

Opdrachtgever:

RWS, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Rekenregels steenbestortingen: stromingsbelasting en transportmodel

Aanvullende werkzaamheden op VOP 2000, Steenstabiliteit

Verslag onderzoek

december 2001

Opdrachtgever:

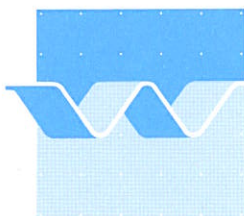
RWS, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Rekenregels steenbestortingen: stromingsbelasting en transportmodel

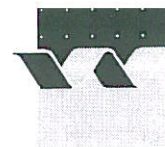
Aanvullende werkzaamheden op VOP 2000, Steenstabiliteit

Verslag onderzoek

december 2001



wL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

TITEL: Rekenregels steenbestortingen: stromingsbelasting en transportmodel.
Aanvullende werkzaamheden op VOP 2000, Steenstabiliteit.

SAMENVATTING:

In voorgaande jaren 1998-2000 is door RWS-DWW en WL | Delft Hydraulics in het kader van het Voortschrijdend Onderzoek Programma (VOP) het samenwerkingsproject 'Steenstabiliteit' uitgevoerd. DWW voert in het verlengde van dit project vervolgvactiteiten uit; deze zijn gericht op het ontwikkelen van rekenregels voor steenbestortingen. In relatie hiermee heeft DWW het WL verzocht een aantal aanvullende werkzaamheden te verrichten op het in 2000 uitgevoerde werk onder project 'Steenstabiliteit'.

De aanvullende werkzaamheden zijn in de periode oktober - december 2001 uitgevoerd en betroffen: Stroomsnelheidsmetingen die in 1999 door M. de Gunst bij de TUD zijn verricht in een schaalmodel (meting met LDA (laser), 2D, horizontaal en vertikaal), zijn verder uitgewerkt en vergeleken met resultaten van vorig jaar bij WL uitgevoerde CFX berekeningen en nieuwe CFX berekeningen. Ook zijn metingen in het WL schaalmodel M711 [Van der Werff, 1966] verder uitgewerkt en vergeleken met CFX metingen. De vergelijking betref de horizontale stroomsnelheid vóór, boven en achter een drempel met voor- en achtertalud onder een helling van achtereenvolgens 1:8 en 1:2. Daarnaast is een bij WL in ontwikkeling zijnd transport- en schademodel verder ontwikkeld. De verdere ontwikkeling betref het uitwerken van de aanbevelingen die zijn gedaan in rapport Q2650 [WL, DWW, 2000]. Het aldus aangepaste model is toegepast op de situatie van de afstap, zoals onderzocht door M. de Gunst (zie hiervoor). Daarbij is zowel gebruik gemaakt van de resultaten van de metingen als van de resultaten van CFX berekeningen voor de afstap.

De uitgevoerde werkzaamheden sluiten nauw aan bij werk dat in het kader van doelsubsidie RWS in 2001 is uitgevoerd (project Q2933, zie de betreffende rapportage). Het uiteindelijke doel van alle genoemde werkzaamheden is tweërlei: (i) het verder onderbouwen van de methode om de dynamische stromingsbelasting op een granulaire verdediging te berekenen met behulp van een numeriek model met k-epsilon turbulentiemodellering, en (ii) het verder ontwikkelen van een ontwerp-methodiek voor de toplaag van een granulaire verdediging op basis van een schadefunctie (transportmodel).

REFERENTIES: Overeenkomst nr DWW-2000, gedateerd 2 oktober 2001, kenmerk AB/015228

VER.	AUTEURS	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
02	T.H.G. Jongeling	20 december 2001		H.J. Verheij	P.C.G. Glas
	H.J. Verheij	20 december 2001		T.H.G. Jongeling	
PROJECTNUMMER:		Q3107			
TREFWOORDEN:		Granulaire verdediging, stromingsbelasting, k-ε turbulentiemodel, steenstabiliteit, steentransport.			
INHOUD:	TEKST	TABELLEN	FIGUREN	APPENDICES	
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG	<input type="checkbox"/> CONCEPT	<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

Inhoud

1	Inleiding	1-1
2	Stromingsbelasting.....	2-1
2.1	Metingen De Gunst.....	2-1
2.1.1	Beschrijving van het schaalmodel De Gunst en het CFX rekenmodel	2-1
2.1.2	Stroomsnelheidsmetingen in het model De Gunst	2-3
2.1.3	Vergelijking metingen met berekeningen	2-5
2.2	Metingen in model M711	2-14
2.2.1	Beschrijving van het schaalmodel M711 en het CFX rekenmodel	2-14
2.2.2	Stroomsnelheidsmetingen	2-16
2.2.3	Vergelijking metingen met berekeningen	2-16
2.3	Conclusies.....	2-18
3	Transportmodellering.....	3-1
3.1	Inleiding.....	3-2
3.2	Verschijselen bij een afstap en schade bij experimenten.....	3-3
3.2.1	Verschijselen.....	3-3
3.2.2	Onderzochte situatie.....	3-5
3.3	Modelleren schadeniveau.....	3-6
3.3.1	Inleiding.....	3-6
3.3.2	Uitgangspunten en aannames.....	3-6
3.3.3	Schadeniveau.....	3-7
3.3.4	Experimentele spoor.....	3-10
3.3.5	Numerieke spoor	3-11
3.3.6	Empirische spoor.....	3-13
3.4	Voorbeeld	3-15
3.4.1	Resultaten experimentele spoor.....	3-16
3.4.2	Resultaten numeriek spoor.....	3-18
3.4.3	Resultaten empirische spoor	3-18
3.4.4	Nadere analyse resultaten.....	3-19
3.5	Conclusies.....	3-21

Bijlage A: Afleiding van een formule voor het schadeniveau voor het vertragingsgebied achter een afstap

Bijlage B: Voorbeeld Excel-sheet met berekening schadeniveau

Tabellen 2.1 t/m 2.4

Figuren 2.0 t/m 2.14a

Figuren 3.1 t/m 3.13

I Inleiding

In voorgaande jaren 1998-2000 is door RWS-DWW en WL | Delft Hydraulics in het kader van het Voortschrijdend Onderzoek Plan (VOP) het samenwerkingsproject 'Steenstabiliteit' uitgevoerd. DWW voert in het verlengde van dit project vervolgvaciteiten uit; deze zijn gericht op het ontwikkelen van rekenregels voor steenbestortingen. In relatie hiermee heeft DWW het WL verzocht een aantal aanvullende werkzaamheden te verrichten voor het in 2000 uitgevoerde werk onder project 'Steenstabiliteit'.

De met DWW overeengekomen werkzaamheden zijn in 'Overeenkomst nr DWW-2000' omschreven en vastgelegd; de begeleidende brief bij deze overeenkomst is gedateerd 2 oktober 2001 en heeft als kenmerk AB/015228.

De opgedragen werkzaamheden bestaan uit:

1. Verdere uitwerking van de stroomsnelheidsmetingen die door M. de Gunst bij de TUD zijn verricht in een schaalmodel (meting met LDA (laser), 2D, horizontaal en vertikaal), en vergelijking van deze metingen met resultaten van vorig jaar bij WL uitgevoerde CFX berekeningen. De uit te werken situaties betreffen stroming over een vlak bed en stroming over een afstap. De meetresultaten van De Gunst zijn in digitale vorm vastgelegd in een aantal meetfiles. De cd's met files waren reeds in het bezit van WL evenals een globale beschrijving van de inhoud van de files, en kunnen in het onderhavige project worden gebruikt. Op basis van de meetseries worden tijdgemiddelde waarden van de stroomsnelheid berekend in diverse punten in vertikalen, alsmede de standaardafwijking van deze stroomsnelheden. Deze grootheden worden samen met resultaten van overeenkomstige CFX berekeningen in figuren geplot en onderling vergeleken. Ook worden op basis van de metingen turbulentie-intensiteiten bepaald. Voorts: nadere uitwerking van metingen in het WL schaalmodel M711 [Van der Werff, 1966]. Het betreft hier de horizontale stroomsnelheid vóór, boven en achter een drempel met voor- en achtertaluud onder een helling van achtereenvolgens 1:8 en 1:2. De stroomsnelheden zijn destijds gemeten met pitotbuizen; de oorspronkelijke aflezingen zijn niet meer beschikbaar maar in het rapport M711 zijn de meetwaarden in vertikalen afzonderlijk uitgezet. De meetwaarden (dit zijn tijdgemiddelde waarden) worden afgelezen en samen met resultaten van overeenkomstige CFX berekeningen in figuren geplot en onderling vergeleken.
2. Verdere ontwikkeling en toepassing van een bij WL in ontwikkeling zijnde transport- en schademodel in een verdragingsgebied benedenstrooms van een drempel. De verdere ontwikkeling betreft hier het uitwerken van de aanbevelingen die zijn gedaan in rapport Q2650 [WL, DWW, 2000] namelijk: implementatie van de ontwikkeling van de grenslaag aan de bodem vanaf het 'reattachment point' van de stroming, en implementatie van lengte- en breedte-effecten. Het optreden van 'negatieve erosie' wordt ondervangen door overgang op een andere schematisatie. Het aangepaste model wordt op de situatie van de afstap, zoals onderzocht door M. de Gunst (zie hiervoor), toegepast. Daarbij wordt zowel gebruik gemaakt van de resultaten van de metingen als van de resultaten van CFX berekeningen voor de afstap.

De werkzaamheden zijn in de periode oktober - november 2001 uitgevoerd. De werkzaamheden genoemd onder punt 1 zijn verricht door H.R.A. Jagers, F.X. Suryadi en T.H.G. Jongeling (project leider) en gerapporteerd in Hoofdstuk 2. De werkzaamheden genoemd onder punt 2 zijn verricht door C. Stolker en H.J. Verheij en gerapporteerd in Hoofdstuk 3. De formuleringen van het schademodel zijn in bijlage A ondergebracht.

De uitgevoerde werkzaamheden sluiten nauw aan bij het werk dat in het kader van doelsubsidie RWS in 2001 is uitgevoerd (project Q2933, zie de betreffende rapportage). Het uiteindelijke doel van alle genoemde werkzaamheden is tweeërlei: (i) het verder onderbouwen van de methode om de dynamische stromingsbelasting op een granulaire verdediging te berekenen met behulp van een numeriek model met k-epsilon turbulentiemodellering (door middel van vergelijking van stromingsmetingen met stromingsberekeningen), en (ii) het verder ontwikkelen van een ontwerpmethodiek voor de toplaag van een granulaire verdediging op basis van een schadefunctie (transportmodel).

2 Stromingsbelasting

In dit hoofdstuk worden de resultaten van verdere uitwerking van stroomsnelheidsmetingen in het schaalmodel van De Gunst [De Gunst, 1999] en schaalmodel M711 [Van der Werff, 1966] gerapporteerd. Het betreft hier achtereenvolgens stroming over een vlak bed, stroming over een afstap en stroming over een drempel met taluds. De meetresultaten worden vervolgens vergeleken met resultaten van berekeningen die voor overeenkomstige situaties zijn uitgevoerd met het numerieke modelsysteem CFX met k-epsilon turbulentiemodellering. Deze werkzaamheden zijn - als vervolg op het eerdere werk in onderzoek Q2650 [WL, DWW, 2000] - van belang voor de vraag of een numeriek model met k-epsilon turbulentiemodellering geschikt is voor de berekening van een representatieve grootte voor de stromingsbelasting op een granulaire verdediging.

2.1 Metingen De Gunst

2.1.1 Beschrijving van het schaalmodel De Gunst en het CFX rekenmodel

Hieronder wordt een beschrijving gegeven van het schaalmodel van De Gunst en het CFX rekenmodel dat met de twee in het schaalmodel onderzochte geometrieën correspondeert. Zie ook de eerdere verslaggeving in rapport Q2650 [WL, DWW, 2000].

Het model van De Gunst was gebouwd in een goot die was voorzien van glazen wanden en een multiplex plafond. De lengte van het model bedroeg 14 m ($x = 0$ is het begin van het model), de breedte 0,4 m en de hoogte (maat tussen bodem en multiplex plafond) 0,2 m. In het fysische model was een granulaire bodemverdediging aangebracht vanaf $x = 7$ m tot $x = 9,1$ m. De steensortering werd gekarakteriseerd door $M_{50} = 3,2$ gram, $D_{n50} = 10,82$ mm en $D_{n85} / D_{n15} = 1,32$ (soortelijke massa stenen $\rho_s \approx 2700$ kg/m³). Met $D_{n50} = 0,84 \cdot D_{50}$ wordt gevonden $D_{50} = 12,88$ mm.

Het nulniveau van de bodem werd gedefinieerd als de gemiddelde ligging van de bovenkant van de stenen. In de situatie met afstap was over het eerste gedeelte van de goot een verhoging aangebracht (multiplex) met hoogte van 0,069 m boven het nulniveau, en verticale beëindiging op $x = 7,45$ m. De verhouding van h_{stap} (hoogte van de afstap) en de waterdiepte achter de afstap was hetzelfde als in een proefopstelling (case ST1) van Nakagawa en Nezu [Nakagawa et al, 1987].

Bij de proeven was de goot steeds geheel gevuld (dus geen vrije waterspiegel onder het multiplex plafond).

Het CFX-rekenmodel dat is gebruikt om de modelsituatie van De Gunst weer te geven (zowel zonder als met afstap), heeft als afmetingen: lengte 14 m, breedte 0,4 m en hoogte 0,2 m. Het rooster is opgebouwd uit 6 blokken en heeft een rechthoekige structuur. In de onderste helft zijn 50 lagen met een uniforme dikte van 2 mm aangebracht, de bovenste helft bestaat uit 20 lagen die naar boven toe lineair dikker worden en verlopen van 2 mm dikte tot 10 mm dikte. Tussen $x = 0$ m en $x = 7$ m verloopt de cellengte lineair van 500 mm tot 5 mm (36 cellen), tussen $x = 7$ m en $x = 9,5$ m zijn 201 cellen aanwezig met een lengte die lineair

verloopt van 5 mm tot 25 mm, en in het laatste deel tussen $x = 9,5$ m en $x = 14$ m zijn 28 cellen aanwezig met een lengte die lineair verloopt van 25 mm tot 500 mm. Het model is 1 cel breed; in totaal bestaat het model uit 18550 cellen (266 gridpunten horizontaal bij 71 gridpunten vertikaal). Bij de simulaties voor het vlakke bed zijn alle cellen actief. Het rooster is geplot in Figuur 2.0.

In de situatie met afstap zijn de cellen in het gebied $x = 0$ tot $x = 7$ m en over een hoogte van 70 mm uitgenomen. Het betreft hier een blok van 38 cellen horizontaal bij 34 cellen vertikaal, zodat in de simulaties voor de afstap in totaal 17258 cellen actief zijn. De beëindiging van de afstap ligt op $x = 7$ m. In het fysisch model lag de afstap op $x = 7,45$ m; bij de vergelijking van resultaten wordt de oorsprong van de x-as in het fysische model 0,45 m opgeschoven, waardoor de afstap een gelijke x-coördinaat heeft als in het CFX model.

Op de zijvlakken van het CFX rekenmodel zijn symmetrie-randvoorwaarden opgelegd. Met deze randvoorwaarden zijn er geen gradiënten mogelijk in het één cel brede model in de richting loodrecht op de stroming (de y-richting); dientengevolge worden k en ϵ alleen afgeleid van de snelheidsgradiënten in het verticale x-z vlak. Overigens, ook wanneer meer dan één cel in de richting loodrecht op het vlak van stroming wordt toegepast, ontstaan er bij toepassing van symmetrie-randvoorwaarden op de zijvlakken geen gradiënten in y-richting, en worden voor k en ϵ dezelfde waarden berekend als bij het één cel brede model (dit is geverifieerd!).

Het plafond had bij de berekeningen in onderzoek Q2650 [WL, DWW, 2000] een free-slip randvoorwaarde (de vloeistof kan dan wrijvingsloos langs de wand bewegen). Bij het huidige onderzoek zijn - om de schaalmodelsituatie beter te simuleren - aanvullende CFX berekeningen gemaakt, waarbij een zekere mate van ruwheid aan het plafond is toegekend. Deze ruwheid is gekarakteriseerd met een ruwheidshoogte van 0,5 mm (in CFX: RHT = roughness height).

In onderzoek Q2650 werd de ruwheid van de bodem in de situatie zonder afstap en dieptegemiddelde snelheid $U = 0,89$ m/s gekarakteriseerd met een ruwheidshoogte van 10,82 mm, gelijk aan de D_{n50} van de stenen in het fysische model van De Gunst. In de situatie met afstap en $U = 0,74$ m/s werd deze ruwheidshoogte gehanteerd voor het deel van de bodem ná de afstap; de ruwheid van de verhoogde bodem werd gekarakteriseerd met een ruwheidshoogte van 0,5 mm. In het huidige onderzoek zijn aanvullende CFX berekeningen gemaakt voor genoemde twee situaties, waarbij de met stenen verdedigde bodem is gekarakteriseerd met een ruwheidshoogte van $2D_{n50} = 21,64$ mm.

Alle boven genoemde ruwheidsmaten zijn zodanig dat bij de beschouwde stroomsnelheden sprake is van een hydraulisch ruwe wand. Als ElogR waarde is bij de CFX-berekeningen daarom een waarde van 30 ingevoerd (in CFX is ElogR een dimensieloze ruwheidsgrootte, die een rol speelt in wandfuncties; de ElogR waarde en de RHT waarde zijn samen bepalend voor de effectieve ruwheid van de wand).

Als randvoorwaarde op de instroomrand is de mass-flow voorwaarde gehanteerd. Met deze voorwaarde wordt de hoeveelheid instromende watermassa (in kg/s) voorgeschreven; de snelheidsverdeling op de instroomrand is daarbij vrij en wordt door CFX zelf in het iteratieproces bepaald. Op de uitstroomrand is eveneens de mass-flow voorwaarde

gehanteerd. Default waarden zijn gebruikt voor de soortelijke massa ρ en de dynamische viscositeit μ van water (bij de opgegeven temperatuur van 20 C).

Bij het rekenproces zijn standaard 5000 iteraties toegepast; dit aantal was ruim voldoende om een stationaire situatie (zonder verdere veranderingen in rekenresultaten) te verkrijgen. In de situatie zonder afstap is het standaard k- ϵ turbulentiemodel toegepast; bij de berekeningen met afstap is de voorkeur gegeven aan het gebruik van het RNG k- ϵ turbulentiemodel vanwege de grotere gradiënten in de stroomsnelheid achter de afstap. Overigens bleek bij andere, verkennende berekeningen in onderzoek Q2650, bij weliswaar aanzienlijk lagere stroomsnelheden, dat de resultaten behaald met het standaard k- ϵ turbulentiemodel weinig verschilden van die behaald met het RNG k- ϵ turbulentiemodel.

Een overzicht van uitgevoerde CFX berekeningen wordt in Paragraaf 2.1.3 getoond.

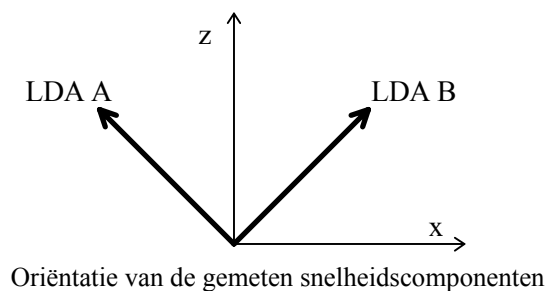
2.1.2 Stroomsnelheidsmetingen in het model De Gunst

In het model van De Gunst zijn zowel bij de proeven met stroming over een vlak bed als bij de proeven met stroming over een afstap stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd met LDA (laser), naast drukmetingen op de bodem en een snelheidsmeting met EMS op een vast punt in de aanstroming. Hier worden alleen de LDA metingen beschouwd.

Er is met LDA gemeten in een aantal vertikalen in de langsas van de goot. De snelheidsmetingen betreffen de componenten in horizontale richting (x-richting) en verticale richting (z-richting). Bij de metingen zijn filters gebruikt; de LDA meetsignalen zijn afgefilterd boven een frequentie van 100 Hz. Soms is ook het deel kleiner dan 0,1 Hz afgefilterd (alleen het dynamisch deel blijft dan over). Deze laatste signalen zijn hier niet gebruikt.

De signalen zijn vervolgens bemonsterd met een frequentie van 200 Hz. De gebruikte sample- en filterfrequenties zijn ruim voldoende om turbulenties in de stroming, opgewekt door viscositeit (schuifspanningen in het water), bodemruwheid en obstakels, te meten. De duur van de metingen bedroeg in alle gevallen minimaal 300 s.

De LDA signalen zoals opgeslagen op de CD's met meetdata, betreffen niet de snelheidscomponenten in x- en z-richting, maar stellen de snelheid (m/s) voor in twee onderling loodrechte richtingen in een assenstelsel dat een hoek van 45° maakt met het x-z assenstelsel.



De snelheidscomponenten u en w in respectievelijk x- en z-richting zijn uit de meetdata (snelheidscomponenten A en B) afgeleid door middel van de volgende transformaties:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{2} \sqrt{2} (B - A) \\ w &= \frac{1}{2} \sqrt{2} (B + A) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Van de op deze wijze gevormde tijdreeksen voor u en w zijn vervolgens tijdgemiddelden en standaarddeviaties bepaald. Voor de tijdgemiddelde waarde \bar{u} en standaardafwijking σ_u van u geldt (n = aantal samples):

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} u_i \\ \sigma_u &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \left(u_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} u_i \right)^2} \end{aligned} \quad (2.2)$$

De snelheid u is positief in positieve x-richting (horizontaal, in stroomrichting). Op gelijke wijze zijn uit de tijdreeks voor de snelheid w de tijdgemiddelde waarde \bar{w} en de standaardafwijking σ_w bepaald. De snelheid w is positief in positieve z-richting (vanaf het bed omhoog).

Voor de situatie met stroming over een vlak bed zijn metingen gedaan bij een dieptegemiddelde stroomsnelheid U in de goot van 0,89 m/s. Deze snelheid correspondeert met de snelheid waarbij in het fysische model een enkele los geplaatste steen in een overigens gefixeerd bed door de stroming werd verplaatst. In deze situatie zijn de stroomsnelheidscomponenten u en w in vijf achter elkaar gelegen vertikalen gemeten, te beginnen op $x = 7,3$ m en vervolgens $x = 7,35$ m, $7,40$ m, $7,45$ m en $7,50$ m. In de eerste drie vertikalen zijn metingen gedaan op twaalf verschillende hoogtes boven het bed, in de laatste twee vertikalen zijn wat minder metingen verricht. De proef heeft als nummer: 2_2.

Voor de situatie met stroming over een afstap zijn metingen gedaan bij een dieptegemiddelde snelheid U van 0,74 m/s (in diepe deel goot). Ook hier betreft het een snelheid waarbij een enkele, losgeplaatste steen door de stroming werd verplaatst. Vertikalen zijn gemeten op $x = 7,3$ m, $7,35$ m, $7,40$ m, $7,45$ m, $7,465$ m, $7,50$ m, $7,55$ m en $7,60$ m. Dit betreft het gebied waar de straal terugkomt naar de bodem en waar de grootste schade aan de bodemverdediging ontstaat. In de vertikalen is op negen verschillende hoogtes boven het bed gemeten, het hoogste op 12 cm (3/5 van de totale waterhoogte). De proef heeft als nummer: 4_2.

In het schaalmodel van De Gunst zijn ook bij lagere stroomsnelheid snelheidsmetingen gedaan, maar het betreft hier puntmetingen, veelal bij proeven waarbij het debiet stapsgewijs werd opgevoerd. De CD's met meetdata bevatten enkele meetresultaten van deze proeven; deze meetresultaten zijn evenwel niet bruikbaar in het huidige onderzoek.

2.1.3 Vergelijking metingen met berekeningen

Hieronder wordt een overzicht gegeven van de CFX berekeningen die voor respectievelijk de situatie met stroming over een vlak bed (proef 2_2, dieptegemiddelde snelheid $U = 0,89$ m/s) en stroming over een afstap (proef 4_2, dieptegemiddelde snelheid $U = 0,74$ m/s in diepe deel achter afstap) zijn gemaakt.

Berekening	Situatie	Turbulentie-model	U (in diepe gedeelte) (m/s)	RHT plafond (mm)	RHT steenbed (mm)
m18	vlak bed	standaard k- ϵ	0,89	glad	10,82
m26	vlak bed	standaard k- ϵ	0,89	0,5	10,82
m28	vlak bed	standaard k- ϵ	0,89	0,5	21,64
m19	afstap	RNG k- ϵ	0,74	glad	10,82
m27	afstap	RNG k- ϵ	0,74	0,5	10,82
m29	afstap	RNG k- ϵ	0,74	0,5	21,64

In de vergelijking wordt allereerst gekeken naar de stationaire stroomsnelheidsverdeling in de vertikaal op verschillende lokaties in langsrichting van de goot en vervolgens naar de dynamische component van de snelheid in deze vertikalen.

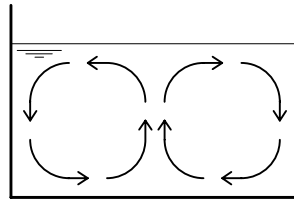
Stroming over een vlak bed

Stationaire component van de stroomsnelheid

De met behulp van CFX berekende u en w snelheidsprofielen op de meetlokaties zijn samen met de meetwaarden van De Gunst geplot in Figuur 2.1. De berekeningsresultaten (ber. m18) zijn weergegeven door middel van getrokken lijnen, de meetwaarden met punten. De overeenstemming tussen de berekende en gemeten u profielen (proef 2_2) is redelijk (bovenste plot in figuur 2.1), maar de metingen geven systematisch een wat hogere snelheid. Dit was verassend aangezien het debiet hetzelfde is bij meting en berekening. De gemeten snelheid op 0,18 m hoogte is evenwel steeds wat lager dan de berekende snelheid en dit geeft aan in welke richting de oplossing voor het verschil in snelheidsprofiel gezocht moet worden. Bij de experimenten was de goot aan de bovenzijde afgesloten door een multiplex plaat, welke in het CFX model, ber. m18, gemodelleerd was als een wrijvingsloze wand. De ruwheid van de plaat blijkt - gezien de meetresultaten - evenwel niet verwaarloosbaar te zijn. De berekening is daarom herhaald, waarbij het plafond is gemodelleerd als een hydraulisch ruwe wand met een k_s -waarde van 0,5 mm (dezelfde waarde als gebruikt voor de afstap, welke ook was gemaakt van multiplex). De resultaten van deze nieuwe simulatie, ber. m26, zijn in Figuur 2.1 aangegeven met de streeplijn. De overeenstemming met de metingen is nu zeer goed voor de u component van de snelheid. De maximale waarde van u bedraagt ca 1,0 m/s.

De w component van de snelheid is in beide CFX simulaties (ber. m18 en ber. m26) gelijk aan 0 over het gehele verticale profiel (onderste plot in Figuur 2.1); dit is in een volledig ontwikkelde stroming over een vlak, horizontaal bed met constante ruwheid ook op puur

theoretische gronden te verwachten. De metingen geven alleen in de meest bovenstroomse vertikaal een waarde 0 voor de w component van de stroomsnelheid. In stroomafwaartse richting gaande wordt de w component ongelijk aan 0 en neemt bovendien toe (de afwijking ten opzichte van 0 is absoluut gezien echter niet zo groot, maximaal ca 0,02 m/s). Een fysische verklaring voor dit verschijnsel zou kunnen zijn dat in de goot een secundair stromingspatroon is opgetreden in het traject waar de metingen zijn verricht, bestaande uit twee tegengesteld draaiende spiraalstromingen. Het ontstaan van dit stromingspatroon lijkt niet onmogelijk bij de relatief grote breedte-diepte verhouding van de goot zoals geschetst in de onderstaande figuur.



Twee spiraalstromingen naast elkaar met
positieve verticale snelheidscomponent in het midden.

Een andere verklaring voor de oplopende waarde voor w kan mogelijk worden gevonden in de meetapparatuur; de geconstateerde afwijking zou ontstaan kunnen zijn door een geleidelijk verloop van de nul-waarde van de LDA meetapparatuur of, eventueel doch minder waarschijnlijk, door een geleidelijke verdraaiing van de meetapparatuur (meetrichtingen A en B). Het nulpuntsverloop c.q. de verdraaiing moet daarbij ook de u component hebben beïnvloed, maar omdat het effect relatief klein is, is deze in de u component niet opvallend.

Een eventueel opgetreden verloop van de nul-waarde van de LDA meetapparatuur heeft geen invloed op de dynamische component.

Dynamische component van de stroomsnelheid

De dynamische component van de stroomsnelheid wordt in de CFX berekeningen gerepresenteerd door de turbulente kinetische energie k . De relatie tussen k en de standaardafwijking $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ van de stroomsnelheid in de drie hoofdrichtingen x, y en z is:

$$k = \xi \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad (2.3)$$

Per definitie wordt gesteld (zie o.a. [Rodi, 1984]) dat de evenredigheidsfactor ξ gelijk is aan:

$$\xi = 0,5 \quad (2.4)$$

In het schaalmodel van De Gunst zijn alleen de componenten van de stroomsnelheid in x - en z -richting gemeten. In de vergelijking van meting en berekening kan dus alleen worden beschikt over de standaardafwijking σ_u van u en σ_w van w . De standaardafwijking σ_v van

de snelheidscomponent v in y -richting dient daarom te worden ingeschat. Aangenomen wordt dat σ_v de volgende relatie heeft met σ_u en σ_w :

$$\sigma_v^2 = \lambda \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_w^2) \quad (2.5)$$

Bij tweedimensionale stromingen (stromingen met geringe variatie in de richting loodrecht op het verticale langsvlak in de stroming) wordt veelal aangenomen dat:

$$\lambda = 0,5 \quad (2.6)$$

De uit de metingen berekende standaardafwijkingen σ_u van u en σ_w van w zijn in Figuur 2.3 uitgezet. Met gebruikmaking van bovenstaande relaties (2.3) en (2.5) is uit de standaardafwijkingen van de gemeten stroomsnelheden u en w de turbulente kinetische energie (TKE) k berekend; daarbij is voor ξ de waarde 0,5 gehanteerd. De waarde van λ is initieel gelijk aan 0 gesteld; deze waarde bleek al tot een goede overeenkomst te leiden tussen de waarden van k berekend uit de metingen en de waarden van k berekend met CFX (opm.: bij deze CFX-berekeningen was de bodemruwheid: $k_s = D_{n50}$). Op de waarde van λ zal later worden teruggekomen. De berekende en 'gemeten' k -waarden zijn in Figuur 2.2 uitgezet.

Figuur 2.2 laat ook zien dat de TKE nabij het plafond groter is wanneer in de CFX berekening een geringe ruwheid aan het plafond wordt toegekend (vergelijk ber. m18, getrokken lijn (glad plafond), en ber. m26, streeplijn (ruw plafond)).

Het knikje nabij de bodem in de k profielen van de CFX berekeningen wordt veroorzaakt door een lokale lineaire benadering van het logaritmische snelheidsprofiel. Deze knik kan worden voorkomen door gebruik te maken van een logaritmische verdeling van de rekenpunten in de onderste lagen in plaats van een uniforme verdeling zoals nu toegepast. De rekenresultaten ter hoogte van de meetpunten in het schaalmodel (2cm en hoger) worden niet door dit numerieke artefact beïnvloed.

In het voorgaande onderzoek Q2650 [WL, DWW, 2000] zijn o.a. CFX-simulaties uitgevoerd bij een debiet dat 20% kleiner was dan het hier doorgerekende debiet; dit debiet kwam bij de experimenten in het model van De Gunst overeen met het debiet waarbij ergens in het gebied met granulaire verdediging stenen begonnen te bewegen. Deze stromingssituatie is toen doorgerekend met twee verschillende bodemruwheden: $k_s = D_{n50}$ en $k_s = 2D_{n50}$ (10,82 mm resp. 21,64 mm). Het effect van de hogere bodemruwheid was dat de bodemschuifspanning τ_b en de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit r_{gem} een factor 1,3 hoger werden. De laatste is gedefinieerd als:

$$r_{gem} = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{\sigma_u(z)}{u(z)} dz \quad (2.7)$$

met h = waterdiepte (m)

De dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit r_o , gedefinieerd als:

$$r_o = \frac{1}{\overline{U}h} \int_0^h \sigma_u(z) dz \quad (2.8)$$

met \overline{U} = diepte-/tijdgemiddelde horizontale stroomsnelheid (m/s)

nam eveneens toe, zij het met een factor 1,13.

Het is met de CFX-berekeningen in het onderzoek Q2650 niet goed duidelijk geworden met welke waarde van k_s een granulaire bodemruwheid het beste wordt weergegeven in het rekenmodel: $k_s = D_{n50}$ of $k_s = 2D_{n50}$. In het huidige onderzoek is daarom berekening m26 voor het vlakke bed met bodemruwheid $k_s = D_{n50} = 10,82$ mm herhaald met een tweemaal zo hoge k_s -waarde (ber. m28). De resultaten van deze simulatie zijn tezamen met de resultaten van simulatie m26 in de Figuren 2.4 en 2.5 geplott. Het blijkt dat door verhoging van de bodemruwheid een iets geringere stroomsnelheid u wordt berekend in de onderste helft van het vloeistofgebied, nabij de bodem, en een wat hogere snelheid u in de bovenste helft van het vloeistofgebied, nabij het plafond (de vorm van de snelheidsvertikaal verandert dus enigszins). De gemeten waarden van u zijn wat beter in overeenstemming met de resultaten van ber. m28 dan met de resultaten van ber. m26.

De TKE k is in het gebied vlak bij de bodem een factor 1,3 groter (vergelijk de streeplijn (m28, hogere bodemruwheid) met de getrokken lijn (m26, lagere bodemruwheid) in Figuur 2.5. De uit de metingen afgeleide k -waarden (berekend met $\lambda = 0$ en $\xi = 0,5$) liggen in de onderste helft van het vloeistofgebied, nabij de bodem, tussen de resultaten van ber. m28 en ber. m26 in. Wanneer voor λ een waarde 0,2 wordt gekozen (de waarde 0 is in feite niet realistisch), komen de ‘meetwaarden’ redelijk goed overeen met de resultaten van ber. m28 (met bodemruwheid $k_s = 2D_{n50}$). Bij $\lambda = 0,5$, de waarde die veelal bij 2-dimensionale stromingen wordt gehanteerd, ontstaan k -waarden die hoger zijn dan de met CFX berekende k -waarden voor ber. m28. Dit zou kunnen betekenen dat in CFX-simulaties een hogere k_s -waarde moet worden gekozen dan $k_s = 2D_{n50}$ om de bedruwheid van een vlak, granulair bed te representeren.

In Tabel 2.1 is voor proef 2_2 uit onderzoek De Gunst (vlak bed, dieptegemiddelde stroomsnelheid $U = 0,89$ m/s) de standaardafwijking σ_u , de turbulentie-intensiteit σ_u/u en de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit aangegeven voor de meetpunten in de vijf doorgemeten vertikalen. De dieptegemiddelde intensiteit is zowel berekend met formule (2.7) als (2.8). Er is gemiddeld over het deel van de waterdiepte waar in de vertikaal metingen zijn verricht. In raaien $x = 7,30$ m, $7,35$ m en $7,40$ m is dat de volle waterdiepte, in raaien $x = 7,45$ m en $7,50$ m is het onderste deel niet doorgemeten en dit deel is dus niet inbegrepen in de middeling. De waarde van r_o ligt rond 10% (overeenkomend met een *normaal* turbulentieniveau in geval van stroming over een vlak bed met uniforme ruwheid). De waarde van r_{gem} ligt rond de 14%.

In Tabel 2.3 zijn voor proef 2_2 uit onderzoek De Gunst de standaardafwijking σ_u van stroomsnelheidscomponent u en de standaardafwijking σ_w van component w per meetvertikaal vergeleken. De verhouding van beide grootheden blijkt gemiddeld ca 1,9 te bedragen. Ofwel in relatie tot vergelijking (2.3):

$$\sigma_w^2 \approx 0,28 \cdot \sigma_u^2 \quad (2.9)$$

Deze verhouding is duidelijk anders dan die waarvan veelal wordt uitgegaan bij uniforme stroming over een vlak bed, namelijk dat σ_u en σ_w van dezelfde orde van grootte zijn. Mogelijk was in het model van De Gunst op de meetlocatie nog geen uitontwikkeld stroombeeld aanwezig (het turbulentieprofiel wordt na een verstoring pas weer stationair na een afstand van 50 à 100 maal de waterdiepte; deze lengte was in het model niet aanwezig). In het rekenmodel daarentegen was wel sprake van een uitontwikkeld stroombeeld. In de CFX simulatie zijn ‘mass-flow’ randvoorwaarden toegepast op zowel de bovenstroomse- als benedenstroomse rand (d.w.z. de instroming c.q. uitstroming van vloeistofmassa per tijdseenheid is voorgeschreven). Bij de uniforme ruwheid van de bodem resulteert dit in stroomsnelheidsprofielen en bijbehorende turbulentieprofielen, die door het gehele rekenmodel heen constant zijn. In Figuur 2.5a zijn de constante snelheids- en turbulentieprofielen als functie van x weergegeven (geldig voor ber. m26).

Stroming over een afstap

Stationaire component van de stroomsnelheid

De met CFX berekende stationaire componenten u en w van de stroomsnelheid in een aantal vertikalen achter de afstap (ber. m19) zijn in Figuur 2.6 tezamen met de in het model van De Gunst gemeten waarden (proef 4_2) weergegeven. Figuur 2.6b bevat vergrotingen van de plots. Bij ber. m19 is het plafond als een free-slip wand gemodelleerd. Zoals in Figuren 2.6 en 2.6b is te zien is de berekende snelheidscomponent u (getrokken lijnen) in het deel van de vertikaal dat ook doorgemeten is in het schaalmodel, systematisch kleiner dan de gemeten waarden. De meest waarschijnlijke verklaring is ook hier weer dat de ruwheid van het multiplex plafond niet is meegenomen in de berekening. Helaas ontbreken de metingen in het bovenste deel van de goot (boven 0,13 m) die dit direct zouden kunnen bevestigen.

De simulatie is herhaald met een plafond met ruwheid $k_s = 0,5$ mm (ber. m27), gelijk aan de ruwheid van de afstap. De resultaten van deze simulatie zijn in Figuren 2.6 en 2.6b aangegeven met streeplijnen. Het gesimuleerde u snelheidsprofiel komt nu goed overeen met de metingen. Uit het teken van u kunnen we afleiden waar in x -richting gezien het stagnatiepunt van de stroming ligt in de berekening; dit blijkt bij $x = \text{ca } 7,5$ m te zijn. Rond dit punt kan het zogenaamde re-attachment point van de stroming worden gedacht, d.w.z. het punt waar de stroming na loslaten van de afstap terug komt naar de bodem.

Wanneer we naar de verticale snelheidscomponent w kijken, welke in de onderste plot van Figuren 2.6 en 2.6b is weergegeven, moeten we constateren dat de verschillen tussen meting en berekening door het meenemen van de plafondruwheid groter zijn geworden. Dit geldt voornamelijk in het gebied met bodemruwheid, d.w.z. in het gebied tot $x = \text{ca } 7,5$ m. Bij de meest stroomafwaarts gelegen meetlocatie komt het gesimuleerde verloop van de verticale snelheid (ber. m 19 én ber. m27) wel redelijk goed overeen met het gemeten verloop.

Meer bovenstrooms, in het recirculatiegebied bovenstrooms van het aanligpunt, zijn de berekende verticale snelheden duidelijk groter dan de gemeten waarden (opgemerkt zij overigens dat de absolute waarde van de verticale stroomsnelheidscomponent w gering is ten opzichte van de horizontale component u). Wat opvalt is dat de gemeten snelheid w nabij de bodem positief (omhoog gericht) is bovenstrooms van het aanligpunt (in de bodemneer) en ook een tendens naar een positieve waarde vertoont benedenstrooms van het aanligpunt. In combinatie met de enigszins negatieve w component nabij het aanligpunt (profielen op 45 en 46,5 cm benedenstrooms van de afstap) leidt dit tot de conclusie dat zich mogelijk intredende en uittredende stromingen hebben voorgedaan in de poreuze granulaire bodem. De bodemporositeit en de oneffenheid van de bodem zijn niet weergegeven in het CFX model, waardoor het effect van eventueel intredende en uittredende stromingen niet is meegenomen en er op dit punt verschillen kunnen bestaan tussen metingen en berekeningen.

In een stationaire stroming zal overigens - uitgaande van een 2DV situatie - op basis van massabehoud moeten gelden dat:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

Dat wil zeggen dat met het vastleggen van het snelheidsveld in u richting ook de w component wordt vastgelegd. Hierbij geldt de randvoorwaarde $w = 0$ aan de bodem (eventueel $w = 0$ aan de dichte gootbodem onder de poreuze steenlaag) en $w = 0$ aan het plafond (in de stationaire, evenwichtssituatie).

Om een beeld te krijgen van de relevantie van de verschillen in de berekende en gemeten groottes van de snelheden en de stroomrichtingen zijn in Figuur 2.6a snelheidsvectoren geplot. Met dunne pijlen zijn de vectoren van de CFX simulatie m27 aangegeven, met dikke pijlen de vectoren op basis van de metingen in proef 4_2. Uit deze figuur blijkt dat de geconstateerde verschillen in de w component voor het totaalbeeld van de stroming uiteindelijk weinig betekenis heeft. Voor de stabiliteit van het granulaire bed ligt dit wellicht wat anders.

Dynamische component van de stroomsnelheid

In Figuren 2.6c en 2.6d worden enkele delen met duur van 6 s getoond van de in het model van De Gunst gemeten horizontale en verticale snelheidscomponenten u en v achter de afstap (proef 4_2), in punten op 1,5 cm boven de bodem (punten C, D en E) en in punten op 12 cm boven de bodem (punten A en B). De punten C, D en E zijn zo gekozen dat ze respectievelijk in de bodemneer, ter plaatse van het aanligpunt van de stroming en benedenstrooms van het aanligpunt liggen. Punten A en B liggen boven punten C en D in de hoofdstroom (zie ook de schets met posities in Figuren 2.6c/d). Uit de registraties blijkt dat de fluctuaties in de stroomsnelheid boven de bodem aanzienlijk sterker zijn dan de fluctuaties in de hoofdstroom op enige afstand van de bodem en buiten de bodemneer. De sterkste fluctuaties hebben een frequentie die ligt in het gebied 0,3 - 2 Hz, zwakkere fluctuaties zijn hogerfrequent. Van de amplitudes zijn histogrammen gemaakt; deze zijn samen met een normale verdeling van amplitudes (op basis van de berekende tijdgemiddelde waarde μ en standaardafwijking σ) in één figuur geplot. Gezien de goede overeenkomst

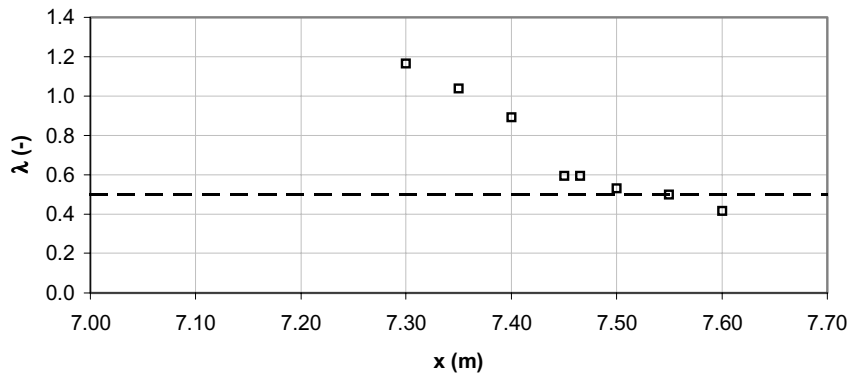
blijkt de veronderstelling van normale (of Gaussische) verdeling voor de snelheidsfluctuaties zeer goed op te gaan, zowel nabij de bodem als in de hoofdstroom.

De standaardafwijking σ_u van snelheidscomponent u en standaardafwijking σ_w van snelheidscomponent w zijn voor proef 4_2 in Figuur 2.8 uitgezet. Met gebruikmaking van relaties (2.3) en (2.5) is uit de standaardafwijkingen van u en w de turbulente kinetische energie (TKE) k berekend; daarbij zijn in eerste instantie gebruikt $\lambda = 0$ en $\xi = 0,5$. In Figuur 2.7 zijn de uit de gemeten stroomsnelheden berekende waarden van k samen met de uit de CFX berekeningen (ber. m19, glad plafond, getrokken lijnen; ber. m27, ruw plafond, streeplijnen) verkregen waarden van k weergegeven. Net als bij de stationaire, verticale snelheidscomponent w is de beste overeenstemming tussen meting en berekening te vinden in het meest benedenstrooms gelegen profiel. De vorm van de meer bovenstrooms gelegen, berekende k -profielen is wel in overeenstemming met de ‘gemeten’ k -profielen maar de grootte is afwijkend.

In de berekening van de turbulente kinetische energie k uit de gesommeerde varianties ($\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2$) van de snelheidscomponenten u , v en w is de evenredigheidsfactor ξ gelijk gesteld aan 0,5 en is σ_v^2 gelijk gesteld aan $\lambda \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_w^2)$. Onderzocht is welke waarde λ aanneemt wanneer de uit de metingen afgeleide waarde van k gelijk wordt gesteld aan de waarde van k uit de CFX berekening:

$$k_{CFX} = k_{meting} = \xi \cdot (1 + \lambda) \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_w^2) \quad (2.11)$$

Bij deze exercitie is de berekening met het ruwe plafond (ber. m27) als uitgangspunt genomen. De vergelijking is gemaakt voor de maximale waarde van k in de verschillende doorgemeten vertikalen achter de afstap. Het resultaat is een waarde van λ per vertikaal, dus een waarde van λ als functie van de horizontale coördinaat x . In de onderstaande grafiek is de gevonden waarde van λ als functie van x ($x = 7,00$ m is achterkant afstap) weergegeven.



Het blijkt dat λ ongeveer de waarde 0,5 aanneemt in het gebied nabij het aanligpunt van de stroming op $x = \text{ca } 7,5 \text{ m}$. Ver van de afstap zal weer een evenwichtssituatie ontstaan zoals bij de stroming over de vlakke bodem. In dat geval zal de waarde van λ liggen tussen wellicht 0,5 en 0,2 (zie ook bij stroming over een vlak bed). Bovenstrooms van het aanligpunt wordt een significant hogere waarde dan 0,5 gevonden voor λ (tot 1,2).

De boven gevonden λ -waarden als functie van x zijn toegepast in de berekening van k uit de standaardafwijkingen van de stroomsnelheidscomponenten u en w in punten in de meetvertikalen; aldus zijn herschaalde ‘meetvertikalen’ gevonden. In Figuur 2.11 zijn deze herschaalde meetvertikalen van k geplot samen met de resultaten van de CFX berekeningen. De maxima in de vertikalen liggen nu uiteraard op de door CFX berekende maximale waarden (ber. m27, streeplijnen), maar er blijven in de vertikalen nog wel wat kleine verschillen bestaan tussen ‘meetwaarden’ en CFX waarden. Hieruit volgt dat λ ook enigszins afhankelijk is van z (en wellicht ook van y).

In het voorgaande is gebruik gemaakt van de resultaten van ber. m19 (glad plafond) en ber. m27 (ruw plafond). Bij beide berekeningen bedroeg de ruwheid van het bed $k_s = D_{n50}$. Berekening m27 is herhaald met een tweemaal zo hoge ruwheid voor het bed (ber. m29). De resultaten van deze berekening (u , w en k) zijn in Figuren 2.9, 2.9a en 2.10 weergegeven samen met die van ber. m27. Het blijkt dat de hogere bedruwheid een veel minder effect heeft op de stroming in het gebied achter de afstap dan de hogere bedruwheid op de stroming over een horizontaal bed (zie bij stroming over vlak bed). Hiervoor zijn twee redenen: ten eerste is de bodemneer met vrije grenslaag in het water sterk bepalend voor de turbulentie-intensiteit in het gebied tussen afstap en aanligpunt van de stroming op het bed, en ten tweede werkt de hogere bedruwheid pas effectief door op de turbulentie-intensiteit en stroomsnelheidsverdeling op enige afstand achter het aanligpunt. In het gebied direct achter de afstap is het effect van de hogere bedruwheid daarom niet of nauwelijks terug te vinden in de plots van u en w in Figuren 2.9 en 2.9a (vergelijk ber. m27, lage bedruwheid, en ber. m29, hoge bedruwheid). Ook is het effect van de hogere bedruwheid niet te zien in de turbulente kinetische energie k (Figuur 2.10). Voor het gebied direct achter de afstap blijkt de bedruwheid dus niet erg relevant te zijn.

In Tabel 2.2 is voor proef 4_2 uit onderzoek De Gunst (afstap, dieptegemiddelde stroomsnelheid $U = 0,74$ m/s in het diepe deel achter de afstap) de standaardafwijking σ_u , de turbulentie-intensiteit σ_u/u en de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit aangegeven voor de meetpunten in de acht doorgemeten vertikalen. De dieptegemiddelde intensiteit is zowel berekend met formule (2.7) als formule (2.8). De middeling heeft plaats gevonden over het deel van de waterdiepte waar in de vertikaal metingen zijn verricht. In alle raaien ($x = 7,30$ m, $7,35$ m, $7,40$ m, $7,45$ m, $7,465$ m, $7,50$ m, $7,55$ m en $7,60$ m) is alleen het onderste deel van de waterdiepte doorgemeten (het gebied met lagere stationaire snelheid maar hogere snelheidsfluctuatie); het bovenste deel is niet doorgemeten en dit deel is dus niet inbegrepen in de middeling. De Gunst heeft alle raaien tweemaal doorgemeten; de resultaten van beide metingen worden in Tabel 2.2 getoond. De waarde van r_0 blijkt in stroomafwaartse richting langzaam op te lopen van ca 13% tot ca 15%. De waarde van r_{gem} vertoont een sterke variatie; de waarden liggen tussen 6,5 en 0,7. Dit komt omdat er in de vertikaal gebieden zijn met lage stroomsnelheid u (hier wordt door gedeeld!), zodat geconcludeerd kan worden dat r_{gem} geen goede maat is voor stromingen waarbij de stroomsnelheid naar nul gaat en / of van teken wisselt in de vertikaal.

In Tabel 2.4 zijn voor proef 4_2 uit onderzoek De Gunst de standaardafwijking σ_u van stroomsnelheidscomponent u en de standaardafwijking σ_w van component w per meetvertikaal vergeleken. De verhouding van beide grootheden blijkt rond de 1,4 te liggen. Dit leidt tot de relatie:

$$\sigma_w^2 \approx 0,51 \cdot \sigma_u^2 \quad (2.12)$$

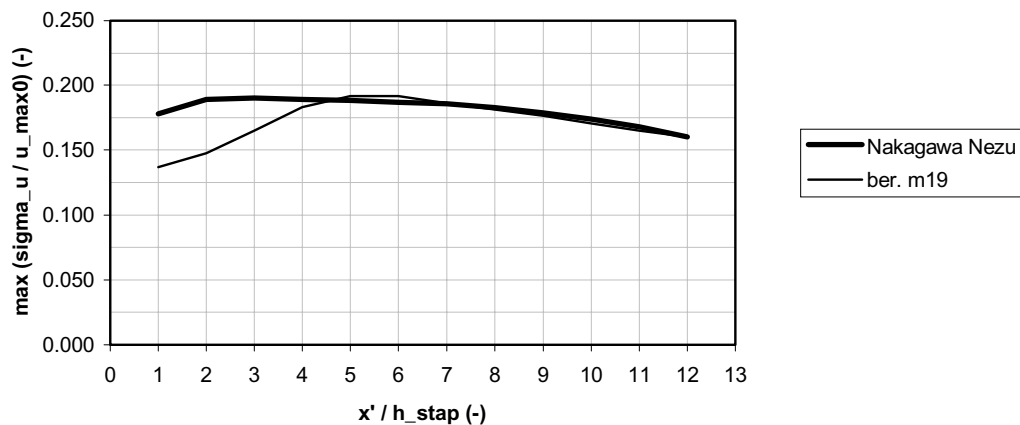
In rapport Q2650 [WL, DWW, 2000] zijn metingen van Nakagawa en Nezu beschouwd; deze metingen betroffen een stroming over een afstap [Nakagawa et al, 1987]. De stromingssituatie was identiek aan de door De Gunst onderzochte situatie, maar er was geen plafond aanwezig. In de figuren in de betreffende publicatie van Nakagawa en Nezu zijn destijds de waarden van σ_u en σ_w opgemeten en is hun onderlinge verhouding bepaald. Deze verhouding werd bepaald voor de maxima in de turbulentieprofielen, en leidde voor het gebied $0 < x'/h < 12$ (met x' = afstand achter afstap, h = staphoogte) tot de globale relatie:

$$\sigma_w \approx 0,75 \sigma_u \quad (2.13)$$

dus gekwadeerd ongeveer hetzelfde als in het model van De Gunst. De schematisatie van ber. m19 met wrijvingsloos plafond sluit het beste aan bij de stromingssituatie met vrij wateroppervlak van Nakagawa en Nezu en de rekenresultaten van ber. m19 zijn gebruikt om te vergelijken met de metingen. Daartoe is met gebruikmaking van formules (2.3) en (2.5), $\xi = 0,5$, en $\sigma_w^2 = 0,56 \cdot \sigma_u^2$ de turbulente kinetische energie k , zoals berekend in m19, omgerekend naar een standaardafwijking σ_u volgens:

$$\sigma_u^2 = \frac{k_{CFX}}{0,78(1 + \lambda)}$$

Initieel is gebruikt $\lambda = 0$. In onderstaande figuur is de maximale waarde van σ_u in de vertikaal (dimensieloos gemaakt door te delen door de maximale snelheid $u_{\max 0}$ in het snelheidsprofiel op de rand van de afstap) voor zowel CFX ber. m19 als de metingen van Nakagawa en Nezu als functie van x' / h_{stap} weergegeven (deze figuur correspondeert met fig. 7.7 in rapport Q2650). In het rekenmodel is de coördinaat x' gelijk aan $x-7,0$ m (maat achter de afstap) en de hoogte van de afstap h_{stap} bedraagt 70 mm.



Het blijkt dat er voornamelijk in het traject $x'/h_{\text{stap}} < 5$ (het gebied met bodemneer) een verschil bestaat tussen meetwaarde en CFX-rekenwaarde (ber. m19). Bedacht moet evenwel worden dat bij de omrekening de waarde 0 is gehanteerd voor λ . Omdat dit niet realistisch is liggen de meetwaarden en CFX-rekenwaarden verder uit elkaar dan de figuur suggereert (de lijn van ber. m19 komt lager te liggen bij λ groter dan 0). Er zal hier nog nader onderzoek naar moeten worden uitgevoerd.

Dit jaar zijn er bij WL | Delft Hydraulics in het kader van doelsubsidie Rijkswaterstaat stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd in een schaalmodel. Het betrof situaties met ‘2-dimensionale’ stroming over een vlak bed, een drempel (verschillende geometrieën) en een onderstroomde schuif. Bij deze metingen zijn de snelheden in drie onderling loodrechte richtingen gemeten. De metingen worden thans uitgewerkt en geanalyseerd en zullen ook worden vergeleken met CFX-berekeningen. We hopen hiermee een beter beeld te krijgen van de waarde van λ .

2.2 Metingen in model M711

2.2.1 Beschrijving van het schaalmodel M711 en het CFX rekenmodel

Hieronder wordt een beschrijving gegeven van het schaalmodel M711 [Van der Werff, 1966] en van het CFX-rekenmodel dat correspondeert met een tweetal in dit schaalmodel onderzochte geometrieën. Zie ook de eerdere verslaggeving in rapport Q2650 [WL, DWW, 2000].

In het schaalmodelonderzoek M711 is onderzoek gedaan naar stroming over een bodemdrempel en naar het effect van de stroming op een granulaire verdediging achter (benedenstrooms) van de drempel. In het onderzoek, dat werd uitgevoerd in een rechte goot, zijn onder andere proeven gedaan voor een drempel met een hoogte van 0,2 m, een kruinbreedte van 4,0 m en een voor- en achtertalud onder een helling van achtereenvolgens 1:2 en 1:8. Deze twee geometrieën zijn in onderzoek Q2650 met het CFX-rekenmodel doorgerekend.

Bij de geselecteerde situaties (proeven T2 en T7/T9; helling van de drempel taluds respectievelijk 1:2 en 1:8) waren de sectie bovenstrooms van de drempel en de drempel zelf belegd met een stabiele laag stenen met nominale diameter $D_{n50} = 0,018$ m (opmerking: bij proef T9 was de nominale steendiameter $D_{n50} = 0,035$ m). Benedenstrooms van de drempel was bij deze proeven een erodeerbare laag stenen met nominale diameter $D_{n50} = 6,5$ mm aangebracht ($D_{50} = D_{n50}/0,84 = 7,7$ mm). De soortelijk massa ρ_s van deze stenen bedroeg 2950 kg/m^3 . De aanstroombreedte tot aan de teen van het benedenstroomse talud bedroeg ca 16 m, het erodeerbare gedeelte aan benedenstroomse zijde van de drempel had een lengte van 10 m. Bij proeven T2 en T7/T9 werd aan benedenstroomse zijde van de drempel een waterdiepte van ca 1,0 m ingesteld. Proeven T7 en T9 zijn afgezien van de steendiameter die bovenstrooms van en op de drempel is toegepast, identiek; deze proeven worden hier gezamenlijk beschouwd ter verkrijging van een grotere dichtheid van meetpunten.

Het CFX-rooster voor de twee drempelgeometrieën is in Figuur 2.12 weergegeven. Het in het schaalmodel gemeten waterspiegelverloop is als bovenrand gemodelleerd. Bij berekening m31 (simulatie proef T2, taludhelling 1:2) leidde dit tot het volgende spiegelverloop: waterstand aan de verre benedenstroomse zijde +1,01 m (bodem benedenstrooms = 0), waterstand boven de drempel +1,00 m en waterstand bovenstrooms bij instroming +1,04 m. Bij berekening m33 (simulatie proeven T7 / T9, taludhelling 1:8) zijn deze maten respectievelijk +1,00 m, +0,98 m en +1,04 m. De kruin van de drempel ligt op +0,20 m, de bovenstroomse bodem bevindt zich op -0,07 m. De lengte van het model tot aan de teen van het benedenstroomse talud bedraagt 16,2 m (de teen ligt op $x = 16,2$ m), de kruinbreedte van de drempel is 4,0 m en het afstroomdeel heeft een lengte van 10 m (totale lengte model 26,2 m).

Het rooster is bij beide geometrieën opgebouwd uit 5 blokken (aanstroom- en afstroomdeel, beide taluddelen en het deel boven de drempel). In de vertikaal zijn 70 lagen toegepast; de kleinste laagdikte van ca 6 mm (boven de drempel ca 5 mm) is te vinden nabij de bodem, de laagdikte neemt lineair toe naar het wateroppervlak (verhouding kleinste en grootste laagdikte 1:5). In het aanstroomdeel zijn in horizontale zin 70 cellen toegepast, waarvan de lengte op lineaire wijze van grof (ca 400 mm) naar fijn (ca 40 mm) verloopt; in het afstroomdeel is dit juist andersom (vergroving 1:10). Boven beide 1:2 taluddelen zijn 10 cellen in horizontale zin toegepast; bij de 1:8 taluddelen zijn 40 cellen toegepast. Boven de kruin van de drempel bedraagt het aantal cellen in horizontale zin 50; de lengte van deze cellen verloopt lineair van 44 mm naar 131 mm en weer terug naar 44 mm. Het rooster is 0,5 m (1 cel) breed. Voor het m31 model (taludhelling 1:2) omvat het rooster 70 bij 210 cellen, ofwel 14700 cellen totaal; voor het m33 model (taludhelling 1:8) is het rooster iets langer: 70 bij 270 gridcellen, ofwel, 18900 cellen totaal.

Op de zijvlakken zijn symmetrie-randvoorwaarden opgelegd. Er bestaan dientengevolge geen gradiënten in de richting loodrecht op de stroming in het één cel brede model.

Op het ‘vrij-water oppervlak’ is een free-slip conditie opgelegd. De ruwheid van de granulaire bodem bovenstrooms van de drempel en van de drempel zelf is gekarakteriseerd met $RHT = D_{n50} = 0,018$ m. De ruwheid van de erodeerbare stenen benedenstrooms van de drempel is gekarakteriseerd met $RHT = D_{n50} = 0,0065$ m. De bodem kan worden beschouwd als een hydraulisch ruwe wand; als ElogR waarde is bij de berekeningen daarom een waarde van 30 ingevoerd. Op de instroomrand en de uitstroomrand is de mass-flow randvoorwaarde voorgeschreven. In de berekeningen is het RNG k- ϵ turbulentiemodel gehanteerd.

Voor een overzicht van de berekeningen wordt verwezen naar Paragraaf 2.1.3.

2.2.2 Stroomsnelheidsmetingen

In het schaalmodel M711 zijn stroomsnelheden gemeten met behulp van pitotbuizen. Bij metingen met pitotbuizen dient de buis met openingen nauwkeurig tegen de stroomrichting in en parallel aan de stroombanen te worden geplaatst; de snelheid wordt afgeleid uit het verschil in stijghoogte ter plaatse van stuwpunt en ongestuwde stroming. Pitotbuizen geven tijdgemiddelde waarden van de stroomsnelheid. Bepalend voor de nauwkeurigheid zijn de wijze van plaatsen van het instrument in de stroming en de afleesnauwkeurigheid. In situaties met wisselende stroombeelden, wisselende stroomrichting of schuine aanstroming zijn pitotbuizen niet geschikt. Bij de stroming over de bodemdrempel in model M711 waren de stroombanen in de buurt van voor- en achtertalud gekromd en was er achter de drempel, bij een taludhelling van 1:2, een neer aanwezig. De meetresultaten zullen met name in dit nereengebied met retourstroming niet nauwkeurig zijn.

In rapport M711 zijn de pitotbuis-metingen in afzonderlijke figuren weergegeven. Metingen zijn verricht in vertikalen in de langsas van de goot; één vertikaal bevond zich bovenstrooms van de drempel, een tweetal vertikalen is doorgemeten ter plaatse van de hoekpunten van de drempel en de overige vertikalen bevonden zich aan benedenstroomse zijde van de drempel (op tussenafstanden van 0,25 à 0,50 m). De meetwaarden zijn in de figuren in rapport M711 opgemeten en samen met de berekende stroomsnelheden geplot.

2.2.3 Vergelijking metingen met berekeningen

Hieronder wordt een overzicht gegeven van de CFX berekeningen die voor respectievelijk de situatie met stroming over een drempel met taludhelling 1:2 (proef T2, dieptegemiddelde stroomsnelheid $U = 1,0$ m/s in het deel met 1,0 m waterdiepte achter de drempel) en stroming over een drempel met taludhelling 1:8 (proeven T7 en T9, $U = 1,1$ m/s in het deel met waterdiepte van 1,0 m achter de drempel) zijn gemaakt. Opgemerkt zij dat proeven T7 en T9 identiek zijn afgezien van de steendiameter bovenstrooms van en op de drempel (T7: $D_{n50} = 18$ mm, T9: $D_{n50} = 34$ mm).

Berekening	Situatie	Turbulentie- model	U (in diepe gedeelte) (m/s)	RHT drempel (mm)	RHT steenbed (mm)
m31	drempel (1:2)	RNG k-ε	1,0	18	6,5
m33	drempel (1:8)	RNG k-ε	1,1	18	6,5

Drempel met taluds 1:2; stationaire stroming

De met behulp van CFX berekende u , w en k profielen (ber. m31) zijn samen met de corresponderende meetwaarden van u (proef T2, M711) geplot in Figuur 2.13. Het betreft hier een drempel met taluds onder een helling van 1:2.

Eerst beschouwen we het stroombeeld. De berekeningsresultaten (u en w) geven aan dat de stroming loslaat van het benedenstroomse hoekpunt van de drempel en op enige afstand achter de drempel terugbuigt naar de bodem. Het aanligpunt ligt op ca 0,7 m achter de teen van de drempel (zie ook rapport Q2650). Interpretatie van de meetresultaten levert een soortgelijk beeld op.

De berekening laat ook zien dat de stroming ter plaatse van het bovenstroomse hoekpunt van de drempel schuin omhoog is gericht; hier buigt de stroming even af van de drempel en komt dan weer terug. De metingen laten dit niet duidelijk zien, omdat alleen de horizontale component van de stroomsnelheid is gemeten.

Over het geheel genomen komen de meetwaarden en de berekende waarden van de horizontale snelheid u evenwel goed met elkaar overeen. De grootste afwijkingen treden op in de vertikalen direct achter de drempel. CFX berekent een negatieve stroomsnelheid achter de drempel, overeenkomend met de terugstroming in de daar aanwezige bodemneer; de meetwaarden van de pitotbuizen daarentegen zijn nul of positief. Zeer waarschijnlijk komt dit doordat de pitotbuis niet goed gericht is geweest tijdens de metingen in de neer (een pitotbuis is ook minder geschikt voor gebruik in gebieden met gekromde stroombanen en omslag van de stroomrichting in de vertikaal).

De vorm van het snelheidsprofiel boven de drempel is in de metingen minder blokvormig dan in de rekensimulatie (let met name op het afstroomprofiel ter plaatse van het benedenstroomse hoekpunt). In het rekenmodel zou de ruwheid van de drempel moeten worden verhoogd om een betere overeenkomst te verkrijgen. De ruwheid van de drempel is in het rekenmodel voorgeschreven als $k_s = D_{n50} = 18$ mm. Het lijkt er dus op dat in geval van een granulaire topklaag beter een hogere waarde voor de ruwheid kan worden gekozen, bijvoorbeeld $2 D_{n50}$.

Drempel met taluds 1:8; stationaire stroming

De resultaten van CFX berekening m33 (u , w en k profielen) zijn in Figuur 2.14 samen met de corresponderende meetwaarden van u (proeven T7 en T9, M711) geplot. Een uitvergroete plot van het stuk net na de drempel is weergegeven in Figuur 2.14a. Het betreft hier een drempel met taluds onder een helling van 1:8.

Uit het verloop van u en w kan worden afgeleid dat de stroming in de berekening het benedenstroomse talud blijft volgen: er ontstaat geen bodemneer met retourstroming langs het talud. De metingen in het schaalmodel laten eenzelfde beeld zien.

Over het geheel gezien is de overeenstemming tussen het gesimuleerde en berekende stroombeeld goed te noemen. De verschillen zijn ook nu het grootst nabij het benedenstroomse hoekpunt van de drempel en boven en direct achter het benedenstroomse talud. Het gemeten snelheidsprofiel nabij het benedenstroomse talud laat minder hoge stroomsnelheden zien nabij de bodem dan de berekening. Opvallend is dat de gemeten snelheid bij de bodem in proef T9 kleiner is dan in proef T7. Oorzaak hiervan zou de grotere ruwheid van de granulaire verdediging vóór en op de drempel kunnen zijn in proef T9. De bodemsnelheid in proef T9 wijkt dan ook meer af van de berekende stroomsnelheid dan die in proef T7. Opnieuw wordt hiermee een aanwijzing gevonden dat een granulaire verdediging beter met een hogere ruwheidswaarde dan $k_s = D_{n50}$ kan worden weergegeven in het rekenmodel.

2.3 Conclusies

De verdere uitwerking van metingen van De Gunst [De Gunst, 1999] en van metingen in model M711 [Van der Werff, 1966] en vervolgens vergelijking van deze metingen met berekeningen uitgevoerd met het CFX-rekenmodel met k -epsilon turbulentiemodellering heeft het volgende opgeleverd:

- De rekenmodellen met 15000 tot 20000 cellen blijken in staat om op correcte wijze het stationaire stroombeeld te berekenen in geval van een stroming over een vlak bed met granulaire verdediging, stroming over een afstap (backward-facing step), en stroming over een bodemdrempel met voor- en achtertalu's onder 1:2 en 1:8. Het vrije wateroppervlak kan worden weergegeven met een wrijvingsloze wand (die ook volgens het werkelijk opgetreden spiegelverloop kan worden gemodelleerd). De ruwheid van de granulaire verdediging kan in het rekenmodel het beste worden weergegeven met een ruwheidsmaat k_s van $2D_{n50}$ of hoger (D_{n50} is de gemiddelde nominale steendiameter van de sortering). De berekende snelheidsprofielen (u - en w -component in horizontale en verticale richting) blijken een goede overeenkomst te vertonen met de gemeten snelheidsprofielen. De bodemneer achter de afstap en de bodemdrempel met talu's 1:2 heeft in het rekenmodel correcte afmetingen en bij de bodemdrempel met talu's 1:8 volgt de stroming de talu's. Grote aantallen kleine cellen zijn toegepast waar grote gradiënten in de oplossing te verwachten waren: nabij de bodem, achter de afstap en drempel (bij loslating). Ook voor dynamische berekeningen zou eenzelfde rooster gebruikt kunnen worden al is dan wel een fijner rooster gewenst in het instroomgedeelte in verband met het opleggen van de dynamica op de instroomrand. Het benodigde aantal cellen neemt echter significant toe bij het doorrekenen van het 3D stroombeeld (in verband met de stationaire berekeningen voldoet nu 2DV).
- De turbulente kinetische energie k in het rekenmodel is een maat voor het turbulentiëniveau van de berekende stroming. Deze maat k heeft de volgende relatie met de varianties van de stroomsnelheidscomponenten u , v en w in de drie hoofdrichtingen x , y en z :

$$k = \xi \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$$

De waarde van ξ wordt per definitie gelijk aan 0,5 gesteld.

Uit de metingen van De Gunst zijn waarden voor de varianties σ_u^2 en σ_w^2 berekend. De variantie in de derde richting is afgeschat door gebruik te maken van de relatie:

$$\sigma_v^2 = \lambda \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_w^2)$$

De waarde van λ wordt bij 'tweedimensionale' stroming veelal gelijk gesteld aan $\frac{1}{2}$.

- In de situatie met stroming over een vlak bed blijken k uit CFX en k afgeleid uit de metingen van De Gunst goed met elkaar overeen te stemmen bij gebruik van $\lambda = 0,2$. In de situatie met stroming over de afstap moet een waarde voor λ tussen 1,2 en 0,5 worden gehanteerd in het gebied achter de afstap, om de metingen van De Gunst te laten overeenkomen met de CFX-berekeningen.
- In het vorige onderzoek Q2650 [WL, DWW, 2000] zijn metingen van Nakagawa en Nezu [Nakagawa et al, 1987] vergeleken met CFX-berekeningen. Het betrof hier dezelfde geometrie als in het onderzoek van De Gunst (maar zonder plafond). Om de metingen van Nakagawa en Nezu overeen te laten komen met de CFX-berekeningen moet een waarde van λ kleiner of gelijk 0 worden gehanteerd.
- Het waarom van dit verschil tussen de metingen van Nakagawa / Nezu en De Gunst is in de analyse niet duidelijk geworden. Hier is nader onderzoek nodig.
- Het streven is om de turbulente kinetische energie k , zoals die wordt berekend met een k-epsilon turbulentiemodel, te gebruiken als onderdeel van een grootheid om de stromingsbelasting op een granulaire verdediging mee weer te geven. Om te kunnen beoordelen of k daartoe geschikt is, dient inzicht te bestaan in de onderlinge verhouding van de dynamische componenten van de stroomsnelheid in drie onderling loodrechte richtingen bij willekeurige stromingssituaties. Met het onderzoek van De Gunst, Nakagawa / Nezu en M711 is hier geen compleet beeld van verkregen. Het lopende doelsubsidie-onderzoek (zie hierna) geeft een aanvulling op het reeds uitgevoerde onderzoek.

Relatie met lopend en vorig onderzoek:

- Dit jaar zijn er bij WL | Delft Hydraulics in het kader van doelsubsidie Rijkswaterstaat stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd in een schaalmodel. Het betrof situaties met '2-dimensionale' stroming over een vlak bed, een drempel (verschillende geometrieën) en een onderstroomde schuif. Bij deze metingen zijn de snelheden in drie onderling loodrechte richtingen gemeten. De metingen worden thans uitgewerkt en geanalyseerd en zullen ook worden vergeleken met CFX-berekeningen. De verwachting is dat hiermee een beter beeld wordt verkregen van de waarde van λ en de eventuele variatie van λ bij verschillende stroombeelden. In deze studie zal ook de literatuur verder worden bestudeerd.
- In onderzoek Q2650 is gezocht naar een grootheid, te berekenen met een k-epsilon turbulentiemodel, die representatief is voor zowel het stationaire als het dynamische deel van de stromingsbelasting op een granulaire verdediging. De grootheid $(u + \alpha \cdot \sqrt{k})^2$ is daarbij als veelbelovende maat naar voren gekomen. De stationaire component wordt

gerepresenteerd door u en de dynamische component door $\alpha.k$. Met de factor α , een versterkingsfactor, kan het aandeel van de dynamische component in de stromingsbelasting in een stabiliteitsanalyse worden benadrukt. De grootheid $(u + \alpha.\sqrt{k})^2$ moet worden beschouwd in een relevant gebied nabij de bodemverdediging; voorgesteld is om de grootheid te middelen over een waterlaag met dikte d boven de bodem. Deze dikte dient nog nader te worden bepaald en kan per stromingssituatie verschillen.

Literatuur Hoofdstuk 2

Gunst, M. de (1999)

Steenstabiliteit in een turbulente stroming achter een afstap
Afstudeerrapport TUD, september 1999.

Nakagawa, H. and Nezu, I. (1987)

Experimental investigation on turbulent structure of backward-facing step flow in an open channel
Journal of Hydraulic Research, Vol 25, no 1, 1987.

Rodi, W. (1984)

Turbulence models and their application in hydraulics - a state of the art review
IAHR, 2nd revised edition, February 1984

Werf, A. van der (1966)

Stroombestendigheid sluitgatdrempel. Stabiliteit los materiaal achter een dam met brede kruin
WL | Delft Hydraulics, rapport modelonderzoek M711, deel IV, juni 1966.

WL, DWW (2000)

Voortschrijdend Onderzoek Programma (VOP), jaar 2000, Project Steenstabiliteit
WL | Delft Hydraulics en RWS, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, verslag onderzoek, december 2000.

3 Transportmodellering

In dit hoofdstuk betreffende transportmodellering worden de volgende symbolen gebruikt:

c_k	-	constructie-afhankelijke turbulentiefactor
c_s	-	constructie-afhankelijke turbulentiefactor
c_5	-	ruwheidsfactor in Chezy-formule
C	$m^{0.5}/s$	Chezy-coefficient
D_n	m	nominale steendiameter
D_{50}	m	karacteristieke, gemiddelde steendiameter
d	m	drempelhoogte
d_e	m	geërodeerde dikte van de bodembescherming
d_0	m	aanwezige dikte van de bodembescherming
g	m/s^2	zwaartekrachtversnelling
h	m	waterdiepte
k	-	turbulente kinetische energie
L	m	aanpassingslengte relatieve turbulentieintensiteit
n	-	porositeit
n_d	-	dikte bodembescherming uitgedrukt in aantal lagen
P	-	faalkans
q_s	m^2/s	specifiek transport
R	-	sterkte van een constructie
r_x	-	relatieve lokale turbulentieintensiteit
r_0	-	relatieve turbulentieintensiteit in uniforme stroming
S	-	belasting op een constructie
S_T	-	totale schade gedurende de levensduur van de constructie
S_1	-	schade gedurende 1 jaar
S_n	-	schadeniveau
T	jaar	levensduur van een constructie
t	s	tijd
u	m/s	stroomsnelheid
u_x	m/s	stroomsnelheid in raai x
u'_x	m/s	turbulentie in raai x
u_o	m/s	dieptegemiddelde stroomsnelheid in uniforme condities
u_*	m/s	schuifspanningssnelheid
x	m	afstand vanaf aanligpunt
Z	var	betrouwbaarheidsfunctie
α	-	factor waarmee standaardafwijking wordt vermenigvuldigd om maximale waarde te bepalen
β	-	betrouwbaarheidsindex
Δ	-	relatieve dichtheid
Δx	m	lengte beschouwde schadegebied
δ	m	turbulente grenslaagdikte
δ_{max}	m	grenslaagdikte bij uniforme condities

$\mu(Z)$	-	gemiddelde waarde parameter Z
ν	m^2/s	kinematische viscositeit
ϕ	-	transportparameter
ρ	kg/m^3	dichtheid water
ρ_s	kg/m^3	dichtheid granulaair materiaal
$\sigma(Z)$	-	standaardafwijking parameter Z
ψ_c	-	kritieke Shieldsparameter

3.1 Inleiding

In het kader van het WL | Delft Hydraulics – DWW samenwerkingsproject “Steenstabiliteit” (Verheij, 2000) is in 2000 een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar de praktische toepassing van een ontwerpmethodiek voor granulaire bodemverdedigingen benedenstreams van een backward-facing step (een bijzonder geval van een drempel). De methodiek is gebaseerd op een transportmodellering waarbij gebruik wordt gemaakt van een schadeniveau waarin een transportgradient een belangrijke rol speelt. Door een niet volledig correcte modellering van stroomsnelheid en turbulentie stemde het resultaat niet tot tevredenheid. Eerder is wel met positief resultaat de praktische bruikbaarheid onderzocht van de methodiek voor de situatie met een versnellende stroming aan bovenstroomse zijde van een drempel (Verheij, 1999). In de onderhavige studie wordt opnieuw de haalbaarheid voor de benedenstroomse situatie onderzocht, maar met verbeterde schematisaties.

Kenmerkend voor de stroming benedenstreams van een afstap is het sterk niet-uniforme karakter met een veranderende stroomsnelheid en een verhoogde turbulentie. In algemene zin is er sprake van een vertraginggebied met een zwaardere hydraulische belasting op elementen van een bodembescherming dan in uniforme stromingscondities.

Schadmodellering impliceert dat wordt gedimensioneerd op bezwijken, dat wil zeggen: er verdwijnt een groot aantal stenen, en niet een gering aantal stenen, zoals dat het geval is bij dimensioneren op basis van stabiliteitscriteria in een aangenomen ontwerpsituatie. In het laatste geval is in principe sprake van een stabiel veronderstelde beschermingsconstructie. Stroomsnelheden en turbulenties spelen een belangrijke rol. In de studie worden drie sporen gevolgd voor de schematisatie daarvan:

1. Experimenteel spoor gebruikmakend van gemeten stroomsnelheden en turbulenties.
2. Numeriek spoor waarbij resultaten van CFX-berekeningen zijn gebruikt.
3. Empirisch spoor dat gebruik maakt van empirische relaties voor stroomsnelheid (via de grenslaagdikte) en relatieve turbulentie.

Het numeriek spoor is interessant vanuit het oogpunt, dat als blijkt dat hiermee goede resultaten worden bereikt, in principe schaalonderzoek voor het bepalen van de stroomsnelheden niet meer nodig is. Voorwaarde is uiteraard wel dat de berekende stroomsnelheden en turbulenties overeenkomen met gemeten waarden. Het empirische spoor is interessant, omdat dit de mogelijkheid opent onafhankelijk van geavanceerde computerprogramma's toch de schade te kunnen bepalen.

De resultaten zullen worden getoetst aan beschikbare meetgegevens van verplaatste aantallen steentjes in een schaalmodel van een afstap (De Gunst, 1999).

Opgemerkt wordt dat ook gepland stond om lengte- en breedte-effecten te implementeren, maar hier is van afgezien, omdat dit pas zinvol wordt geacht als de ontwikkelde methodiek bruikbaar blijkt.

Parallel aan deze studie vindt ook doelsubsidie-onderzoek plaats naar de haalbaarheid voor praktische toepassing van een transportmodellering benedenstrooms van een drempel (taluds 1:3 en 1:8) en een onderstroomde schuif. De resultaten hiervan zullen afzonderlijk worden gerapporteerd (Jongeling et al, 2001).

Dit hoofdstuk is geschreven door ir.H.J.Verheij en ir.C.Stolker.

3.2 Verschijnselen bij een afstap en schade bij experimenten

In deze paragraaf komen kort allereerst de verschijnselen aan de orde zoals die kunnen worden onderscheiden bij een afstap. Vervolgens zal worden ingegaan op de uitgevoerde schaalproeven.

3.2.1 Verschijnselen

Bij een afstap of backward-facing step is sprake van een plotselinge toename van de waterdiepte. In feite is een afstap een bijzonder geval van een drempel waar aan de benedenstroomse zijde sprake is van een meer geleidelijke toename van de waterdiepte. Kenmerkend voor het gebied benedenstrooms van een constructie is dat de stroming niet-uniform van karakter is: er ontstaat een menglaag waarin de stroomsnelheid zich moet aanpassen (snelheidsvertikaal wijkt af van logaritmische vorm bij uniforme stroming) en de turbulentie snel toeneemt tot een zeker maximum om daarna zeer langzaam weer af te nemen tot het normale niveau van een uniforme stroming. Waar de menglaag de bodem raakt, ligt het reattachment point of aanligpunt. Een vergelijkbaar stroombeeld treedt op in ontgrondingskuilen en benedenstrooms van zandduinen. De aanwezige turbulentie in de stroming bovenstrooms van de afstap wordt overschaduwed door de turbulentie samenhangend met die in de menglaag en nabij het aanligpunt. Te onderkennen verschijnselen zijn (Figuur 3.1):

- Een bodemneer direct benedenstrooms van de afstap.
- Het aanligpunt waar de stroming in de menglaag de bodem weer bereikt.
- Gebied benedenstrooms van het aanligpunt waar zich langs de bodem een grenslaag ontwikkelt.
- Sterk verhoogde turbulentie direct na de afstap die in benedenstroomse richting geleidelijk afneemt.
- Straalwerking bij een relatief hoge afstap inclusief een dekneer nabij het wateroppervlak.

In het algemeen zal bij een stroming die een constructie moet passeren vaak straalwerking optreden; denk aan stroming onder een schuif, overstortende stralen, en uitstromend water tussen sluisdeuren. Bij drempels en backward-facing steps kan dit ook het geval zijn als de verhouding drempelhoogte - waterdiepte groter is dan 0.35. Uitgangspunt voor deze studie is dat er geen straal optreedt en dus ook geen dekneer. Voor situaties waarbij wel een straal optreedt, zal gemodelleerd moeten worden met gebruikmaking van de straaltheorie.

Bij lage drempels (drempelhoogte-waterdiepte verhouding < 0.35) is in de bodemmeer de stroming gericht in bovenstroomse richting. De lengte van deze zone bedraagt ongeveer 6 à 8 keer de drempelhoogte. De lengte van de neer is niet constant in de tijd en daarmee fluctueert dus ook de locatie van het aanligpunt. Omdat na de afstap de stroming vertraagt neemt de turbulentie sterk toe. De maximale waarde treedt echter op hoger in de vertikaal - om precies te zijn: boven de neer - en speelt daarmee geen rol bij de belasting op de bodem. Niettemin kan de combinatie van stroomsnelheid en turbulentie bovenstrooms van het aanligpunt leiden tot transport.

Na de neer bereikt de stroming de bodem in het re-attachment point, waarna zich benedenstrooms daarvan een grenslaag zal ontwikkelen (Figuur 3.2). De grenslaag neemt geleidelijk in dikte toe en daarmee ook de stroomsnelheid op een gegeven afstand van de bodem. De verticale stroomsnelheidsverdeling is na een zekere afstand (ongeveer 10 keer de waterdiepte) weer conform die bij uniforme stroming. Gelijktijdig neemt de turbulentie in benedenstroomse richting af en bereikt na ongeveer 50 à 100 keer de waterdiepte het niveau gelijk aan dat bij uniforme stroming (van Rijn, 1995).

Op de modellering zal in paragraaf 3.3 nader worden ingegaan.

De grootste schade zal direct benedenstrooms van het aanligpunt optreden. De optredende combinatie van stroomsnelheid en hoge turbulentie is maximaal juist benedenstrooms van het aanligpunt. In een doorsnede zal de stroomsnelheid fluctueren tussen een maximale waarde gelijk aan gemiddelde + fluctuatie en een minimale waarde gelijk aan gemiddelde - fluctuatie. De minimale waarde kan dichtbij het aanligpunt negatief zijn, omdat de gemiddelde stroming klein is. Het voorgaande betekent dat in een raai benedenstrooms van het aanligpunt transport optreedt in zowel benedenstroomse als bovenstroomse richting, waarbij eerstgenoemde overigens groter is. Benedenstrooms op grotere afstand zal uitsluitend transport in benedenstroomse richting optreden.

Bovenstrooms van het aanligpunt in de bodemmeer kan eveneens transport optreden, maar door de lagere snelheden zal dit gering zijn.

Dat benedenstrooms van het re-attachment point de grootste schade optreedt is, kan worden onderbouwd met resultaten van uitgevoerde experimenten:

- Schaalonderzoek in het verleden bij WL|Delft Hydraulics, recent bevestigd door de metingen van De Gunst (1999), en
- Bevindingen van Xingkui & Fontijn (1993).

Het experimentele gegeven dat de grootste schade benedenstrooms van het aanligpunt optreedt kan worden verklaard door de hogere turbulentiëgraad nabij de bodem in combinatie met de zich ontwikkelende grenslaag langs de bodem. In deze grenslaag neemt de stroomsnelheid op een zekere afstand boven de bodem vanaf het aanligpunt toe (dieptegemiddeld is de stroomsnelheid uiteraard constant). De belasting op de bodem is hierdoor groter dan bovenstrooms van het aanligpunt en groter dan meer benedenstrooms waar de grenslaag reeds is ontwikkeld. Benedenstrooms van het aanligpunt is dus in zowel de stroomsnelheid als de turbulentie een gradiënt aanwezig.

3.2.2 Onderzochte situatie

Door De Gunst (1999) zijn in een schaalmodel experimenten uitgevoerd met een afstap. De transportmodellering zal worden getoetst aan de condities tijdens en resultaten van die experimenten voor zover het betreft de situatie benedenstrooms van het reattachementpunt van de afstap of backward-facing step. In Figuur 3.1 is de configuratie weergegeven.

De op de TU Delft uitgevoerde proeven hebben plaats gevonden in een stroomgoot met een breedte van 0,4 m. Er zijn verschillende soorten proeven uitgevoerd, waarvan in dit kader alleen de proeven met een los bed relevant zijn (experimenten 1-1 t/m 1-5);. Bij de proeven bedroeg de afstaphoogte 0,069 m, was de waterdiepte 0,20 m ($d/h = 0,345$), en werd een stapsgewijze oplopende stroomsnelheid in een periode van 2,7 uur tot een maximum van ruim 0,7 m/s aangehouden.

Benedenstrooms van de afstap zijn stroken van gekleurd materiaal met een nominale diameter $D_n = 0,0108$ m en een strookbreedte van 0,1 m toegepast. De totale lengte strekte zich uit tot 2 m benedenstrooms van de afstap. De stenen zijn aangelegd in een laagdikte van $2 \cdot D_n$. De waarde van D_n is bepaald ervan uitgaande dat er instabiliteit optreedt.

De experimenten hebben de volgende uitkomsten gehad. Transport van stenen is in het model geconstateerd tot op een afstand van 1,60 m, dat wil zeggen tot op een afstand van 23 keer de afstaphoogte benedenstrooms van het aanligpunt. In totaal zijn ongeveer 100 steentjes verplaatst (gemiddelde van 5 proeven). In de volgende tabel staan de aantallen verplaatste stenen als functie van de tijdstap.

Stap	u (m/s)	Δt (s)	Cumulatieve aantal verplaatste stenen
1	0.34	1200	0
2	0.40	1200	0
3	0.46	1200	2
4	0.52	1200	5
5	0.57	1200	10
6	0.61	1200	25
7	0.69	1200	50
8	0.74	1200	100

In onderstaande tabel staat de locatie van de verplaatste stenen (vak 6 is het eerste vak benedenstrooms van het aanligpunt).

Vak	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Totaal
X	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	0,1-1,6
Aantal	4	20	7	17	11	7	6	8	5	5	5	1	3	4	1	3	107

De maximale schade is geconstateerd in een strook op $(6,5 \text{ à } 9) \cdot d$ (kern op $8 \cdot d$).

Het aanligpunt lag op ongeveer 6,5 keer de drempelhoogte benedenstrooms van de afstap.

3.3 Modelleren schadeniveau

3.3.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt het schadeniveau afgeleid voor een vertragsgebied benedenstrooms van het aanligpunt van een drempel, meer in het bijzonder een afstap of backward-facing step. Daarbij wordt voor de modellering van de schade gebruik gemaakt van het door Akkerman (1999) afgeleide schadeniveau. Van belang daarbij is de hydraulische belasting op de bodem bestaande uit de stroomsnelheid en de turbulentie. Drie sporen zullen worden gevolgd:

1. Experimenteel spoor gebruikmakend van gemeten stroomsnelheden en turbulentie.
2. Numeriek spoor waarbij resultaten van CFX-berekeningen zijn gebruikt.
3. Empirisch spoor dat gebruik maakt van empirische relaties voor stroomsnelheid en relatieve turbulentie.

In alle gevallen wordt het schadeniveau getoetst aan gemeten steentransporten tijdens proeven op de TU Delft in een fysiek model (De Gunst, 1999).

3.3.2 Uitgangspunten en aannames

Bij de modellering van het schadeniveau worden een aantal aannames gedaan. In deze paragraaf worden deze opgesomd. Voor zover noodzakelijk zullen aannames worden toegelicht; in andere gevallen wordt elders in dit hoofdstuk een toelichting gegeven.

Uitgangspunten zijn:

- het door Akkerman (1999) gedefinieerde schadeniveau voor een versnellende stroming aan de bovenstroomse zijde van de kruin van een drempel (toenemende stroomsnelheid en constante turbulentie), en
- de mogelijkheid tot het in rekening brengen in het schadeniveau van het niet-uniforme karakter van de stroming in een vertragsgebied benedenstrooms van een drempel (vertragende stroomsnelheid en sterke turbulentie).

Het voorgaande impliceert dat:

1. Er wordt uitgegaan van een lage drempel (drempelhoogte maximaal 30% van de waterdiepte);
2. Er sprake is van een tweedimensionale situatie en dat daarmee het steentransport in breedterichting gelijkmatig is verdeeld over een oppervlak en niet is geconcentreerd op bepaalde locaties (in de stroomrichting is het steentransport uiteraard wel locatieafhankelijk);
3. Sedimenttransportformules ook geldig zijn voor de zeer lage transporten nabij het begin van bewegen van stenen.

De tweede veronderstelling kan in principe worden gecompenseerd door implementatie van breedte-effecten. De derde veronderstelling houdt impliciet in dat er een geleidelijke overgang wordt verondersteld van het begin van bewegen van een enkele steen naar

doorgaand transport. Hierdoor wordt bijvoorbeeld voorbijgegaan aan het hiding-effect dat in sterkere mate een rol speelt bij zeer lage aantallen steenverplaatsingen dan bij hogere transporten. Ook de grotere invloed van het stochastische karakter van de stroming rond de kritische stroomsnelheid bij begin van bewegen wordt buiten beschouwing gelaten.

Voor het specifieke geval van de situatie benedenstrooms van een afstap zijn verder de volgende aannames gedaan:

- Geen transport van stenen bovenstrooms van het aanligpunt (In werkelijkheid kan er een klein transport optreden als gevolg van de relatief lage stroomsnelheid in de bodemmeer en de turbulentie).
- Het aanligpunt van de stroming aan de bodem is gefixeerd, dat wil zeggen fluctuaties daarin worden verwaarloosd. In werkelijkheid zal de ligging van het aanligpunt fluctueren tussen 6 à 8 keer de drempelhoogte.
- De sedimenttransportformule van Paintal is geldig, omdat deze is afgeleid en gevalideerd voor zeer lage transporten. De formule geldt in principe echter alleen voor uniforme stroming.
- Nabij de bodem is de turbulentie normaal verdeeld. In werkelijkheid zal er sprake zijn van een scheve verdeling.

3.3.3 Schadeniveau

Door Akkerman (1999) is het volgende schadeniveau gedefinieerd:

$$s_n = \frac{d_e}{d_0} \quad \text{met} \quad d_0 = n_d D_n \quad \text{en} \quad d_e = \frac{dq_s}{dx} \frac{1}{1-n} t \quad (1)$$

$$s_n = \frac{1}{n_d D_n} \frac{dq_s}{dx} \frac{1}{1-n} t \quad (2)$$

waarbij:

d_e = geërodeerde dikte van de toplaag van de bodembescherming (m)

d_0 = aanwezige dikte van de toplaag van de bodembescherming (m)

D_n = nominale steendiameter (m)

n_d = dikte bodembescherming uitgedrukt in aantal lagen (-)

q_s = specifiek transport (m^2/s)

n = porositeit (-)

x = afstand tot aanligpunt (m)

t = tijd (s)

Het schadeniveau s_n geeft een indicatie over de omvang van het steentransport. De waarde kan nooit groter zijn dan 1, omdat dan de toplaag volledig is verdwenen. Bij een waarde van 0 is er geen schade en bij negatieve waarden is er sedimentatie.

In ontwerpsituaties wordt meestal gedimensioneerd op basis van stabiliteitscriteria en mag slechts een zeer gering aantal stenen verplaatsen als de ontwerpsituatie daadwerkelijk optreedt. Dit betekent voor die situaties dat de waarde van het schadeniveau s_n zeer klein is, ondanks dat een levensduur van de constructie wordt beschouwd van bijvoorbeeld 30 jaar

(er is dus een zeer kleine kans op steenverplaatsing). Monitoren van een bestaande bodembescherming mag in die situaties dus geen of weinig schade aangeven.

Als een ontwerp wordt gemaakt waarbij wordt uitgegaan van regelmatig onderhoud in de vorm van bijstorten van stenen, dan mag worden verwacht dat bij monitoren ook schade wordt geconstateerd. In dat geval kan de grootte daarvan worden getoetst aan een vooraf voorspeld schadeniveau met bovengenoemde formules. Omgekeerd biedt het relateren van het schadeniveau aan de laagdikte de mogelijkheid tot een onderhoudsstrategie, want daarmee kan de hoeveelheid onderhoud worden aangegeven.

In de praktijk zal een beheerder echter nooit accepteren dat de toplaag over de volledige dikte is verdwenen ook niet als de ontwerpsituatie is opgetreden. Een realistischer waarde als bovengrens voor het schadeniveau is daarom bijvoorbeeld $s_n = 0,5$ (bij twee lagen stenen).

Samenvattend: In onderhavige afleiding zal de schade worden gerelateerd aan de laagdikte en niet aan de kans op bewegen van een gering aantal individuele stenen. Dit betekent dat wordt uitgegaan van ontwerpen inclusief onderhoud, bijbehorende onderhoudsstrategie, en de mogelijkheid schade te kunnen monitoren, welke zijn gebaseerd op (gedeeltelijk) bezwijken van een toplaag (dus het verdwijnen van een deel van de laagdikte). Er wordt dus niet uitgegaan van het begin van bewegen van enkele stenen, dat is immers niet gerelateerd aan monitoren. Voor de toekomst is het streven uiteraard gericht op een continue overgang van stabiliteitscriterium naar bezwijken.

Het transport q_s in vgl.(2) is een functie van de stroomsnelheid en eventuele correcties daarop, bijvoorbeeld in verband met de turbulentie en/of een afwijkend snelheidsprofiel in de vertikaal. Stroomsnelheid en turbulentie, gemiddeld in de vertikaal of op een bepaald niveau boven de bodem, verschillen per locatie in de stroomrichting. Beschouwen we een afstand Δx gedurende een tijd Δt dan kan de transportgradiënt dq_s/dx voor die tijdstap worden gedefinieerd als:

$$\frac{dq_s}{dx} \Delta t = \frac{(q_{s,2} + q_{s,4}) \frac{\Delta t}{2} - (q_{s,1} + q_{s,3}) \frac{\Delta t}{2}}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

De transporten $q_{s,1}$ en $q_{s,3}$ zijn gerelateerd aan respectievelijk de snelheden $u_1 + u_1'$ en $u_1 - u_1'$ in de meest bovenstroomse gelegen raai 1 van de afstand Δx en $q_{s,2}$ en $q_{s,4}$ aan respectievelijk de snelheden $u_2 + u_2'$ en $u_2 - u_2'$ in de meer benedenstroomsgelegen raai 2 (u_x = tijdgemiddelde stroomsnelheid; u_x' = turbulente snelheidsfluctuatie). De stroomsnelheden $u_1 - u_1'$ en $u_2 - u_2'$ kunnen negatief zijn, dat wil zeggen in bovenstroomse richting werken. Aangenomen is dat de helft van de tijd de turbulentie in positieve x-richting werkt en de helft van de tijd in negatieve x-richting.

Aannemende dat de formulering volgens Paintal van toepassing is om het snelheidseffect op het transport in rekening te brengen, kan onafhankelijk van de wijze van modelleren van gemiddelde stroomsnelheid u en turbulentie u' uitgaande van vgl.(2) en (3) een functie voor het schadeniveau worden afgeleid. Het uiteindelijk resultaat luidt (zie Bijlage A):

$$s_{n,i} = const. \frac{\Delta t_i}{x_2 - x_1} \left[\left\{ \left(\frac{u_2 + u_2^1}{C_2} \right)^{17.8} + \left(\frac{u_2 - u_2^1}{C_2} \right)^{17.8} \right\} - \left\{ \left(\frac{u_1 + u_1^1}{C_1} \right)^{17.8} + \left(\frac{u_1 - u_1^1}{C_1} \right)^{17.8} \right\} \right] \quad (4)$$

$$\text{met } const = \frac{3.10^7 (\Delta g D^3)^{0.5}}{2 (\Delta D)^{8.9}} \cdot \frac{1}{n_d D_n (1-n)} \quad (5)$$

waarin:

C_x = Chézy coëfficiënt in x ($m^{0.5}/s$)

Δ = relatieve dichtheid stenen (-)

Zoals vermeld wordt de sedimenttransportformule van Paintal gebruikt. Deze is afgeleid om het snelheidseffect op het transport in rekening te brengen voor uniforme stroming met “gewone” turbulentie. In de onderhavige situatie is dit niet het geval, maar geldt:

$$q_s \div u_x^{17.8} \quad \text{met} \quad u_x = \bar{u}_x \pm u_x^1 \quad (6)$$

waarbij u_x^1 veel groter is dan in uniforme stromingsomstandigheden. Voor het mogen toepassen van de formule van Paintal is dit geen probleem, maar dient bedacht te worden dat dan feitelijk wordt gerekend met een equivalente uniforme stroomsnelheid u_{eq} . Dit kan als volgt worden toegelicht. Bij het in rekening brengen van verhoogde turbulentie wordt vaak gebruik gemaakt van de Breusers formulering:

$$u_{\max} = u_0 \frac{1 + \alpha r_0}{1,3} \quad (7)$$

waarin:

u_{\max} = totale snelheid (gemiddelde + turbulentie) (m/s)

u_0 = gemiddelde stroomsnelheid bij uniforme condities (m/s)

r_0 = relatieve turbulentie intensiteit (-)

α = vergrotingsfactor voor de turbulentie (-)

Met $\alpha = 3$ en $r_0 = 0,1$ volgt dan de conditie voor uniforme stroming. Bij verhoogde turbulentie, bijvoorbeeld $r_0 = 0,3$, kan een hogere stroomsnelheid worden bepaald. Omgekeerd kan de relatie ook worden gebruikt bij substitutie in de Paintal-formule van de totale snelheid, zijnde de som van gemiddelde en turbulente fluctuatie. In dat geval wordt het sedimenttransport uitgerekend met een equivalente stroomsnelheid die gelijk is aan:

$$u_{eq} = \frac{u_x + \alpha r_0 u_0}{1,3} = \frac{u_x + u_x^1}{1,3} \quad (8)$$

Tenslotte wordt voor de volledigheid de wijze van berekenen van de faalkans vermeld. Daarbij wordt uitgegaan van de betrouwbaarheidsfunctie Z:

$$Z = 1 - S_T (= R - S) \quad (9)$$

$$\text{met: } S_T = T S_1 = T \sum s_{n,i} \quad \text{met } s_{n,i} = f(u_i, h_i, t_i, r_i) \quad (10)$$

De kans op schade volgt dan met:

$$P(Z < 0) = P(S_T > 1) = P(1 - S_T < 0) \quad (11)$$

waarin:

- Z = betrouwbaarheidsfunctie (-)
- R = sterkte van de constructie (-)
- S = belasting op een constructie (-)
- S₁ = schade gedurende 1 jaar (-)
- T = levensduur (jaar)
- s_{n,i} = schadeniveau voor i^e tijdstap (-)
- P = faalkans (-)

3.3.4 Experimentele spoor

In deze paragraaf wordt de algemene formule voor het schadeniveau zoals in voorgaande paragraaf gepresenteerd, toegespitst op de resultaten en condities tijdens de uitgevoerde experimenten door De Gunst (1999). Dit betekent dat wordt uitgegaan van gemeten stroomsnelheden en turbulenties. Daarbij is er voor gekozen om de stroomsnelheden en turbulenties te gebruiken die zijn gemeten op een niveau $z = 0,05$ m boven de bodem. Deze waarde is gekozen omdat uit eerdere studies een goede voorspelling voor de steenstabiliteit gerelateerd bleek aan de stroomcondities op een hoogte boven de bodem gelijk aan $5 \cdot D_{n50}$ (EKOR, 1982). Bij een waarde van $D_{n50} = 0,01$ m betekent dit $z = 0,05$ m.

Stroomsnelheid en turbulentie kunnen dan voor de tijdstap met de grootste afvoer ($Q = 0.059 \text{ m}^3/\text{s}$) worden gerepresenteerd door:

$$u_x = 0.44 + 0.1 \ln(1 + 6x)^{1,26} \quad (12)$$

en

$$k_x = 0.3034 \exp[-0,6826(x + 0,465)] \quad (13)$$

waarin:

- k_x = turbulente kinetische energie (-)

Beide formules zijn gefit aan gemeten waarden voor u_x en u_x' (proef 4_2), waarbij verder is aangenomen dat $u_{x=1,60\text{m}} = 0,74 \text{ m/s}$ en dat op $x = 1,60$ m de waarde van u_x' is gerelateerd aan $r = 0,1$ (turbulentie bij uniforme stroming). Om k te berekenen is daarbij gebruik gemaakt van de formule (Jongeling, 2000):

$$u_x^1 = \alpha \sigma_u \quad \text{met } \sigma_u = 1,07 \sqrt{k_x} \quad (14)$$

waarin:

σ_u = standaardafwijking van de stroomsnelheid (m/s)

De coëfficiënt 1,07 in (14) wordt gevonden wanneer in formules (2.3) en (2.5) voor ξ de standaardwaarde 0,5 wordt gesubstitueerd, voor λ de waarde 0,3 en voor de verhouding σ_w^2/σ_u^2 de waarde 0,35 (arbitrair!). De waarde van λ is nog onderwerp van studie (λ zal groter dan 0 zijn en waarschijnlijk niet groter dan 2 in realistische omstandigheden); de verhouding σ_w^2/σ_u^2 ligt afhankelijk van het stroombeeld eveneens ruwweg tussen 0 en 2.

Desgewenst kan voorts r_x worden afgeleid (met vgl.(8)).

De situatie met de hoogste afvoer komt in het model slechts 1200 seconden voor van de in totaal 9600 s. Voor de andere tijdvakken treden lagere stroomsnelheden op en zouden andere formuleringen moeten worden gebruikt. Deze zijn niet afzonderlijk bepaald op bovenstaande wijze, maar de uitkomsten van bovenstaande formules zijn verhoudingsgewijs gereduceerd.

Substitutie van het bovenstaande in vgl.(4) resulteert uiteindelijk in:

$$s_{n,i} = const. \frac{\Delta t_i}{x_2 - x_1} \left(\frac{1}{C} \right)^{17,8} \left[\left\{ (u_2 + u_2^1)^{17,8} + (u_2 - u_2^1)^{17,8} \right\} - \left\{ (u_1 + u_1^1)^{17,8} + (u_1 - u_1^1)^{17,8} \right\} \right] \quad (15)$$

$$\text{met } const = \frac{3 \cdot 10^7 (\Delta g D^3)^{0,5}}{2 (\Delta D)^{8,9}} \cdot \frac{1}{n_d D_n (1 - n)} \quad (5)$$

Formule voor u_x^1 :

$$u_x^1 = \alpha \sigma_u \quad \text{met} \quad \sigma_u = 1,07 \sqrt{k_x} \quad (16)$$

(Zie ook hierboven voor wat betreft de aannames van de onderlinge verhoudingen van de varianties van de stroomsnelheidscomponenten; deze verhoudingen zijn per stroomsituatie verschillend en zijn bepalend voor de grootte van de coëfficiënt in formule (16). In de huidige analyse is voorlopig uitgegaan van een waarde 1.07).

Eerder is opgemerkt dat de stroomsnelheden $u_1 - u_1^1$ en $u_2 - u_2^1$ negatief kunnen zijn. In de uiteindelijke berekeningen is de exponent van die termen in formule (15) daarom gelijk gesteld aan 17,0 in plaats van 17,8.

3.3.5 Numerieke spoor

Bij het numerieke spoor is op geheel analoge wijze het schadeniveau bepaald, maar zijn de stroomsnelheden en turbulenties niet ontleend aan de gemeten waarden in het schaalmodel, maar aan de uitkomsten van berekeningen met CFX voor de situatie van een afstap (zie hoofdstuk 2, alsmede Jongeling, 2000). Uitgegaan is opnieuw van de condities op 0,05 m boven de bodem, maar daarnaast is ook uitgegaan van berekeningsresultaten waarbij waarden zijn aangehouden die zijn gemiddeld over de onderste 0.05 m.

De daarbij behorende functies voor stroomsnelheid en turbulente kinetische energie k luiden:

- Gemiddeld over de onderste 5 cm:

$$u_x = 0.137 + 0.168 \ln(1 + 6x)^{0.87} \quad (17)$$

en

$$k_x = 0.021(x + 0.52)^{-0.6} \quad (18)$$

- Op het niveau $z = 0,05$ m:

$$u_x = 0.36 + 0.092 \ln(1 + 6x)^{1.17} \quad (19)$$

en

$$k_x = 0.0275(x + 0.52)^{-0.72} \quad (20)$$

Ook deze beide formules gelden voor een afvoer van $Q = 0.059 \text{ m}^3/\text{s}$ en dus de hoogste stroomsnelheid. De lagere snelheden zijn in verhouding gereduceerd.

Met bovenstaande formuleringen kan een schadeniveau volgens het CFX-spoor worden geformuleerd:

$$s_{n,i} = \text{const.} \cdot \frac{\Delta t_i}{x_2 - x_1} \left(\frac{1}{C} \right)^{17.8} \left[\left\{ (u_2 + u_2^1)^{17.8} + (u_2 - u_2^1)^{17.8} \right\} - \left\{ (u_1 + u_1^1)^{17.8} + (u_1 - u_1^1)^{17.8} \right\} \right] \quad (21)$$

$$\text{met } \text{const} = \frac{3.10^7 (\Delta g D^3)^{0.5}}{2 (\Delta D)^{8.9}} \cdot \frac{1}{n_d D_n (1 - n)} \quad (5)$$

Formule voor u_x' : zie vgl.(16) met commentaar t.a.v. de coëfficiënt 1,07.

Opgemerkt wordt dat de α in bovenstaande dezelfde is als de a die door Jongeling wordt gebruikt in Q2650. Dit betekent ook dat de α anders is gedefinieerd dan door Jongeling. Af te leiden is dat geldt:

$$\alpha = A \sqrt{\xi} \alpha_J \quad (22)$$

Door Jongeling is in Q2650 voorlopig gesteld dat een waarde 6 voor de versterkingsfactor α_J (versterkingsfactor voor het aandeel van de turbulente kinetische energie in de nieuwe stromingsbelastinggrootheid $(u + \alpha_J \sqrt{k})^2$) mogelijk een geschikte waarde is (Jongeling,

2000). Met $\xi = 0,5$, $\lambda = 0,3$, $\sigma_w^2/\sigma_u^2 = 0,35$ en dientengevolge $A = 1,42$ en volgt dan: $\alpha = 6,0$.

In Hoofdstuk 2 is voor de stromingssituatie met afstap zoals doorgemeten door De Gunst, geconstateerd dat juist benedenstrooms van het aanligpunt de waarde van λ ongeveer 0,5 bedraagt. Substitutie van $\lambda = 0,5$ en $\sigma_w^2/\sigma_u^2 = 0,56$ levert $A = 1,53$, en met $\xi = 0,5$ wordt gevonden: $\alpha = 6,5$. Waarden voor α van 6 à 6,5 lijken aan de hoge kant.

Verder wordt opgemerkt dat het aanligpunt bij de CFX berekeningen ligt op ca 0,5 m (= 7 * afstaphoogte d) benedenstrooms van het afstap. Dit is ongeveer overeenkomstig de experimenten van De Gunst.

Tenslotte geldt ook in dit geval dat de stroomsnelheden $u_1 - u_1'$ en $u_2 - u_2'$ negatief kunnen zijn. In de uiteindelijke berekeningen is de exponent van die termen daarom gelijk gesteld aan 17,0 in plaats van 17,8.

3.3.6 Empirische spoor

In tegenstelling tot beide andere sporen is nu geen informatie beschikbaar over de stroomsnelheid en de turbulentie. Modelleringen hiervoor zullen in het navolgende worden afgeleid. De totale stroomsnelheid (gemiddelde + snelheidsfluctuaties) kan worden geschreven als:

$$u_{\max} = \bar{u}_x + u_x^1 = \bar{u}_x + \alpha \sigma_u = \bar{u}_x (1 + \alpha r_x) \quad (23)$$

In figuur 3.2 zijn de relevante stroomsnelheden schematisch gepresenteerd.

stroomsnelheid

De stroming raakt de bodem weer bij het aanligpunt en vanaf dat punt gaat de stroming zich geleidelijk weer ontwikkelen naar een stroombeeld met een logaritmisch snelheidsprofiel in de vertikaal zoals dat bij uniforme stroming behoort. Vanaf het aanligpunt ontwikkelt zich een grenslaag en neemt de stroomsnelheid toe.

Dit is als volgt geschematiseerd:

In het aanligpunt wordt de uniforme snelheid u_0 gereduceerd tot een representatief veronderstelde snelheid u_x . De nieuwe vertikaal gemiddelde stroomsnelheid voldoet aan:

$$\bar{u}_x = u_0 \frac{h_x}{h_x + \delta_{\max}} \quad (24)$$

met

$$\delta_{\max} = 0.37 x_{\max} \left(\frac{u_0 x_{\max}}{\nu} \right)^{-0.2} \quad \text{met} \quad x_{\max} = 10 \cdot h_0 \quad (25)$$

waarin:

h_x = waterdiepte op afstand x vanaf het aanligpunt (m)

h_0 = benedenstroomse waterdiepte met uniforme stroming (m)

δ_{\max} = turbulente grenslaagdikte op een afstand x_{\max} waar uniforme condities worden verondersteld (m)

Verder benedenstrooms vanaf het aanligpunt neemt de grenslaagdikte δ_x geleidelijk toe van 0 tot δ_{\max} en de snelheid u_x neemt daardoor geleidelijk toe tot u_0 bij x_{\max} af:

$$\bar{u}_x = u_0 \frac{h_x}{h_x + (\delta_{\max} - \delta_x)} \quad (26)$$

met

$$\delta_x = 0.37x \left(\frac{u_0 x}{\nu} \right)^{-0.2} \quad (27)$$

Vgl.(27) berekent als functie van x de dikte van de turbulente grenslaag op een plaat (van Rijn, 1990).

turbulentie

De dieptegemiddelde snelheidsfluctuaties kunnen worden geschreven als:

$$u^1 = \alpha \cdot r_x \cdot \bar{u} \quad (28)$$

waarin:

α = statistische parameter (-)

u = nader te bepalen gemiddelde stroomsnelheid (m/s)

r_x = locatie afhankelijke relatieve turbulentie (-)

Voor de schademodelering wordt uitgegaan van een constante turbulentie tussen afstap en aanligpunt en benedenstrooms van het aanligpunt van een exponentieel afnemende turbulentie afnemend tot een niveau gelijk aan dat bij uniforme stroming. Schematisch is dit in Figuur 3.3 weergegeven.

Voor niet-uniforme stroming benedenstrooms van constructies kan de dieptegemiddelde r_x worden geschreven als (Hoffmans, 1993a, 1993b, 1994):

$$r_x = \sqrt{c_k \left(1 - \frac{d}{h}\right)^{-2} \left(\frac{x}{6,67h} + 1\right)^{-1,08} + 1,45 \frac{g}{C_x^2}} \quad (29)$$

De formule is geldig vanaf het aanligpunt; bovenstrooms wordt een constante waarde verondersteld:

$$r_x = \sqrt{c_s + 1,45 \frac{g}{C_x^2}} \quad (30)$$

De 2^e term is de bronterm behorende bij uniforme stroming. Voor de maximale waarde van c_s geldt dus (Hoffmans, 1993b):

$$c_s = c_k \left(1 - \frac{d}{h}\right)^{-2} \quad (31)$$

waarin:

d = drempelhoogte (m)

Voor c_k leidt Hoffmans af voor drempels: $c_k = 0,025$. In algemene zin is de coëfficiënt c_s afhankelijk van de geometrie van de constructie en de randvoorwaarden:

c_s = functie (drempelhoogte, lengte bodemverdediging, benedenwaterstand)

De formulering voor r_x is gerelateerd aan de dieptegemiddelde stroomsnelheid u_0 en dit impliceert dat deze waarde ook met worden ingevuld in vgl.(28).

Substitutie van bovenstaande in vgl.(4) levert een formule voor het schadeniveau volgens het empirische spoor.

$$s_{n,i} = const. \frac{\Delta t_i}{x_2 - x_1} \left(\frac{u_0}{C} \right)^{17.8} \left[\left\{ \left(\frac{h}{h + (\delta_{\max} - \delta_2)} + \alpha r_2 \right)^{17.8} + \left(\frac{h}{h + (\delta_{\max} - \delta_2)} - \alpha r_2 \right)^{17.8} \right\} - \left\{ \left(\frac{h}{h + (\delta_{\max} - \delta_1)} + \alpha r_1 \right)^{17.8} + \left(\frac{h}{h + (\delta_{\max} - \delta_1)} - \alpha r_1 \right)^{17.8} \right\} \right] \quad (32)$$

$$\text{met } const = \frac{3.10^7 (\Delta g D^3)^{0.5}}{2 (\Delta D)^{8.9}} \cdot \frac{1}{n_d D_n (1 - n)} \quad (5)$$

Tenslotte geldt opnieuw dat de stroomsnelheden $u_1 - u_1'$ en $u_2 - u_2'$ negatief kunnen zijn (in vgl.(32) betreft het dan de termen $-\alpha r_2$ en $-\alpha r_1$). In de uiteindelijke berekeningen is de exponent van die termen daarom gelijk gesteld aan 17,0 in plaats van 17,8.

3.4 Voorbeeld

Voor de specifieke situatie van een backward-facing step is de ontwikkelde methodiek getoetst aan metingen door De Gunst gedaan in het kader van haar afstudeerproject aan de TU-Delft (De Gunst, 1999). Voor de resultaten wordt verwezen naar paragraaf 3.2.2.

In de paragrafen 3.4.1 t/m 3.4.3 worden de resultaten wat betreft de vergelijking van gemeten en berekende schadeniveaus gepresenteerd, waarna in paragraaf 3.4.4 deze resultaten kritisch worden beoordeeld.

Met de ontwikkelde methodiek is het ook mogelijk de faalkans (probabilistische berekening) te bepalen met de vgl.(9) t/m (11). Eerder is dit uitgevoerd met het programma BD-Afda (Jongeling, 2000), maar ook andere pakketten of andere methodieken zijn mogelijk, zoals bijvoorbeeld een Monte-Carlo simulatie. Echter, dergelijke berekeningen zijn nu niet uitgevoerd, omdat het resultaat op zich niets toevoegt aan de resultaten van het berekende schadeniveau op deterministische wijze. Een probabilistische berekening is immers niets meer of minder dan het in rekening brengen van de onzekerheden.

Gegeven de diverse formules voor de verschillende sporen zal dus het schadeniveau op deterministische wijze worden bepaald voor omstandigheden zoals die golden voor de modelproeven. De tijdsafhankelijke en locatieafhankelijke variabelen in deze formules zijn: stroomsnelheid u , turbulentie u' (of r), tijd t en bij het empirische spoor ook waterdiepte h en grenslaagdikte δ . Het schadeniveau is uitgerekend gebruik makend van een Excel spreadsheet; een voorbeeld daarvan is bijgevoegd als Bijlage B (experimentele spoor met $\alpha = 2$).

Gegeven een breuksteendiameter van $D_n = 0.0108$ m zijn de overige relevante invoerwaarden:

$$\begin{aligned} n_d &= 1,8 \\ n &= 0,4 \\ c_k &= 0,025 \\ c_5 &= 2,5 \\ \alpha &= 2 \text{ à } 3 \\ h &= 0,2 \text{ m} \end{aligned}$$

Lokaal is in het laboratorium experiment daadwerkelijk de volledige toplaag verdwenen. Dit betekent dat voor dat specifieke oppervlak zou moeten gelden: $s_n = 1$. Als een groter oppervlak wordt beschouwd dan is uiteraard het schadeniveau kleiner dan 1.

3.4.1 Resultaten experimentele spoor

Het schadeniveau is berekend met de formules uit paragraaf 3.3.4 met $\alpha = 2$ en $\alpha = 3$. Voor $\alpha = 2$ staan de resultaten wat betreft het verloop van de stroomsnelheden (maximale snelheid, tijdgemiddelde snelheid en turbulente fluctuatie) en het schadeniveau in Figuur 3.4, en voor $\alpha = 3$ in Figuur 3.5.

Beschouwen we eerst $\alpha = 2$ dan zien we dat de totale snelheid van $x = 0$ m tot $x = 0,4$ m eerst toeneemt om daarna af te nemen. Dit vertaalt zich in een maximaal schadeniveau bij $x = 0,2$ m (= 3 keer de drempelhoogte) gelijk aan $s_{n,i} = 0,00140$. Daarna daalt het schadeniveau om vanaf $x = 0,5$ m negatief te worden. In andere woorden: transport treedt op van $x = 0$ m tot $x = 0,5$ m en verder benedenstrooms is sprake van sedimentatie.

Als we dit vergelijken met de meetresultaten wat betreft het steentransport in de experimenten dan klopt het beeld niet vanaf $x = 0,5$ m. Bij de experimenten was over de gehele lengte sprake van transport en niet van sedimentatie.

De berekende schadeniveaus kunnen worden vertaald naar aantallen verplaatste stenen. Dit is uitgevoerd in onderstaande tabel. Per vaklengte van $\Delta x = 0,1$ m is een waarde van het schadeniveau $s_{n,i}$ bepaald, terwijl dit ook voor het volledige traject van $\Delta x = 1,6$ m is berekend. Door nu per traject het schadegetal te vermenigvuldigen met het aantal oorspronkelijk aanwezige stenen van 144 kan per traject het aantal verplaatste stenen n_e worden berekend.

Afstand x tot het aanligpunt (m)	$S_{n,i}$ per traject	Verplaatste aantal stenen n_e Per traject	Cumulatieve aantal stenen n_e na 9600 s
0,0 – 0,1	+ 0,00138	0,2	0,2
0,1 – 0,2	+ 0,00139	0,2	0,4
0,2 – 0,3	+ 0,00079	0,1	0,5
0,3 – 0,4	+ 0,00029	0	0,5
0,4 – 0,5	- 0,00005	0	0,5
0,5 – 0,6	- 0,00026	0	0,5
0,0 -- 1,6	+ 0,00002	0,05	0

Ter toelichting de wijze waarop het aantal stenen kan worden bepaald. Het aantal aanwezige

stenen bedraagt: $n_0 = n_d \frac{lb}{s_f D_n^2}$ met $s_f = \frac{\pi}{4}$

Voor een oppervlak van $l*b = 1 \text{ m}^2$ volgt dan 14422 stenen/m^2 ; voor $l = 0,1\text{m}$ en $b = 0,1\text{m}$ volgt $n_0 = 144$. Het aantal geërodeerde stenen volgt dan uit: $n_{\text{geërodeerd}} = S_n n_0$

Als bovenstaand resultaat wordt vergeleken met de metingen dan kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Over het gehele traject van 1,6 m kan het aantal berekende stenen gelijk aan 0 worden gesteld en dat is veel kleiner dan bij de metingen waarbij 100 stenen verplaatsten. Verwacht zou mogen worden een schadegetal gelijk aan $s_{n,i} = 0,043$ (100 verplaatste stenen gedeeld door 2300 aanwezige stenen in een traject van 1,60 m), terwijl berekend is $s_{n,i} = 0,00002$.
2. Wordt slechts een traject bekeken van 0,20 m (3 keer de drempelhoogte waarin de grootste erosie plaats vindt) dan zijn de resultaten ook niet conform de meetresultaten: minder dan 1 berekend tegen 24 gemeten. Op basis van het gemeten aantal verplaatste stenen kan worden berekend dat het schadegetal ongeveer gelijk zou moeten zijn aan $s_{n,i} = 0,08$ (24 verplaatste stenen gedeeld door 288 aanwezige stenen in een traject van 0,20 m).

Welke benadering ook wordt gekozen, bijvoorbeeld de totale gootbreedte in plaats van een centraal gedeelte van slechts 0,10 m zoals in bovenstaande, altijd is het resultaat dat het berekende aantal stenen geringer is dan het gemeten aantal.

Voor een erosiebreedte van 0,1 m is gekozen in plaats van de gootbreedte van 0,4 m, omdat uit de resultaten van De Gunst (1999) ten aanzien van de breedte van de erosiekuil blijkt dat deze ovaalvormig is met een breedte in de orde van 0,1 m. Dit houdt verband met de breedte/diepte-verhouding van de laboratorium goot, waardoor het zeer waarschijnlijk is dat wandinvloeden zijn opgetreden.

Voor de berekening met $\alpha = 3$ (Figuur 3.5) zijn het gedrag van de snelheden en het verloop van het schadeniveau wat betreft vorm gelijk aan het voorgaande. Het schadeniveau is echter altijd negatief en dus wordt sedimentatie voorspelt. Kennelijk resulteert het in rekening brengen van de grotere turbulentie tot een over het gehele traject afnemende totale

stroomsnelheid en dus een negatieve transportgradiënt. Dit resultaat is aanleiding niet het aantal verplaatste stenen te berekenen.

Tenslotte wordt opgemerkt dat 75% van de waarde van het schadeniveau wordt bepaald door de laatste tijdstap van 1200 s en dat de totale waarde bijna geheel wordt bepaald door de laatste twee tijdstappen. Feitelijk zou kunnen worden volstaan met de twee hoogste afvoeren.

3.4.2 Resultaten numeriek spoor

Analoog aan de uitgevoerde berekeningen zijn ook voor het numerieke spoor schadeniveau's bepaald voor $\alpha = 2$ en $\alpha = 3$. In de Figuren 3.6 en 3.7 zijn het verloop van de snelheden en de schadeniveaus gepresenteerd.

Geconstateerd kan worden dat de vorm van het schadeniveau zeker voor $\alpha = 2$ geheel beantwoordt aan het verwachte verloop: sterk toenemend transport in de eerste 0,20 m om daarna snel af te nemen tot een waarde bijna gelijk 0 bij 0,60 m. Daarna zou het transport verder moeten teruglopen naar 0, maar dat is niet het geval. De lokatie met maximale schade komt zeer goed overeen met de lokatie van maximale schade bij de metingen. De grootte van de schade komt echter in het geheel niet overeen.

Voor $\alpha = 3$ zijn vergelijkbare conclusies te trekken wat betreft de vorm van de curves, maar het maximale schadeniveau is groter dan bij $\alpha = 2$, terwijl direct na de lokatie met maximale transport een gebied met sedimentatie optreedt. Op zich is dit fysisch niet onlogisch, immers direct benedenstrooms van een erosiegebied zullen de geërodeerde stenen weer sedimenteren.

Eerder is aangegeven dat de factor α voor experimenten met een afstap de waarde 6 à 6,5 kan hebben. Hoewel dit niet reëel lijkt zijn voor waarden van α van 5,6 en 7,3 ook schadeniveaus bepaald. Het resultaat staat in Figuur 3.8.

Het blijkt dat de grote dominantie van de turbulentie tot gevolg heeft dat zeer grote negatieve waarden voor het schadeniveau worden berekend.

Tenslotte zijn berekeningen uitgevoerd maar niet gepresenteerd op basis van snelheden en turbulenties gemiddeld over de onderste 0,05 m met de vgl.(17) en (18) voor respectievelijk u en u' . In dat geval blijken de stroomsnelheden en turbulenties zo gering dat geen transporten optreden.

3.4.3 Resultaten empirische spoor

Geheel analoog aan de experimentele en numerieke berekening van het schadeniveau is ook voor het empirische spoor het schadeniveau bepaald. In vergelijking met de beide andere sporen is uiteraard nu gebruik gemaakt van de empirische formules voor tijdgemiddelde stroomsnelheid en turbulentie.

De resultaten voor het verloop van de snelheden en de schadeniveaus staan weergegeven in de Figuren 3.9 en 3.10.

Uit beide figuren blijkt dat het schadeniveau in het eerste deel negatief is en dat daar dus sedimentatie wordt voorspeld. Dit is niet conform het geconstateerde bij de proeven. Bij $\alpha = 2$ treedt uiteindelijk bij $x = 0,80$ m wel transport op, maar bij $\alpha = 3$ is over het gehele traject sprake van sedimentatie.

Gezien deze resultaten is verder afgezien van een berekening van het aantal verplaatste stenen.

Een ander aspect is dat bij de berekening een maximale waarde voor de relatieve turbulentie r wordt berekend van 0,27 bij het aanligpunt (te berekenen met vgl.(31). Dit is lager dan de gemeten waarde van 0,50. Overwogen zou kunnen worden om een berekening uit te voeren met deze gegevens, bijvoorbeeld door aanpassing van de waarde van c_k om dit effect te verdisconteren, omdat dan te verwachten valt dat een reëler waarde voor het schadeniveau wordt verkregen.

3.4.4 Nadere analyse resultaten

Het verwachte beeld op grond van de experimentele resultaten is dat de stroomsnelheid op een bepaalde hoogte boven de bodem vanaf het aanligpunt geleidelijk toeneemt en dat de turbulentie op die zelfde hoogte geleidelijk afneemt. De som van beide bepaalt de uiteindelijke belasting op de bodem. Teneinde een positieve transportgradiënt (en daarmee steentransport) te verkrijgen zal de gradiënt in de totale snelheid altijd positief moeten zijn. Om een geleidelijk toenemend transport te krijgen zal de gradiënt in de totale snelheid eerst moeten toenemen, om vervolgens geleidelijk af te nemen zodat het transport geleidelijk afneemt tot nul. De uiteindelijke waarde van de totale snelheid bereikt asymptotisch een waarde gelijk aan u_0 (uniforme stroming) plus een waarde van orde 30% van u_0 (maximale turbulentie gerelateerd aan $r_0 = 0,1$).

Voor het schadeniveau mag je op grond van het voorgaande verwachten dat deze eerst toeneemt en vervolgens afneemt (zie bijvoorbeeld figuur 3.4).

Bij de bespreking van de afzonderlijke resultaten is gebleken dat een dergelijk verloop zeker niet in alle gevallen resulteert. Het verloop blijkt in sterke mate afhankelijk van de gradiënt in de stroomsnelheid (tijdgemiddelde + fluctuatie).

Voor het experimentele en numerieke met spoor $\alpha = 2$ (Figuren 3.4 en 3.6) lijkt het resultaat wat betreft vorm correct, maar niet de grootte. Dit lijkt ogenschijnlijk ook zo voor het numerieke met spoor $\alpha = 3$, maar daarbij treedt direct benedenstrooms van het aanligpunt eerst sedimentatie op. Bij het experimentele spoor met $\alpha = 3$ en de beide empirische resultaten treedt sedimentatie op en is dus kennelijk de totale stroomsnelheid niet correct gemodelleerd.

Het lijkt er op dat bij $\alpha = 3$ de turbulentie een te grote rol krijgt toebedeelt ten opzichte van de tijdgemiddelde snelheid. Steeds is in die gevallen sprake van sedimentatie. In het extreme geval wordt dit geïllustreerd door de berekeningen met $\alpha = 5,7$ en $\alpha = 7,3$ bij het numerieke spoor (Figuur 3.8).

Dit verklaart nog niet waarom dan ook bij het empirische spoor niet een goed verloop van het schadeniveau wordt verkregen bij $\alpha = 2$, hoewel de sedimentatie hier geringer is dan bij $\alpha = 3$.

Waarschijnlijk speelt hier een rol dat het zeer flauwe verloop van de tijdgemiddelde snelheid zelfs bij $\alpha = 2$ al leidt tot een te grote invloed van de turbulentie.

Ter onderbouwing van het voorgaande zijn in Figuur 3.11 en 3.12 tijdgemiddelde snelheid en turbulentie respectievelijk totale snelheid weergegeven. Het verloop van de tijdgemiddelde snelheid bij het experimentele en numerieke spoor blijkt ongeveer hetzelfde. Ook blijkt inderdaad het zeer flauwe verloop van de tijdgemiddelde snelheid bij het empirische spoor ten opzichte van de beide andere sporen, wat het eerder genoemde grotere relatieve effect van de turbulentie veroorzaakt.

Kijken we naar de turbulentie dan valt op dat deze bij de metingen (experimentele spoor) bij $\alpha = 3$ veel sneller afneemt dan bij de andere sporen. In de eerste 0,5 m vanaf het aanligpunt is de waarde ongeveer gelijk voor alle sporen (bij $\alpha = 3$). Kijken we naar het experimentele spoor met $\alpha = 2$ dan is het verloop ongeveer gelijk maar is uiteraard de grootte van de turbulentie veel kleiner (orde 30% direct benedenstrooms van het aanligpunt). Dit betekent ten opzichte van $\alpha = 3$ dat de invloed van de turbulentie geringer is en dat daardoor steentransport optreedt in plaats van bij $\alpha = 3$ sedimentatie.

Het voorgaande is terug te vinden in de vergelijking van de totale snelheid voor de verschillende sporen, gepresenteerd in Figuur 3.12. Daaruit blijkt dat de curven allemaal bijna horizontaal lopen, maar dat kleine verschillen het precieze verloop bepalen. Ter illustratie daarvan is in Figuur 3.13 vergroot het verloop weergegeven van de totale snelheid bij het numerieke spoor met $\alpha = 3$. Duidelijk zijn nu de diverse buigpunten in de curve te onderkennen, die reflecteren in de vorm van het overigens niet geheel correcte schadeniveau in Figuur 3.7.

Op basis van het voorgaande moet worden geconcludeerd dat de modellering van de tijdgemiddelde snelheden en turbulenties zeer nauw blijkt te luisteren. Bij een kleine verandering is al snel sprake van een ander transportgedrag (sedimentatie in plaats van transport).

Dit houdt mede verband met de grote gevoeligheid van het schadeniveau voor de stroomsnelheid vanwege de hoge exponent van 17,8 in de formule van Paintal. Overwogen moet worden of met de nu gevolgde aanpak moet worden verder gegaan of dat naar alternatieven moet worden gezocht. Misschien moet toch een kritieke stroomsnelheid worden ingebouwd waar beneden geen transport optreedt. Om toch transport beneden die kritieke grens te laten optreden (een fysische grens bestaat immers niet), zou kunnen worden overwogen om het stochastische karakter van de belasting in rekening te brengen.

Wat betreft de grootte van het schadeniveau moet worden geconcludeerd dat in alle gevallen het berekende steentransport te laag is. Mogelijk is de oorzaak een te lage totale stroomsnelheid en zou dan op een hoger niveau boven de bodem de karakteristieke snelheden en turbulenties moeten worden bepaald. In dat verband wordt opgemerkt dat door Jongeling (2000) is gesteld dat een goede referentie waarde voor de stromingscondities lijkt te zijn: $5 \cdot D_{n50} + 0,1 \cdot h$. Dit leidt in de onderhavige situatie tot een niveau 7 cm boven de bodem. (opgemerkt wordt dat het eerste deel gelijk is aan de door EKOR aanbevolen waarde). Mogelijk leidt dit tot een verbetering, maar een berekening met snelheden en turbulenties op dit niveau heeft niet plaats gevonden.

Wat betreft het empirische spoor is duidelijk dat het verloop van de tijdgemiddelde snelheid te flauw is. De modellering hiervan zal moeten worden aangepast. Het verloop van u' via r lijkt wel correct, dat wil zeggen het komt overeen met het verloop volgens het numerieke spoor, maar de afname is langzamer dan bij het experimentele spoor. In dat verband is het opmerkelijk dat bij de experimenten u' veel sneller afneemt. Mogelijk speelt daarbij een rol de grotere demping van de turbulentie boven stenen dan boven een zandbodem, die voor de stroming gladder aanvoelt dan de ruwere stenen. De betreffende formule (zie vgl.(29)) is afgeleid voor de afname van de turbulentie boven een zandbodem.

Tenslotte moet worden opgemerkt dat de onderlinge verhouding van de varianties van de stroomsnelheden in de drie hoofdrichtingen nog onderwerp van studie is (zie ook Hoofdstuk 2). De omrekening van k uit de CFX berekeningen naar σ_u en vervolgens u_x' is daarom nog niet duidelijk.

3.5 Conclusies

Op basis van de uitgevoerde studie en de resultaten van de berekeningen zijn de volgende conclusies te trekken:

- De ontwerpmethodiek op basis van een transportbenadering inclusief het in rekening brengen van een plaatsafhankelijke turbulentie lijkt in principe bruikbaar bij lage drempels, zowel benedenstrooms van de drempel (vertragingsgebied) als bovenstrooms. Voorwaarde is wel dat een goede schematisatie van de stromingscondities wordt gebruikt.
- Het experimentele en numerieke spoor waarbij gebruik wordt gemaakt van respectievelijk gemeten snelheden en snelheden uit CFX-berekeningen resulteren beide in een verloop van het schadeniveau waarvan de vorm conform de verwachtingen is, maar de resulterende schade is te gering. Waarschijnlijke oorzaak is dat het gehanteerde uitgangspunt niet moet zijn de stroming op $z = 0,05$ m boven de bodem, maar die op een hoger niveau.
- Het empirische spoor voldoet duidelijk niet aan de verwachtingen wat betreft vorm van de schadecurve en grootte van het transport, wat waarschijnlijk wordt veroorzaakt door een te geringe gradiënt in de stroomsnelheid. De turbulentie lijkt wel correct.
- Vastgesteld moet worden dat de afname van de turbulentie bij de experimenten veel sneller plaats vindt dan in het numerieke model en ook sneller verloopt dan verwacht op basis van de empirische resultaten. Bij het empirische spoor is een formule voor de turbulentie afname gebruikt die is afgeleid voor de situatie bij een ontgroning bij een zandbodem. Mogelijk zorgen de ruwere stenen voor een snellere demping van de turbulentie dan de gladdere zandbodem.

Gezien de resultaten is de vraag gerechtvaardigd of verder moet worden gegaan met de nu gevolgde aanpak of dat naar alternatieven moet worden gezocht. De grote gevoeligheid voor de stroomsnelheid veroorzaakt door de hoge exponent in de Paintal-formule, is hierbij een belangrijk probleem. Misschien is het introduceren van een kritieke stroomsnelheid (eventueel per steenfractie) waar beneden geen transport optreedt, een optie. Om toch transport beneden die kritieke grens te laten optreden (een fysische grens bestaat immers niet), zou kunnen worden overwogen om ook het stochastische karakter van de belasting in

rekening te brengen. Het voorgaande betekent in wezen dat de transportformule ook geschikt wordt gemaakt voor toepassing bij echte begin van bewegen condities.

Naast bovenstaande meer fundamentele aanbeveling voor modificatie van de transportformule aan begin van bewegen condities, wordt ook aanbevolen om de huidige methodiek verder te toetsen. De resultaten bij met name het experimentele spoor wat betreft het verloop van het schadeniveau zijn dermate veelbelovend dat dit verdere toetsing rechtvaardigt. In het bijzonder wordt aanbevolen:

- Implementatie van breedte effecten, dwz geen gelijkmatig transport in breedte richting.
- Implementatie van een fluctuerend aanligpunt.
- Implementatie van een limiet in het schadeniveau tot maximaal de laagdikte.
- Uitvoeren van berekeningen met een correcte waarde van de parameter l .
- Verdere verbetering van het empirische spoor, in het bijzonder de modellering van de tijdgemiddelde snelheid waarvan de gradiënt nu te flauw is.

Literatuur Hoofdstuk 3

- Akkerman, G.J. (1999): *Memo schademodeltering*, WL|Delft Hydraulics (in: Mosselman et al: Stone stability - annual report 1999; WL|Delft Hydraulics, report Q2539, 2000)
- CUR/RWS (1997): *Kansen in de civiele techniek, deel 1: probabilistisch ontwerpen in theorie*, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving/Rijkswaterstaat, CUR rapport 190, Gouda
- Gunst, M.de (1999): *Steenstabiliteit in een turbulente stroming achter een afstap*, TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, afstudeerrapport, Delft
- Hoffmans, G.J.C.M. (1993a): *Two-dimensional modelling of local-scour holes*, Dissertation, Delft University of Technology.
- Hoffmans, G.J.C.M. (1993b): *A study concerning the influence of the relative turbulence intensity of local scour holes*, Rijkswaterstaat, DWW, Report W-DWW-93-251, February 1993.
- Hoffmans, G.J.C.M. (1994): *Ontgroningen door horizontale stralen*, Rijkswaterstaat, DWW, Conceptnota.
- Jongeling, T.H.G. (2000): *Stromingsbelasting*, WL|Delft Hydraulics, appendix A, report Q2650, Delft
- Jongeling, T.H.G. et al (2001): *Ontwerpmethodiek granulaire verdedigingen – doelsubsidie*, WL|Delft Hydraulics, report Q2933, Delft (nog te verschijnen)
- Jorissen, R.E., E.Berendsen and D.P.de Wilde (1995): *Design of bed protection of the Rotterdam Storm Surge Barrier*, in: River, coastal and shoreline protection: erosion control using riprap and armourstone, John Wiley & Sons Ltd.
- Rijn, L.C. (1990): *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans*, Aqua Publications, Oldemarkt
- Verheij, H.J. (1999): *Memo case toplaag dimensionering*, WL|Delft Hydraulics (in: Mosselman et al: Stone stability - annual report 1999; WL|Delft Hydraulics, report Q2539, 2000)
- Verheij, H.J. (2000): *Ontwerpmethodiek voor granulaire bodemverdedigingen op basis van transportmodellering*, WL|Delft Hydraulics, appendix B, report Q2650, Delft
- Wergroep EKOR (1982): *Stormvloedkering Oosterschelde, Onderzoek korrelstabiliteit*, Deltadienst, nota en bijlagen, 21 EKOR-N-82025.

Bijlagen

A Afleiding van een formule voor het schadeniveau voor het vertragingsgebied achter een afstap

schadeniveau

Het schadeniveau is gedefinieerd als:

$$s_{n,i} = \frac{d_e}{d_0} \quad \text{met} \quad d_0 = n_d D_n \quad \text{en} \quad d_e = \frac{dq_s}{dx} \frac{1}{1-n} \Delta t$$

wat resulteert in:

$$s_{n,i} = \frac{1}{n_d D_n} \frac{dq_s}{dx} \frac{1}{1-n} \Delta t$$

De transportgradiënt dq_s/dx is gedefinieerd als:

$$\frac{dq_s}{dx} \Delta t = \frac{(q_{s,2} + q_{s,4}) \frac{\Delta t}{2} - (q_{s,1} + q_{s,3}) \frac{\Delta t}{2}}{x_2 - x_1}$$

De transporten $q_{s,1}$ en $q_{s,3}$ zijn gerelateerd aan respectievelijk de snelheden $u_1 + u_1'$ en $u_1 - u_1'$ in doorsnede 1 en $q_{s,2}$ en $q_{s,4}$ aan respectievelijk de snelheden $u_2 + u_2'$ en $u_2 - u_2'$ in de meer benedenstroomsgelegen doorsnede 2.

$$\text{Met} \quad q_s = \phi \cdot \sqrt{\Delta g D^3} \quad \text{met} \quad \phi = 3.10^7 \psi^{8.9} \quad (\text{Paintal}) \quad \text{en} \quad \psi = \frac{u_{*,x}^2}{\Delta g D}$$

volgt dan:

$$q_{s,x} = 3.10^7 \left(\frac{u_{*,x}^2}{\Delta g D} \right)^{8.9} \sqrt{\Delta g D^3}$$

$$\text{waarbij} \quad u_{x,*} = u_x \frac{\sqrt{g}}{C}$$

numerieke en experimentele spoor

De stroomsnelheid is gedefinieerd als de som van de gemiddelde snelheid en een turbulente fluctuatie:

$$u_x = \bar{u}_x (1 \pm \alpha \cdot r_0) = \bar{u}_x \pm \alpha \sigma_x = \bar{u}_x \pm u_x^1$$

$$\text{met} \quad u_x^1 = \alpha \sigma_u = \alpha \sqrt{k}$$

Verder zijn relevant:

$$C_x = 18 \log \left(\frac{12h_x}{c_s D} \right)$$

$$\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$$

$$D_n = 0.84D$$

Alles substituerend in de formule voor het schadeniveau resulteert in:

$$s_{n,i} = \text{const.} \frac{\Delta t_i}{x_2 - x_1} \left[\left\{ \left(\frac{u_2 + u_2^1}{C_2} \right)^{17.8} + \left(\frac{u_2 - u_2^1}{C_2} \right)^{17.8} \right\} - \left\{ \left(\frac{u_1 + u_1^1}{C_1} \right)^{17.8} + \left(\frac{u_1 - u_1^1}{C_1} \right)^{17.8} \right\} \right]$$

$$\text{met } \text{const} = \frac{3.10^7 (\Delta g D^3)^{0.5}}{2 (\Delta D)^{8.9}} \cdot \frac{1}{n_d D_n (1-n)}$$

Stel de waterdiepte h is constant, dan volgt: $h_1 = h_2 = h$ en $C_2 = C_1 = C$ en gaat $s_{n,i}$ over in:

$$s_{n,i} = \text{const.} \frac{\Delta t_i}{x_2 - x_1} \left(\frac{1}{C} \right)^{17.8} \left[\left\{ (u_2 + u_2^1)^{17.8} + (u_2 - u_2^1)^{17.8} \right\} - \left\{ (u_1 + u_1^1)^{17.8} + (u_1 - u_1^1)^{17.8} \right\} \right]$$

empirische spoor

Nu wordt de volgende relatie voor de turbulente snelheidsfluctuatie verondersteld:

$$u_x^1 = \alpha r_x u_0$$

met:

$$r_x = \sqrt{c_k \left(1 - \frac{d}{h} \right)^{-2} \left(\frac{x}{6,67 h} + 1 \right)^{-1,08} + 1,45 \frac{g}{C_x^2}}$$

$$\text{waarbij } C_x = 18 \log \left(\frac{12h_x}{c_s D} \right)$$

Voor de gemiddelde stroomsnelheid wordt een relatie gelegd met:

$$\bar{u}_x = u_0 \frac{h_x}{h_x + (\delta_{\max} - \delta_x)}$$

$$\text{waarin: } \delta_x = 0.37x \left(\frac{u_0 x}{\nu} \right)^{-0.2}$$

en $\delta_{\max} = 0.37x_{\max} \left(\frac{u_0 x_{\max}}{\nu} \right)^{-0.2}$ met $x_{\max} = 10 \cdot h_0$

Dit alles leidt tot:

$$s_{n,i} = \text{const.} \frac{\Delta t_i}{x_2 - x_1} u_0^{17.8} \left[\left\{ \left(\frac{h_2}{h_2 + (\delta_{\max} - \delta_2)} + \alpha r_2 \right)^{17.8} + \left(\frac{h_2}{h_2 + (\delta_{\max} - \delta_2)} - \alpha r_2 \right)^{17.8} \right\} - \left\{ \left(\frac{h_1}{h_1 + (\delta_{\max} - \delta_1)} + \alpha r_1 \right)^{17.8} + \left(\frac{h_1}{h_1 + (\delta_{\max} - \delta_1)} - \alpha r_1 \right)^{17.8} \right\} \right]$$

Stel opnieuw h is constant, dan volgt weer: $h_1 = h_2 = h$ en $C_2 = C_1 = C$ en gaat $s_{n,i}$ over in:

$$s_{n,i} = \text{const.} \frac{\Delta t_i}{x_2 - x_1} \left(\frac{u_0}{C} \right)^{17.8} \left[\left\{ \left(\frac{h}{h + (\delta_{\max} - \delta_2)} + \alpha r_2 \right)^{17.8} + \left(\frac{h}{h + (\delta_{\max} - \delta_2)} - \alpha r_2 \right)^{17.8} \right\} - \left\{ \left(\frac{h}{h + (\delta_{\max} - \delta_1)} + \alpha r_1 \right)^{17.8} + \left(\frac{h}{h + (\delta_{\max} - \delta_1)} - \alpha r_1 \right)^{17.8} \right\} \right]$$

B Voorbeeld EXCEL-sheet met berekening schadeniveau

$ds_{n,i}$	$t(s) \downarrow$	$x(m) \rightarrow$	0.001	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
	0									
	1200									
	2400									
	3600									
	4800									
	6000									
	7200									
	8400									
	9600									

$u'x = 2 * \text{sigma}(u)$

0.44147	0.41262	0.36540	0.35997	0.33621	0.31403	0.29331	0.27396
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
-0.000001	0.000000	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
-0.000010	-0.000002	0.000004	0.000007	0.000009	0.000010	0.000011	0.000012	0.000013
-0.000036	-0.000005	0.000014	0.000025	0.000031	0.000034	0.000037	0.000040	0.000044
0.25568	0.23900	0.22323	0.20650	0.19474	0.18169	0.16969	0.15666	0.14621

Tabellen

Tabel 2.1 Model De Gunst, proef 2_2, turbulentie intensiteit

x (m)			7.300000		
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/u
1.5	0.622227	0.157278	0.252767	0.001573	0.002528
2	0.660557	0.158192	0.239483	0.001186	0.001796
3	0.763878	0.153743	0.201266	0.001537	0.002013
4	0.844815	0.145140	0.171801	0.001451	0.001718
5	0.912653	0.132035	0.144671	0.001320	0.001447
6	0.965975	0.119550	0.123761	0.001793	0.001856
8	1.030468	0.102541	0.099509	0.002051	0.001990
10	1.055337	0.090975	0.086205	0.001820	0.001724
12	1.071579	0.075754	0.070694	0.001515	0.001414
14	1.078094	0.066366	0.061559	0.001327	0.001231
16	1.058338	0.071623	0.067675	0.001432	0.001354
18	0.993539	0.083960	0.084506	0.001679	0.001690
				0.018686	0.020761
r0				0.102389	
r gem					0.140073

Tabel 2.1 Model De Gunst, proef 2_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.350000		
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/u
1.5	0.615867	0.153303	0.248921	0.001533	0.002489
2	0.671133	0.154832	0.230702	0.001161	0.001730
3	0.761843	0.151870	0.199346	0.001519	0.001993
4	0.846442	0.141594	0.167281	0.001416	0.001673
5	0.894242	0.133952	0.149794	0.001340	0.001498
6	0.956971	0.120621	0.126044	0.001809	0.001891
8	1.027266	0.100878	0.098200	0.002018	0.001964
10	1.050638	0.086809	0.082625	0.001736	0.001653
12	1.069594	0.071969	0.067286	0.001439	0.001346
14	1.068371	0.065531	0.061337	0.001311	0.001227
16	1.044621	0.071364	0.068315	0.001427	0.001366
18	0.981320	0.084164	0.085766	0.001683	0.001715
				0.018392	0.020545
r0				0.100778	
r gem					0.138618

Tabel 2.1 Model De Gunst, proef 2_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.400000		
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/u
1.5	0.631451	0.152330	0.241238	0.001523	0.002412
2	0.673325	0.151614	0.225172	0.001137	0.001689
3	0.758053	0.150236	0.198187	0.001502	0.001982
4	0.834207	0.142538	0.170867	0.001425	0.001709
5	0.889888	0.134663	0.151326	0.001347	0.001513
6	0.948374	0.123312	0.130024	0.001850	0.001950
8	1.017542	0.099646	0.097928	0.001993	0.001959
10	1.047970	0.083793	0.079957	0.001676	0.001599
12	1.068633	0.072244	0.067604	0.001445	0.001352
14	1.071335	0.066094	0.061693	0.001322	0.001234
16	1.045541	0.068161	0.065192	0.001363	0.001304
18	0.763604	0.147864	0.193640	0.002957	0.003873
				0.019540	0.022576
r0				0.107071	
r gem					0.152319

Tabel 2.1 Model De Gunst, proef 2_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.450000		
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/u
1.5					
2					
3	0.763604	0.147864	0.193640	0.001479	0.001936
4	0.832520	0.141641	0.170135	0.001416	0.001701
5	0.892890	0.130315	0.145947	0.001303	0.001459
6	0.936651	0.129353	0.138101	0.001940	0.002072
8	1.004819	0.106543	0.106032	0.002131	0.002121
10	1.049869	0.086956	0.082825	0.001739	0.001657
12	1.068231	0.072250	0.067635	0.001445	0.001353
14	1.063305	0.068805	0.064709	0.001376	0.001294
16	1.050902	0.071687	0.068215	0.001434	0.001364
18	0.991473	0.084358	0.085084	0.001687	0.001702
				0.015950	0.016659
r0				0.096670	
r gem					0.137504

Tabel 2.1 Model De Gunst, proef 2_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.500000		
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/u
1.5					
2					
3					
4	0.814114	0.139598	0.171472	0.001396	0.001715
5	0.897996	0.134314	0.149571	0.001343	0.001496
6	0.955401	0.120778	0.126416	0.001812	0.001896
8	1.018318	0.103711	0.101845	0.002074	0.002037
10	1.065854	0.068476	0.064245	0.001370	0.001285
12	1.064851	0.076092	0.071458	0.001522	0.001429
14	1.065854	0.068476	0.064245	0.001370	0.001285
16	1.053636	0.069515	0.065976	0.001390	0.001320
18	0.996266	0.083598	0.083911	0.001672	0.001678
				0.013948	0.014140
r0				0.089988	
r gem					0.132262

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit

x (m)			7.300000	1ste meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	-0.1204982	0.1396436	1.158885	0.001396	0.011589
2	-0.0669024	0.1516508	2.266747	0.001137	0.017001
3	0.0455998	0.1660009	3.640387	0.001660	0.036404
4	0.1684963	0.1792539	1.063845	0.001793	0.010638
5	0.322943	0.1847617	0.572119	0.001848	0.005721
6	0.5245486	0.1888474	0.360019	0.002833	0.005400
8	0.9278662	0.1481364	0.159653	0.002963	0.003193
10	1.1821052	0.0713764	0.060381	0.001428	0.001208
12	1.2738833	0.0454027	0.035641	0.000908	0.000713
				0.015965	0.091867
r0				0.130327	
r gem					1.654567

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.350000	1ste meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	-0.1034623	0.146803	1.418903	0.001468	0.014189
2	-0.0561228	0.1620885	2.888104	0.001216	0.021661
3	0.0683374	0.1794878	2.626494	0.001795	0.026265
4	0.2051903	0.1885364	0.918837	0.001885	0.009188
5	0.3564313	0.1916035	0.537561	0.001916	0.005376
6	0.5462665	0.1945501	0.356145	0.002918	0.005342
8	0.917501	0.1496359	0.163091	0.002993	0.003262
10	1.1664524	0.0746176	0.063970	0.001492	0.001279
12	1.2553806	0.0456466	0.036361	0.000913	0.000727
				0.016596	0.087289
r0				0.135479	
r gem					1.572126

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.350000	2e meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	-0.0978188	0.1447405	1.479680	0.001447	0.014797
2	-0.0541675	0.1635229	3.018838	0.001226	0.022641
3	0.0644442	0.1829905	2.839519	0.001830	0.028395
4	0.2024411	0.1881748	0.929529	0.001882	0.009295
5	0.3604005	0.1962068	0.544413	0.001962	0.005444
6	0.5435261	0.1981871	0.364632	0.002973	0.005469
8	0.9144269	0.149407	0.163389	0.002988	0.003268
10	1.1662984	0.0751728	0.064454	0.001503	0.001289
12	1.2533753	0.0462739	0.036919	0.000925	0.000738
				0.016737	0.091337
r0				0.136632	
r gem					1.645034

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.400000	1st meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	-0.0401549	0.1575972	3.924731	0.001576	0.039247
2	0.0044542	0.1674688	37.597952	0.001256	0.281985
3	0.1165956	0.1835733	1.574444	0.001836	0.015744
4	0.2392592	0.1963768	0.820770	0.001964	0.008208
5	0.4001701	0.2016079	0.503806	0.002016	0.005038
6	0.5659686	0.199433	0.352375	0.002991	0.005286
8	0.9026605	0.1533172	0.169850	0.003066	0.003397
10	1.1417966	0.0788847	0.069088	0.001578	0.001382
12	1.2351418	0.0444921	0.036022	0.000890	0.000720
				0.017173	0.361007
r0				0.140187	
r gem					6.501921

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.400000	2e meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	-0.0411121	0.1619224	3.938558	0.001619	0.039386
2	0.0088522	0.1715958	19.384537	0.001287	0.145384
3	0.112653	0.1871416	1.661222	0.001871	0.016612
4	0.2413385	0.1989773	0.824474	0.001990	0.008245
5	0.4010233	0.1993437	0.497088	0.001993	0.004971
6	0.5697985	0.197931	0.347370	0.002969	0.005211
8	0.907484	0.1545855	0.170345	0.003092	0.003407
10	1.1416924	0.0786048	0.068849	0.001572	0.001377
12	1.2351208	0.0442064	0.035791	0.000884	0.000716
				0.017278	0.225308
r0				0.141043	
r gem					4.057908

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.450000	1ste meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	0.0154806	0.1679958	10.852021	0.001680	0.108520
2	0.0590748	0.1732396	2.932547	0.001299	0.021994
3	0.1580703	0.1927745	1.219549	0.001928	0.012195
4	0.2872792	0.1979114	0.688917	0.001979	0.006889
5	0.421476	0.209596	0.497290	0.002096	0.004973
6	0.5873834	0.2064337	0.351446	0.003097	0.005272
8	0.9040301	0.1547481	0.171176	0.003095	0.003424
10	1.1193378	0.080423	0.071849	0.001608	0.001437
12	1.2092459	0.0446136	0.036894	0.000892	0.000738
				0.017674	0.165442
r0				0.144280	
r gem					2.979694

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.450000	2e meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	0.0194621	0.1612761	8.286675	0.001613	0.082867
2	0.0623904	0.1780103	2.853168	0.001335	0.021399
3	0.171146	0.1922244	1.123160	0.001922	0.011232
4	0.2801651	0.2049662	0.731591	0.002050	0.007316
5	0.4268173	0.20771	0.486649	0.002077	0.004866
6	0.5854352	0.2099109	0.358555	0.003149	0.005378
8	0.9058823	0.1490469	0.164532	0.002981	0.003291
10	1.1197381	0.0786189	0.070212	0.001572	0.001404
12	1.2108594	0.044485	0.036738	0.000890	0.000735
				0.017589	0.138487
r0				0.143580	
r gem					2.494231

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.465000	1ste meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	0.039616	0.1652043	4.170141	0.001652	0.041701
2	0.0775159	0.1750283	2.257966	0.001313	0.016935
3	0.1885549	0.1928246	1.022644	0.001928	0.010226
4	0.2987592	0.2011096	0.673149	0.002011	0.006731
5	0.4387508	0.2084142	0.475017	0.002084	0.004750
6	0.5878578	0.2082185	0.354199	0.003123	0.005313
8	0.8968936	0.1566591	0.174669	0.003133	0.003493
10	1.1060568	0.0847647	0.076637	0.001695	0.001533
12	1.200456	0.0456565	0.038033	0.000913	0.000761
				0.017853	0.091444
r0				0.145740	
r gem					1.646954

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.465000	2de meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	0.0154806	0.1679958	10.852021	0.001680	0.108520
2	0.0789953	0.1737227	2.199152	0.001303	0.016494
3	0.1850495	0.1960728	1.059569	0.001961	0.010596
4	0.3004449	0.2038601	0.678527	0.002039	0.006785
5	0.4365734	0.209261	0.479326	0.002093	0.004793
6	0.5940378	0.2030954	0.341890	0.003046	0.005128
8	0.8893842	0.1569615	0.176483	0.003139	0.003530
10	1.1085165	0.0832147	0.075069	0.001664	0.001501
12	1.1991949	0.045134	0.037637	0.000903	0.000753
				0.017827	0.158100
r0				0.145530	
r gem					2.847466

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.500000	1ste meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	0.0793499	0.1685881	2.124616	0.001686	0.021246
2	0.1284232	0.1770157	1.378378	0.001328	0.010338
3	0.2076656	0.1926164	0.927532	0.001926	0.009275
4	0.3265493	0.1986407	0.608302	0.001986	0.006083
5	0.4525861	0.2116083	0.467554	0.002116	0.004676
6	0.5895099	0.2089107	0.354380	0.003134	0.005316
8	0.884227	0.160497	0.181511	0.003210	0.003630
10	1.088086	0.0906479	0.083309	0.001813	0.001666
12	1.185173	0.0464748	0.039214	0.000929	0.000784
				0.018128	0.063014
r0				0.147985	
r gem					1.134919

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.500000	2de meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	0.0917866	0.1687248	1.838229	0.001687	0.018382
2	0.1245125	0.1750799	1.406123	0.001313	0.010546
3	0.2260484	0.1885707	0.834205	0.001886	0.008342
4	0.3346041	0.2031826	0.607233	0.002032	0.006072
5	0.455504	0.2103573	0.461812	0.002104	0.004618
6	0.6010529	0.2042156	0.339763	0.003063	0.005096
8	0.8844141	0.1642404	0.185705	0.003285	0.003714
10	1.0900282	0.0862788	0.079153	0.001726	0.001583
12	1.1823448	0.0459746	0.038884	0.000919	0.000778
				0.018015	0.059132
r0				0.147058	
r gem					1.064998

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.550000	1ste meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	0.1260546	0.1593719	1.264308	0.001594	0.012643
2	0.1647241	0.1705318	1.035257	0.001279	0.007764
3	0.2392221	0.188213	0.786771	0.001882	0.007868
4	0.3456149	0.203819	0.589729	0.002038	0.005897
5	0.4636606	0.208174	0.448979	0.002082	0.004490
6	0.6077338	0.2110856	0.347332	0.003166	0.005210
8	0.8763561	0.1661086	0.189545	0.003322	0.003791
10	1.0726739	0.0954192	0.088955	0.001908	0.001779
12	1.1690445	0.0476134	0.040728	0.000952	0.000815
				0.018224	0.050257
r0				0.148766	
r gem					0.905151

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.550000	2de meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	0.1286465	0.1610438	1.251832	0.001610	0.012518
2	0.1614233	0.1713851	1.061712	0.001285	0.007963
3	0.2382298	0.1882635	0.790260	0.001883	0.007903
4	0.3537033	0.2035027	0.575349	0.002035	0.005753
5	0.4726436	0.2085052	0.441147	0.002085	0.004411
6	0.610934	0.206647	0.338248	0.003100	0.005074
8	0.8701119	0.1671923	0.192150	0.003344	0.003843
10	1.0771292	0.0903999	0.083927	0.001808	0.001679
12	1.1700569	0.0466034	0.039830	0.000932	0.000797
				0.018082	0.049941
r0				0.147609	
r gem					0.899455

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.600000	1ste meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	0.1855297	0.1558906	0.840246	0.001559	0.008402
2	0.2097981	0.162865	0.776294	0.001221	0.005822
3	0.2900362	0.1823074	0.628568	0.001823	0.006286
4	0.376495	0.1994658	0.529797	0.001995	0.005298
5	0.4877942	0.2083305	0.427087	0.002083	0.004271
6	0.6148162	0.2116988	0.344329	0.003175	0.005165
8	0.8495623	0.1725849	0.203146	0.003452	0.004063
10	1.0568016	0.1036123	0.098043	0.002072	0.001961
12	1.1537981	0.0526226	0.045608	0.001052	0.000912
				0.018433	0.042180
r0				0.150476	
r gem					0.759684

Tabel 2.2 Model De Gunst, proef 4_2, turbulentie intensiteit (vervolgd)

x (m)			7.600000	2de meting	
z (cm)	u	sigma u	(sigma u)/ u	(sigma u)*dz	(sigma u)*dz/ u
1.5	0.1860853	0.1529242	0.821796	0.001529	0.008218
2	0.2090534	0.163018	0.779791	0.001223	0.005848
3	0.2947039	0.1826207	0.619675	0.001826	0.006197
4	0.3934531	0.1982111	0.503773	0.001982	0.005038
5	0.4993882	0.1988835	0.398254	0.001989	0.003983
6	0.6216948	0.204029	0.328182	0.003060	0.004923
8	0.8659663	0.1644056	0.189852	0.003288	0.003797
10	1.0531005	0.1044984	0.099229	0.002090	0.001985
12	1.1539477	0.050609	0.043857	0.001012	0.000877
				0.018000	0.040865
r0				0.146937	
r gem					0.735998

Tabel 2.3 Model De Gunst, proef 2_2, standaardafwijkingen

x (m)	7.300000		
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.157278	0.0824471	1.907628
2	0.158192	0.083819	1.887305
3	0.153743	0.0799673	1.922568
4	0.145140	0.0742685	1.954259
5	0.132035	0.0673324	1.960939
6	0.119550	0.0618458	1.933025
8	0.102541	0.0544566	1.882984
10	0.090975	0.0503623	1.806415
12	0.075754	0.0455538	1.662959
14	0.066366	0.0412428	1.609161
16	0.071623	0.0364478	1.965090
18	0.083960	0.0321639	2.610389
			gemiddeld 1.925227

Tabel 2.3 Model De Gunst, proef 2_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

x (m)	7.350000		
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.153303	0.0839429	1.826271
2	0.154832	0.0838257	1.847067
3	0.151870	0.0814652	1.864237
4	0.141594	0.0741564	1.909394
5	0.133952	0.0686166	1.952176
6	0.120621	0.0622218	1.938557
8	0.100878	0.0536263	1.881129
10	0.086809	0.0482904	1.797647
12	0.071969	0.0441412	1.630427
14	0.065531	0.041048	1.596443
16	0.071364	0.0382693	1.864772
18	0.084164	0.0324679	2.592222
			gemiddeld 1.891695

Tabel 2.3 Model De Gunst, proef 2_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

x (m)	7.400000		
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.152330	0.0811091	1.878086
2	0.151614	0.0803375	1.887215
3	0.150236	0.0788824	1.904560
4	0.142538	0.0740965	1.923686
5	0.134663	0.0686552	1.961444
6	0.123312	0.0627177	1.966136
8	0.099646	0.0544218	1.830998
10	0.083793	0.0485565	1.725670
12	0.072244	0.0443226	1.629959
14	0.066094	0.0405964	1.628078
16	0.068161	0.0376464	1.810545
18	0.147864	0.0786214	1.880714
			gemiddeld 1.835591

Tabel 2.3 Model De Gunst, proef 2_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

x (m)		7.450000	
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5			
2			
3	0.147864	0.0786214	1.880714
4	0.141641	0.075357	1.879594
5	0.130315	0.0695197	1.874505
6	0.129353	0.0641468	2.016512
8	0.106543	0.0560624	1.900438
10	0.086956	0.0490736	1.771945
12	0.072250	0.045941	1.572674
14	0.068805	0.0434929	1.581985
16	0.071687	0.0376067	1.906229
18	0.084358	0.0328415	2.568646
			gemiddeld 1.895324

Tabel 2.3 Model De Gunst, proef 2_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

x (m)		7.500000	
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5			
2			
3			
4	0.139598	0.0752794	1.854392
5	0.134314	0.0707313	1.898932
6	0.120778	0.0636531	1.897443
8	0.103711	0.0555346	1.867501
10	0.068476	0.0429439	1.594536
12	0.076092	0.0465972	1.632972
14	0.068476	0.0429439	1.594536
16	0.069515	0.0381997	1.819784
18	0.083598	0.0332357	2.515292
			gemiddeld 1.852821

Tabel 2.4 Model De Gunst, proef 4_2, standaardafwijkingen

x (m)		7.300000	1ste meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1396436	0.0962035	1.451544
2	0.1516508	0.1038945	1.459661
3	0.1660009	0.1136796	1.460252
4	0.1792539	0.1196223	1.498499
5	0.1847617	0.1267693	1.457464
6	0.1888474	0.12978	1.455135
8	0.1481364	0.1019757	1.452664
10	0.0713764	0.0552045	1.292945
12	0.0454027	0.0327787	1.385128

gemiddeld:
1.434810

Tabel 2.4 Model De Gunst, proef 4_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

x (m)		7.350000	1ste meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.146803	0.1040732	1.410574
2	0.1620885	0.109882	1.475114
3	0.1794878	0.1216626	1.475292
4	0.1885364	0.1309768	1.439464
5	0.1916035	0.1334602	1.435660
6	0.1945501	0.1330596	1.462127
8	0.1496359	0.1028657	1.454672
10	0.0746176	0.0576255	1.294871
12	0.0456466	0.0347641	1.313038

gemiddeld:
1.417868

x (m)		7.350000	2de meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1447405	0.1045821	1.383989
2	0.1635229	0.1134334	1.441576
3	0.1829905	0.123545	1.481165
4	0.1881748	0.1299215	1.448373
5	0.1962068	0.1351887	1.451355
6	0.1981871	0.1325939	1.494692
8	0.149407	0.1017223	1.468773
10	0.0751728	0.0589661	1.274848
12	0.0462739	0.0351	1.318345

gemiddeld:
1.418124

Tabel 2.4 Model De Gunst, proef 4_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

x (m)		7.400000	1ste meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1575972	0.1177435	1.338479
2	0.1674688	0.1247826	1.342085
3	0.1835733	0.1336801	1.373228
4	0.1963768	0.139418	1.408547
5	0.2016079	0.1404407	1.435538
6	0.199433	0.1356516	1.470185
8	0.1533172	0.1050989	1.458790
10	0.0788847	0.0622692	1.266833
12	0.0444921	0.0364912	1.219256
			gemiddeld: 1.368105

x (m)		7.400000	2de meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1619224	0.1181732	1.370213
2	0.1715958	0.126773	1.353567
3	0.1871416	0.1340076	1.396500
4	0.1989773	0.1380027	1.441836
5	0.1993437	0.1383603	1.440758
6	0.197931	0.1349585	1.466606
8	0.1545855	0.1040409	1.485815
10	0.0786048	0.0622115	1.263509
12	0.0442064	0.0363612	1.215757
			gemiddeld: 1.381618

Tabel 2.4 Model De Gunst, proef 4_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

x (m)		7.450000	1ste meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1679958	0.1234355	1.361001
2	0.1732396	0.1315113	1.317298
3	0.1927745	0.1400051	1.376911
4	0.1979114	0.1421781	1.391996
5	0.209596	0.1435588	1.460001
6	0.2064337	0.1382341	1.493363
8	0.1547481	0.103645	1.493059
10	0.080423	0.06428	1.251136
12	0.0446136	0.0373994	1.192896
			gemiddeld: 1.370851

x (m)		7.450000	2de meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1612761	0.1185935	1.359907
2	0.1780103	0.1305768	1.363261
3	0.1922244	0.1376192	1.396785
4	0.2049662	0.1441362	1.422031
5	0.20771	0.1430851	1.451654
6	0.2099109	0.1370992	1.531088
8	0.1490469	0.1013585	1.470492
10	0.0786189	0.0635499	1.237121
12	0.044485	0.0380981	1.167644
			gemiddeld: 1.377776

Tabel 2.4 Model De Gunst, proef 4_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

x (m)		7.465000	1ste meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1652043	0.1235728	1.336899
2	0.1750283	0.1333809	1.312244
3	0.1928246	0.1396616	1.380656
4	0.2011096	0.144402	1.392706
5	0.2084142	0.1443897	1.443415
6	0.2082185	0.1366113	1.524167
8	0.1566591	0.1044829	1.499375
10	0.0847647	0.0669923	1.265290
12	0.0456565	0.0388338	1.175690

gemiddeld:
1.370049

x (m)		7.465000	2de meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1679958	0.1234355	1.361001
2	0.1737227	0.1335254	1.301046
3	0.1960728	0.1397448	1.403078
4	0.2038601	0.1442074	1.413659
5	0.209261	0.1432799	1.460505
6	0.2030954	0.1349147	1.505362
8	0.1569615	0.1049088	1.496171
10	0.0832147	0.0662503	1.256065
12	0.045134	0.0395365	1.141578

gemiddeld:
1.370940

Tabel 2.4 Model De Gunst, proef 4_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

x (m)		7.500000	1ste meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1685881	0.1267187	1.330412
2	0.1770157	0.1316	1.345104
3	0.1926164	0.1401942	1.373926
4	0.1986407	0.1420541	1.398345
5	0.2116083	0.1435198	1.474419
6	0.2089107	0.1406864	1.484939
8	0.160497	0.107139	1.498026
10	0.0906479	0.0694019	1.306130
12	0.0464748	0.0404537	1.148839

gemiddeld:
1.373349

x (m)		7.500000	2de meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1687248	0.1269016	1.329572
2	0.1750799	0.1336601	1.309889
3	0.1885707	0.1405368	1.341789
4	0.2031826	0.1437462	1.413482
5	0.2103573	0.1429488	1.471557
6	0.2042156	0.138609	1.473321
8	0.1642404	0.1082817	1.516788
10	0.0862788	0.0677631	1.273242
12	0.0459746	0.0410548	1.119835

gemiddeld:
1.361053

Tabel 2.4 Model De Gunst, proef 4_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

x (m)		7.550000	1ste meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1593719	0.1222175	1.304002
2	0.1705318	0.1334536	1.277836
3	0.188213	0.1434885	1.311694
4	0.203819	0.1457682	1.398240
5	0.208174	0.1452064	1.433642
6	0.2110856	0.1373801	1.536508
8	0.1661086	0.1090639	1.523039
10	0.0954192	0.0732168	1.303242
12	0.0476134	0.0432573	1.100702

gemiddeld:
1.354323

x (m)		7.550000	2de meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1610438	0.1241611	1.297055
2	0.1713851	0.1343959	1.275226
3	0.1882635	0.1416895	1.328705
4	0.2035027	0.143633	1.416824
5	0.2085052	0.1433643	1.454373
6	0.206647	0.1389656	1.487037
8	0.1671923	0.1104191	1.514161
10	0.0903999	0.0703218	1.285517
12	0.0466034	0.0421854	1.104728

gemiddeld:
1.351514

Tabel 2.4 Model De Gunst, proef 4_2, standaardafwijkingen (vervolgd)

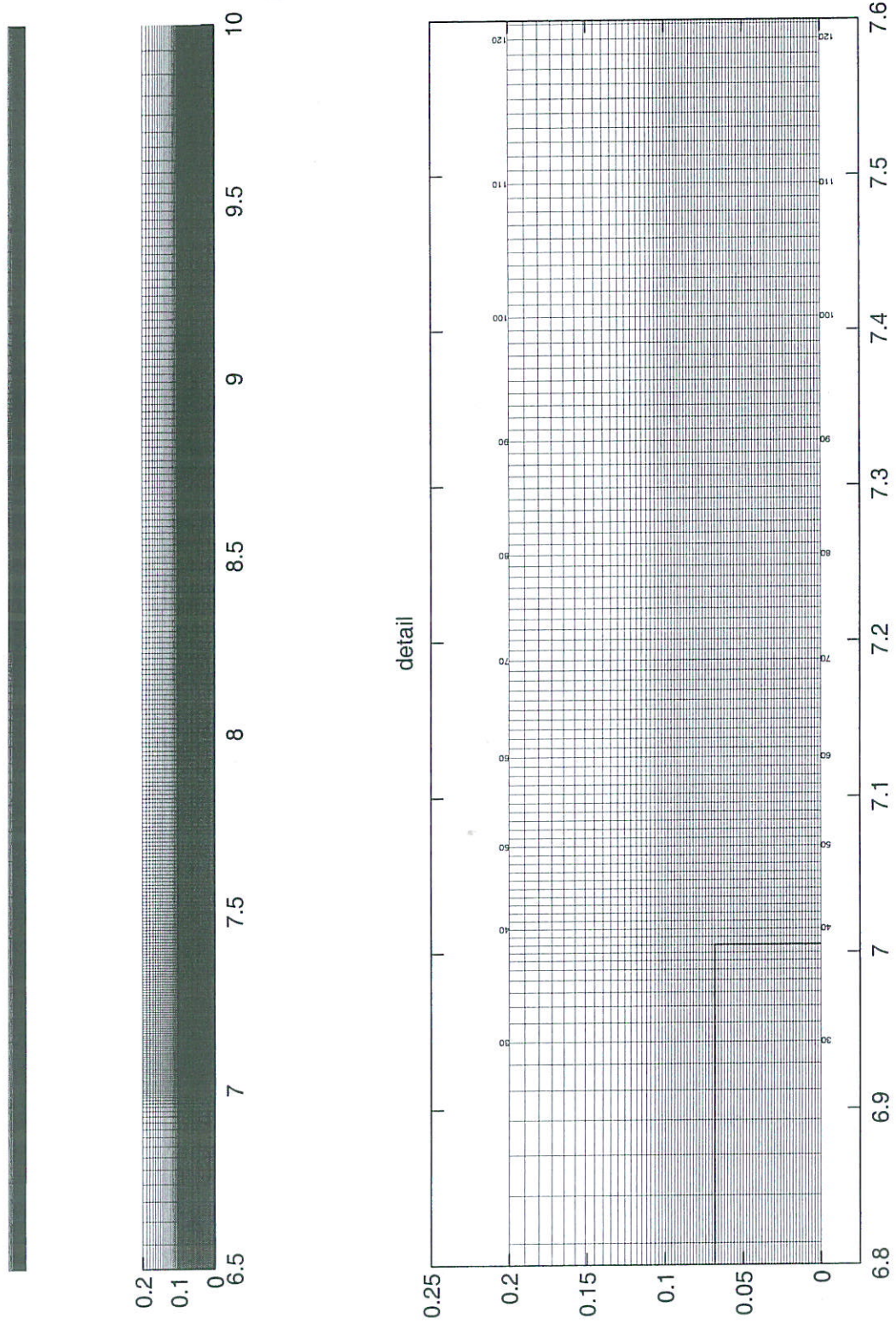
x (m)		7.600000	1ste meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1558906	0.1141018	1.366241
2	0.162865	0.1216992	1.338259
3	0.1823074	0.1356163	1.344288
4	0.1994658	0.1431196	1.393700
5	0.2083305	0.1460493	1.426440
6	0.2116988	0.1387412	1.525854
8	0.1725849	0.1142365	1.510768
10	0.1036123	0.0757118	1.368509
12	0.0526226	0.0483566	1.088220

gemiddeld:
1.373587

x (m)		7.600000	2de meting
z (cm)	sigma u	sigma w	sigma u / sigma w
1.5	0.1529242	0.1142646	1.338334
2	0.163018	0.1225151	1.330595
3	0.1826207	0.1362674	1.340164
4	0.1982111	0.1427226	1.388786
5	0.1988835	0.1381849	1.439256
6	0.204029	0.1375229	1.483600
8	0.1644056	0.1092354	1.505058
10	0.1044984	0.0774354	1.349491
12	0.050609	0.0458272	1.104344

gemiddeld:
1.364403

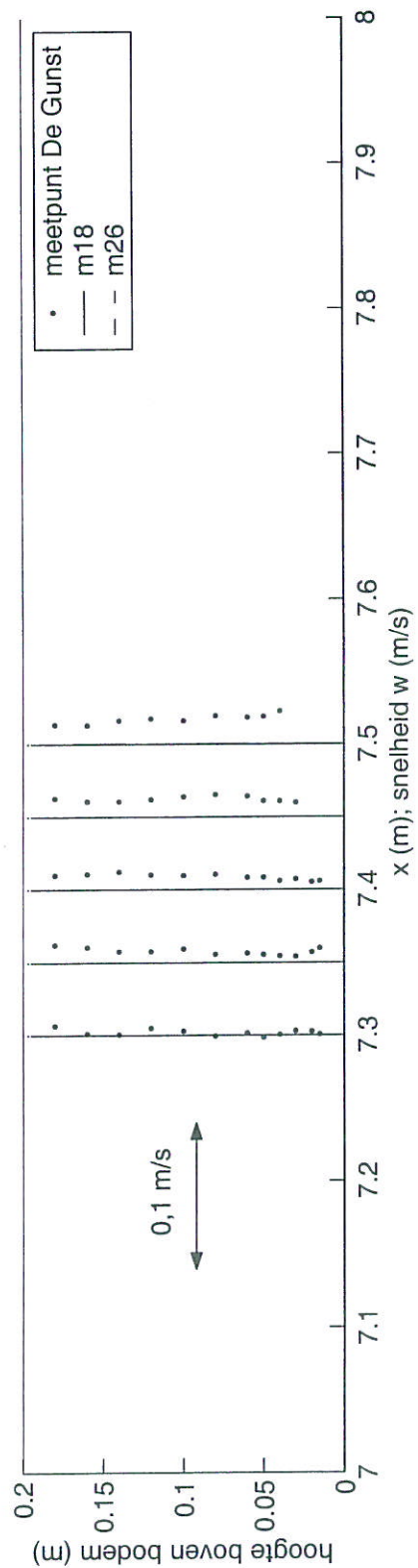
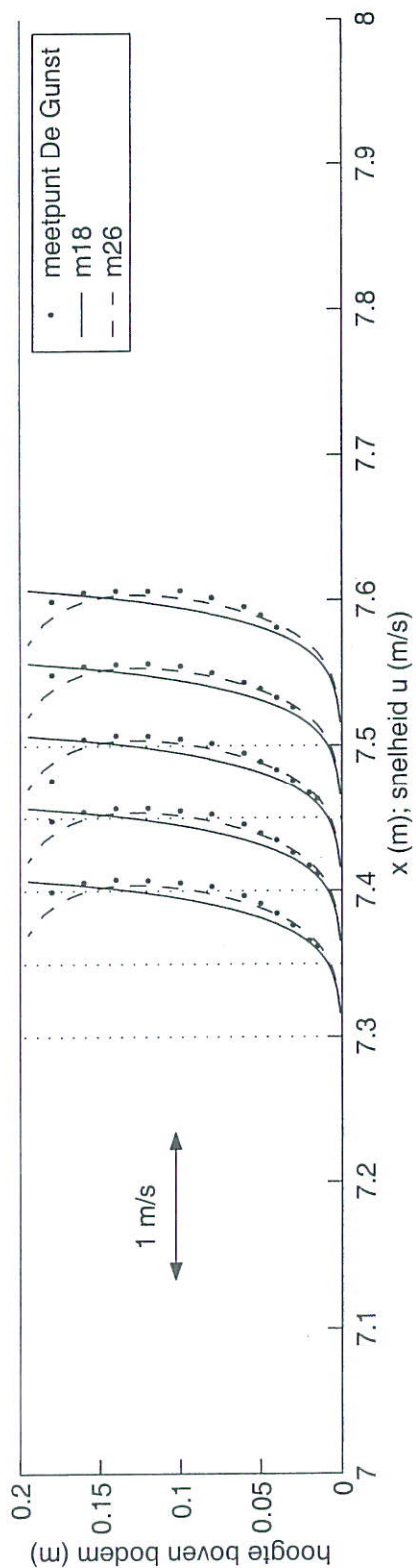
Figuren



CFX model voor simulaties met vlakbed en afstap

CFX

Situatie: vlakbed en afstap

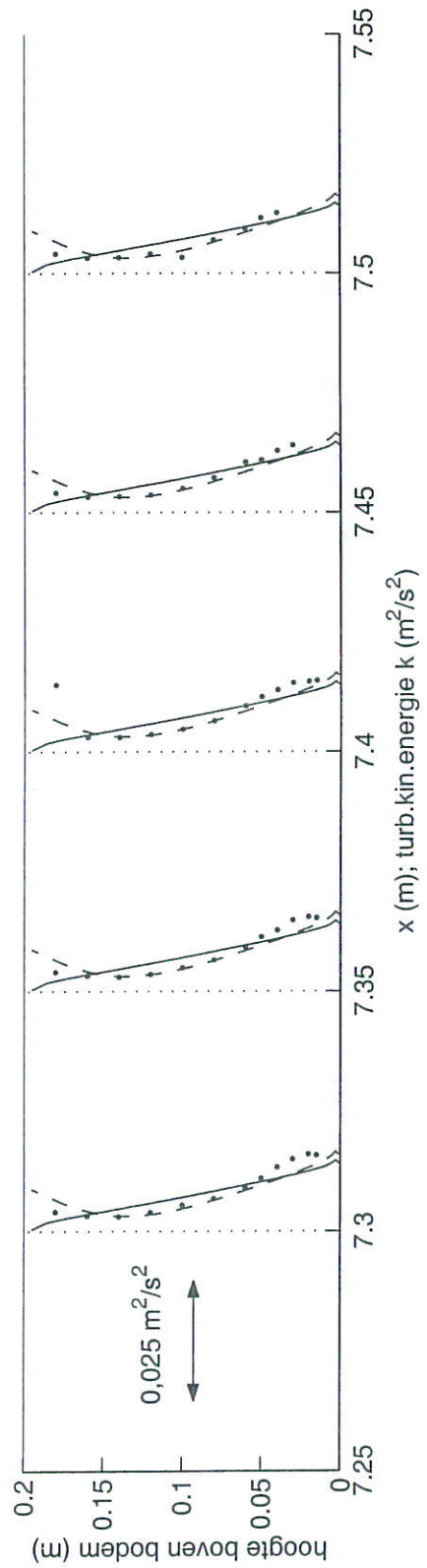
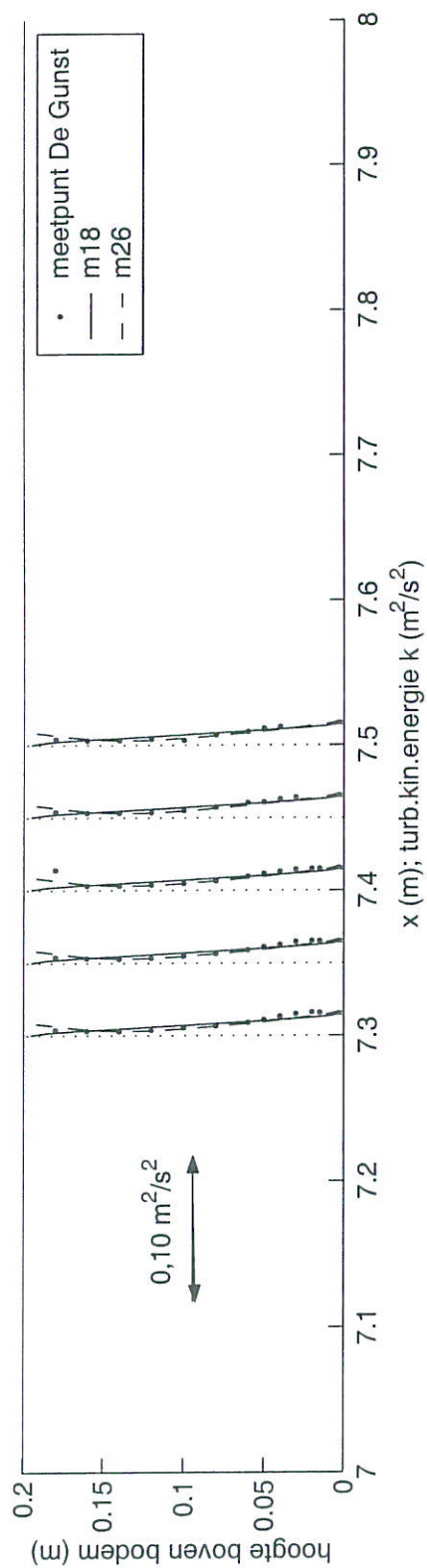


Metingen De Gunst vergeleken met CFX berekeningen
Tijdgemiddelde snelheden u en w

CFX: m18/m26

Proef 2_2

Situatie: vlakbed



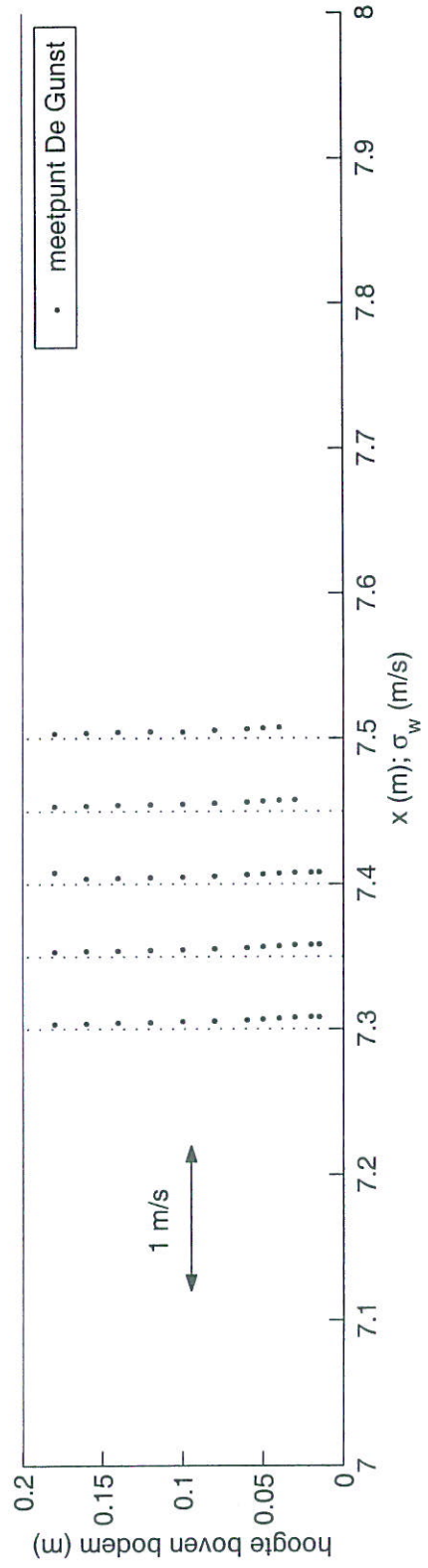
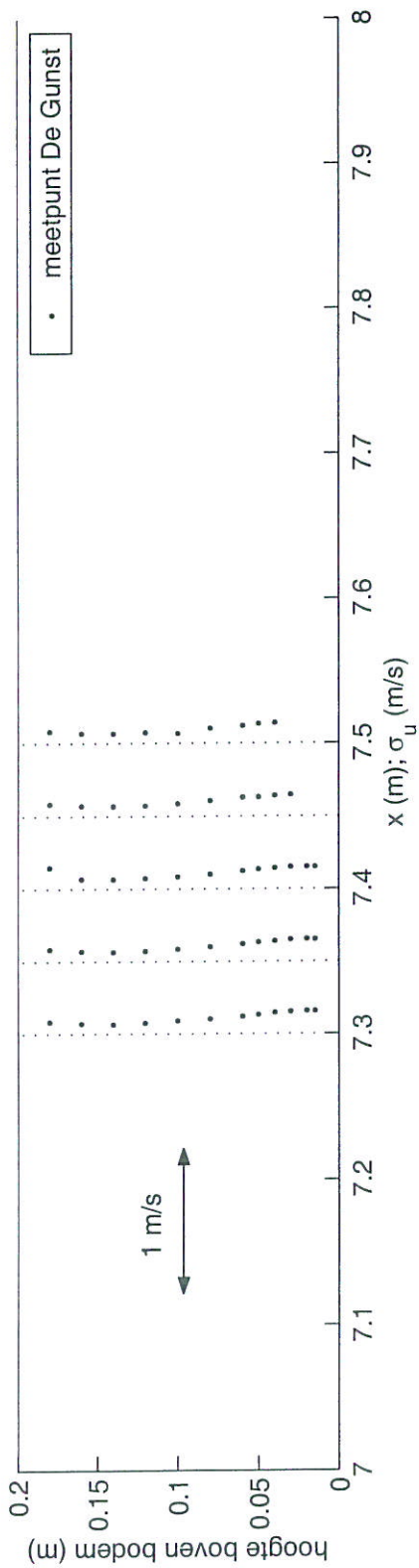
Metingen De Gunst vergeleken met CFX berekeningen

Turb. kin. energie k met $\xi = \frac{1}{2}$; $\sigma_v^2 = 0$. ($\sigma_u^2 + \sigma_w^2$)

CFX: m18/m26

Proef 2_2

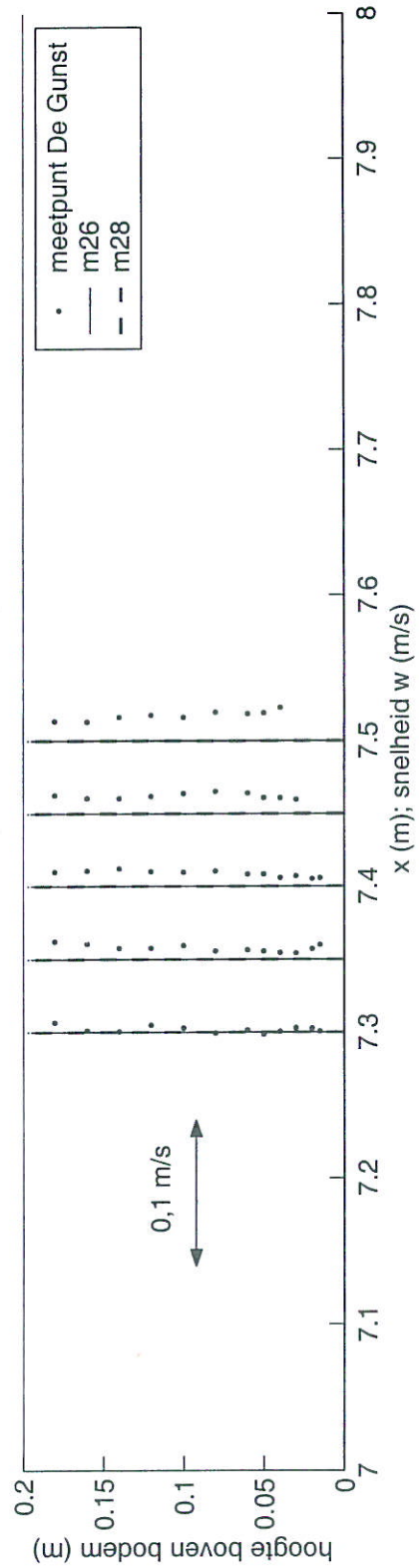
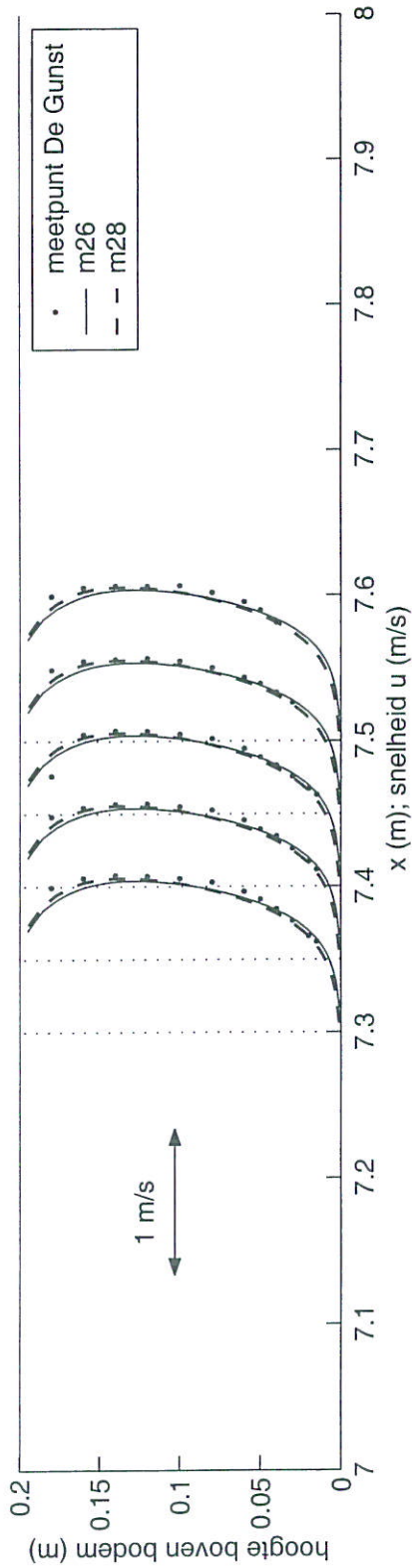
Situatie: vlakbed



Metingen De Gunst standaardafwijking σ_u en σ_w

Proef 2_2

Situatie: vlakbed



Effect bodemruwheid in CFX berekeningen
Tijdgemiddelde snelheden u en w

CFX: m26/m28

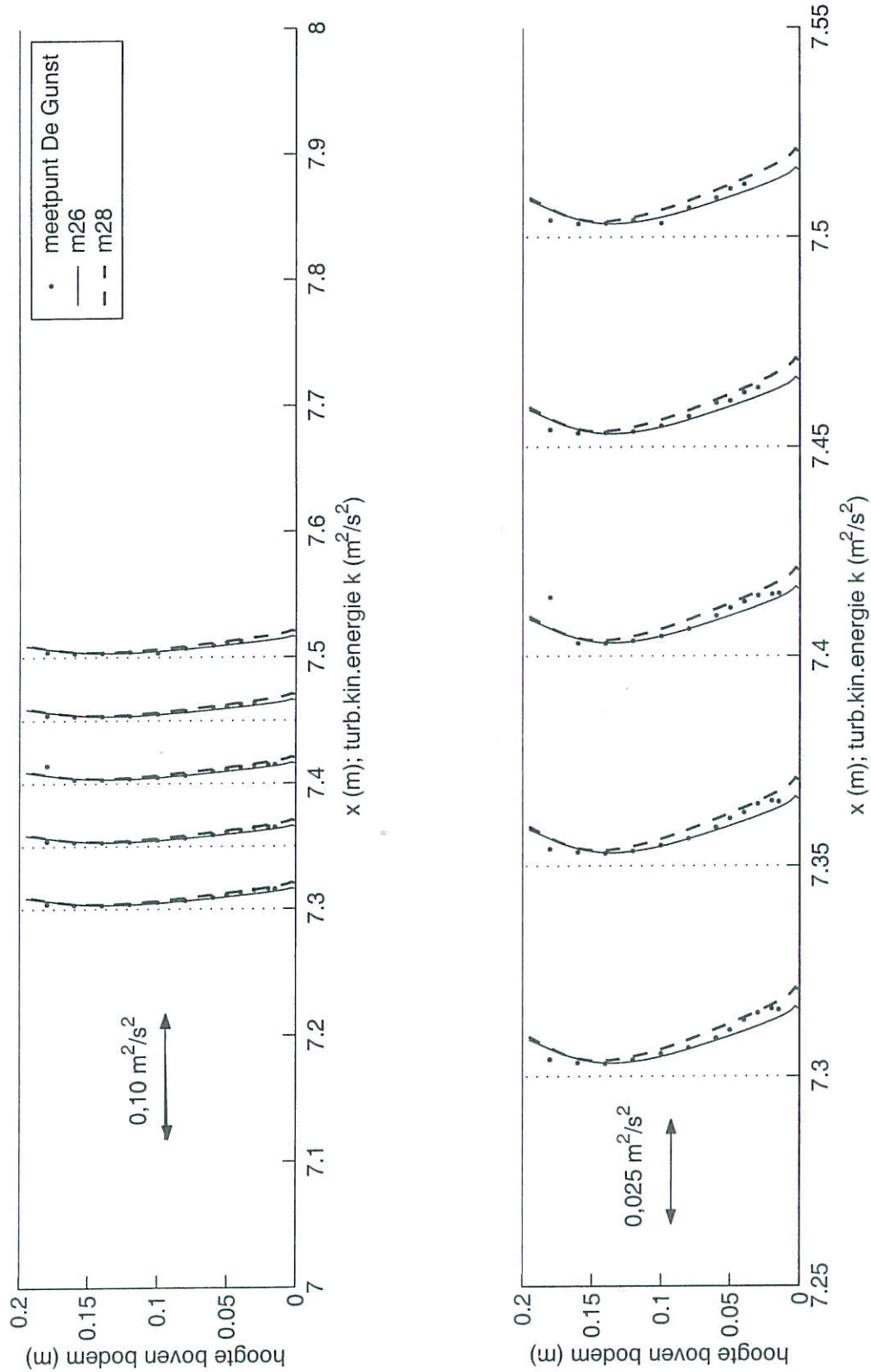
Proef 2_2

Situatie: vlakbed

WL | DELFT HYDRAULICS

Q3107

Fig. 2.4



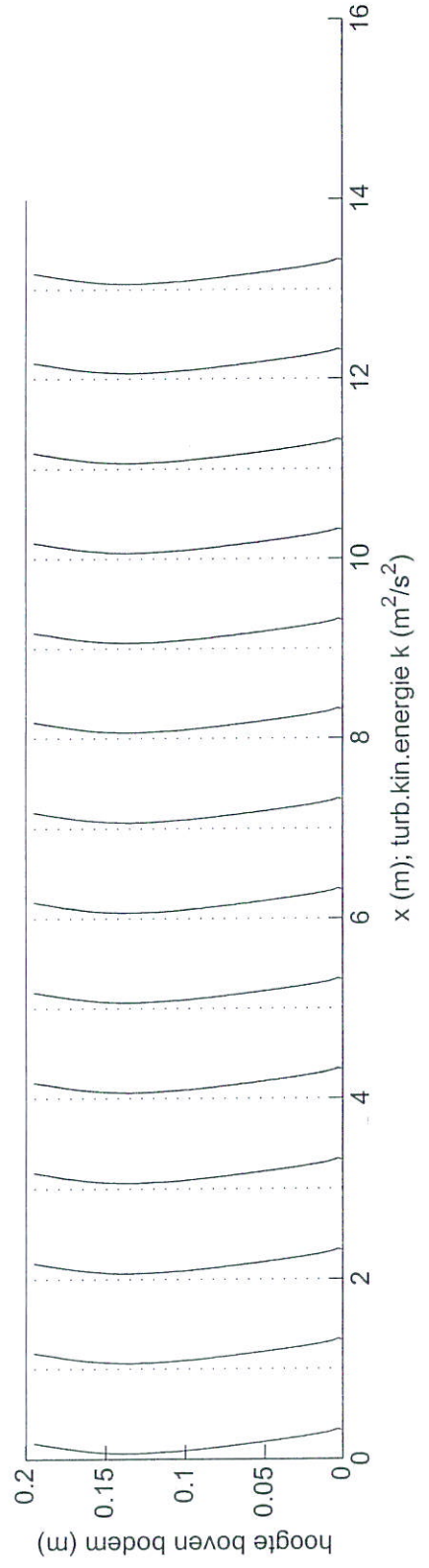
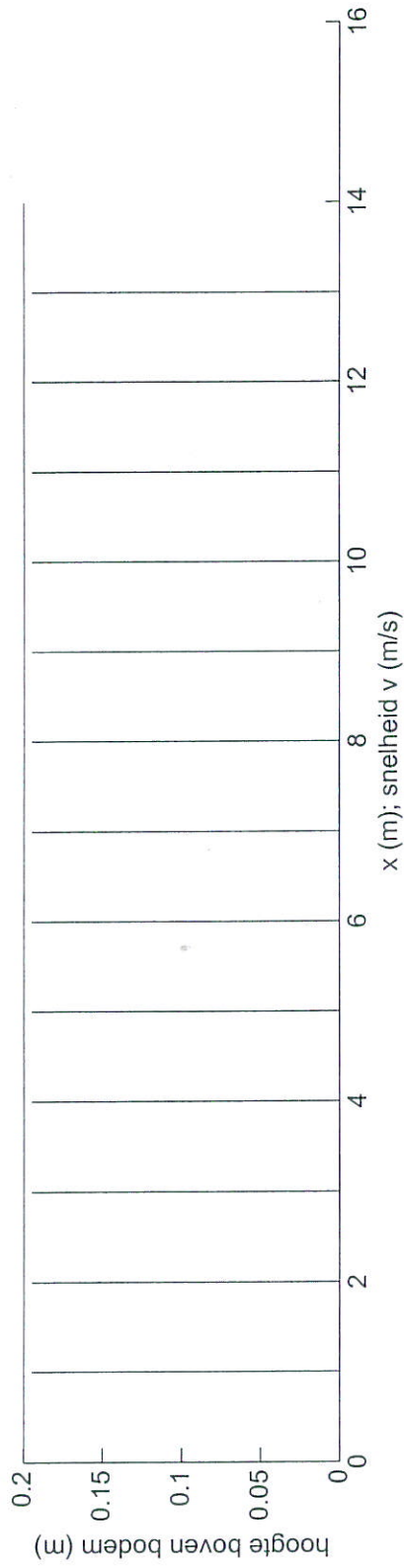
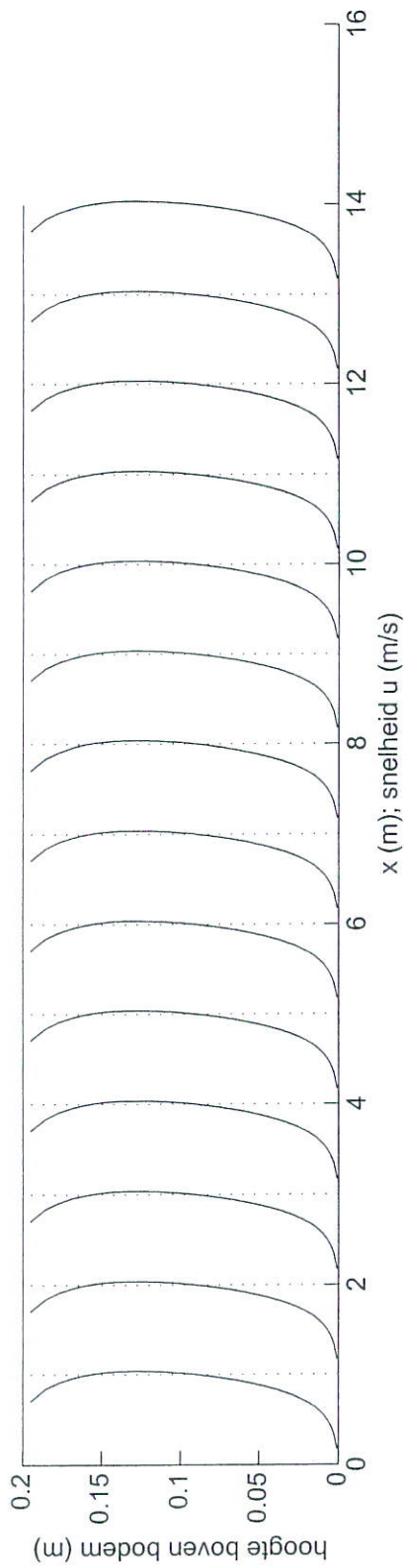
Effect bodemruwheid in CFX berekeningen

Turb. kin. energie k met $\xi = 1/2$, $\sigma_v^2 = 0$, $(\sigma_u^2 + \sigma_w^2)$

CFX: m26/m28

Proef 2_2

Situatie: vlakbed



Snelheidsprofielen en
turbulentieprofielen als functie van x

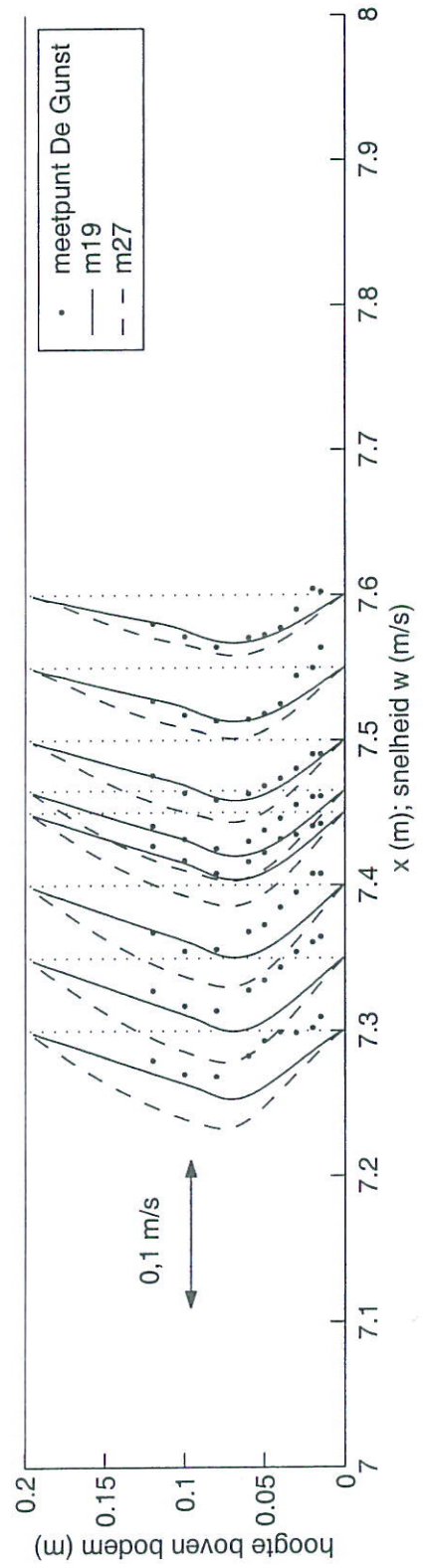
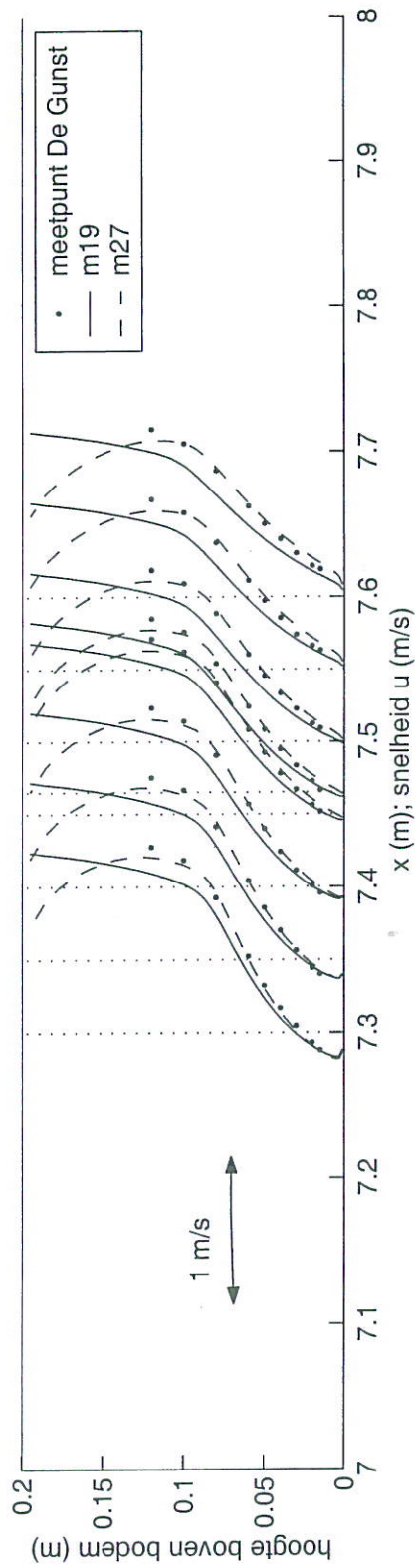
CFX: m26

Situatie: vlak bed

WL | DELFT HYDRAULICS

Q 3107

Fig 2.5a

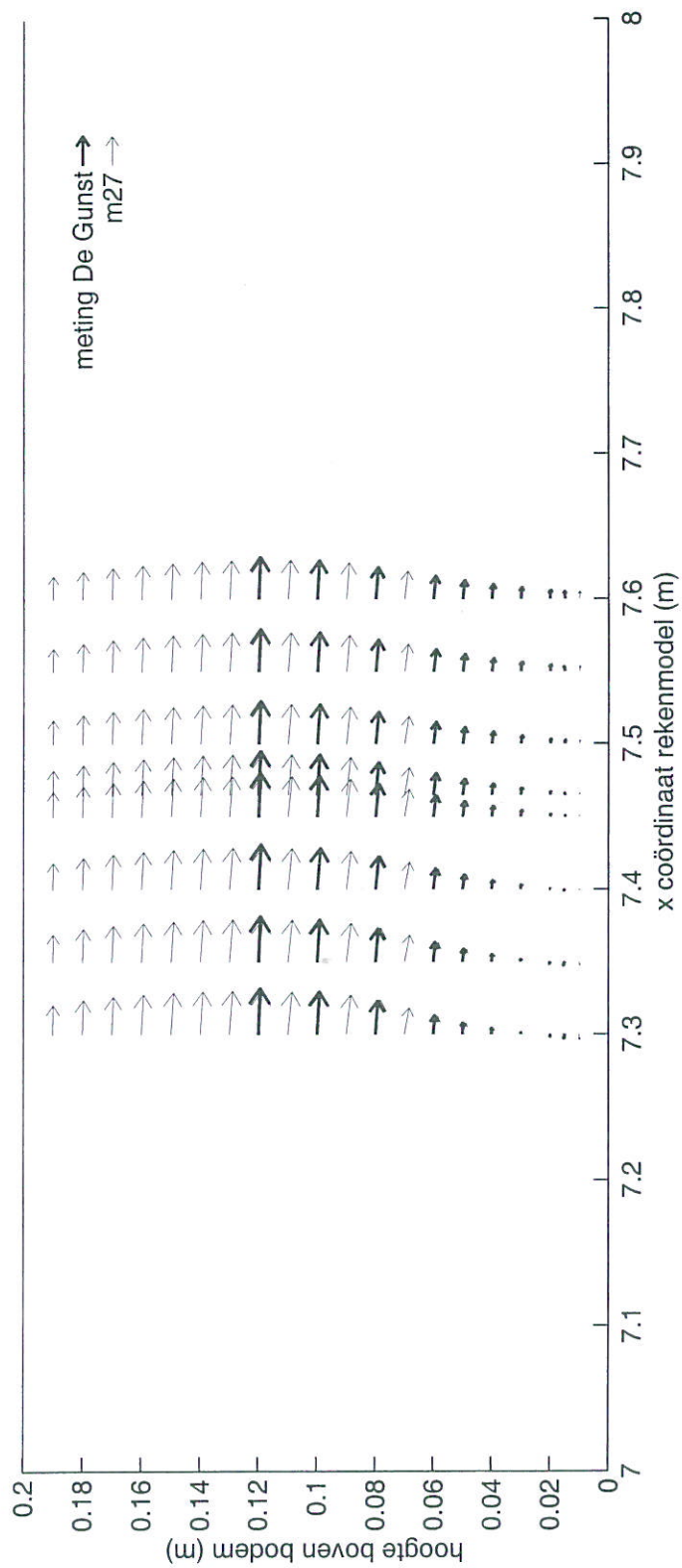


Metingen De Gunst vergeleken met CFX berekeningen
Tijdgemiddelde snelheden u en w

CFX: m19/m27

Proef 4_2

Situatie: afstap

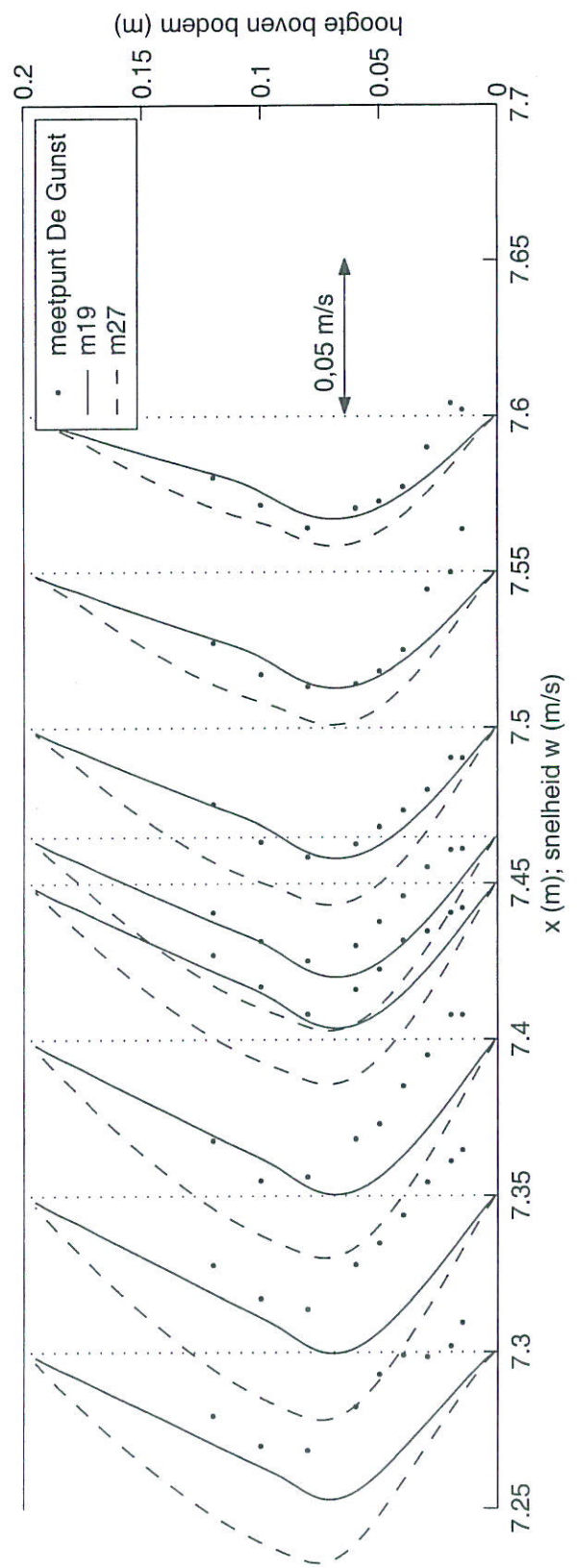
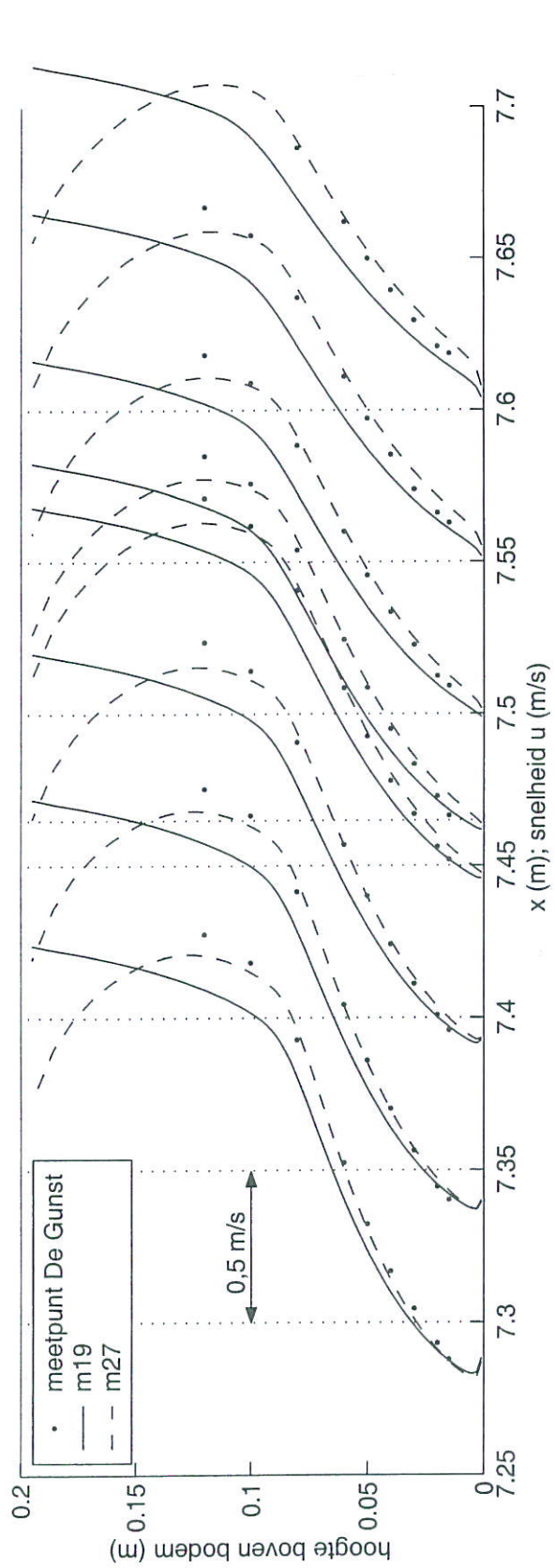


Metingen De Gunst vergeleken met CFX berekeningen
Snelheidsvectoren in verticalen achter de afstap

CFX: m27

Proef 4_2

Situatie: afstap

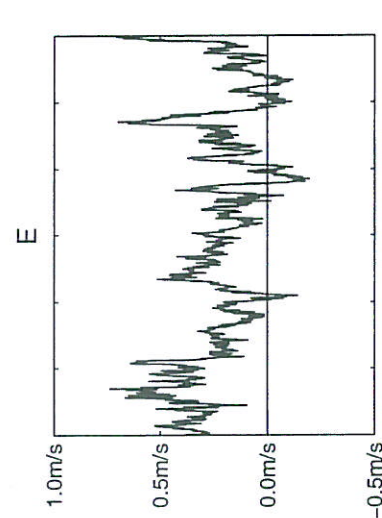
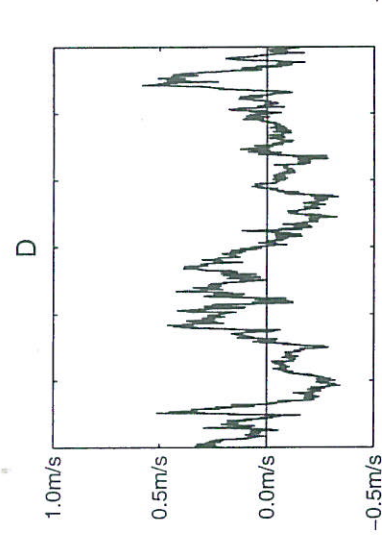
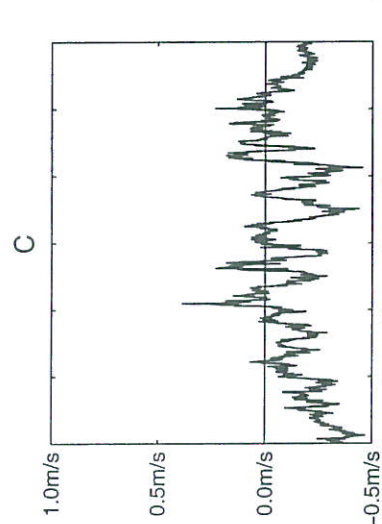
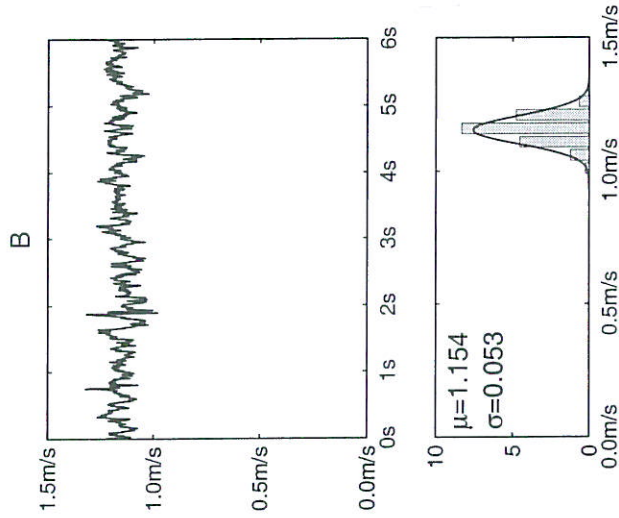
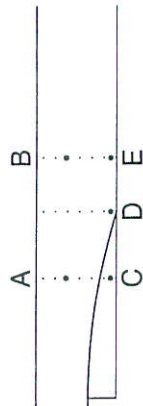
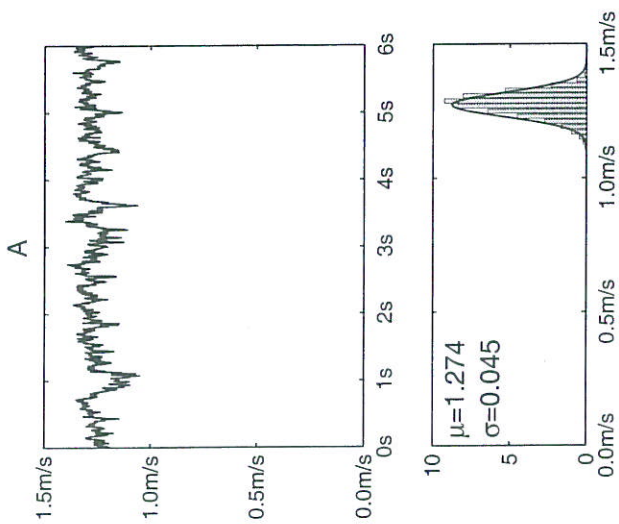


Metingen De Gunst vergeleken met CFX berekeningen
 Tijdgemiddelde snelheden u en w

CFX: m19/m27

Proef 4_2

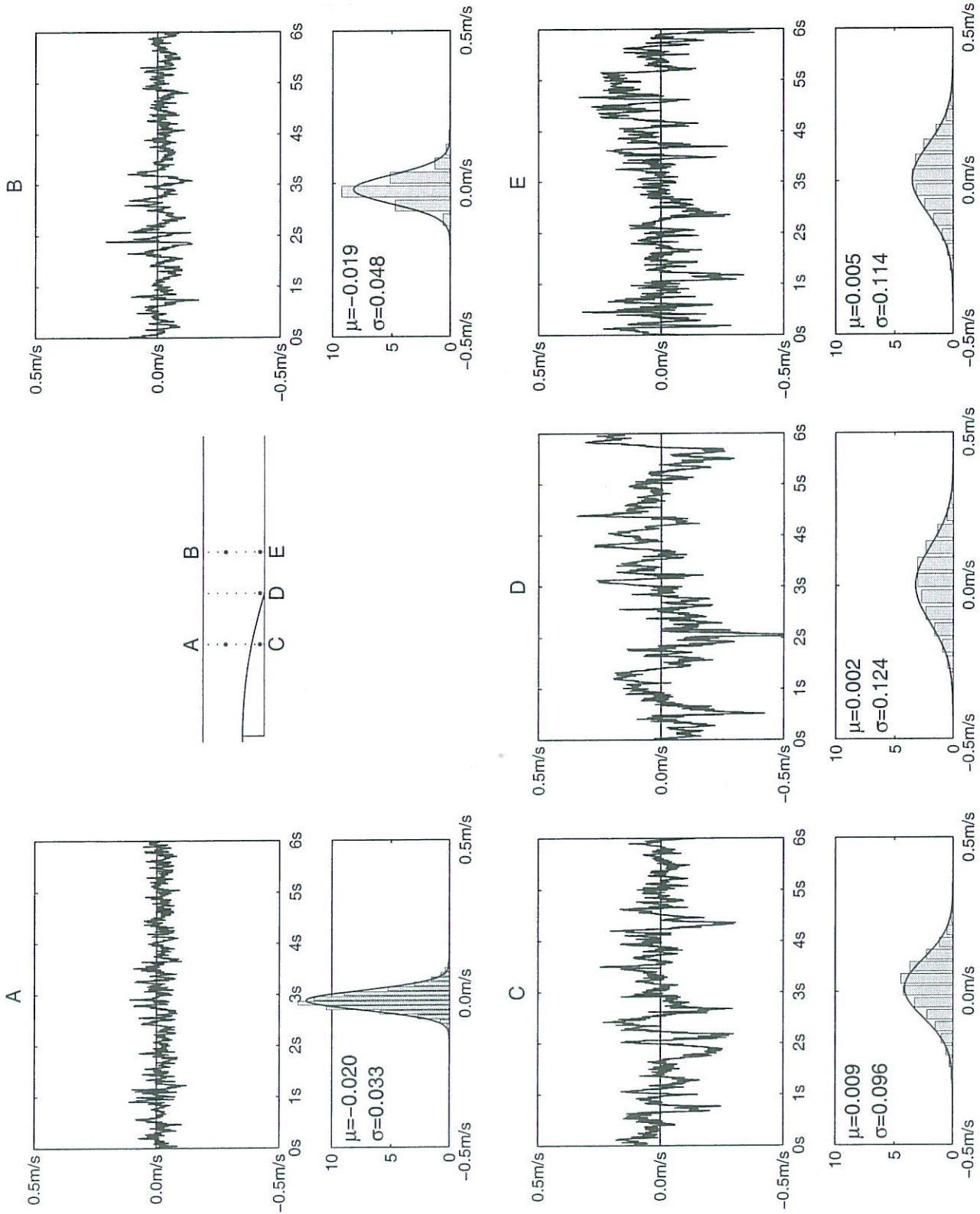
Situatie: afstap



Horizontale snelheidscomponent metingen De Gunst
Plots met 6 seconden uitsneden meetseries en
spreiding van snelheidsfluctuaties op 5 lokaties.

Proef 4_2

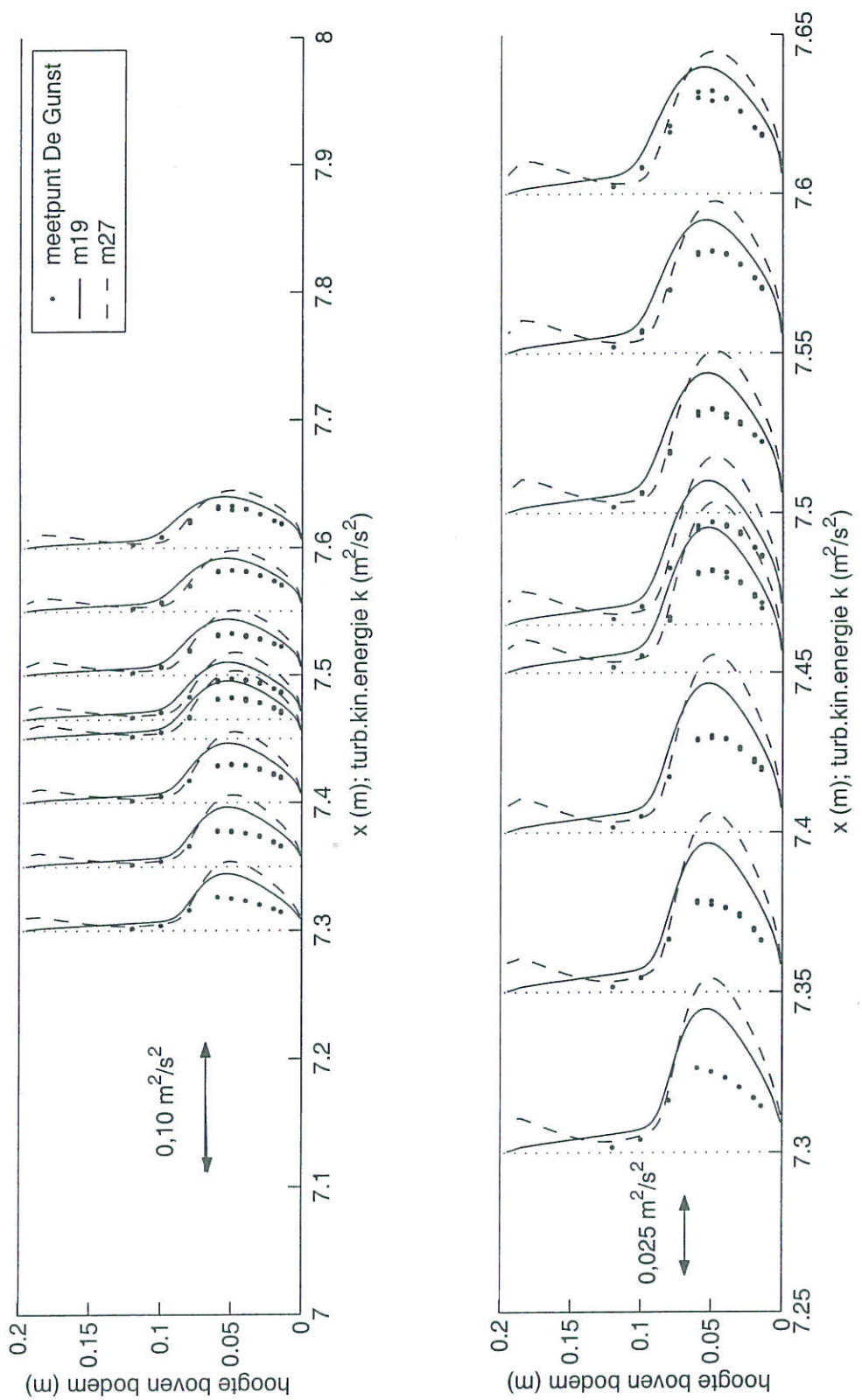
Situatie: afstap



Verticale snelheidscomponent metingen De Gunst
 Plots met 6 seconden uitsneden meetseries en
 spreiding van snelheidsfluctuaties op 5 lokaties.

Proef 4_2

Situatie: afstap



Metingen De Gunst vergeleken met CFX berekeningen

Turb. kin. energie k met $\xi = \frac{1}{2}$, $\sigma_v^2 = 0$. ($\sigma_u^2 + \sigma_w^2$)

CFX: m19/m27

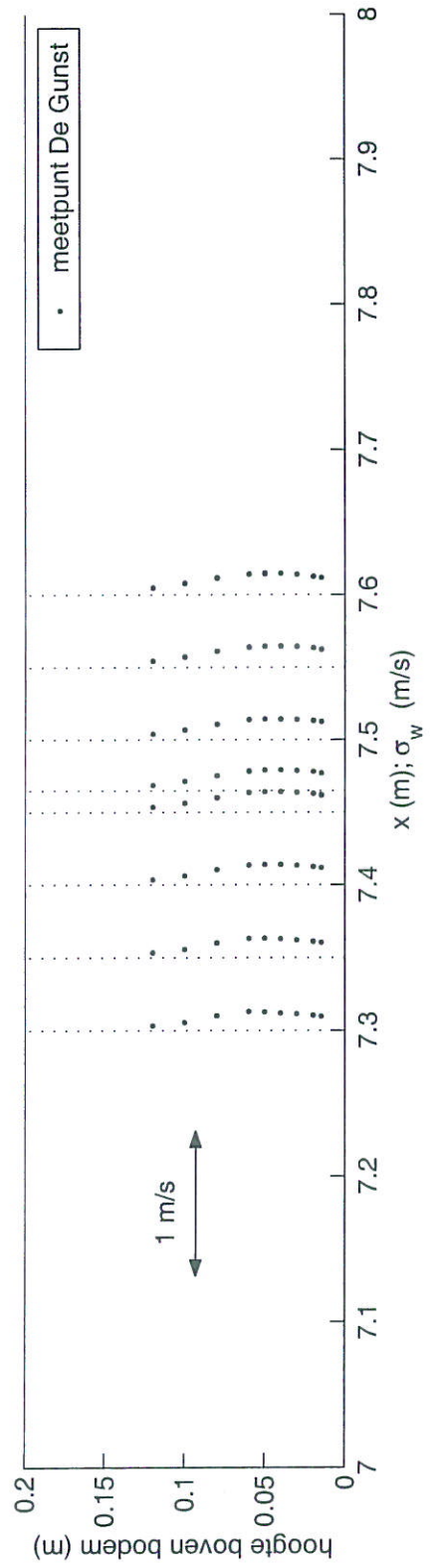
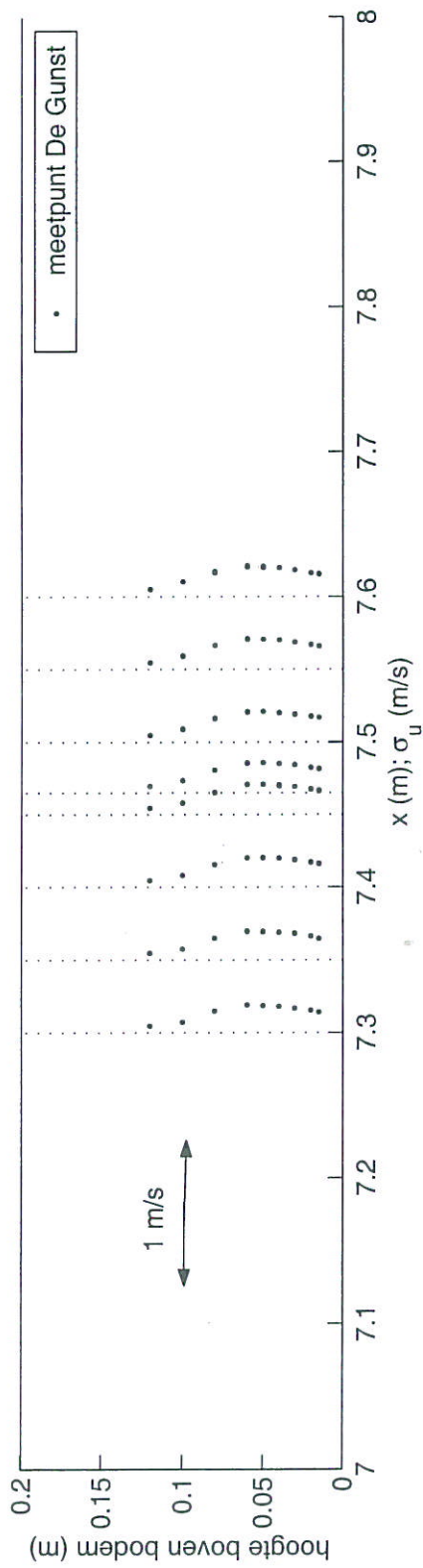
Proef 4_2

Situatie: afstap

WL | DELFT HYDRAULICS

Q3107

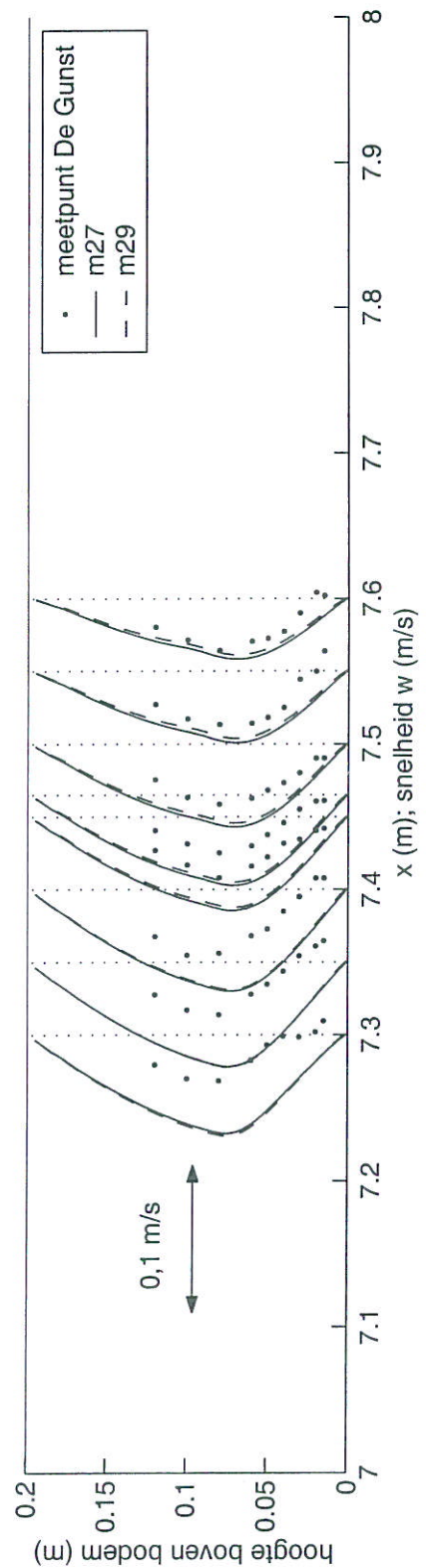
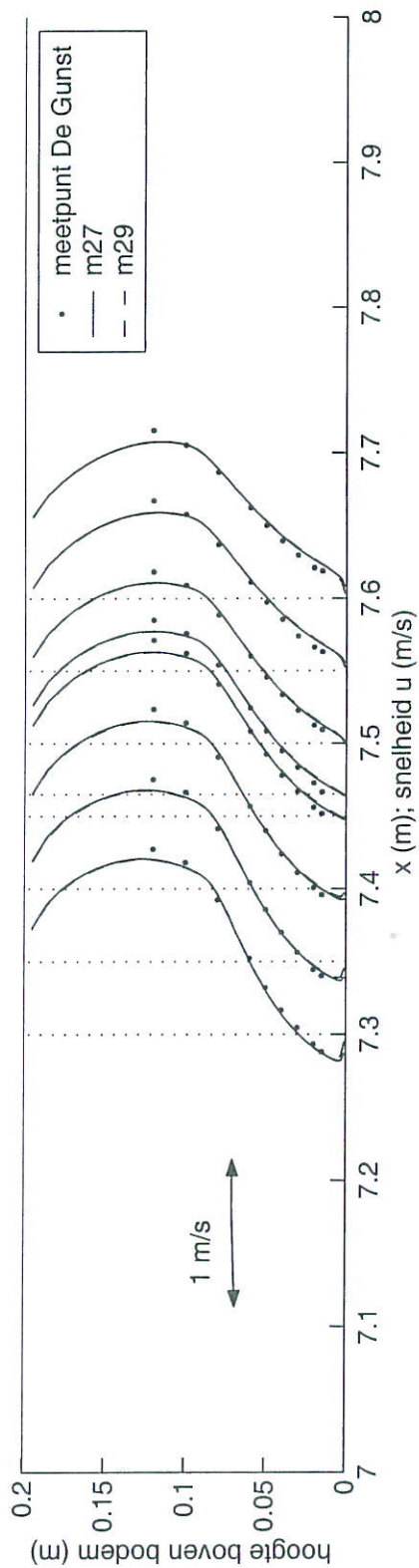
Fig. 2.7



Metingen De Gunst standaardafwijking σ_u en σ_w

Proef 4_2

Situatie: afstap

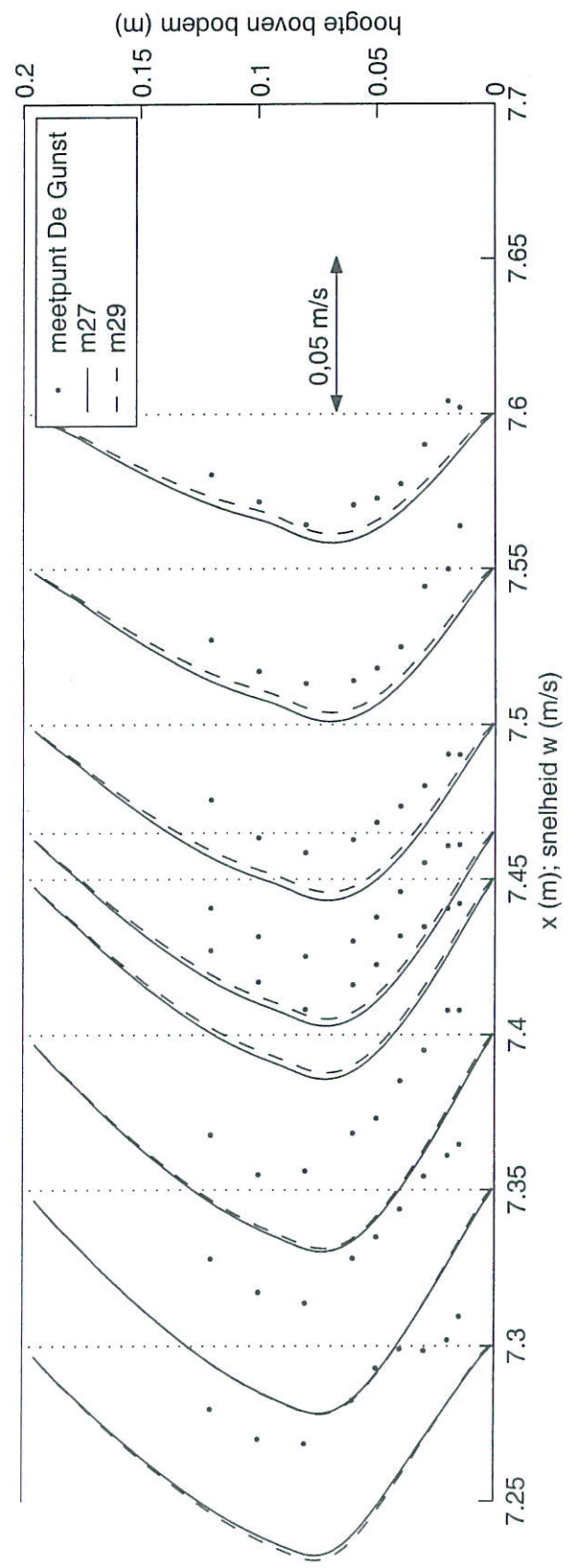
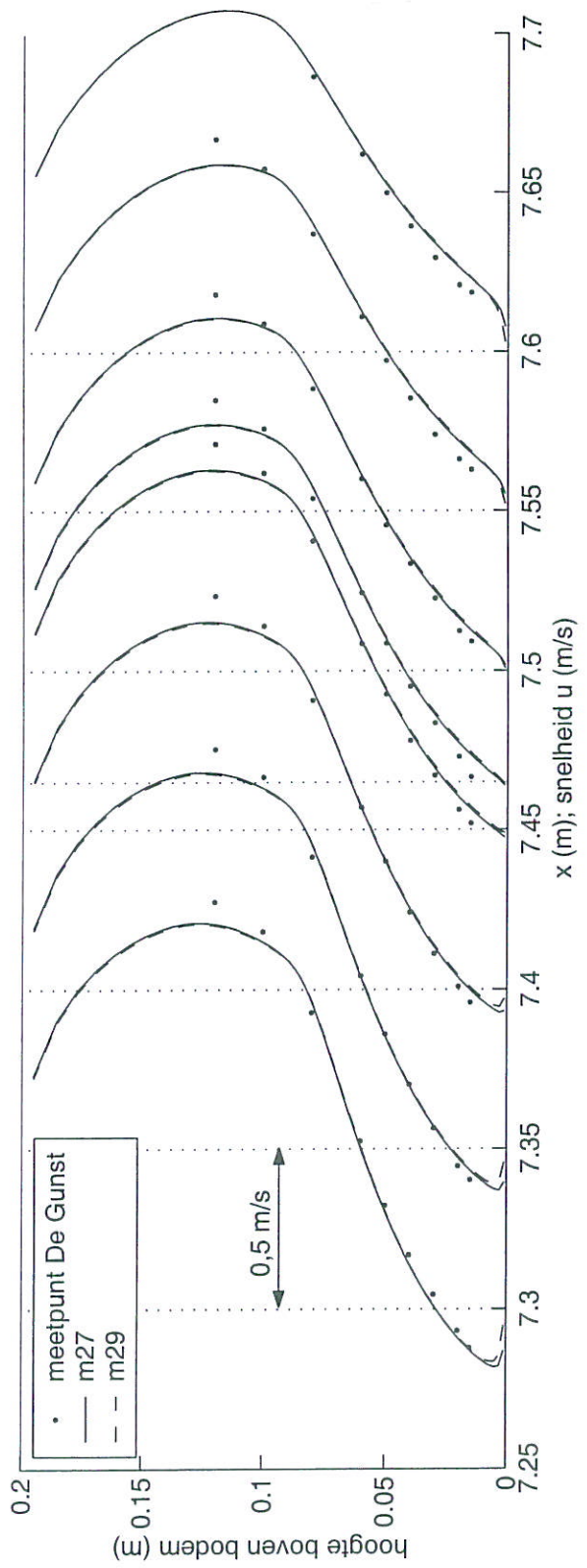


Effect bodemruwheid in CFX berekeningen

CFX: m27/m29

Proef 4_2

Situatie: afstap

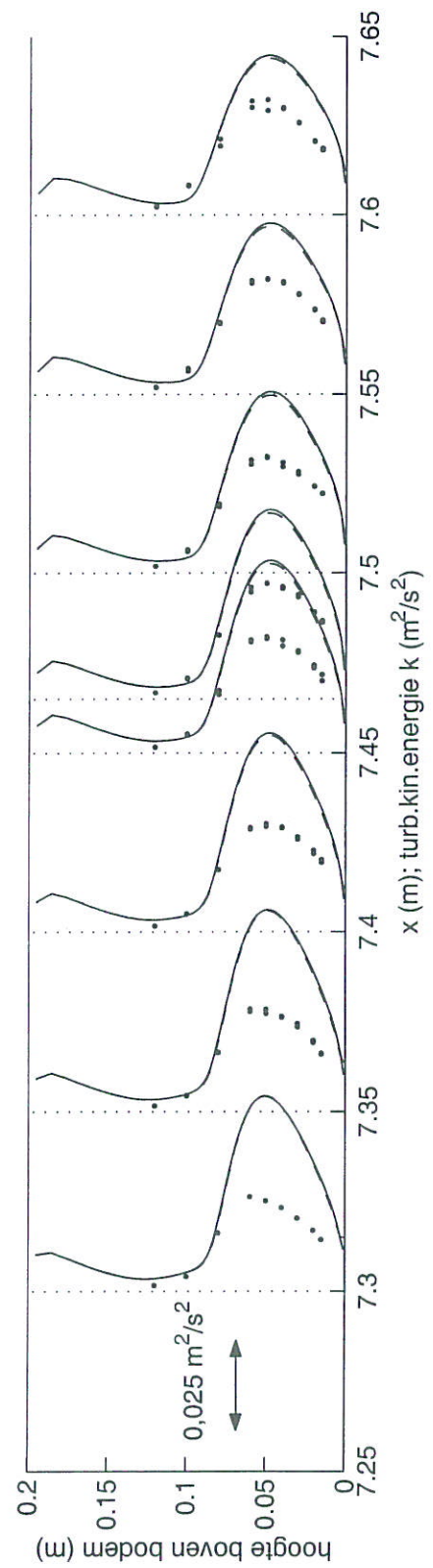
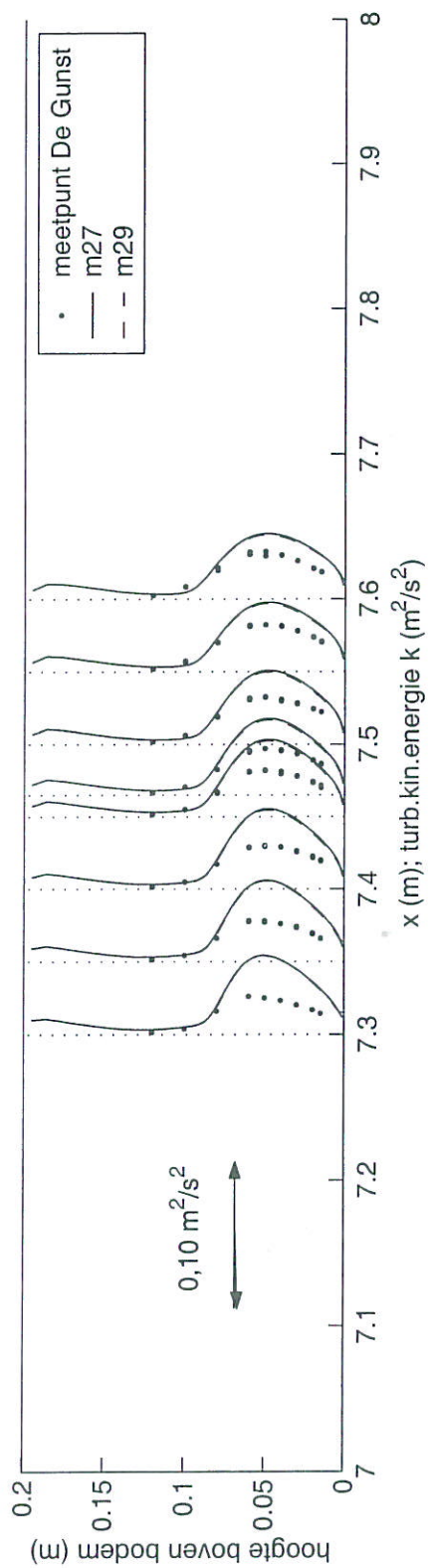


Effect bodemruwheid in CFX berekeningen

CFX: m27/m29

Proef 4_2

Situatie: afstap



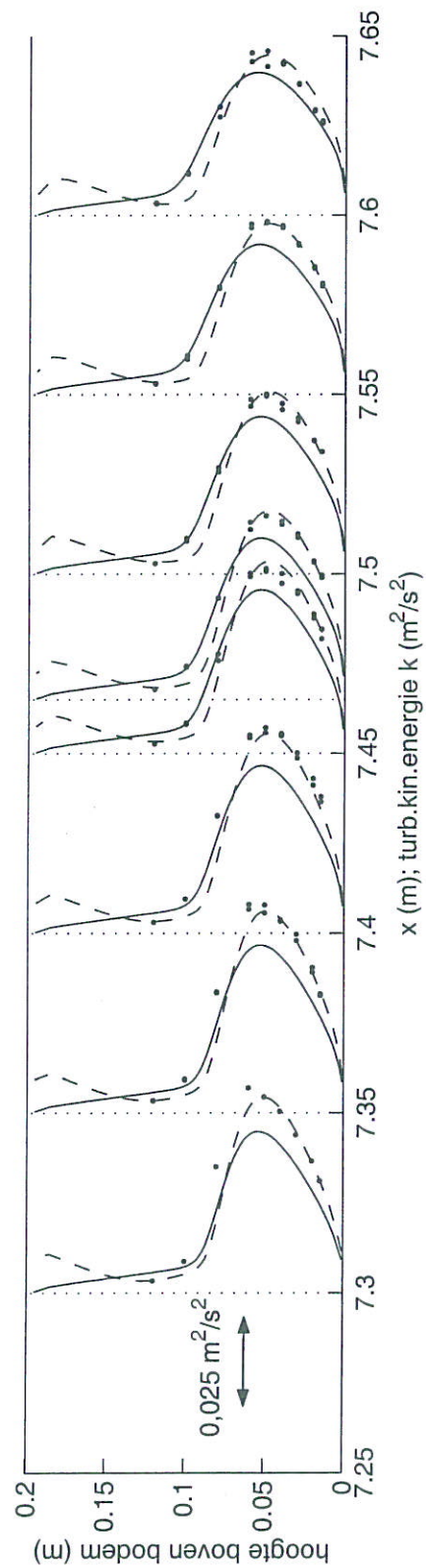
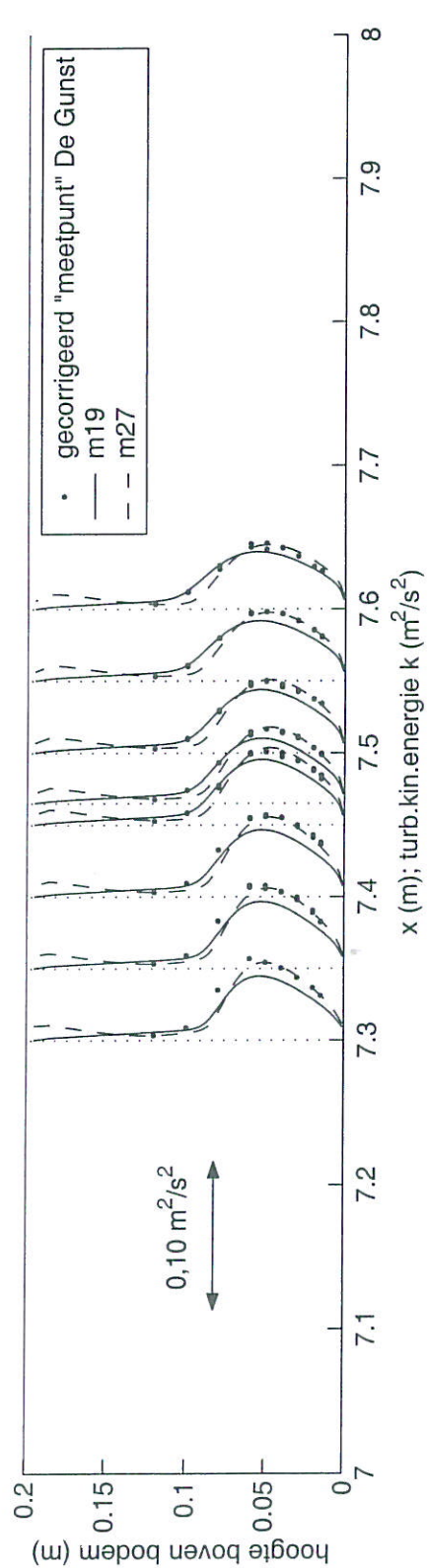
Effect bodemruwheid in CFX berekeningen

Turb. kin. energie k met $\xi = 1/2$, $\sigma_v^2 = 0$. ($\sigma_u^2 + \sigma_w^2$)

CFX: m27/m29

Proef 4_2

Situatie: afstap



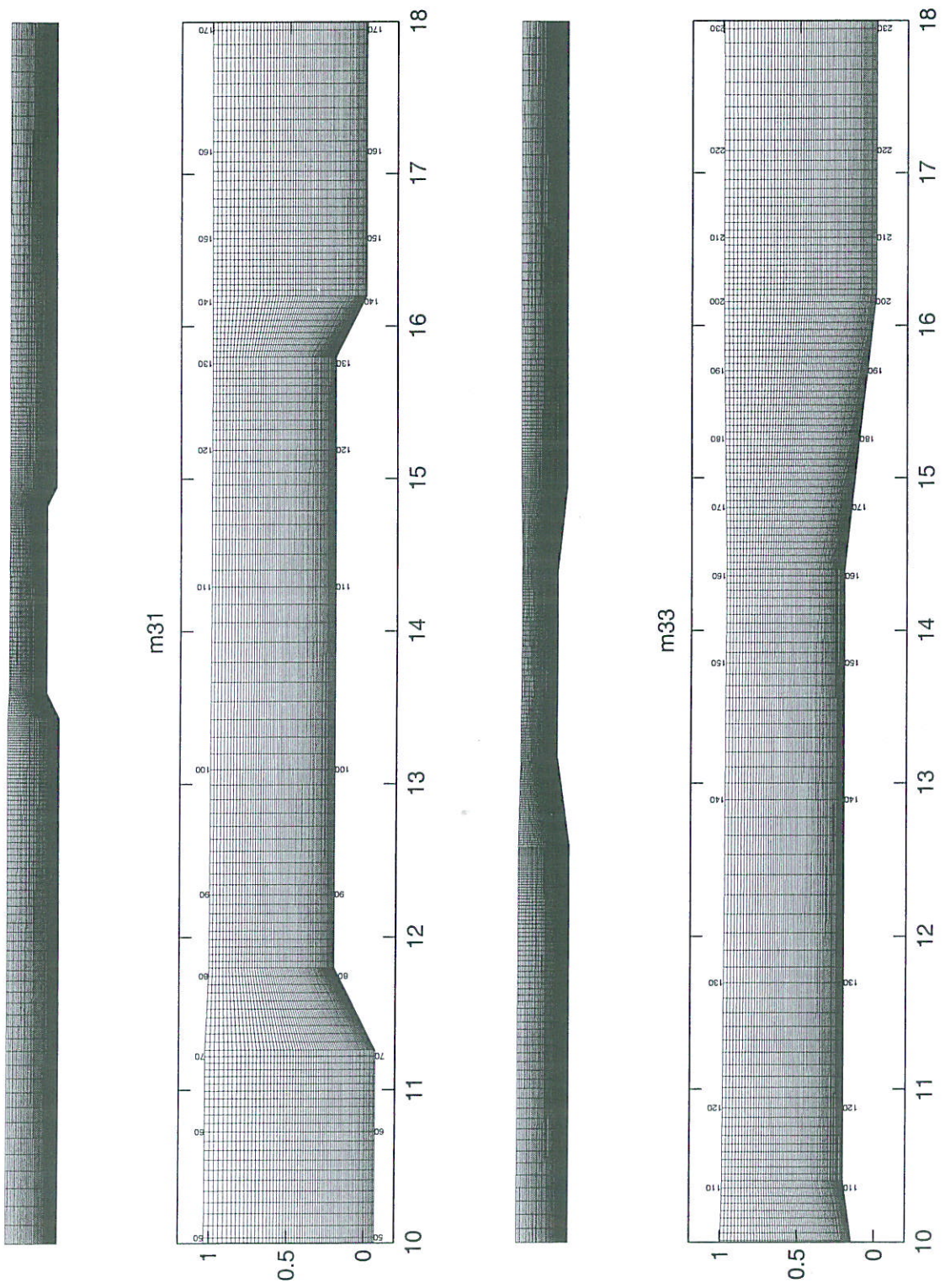
Metingen De Gunst vergeleken met CFX berekeningen

Turb. kin. energie k met $\xi = \frac{1}{2}$, $\sigma_v^2 = \lambda(\xi)(\sigma_u^2 + \sigma_w^2)$

CFX: m19/m27

Proef 4_2

Situatie: afstap



CFX model voor drempel (1:2 en 1:8)

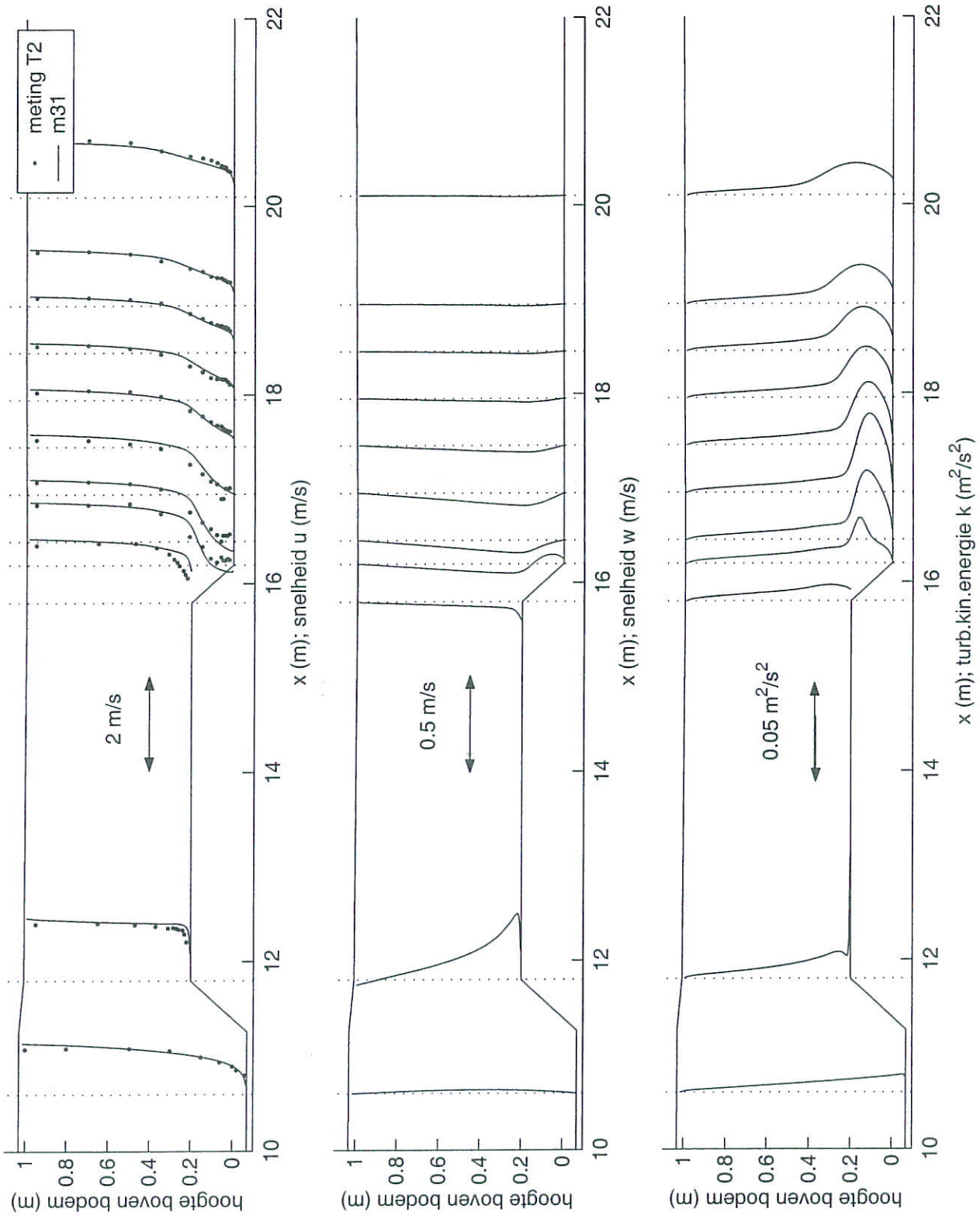
m31/m33

Situatie: drempel

WL | DELFT HYDRAULICS

Q3107

Fig. 2.12

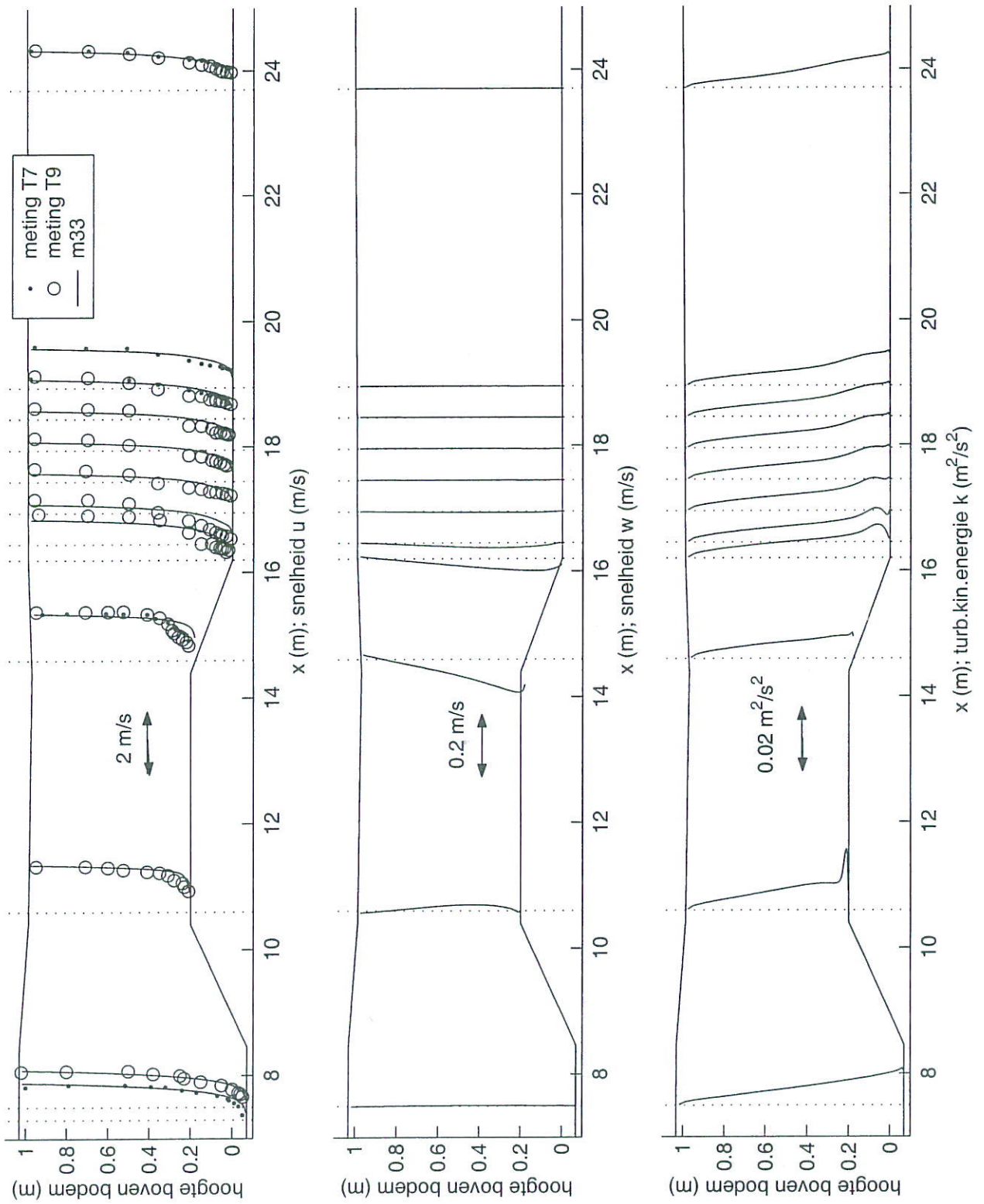


Metingen M711 vergeleken met CFX berekeningen
Tijdgemiddelde snelheden u

CFX: m31

Proef T2

Situatie: drempel 1:2

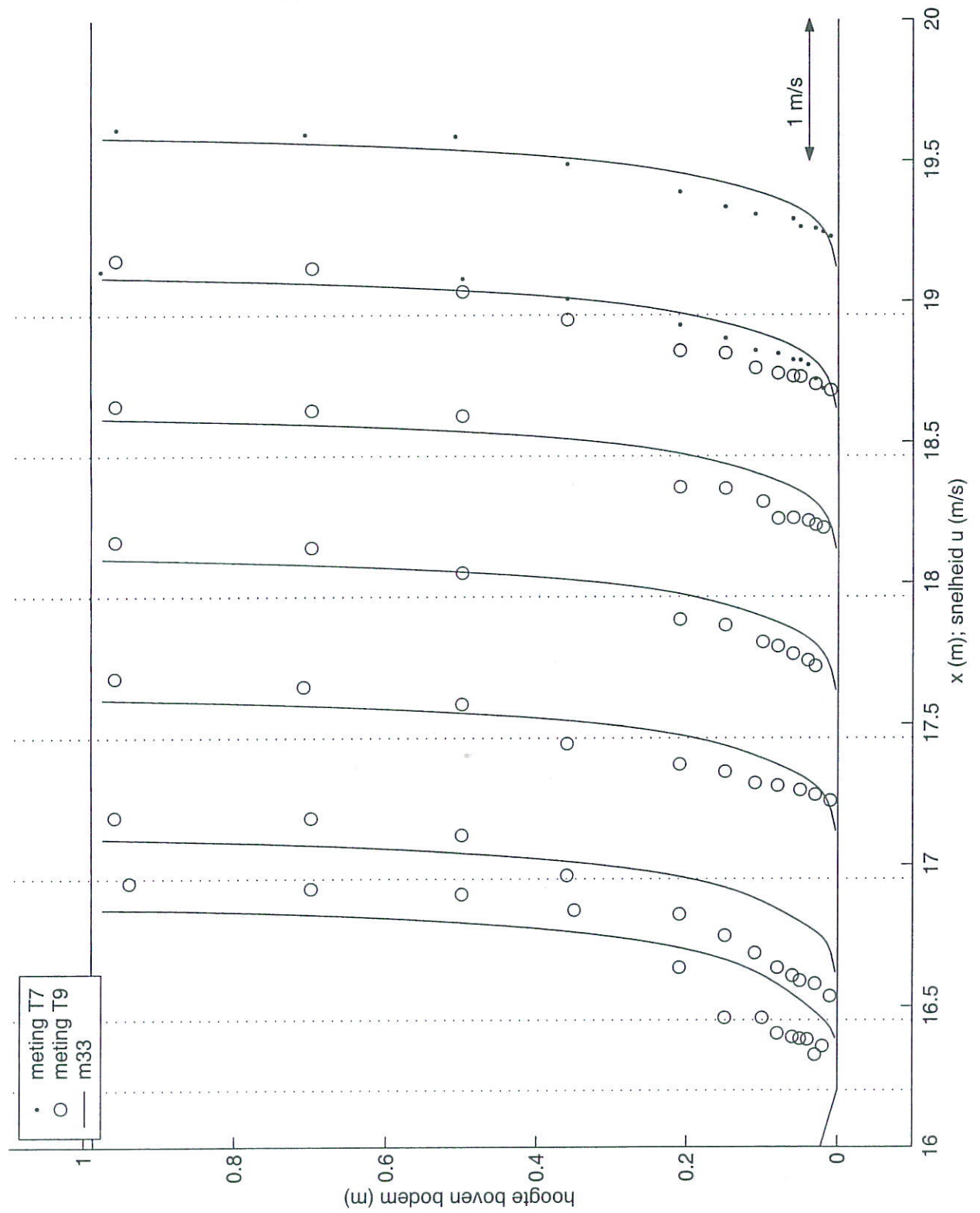


Metingen M711 vergeleken met CFX berekeningen
Tijdgemiddelde snelheden u

CFX: m33

Proef T7/T9

Situatie: drempel 1:8



Metingen M711 vergeleken met CFX berekeningen
Tijdgemiddelde snelheden u

CFX: m33

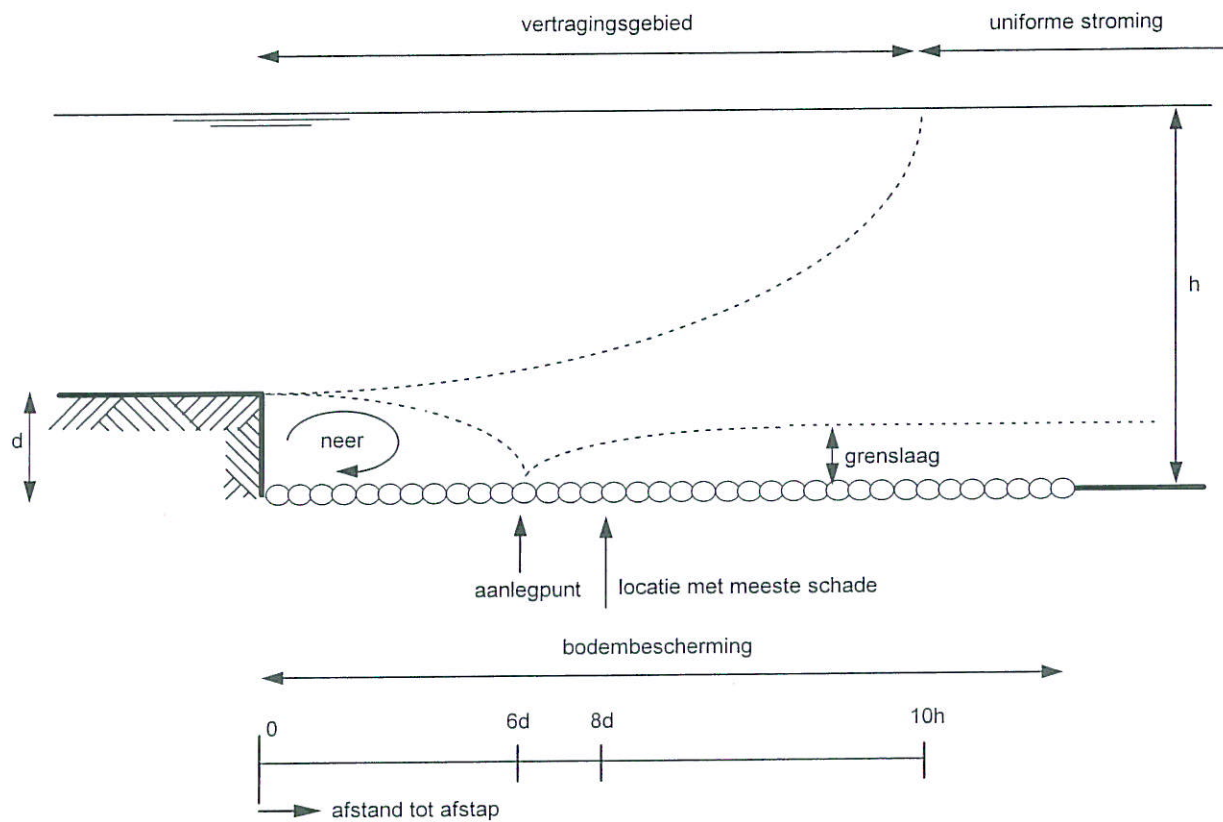
Proef T7/T9

Situatie: drempel 1:8

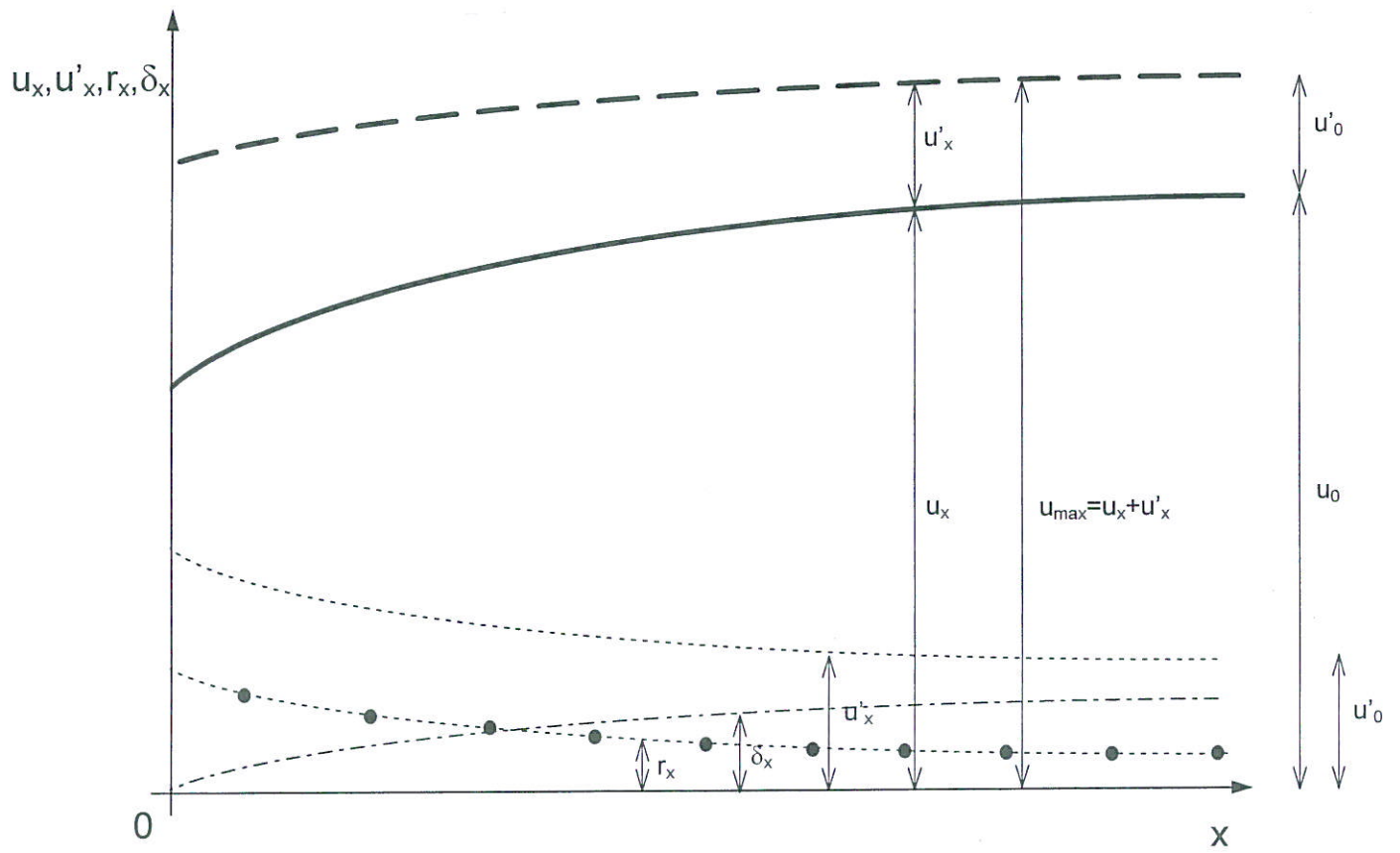
WL | DELFT HYDRAULICS

Q3107

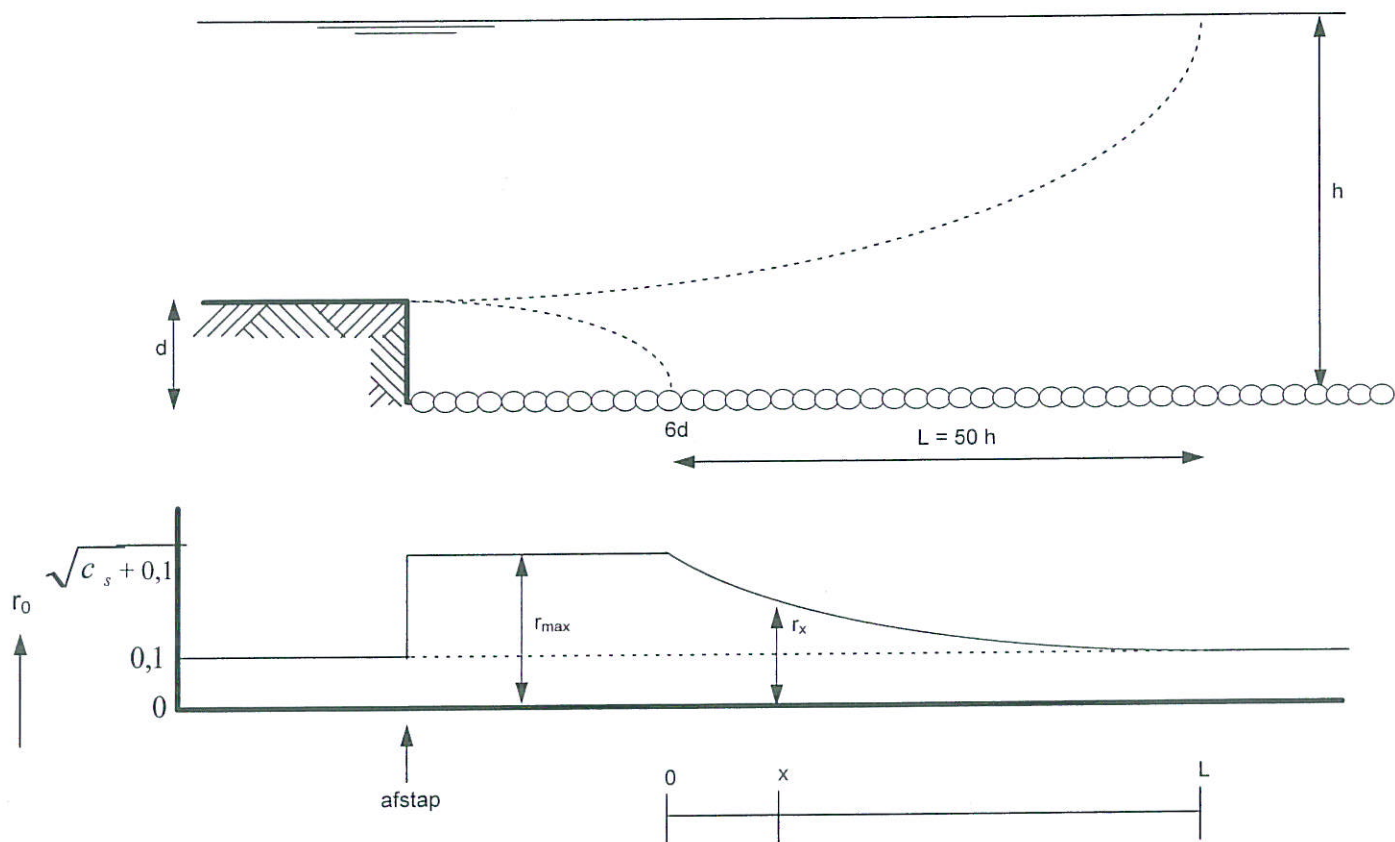
Fig. 2.14a



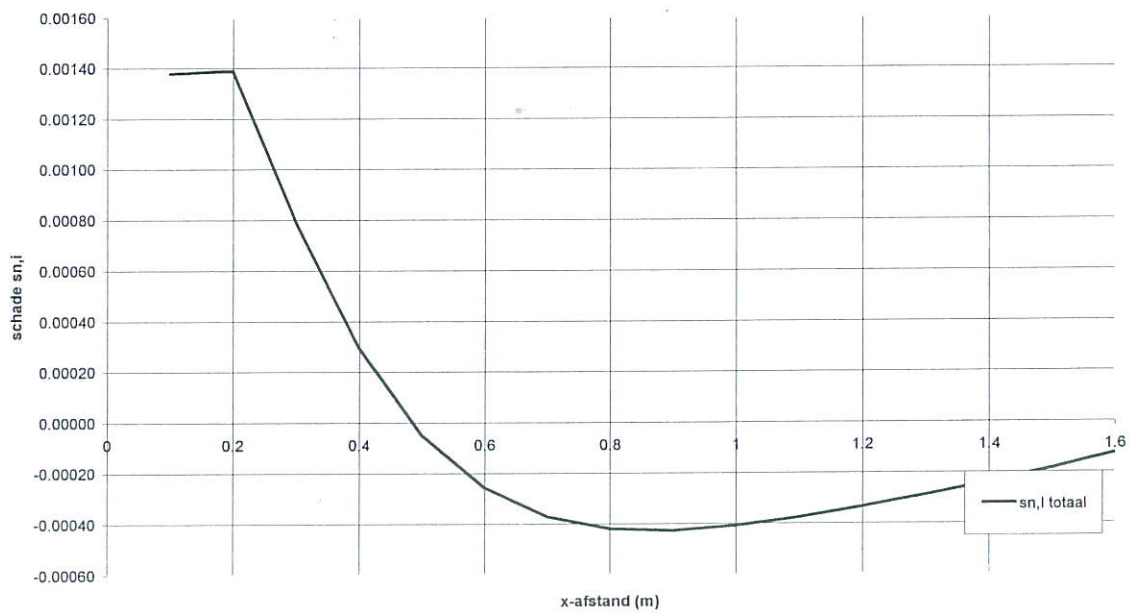
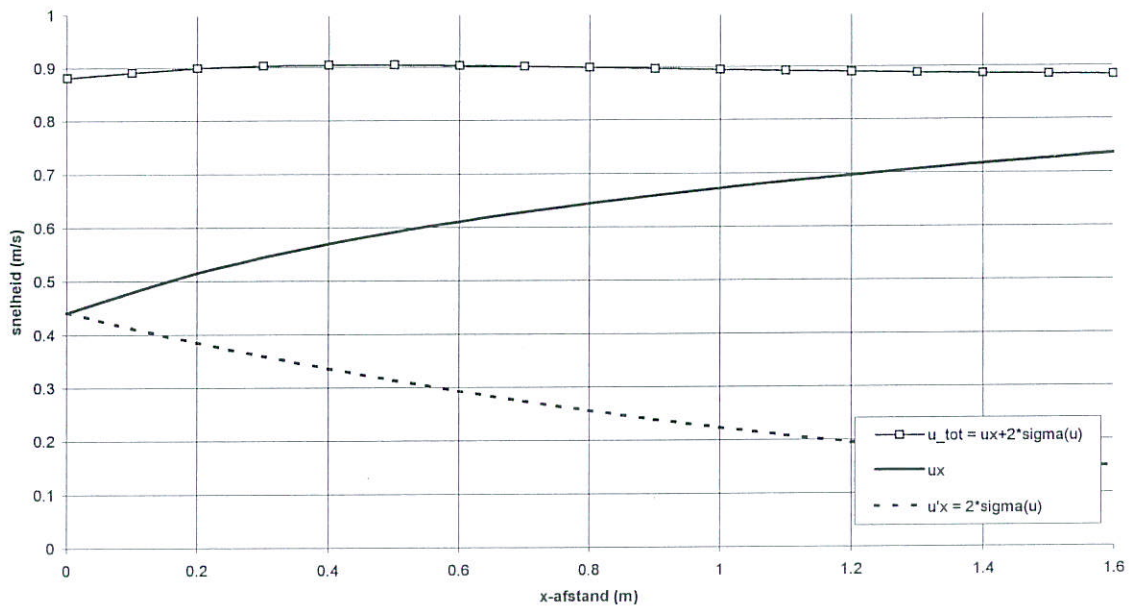
Figuur 3.1 Backward-facing step met karakteristieke gebieden



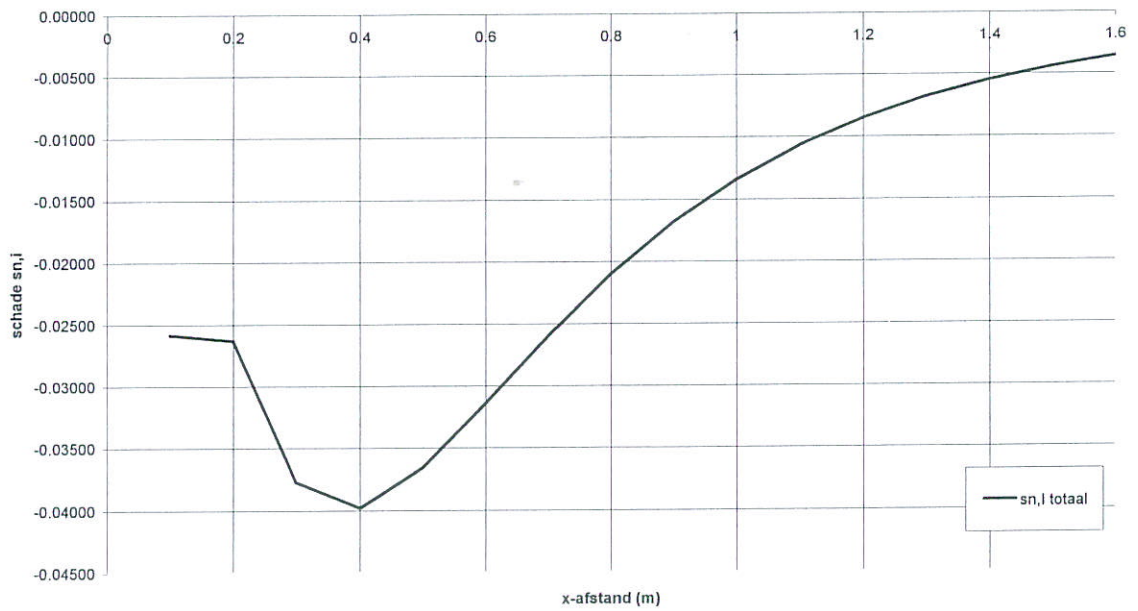
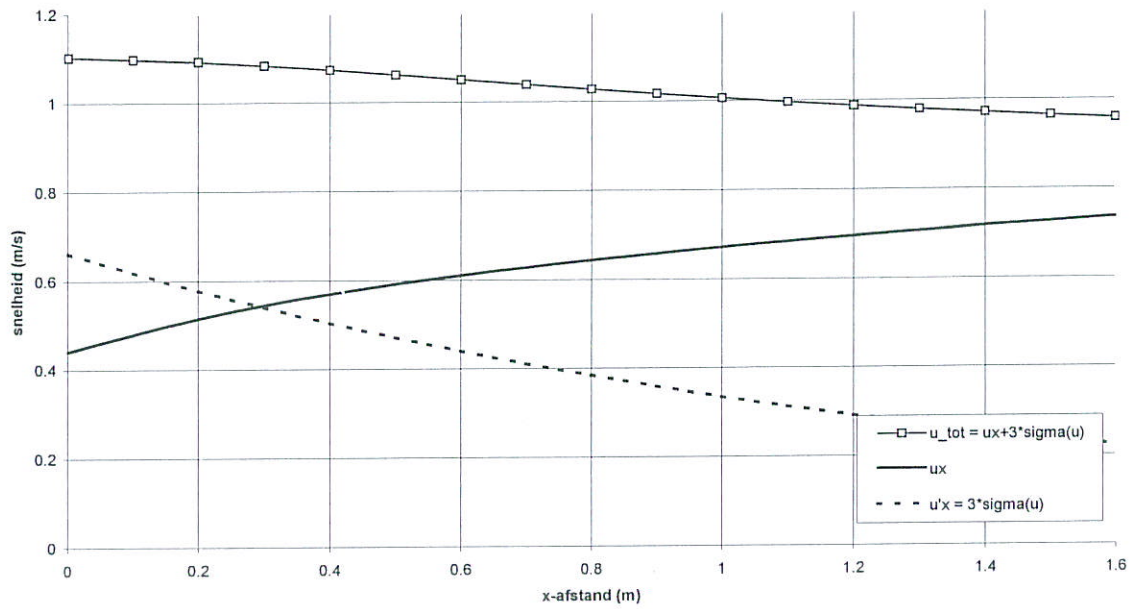
Figuur 3.2 Schematische weergave stroombeeld vanaf aanligpunt



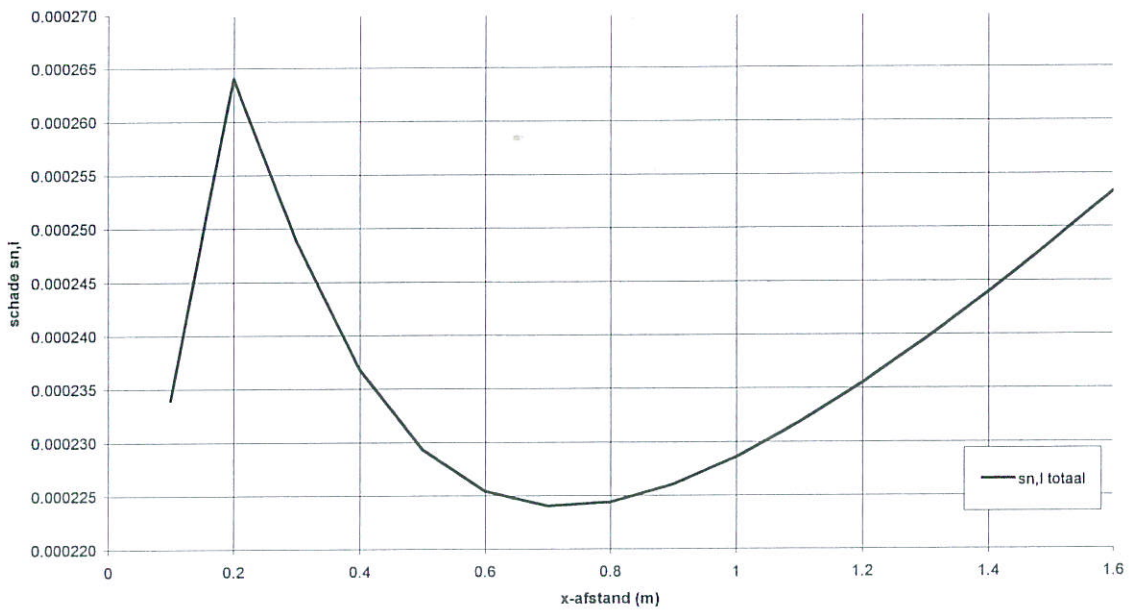
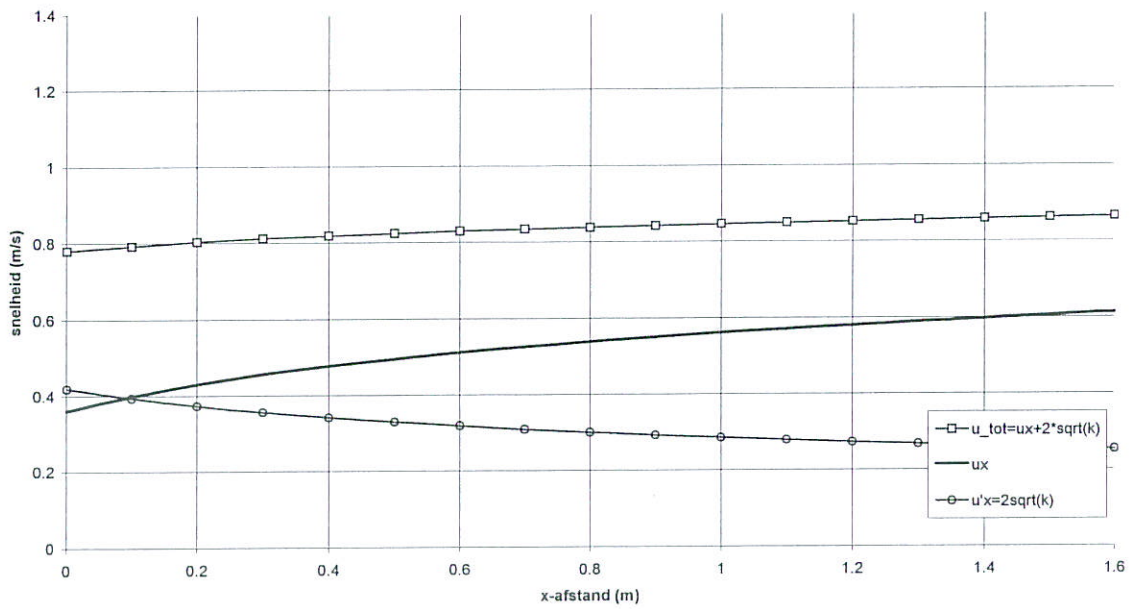
Figuur 3.3 Schematisatie relatieve dieptegemiddelde turbulentie



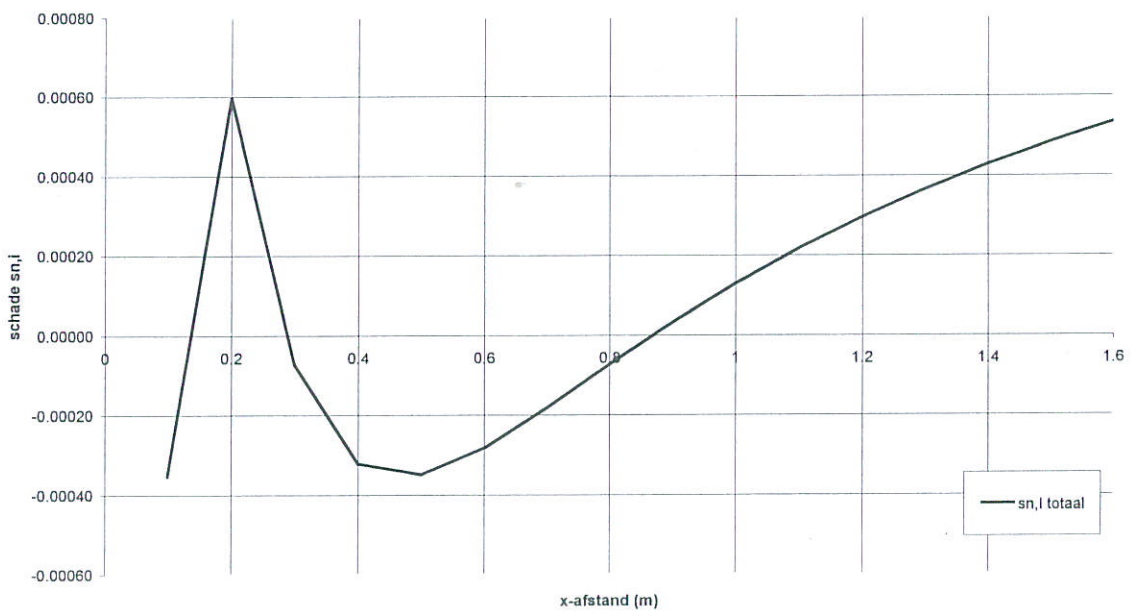
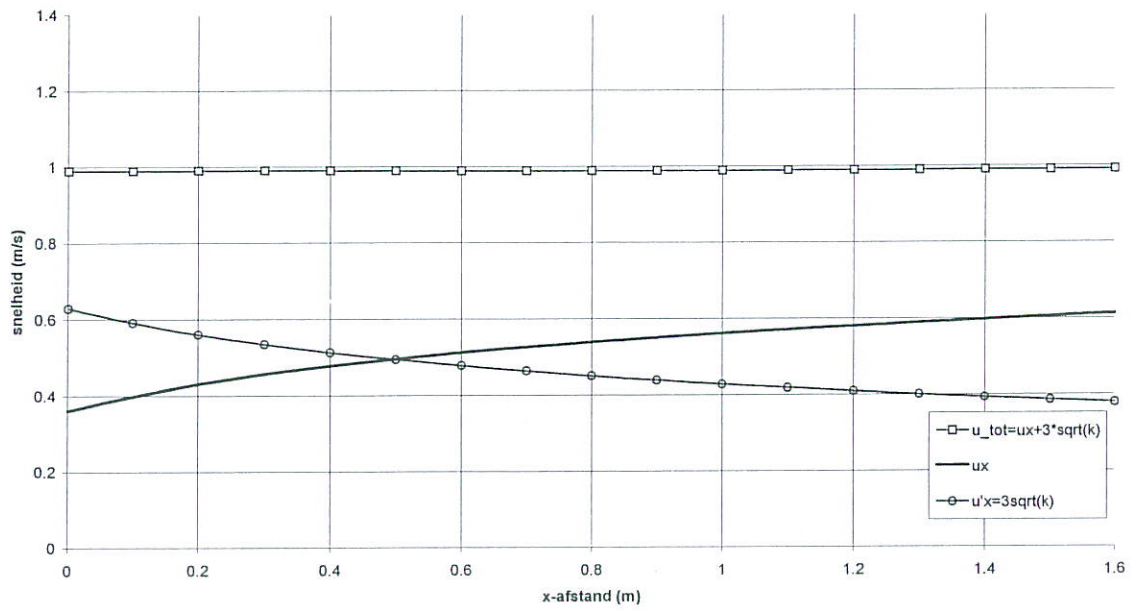
Figuur 3.4 Stroomsnelheden en schadeniveau voor experimentele spoor ($\alpha = 2$)



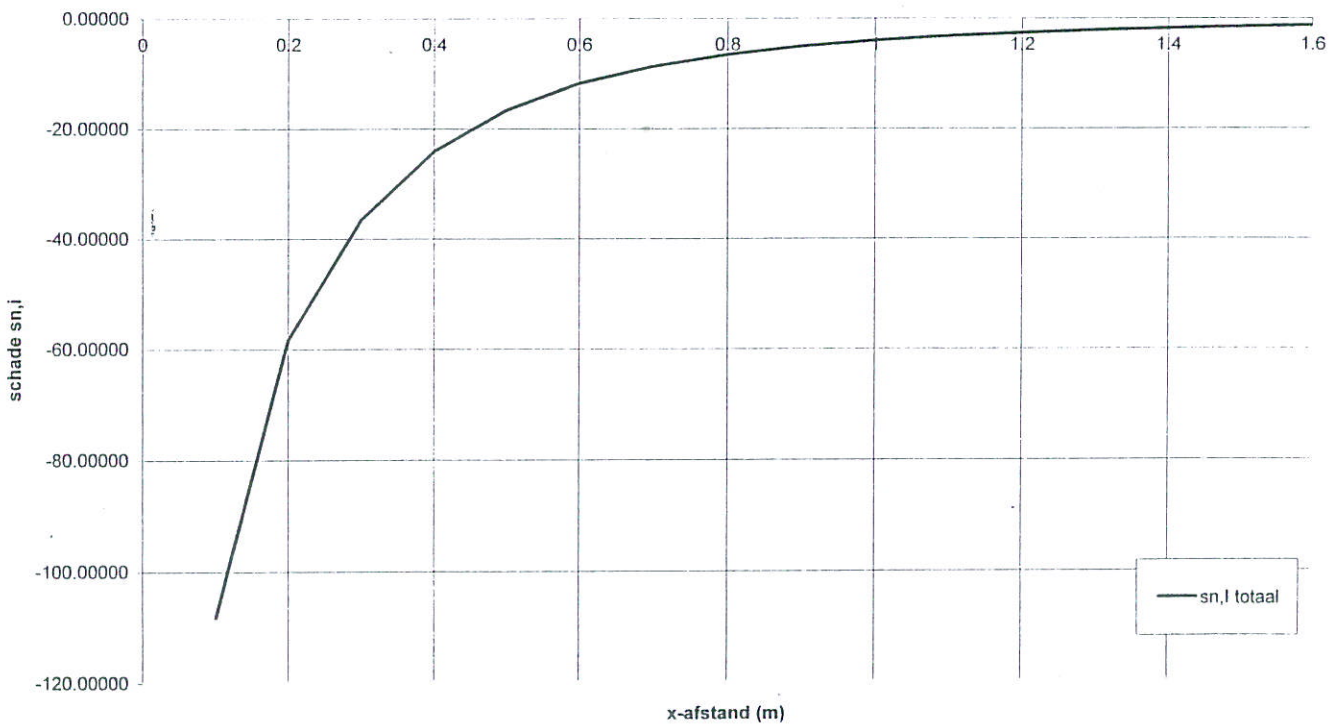
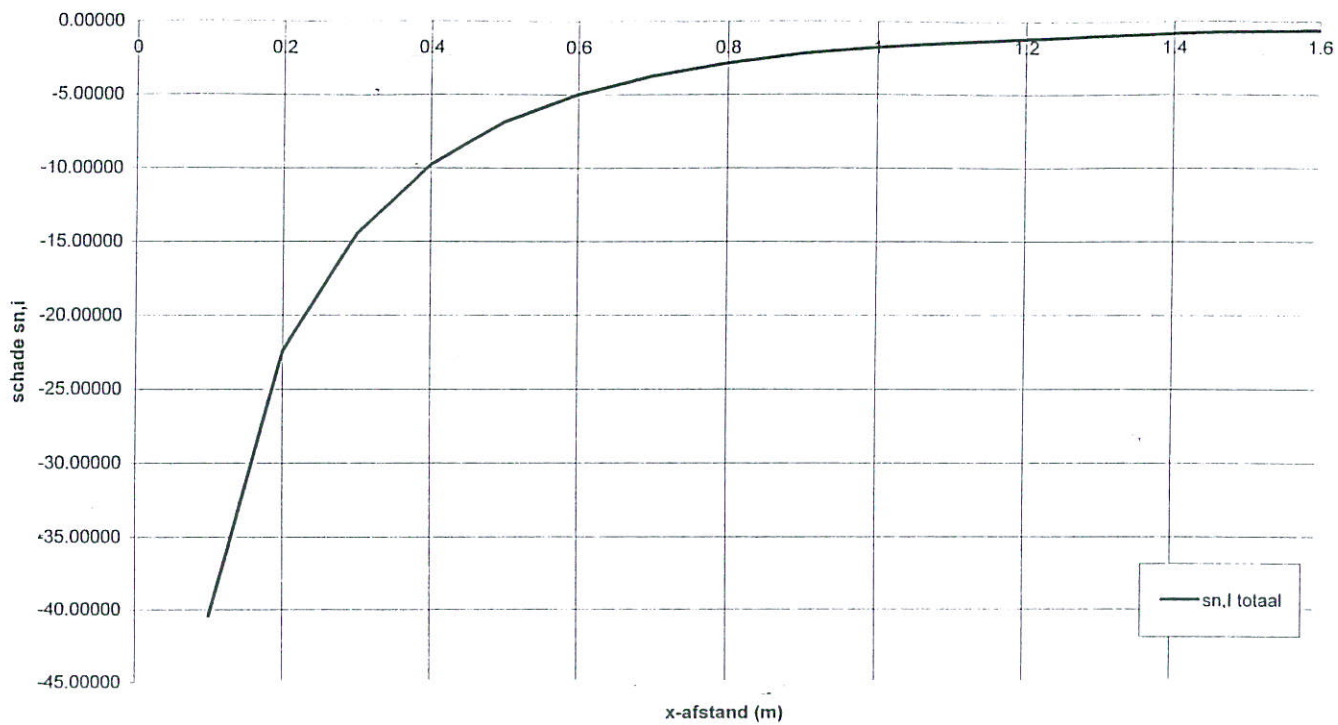
Figuur 3.5 Stroomsnelheden en schadeniveau voor experimentele spoor ($\alpha = 3$)



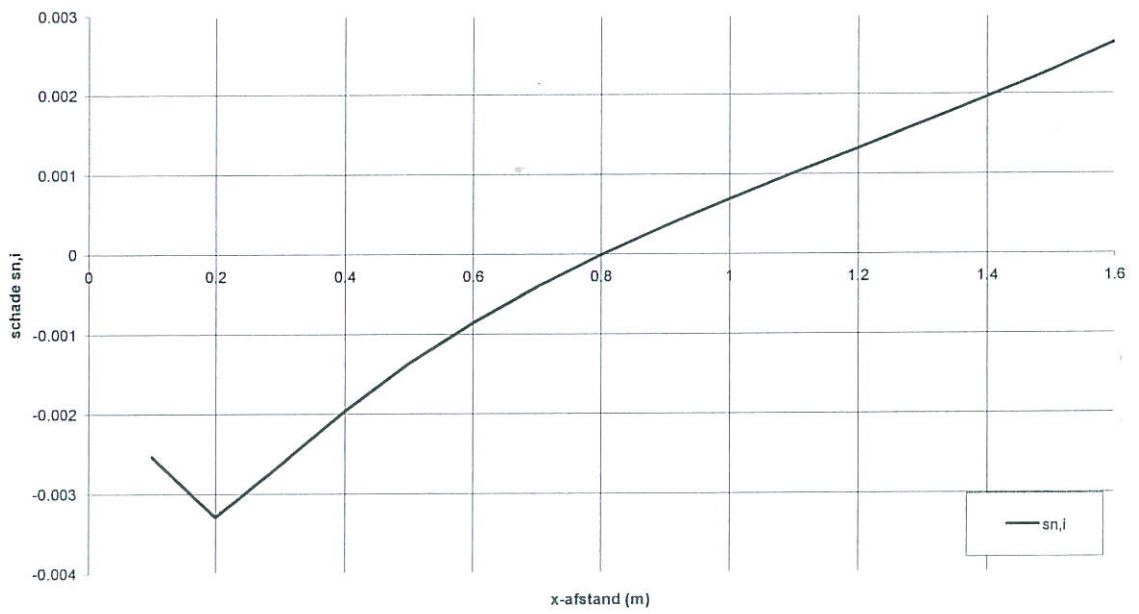
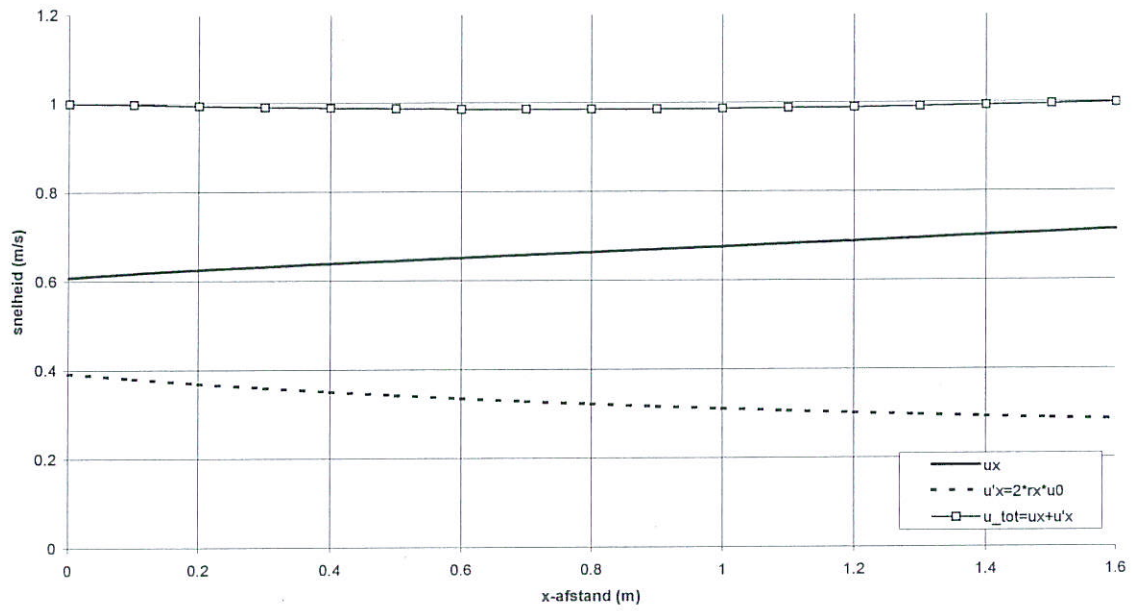
Figuur 3.6 Stroomsnelheden en schadeniveau voor numerieke spoor ($\alpha = 2$)



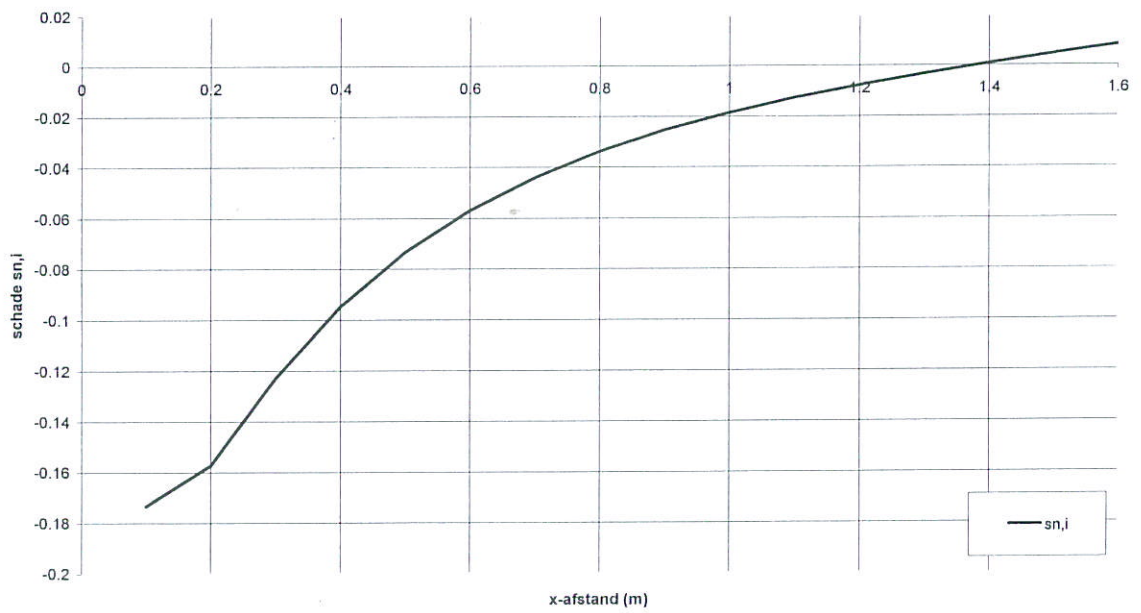
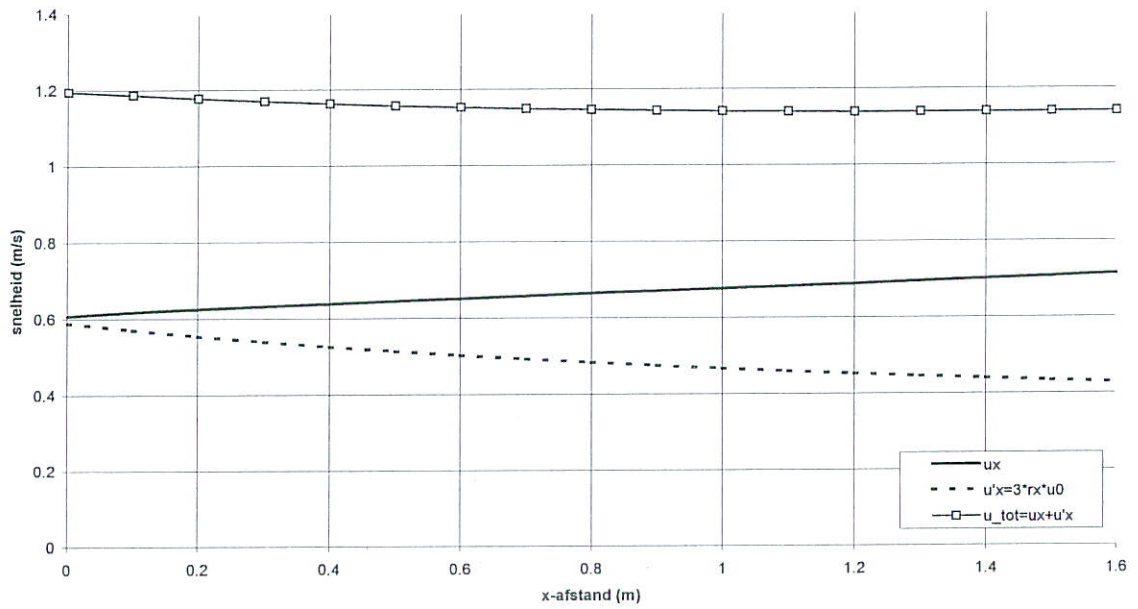
Figuur 3.7 Stroomsnelheden en schadeniveau voor numerieke spoor ($\alpha = 3$)



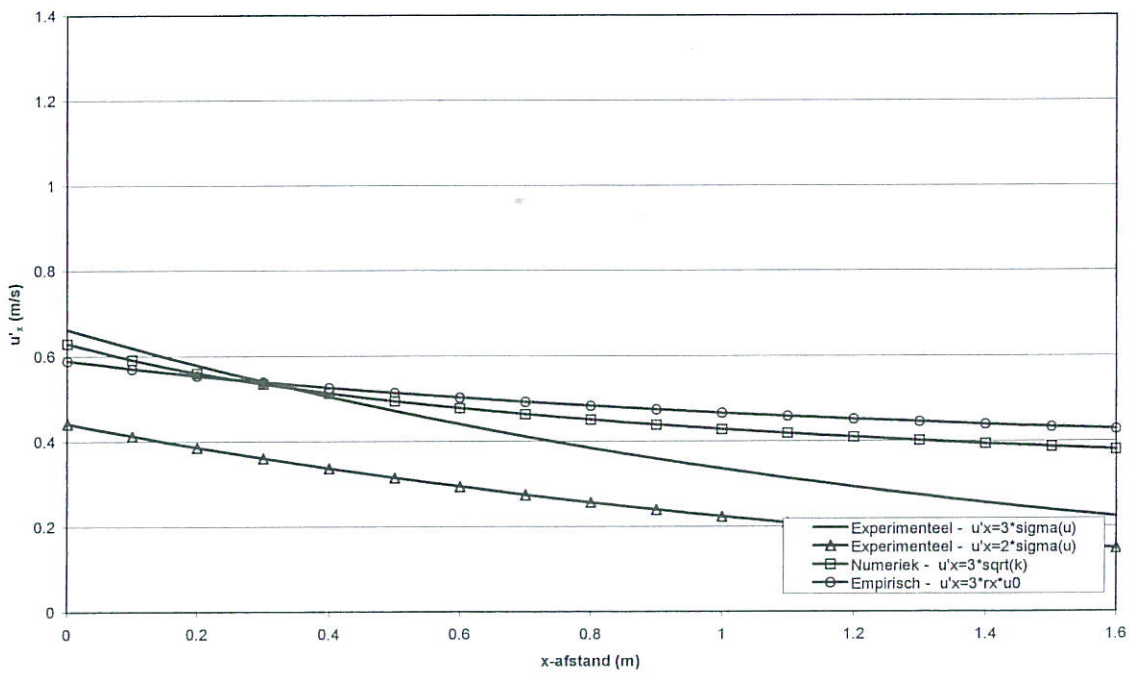
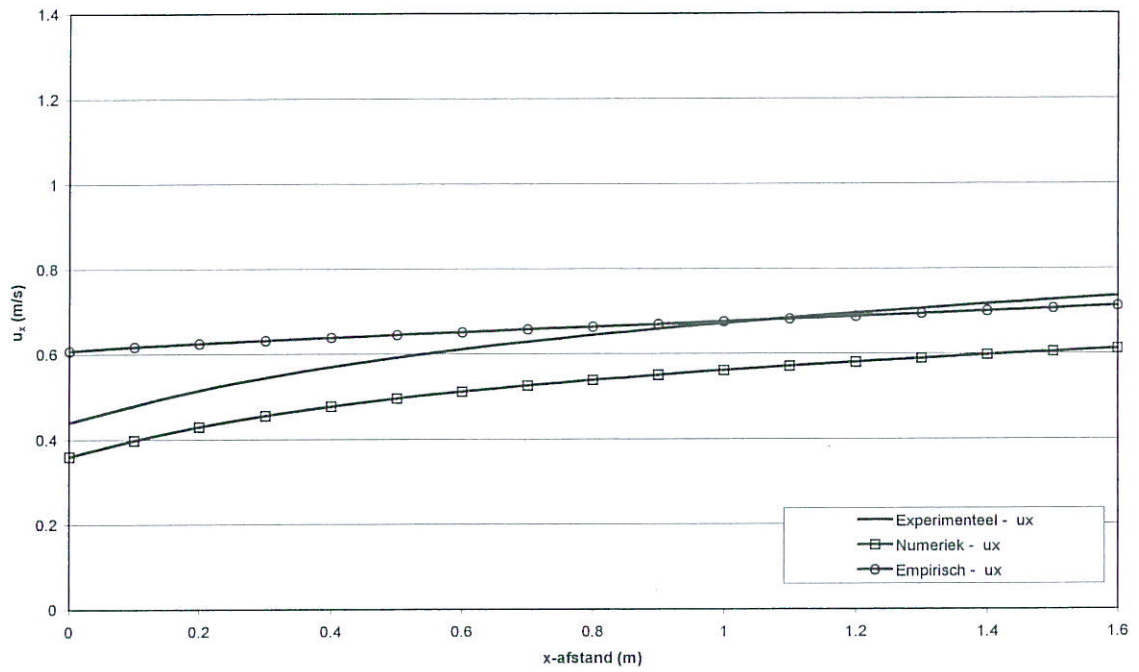
Figuur 3.8 Schade bij numerieke spoor bij $\alpha = 5,6$ en $7,3$



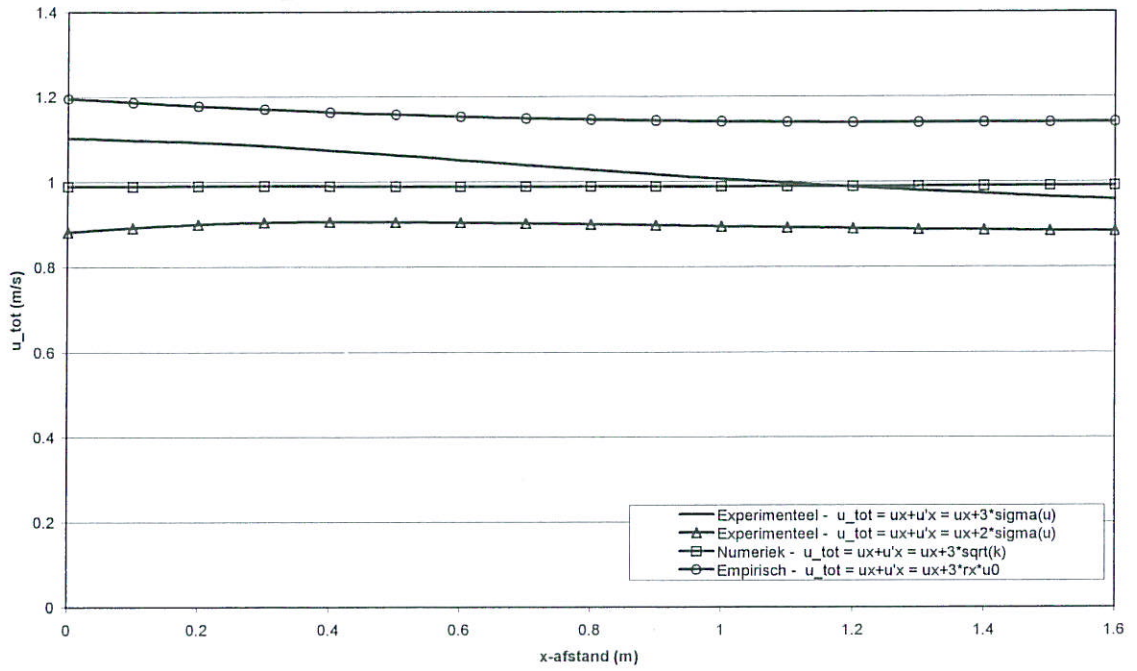
Figuur 3.9 Stroomsnelheden en schadeniveau voor empirische spoor ($\alpha = 2$)



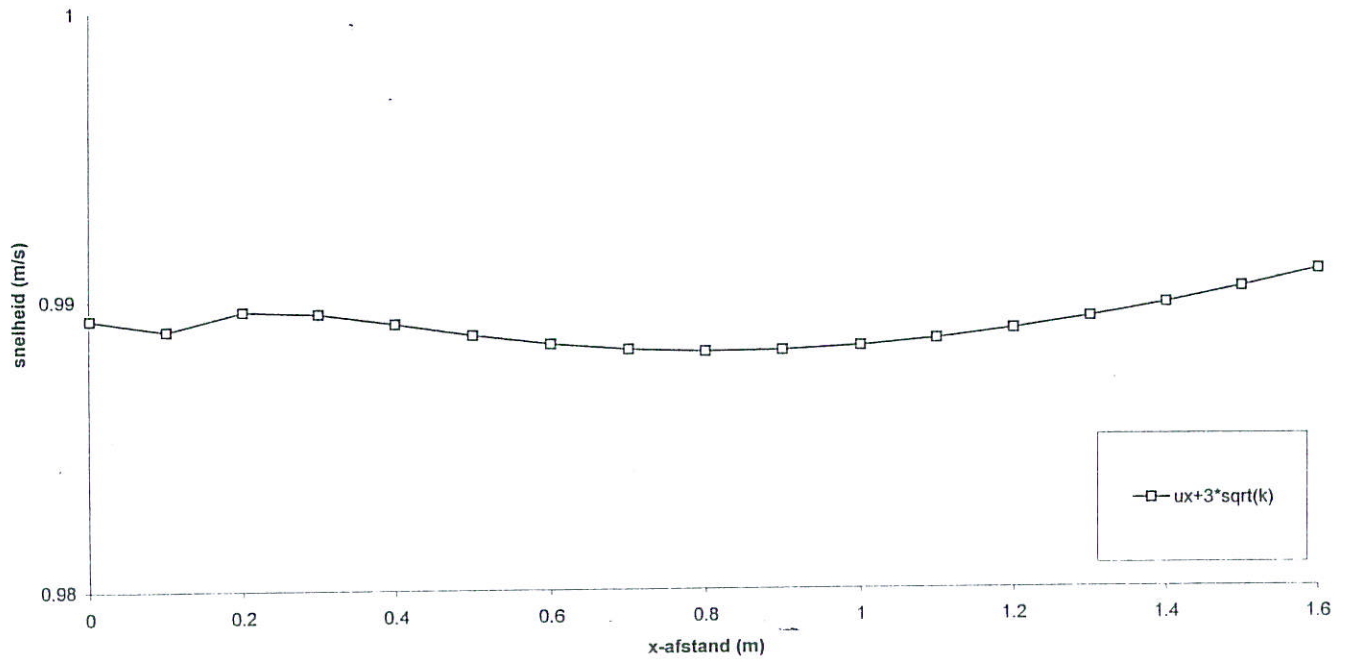
Figuur 3.10 Stroomsnelheden en schadeniveau voor empirische spoor ($\alpha = 3$)



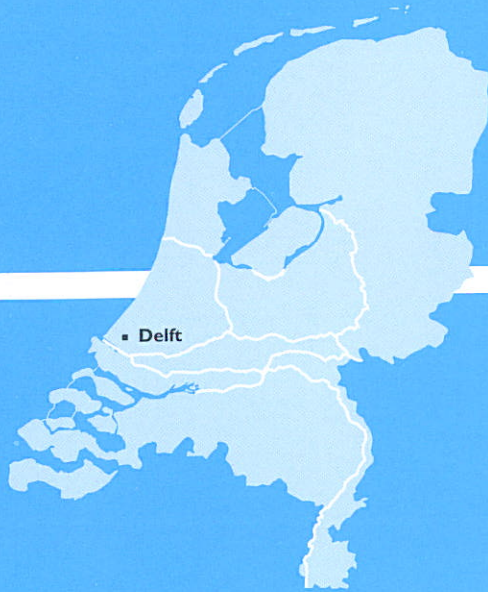
Figuur 3.11 Gemiddelde stroomsnelheden en turbulentie op 5 cm boven de bodem



Figuur 3.12 Maximale stroomsnelheden op 5 cm boven de bodem



Figuur 3.13 Gedrag maximale stroomsnelheid bij numerieke spoor $\alpha = 3$



WL | Delft Hydraulics

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

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

