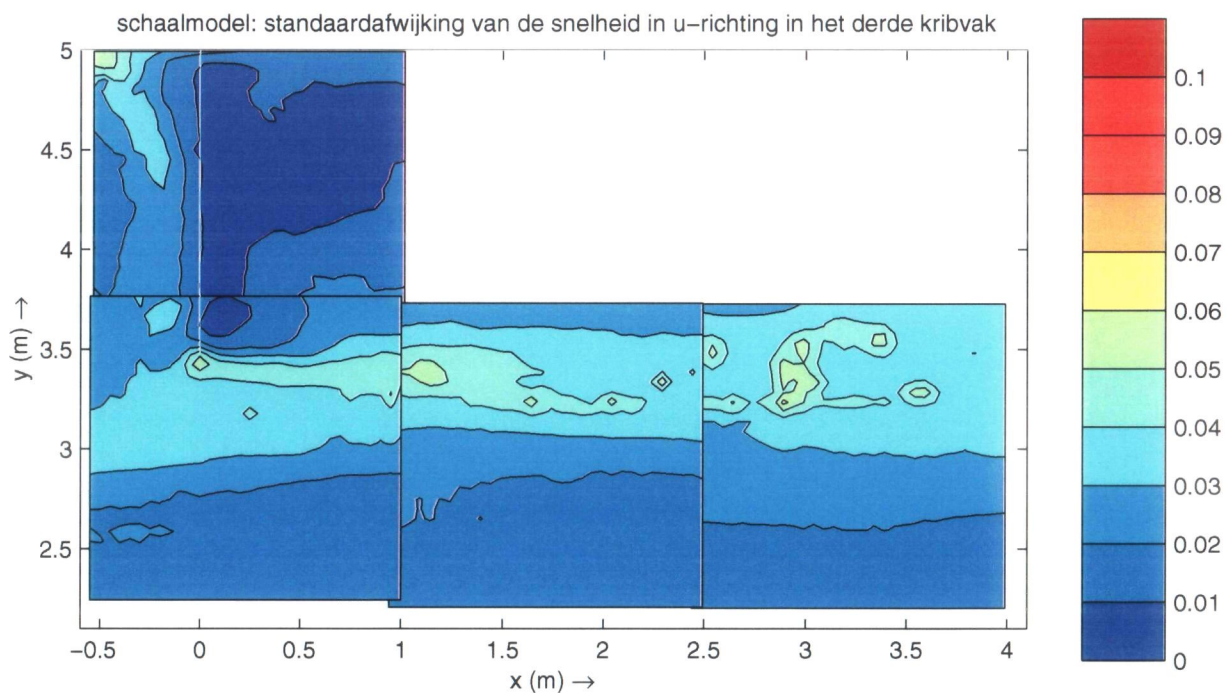
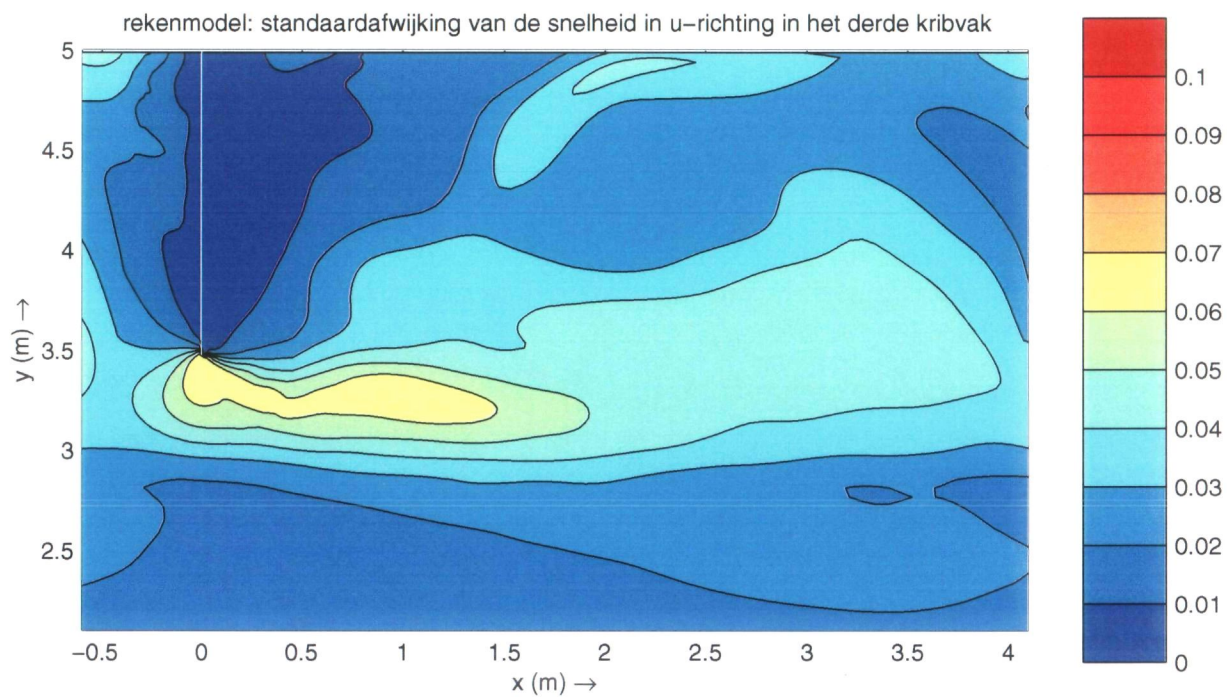
t7

niet-overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

B-6

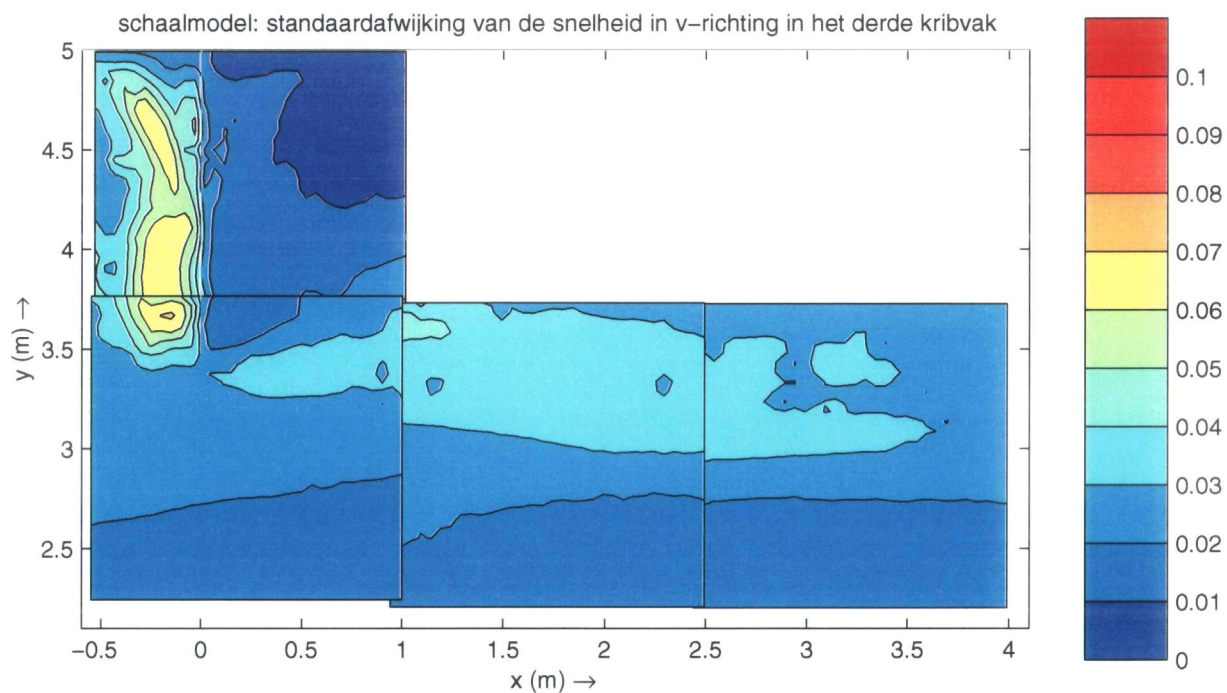
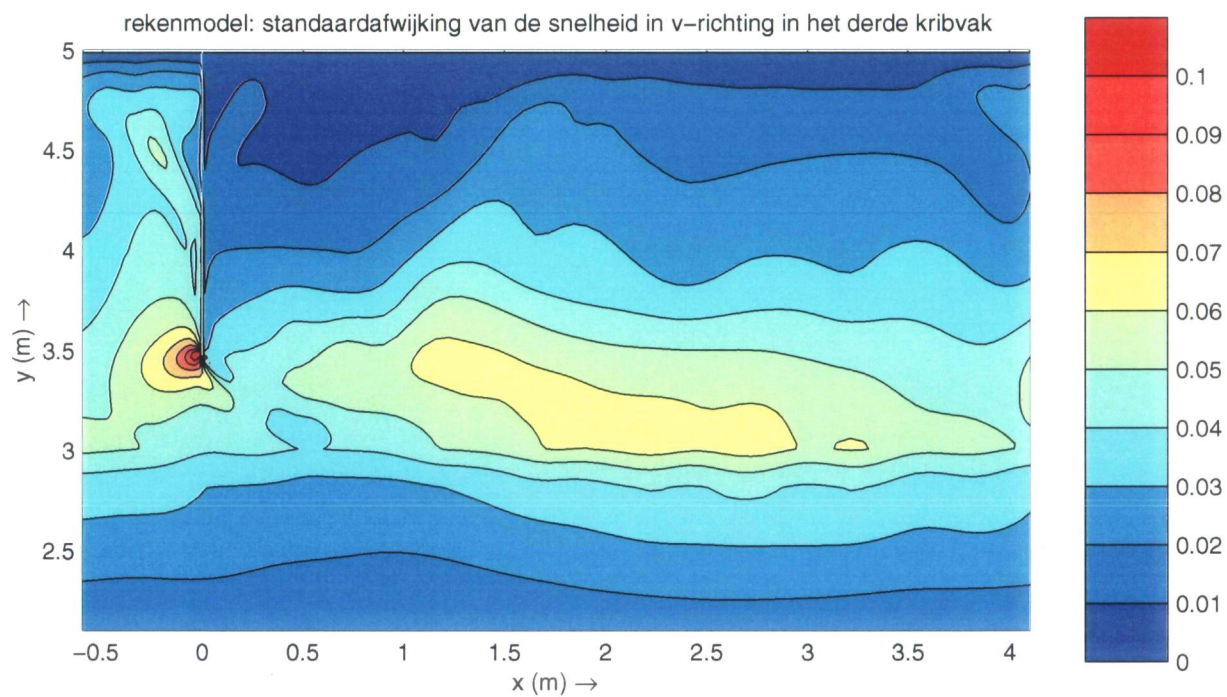


Standaardafwijking van de snelheid in u-richting  
in het derde kribvak

t7

niet-overstroomd 1:3

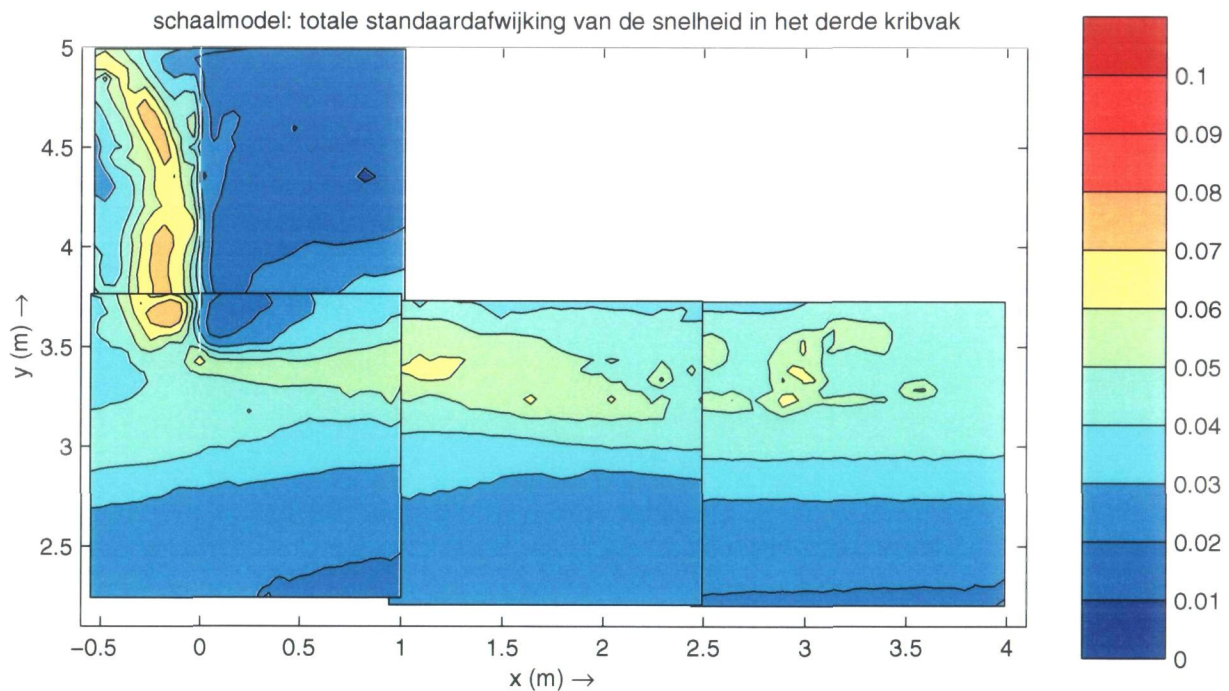
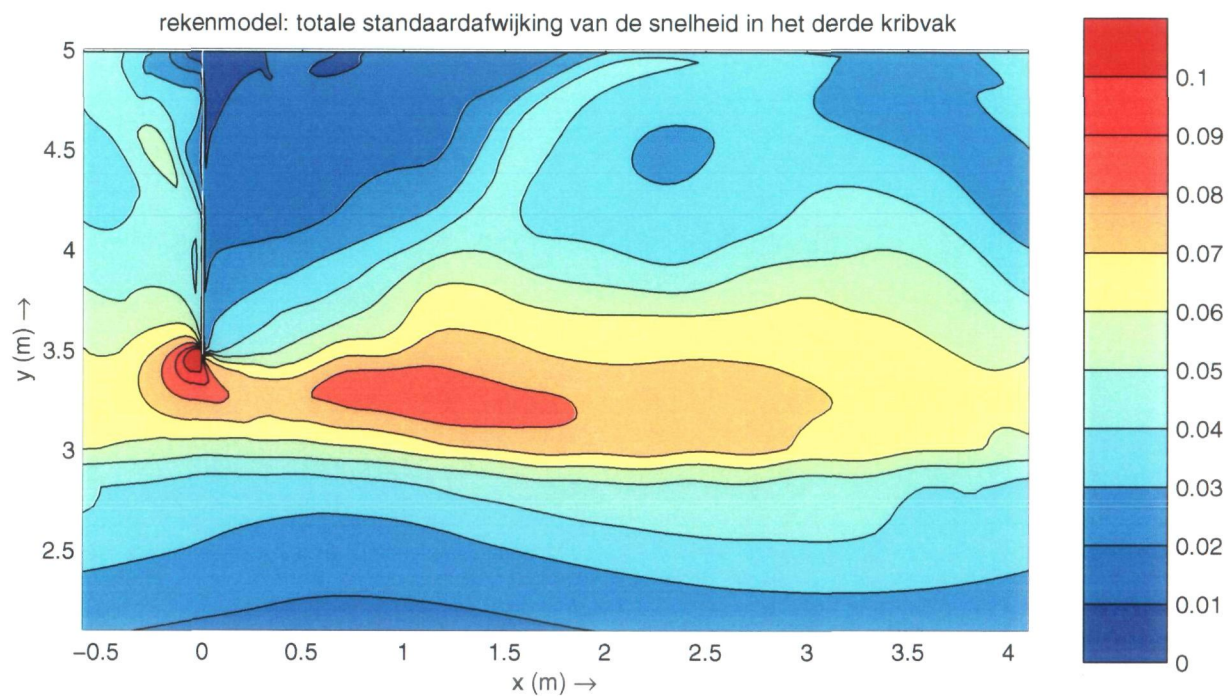




Standaardafwijking van de snelheid in v-richting  
in het derde kribvak

t7

niet-overstroomd 1:3

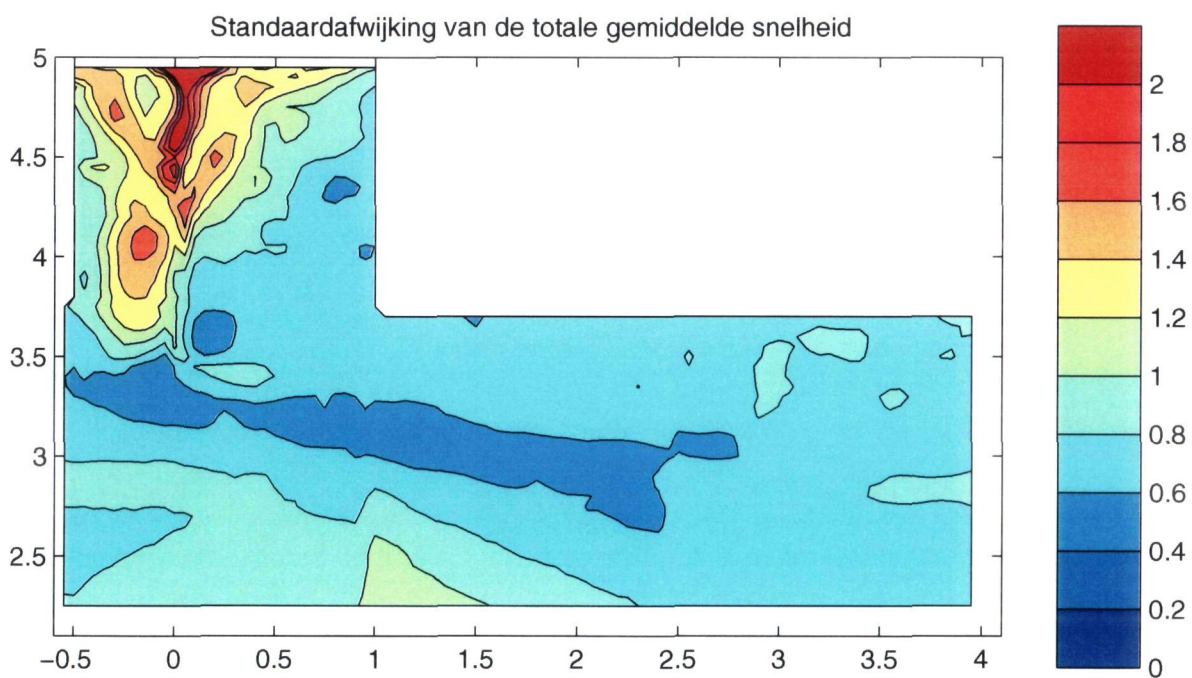
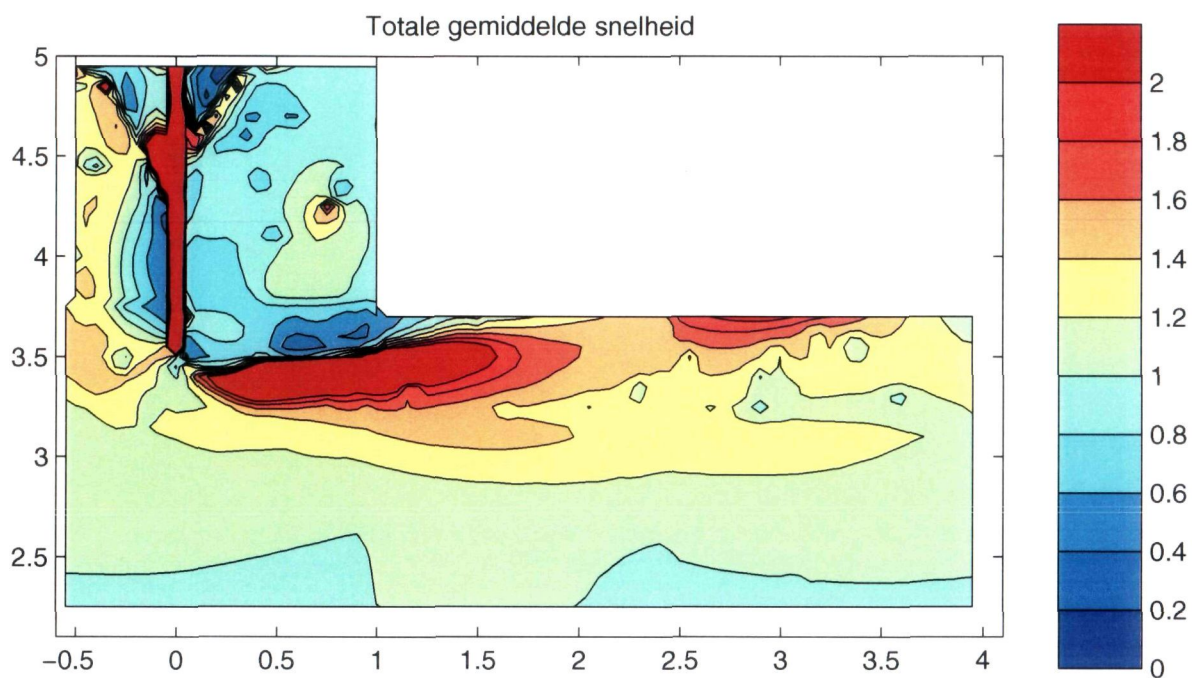


Totale standaardafwijking van de snelheid in het derde kribvak

t7

niet-overstroomd 1:3





Verskil tussen schaalmodel en rekenmodel  
snelheden schaalmodel gedeeld door snelheden rekenmodel

t7

A1

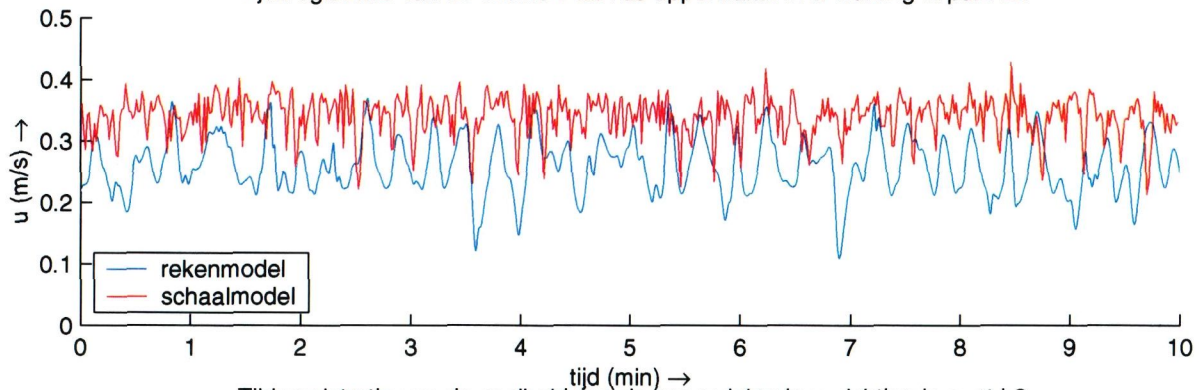
niet-overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

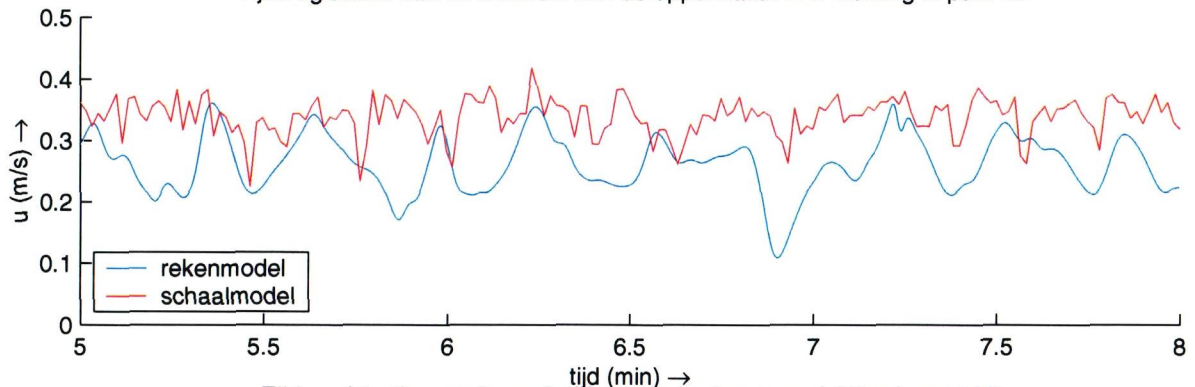
Q2973

B-10

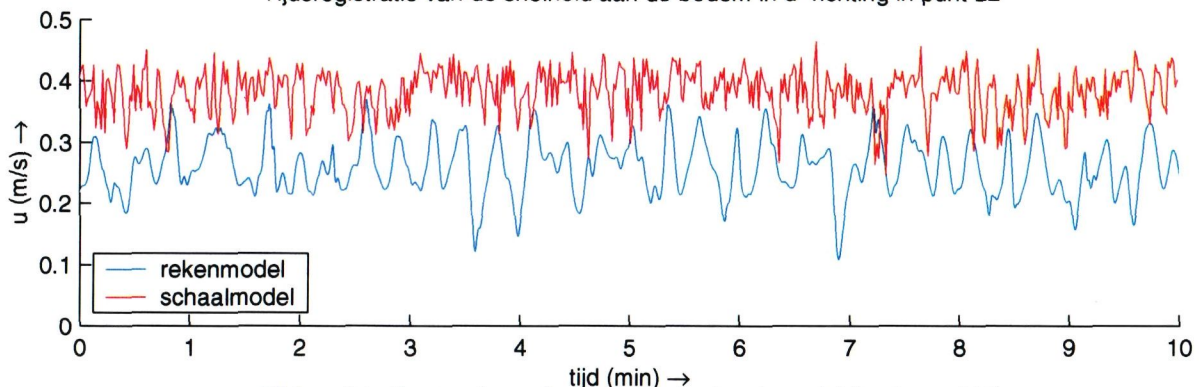
Tijdsregistratie van de snelheid aan de oppervlakte in u-richting in punt L2



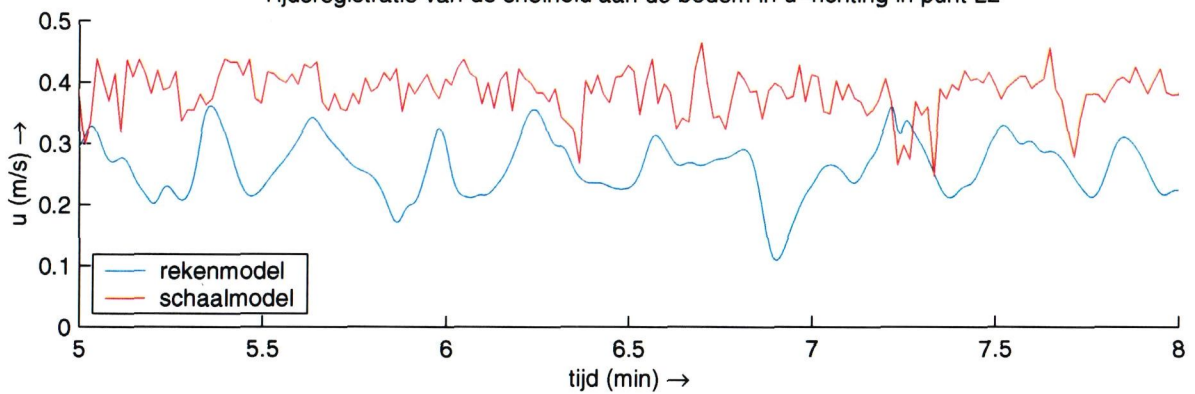
Tijdsregistratie van de snelheid aan de oppervlakte in u-richting in punt L2



Tijdsregistratie van de snelheid aan de bodem in u-richting in punt L2



Tijdsregistratie van de snelheid aan de bodem in u-richting in punt L2

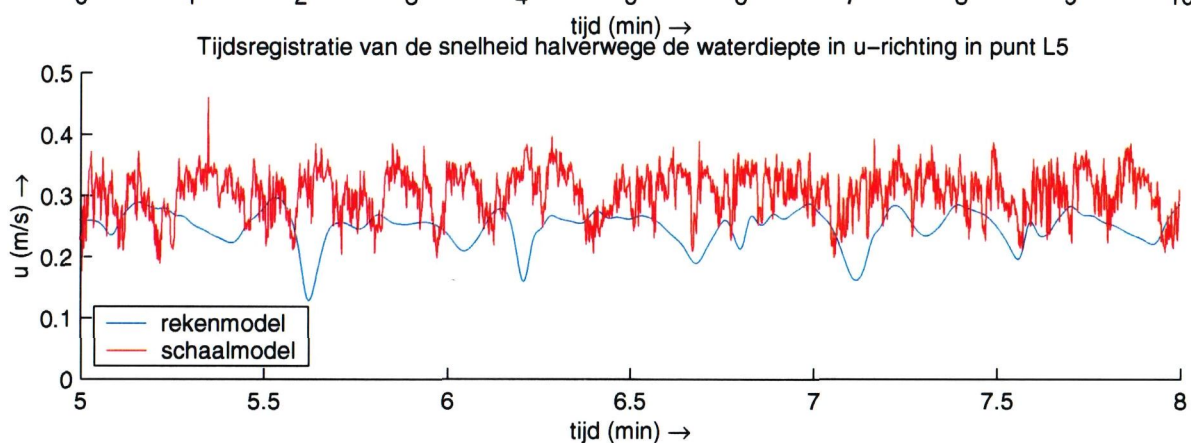
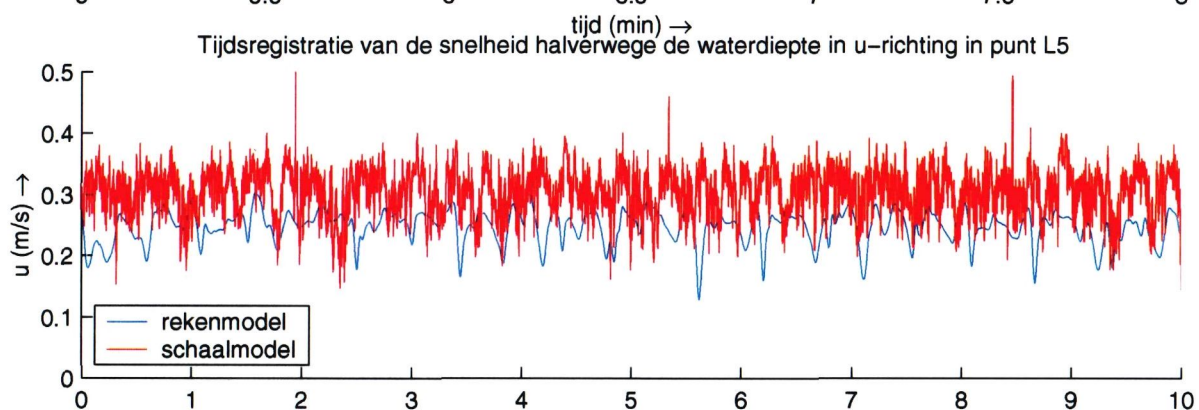
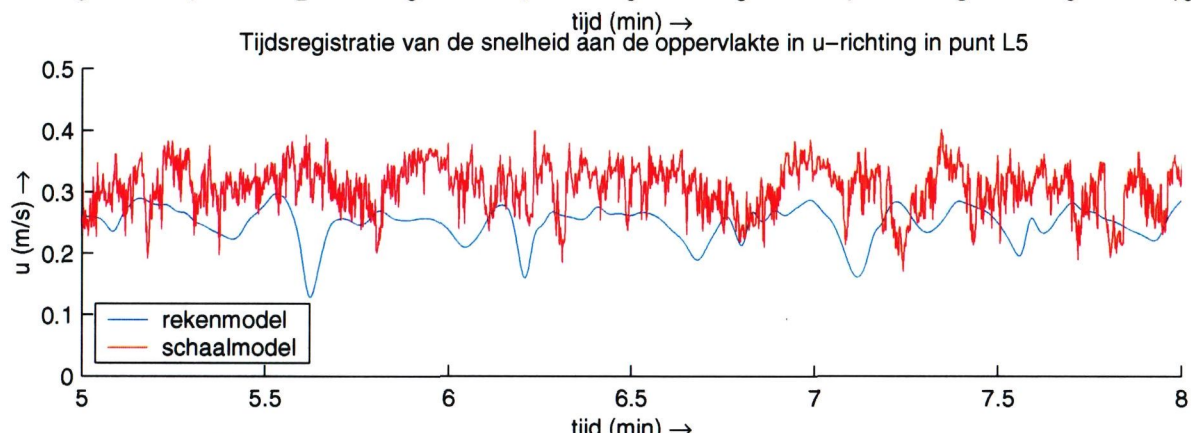
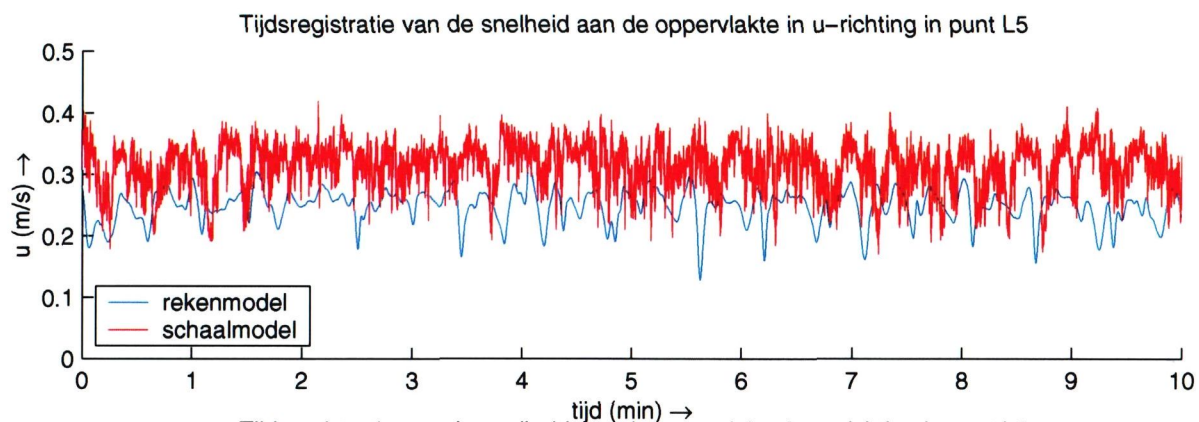


Tijdsregistratie van de snelheid in punt L2

t7

niet-overstroomd 1:3



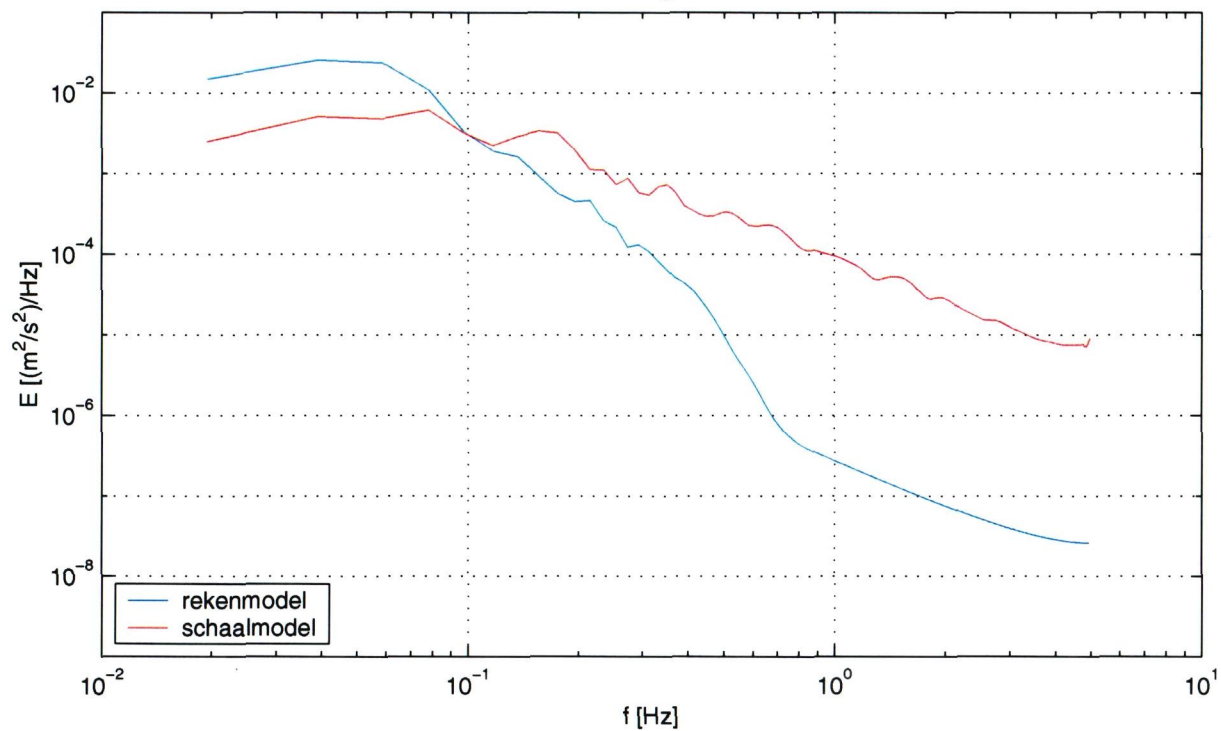


Tijdsregistratie van de snelheid in punt L5

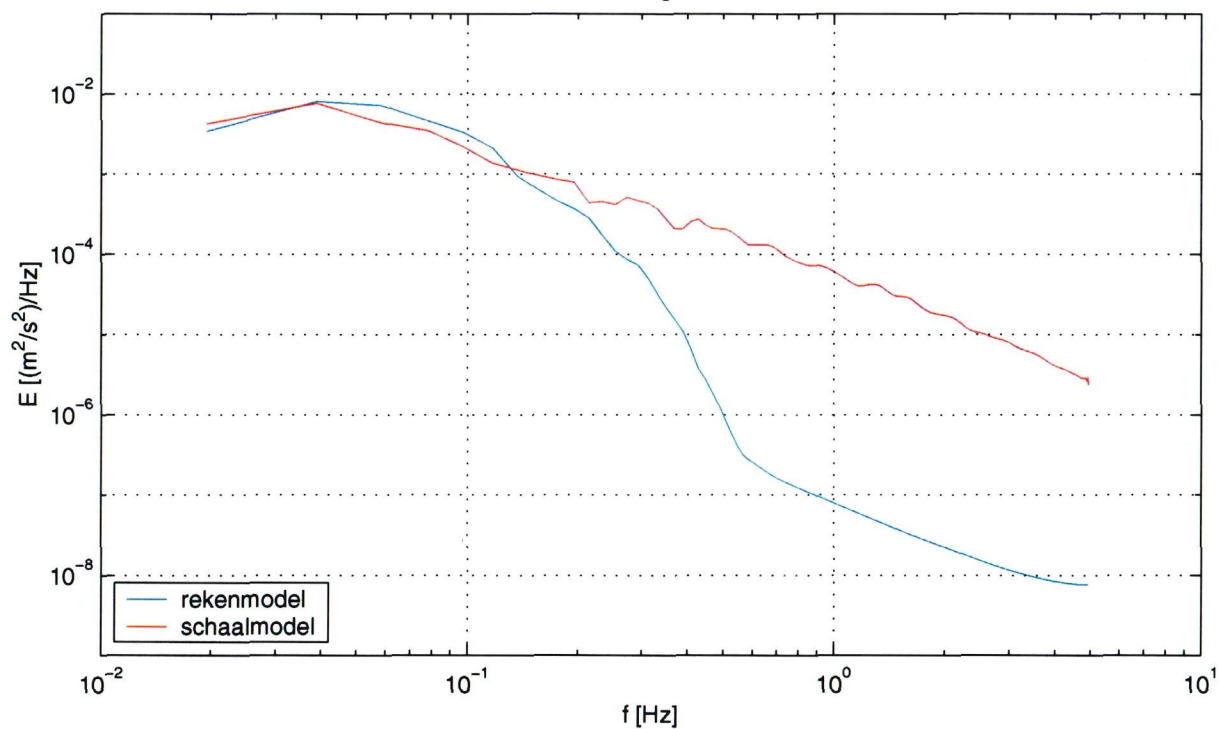
t7

niet-overstroomd 1:3

Vermogensdichtheidsspectrum  
in u-richting voor L2



Vermogensdichtheidsspectrum  
in u-richting voor L5



Energiedichtheidsspectra voor punten L2 en L5

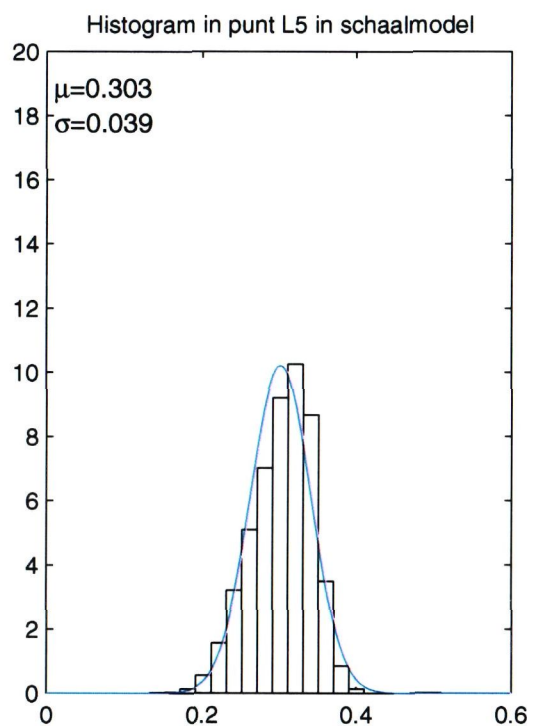
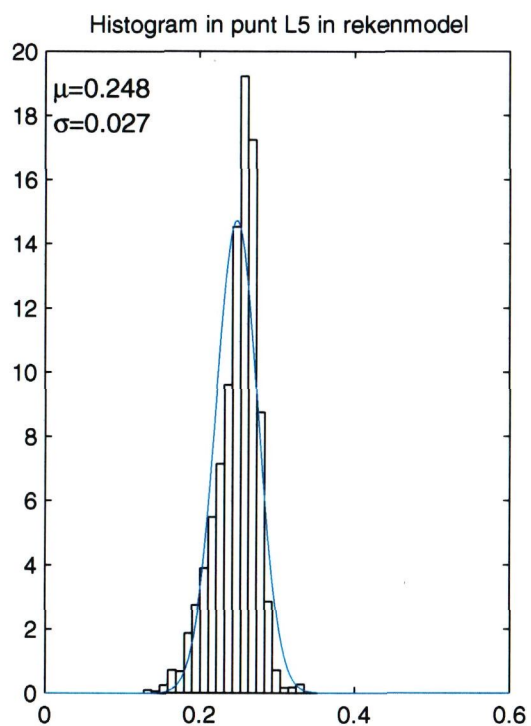
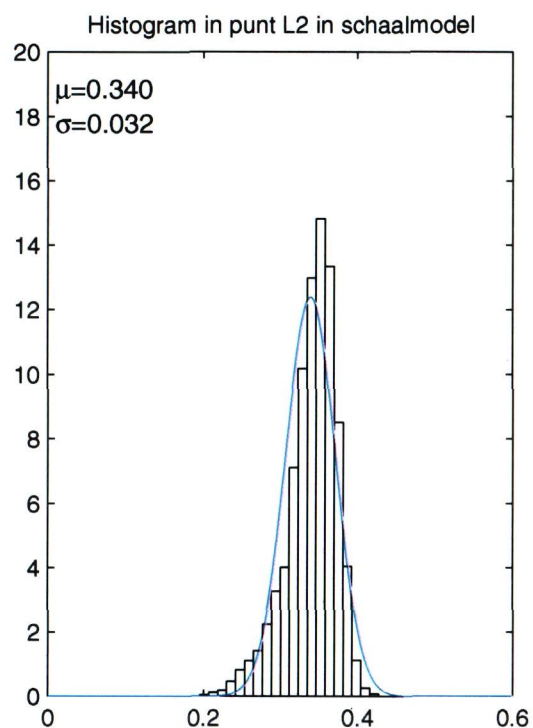
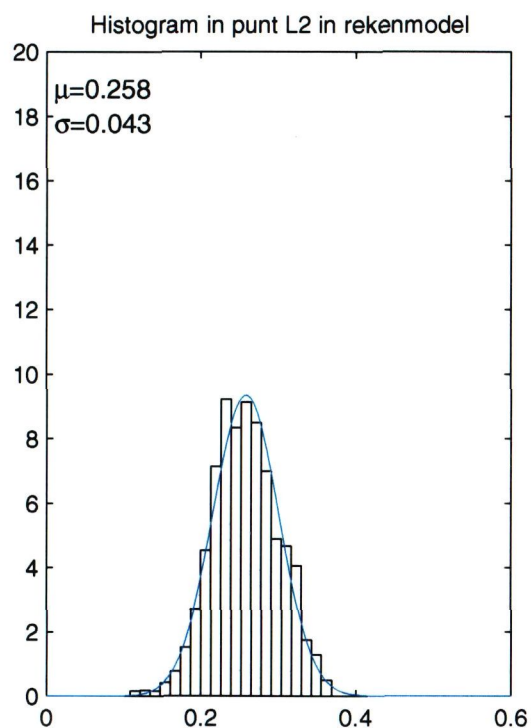
t7

niet-overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

B-13

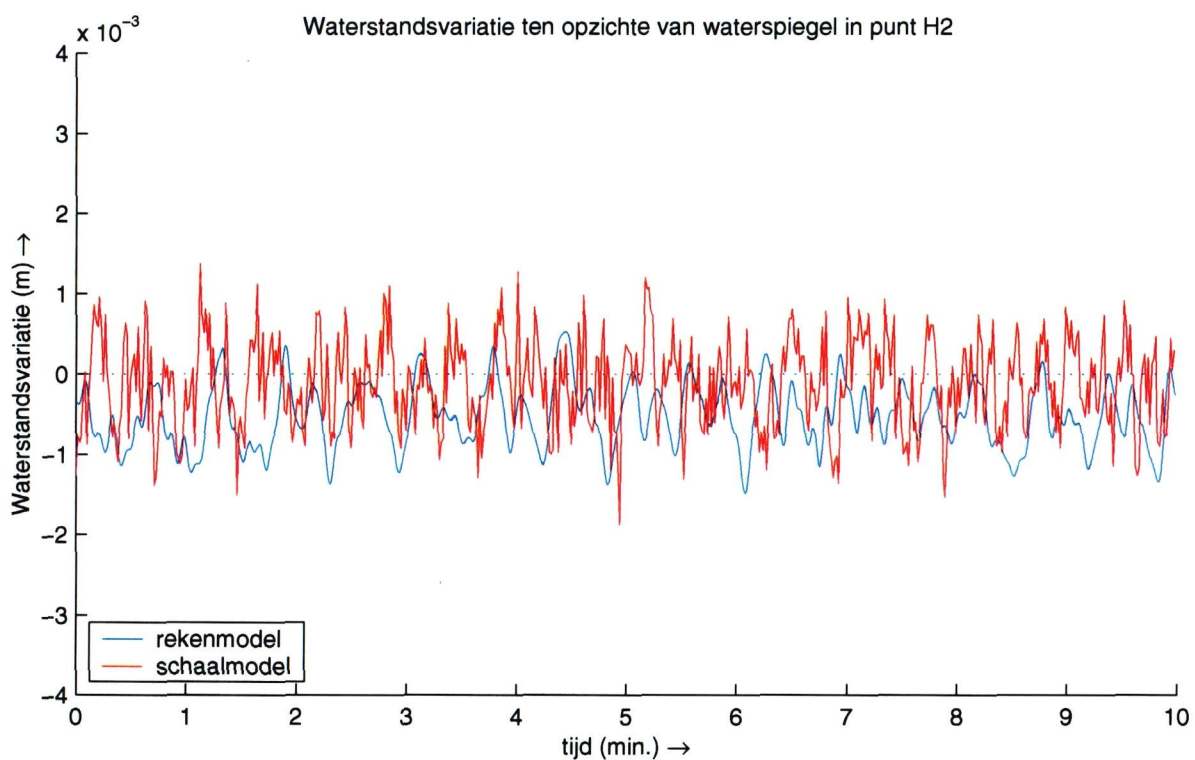
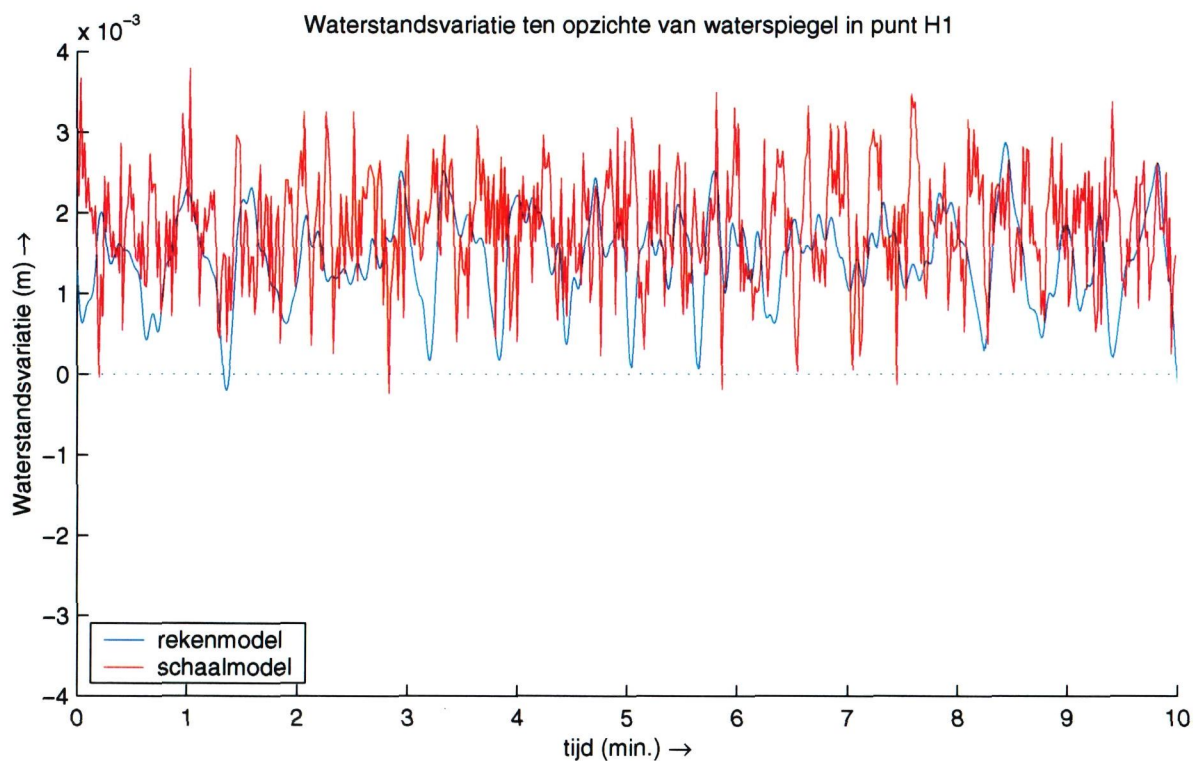


Histogrammen voor snelheid in u-richting in punten L2 en L5  
voor rekenmodel en schaalmodel

t7

niet-overstroomd 1:3





Waterstandsvariati es ten opzichte van de waterspiegel  
in punten H1 en H2 in de hoofdstroom

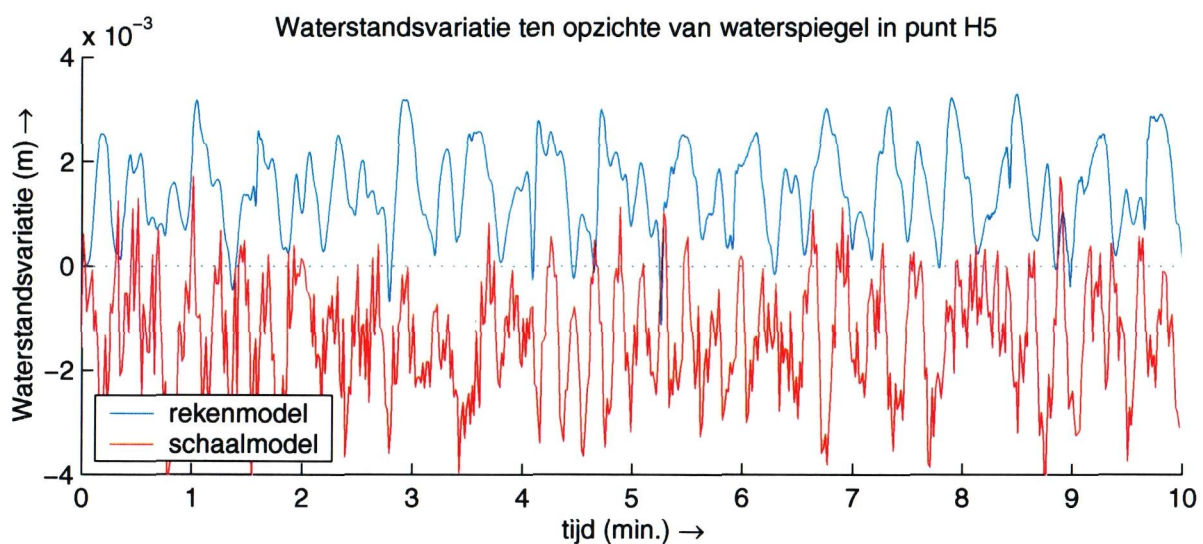
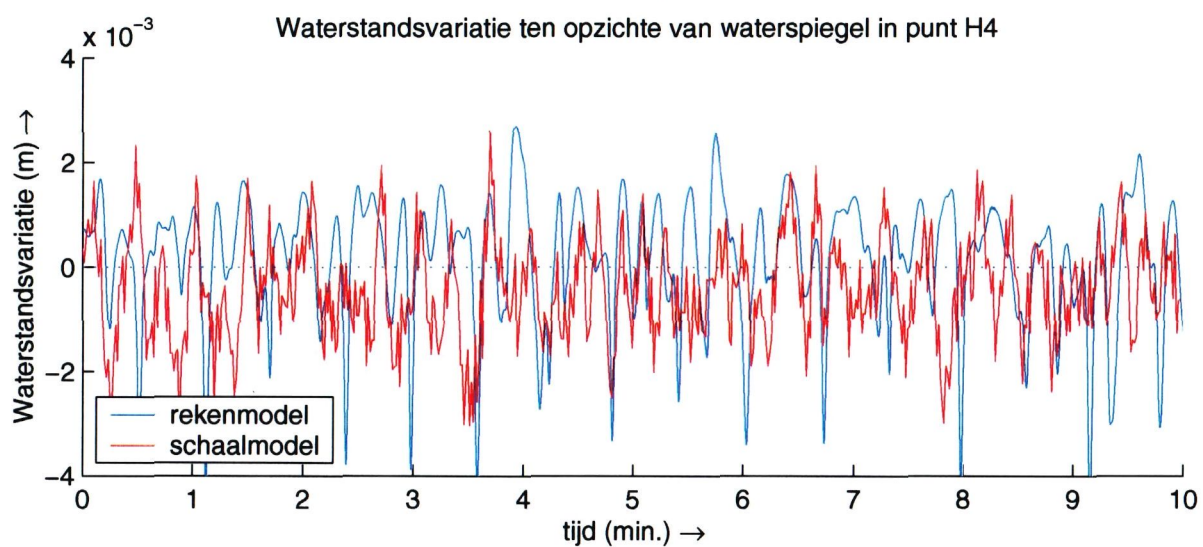
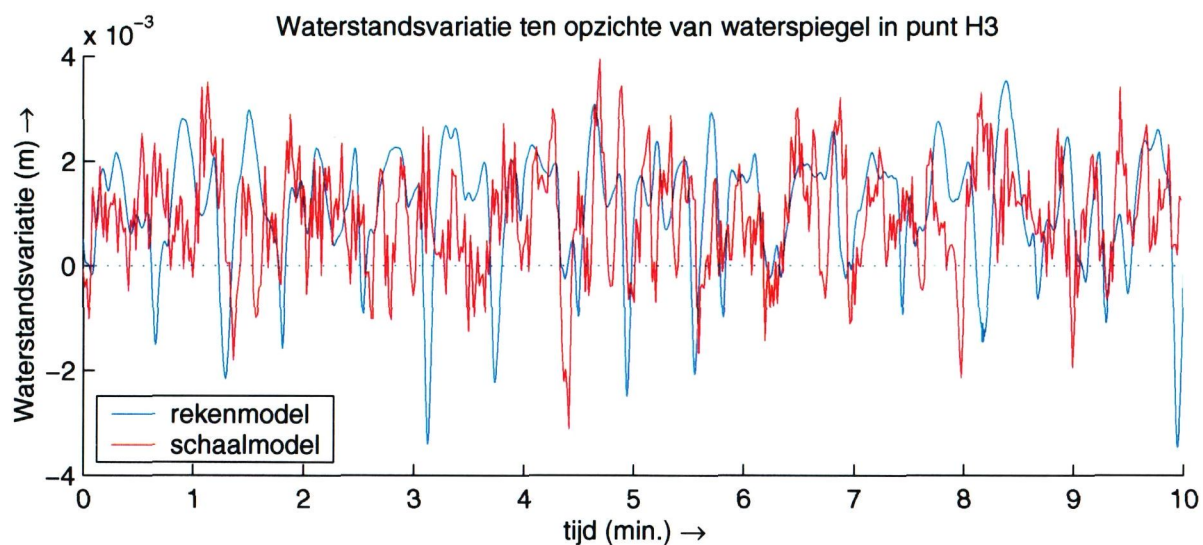
t7

niet-overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

B-15

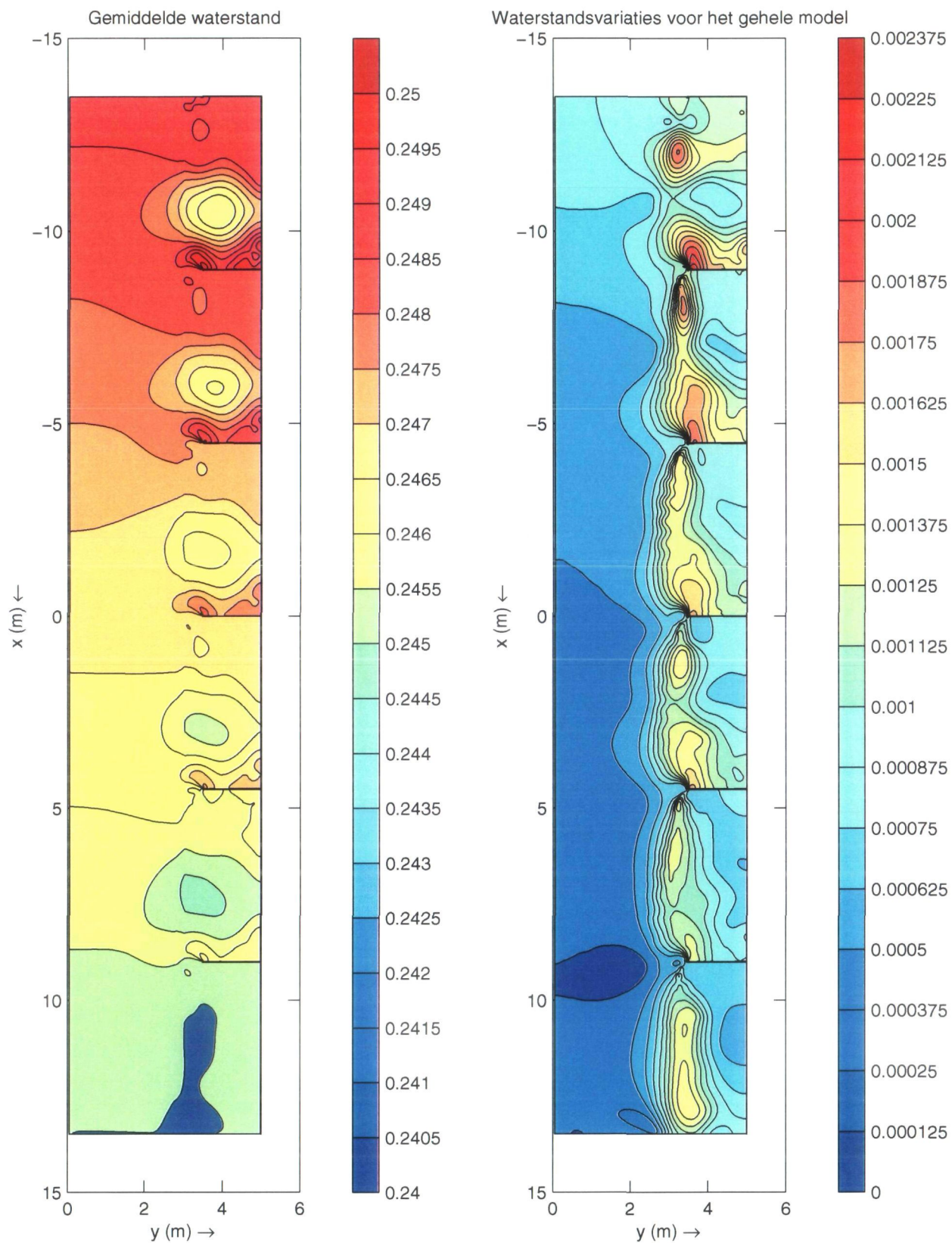


Waterstandsvariaties ten opzichte van de waterspiegel  
in H3, H4 en H5 in het tweede kribvak

t7

niet-overstroomd 1:3





Gemiddelde waterstand en waterstandsvariates  
voor het gehele model

t7

niet-overstroomd 1:3

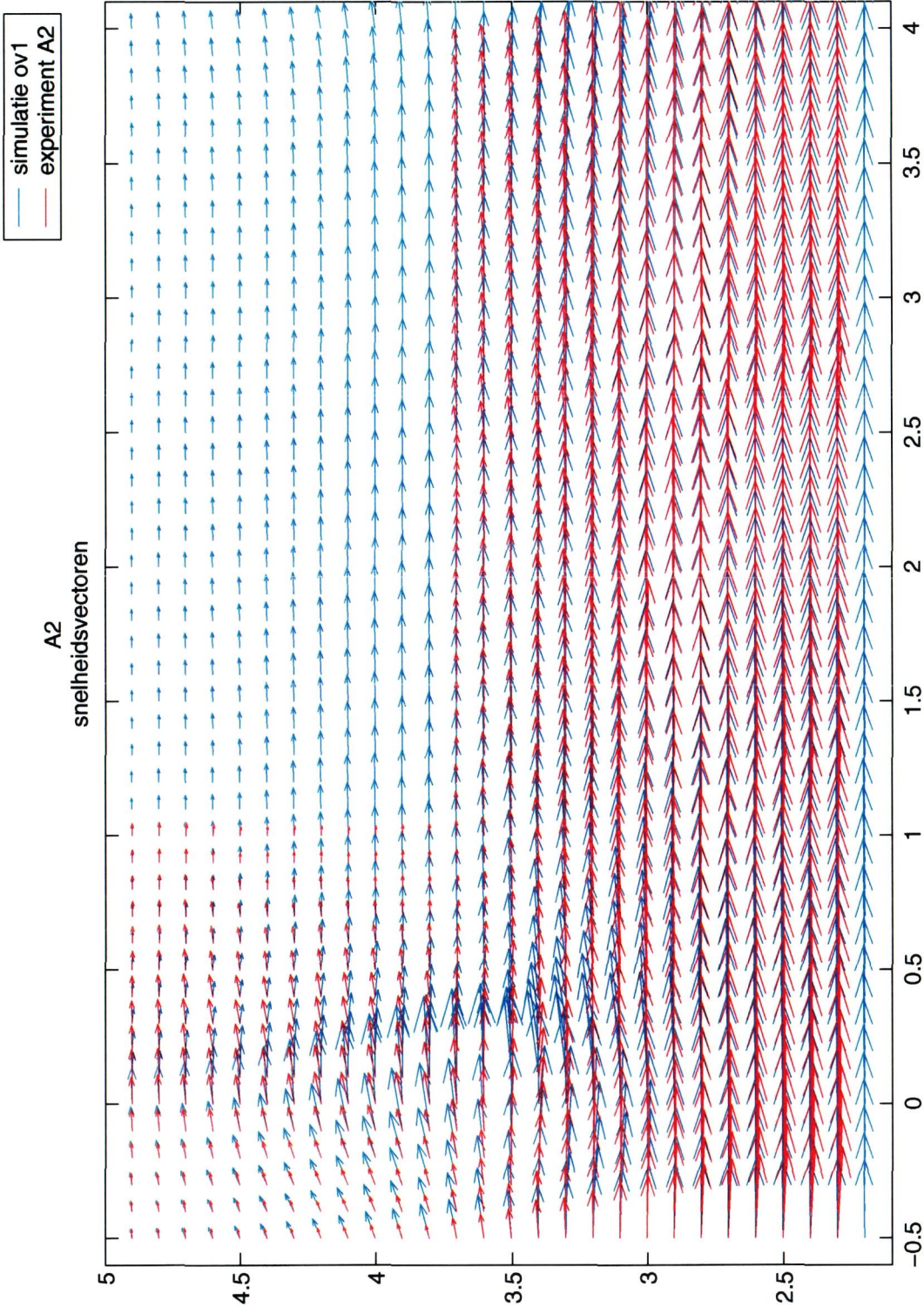
WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

B-17

## **C      Figuren overstroomde situatie krib 1:3**

- C-1      Tijdsgemiddeld stroombeeld voor metingen en berekeningen
- C-2      Totale gemiddelde snelheid en bijbehorende standaardafwijking voor het gehele model
- C-3      Tijdsgemiddelde snelheden in u-richting in dwarsraaien
- C-4      Gemiddelde snelheid in u-richting in het derde kribvak; rekenmodel en schaalmodel
- C-5      Gemiddelde snelheid in v-richting in het derde kribvak; rekenmodel en schaalmodel
- C-6      Totale gemiddelde snelheid in het derde kribvak, rekenmodel en schaalmodel
- C-7      Standaardafwijking van de snelheid in u-richting in het derde kribvak; rekenmodel en schaalmodel
- C-8      Standaardafwijking van de snelheid in v-richting in het derde kribvak; rekenmodel en schaalmodel
- C-9      Standaardafwijking van de totale gemiddelde snelheid in het derde kribvak; rekenmodel en schaalmodel
- C-10    Verschil tussen schaalmodel en rekenmodel voor totale gemiddelde snelheid en bijbehorende standaardafwijking
- C-11    Tijdsregistratie van de snelheid in punt L2
- C-12    Tijdsregistratie van de snelheid in punt L5
- C-13    Histogrammen voor snelheid in u-richting in punten L2 en L5
- C-14    Waterstandsvariaties ten opzichte van de waterspiegel in H1 en H2 in de hoofdstroom
- C-15    Waterstandsvariaties ten opzichte van de waterspiegel in H3, H4 en H5 in het tweede kribvak
- C-16    Totale gemiddelde snelheid in het derde kribvak met  $k = 0,01$  m voor de krib

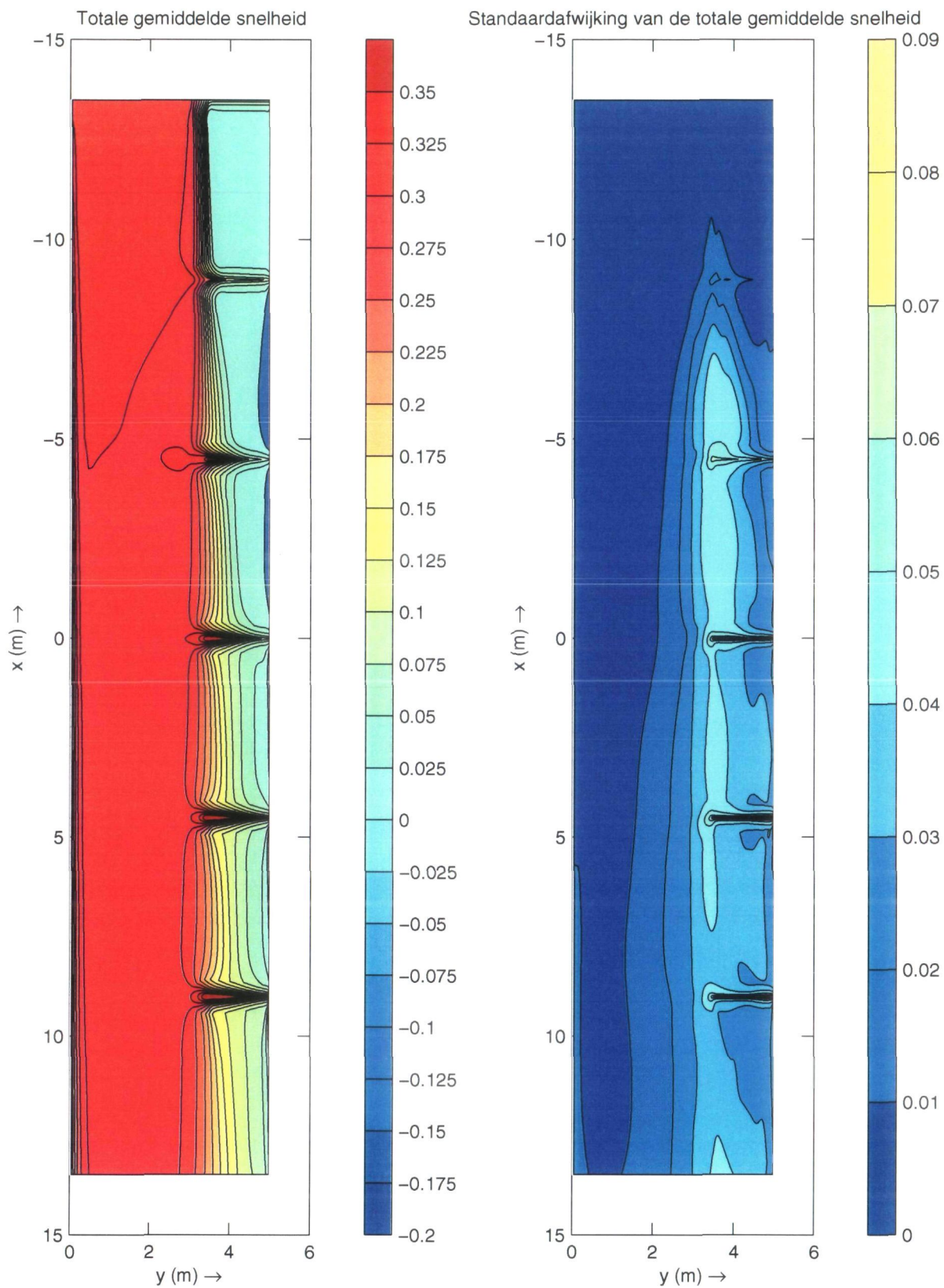


Tijdgemiddeld stroombeeld voor metingen en berekeningen

ov1

overstroomd 1:3





Totale gemiddelde snelheid en bijbehorende standaard-  
afwijking voor het gehele model

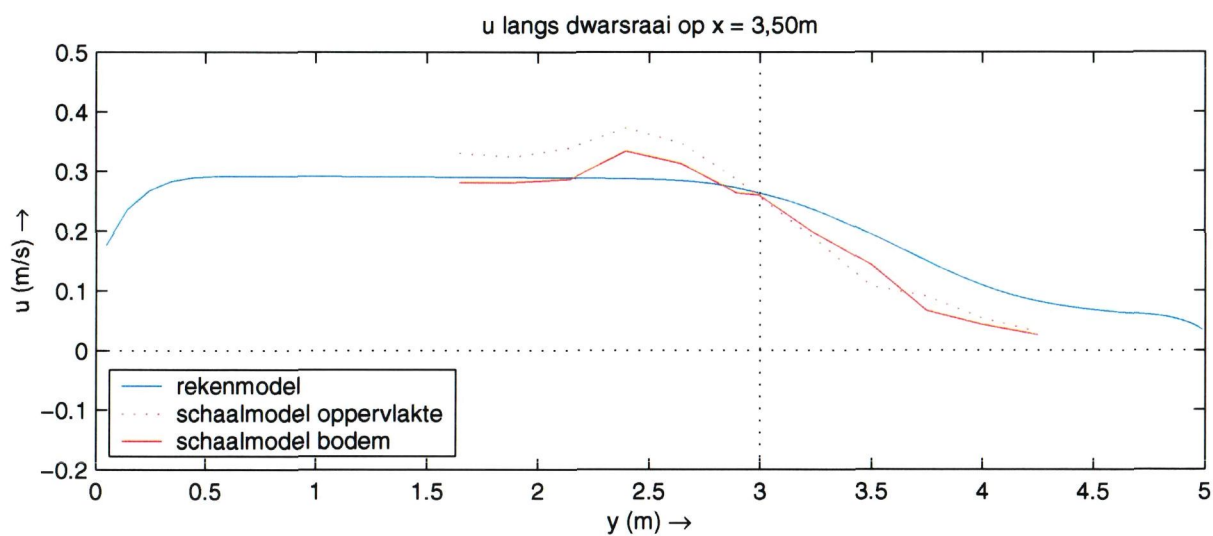
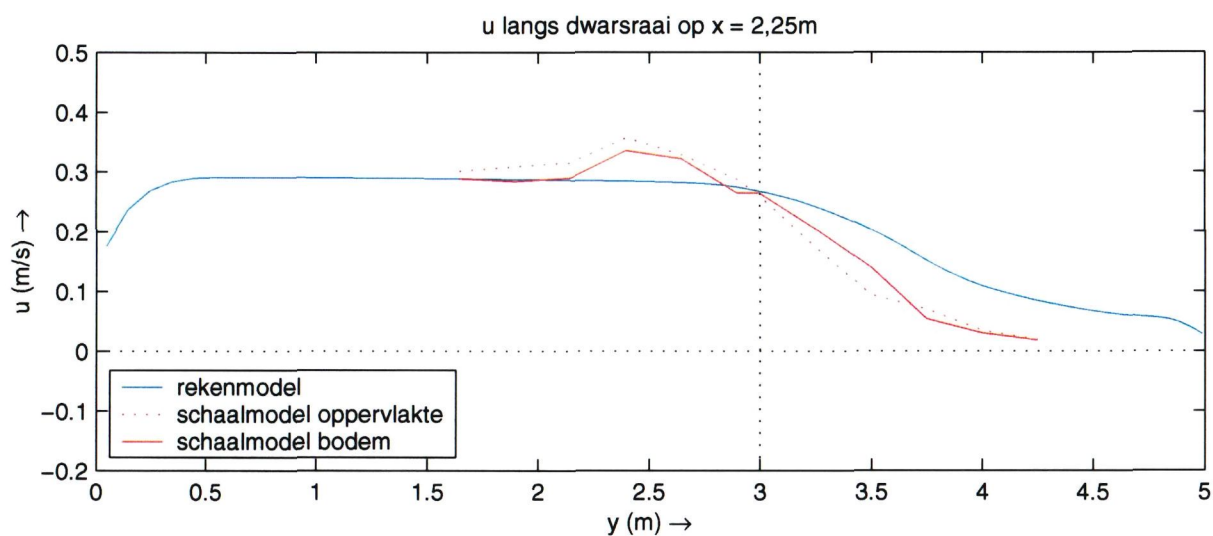
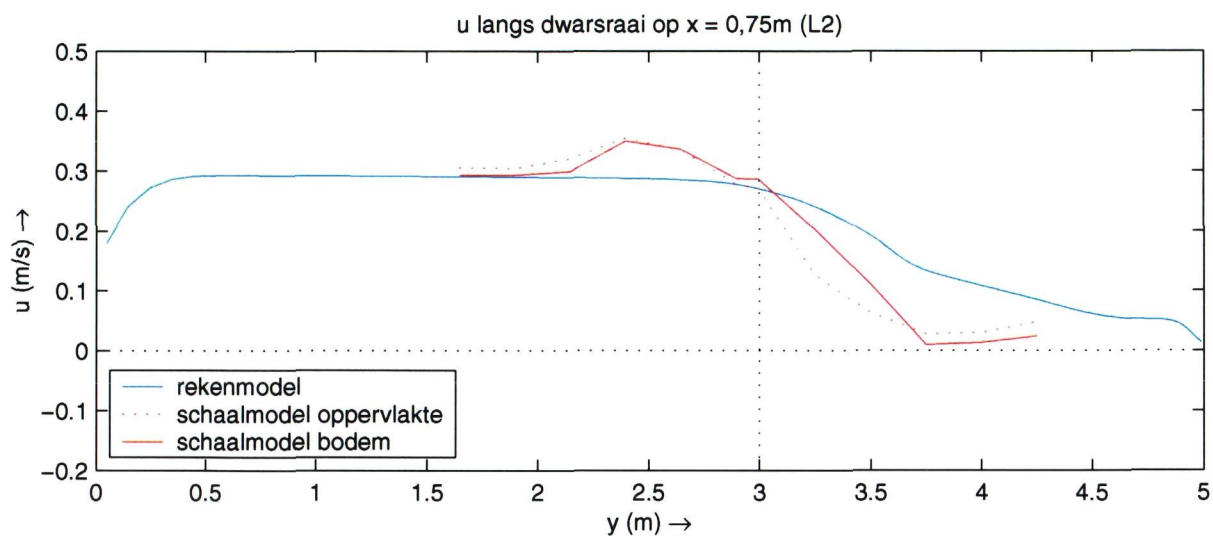
ov1

overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

C-2

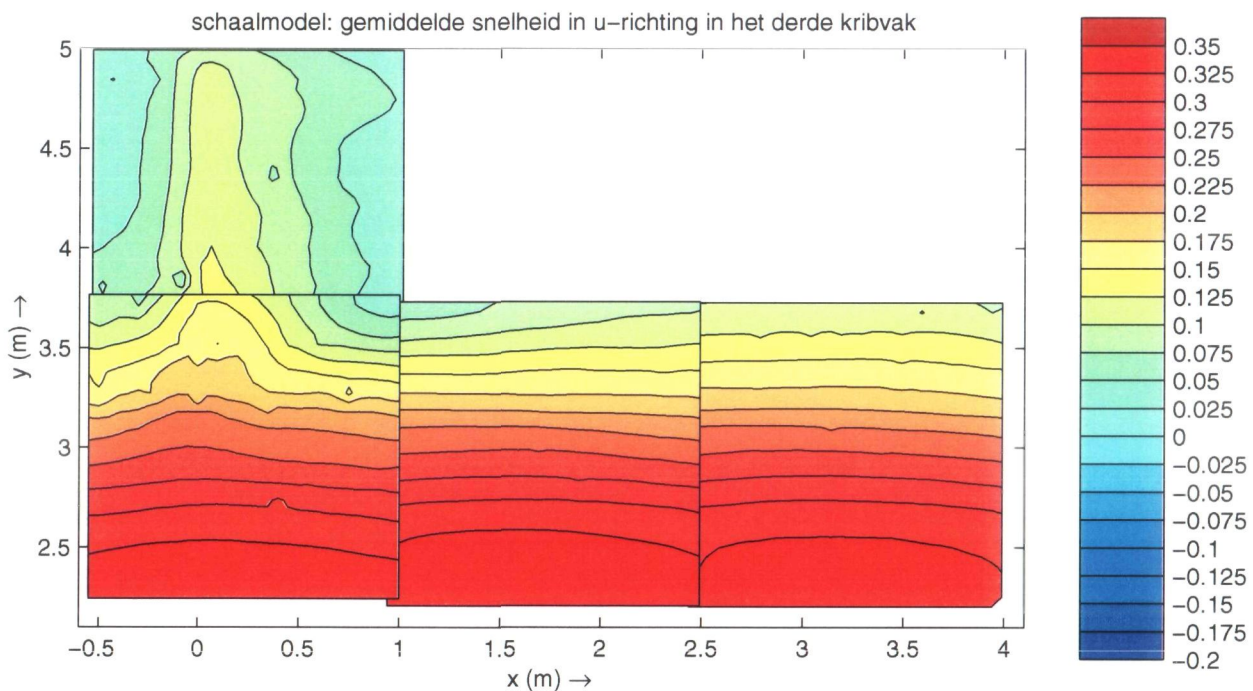
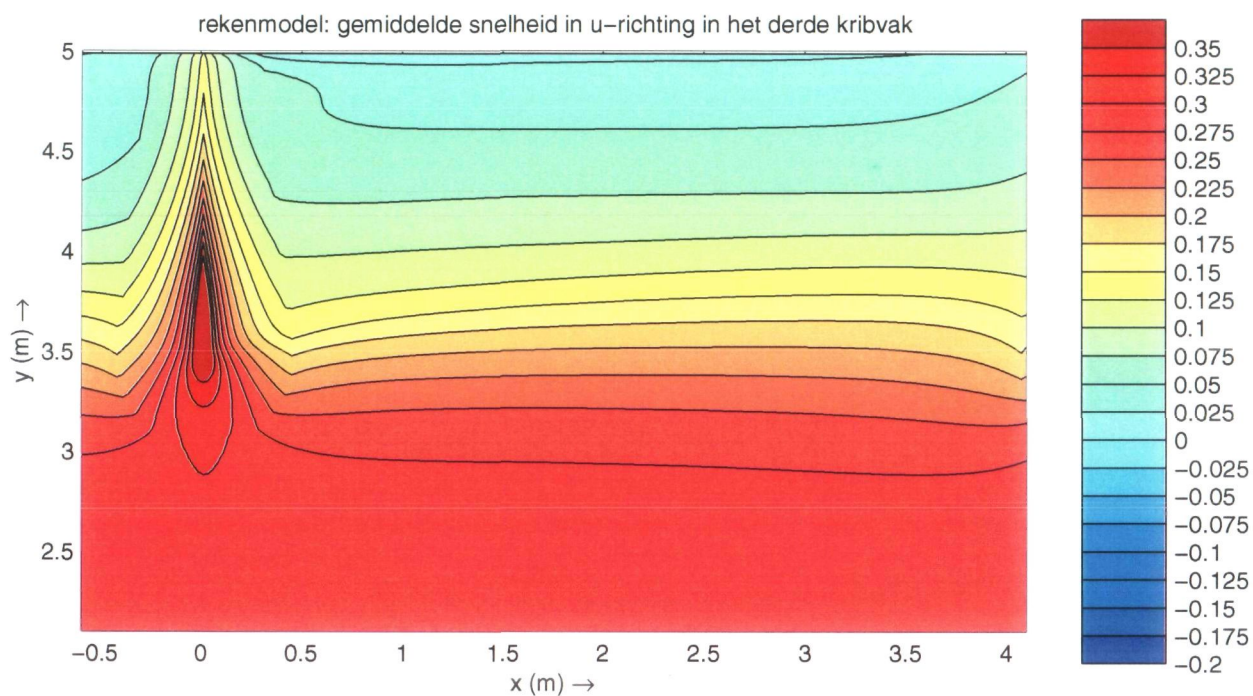


Tijds gemiddelde snelheden in u-richting in dwarsraaien

ov1

overstroomd 1:3





Gemiddelde snelheid in u-richting in het derde kribvak

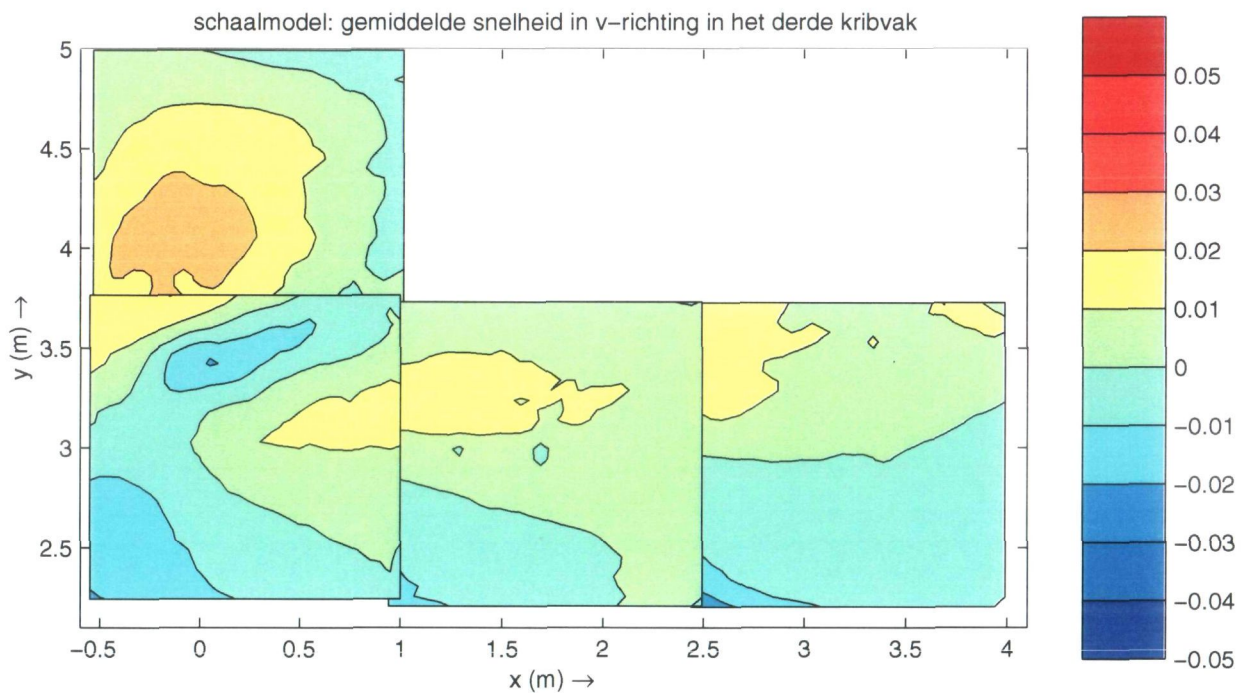
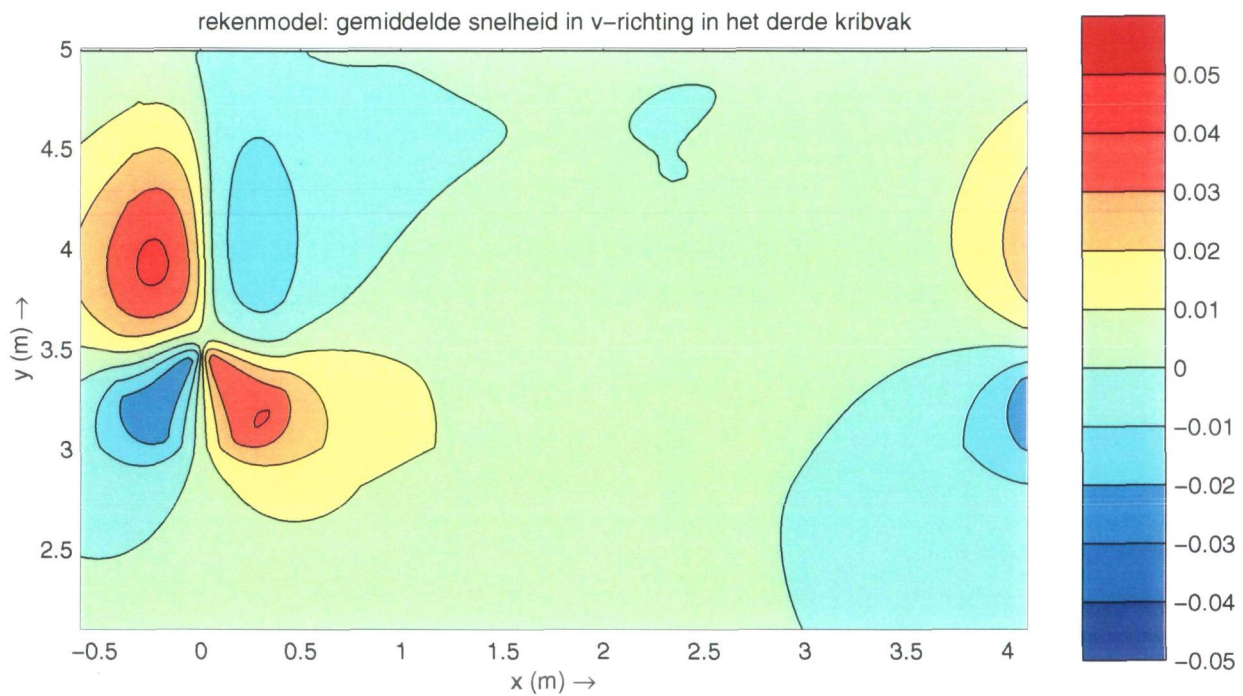
ov1

overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

C-4



Gemiddelde snelheid in v-richting in het derde kribvak

ov1

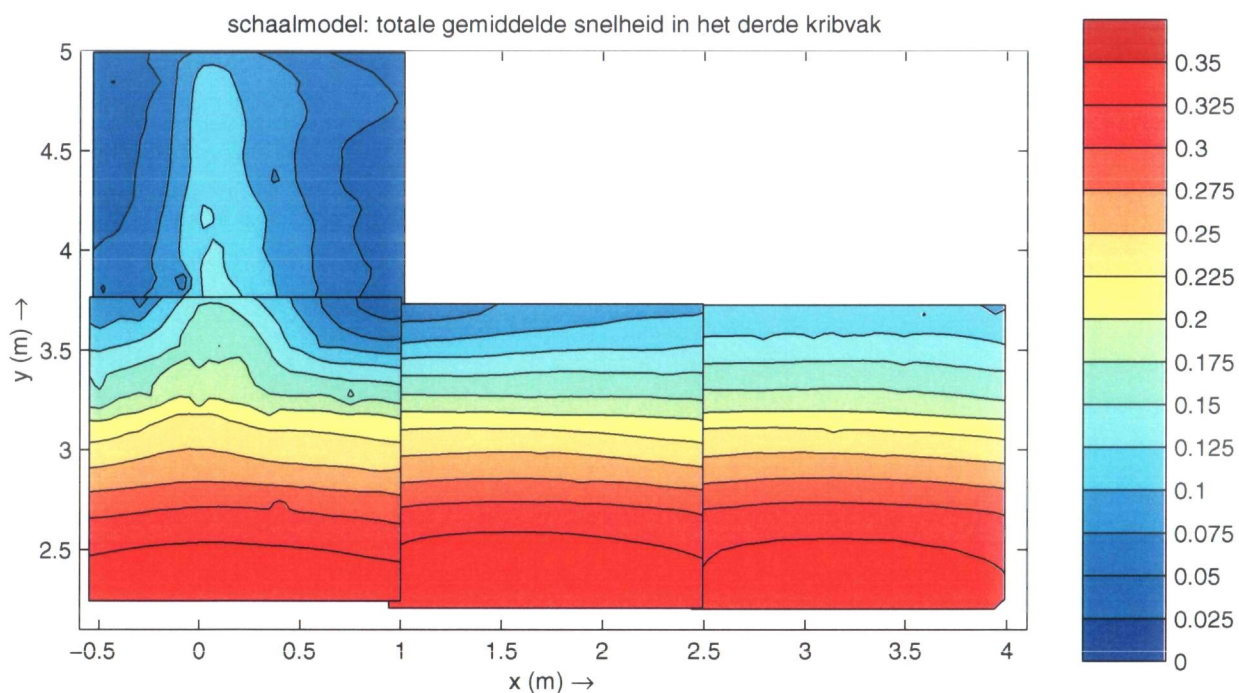
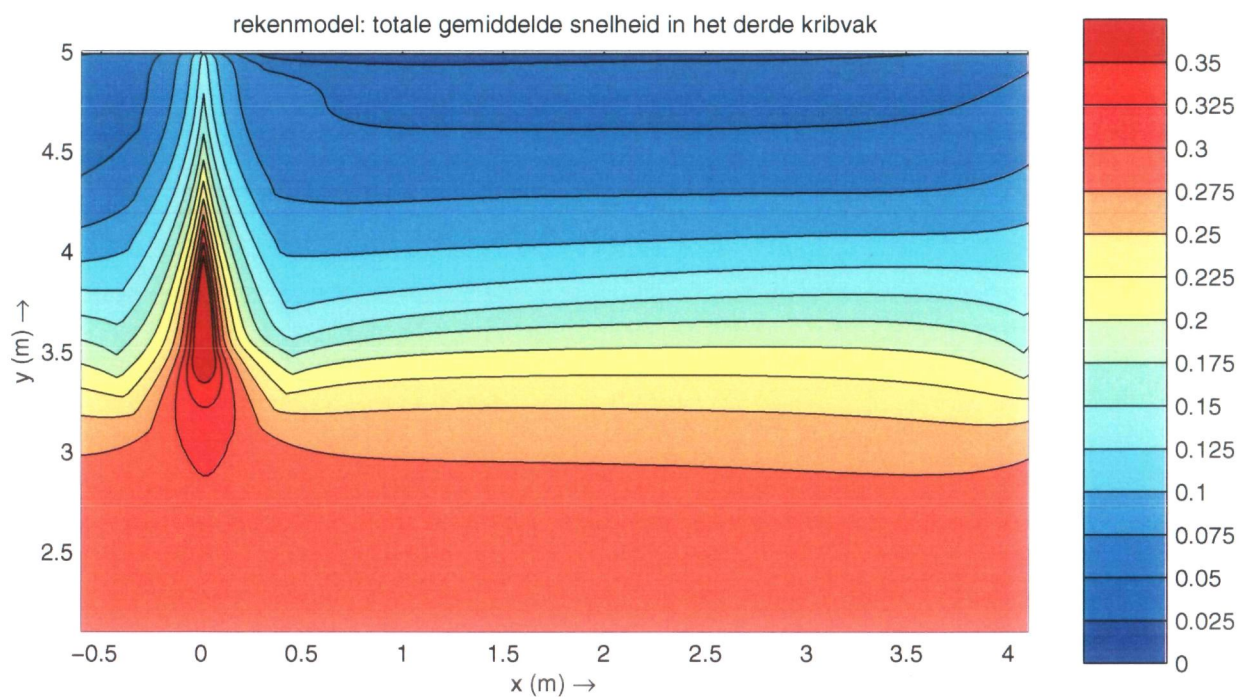
overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

C-5

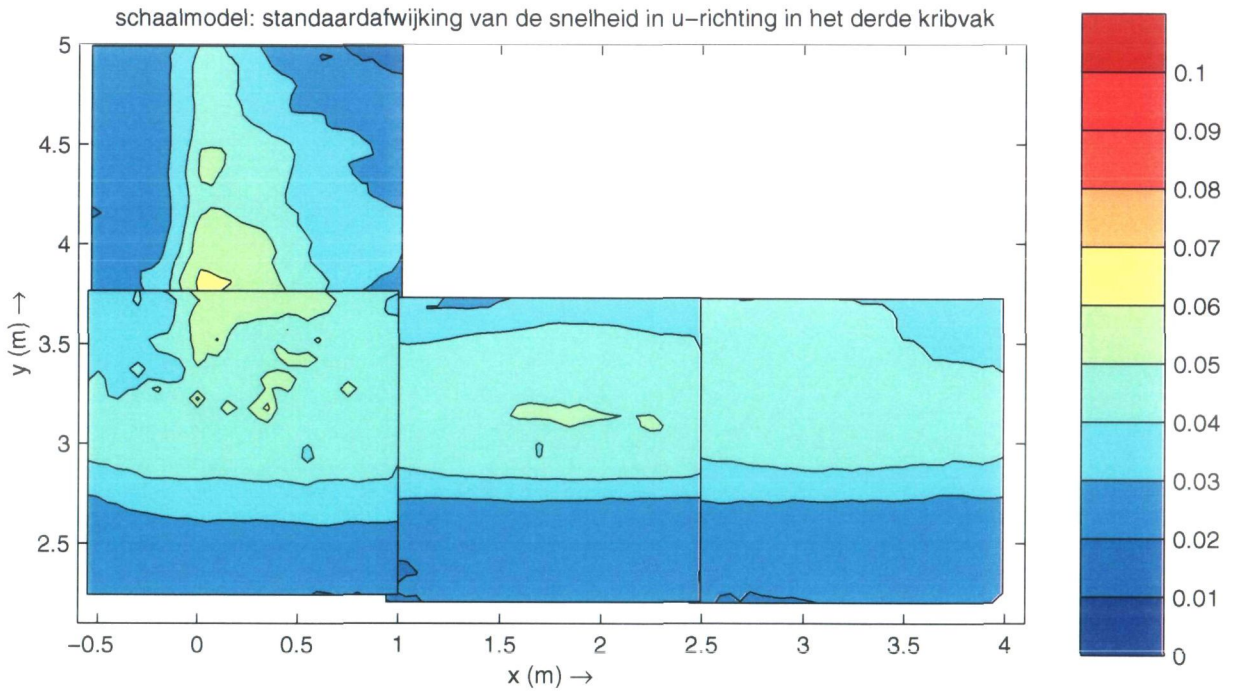
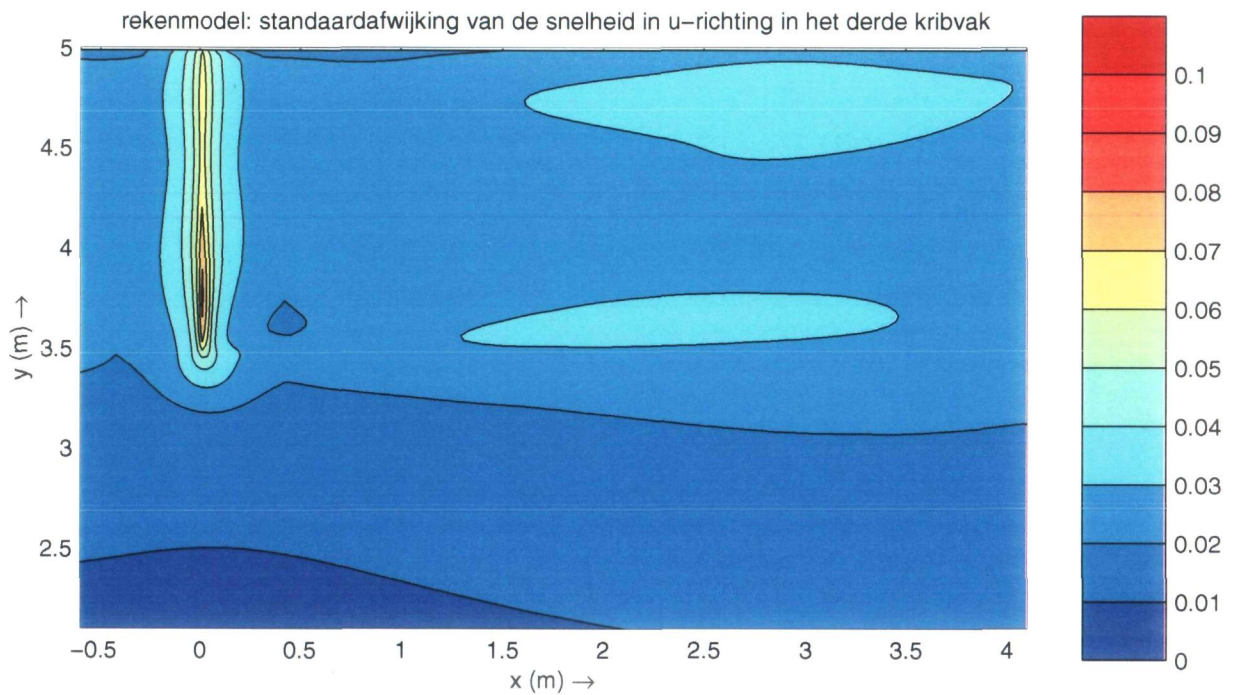




Totale gemiddelde snelheid in het derde kribvak

ov1

overstroomd 1:3



Standaardafwijking van de snelheid in u-richting  
in het derde kribvak

ov1

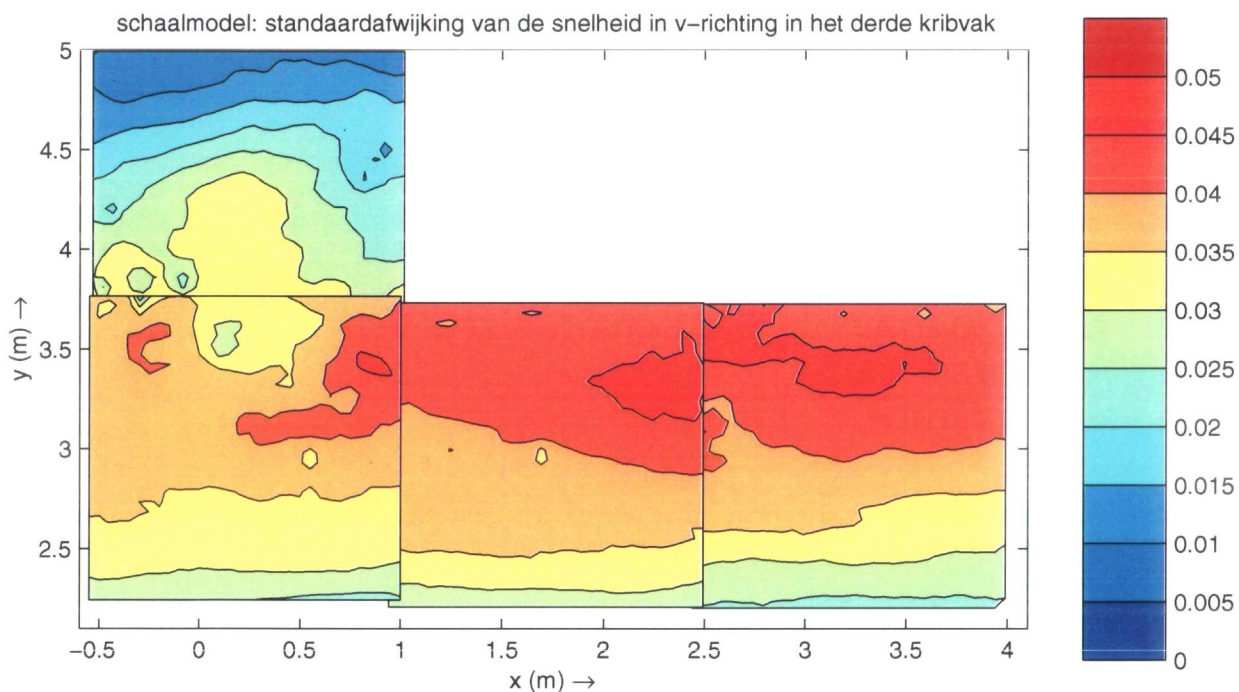
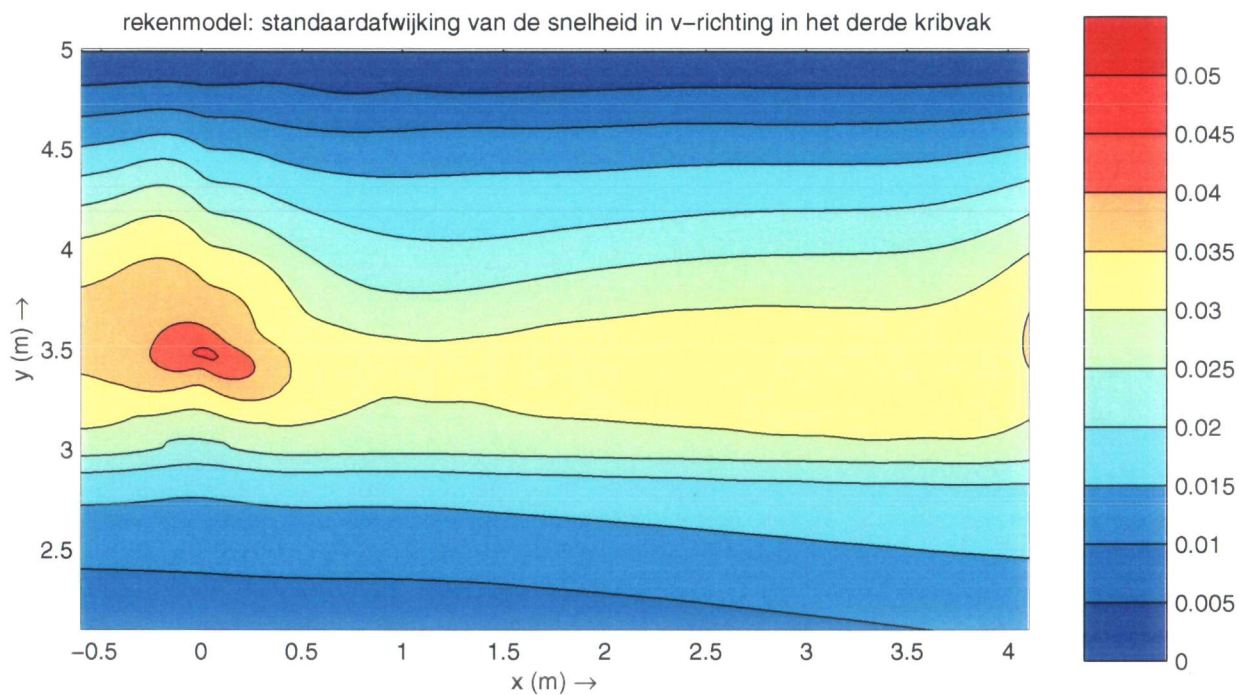
overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

C-7





Standaardafwijking van de snelheid in v-richting  
in het derde kribvak

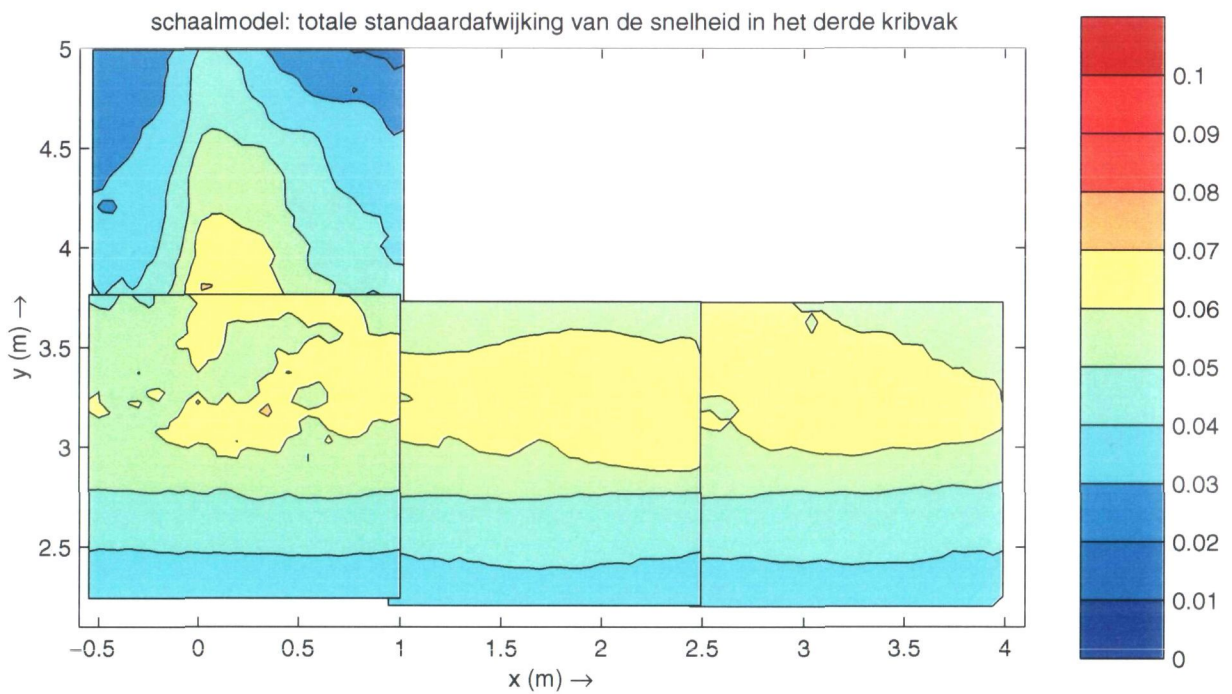
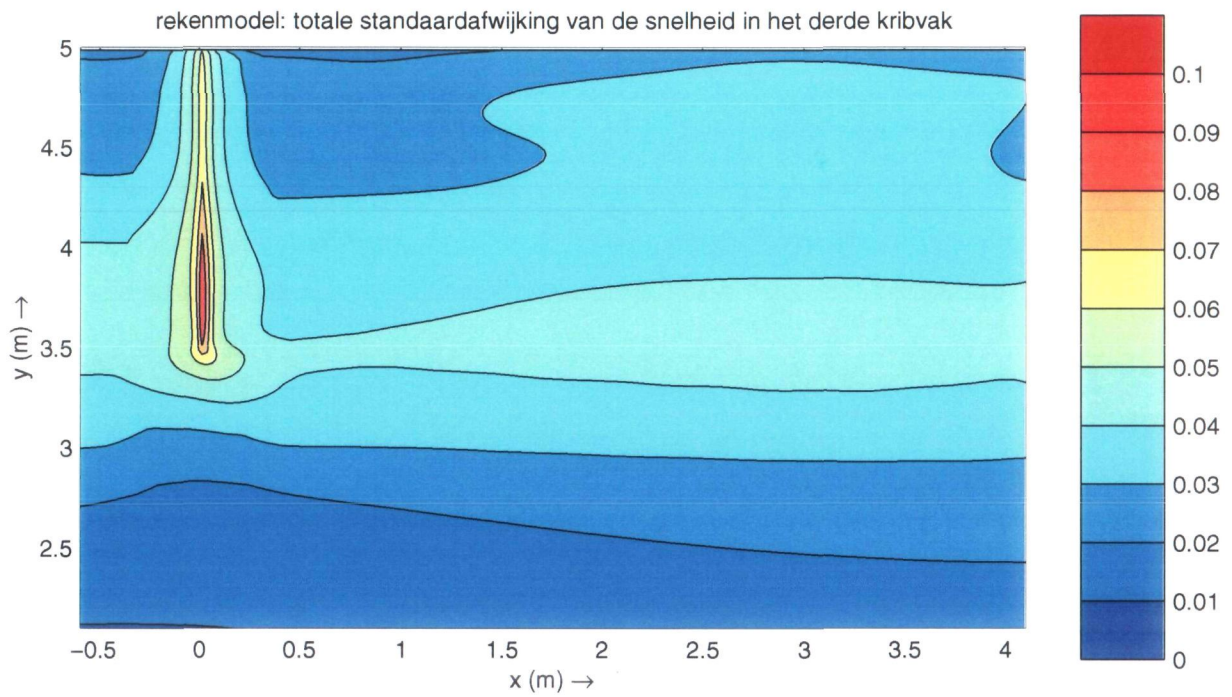
ov1

overstroomd 1:3

**WL | DELFT HYDRAULICS**

Q2973

C-8

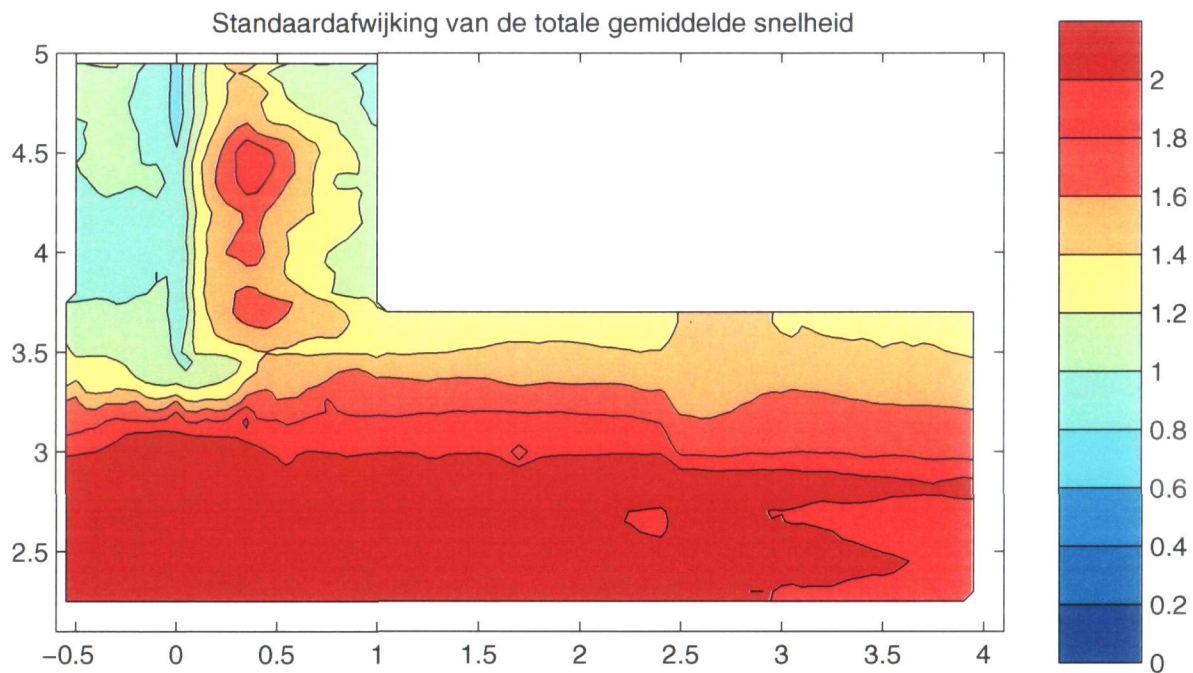
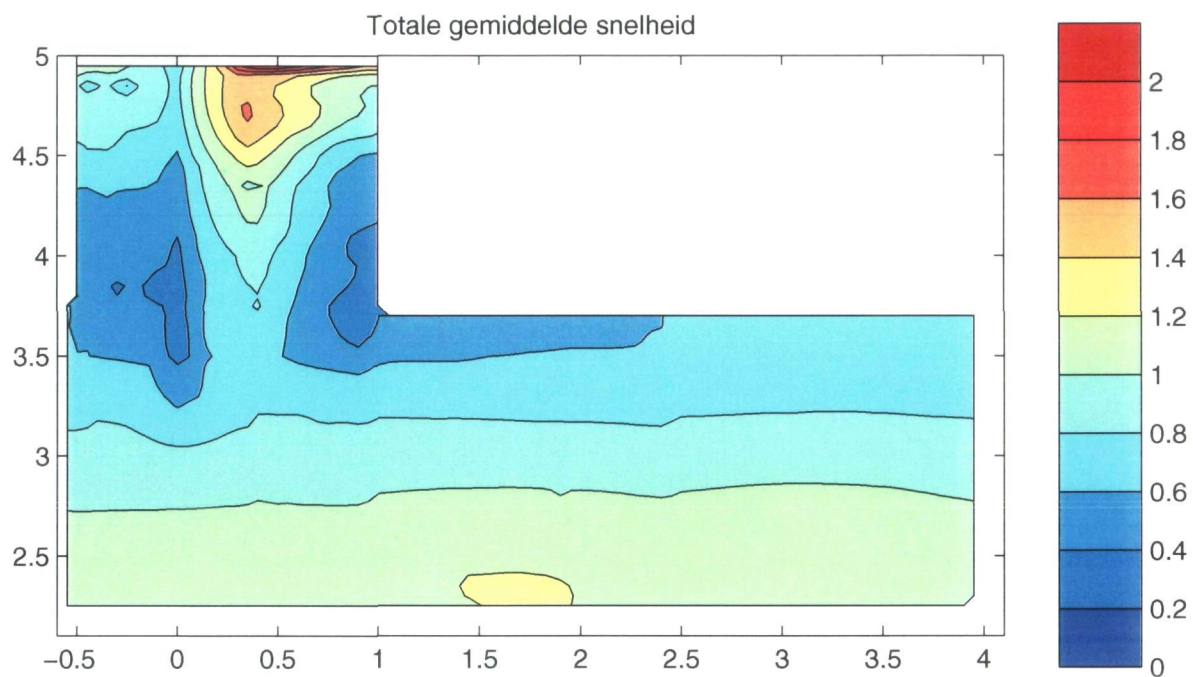


Standaardafwijking van de totale gemiddelde snelheid  
in het derde kribvak

ov1

overstroomd 1:3





Vershil tussen schaalmodel en rekenmodel  
snelheden schaalmodel gedeeld door snelheden rekenmodel

ov1

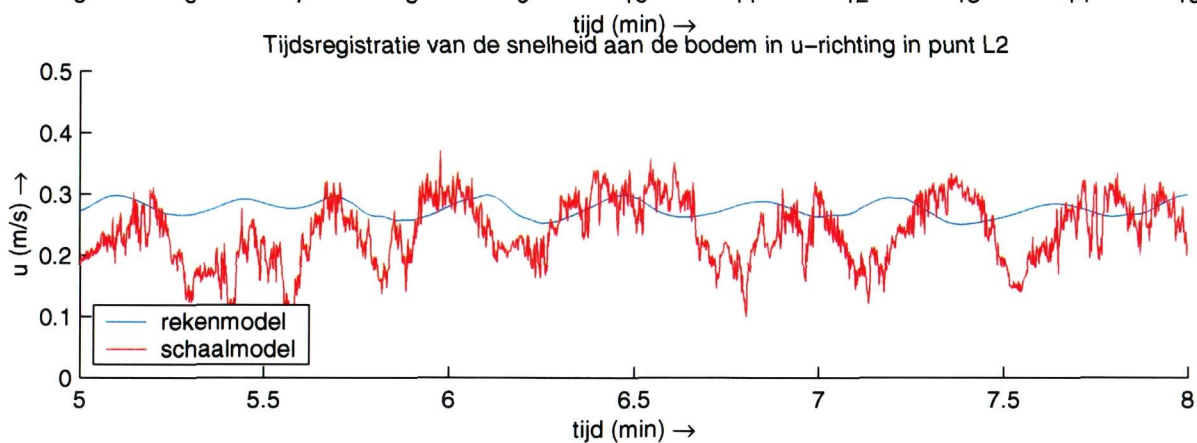
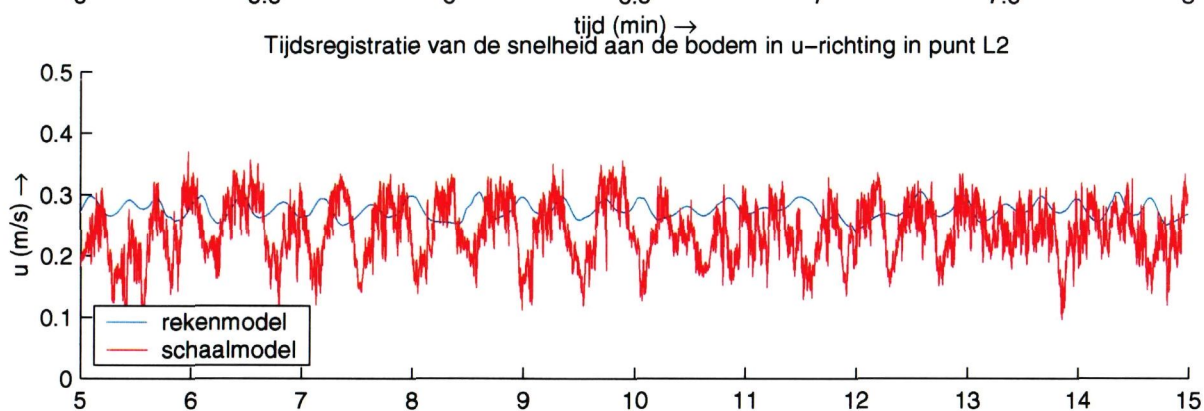
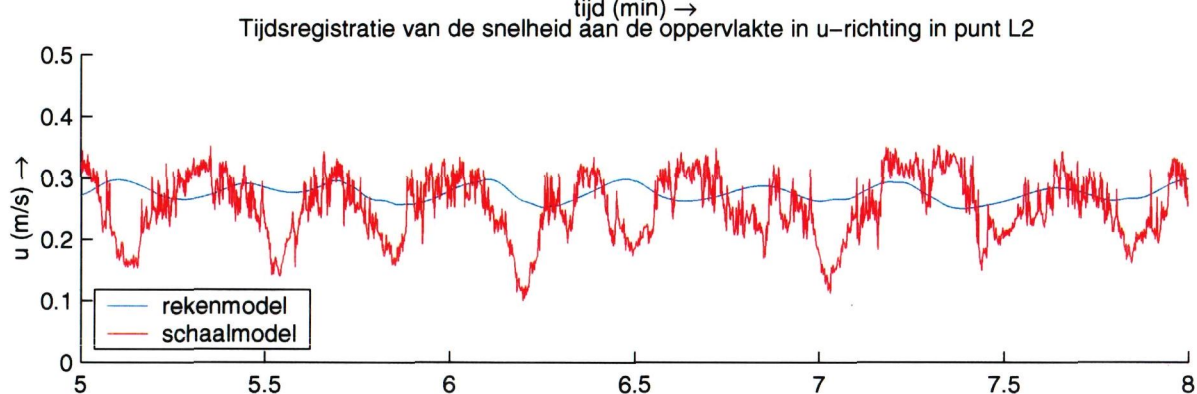
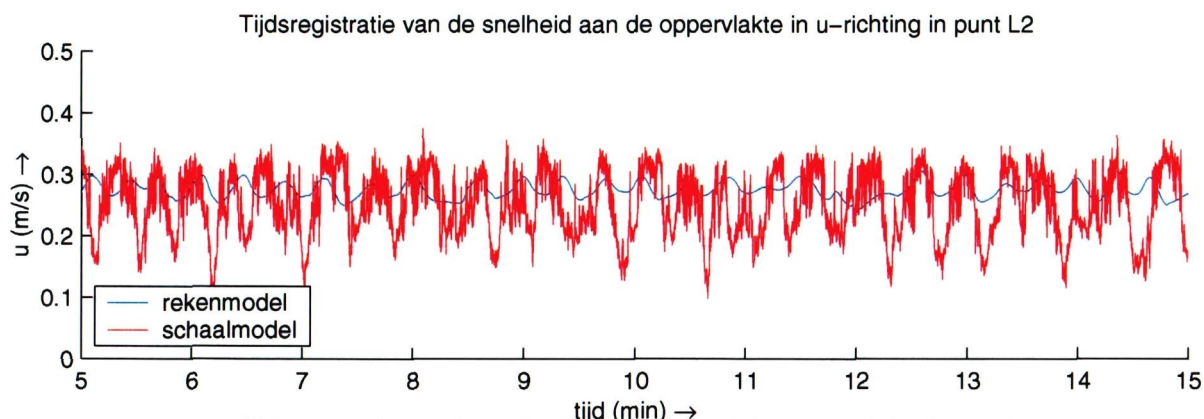
A2

overstroomd 1:3

WL | DELFT HYDRAULICS

Q2973

C-10



Tijdsregistratie van de snelheid in punt L2

ov1

overstroomd 1:3