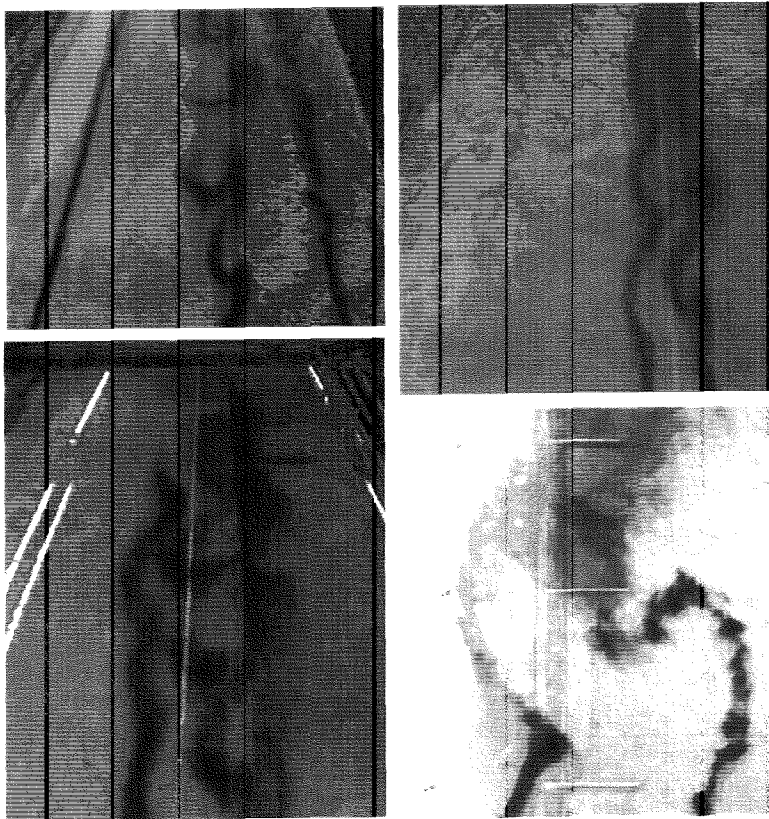


Uitwisselingsprocessen tussen hoofdgeul en uiterwaard van een rivier

een experimentele studie



Mathijs Bos
mei 2000



TU Delft

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde



Voorwoord

Na eerst als student-assistent half mei 1999 begonnen te zijn met metingen in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica gedurende twee dagen per week, ben ik vanaf half augustus begonnen met mijn afstudeerwerk. Tot half december ben ik bezig geweest met het uitvoeren van proeven. Aan het eind van de reeks proeven mocht ik samen met Fred Havinga als klap op de vuurpijl de kroonprins ontvangen en assisteren bij het 'spelen met water'. Tijdens het doen van de proeven, het analyseren van de meetgegevens en het rapporteren, heb ik veel kennis opgedaan wat betreft de uitwisseling door grootschalige horizontale wervels. Daarnaast heb ik geleerd om een grote hoeveelheid meetgegevens te ordenen.

Hierbij bedank ik mijn afstudeercommissie (de heren de Vriend, Booij en Havinga) voor het in goed banen leiden van mijn afstudeerproject. Daarnaast ben ik Wim Uijtewaaldankbaar voor zijn adviezen en Bram van Prooijen, van wie ik een aantal Matlab-programma's kon overnemen. Tenslotte wil ik ook het technisch personeel van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica bedanken voor de hulp bij het bouwen van de experimentele opstellingen en het verhelpen van technische problemen.

Tenslotte wens ik u veel leesplezier toe.

Mathijs Bos

Uitwisselingsprocessen tussen hoofdgeul en uiterwaard van een rivier

een experimentele studie

Dit afstudeerproject heeft als afstudeercommissie:

prof. dr. ir. H.J. de Vriend
drs. R. Booij
ir. F.J. Havinga

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Subfaculteit Civiele Techniek
Sectie Waterbouwkunde

Mathijs Bos
105066

Delft, mei 2000

Inhoudsopgave

Voorwoord	
Hoofdstuk 1 Inleiding	5
Hoofdstuk 2 Probleemanalyse	9
2.1 Inleiding	9
2.2 Probleembeschrijving	9
2.2.1 <i>Ontwikkeling van de Nederlandse rivieren</i>	9
2.2.2 <i>Problemen in het rivierbeheer</i>	10
2.2.3 <i>Onderzoek naar waterbeweging en morfologie</i>	12
2.2.4 <i>Simulatie in computermodellen</i>	17
2.2.5 <i>Vervolgonderzoek</i>	17
2.3 Ontstaan van grootschalige horizontale wervels	18
2.3.1 <i>Definitie van de menglaag</i>	18
2.3.2 <i>Aandrijvende kracht</i>	19
2.3.3 <i>Bodemwrijving</i>	20
2.3.4 <i>Ontwikkeling van de menglaag</i>	21
2.3.5 <i>Uitwisseling van impuls tussen hoofdgeul en uiterwaard</i>	22
2.3.6 <i>Overige invloeden</i>	22
2.4 Doel van het project	23
Hoofdstuk 3 Modelopstelling en meetapparatuur	25
3.1 Inleiding	25
3.2 Experimentele opstelling	25
3.2.1 <i>Het fysisch model</i>	25
3.2.2 <i>Wijzigingen in het model</i>	26
3.2.3 <i>Modelopstellingen en -instellingen</i>	28
3.3 Meetapparatuur	32
Hoofdstuk 4 Meet- en analyseprogramma	37
4.1 Inleiding	37
4.2 Meetprogramma en bewerkingen	37
4.2.1 <i>LDA en EMS</i>	37
4.2.2 <i>PTV-techniek</i>	40
4.2.3 <i>Golfhoogtemeter</i>	41
4.3 Ontwikkeling van de menglaag	42
4.4 Grootschalige horizontale wervels	42
4.4.1 <i>Periodiciteit en regelmatigheid</i>	43
4.4.2 <i>Intensiteit</i>	44
4.4.3 <i>Afmetingen en samenhang</i>	45
4.4.4 <i>Ligging ten opzichte van de overgang</i>	45
4.4.5 <i>Waterstandsfluctuaties</i>	46
4.4.6 <i>Uitwisseling en mogelijke sedimentatie in uiterwaard</i>	46
Hoofdstuk 5 Resultaten en interpretatie fase 1	47
5.1 Inleiding	47
5.2 Ontwikkeling van de menglaag	47
5.2.1 <i>Opstelling 1: rechte stroming</i>	47
5.2.2 <i>Opstellingen 2 en 3: schuine aanstromingen</i>	54
5.2.3 <i>Vergelijking opstellingen 1, 2 en 3</i>	56

5.3	Grootschalige horizontale wervels	58
5.3.1	<i>Periodiciteit en regelmatigheid</i>	58
5.3.2	<i>Intensiteit</i>	60
5.3.3	<i>Afmetingen en samenhang</i>	64
5.3.4	<i>Ligging ten opzichte van de overgang</i>	66
5.3.5	<i>Waterstandsfluctuaties</i>	67
5.3.6	<i>Uitwisseling en mogelijke sedimentatie in uiterwaard</i>	67
Hoofdstuk 6	Resultaten en interpretatie fase 2	73
6.1	Inleiding	73
6.2	Ontwikkeling van de menglaag	73
6.3	Grootschalige horizontale wervels	76
6.3.1	<i>Periodiciteit en regelmatigheid</i>	76
6.3.2	<i>Intensiteit</i>	77
6.3.3	<i>Afmetingen en samenhang</i>	78
6.3.4	<i>Ligging ten opzichte van de overgang</i>	79
6.3.5	<i>Uitwisseling en mogelijke sedimentatie in uiterwaard</i>	79
Hoofdstuk 7	Resultaten en interpretatie fase 3	81
7.1	Inleiding	81
7.2	Tijdsgemiddeld horizontaal snelheidsveld	81
7.3	Grootschalige horizontale wervels	85
6.3.1	<i>Inleiding</i>	85
6.3.2	<i>Periodiciteit</i>	85
6.3.3	<i>Intensiteit</i>	88
6.3.4	<i>Afmetingen en samenhang</i>	90
6.3.5	<i>Ligging ten opzichte van de overgang op $y = 0$</i>	92
6.3.5	<i>Uitwisseling en mogelijke sedimentatie in uiterwaard</i>	94
Hoofdstuk 8	Gedrag van individuele grootschalige wervels	95
8.1	Inleiding	95
8.2	Groei en afname	95
8.3	Asymmetrie	96
8.4	Paargedrag	96
8.5	Afmetingen	98
Hoofdstuk 9	Conclusies en aanbevelingen	101
9.1	Inleiding	101
9.2	Conclusies	101
9.3	Aanbevelingen t.b.v. vervolgonderzoek	104

Literatuur en referenties

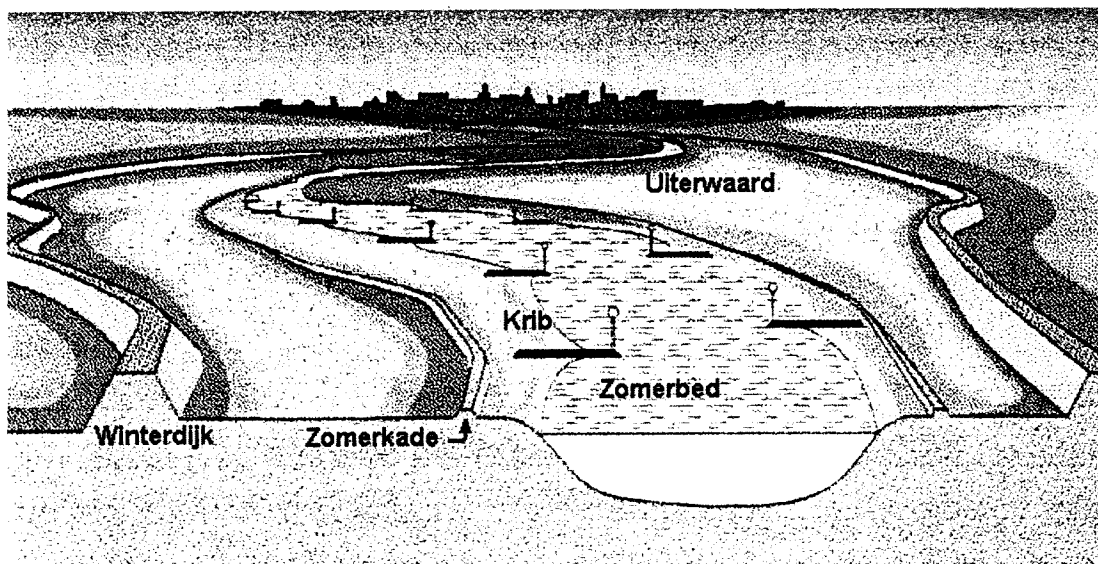
Bijlage 1	Overzicht van metingen
Bijlage 2	Vectorvelden opstellingen 1 t/m 5
Bijlage 3	Vectorvelden opstelling 6
Bijlage 4	Inhoud cdrom's met video-opnames
Bijlage 5	Energieaandeel van de grootschalige wervels
Bijlage 6	Piekenergiedichtheid

Hoofdstuk 1 Inleiding

De Rijnakken, bestaande uit Waal, Bovenrijn, Nederrijn, IJssel en Maas, worden gerekend tot de grote rivieren in Nederland. De afgelopen jaren hebben deze rivieren in de belangstelling gestaan vanwege onder andere een dreiging van een dijkdoorbraak bij het plaatsje Ochten en daadwerkelijke inundaties in Limburg. Om zulke kritieke hoogwatersituaties in rivieren zo goed als mogelijk te vermijden denkt men allereerst aan het verhogen en verzwaren van de rivierdijken. Maar daarnaast zijn er nog andere mogelijkheden zoals het verlagen van de weerstand van de rivier, zodat het water sneller afgevoerd kan worden, en het verbreden van het rivierbed, met initieel lagere waterstanden als gevolg. In het kader van 'Ruimte voor de Rivier' worden diverse maatregelen voorgesteld om de veiligheid van de burger te kunnen waarborgen. Daarbij wordt naast het aspect van de veiligheid bovendien rekening gehouden met scheepvaart, landbouw, milieu, cultuur en recreatie. De geometrie van de rivier speelt hierbij een belangrijke rol.

Sedimentatie door uitwisselingsprocessen

Het dwarsprofiel van een rivier bestaat uit een diep zomer- en een ondiep winterbed. Bij laagwater vindt de rivierafvoer alleen in de hoofdgeul - het zomerbed - plaats terwijl bij hoogwater ook de uiterwaarden - ook wel het winterbed genoemd - water afvoeren (figuur 1.1). Ten behoeve van de scheepvaart is de hoofdgeul gedurende eeuwen steeds verder uitgediept. Kribben zijn aangelegd om de stroming bij laagwater te fixeren in het midden van de geul zodat de waterdiepte voldoende groot is voor de scheepvaart. Zomerkades zorgen ervoor dat de uiterwaarden lange tijd droog blijven ten behoeve de landbouw. De zomerkades kunnen echter niet beletten dat bij een voldoende hoge waterstand water vanuit de hoofdgeul de uiterwaard instroomt. Hierdoor wordt sediment, dat de hoofdgeul met het water afvoert, naar de uiterwaard getransporteerd. Ook als de uiterwaarden gevuld zijn en het waterniveau in hoofdgeul en uiterwaard gelijk is vindt uitwisseling van sediment plaats. Dit gebeurt

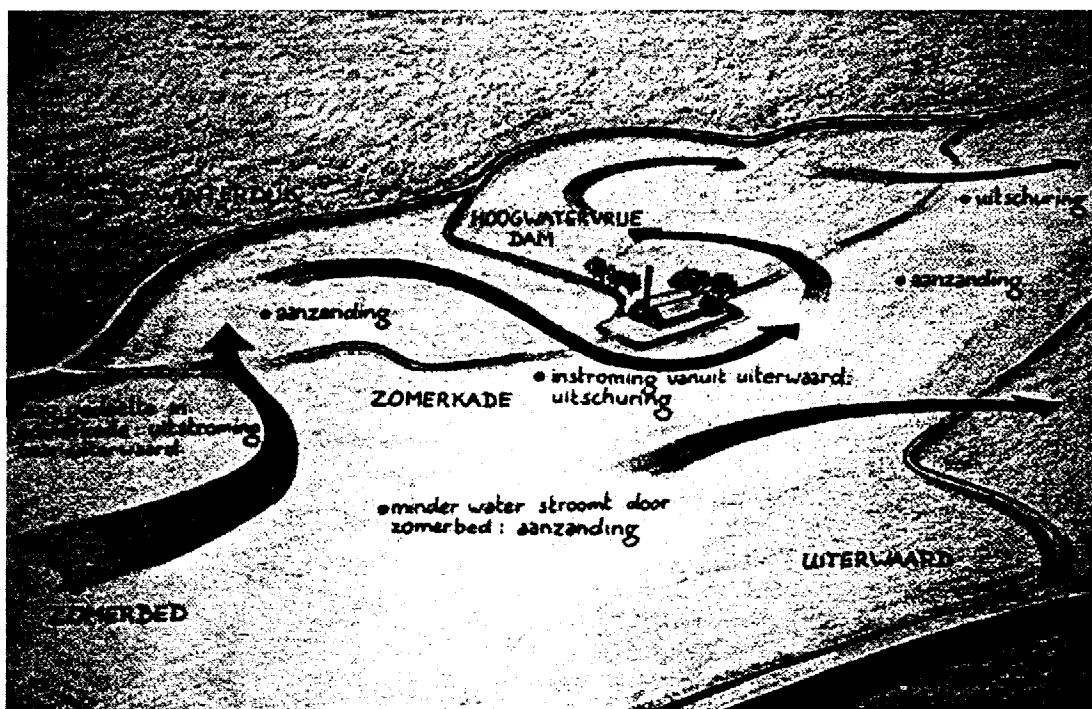


Figuur 1.1: Huidig (schematisch) riviersysteem bij laag water (bron: IVR [22]).

bijvoorbeeld in rivierbochten en op andere plaatsen waar de hoofdstroming doorschiet naar de uiterwaard. In de uiterwaard bezinken gesuspendeerde stoffen hetgeen leidt tot zandafzettingen. Voor en na afloop van een hoogwater vindt kartering plaats van de locatie van de afzettingen om zo het aantal kubieke meters zand van de afzetting te bepalen. Van deze afzettingen kunnen verschillende mogelijke uitwisselingsprocessen als oorzaak worden aangewezen. Figuur 1.2 geeft een schets van een uitwisselingsproces.

Uitwisseling door grootschalige horizontale wervels

In dit afstudeerproject wordt experimenteel onderzoek gedaan naar één van de mogelijke uitwisselingsprocessen die tot sedimentatie in de uiterwaard kunnen leiden, namelijk uitwisseling als gevolg van grootschalige horizontale wervels. Hoewel men deze wervels nog niet in de Nederlandse rivieren heeft waargenomen, is met eerder experimenteel onderzoek door Van Prooijen [19] al aangetoond dat deze wervels in het overgangsgebied tussen hoofdgeul en uiterwaard voorkomen. Van Prooijen heeft de experimenten uitgevoerd in een fysisch model dat een eenvoudige schematisatie is van een rivier bestaande uit hoofdgeul en uiterwaard. De aandrijvende kracht waardoor de wervels worden opgewekt blijkt het snelheidsverschil tussen hoofdgeul en uiterwaard te zijn. Doordat de hoofdgeul dieper is dan de uiterwaard, is de snelheid hierin hoger. De complexe geometrie van een rivier kan een behoorlijke invloed op de wervels hebben. We kunnen daarbij denken aan versmallingen in zomer- en winterbed, rivierbochten, zomerkades, kribben en allerlei obstakels in de uiterwaard zoals hoogwatervrije terreinen, spoordammen, steenfabrieken en ooibossen. In het onderzoek van Van Prooijen zijn deze aspecten nauwelijks meegenomen. Slechts de invloed van schuine aanstromingen, richting uiterwaard en hoofdgeul, is onderzocht. Om enig inzicht te krijgen in de invloed van een complexe geometrie op het uitwisselingsproces wordt in dit afstudeerproject de invloed van geometrische veranderingen onderzocht, zoals lagere

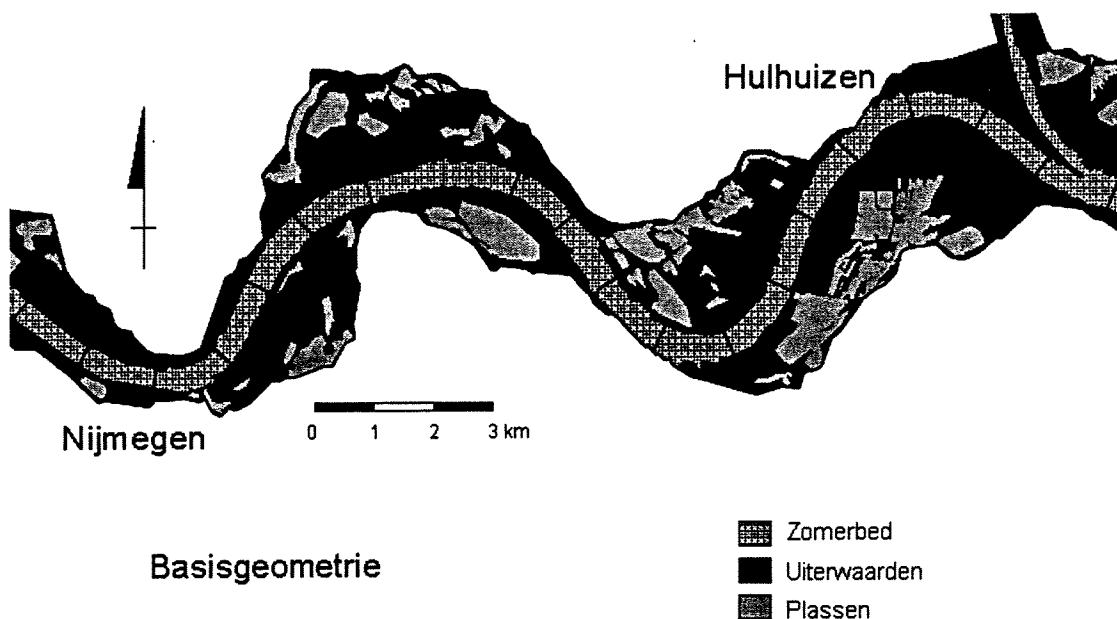


Figuur 1.2: Uitwisselingsprocessen tussen hoofdgeul en uiterwaard en gevolgen voor de morfologie (bron: IVR [22]).

waterstanden, zomerkades en kribben. De experimenten vinden plaats in het genoemde fysische model.

Uitontwikkelde stroming

Het experimentele onderzoek van de grootschalige horizontale wervels gaat uit van een uitontwikkelde stroming. Van een uitontwikkelde stroming is sprake als groei en afbraak van de wervels in evenwicht zijn. Immers, alleen voor een uitontwikkelde stroming is een onderlinge vergelijking van de verschillende experimenten goed mogelijk. In de natuur is de stroming in de rivier echter nooit uitontwikkeld als gevolg van de complexe geometrie (figuur 1.3). Toch kan op bepaalde trajecten wel een min of meer uitontwikkelde stroming ontstaan. De ontwikkelingslengte voor de experimenten - orde van 20 à 30 meter, afhankelijk van de richting van de stroming - komt overeen met enkele kilometers in de natuur. Figuur 1.3 geeft een gedeelte van de rivier de Waal weer waarin de geometrie in langsrichting als gevolg van de rivierbochten nogal varieert. Een uitontwikkelde stroming wordt op dit traject waarschijnlijk niet bereikt. Op andere, minder bochtige, trajecten kan dit wel het geval zijn. Binnen deze trajecten treden in langsrichting nog wel variaties op - het wel of niet aanwezig zijn van kribben, zomerkades, hoogwatervrije terreinen, oobossen etc. - die invloed hebben op de ontwikkeling van de wervels. In de praktijk moet per situatie onderzocht worden of hun invloed op de wervels verwaarloosd kan worden.



Figuur 1.3: Geometrie van de Waal(bron: IVR [22]).

Leeswijzer

Dit rapport bevat negen hoofdstukken en zes bijlagen. In hoofdstuk 2 worden in de praktijk van de nederlandse rivieren voorkomende problemen aan de orde gesteld. Enkele resultaten van onderzoek naar de uitwisseling tussen hoofdgeul en uiterwaard - in het bijzonder de uitwisseling door grootschalige horizontale wervels - passeren de revue. Theoretische achtergronden van het ontstaan en de eigenschappen van grootschalige wervels komen aan de orde. Tenslotte wordt het doel van het project geformuleerd. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de diverse experimentele opstellingen en de gebruikte meetapparatuur. Hoofdstuk 4 beschrijft *wat* er gemeten wordt en op welke wijze de meetgegevens verwerkt worden. Vervolgens komen analysemethoden waarmee inzicht wordt verkregen in de ontwikkeling van de stroming en de wervels aan de orde. In hoofdstuk 5 en 6 worden de resultaten voor de experimenten zonder zomerkades respectievelijk de experimenten met zomerkades gepresenteerd en geïnterpreteerd. In hoofdstuk 7 komt het experiment met overstroomde kribben aan de orde. Hoofdstuk 8 gaat in op het gedrag van individuele grootschalige wervels. Hoofdstuk 9, tenslotte, bevat een aantal conclusies en aanbevelingen.

Hoofdstuk 2 Probleemanalyse

2.1 Inleiding

In de inleiding werd gesproken over mogelijke uitwisselingsprocessen tussen hoofdgeul en uiterwaard van een rivier. Dit hoofdstuk gaat hier dieper op in waarbij het accent op de uitwisseling door grootschalige horizontale wervels wordt gelegd - die zijn immers het onderwerp van het onderzoek. De inhoud van het hoofdstuk is als volgt:

Paragraaf 2.2 gaat in op de problemen die de aanleiding vormen tot het onderzoek naar de uitwisselingsprocessen tussen hoofdgeul en uiterwaard. De praktijksituatie van de Nederlandse rivieren, de onbekendheid met het uitwisselingsproces en de problemen in het modelleren van complexe stroming komen aan de orde. Paragraaf 2.3 beschrijft het ontstaan en de ontwikkeling van grootschalige horizontale wervels. In paragraaf 2.4 wordt tenslotte het doel van het project geformuleerd.

2.2 Probleembeschrijving

2.2.1 Ontwikkeling van de Nederlandse rivieren¹

Eeuwen geleden bestonden er nog geen dijken, die tegenwoordig zo dominant aanwezig zijn in het Nederlandse rivierengebied. De rivieren hadden een veel bredere bedding dan tegenwoordig en overstroonden regelmatig het land. Omdat de middeleeuwse boerenbevolking inzag dat een land dat niet overstroomde voor hen aantrekkelijker was dan een land dat steeds weer blank stond, legde ze dijken om haar landerijen aan. Deze 'hoge gronden' werden vervolgens door dijken met elkaar verbonden. Het zo ontstane grillige dijkenpatroon is tegenwoordig nog bepalend voor het rivierenlandschap. De rivieren bleven voortaan binnen hun grenzen - op de talloze dijkdoorbraken na - zodat het (bouw)land in tijden van hoogwater niet overstroomde.

Een nadeel echter van deze bedijking was dat het binnendijkse land ging inklinken. De overstromingen brachten juist het voordeel met zich mee dat sediment werd afgezet op het overstroomde land. Het water kwam daar namelijk tot rust wat bezinking van gesuspendeerde stoffen in het water bevorderde. Met de afzetting van sediment werd de bodemdaling gecompenseerd. Door de bedijking daalde het binnendijkse land en de dijk zelf zodat door de jaren heen de dijken steeds weer verhoogd en in de breedte versterkt - vanwege het toenemende verval tussen hoogwaterpeil en grondwaterpeil binnendijks - moesten worden. De rivieren hebben later verder vorm gekregen door:

- verdieping van de hoofdgeul,
- de aanleg van kribben
- en zomerkades

Omdat de scheepvaart belang had bij een diepe vaargeul moest de hoofdgeul van de rivier uitgediept worden en op peil worden gehouden. Tegenwoordig worden regelmatig

¹ Bron: Ministerie van V&W, Integrale Verkenning inrichting Rijntakken (IVR) [22]

bodempeilingen (JDP = jaarlijkse dwarspeiling) gedaan. Hieruit blijkt dat op enkele plaatsen ondieptes ontstaan die veelal het gevolg zijn van aanzandingen tijdens hoogwater omdat dan veel sediment door de rivier wordt afgevoerd. Op slingerende trajecten treden ze vooral in de binnenbochten op terwijl op rechte stukken rivier de aanzandingen over de hele breedte kunnen voorkomen.

De kribben houden het zomerbed op zijn plaats en houden tevens de diepte op peil doordat ze de stroming fixeren tussen de uiteinden van de kribben.

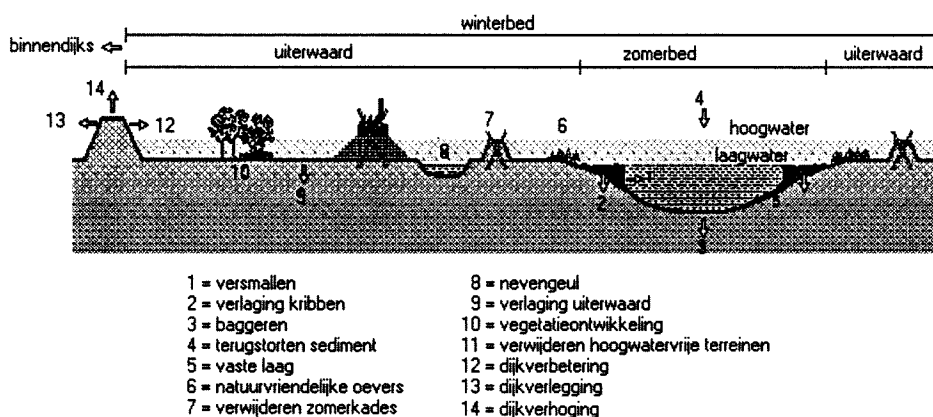
De zomerkades hebben een stroomgeleidende functie die van belang is voor de bodemontwikkeling van het zomerbed. Bij lage afvoeren zorgen ze ervoor dat in de hoofdgeul voldoende waterdiepte overblijft voor de scheepvaart. Bij hogere afvoeren stijgen de waterstanden tot uiteindelijk het water over de zomerkades stroomt, de uiterwaarden in. Deze dienen tijdens het stijgen van de waterstand vooral als berging. Als het waterniveau in de uiterwaard gestegen is tot het niveau in de hoofdgeul, gaat ook de uiterwaard water afvoeren. Primair zijn de zomerkades aangelegd ten behoeve van de landbouw. Ze verhinderen namelijk een regelmatig overstromen van de uiterwaarden, waarop landbouw bedreven wordt. Deze functie is vergelijkbaar met die van de bandijken (winterdijken) ter bescherming van het binnendijkse gebied.

Veel kunstmatig ingrijpen van de mens - het aanleggen van kribben, zomerkades en bandijken - heeft de natuurlijke rivier doen verdwijnen. Immers, van nature bestaat het zomerbed van de rivier voor een groot deel uit ondiep water met eilanden en zand- en grindbanken, waar vis en macrofaunasoorten verblijven. Het zomerbed voert slib, nutriënten, zaden en eieren af en aan. De uiterwaarden zijn hoofdzakelijk begroeid met oobos en ruigte. Alleen in de Grensmaas, waarin geen vaargeul wordt onderhouden, komen deze elementen tegenwoordig nog voor, c.q. gaat men ze weer aanleggen.

2.2.2 Problemen in het rivierbeheer

Vandaag de dag zijn er een aantal problemen waardoor een goed functioneren van de rivier op het gebied van veiligheid, scheepvaart, recreatie, landbouw en natuur in het geding is.

Allereerst is het verdwijnen van de natuurlijke rivier te noemen. Een ander voorbeeld is de bodemdaling van de hoofdgeul. Deze bodemdaling hindert het functioneren van de infrastructuur van de rivier, bestaande uit sluizen, stuwen en, kribben, en belemmert daardoor



Figuur 2.1: Ingrepen in de rivier (bron: IVR [22]).

het scheepvaartverkeer. Doordat het waterniveau in de rivier met de bodem mee daalt, zakken de grondwaterstanden in het omliggende gebied wat nadelig is voor de landbouw en de natuur. Vooral bij een kleine afvoer staat het water laag in de diepe geul wat verdroging van het omliggende gebied in de hand werkt. Een ander probleem zijn de hoge waterstanden die de veiligheid tegen overstromingen in het geding brengen. De dijken zullen hoog genoeg moeten zijn om de veiligheid te garanderen. Grote waterstandsverschillen zorgen er tevens voor dat de kans op kwel en piping groter wordt en daardoor tevens de kans op bezwijken van de dijk. Om iets aan de problemen van hoogwater te doen zijn in het kader van 'Ruimte voor de rivier' (RVR) diverse maatregelen voorgesteld. 'Integrale verkenning inrichting Rijntakken' (IVR [22]) geeft een overzicht van deze maatregelen. Deze zijn op te delen in twee categorieën:

1. waterstandsverlagende maatregelen
2. maatregelen die de veiligheid waarborgen zonder dat de waterstand wordt verlaagd

Voor elk onderdeel van de rivier (zomerbed, uiterwaard en binnendijks gebied) staan de maatregelen van categorie 1 opgesomd in tabel 2.1. Het verhogen van de dijken is een maatregel van categorie 2. Figuur 2.1 geeft het dwarsprofiel van de rivier met daarin de voorgestelde maatregelen weer. Enkele opmerkingen bij de maatregelen:

- Als gevolg van de bodemdaling van de rivier de Waal liggen de kribben tegenwoordig hoger dan voor het op diepte houden van het zomerbed noodzakelijk is waardoor ze voor extra weerstand zorgen. Deze belemmeren bij hoogwaters een snelle afvoer in de uiterwaard en werken daardoor waterstandsverhogend. *Kribverlaging* is dus gewenst.
- De *uiterwaardverlaging* compenseert de verhoging van de uiterwaard die tot stand gekomen is door jaren van opslibbing. Opslibbing is ook nadelig voor de natuur omdat per jaar de periode waarin de uiterwaard onder water staat, kleiner zal zijn, wat niet bevorderlijk is voor de ecologie van de rivier.
- Het *verwijderen van zomerkaden in combinatie met uiterwaardverlaging* heeft sneller opslibben en aanzanden van de uiterwaard tot gevolg zodat de uiterwaardverlaging op termijn weer teniet wordt gedaan.

Locatie	Maatregel
zomerbed	kribverlaging
	verdieping van de geul
	wijziging afvoerverdeling op splitsingspunten
winterbed	verwijderen van locale hydraulische knelpunten (aarden banen voor (spoor)bruggen etc..)
	verwijderen van hoogwatervrije terreinen (steenfabrieken etc..)
	verwijderen van zomerkaden en dijkweggetjes
	vervangen van de huidige vegetatie
	aanleg van nevengeulen
	uiterwaardverlaging
binnendijks gebied	waterafleiding
	waterberging
	uiterwaardverbreding door bandijk te verleggen

Tabel 2.1: Overzicht van de waterstandsverlagende maatregelen

2.2.3 Onderzoek naar waterbeweging en morfologie

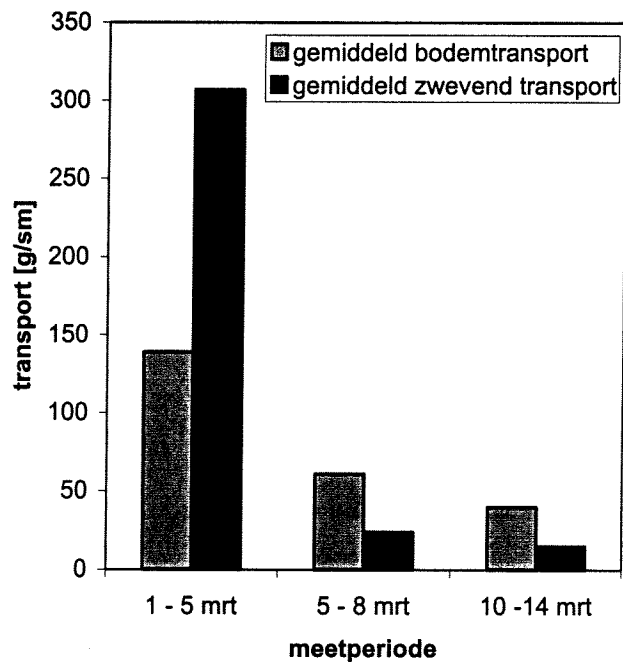
Onderzoek naar de waterbeweging in rivieren is nodig om te kunnen voorspellen wat de effecten van eventuele maatregelen op de morfologie van de rivieren zijn. Om deze effecten in kaart te kunnen brengen moet de waterbeweging onderzocht worden in:

- de bestaande geometrie (met zomerkades, kribben, etc..) en in
- toekomstige situaties na het uitvoeren van de maatregelen (bijv. zonder zomerkades, met verlaagde kribben, minder ruwe uiterwaard)

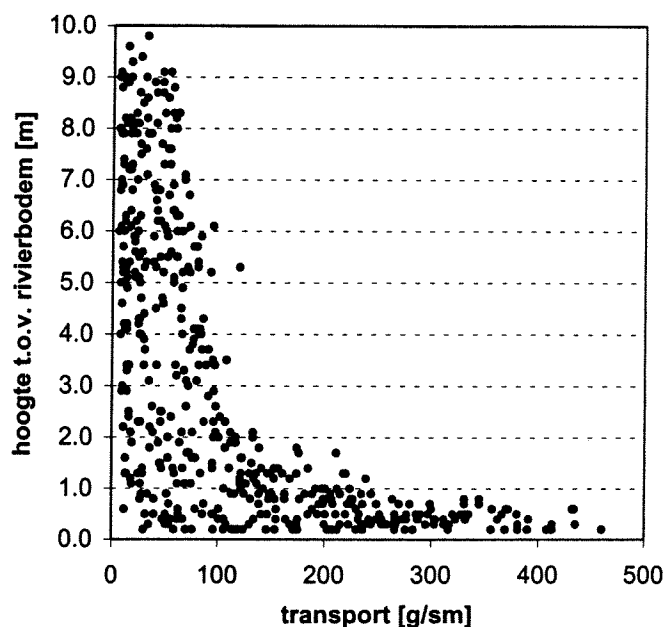
Zandafzettingen in de uiterwaard

In het transport van de sediment in een rivier moet onderscheid gemaakt worden tussen bodem- en zwevend transport. Het bodemtransport betreft transport van rollende, glijdende en springende korrels langs de bodem. Bij hogere watersnelheden gaan steeds meer korrels op de bodem bewegen. Zwevend transport betreft korrels die grote afstanden afleggen in de waterkolom zonder contact met de bodem te hebben. Voor een deel kan het zwevend transport uit spoeltransport, dat korrels bevat die niet van de plaatselijke rivierbodem afkomstig zijn, bestaan.

Tijdens hoogwater is het zwevend transport groot (figuur 2.2). De verhouding tussen bodem- en zwevend transport is dan ongeveer 1:2. Na de hoogwaterpiek neemt het zwevend transport af. Tijdens laagwater speelt alleen bodemtransport nog een rol. De scheiding van hoofdgeul en uiterwaard door zomerkaden en kribben zorgt ervoor dat het zandtransport bij lage tot middelmatige afvoeren



Figuur 2.2: Statistieken van gemeten transport in de Waal km 868.5 1-14 maart 1997. Piek van hoogwater op 2 maart met debiet van 4600 m³/s (1500 m³/s op 14 maart). Bron: Kleinhans, 1997 [13].



Figuur 2.3: Gemeten transport op verschillende posities in dwarsrichting in de Waal bij de Pannerdensche Kop tijdens hoogwater in 1998 (31 okt - 11 nov.) bij waterdieptes van minimaal 10 m. Bron: Kleinhans, 1998/99 [14].



*Figuur 2.4: Zandafzetting in Millingerwaard, Waal
(bron: IVR [22]).*

uitsluitend in de hoofdgeul werkzaam is. Tijdens extreme hoogwaters kan de rivierbodem lokaal eroderen of aanzanden, bijvoorbeeld bij discontinuïteiten in de breedte van het totale rivierbed. Verbredingen en vernauwingen in de waterstroom resulteren in vertragingen respectievelijk versnellingen van de afvoer. Sedimentatie en erosie treden daarbij op. Bij hoge afvoeren kan het sedimentvoerende water over lokaal lager gelegen zomerkaden stromen en het sediment afzetten op de uiterwaard. Grote hoeveelheden zand kunnen dan op de oevers van de uiterwaarden worden afgezet. Er is daarbij alleen sprake van zwevend transport. De bodem van de laagwatergeul ligt een aantal meters (gemiddeld ongeveer 7 m.) hoger dan de hoofdgeul zodat uitwisseling via bodemtransport niet mogelijk is. Een zomerkade zou daarbij nog een extra belemmering zijn.

Uit veld- en luchtfoto-onderzoek door *RIZA* [23] blijkt dat op de oevers van de Rijntakken en de Maas tijdens de hoogwaters van 1993/1994 en 1995 inderdaad zand is afgezet. De totale sedimentatie in de Rijntakken was maximaal in 1995 en wordt geschat op 310.000 m³.

Waarschijnlijk wordt het totale volume onderschat vanwege ontbrekende zoden onder de zandafzettingen die als referentiepunt zouden moeten dienen. De afzettingen zijn enkele honderden meters groot in lengte en enkele tientallen meters in de breedte. *Tussen de rivieren onderling* zijn een aantal verschillen te constateren in de hoeveelheid en de plaats van het sediment:

- In de Waal is de sedimentatie groter dan in de andere rivieren
- De grootte van de gemiddelde korreldiameter van de afzettingen verschilt per rivier.

Ook over de lengte van een rivier en in het dwarsprofiel zijn verschillen te zien:

- In de binnenbochten van de rivier is de sedimentatie (in kubieke meters) minimaal twee maal zo groot als in de buitenbochten.
- In de Waal is tevens de gemiddelde korreldiameter op de linkeroever kleiner dan op de rechteroever.

RIZA [23] stelt dat de sedimentatie door twee hoofdmechanismen wordt veroorzaakt:

1. pointbarvorming (afzetting in de binnenbocht als gevolg van bochtstroming)
2. sedimentatie als gevolg van de stroming van zomerbed naar winterbed

Bij bochtstroming ontstaan zandbanken in de binnenbocht, zogenaamde pointbars, en treedt erosie in de buitenbocht op. De onderliggende verschillen tussen rivieren en riviertrajecten kunnen verklaard worden uit de variatie in sinuositeit (meandergedrag) en de daarmee samenhangende spiraalstroming die tot pointbarvorming kunnen leiden. Een hoge sinuositeit draagt bij aan de oeversedimentatie, die echter ook sterk afhankelijk is van de interactieparameter λ_s/λ_w die sterk bepaald wordt door de breedte-diepte verhouding B/h . Deze parameter bepaalt de invloed van de spiraalstroming². De aanpassingslengte λ_s is een lengtemaat waarover een verstoring zoals een spiraalstroming in stroomafwaartse richting doorwerkt op het sedimentatiepatroon. De aanpassingslengte λ_w is een lengtemaat voor de waterbeweging. Bij λ_s/λ_w tussen 0.2 en 5 oscilleert het evenwichtsprofiel van de rivierbodem: erosie en sedimentatie aan beide zijden van de rivier wisselen elkaar over de lengte in benedenstroomse richting af. Voor de Waal geldt afhankelijk van het traject een waarde variërend van 0,42 tot 0,66 (*RIZA* [23]) terwijl voor de andere rivieren de hoogste waarde 0,17 bedraagt. In de Waal is dus een minder gedempt systeem (λ_s/λ_w is groter) werkzaam dan in de IJssel. Dit verschil zorgt ervoor dat het effect van spiraalstroming groter is in de Waal dan bijvoorbeeld in de IJssel terwijl de rivieren allebei een even hoge sinuositeit hebben.

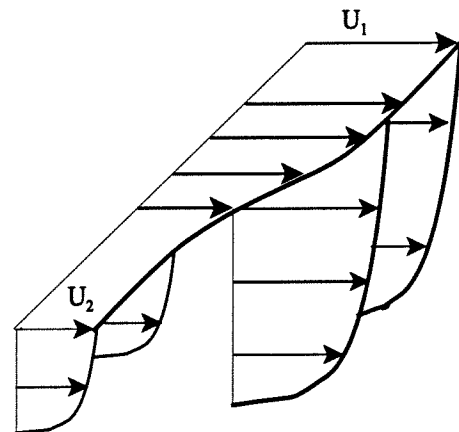
Grootschalige horizontale wervels

Naast de door *RIZA* genoemde twee hoofdmechanismen kan ook de uitwisseling van impuls en stoffen door grootschalige horizontale wervels (zie o.a. *Van Prooijen* [19]) een bijdrage leveren aan sedimentatie in de uiterwaard. Hiervoor is al geconstateerd dat het sedimenttransport tijdens hoogwater voor het grootste gedeelte uit zwevend transport bestaat. Grootschalige wervels, die zich voornamelijk voordoen in het bovenste deel van de waterkolom, kunnen zodoende een grote bijdrage leveren aan het transport van zwevend bodemmateriaal.

Luchtfoto's van rivieren in Japan laten grootschalige wervels in de waterbeweging zien die zich voordoen in het overgangsgebied tussen hoofdgeul en 'floodplain'. Met behulp van fysische modellen, waarin onder geconditioneerde omstandigheden bepaalde aspecten van stroming onderzocht kunnen worden, is naar dit mechanisme onderzoek gedaan. Uit de onderzoeken (door o.a. *Van Prooijen* [19], *Sellin* [21], *Ikeda&Sano* [12]) blijkt dat grootschalige horizontale wervels inderdaad optreden in het overgangsgebied tussen hoofdgeul en uiterwaard. Naar de eigenschappen van deze wervels die ook wel grootschalige

² Bron: River dynamics [26].

horizontale structuren worden genoemd, is onder verschillende omstandigheden onderzoek verricht. Een aantal experimentele studies gaat bij het onderzoeken van dit mechanisme uit van een *samengesteld kanaal* (o.a. Van Prooijen [19], Sellin [21], Ikeda&Sano [12]) bestaande uit een kanaal met een hoge snelheid en een wat ondieper kanaal met een lage snelheid. Er zijn ook onderzoeken gedaan naar menglaagstroming in een *enkelvoudig kanaal* (o.a. Uittenwaal&Booij [24]) waarin de waterdiepte voor de langzame en snelle stroming even groot is. Bij het onderzoeken van de grootschalige wervels voor een rivier met uiterwaard wordt ligt de keuze voor een samengesteld kanaal voor de hand.



Figuur 2.5: Snelheidsprofiel voor ondiepe menglaagstroming waarin duidelijk de invloed van de bodemwrijving op de snelheid zichtbaar is

Een recent onderzoek in zo'n fysisch model wordt beschreven in Van Prooijen [19]. Dat onderzoek staat in het kader van een grootschalig onderzoek naar grootschalige horizontale wervels en kan gezien worden als start voor verder onderzoek. Het fysisch model dat hij heeft gebruikt, onderscheidt zich in afmetingen van de meeste andere modellen. Van Prooijen [19] stelt dat in de meeste experimentele opstellingen de breedte/diepte verhouding van de hoofdgeul veel geringer is dan deze in werkelijkheid in de rivieren is. De verhoudingen variëren tussen ca. 2:1 en 8:1 terwijl bijvoorbeeld in de Waal deze verhouding 50:1 is. De breedte/diepte verhouding van een menglaag³ in de Nederlandse rivieren is ongeveer 5:1 zodat de wervels in de menglaag aan beide zijden van de hoofdgeul elkaar niet kunnen beïnvloeden. In de meeste experimentele opstellingen is vanwege de te smalle geul wel sprake van wederzijdse beïnvloeding. Van Prooijen heeft daarom in zijn onderzoek gebruik gemaakt van een samengesteld kanaal bestaande uit een hoofdgeul met een voldoende grote breedte/diepte verhouding van ruim 20:1. Omdat in de Nederlandse rivieren de mechanismen elkaar niet beïnvloeden is slechts aan één zijde een brede uiterwaard gerealiseerd. Een verticale stap in het bodemprofiel vormt de overgang tussen uiterwaard en hoofdgeul.

Uit het onderzoek blijkt dat ten gevolge van een snelheidsverschil tussen de stroming in de hoofdgeul (u_1) en die in de uiterwaard (u_2) zich in het overgangsgebied tussen de twee parallelle stromingen een *vrije menglaagstroming* ontwikkelt (figuur 2.5). In de menglaag vindt uitwisseling van impuls en massa tussen diep en ondiep kanaal plaats. De ontwikkeling van de menglaag wordt afgelezen uit de ontwikkeling van de breedte van de menglaag. De bodemwrijving heeft een remmende werking op de groei van de menglaagbreedte waardoor de menglaag na een zekere lengte stroomafwaarts is uitontwikkeld. De invloed van de bodemwrijving wordt duidelijk in de verschillende *experimentele opstellingen*: een rechte stroming (1), een stroming met een transversale component richting de uiterwaard (2) en een

³ De menglaag is het overgangsgebied tussen hoge en lage snelheid. De grootschalige wervels treden in dit gebied op.

stroming met een transversale component richting de hoofdgeul (3). In opstelling 2 verschuift de menglaag richting uiterwaard terwijl in opstelling 3 een verschuiving naar de hoofdgeul optreedt. Met behulp van diverse meetmethoden en visualisatietechnieken laat Van Prooijen zien dat voor alle drie opstellingen grootschalige horizontale wervels in de menglaag aanwezig zijn. Hierbij dient nog opgemerkt te worden dat in het model geen sediment aanwezig is. Het model heeft een 'fixed bottom' waarin slechts de waterbeweging onderzocht kan worden. Van de morfologische effecten kan slechts een schatting worden gemaakt.

Ander recent onderzoek naar stroming in een samengesteld kanaal met aan één zijde van de hoofdgeul een uiterwaard is gedaan door *Iked&Sano* [12]. Naast experimenteel onderzoek hebben zij ook numeriek onderzoek gedaan met een turbulentie model. Experimenten met verschillende waterstanden laten horizontale wervels zien waarbij het centrum⁴ van de wervels op de overgang ligt. Uit de proeven blijkt dat bij hogere waterstanden het regelmatige patroon van horizontale wervels verdwijnt. Beperkingen aan het fysisch model zijn echter de geringe breedte van zowel de hoofdgeul als de uiterwaard en de geringe turbulentie tot uitdrukking gebracht in een laag Reynoldsgetal dat voor de uiterwaard afhankelijk van het experimentele geval varieert van minimaal $Re = 448$ tot maximaal $Re = 5547$. In het geval waarmee ook een numerieke simulatie van sedimenttransport is uitgevoerd (zie subparagraaf 2.2.4), is in de uiterwaard het Reynoldsgetal slechts 929. Evenals de stroming in de natuur moet ook die in het model turbulent zijn. Het omslagpunt van laminaire naar turbulente stroming ligt bij een Reynoldsgetal van 2300 zodat de stroming in het fysisch model in dit geval niet aan de voorwaarde voldoet. De breedte/diepte verhouding in de hoofdgeul is ongeveer 10:1 wat groot genoeg is voor een menglaag met breedte/diepte verhouding van 5:1.

De invloed van de horizontale wervels op de morfologie van een rivier kan groot zijn. De sedimentafzettingen in de uiterwaarden van rivieren zouden voor een deel verklaard kunnen worden door het voorkomen van de horizontale wervels. Veldonderzoek heeft tot nu toe nog weinig opgeleverd om de werking van het mechanisme in de natuur te verifiëren. Op grond van de resultaten van de experimenten van (vooral) Van Prooijen kan aannemelijk worden gemaakt dat de grootschalige wervels zich in de Nederlandse rivieren zullen voordoen. Er wordt immers voldaan aan de voorwaarden van turbulente stroming en de breedte/diepte verhouding. De experimenten berusten echter op een al te vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid. Te noemen zijn onder andere de vrij rechte stroming, geometrische vereenvoudigingen in het bodemprofiel zowel in langs- als in dwarsrichting: de vrij abrupte overgang tussen hoofdgeul en uiterwaard, het afwezig zijn van zomerkaden, kribben en andere objecten in de uiterwaard. In de natuur verloopt de overgang geleidelijker en is de hele geometrie veel complexer. Daarom kan niet gesteld worden dat de wervels in dezelfde mate in de rivieren zullen optreden als in de experimenten. De mate waarin ze optreden en de invloed die ze hebben op sedimenttransport is afhankelijk van de complexe praktijksituatie. Een voorbeeld van een complexe geometrie is het meandergedrag. *Muto&Shiono* [18] hebben in hun experimentele opstelling een meanderende rivier nagebootst. De wervels blijken hier

⁴ Het centrum wordt gedefinieerd als de plaats waar de vortciteit (=draaiing van de wervel) het grootst is.

als gevolg van het sterk meanderen niet voor te komen. Dit neemt niet weg dat op min of meer rechte stukken rivier de wervels juist wel kunnen optreden.

2.2.4 Simulatie in computermodellen

De stap die gemaakt moet worden tussen fysisch modellen en praktijksituatie kan via computermodellen lopen. In computermodellen kan de complexe geometrie in de natuur gemakkelijker benaderd worden dan in een fysisch model. Nadat de waterbeweging in deze simulaties goed gemodelleerd is, kan daarin ook het sedimenttransport, dat in dit fysisch model afwezig is, berekend worden. Verschillende situaties kunnen met de nodige vereenvoudigingen nagebootst worden door de bij een specifieke situatie behorende afmetingen in het model in te voeren. Maar ook op het gebied van de computermodellen doen zich problemen voor. Bij een eenvoudige geometrie blijkt in de meeste modellen turbulentie niet goed gemodelleerd te worden. Dat dit wel goed gebeurt is van belang bij het simuleren van grootschalige horizontale wervels in een menglaag. Het gevolg van een beperkte modellering van turbulentie in veel rivierkundige modellen is een verkeerde berekening van bodem- en suspensietransport tussen hoofdgeul en uiterwaarden. Een recent voorbeeld geven *Ikedo&Sano* [12] met hun numerieke model (SDS-2DH turbulence model) waarin de horizontale wervels die ze in hun experimenten hebben gemeten worden gesimuleerd. De resultaten van de computersimulatie wat betreft de waterbeweging komen in de menglaag niet goed overeen met die van de experimenten. In de menglaag zijn de horizontale schuifspanningen - dichtbij het oppervlak, als gevolg van het verschil tussen snelheid in hoofdgeul en uiterwaard - voor de numerieke berekening een stuk kleiner dan de gemeten waarden. Blijkbaar wordt het mechanisme van de horizontale wervels door het model nog niet goed benaderd.

Ook is een berekening van het suspensietransport tussen hoofdgeul en uiterwaard gemaakt. Voor het geval met een verhouding $h_{\text{uiterwaard}}/h_{\text{hoofdgeul}}$ van 0.18 is het sedimenttransport berekend waarbij fijn materiaal met een diameter van 0.1 mm en een specifiek gewicht van 1,3 is gebruikt. Het resultaat laat zien dat water met een kleine concentratie zand zich naar de hoofdgeul verplaatst en omgekeerd water met een hoge concentratie zand naar de uiterwaard getransporteerd wordt. Het sedimentatie- en erosiepatroon is gecorreleerd met de aanwezigheid van de grootschalige horizontale wervels: op de uiterwaard vindt sedimentatie plaats en in de hoofdgeul erosie. In paragraaf 2.2.3 werd echter al geconstateerd dat de stroming in het voor de simulatie gebruikte experiment niet turbulent is. In een meer turbulente stroming zullen de horizontale wervels minder sterk zijn omdat meer energie gedissipeerd wordt. Daarom moet aan de juistheid van de resultaten betreffende de waterbeweging en sedimentatie en erosie getwijfeld moet worden.

2.2.5 Vervolgonderzoek

Uit voorgaande analyse is duidelijk geworden dat een aantal aspecten van grootschalige wervels nog (verder) onderzocht moeten worden. Tot nu toe zijn de wervels onderzocht onder in vergelijking met de natuur sterk vereenvoudigde omstandigheden. De experimentele opstellingen voldoen vaak niet aan de gewenste breedte/diepte verhouding en soms niet aan de voorwaarde voor turbulente stroming. Nog onbekend is welke invloed een complexere geometrie - die bijvoorbeeld bestaat uit zomerkaden, hoogwatervrije terreinen, kribben en een

flauwere overgang tussen hoofdgeul en uiterwaard - en verschillende waterstanden⁵ hebben op de grootschalige wervels. Het vrij grote fysische model waarin Van Prooijen de experimenten heeft uitgevoerd, leent zich goed voor het aanbrengen van geometrische veranderingen.

Naast experimenteel onderzoek is numeriek onderzoek nodig om onjuistheden in computersimulaties van grootschalige horizontale wervels bloot te leggen door validatie van de computerresultaten aan experimentele resultaten. Door een wisselwerking van aanpassing van het turbulentiemechanisme in het computermodel en validatie aan experimentele resultaten kunnen computermodellen gecalibreerd en verbeterd worden. Het resultaat is een computermodel dat het turbulentiemechanisme in de berekening goed benadert. Met het model kan vervolgens voor praktijksituaties bepaald worden in welke mate de horizontale wervels voorkomen en de welke invloed ze op het sedimenttransport hebben

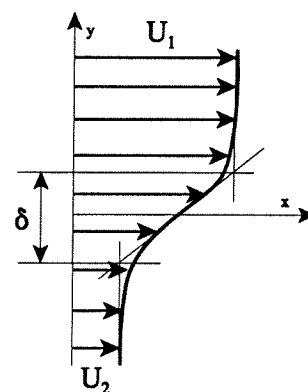
2.3 Ontstaan van grootschalige horizontale wervels

Om een goed inzicht te krijgen in het gedrag van de grootschalige horizontale wervels wordt in deze paragraaf meer in detail dan in subparagraaf 2.2.3 ingegaan op het proces van ontstaan en het ontwikkelen van de grootschalige horizontale wervels. Resultaten uit experimenteel onderzoek naar menglaagstroming en grootschalige wervels komen daarbij aan de orde. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen *enkelvoudige* en *samengestelde* kanalen. Veel definities die voor een *enkelvoudig* kanaal gelden, kunnen niet zonder meer op een *samengesteld* kanaal worden toegepast omdat voor veel gebruikte parameters, zoals waterdiepte (h) en wrijvingscoëfficiënt, de waarden voor uiterwaard en hoofdgeul onderling verschillen.

De meeste in deze paragraaf voorkomende formules gelden alleen voor menglaagstroming in *enkelvoudige* kanalen.

2.3.1 Definitie van de menglaag⁶

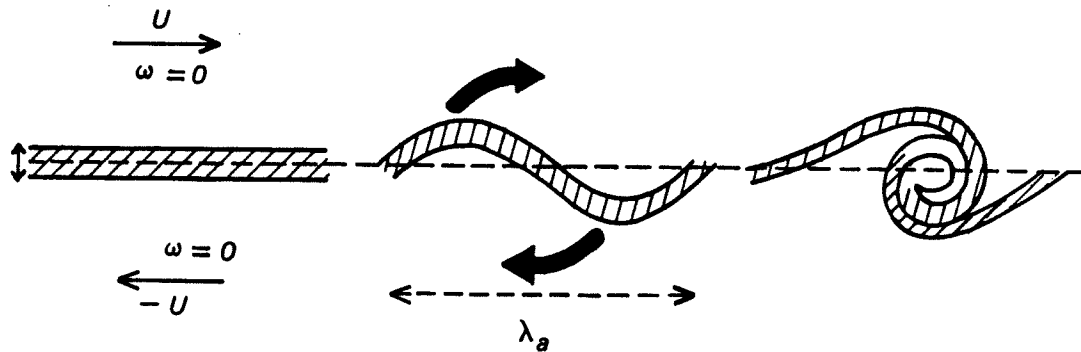
In ondiepe menglaagstroming (ondiep vanwege de kleine waterdiepte) blijven buiten de menglaag in dwarsrichting de snelheden van de twee stromingen gelijk, u_1 en u_2 voor respectievelijk de snelle en de langzame stroming. De menglaagbreedte δ is af te lezen uit het snelheidsprofiel (figuur 2.6). De definitie van δ wordt verderop in deze paragraaf gegeven. De hoofdstroming is in lengterichting (x) en de gradiënt van de snelheid



Figuur 2.6: Definitieschets van de menglaagbreedte

⁵ Hoewel Ikeda & Sano [12] proeven met verschillende waterstanden hebben uitgevoerd, is gezien de in 2.2.3 en 2.2.4 genoemde beperkingen van het experimentele en numerieke model verificatie van hun resultaten nodig.

⁶ Uit Booij & Tukker [3], 'Integral model of shallow mixing layers'.



Figuur 2.7: Principechets van het ontstaan van Kelvin-Helmholtz instabiliteiten Lesieur [26].

van de hoofdstroming is in dwarsrichting (y). Het centrum van de menglaag ($y = y_c$) is gedefinieerd als de positie waar de snelheid het gemiddelde van de snelle en de langzame stroming is, namelijk $u_c = \frac{1}{2} (u_1 + u_2)$. Voor een *samengesteld* kanaal dat model staat voor een rivier met uiterwaard geldt voor het diepe gedeelte $u_1 = u_{\text{hoofdgeul}}$ en voor het ondiepe gedeelte $u_2 = u_{\text{uiterwaard}}$.

2.3.2 Aandrijvende kracht

In *Alavian&Chu* [1] en in *Godreche et al.* [11] wordt gesteld dat op het buigpunt van het dwarsprofiel van de horizontale snelheid in een *enkelvoudige* menglaag zogenaamde Kelvin-Helmholtz instabiliteiten ontstaan die zich ontwikkelen tot grootschalige horizontale wervels (figuur 2.7). Ter plaatse van het buigpunt is de snelheidsgradiënt het grootst. Het snelheidsverschil kan gezien worden als de aandrijvende kracht voor de vorming van instabiliteiten in de menglaag die daarmee voor de groei van de menglaag zorgt. In een *enkelvoudig* kanaal nemen de snelheden in de hoofdgeul en in de uiterwaard af respectievelijk toe in stroomafwaartse richting zodat de aandrijvende kracht, het snelheidsverschil, afneemt. In een *samengesteld* kanaal wordt het snelheidsverschil daarentegen gehandhaafd door het verschil in diepte tussen hoofdgeul en uiterwaard. Door de grotere diepte in de hoofdgeul is de gemiddelde snelheid daar groter dan in de uiterwaard. De spreidingssnelheid in een *enkelvoudig* kanaal - waardoor de breedte van de menglaag toeneemt - is aanvankelijk evenredig met het relatieve snelheidsverschil λ :

$$\frac{d\delta}{dx} = \alpha \lambda$$

$$\lambda = \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} = \frac{\Delta u}{2u_c}$$

met:

u_c = snelheid in centrum van de menglaag = gemiddelde snelheid

Uit verschillende onderzoeken (o.a. *Chu&Babarutsi* [8], *Brown&Roshko* [6]) blijkt dat de spreidingscoëfficiënt α (evenredigheidsparameter) een gemiddelde waarde van $0.18 (\pm 0.015)$ heeft. Turbulentie van de twee stromingen draagt bij aan de uitwisseling in de laag wat in principe resulteert in een kleine verhoging van de spreidingssnelheid van de menglaag.

2.3.3 Bodemwrijving

Naast de aandrijvende kracht is er de stabiliserende invloed van de bodemwrijving die vanwege de geringe waterdiepte een grote rol speelt. Deze remt de ontwikkeling van grootschalige wervels in de menglaag af. Doordat de ontwikkeling geremd wordt blijft de breedte van de menglaag beperkt. Een parameter die de verhouding tussen de stabiliserende en aandrijvende kracht weergeeft is het *bodemwrijvingsgetal* (zie *Chu&Babarutsi* [8]):

$$S = \frac{c_f}{2\lambda} \frac{\delta}{h}$$

met:

h = waterdiepte

δ = menglaagbreedte

c_f = bodemwrijvingscoëfficiënt die volgt uit:

$$\frac{1}{\sqrt{c_f}} = \frac{1}{\kappa} \left[\ln(\text{Re} \sqrt{c_f}) + 1 \right]$$

Stabiliteitsanalyses (door o.a. *Chu&Wu* [9], *Chen&Jirka* [7]) hebben aangetoond dat bij een waarde van $S \ll S_c$ - waarbij S_c de kritische waarde is - de bodemwrijving een verwaarloosbaar effect heeft op de groei van de instabiliteiten in de menglaagstroming. Daarboven is de spreidingscoëfficiënt α gelijk aan 0 zodat de menglaag niet meer groeit. Hieruit kan worden afgeleid dat in het begin van menglaagstroming, waar de menglaagbreedte klein is, de bodemwrijving nauwelijks invloed heeft op de stroming en de groei lineair is. (De spreidingssnelheid is evenredig met het relatieve snelheidsverschil). Voor het bereiken van de kritische waarde wordt de groei significant afgeremd (bij de kritische waarde is er geen sprake meer van groei) en is de menglaagstroming uitontwikkeld. Er zijn voor S_c waarden gevonden die liggen tussen de 0.06 en 0.12. *Chu&Babarutsi* [8] hebben op basis van hun experimenten een waarde van 0.09 bepaald. Voor een *samengesteld* kanaal is de formule (S) niet zomaar toe te passen omdat voor uiterwaard en hoofdgeul de parameters c_f en h verschillende waarden hebben. Een afzonderlijke behandeling van uiterwaard en hoofdgeul is hierbij niet mogelijk omdat de processen in uiterwaard en hoofdgeul elkaar beïnvloeden. Een wervel ligt namelijk voor een deel in de hoofdgeul en voor een deel in de uiterwaard.

De mate van bodemwrijving is in een *samengesteld* kanaal ook afhankelijk van de richting van de stroming. In het geval van een stroming met een transversale component richting de uiterwaard ondervindt de menglaagstroming ten opzichte van de rechte stroming meer bodemwrijving als gevolg van het stromen over de ondiepe uiterwaard. In geval van een stroming met een transversale component richting de diepe hoofdgeul is de bodemwrijving juist kleiner. In het laatste geval is de stroming pas verder stroomafwaarts uitontwikkeld (zie *Van Prooijen* [19]).

2.3.4 Ontwikkeling van de menglaag

De ontwikkeling van de menglaag wordt afgelezen uit de ontwikkeling van de breedte van de menglaag. In een *enkelvoudig* kanaal wordt deze menglaagbreedte gedefinieerd als de breedte bij maximale helling van het gemiddelde snelheidsprofiel (zie figuur 2.6) :

$$\delta = \frac{u_1 - u_2}{(\delta u / \delta y)_{\max}}$$

met:

$\delta u / \delta y$ = snelheidsgradiënt

Voor een *samengesteld* kanaal is deze definitie niet zonder meer toepasbaar. *Van Prooijen* heeft voor hoofdgeul en uiterwaard elk apart een menglaagbreedte bepaald omdat snelheidsgradiënt in hoofdgeul duidelijk een stuk groter is dan in de uiterwaard. Ongeveer ter plaatse van de overgang bevindt zich in het snelheidsprofiel een duidelijke knik.

Booij&Tukker [3] stellen dat voor een *enkelvoudig* kanaal de breedte van menglaag overeenstemt met de afmetingen van de horizontale wervels die daarmee hoofdzakelijk verantwoordelijk zijn voor de uitwisseling van impuls en stoffen over de menglaag en in dwarsrichting.

Zoals gezegd heeft de bodemwrijving een remmende werking op de groei van de menglaagbreedte waardoor de menglaag na een zekere lengte stroomafwaarts is uitontwikkeld. *Van Prooijen* stelt dat voor de ontwikkelafstand de formule

$$x = \frac{h}{2c_f}$$

een goede waarde geeft, waarin:

x = afstand in langsrichting

h = waterdiepte

c_f = wrijvingscoëfficiënt

Deze waarden zijn echter voor uiterwaard en hoofdgeul verschillend vanwege het verschil in grootte van de bodemwrijving tussen uiterwaard en hoofdgeul en moeten daarom respectievelijk als onder- en bovengrens voor de ontwikkelengte gebruikt worden (zie tabel 2.2).

stroomrichting	$x_{\text{uiterwaard}}$	$x_{\text{hoofdgeul}}$	x_{analyse}
recht	7.4 m.	28.7 m.	20 m.
naar uiterwaard	8.0 m.	28.9 m.	13 m.
naar hoofdgeul	8.0 m.	30.2 m.	> 22.3 m.

Tabel 2.2: Op basis van $x = h/2c_f$ berekende ontwikkelengtes voor uiterwaard en hoofdgeul en de ontwikkelengte die volgt uit analyse van meetdata uit de experimenten van *Van Prooijen* [19].

Uit het onderzoek van *Uijtewaal&Booij* [24] in een *enkelvoudig* kanaal blijkt dat de bodemwrijving een vertraging aan de hoge snelheidskant en een versnelling aan de lage snelheidskant veroorzaakt waardoor de menglaag in het deel van de stroming met een hogere snelheid dan het gemiddelde breder wordt en smaller in het langzamere deel. Een verschuiving van de menglaag richting het langzaam stromende deel treedt op om te voldoen aan de continuïteitsvoorwaarde dat het debiet stroomafwaarts niet kan toe- of afnemen ($Q_{x=1} = Q_{x=2}$). Voor kleinere waterdieptes is dit effect sterker vanwege de grotere invloed van de bodemwrijving. Zo'n verschuiving is in de eerste meters ook zichtbaar in de rechte opstelling bij *Van Prooijen* [19]: de menglaag ligt voor het grootste gedeelte in de uiterwaard.

2.3.5 Uitwisseling van impuls tussen hoofdgeul en uiterwaard

De intensiteit van de uitwisseling van impuls tussen hoofdgeul en uiterwaard wordt uitgedrukt in de turbulente intensiteit v' . De mengweglengte is een maat voor de breedte waarover uitwisseling van impuls plaats vindt en wordt als volgt bepaald:

$$\frac{Cov(u, v)}{(u_{\text{hoofdgeul}} - u_{\text{uiterwaard}})^2} = \left(\frac{l_m}{\delta} \right)^2$$

waarin:

l_m = mengweglengte

δ = menglaagbreedte

u, v = in de tijd variërende langs- en dwarssnelheid

In vorige onderzoeken (bijv. *Uijtewaal&Booij* [24]) bleek de mengweglengte van de orde van de waterdiepte te zijn terwijl de menglaag veel groter was. De *mengweglengte* is geen goede maat voor de breedte waarover uitwisseling door de grootschalige wervels plaats vindt. De menglaagbreedte kan als tijdsgemiddelde maat voor de breedte van de wervels worden aangehouden.

2.3.6 Overige invloeden

Er is nog een aantal verschijnselen die de menglaagstroming kan beïnvloeden. Een verticale stap of een talud als overgang tussen het diepe en ondiepe gedeelte in een samengesteld kanaal zorgt voor een secundaire stroming in het verticale vlak, die de ontwikkeling van de wervels kan verstoren. Een ander effect is de geometrische beperking van de waterbeweging vanwege de kleine diepte. De geringe diepte beperkt de wervels tot het maken van een horizontale beweging. Deze invloed wordt duidelijk in het onderzoek van *Uijtewaal&Booij* [24] in een *enkelvoudig* kanaal. Hierin bleek dat bij een gelijk bodemwrijvingsgetal de wervels stroomafwaarts bij een vrij kleine waterdiepte verdwenen terwijl ze bij een grotere waterdiepte bleven bestaan. Het bodemwrijvingsgetal is blijkbaar niet alleen bepalend voor het al dan niet voorkomen van de wervels. De kleine waterdiepte speelt dus niet alleen als weerstand een rol maar ook als geometrische parameter waardoor de turbulente waterbeweging beperkt wordt.

2.4 Doel van het project

In dit afstudeerproject wordt met behulp van een fysisch model onderzoek gedaan naar de uitwisselingsprocessen die bij hoogwater optreden tussen uiterwaard en hoofdgeul van een rivier. Dit afstudeerproject geeft daarmee een vervolg aan het door *Van Prooijen* [19] opgezette onderzoek naar grootschalige horizontale wervels in ondiepe menglaagstroming. Het fysisch model, waarin ook *Van Prooijen* zijn experimenten heeft uitgevoerd, is een samengesteld kanaal bestaande uit een hoofdgeul en een uiterwaard met een vaste bodem. In deze studie ligt het accent op het onderzoek naar de uitwisseling (van impuls, massa en sediment) door grootschalige horizontale wervels. Daarbij worden de invloeden van geometrische veranderingen op de wervels zoals het aanbrengen van zomerkaden en kribben en variatie in waterstand onderzocht.

Het experimentele onderzoek is onder te verdelen in *drie* fasen:

Fase 1

In deze fase worden de drie opstellingen van *Van Prooijen* (rechte stroming (1), stroming met dwarscomponent naar de uiterwaard (2) en stroming met dwarscomponent naar de hoofdgeul (3)) herhaald met een wijziging in de geometrie (die ook voor fase 2 en 3 geldt): de verticale stap als overgang tussen hoofdgeul en uiterwaard wordt vervangen door een overgangstalud met helling 1:2.

Daarnaast wordt in de rechte opstelling een experiment met een verlaagde waterstand gedaan (1a). Het meet- en analyseprogramma in *Van Prooijen* [19] wordt voor een groot deel toegepast. Dit maakt het mogelijk de resultaten van de verschillende opstellingen met elkaar te vergelijken. Dit gebeurt aan de hand van de ontwikkeling van de menglaag en de eigenschappen van de daarin voorkomende horizontale wervels zoals afmetingen, ligging en intensiteit. Daarnaast vindt op een kwalitatieve wijze onderlinge vergelijking van de zes opstellingen plaats wat betreft de mate van uitwisseling en sedimentatie in de uiterwaard.

Fase 2

Het onderzoek spitst zich in deze en de volgende fase meer toe op praktijksituaties. In twee opstellingen (4 en 5) wordt de invloed van zomerkades in de uiterwaard op de uitwisseling door grootschalige wervels onderzocht. Het effect van de ligging van de zomerkade t.o.v. de overgang op de wervels krijgt hierbij aandacht. Onderlinge vergelijking van de opstellingen 1, 4 en 5 wat betreft de mate van uitwisseling en sedimentatie wordt uitgevoerd.

Fase 3

In deze fase worden kribben in de hoofdgeul (zonder zomerkaden) aangebracht. De totale waterbeweging, waarvan de grootschalige wervels een onderdeel zijn, wordt onderzocht en beschreven in *Bos&Havinga* [5]. Dit afstudeerrapport bevat slechts het gedeelte dat betrekking heeft op de grootschalige horizontale wervels en de gevolgen voor uitwisseling en sedimentatie in de uiterwaard.

Uit de resultaten van de experimenten in fase 1, 2 en 3 wordt inzicht verkregen in de effecten

van de in het kader van 'Ruimte voor de rivier' voorgestelde maatregelen - zoals het verwijderen van zomerkaden en kribverlaging – op waterbeweging en morfologie. De meetresultaten worden verder verwerkt in numeriek onderzoek. De nodige aanpassingen betreffende het simuleren van de turbulente beweging in computermodellen kunnen met behulp van deze meetresultaten in een proces van validatie en calibratie gedaan worden.

Hoofdstuk 3 Modelopstelling en meetapparatuur

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de faciliteiten en meetinstrumenten waarvan in het onderzoek gebruik is gemaakt, behandeld. Ook komen de verschillende experimentele opstellingen en instellingen (snelheden, waterdieptes) aan de orde. Paragraaf 3.2 geeft een beschrijving van het voor de experimenten gebruikte fysische model. De verschillen ten opzichte van het eerdere onderzoek door *Van Prooijen* [19] worden hier aangestipt. Vervolgens komen de experimentele opstellingen en instellingen aan de orde. Een beschrijving van de meetinstrumenten vindt plaats in paragraaf 3.3.

3.2 Experimentele opstelling

3.2.1 Het fysisch model

Een fysisch model is een opstelling (veelal schaalmodel) waarin een in de natuur voorkomend verschijnsel optreedt. Dit verschijnsel kan in het model geïsoleerd van andere in de natuur voorkomende verschijnselen onderzocht worden. Het door *Van Prooijen* [19] en tevens in dit onderzoek gebruikte model is ontworpen als *laboratorium experiment*, dat een fundamentele benadering van de te bestuderen verschijnselen geeft. In het laboratorium experiment worden de afmetingen van het model bepaald op basis van de verwachte afmetingen van de te bestuderen verschijnselen. Op grond van de resultaten van het laboratorium experiment kan inzicht verkregen worden in de wijze waarop het verschijnsel in de praktijk optreedt. Een andere benadering is het *schaalmodel* dat een al dan niet in de natuur bestaande situatie op schaal weergeeft. Hoewel in dit onderzoek strikt genomen geen sprake is van een schaalmodel, komen de horizontale en verticale afmetingen van de opstelling vrij goed overeen met die van een rivier tijdens hoogwater op een schaal van 1:100. Voor het inbouwen van zomerkaden (opstellingen 4 en 5) en kribben (opstelling 6) kan deze schaal ook gehanteerd worden. De fundamentele benadering is nuttig voor validatie van computermodellen. Door vergelijking van de meetresultaten met resultaten uit het computermodel (voor eenzelfde opstelling) kan worden nagegaan of het mechanisme goed berekend wordt. Schaling naar in de praktijk voorkomende situaties kan met computersimulaties gedaan worden zodat fysische schaalmodellen achterwege kunnen blijven.

Faciliteiten en eisen

In het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de TU Delft is gebruik gemaakt van een stroomfaciliteit - ook wel golfbassin genoemd - van 30 m. lang en 12. m breed (figuur 3.1). Er is een maximum debiet van 150 l/s beschikbaar.

Bij het ontwerp is rekening gehouden met een aantal eisen:

- De modelopstelling moet voldoende lang zijn om de menglaag uit te laten ontwikkelen (tot quasi-uniforme toestand)

- De breedte van hoofdgeul en uiterwaard dient zo groot te zijn dat de menglaag met de daarin voorkomende wervels niet door de zijwanden van het golfbassin wordt beïnvloed.
- De stroming moet onder alle omstandigheden voldoende turbulent zijn ($Re \gg 2300$)
- De stroming dient subkritisch te zijn met een Froudegetal behoorlijk kleiner dan 1 zodat het wateroppervlakte vrij vlak is.

Het fysisch model is op basis van ontwerpformules voor ondiepe menglaagstroming in een enkelvoudig kanaal ontworpen (*Van Prooijen* [19], pag 13 e.v.). Voor een samengesteld kanaal zijn namelijk geen ontwerpformules bekend. In het model zijn hoofdgeul en uiterwaard geschematiseerd door een diep gedeelte respectievelijk een ondiep gedeelte die parallel aan elkaar lopen in langsrichting van het bassin. In het model bevindt zich slechts aan één zijde van de hoofdgeul een uiterwaard. In paragraaf 2.2.3 is al aangetoond dat deze vereenvoudiging aanvaardbaar is. De grootschalige wervels die zich in werkelijkheid voordoen op de overgangen van diep naar ondiep water aan beide zijden van de rivier, zullen elkaar niet beïnvloeden.

Het fysisch model heeft overigens geen bodemverhang. Het verhang in de meeste Nederlandse rivieren is ongeveer 10^{-4} wat in het model neer zou komen op een verval van 3 mm over 30 meter. Het aanbrengen van het bodemverhang zou bij een verval van 3 mm een nauwkeurigheid vereisen die uitvoeringstechnisch niet haalbaar is. Bovendien worden verschillende opstellingen en instellingen gebruikt waarbij het waterverhang steeds gewijzigd wordt (in de uniforme situatie zijn water- en bodemverhang gelijk).

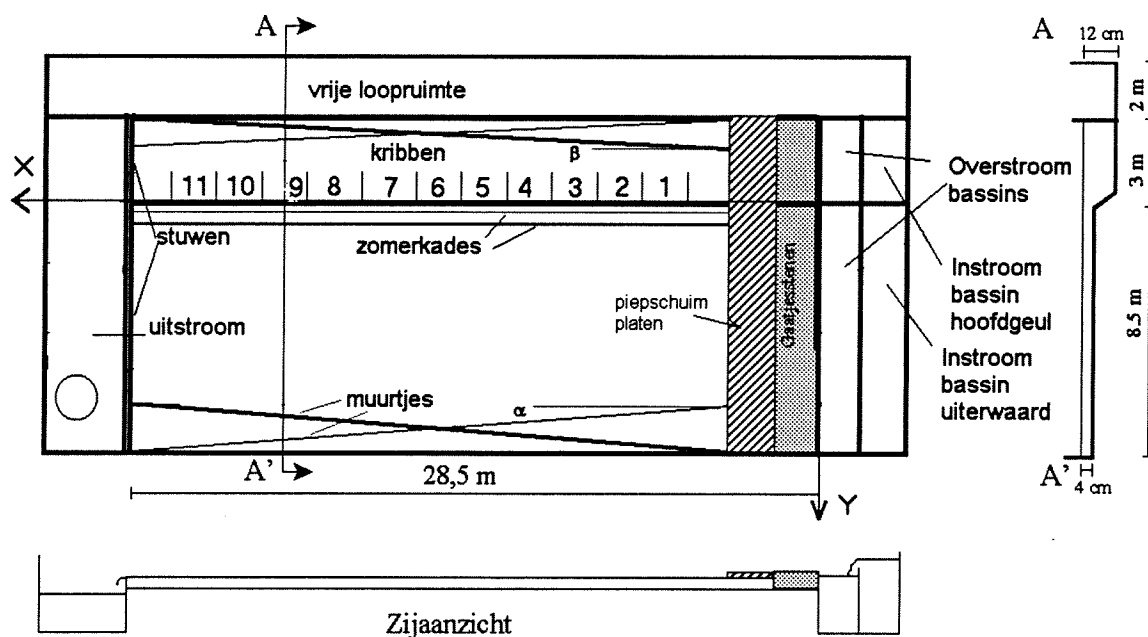
3.2.2 Wijzigingen in het model

In paragraaf 2.4 werd aangegeven dat het model ter plaatse van de overgang gewijzigd is in vergelijking met de experimenten van *Van Prooijen* [19]: een 1:2 talud i.p.v. een verticale stap. Daarnaast bestaan er echter ook nog verschillen in instelling en meetlocatie. Hier wordt nader ingegaan op deze verschillen:

- 1:2 talud op overgang i.p.v. verticale stap
- andere instelling van de waterbeweging
- andere meetlocatie voor ontwikkelde situatie

1:2 talud

De overgang tussen de twee kanalen bestond bij *Van Prooijen* uit een verticale stap in het bodemprofiel die voor dit onderzoek is vervangen door een talud van 1:2. In *Van Prooijen*'s experimenten was het doel de eigenschappen van grootschalige wervels te onderzoeken. Daarvoor was het belangrijk dat ze goed zichtbaar waren. In plaats van voor een flauwe helling werd daarom voor een abrupte overgang – met als gevolg een groot snelheidsverschil over een relatief kleine breedte - gekozen. De wervels waren inderdaad goed zichtbaar. Nu is de stap in het bodemprofiel ter plaatse van de overgang tussen de hoofdgeul en de uiterwaard vervangen door een talud. De plaats van de overgang wordt hier gedefiniëerd als de lijn tussen het ondiepe gedeelte en het talud, overeenkomend met de positie van de verticale stap. Voor deze wijziging is een aantal redenen aan te geven. Zoals in hoofdstuk 2 al is aangegeven zijn de meetgegevens nodig om de (uitkomsten van) computermodellen te calibreren (en te



Figuur 3.1: Plattegrond en dwarsdoorsnede van het fysisch model. Ten behoeve van opstellingen 2 (dunne lijn) en 3 (dikke lijn) zijn muurtjes geplaatst onder hoek α (uiterwaard) en β (hoofdgeul). Voor opstellingen 4 en 5 zijn zomerkades gelegd op posities $y = 0.75$ m. (zwarte lijn) respectievelijk $y = 0.25$ m. (gestippelde lijn). Opstelling 6 bevat 12 kribben in de hoofdgeul (11 kribvakken).

valideren). De verticale stap geeft problemen bij het doorrekenen van computermodellen waarin de zogenaamde σ -modellering gebruikt. Bij de σ -modellering wordt de waterdiepte in een aantal lagen opgedeeld. Een talud geeft i.t.t. een abrupte, verticale, stap in het profiel geen problemen bij het doorrekenen. Daarnaast moet opgemerkt worden dat in de natuur de overgang tussen een uiterwaard en hoofdgeul van een rivier geleidelijk verloopt onder een flauwe helling variërend van 1:4 tot 1:30. Een 1:2 talud doet meer recht aan de situatie in de natuur. Omdat de ingreep niet extreem groot is, wordt verwacht dat de wervels ook in deze situatie goed zichtbaar zijn en het onderzoeken waard zijn.

Instelling van de waterbeweging

Om het effect van het 1:2 talud t.o.v. verticale stap op de menglaagstroming goed te kunnen bepalen, moeten de instellingen (snelheden, waterdiepte en verhang) overeenkomen met de instellingen bij *Van Prooijen* [19]. Het bleek echter niet mogelijk de instellingen van *Van Prooijen* goed te reproduceren. De horizontale langssnelheden in hoofdgeul en uiterwaard (buiten de menglaag) blijken hoger te zijn. Met de Laser Doppler Anemometer (LDA) zijn voor de basisopstelling snelheden (u) van 0,28 m/s (tegenover 0,25 m/s in *Van Prooijen*)

respectievelijk 0,15 m/s (tegenover 0,14 m/s) gemeten. Daarbij is het opmerkelijk dat de waterdiepte ongeveer 1 cm kleiner is. Uitgaande van de weerstandsformule van Chézy voor een prismatisch kanaal met breedte $\gg$ diepte:

$$u = C\sqrt{hi}$$

waarin h en daarmee ook C kleiner worden dan in de experimenten met verticale stap, moet het verhang i toenemen. Omdat de bodemwand 'hydraulisch glad' is, hangt C slechts af van κ , de waterdiepte en het Reynoldsgetal. Het Reynoldsgetal dat evenredig is met $u \cdot h$ neemt iets af. De oorzaak van het grotere verhang moet niet gezocht worden in de instroom- maar in de uitstroomcondities. Als gevolg van de overlaat bij de uitstroom treedt in de laatste zes meter voor de overlaat een significante versnelling van de stroming op. Vermoedelijk is de stuw gedurende enkele maanden gaan zakken. Ter hoogte van het midden van de uiterwaard is een verzakking van de stuw ten opzichte van beide uiteinden waar te nemen. Deze verzakking veroorzaakt een extra stuwkromme-effect waardoor het verhang groter en de benodigde waterdiepte kleiner wordt.

De wijzigingen zijn onbewust in het fysisch model geslopen. Hierbij moet aangetekend worden dat het instellen van de waterbeweging een tijdrovende bezigheid is waarbij precies dezelfde instelling als in vorige opstellingen creëren niet goed mogelijk is. *Van Prooijen* kreeg bij het instellen van de waterbeweging al te maken met de beperkingen van de stuw. Daarbij zijn de grenzen voor een zo goed mogelijk afstellen van de stuw al bereikt. Het corrigeren van de stuw is waarschijnlijk niet mogelijk en zou zelfs een verder zakken van de stuw tot gevolg kunnen hebben. Om het risico van een nog slechter afgestelde stuw te voorkomen zijn maatregelen om de stuw op het oude niveau terug te brengen achterwege gelaten.

Meetlocatie uitontwikkelde stroming

De minder goed afgestelde stuw heeft ook consequenties voor de meetlocaties van de uitontwikkelde menglaagstroming. Observaties wijzen uit dat de stuw een verlaging heeft ter plaatse van het midden van de uiterwaard. De verzakte stuw heeft tot gevolg dat het langsverhang groter is. Daarnaast is ook een invloed in dwarsrichting te zien. Vanaf $x = 22.3$ m. (in de basisopstelling) stroomt het water in de uiterwaard niet meer rechthoekig maar wordt afgebogen in de richting van de knik in de stuw. Het gebied vanaf $x = 22.3$ m. stroomafwaarts kan daarom niet gebruikt worden voor metingen. Hierbij moet echter opgemerkt worden dat ook in een situatie met een goed afgestelde stuw, vanwege een lokaal effect van de stuw, de stroming een paar meter voor de stuw afbuigt richting de uiterwaard.

3.2.3 Modelopstellingen en -instellingen

Het onderzoek bestaat uit drie fases met in totaal zes opstellingen. In *fase 1* worden experimenten gedaan met drie opstellingen die min of meer equivalent zijn aan de drie opstellingen in *Van Prooijen* [19]. De verschillen zijn in subparagraaf 3.1.2 genoemd. *Fase 2* bevat de opstellingen met zomerkades en *fase 3* de opstelling met kribben. De afmetingen van de opstellingen komen behoudens het overgangstalud overeen met die in *Van Prooijen* (zie figuur 3.1). Hoewel de stroomsnelheden en waterdieptes niet overeen komen, mogen toch dezelfde afmetingen aan worden gehouden omdat de verschillen voldoende klein zijn. Bij

Van Prooijen verschillen immers de daadwerkelijk gebruikte instellingen uiteindelijk ook van de ontworpen instelling. Bij alle opstellingen moet de instelling van de waterbeweging voldoen aan de in paragraaf 3.1.1 genoemde eisen zoals het uitontwikkeld zijn van de menglaag voor de uitstroom van het bassin. Tabel 3.2 bevat de instellingen voor de opstellingen in fase 1, 2 en 3. De snelheden aan het oppervlak en de over de waterdiepte gemiddelde snelheden zijn op basis van LDA-metingen en uitgaande van een theoretisch logaritmisch snelheidsprofiel op $x = 17.3$ m. bepaald op plaatsen buiten de menglaag.

Tabel 3.1 bevat waarden voor verhanglijnmetingen (met golfhoogtemeter) en -berekeningen (bij rechte stroming, voor hoofdgeul en uiterwaard apart). De verhanglijnberekeningen zijn uitgevoerd met waarden voor c_f , h en $u_{\text{gemiddeld}}$ (over de verticaal) met:

$$i = -\frac{dh}{dx} = c_f \frac{1}{\frac{gh}{u_{\text{gemiddeld}}^2} - 1}$$

	Verhang [-] * 10 ⁴			
	uiterwaard	overgang	hoofdgeul	gewogen gemiddelde
gemeten	1.65	1.43	1.65	-
berekend	1.7	-	1.35	1.6

Tabel 3.1: Gemeten en berekende waarden voor het waterstandsverhang (*10⁴) voor de rechte stroming (opstelling 1).

Verhanglijnmetingen wijzen op een zelfde verhang in de hoofdgeul als in de uiterwaard. De waarde op de overgang is minder betrouwbaar vanwege de grotere waterstandsfluctuaties als gevolg van optredende wervels op de overgang. Ervan uitgaande dat stroomafwaarts het verhang in uiterwaard en hoofdgeul gelijk wordt getrokken - dit zou in een theoretisch eenvoudige situatie als deze het geval moeten zijn - kan een gewogen (met de breedte van uiterwaard en hoofdgeul) gemiddeld verhang voor uiterwaard en hoofdgeul berekend worden. Deze waarde komt goed overeen met de waarde uit de verhangmetingen in uiterwaard en hoofdgeul.

Fase 1 : opstellingen 1, 2 en 3

Naast experimenten met een rechte stroming (opstelling 1) worden ook experimenten met schuine aanstromingen uitgevoerd. Om het effect van stroming met een dwarscomponent richting de uiterwaard op de menglaag en de grootschalige wervels te bepalen, worden voor opstelling 2 aan beide zijden van het bassin schuine wanden onder hoeken α (5°) en β (1°) met de x-as gebouwd (zie figuur 3.1). Voor het omgekeerde geval, stroming met een dwarscomponent richting de hoofdgeul (opstelling 3), worden de wanden gebouwd met hoeken van $\alpha = -5^\circ$ en $\beta = -1^\circ$. De waarden voor deze hoeken zijn overgenomen uit het ontwerpproces van *Van Prooijen* [19], pag. 20.

Een *variant* voor opstelling 1 is *opstelling 1a* waarin de waterstand ten opzichte van opstelling 1 0.01 m is verlaagd (waardoor tevens de snelheden lager zijn). De invloed van een kleiner snelheidsverschil en een kleinere verhouding in waterdiepte ($h_{\text{uiterwaard}}/h_{\text{hoofdgeul}}$) tussen uiterwaard en hoofdgeul op menglaag en horizontale wervels kan onderzocht worden.

Fase 2 : opstellingen 4 en 5

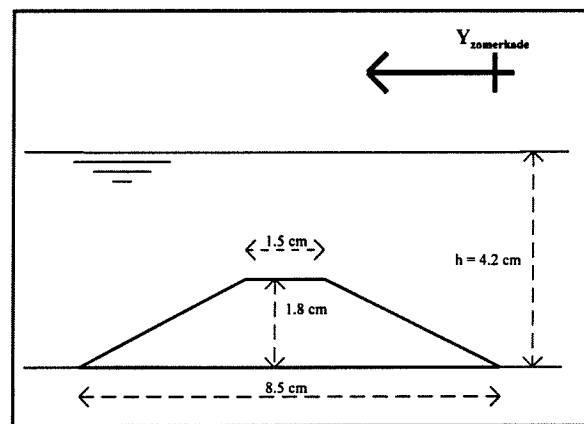
In deze fase worden experimenten gedaan met zomerkades in de uiterwaard. De zomerkades zijn ontworpen aan de hand van de afmetingen die gebruikelijk zijn in het Nederlandse rivierengebied (schaal 1:100, figuur 3.2). Zomerkades vormen de scheiding tussen zomerbed en winterbed (uiterwaard) en hebben daardoor een beperkende invloed op de onderlinge uitwisseling. Als de zomerkades verwijderd worden - wat één van de voorgestelde maatregelen ter verlaging van de waterstand is

- kan de mate van uitwisseling wellicht significant toenemen. De ligging van de zomerkades - de afstand tot de overgang tussen hoofdgeul en uiterwaard - is in de natuur nogal variabel. Er zijn bovendien ook riviertrajecten waarop zomerkades afwezig zijn. Naast zomerkades kan ook gedacht worden aan andere kades, dammetjes en dijkes die bij hoogwater de uitwisseling kunnen beperken.

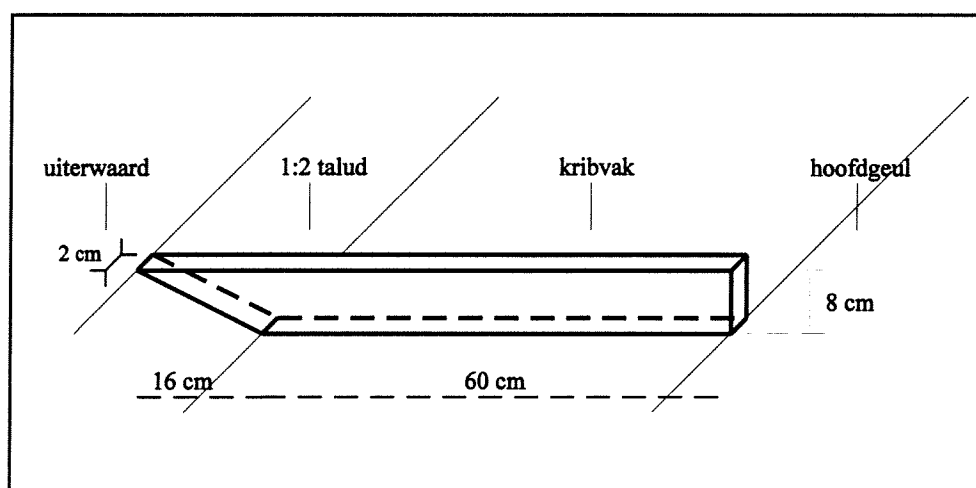
Omdat de afstanden tot de overgang per traject sterk kunnen verschillen, wordt er in dit onderzoek voor gekozen twee gevallen te beschouwen. In beide gevallen liggen de zomerkades in het gebied waarin voor opstelling 1 de menglaag zich bevindt. Onderzoek waarin de zomerkades buiten dit gebied liggen is nutteloos aangezien de zomerkades dan geen invloed op de uitwisseling hebben. In opstelling 4 wordt de teen van de zomerkade op 0.75 meter van de overgang gelegd (zie figuur 3.1). Dit komt overeen met 75 m in werkelijkheid (schaal van het model is 1:100). In opstelling 5 wordt de zomerkade dichtbij de overgang gelegd, op een afstand van 25 cm . In het Nederlandse rivierengebied komen beide gevallen voor. De waarden voor c_f en λ die in een rivier in de natuur gelden kunnen ook in het model worden ingesteld. Uitgaande van een zelfde waarde voor het bodemwrijvingsgetal voor rivier en model:

$$S = \frac{c_f}{2\lambda} \frac{\delta}{h}$$

komt de waarde voor δ/h in het model overeen met die in de rivier. Als de waterdiepte in de rivier 100 maal zo groot is als in het model, geldt dat dus (bij de juiste instellingen) ook voor de menglaagbreedte. Er mag daarom worden uitgegaan van geometrische gelijkvormigheid tussen natuur en het model zodat de zomerkade in het model dezelfde invloed heeft op de menglaag als de zomerkade in de natuur. Bij implementatie van de meetgegevens in computermodellen kan nagegaan worden of deze aanname juist is.



Figuur 3.2: Schets van zomerkade waarin $Y_{\text{zomerkade}} = 0.75\text{ m}$ voor opstelling 4 en 0.25 m voor opstelling 5.



Figuur 3.3: Schets van een krib in opstelling 6

Omdat proeven met zomerkaden in de context van ondiepe menglaagstroming met horizontale wervels nog niet eerder zijn uitgevoerd, is niet op voorhand te zeggen wat het effect van de zomerkade is. De verwachting is dat de zomerkade de breedte van de menglaag meer zal beperken naarmate de afstand van de zomerkade tot de overgang - waar in de basisopstelling het centrum van de menglaag zich bevindt met de grootste intensiteit van de wervels - kleiner is. Door opstellingen 4 en 5 met elkaar te vergelijken wordt dit effect duidelijk. Een belangrijke factor is de hoogte van de zomerkade (1.8 cm). Een hoge zomerkade beperkt de waterdiepte waarover uitwisseling kan plaatsvinden. Wervels die een sterke component in de diepte hebben botsen tegen de zomerkade op en worden daardoor afgeremd. Indien de wervels geen sterke component in de diepte hebben, zullen ze gemakkelijker de zomerkade oversteken. Lokale effecten kunnen voorkomen zoals een geringe versnelling over de zomerkade in dwarsrichting (waardoor de wervels uitgerekt worden in dwarsrichting) en secundaire stroming in het verticale vlak.

Fase 3: opstelling 6

Deze opstelling is gelijk aan opstelling 1 maar dan met kribben die in de hoofdgeul worden aangebracht (figuur 3.1). In het model is sprake van overstroomde kribben wat immers ook het geval is in hoogwatersituaties in de natuur. De kribben hebben een hoogte gelijk aan die van de uiterwaard. Bij handhaving van het snelheidsverschil tussen uiterwaard en hoofdgeul wordt het effect van de kribben op de grootschalige wervels onderzocht. De grote weerstand van de kribben in de menglaag zal echter naar verwachting zowel lokaal, dichtbij de kribben, als globaal een grote invloed op de waterbeweging hebben. Er treedt dan ook een stroming op waarbij geen sprake meer is van een menglaag zoals in de opstellingen 1 t/m 5. Daarom spreken we hier van een *menggebied* tussen uiterwaard en hoofdgeul waar binnen de kribvakken liggen. Door het overstroomen van de kribben zal net benedenstrooms van de kribben verticale neervorming ontstaan. Ook loslatingverschijnselen bij de kop en in mindere mate bij de wortel van de krib zijn te verwachten. Deze verschijnselen kunnen grote invloed op de grootschalige horizontale wervels hebben. In het kribvak is geen sprake van een uniforme stroming; De in langsricting gemiddelde snelheid (aan het oppervlak) bedraagt 0.08 m/s.

Omdat het doel is slechts een globale indruk te krijgen van de waterbeweging bij overstroomde kribben, zijn de dimensies van de kribben en kribvakken sterk vereenvoudigd. De kribben hebben een rechthoekige doorsnede terwijl in de natuur sprake is van een talud aan de randen van de krib (figuur 3.3). De kribben hebben een breedte van 0.02 m en een hoogte van 0.08 m. Zij sluiten aan op het niveau van de uiterwaard en op het overgangstalud tussen uiterwaard en hoofdgeul van 1:2. De kribvakken hebben een lengte van 2.0 m en een breedte van 0.76 m in de hoofdgeul (gemeten tot uiterwaard, inclusief het overgangstalud). De bodem heeft hetzelfde niveau als de bodem van de hoofdgeul, i.t.t. de praktijk waarin een flauwe dwarshelling in het kribvak de overgang vormt van uiterwaard naar hoofdgeul.

opstellingnummer en omschrijving		$u_{\text{hoofdgeul}}$ [m/s]		$u_{\text{uiterwaard}}$ [m/s]		$h_{\text{hoofdgeul}}$ [mm]	$h_{\text{uiterwaard}}$ [mm]	$c_{f, \text{hoofdgeul}}$ [-]	$c_{f, \text{uiterwaard}}$ [-]
		gemiddeld	oppervlak	gemiddeld	oppervlak				
1	recht	0.26	0.29	0.14	0.16	124	44	0.0023	0.0034
1a	recht, lagere waterstand	0.18	0.21	0.09	0.10	114	34	0.0025	0.0041
2	stroming naar uiterwaard	0.28	0.31	0.15	0.17	122	42	0.0023	0.0034
3	stroming naar hoofdgeul	0.27	0.30	0.16	0.18	124	44	0.0023	0.0033
4	recht, zomerkade op $y = 0.75$ m.	0.26	0.29	0.13	0.15	122	42	0.0023	0.0035
5	recht, zomerkade op $y = 0.25$ m.	0.26	0.29	0.15	0.17	122	42	0.0023	0.0034
6	recht, kribben	0.26	0.29	0.15	0.17	112	32	0.0023	0.0034

Tabel 3.2: Instellingen van snelheden (op basis van aanname van logaritmisch snelheidsprofiel) en waterstanden voor de zes opstellingen

3.3 Meetapparatuur

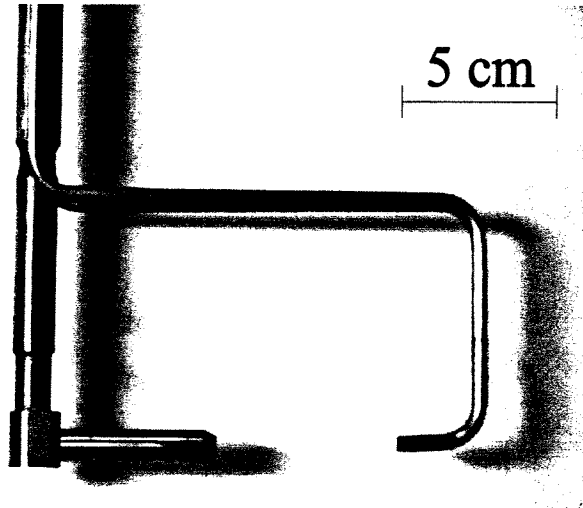
In deze paragraaf worden de meetinstrumenten beschreven die gebruikt worden bij het uitvoeren van de experimenten. De grootheden die gemeten worden zijn snelheden en waterstanden. Voor het meten van de snelheden zijn gebruikt:

- Indompelbare Laser Doppler Anemometer (LDA)
- Elektromagnetische Snelheidsmeter (EMS)
- Digitale camera met particle tracking software

Voor het meten van waterstanden zijn gebruikt:

- Peilnaad
- Golfhoogtemeter

Voor veruit de meeste metingen is gebruik gemaakt van de LDA en de digitale camera. Hoewel de EMS ten opzichte van de LDA het voordeel heeft dat hij ook de snelheid in dwarsrichting -LDA meet alleen in langsrichting - meet, wordt deze niet op grote schaal ingezet vanwege onzekerheden en onnauwkeurigheden in de meetresultaten. Naast de metingen met genoemde instrumenten zijn er nog enkele visualisatietechnieken toegepast. Met kleurstofinjecties (in water opgelost kaliumpermanganaat) wordt een stroomlijn vanaf een bepaald punt zichtbaar gemaakt. Met behulp van een buizensysteem kan op



Figuur 3.4: Detail van de LDA, de probes.

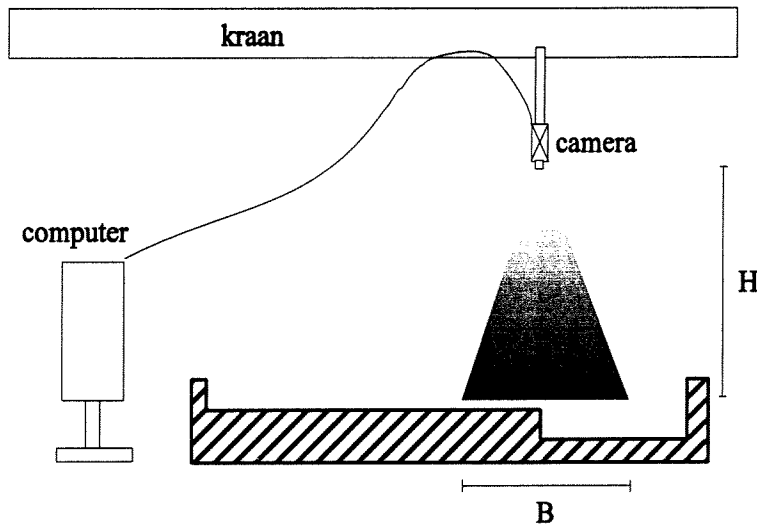
een aantal punten tegelijk kleurstof geïnjecteerd worden. Het beeld kan vastgelegd worden met een digitale videocamera. Verder worden snelheidsrichtingen op de bodem weergegeven met wollen draadjes die vast zijn gemaakt op een dunne aluminium plaat. Twee metalen platen van 90 bij 90 cm en een van 90 bij 16 cm (passend op overgangstalud) kunnen op diverse plaatsen in het golfbassin neergelegd worden.

De meetinstrumenten (LDA, EMS, golfhoogtemeter en peilnaald) staan op een meetkar die zelf op een in langsrichting van het bassin verrijdbare brug (over de breedte van het bassin) is gemonteerd. De meetkar is dus in dwarsrichting van het bassin over de brug verrijdbaar. De horizontale positiebepaling gebeurt automatisch, waarbij de nauwkeurigheid van de verplaatsing van de brug ca. 2 cm bedraagt en de verplaatsing van de meetkar ca. 1 cm. Onnauwkeurigheden in het traverseersysteem (meetkar+meetbrug) zorgen voor meetfouten. Vooral bij het gebruik van golfhoogtemeter en peilnaald is de fout in de hoogte van de apparatuur significant. Voor het bepalen van waterdieptes is dit echter geen probleem omdat deze bepaald worden uit de afstand tussen wateroppervlak en bodem (deze wordt niet beïnvloed door de hoogte van de brug). Om de fouten te corrigeren is het verloop van de hoogte van de brug zowel in langs- als in dwarsrichting bepaald (t.o.v. stilstaand water, uit gegevens van Van Prooijen) en verwerkt in de waterstandsmetingen met de golfhoogtemeter. Het verschil in brughoogte tussen in- en uitstroom van het bassin bedraagt ongeveer 3 mm. In dwarsrichting is het verloop van de brughoogte grillig waarin de grootste variatie 4 mm. bedraagt.

Voor elk meetinstrument volgt hieronder een korte beschrijving.

Peilnaald

De peilnaald wordt gebruikt voor de bepaling van de waterdiepte. De peilnaald kan met een noniusschaal afgelezen worden op ca 0.1 mm. nauwkeurig. Door kleine schommelingen in het wateroppervlak is dit echter in de praktijk ca. 0.5 mm. De metingen met de peilnaald kunnen slechts gedaan worden t.b.v. dieptemetingen. Verhangmetingen vergen een nauwkeurig referentievlak, wat door oneffenheden in de bodem en een zeeg in de brug niet mogelijk is.



Figuur 3.5: De opstelling t.b.v. Particle Tracking Velocimetry.

Golfhoogtemeter

Hoewel het niet de intentie is om oppervlaktegolven te meten, wordt wel een golfhoogtemeter gebruikt. Deze leest met een frequentie van 100 Hz waterstanden nauwkeurig af. Met de golfhoogtemeter wordt de waterstandvariatie in de tijd gemeten en is het ook mogelijk om verhangmetingen te verrichten. Daarvoor moeten de tijdsgemiddelde waterstanden met het brughoogteverloop gecorrigeerd worden.

Laser Doppler Anemometer (LDA)

Het meetprincipe van de LDA is gebaseerd op de verstrooiing van laserlicht op in de stroming aanwezige deeltjes. De toegepaste LDA is een indompelbare LDA wat betekent dat de probes zich onder het wateroppervlak bevinden. Een voordeel van een indompelbare LDA is dat deze zeer flexibel is en direct op de meetkar gemonteerd kan worden waardoor verplaatsing in x- en y-richting mogelijk is. De meetnauwkeurigheid van de LDA is ongeveer 1 mm/s. De maximale meetfrequentie bedraagt 200 Hz. In dit onderzoek wordt gemeten met een hogere frequentie (100 Hz) dan in *Van Prooijen* [19] (10 Hz) gemeten om beter inzicht te krijgen in de bodemturbulentie. In figuur 3.4 is een foto van de gebruikte LDA-probes weergegeven. De buisjes aan de onderkant zijn de laserlicht uitzendende en ontvangende probes. Doordat de probes zich onder het wateroppervlak bevinden, wordt in principe de stroming beïnvloed, maar door het geringe 'stuwoppervlak' en de cilindervorm van de probes kan opstuwing verwaarloosd worden. Dichtbij de bodem en dichtbij het wateroppervlak kan de invloed van de probes echter groter worden. De probes bevinden zich minimaal 1.5 cm onder het wateroppervlak en minimaal 1 cm boven de bodem. Voor de meeste metingen bevinden de probes zich op 2 cm onder het wateroppervlak. De uiteinden van de probes bevinden zich 2.5 cm vanaf het meetvolume, wat voldoende ver wordt beschouwd. De LDA meet een horizontale en een verticale component (in het vlak loodrecht op de lijn tussen de uitzendende en de ontvangende probe).

Elektromagnetische Snelheidsmeter (EMS)

Het meetprincipe van de EMS is gebaseerd op een magnetisch veld wat beïnvloed wordt door de stroming. De meetnauwkeurigheid bedraagt 1 cm/s waarbij de meetpuntjes 2 cm uit elkaar



Figuur 3.6: Digitale momentopname, welke gebruikt worden voor de PTV. De zwarte puntjes zijn de kraaltjes, die gevolgd worden.

liggen. De meetfrequentie bedraagt maximaal 10 Hz. De probe (diameter=3 cm, hoogte=1.2 cm) zit volledig onder het water oppervlak (ca 1 cm onder het oppervlak) en moet zich minimaal ca. 2 cm boven de bodem bevinden. Dit heeft tot gevolg dat de EMS in de uiterwaard niet goed functioneert vanwege de te kleine waterdiepte. Een ander nadeel van de EMS is dat het meetsignaal beïnvloed kan worden door magnetische velden uit de omgeving of materiaal dat het magnetisch veld van de EMS beïnvloedt zoals bijvoorbeeld de metalen brug. Tenslotte moet nog opgemerkt worden dat de fouthoek +/- 10° bedraagt hetgeen voor onzekerheid in de juistheid van de meetresultaten zorgt. Het is duidelijk zijn dat de LDA ten opzicht van de EMS een aantal belangrijke voordelen heeft: hij is nauwkeuriger, heeft minder last van verstoringen, heeft geen fouthoek, een hogere meetfrequentie en is in de uiterwaard te gebruiken.

Particle Tracking Velocimetry (PTV)

PTV is niet een directe meetmethode, maar een manier van bewerken. Als data voor de bewerking worden digitale foto's gebruikt. De opnames worden gemaakt met een digitale videocamera, die een resolutie heeft van 1000x1000 pixels en een maximale frequentie van 30 Hz (in dit onderzoek 15 Hz gebruikt). Het principe berust op het volgen van afzonderlijke deeltjes (zwarte kralen met diameter van 8 mm.) in opeenvolgende beelden (figuur 3.6). Met behulp van PTV kan een momentaan snelheidsveld gegenereerd worden. De videocamera is gekoppeld aan een computersysteem met bijbehorende software (figuur 3.5).

Hoofdstuk 4 Meet- en analyseprogramma

4.1 Inleiding

Zoals eerder al is aangegeven, wordt het experimenteel onderzoek in drie fases ingedeeld. Voor de fases 1 en 2 wordt in het analyseprogramma onderscheid gemaakt tussen de ontwikkeling van de menglaag in stroomafwaartse richting en de grootschalige horizontale wervels in de uitontwikkelde stroming. In fase 3 wordt alleen voor een uitontwikkelde stroming de uitwisseling tussen hoofdgeul en uiterwaard via de kribvakken onderzocht. Een aantal vergelijkingen van opstellingen onderling vindt plaats:

- fase 1: vergelijking van de opstellingen 1 (en 1a), 2 en 3 onderling en met de drie opstellingen van *Van Prooijen* [19]
- fase 2: vergelijking van de opstellingen 4 en 5 onderling met de rechte opstelling (1) zonder zomerkade als referentie
- fase 3: invloed van kribben op de stroming met de rechte opstelling (1) als referentie

In paragraaf 4.2 wordt het meetprogramma en een aantal bewerkingen die op de meetresultaten worden toegepast, behandeld. In paragraaf 4.3 en 4.4 komt het analyseprogramma wat betreft de ontwikkeling van de menglaag respectievelijk de horizontale wervels in quasi-uniforme stroming aan de orde.

4.2 Meetprogramma en bewerkingen

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de grootheden die gemeten worden en de bewerkingen die daarop uitgevoerd worden. In *bijlage 1* is voor alle opstellingen een overzicht van de inzet van de meetinstrumenten op diverse meetlocaties opgenomen.

4.2.1 LDA en EMS

De LDA is gebruikt omdat de PTV-techniek niet geschikt is om over een lange tijd te middelen. Een proef met PTV duurt ongeveer 1 à 2 minuten en zou dus 15 à 30 maal herhaald moeten worden voor de gewenste meettijd van 30 minuten. Het tussen de proeven noodzakelijke opslaan van de beelden kost extra tijd en maakt het tot een arbeidsintensieve meetmethode. De verwerking van de gegevens kost eveneens veel tijd en opslagruimte. De LDA daarentegen kan gedurende 30 minuten onafgebroken meten waarbij de enige handeling het verplaatsen van het meetinstrument is (en als de harde schijf volraakt, opslaan op 'zipdiskette'). De verwerking verloopt sneller dan bij PTV. Een ander voordeel van de LDA is de hoge meetfrequentie (hier 100 Hz) tegenover die van PTV (max. 30 Hz).

De LDA meet in elke opstelling dwars- en langsraaien terwijl de EMS slechts in de opstellingen 1 en 6 wordt gebruikt op een paar meetpunten in de menglaag ten behoeve van correlatiemetingen. Het betreft hier correlatie tussen langs- en dwarssnelheid (u en v), correlatie tussen langssnelheden op verschillende posities ($u_{\text{uiterwaard}}$, $u_{\text{hoofdgeul}}$) waarbij de LDA het tweede meetinstrument is. Op de met LDA doorgemeten langsraaien worden parameters bepaald waarmee de ontwikkelengte van de menglaag bepaald kan worden. De meetpunten

hebben een onderlinge afstand van twee meter. Op de dwarsraaiën liggen de meetpunten vanaf de uiterwaard (buiten het menggebied) tot in de hoofdgeul (buiten het menggebied) met tussenafstanden van 0.1 m. In de vorige experimenten werd voor elke opstelling op $x = 22.3$ m., voor de uitontwikkelde menglaagstroming, een dwarsraai gemeten. Omdat de verstorende invloed van de stuw hier groter is, vinden de metingen meer bovenstrooms op $x = 17.3$ m, plaats. De menglaag is in de meeste opstellingen al voor $x = 17.3$ m. uitontwikkeld. Uit het signaal van de LDA kan de horizontale langssnelheid (u) en de verticale snelheid (w) bepaald worden). Met de EMS worden in één meetpunt de horizontale langssnelheid (u) en de dwarssnelheid (v) gemeten.

Meetsignaal

Voor de metingen wordt evenals in de vorige experimenten een tijdsduur van 30 minuten aangehouden. Voor het bepalen van energiedichtheidspectra moet het meetsignaal een groot aantal wervels bevatten. In een tijdsduur van 30 minuten komen genoeg wervels - ongeveer 60 - voor om de energiedichtheidspectra nauwkeurig te bepalen. Voor elk meetpunt wordt dus een tijdsverloop van de horizontale snelheid (u of v) verkregen. Dit geeft een kwalitatief inzicht in het tijdsafhankelijke karakter van de waterbeweging in de menglaag. Op het meetsignaal worden vervolgens bewerkingen gedaan waarmee een aantal voor het beschrijven van de ontwikkeling van de menglaag en de wervels belangrijke parameters bepaald wordt.

Tijdsgemiddelde snelheid u en turbulente intensiteit u'

Per meetpunt wordt berekend:

- de tijdsgemiddelde horizontale langssnelheid u (v voor EMS)
- de standaardafwijking u' (v' voor EMS) bepaald, hier *turbulente intensiteit* genoemd

Voor een dwars- en langsraaiën wordt bepaald:

- dwars- of langsprofiel van de tijdsgemiddelde horizontale langssnelheid
- dwars- of langsprofiel van de turbulente intensiteit

Het dwarsprofiel van de snelheid geeft het verloop van de snelheid in de menglaag, van hoofdgeul naar uiterwaard, weer. Hieruit kunnen vervolgens bepaald worden:

- breedte van de menglaag
- grootte van het snelheidsverschil tussen uiterwaard en hoofdgeul
- grootte van de gradiënt van de snelheid in de menglaag, zowel aan de kant van de uiterwaard als aan de kant van de hoofdgeul

De langsprofielen geven inzicht in de ontwikkeling van de menglaag in stroomafwaartse richting.

Energiedichtheidspectrum van de turbulente kinetische energie

Het energiedichtheidspectrum voor de horizontale langssnelheid geeft inzicht in de verdeling van de turbulente kinetische energie $S_u(f)$ over de frequenties of de verschillende lengteschalen. De som is gelijk aan u'^2 . Een piek in het spectrum treedt op bij de karakteristieke frequentie van de wervels. De volgende grootheden kunnen worden bepaald:

f_p de frequentie waarbij S_u een piek heeft

S_p de piekenergiedichtheid (voor $f = f_p$)

Het spectrum wordt uitgezet in een grafiek met logaritmische assen. Voor het geval van ondiepe menglaagstroming kan het spectrum opgedeeld worden in drie belangrijke frequentiegebieden van lage naar hoge frequentie:

anisotroop gebied	met energierijke, grootschalige horizontale wervels tot een frequentie van ongeveer u/δ . De turbulente beweging krijgt zijn energie uit de hoofdbeweging door middel van anisotrope beweging. De rechterkant van de piek in het spectrum heeft vaak een helling van -3 (zie <i>Uijtewaal&Booij</i> [24]). Deze helling duidt op de omzet van kleinschalige horizontale turbulentie in grootschalige turbulentie.
overgangsgebied	met fluctuaties vanaf $f = u/\delta$ die waarschijnlijk samenhangen met de bodemturbulentie. Vaak wordt een helling van -1 in het spectrum gevonden (zie <i>Van Prooijen</i> [19]). Deze helling komt ook voor buiten de menglaag waar de wervels afwezig zijn. In spectra voor de verticale snelheid en de horizontale dwarssnelheid is dit gebied afwezig.
bodemturbulentiegebied	met drie-dimensionale wervels bij hoge frequenties vanaf $f = u/h$. Hierin wordt energie overgedragen van de grote wervels naar de kleinschalige 3-dimensionale wervels. In het spectrum wordt vaak een helling van ongeveer -5/3 gevonden (zie <i>Uijtewaal&Booij</i> [24]).

Voor het gebied van de grootschalige horizontale wervels wordt het spectrum tevens langs lineaire assen uitgezet. Aflezen van energiedichtheidspiek(en) en piekfrequentie(s) en onderling vergelijking gaat daarin gemakkelijker. Het aandeel van de grootschalige horizontale wervels in de turbulente kinetische energie ($u_w'^2/u'^2$) wordt berekend door de turbulente kinetische energie die in het anisotrope gebied zit (tot ongeveer $f = 0.12$ Hz) te delen door de totale turbulente kinetische energie. Voor een dwars- en langsraai kunnen f_p , S_p en $u_w'^2/u'^2$ worden uitgezet. De langsraai geeft inzicht in de ontwikkeling van de wervels in afmetingen en intensiteit.

Autocorrelatie

Op een dwarsraai in uitontwikkelde stroming vindt op minstens drie posities (in menglaag, in uiterwaard en in hoofdgeul) vergelijking van de horizontale snelheden op verschillende tijdstippen plaats. In een autocorrelatiediagram wordt de correlatie uitgezet tegen de tijd. Een maximum in de correlatie bij de karakteristieke periode van de wervels duidt op samenhangende wervels. De correlatiecoëfficiënt wordt als volgt bepaald:

$$R_{uu}(\tau) = \frac{\sum u'(t) \cdot u'(t + \Delta t)}{\sqrt{\sum u'(t)^2 \sum u'(t + \Delta t)^2}}$$

Uitwisseling van impuls tussen hoofdgeul en uiterwaard

De uitwisseling van impuls tussen hoofdgeul en uiterwaard wordt uitgedrukt in v' . Omdat de EMS onbetrouwbare resultaten genereert en bovendien niet in de uiterwaard kan meten, is het niet mogelijk v' goed te bepalen. Vanwege een evenredig verband tussen v' en u' , kan de uit LDA-metingen bepaalde u' als indicatie voor de mate van uitwisseling in dwarsrichting gehanteerd worden. Uit EMS-metingen wordt nog wel een correlatiecoëfficiënt (u, v) berekend:

$$R_{uv} = \frac{Cov(u, v)}{\sigma_u \cdot \sigma_v}$$

met:

$Cov(u, v)$ = covariantie tussen u en v

σ = standaardafwijking

Bij een waarde van $R_{uv} = 1$ (= maximale waarde) zijn u en v in fase.

Deze metingen zijn alleen uitgevoerd voor opstellingen 1 en 6.

Correlatie van langssnelheden in uiterwaard en hoofdgeul

Omdat in opstelling 6 op twee y-posities wervels kunnen voorkomen is het belangrijk het verband tussen deze wervels te onderzoeken. Daaronder valt o.a. een mogelijk faseverschil tussen de twee periodieke bewegingen. Uit de meetsignalen van de EMS en LDA kan een correlatiecoëfficiënt voor u_{ems} (in de hoofdgeul) en u_{lda} (in de uiterwaard) bepaald worden:

$$R_{u_{lda}u_{ems}} = \frac{Cov(u_{lda}, u_{ems})}{\sigma_{u_{lda}} \cdot \sigma_{u_{ems}}}$$

Daarnaast is de correlatie tussen u_{lda} en v_{ems} bepaald. Deze metingen zijn alleen uitgevoerd voor opstelling 6 waarbij LDA en EMS gelijktijdig opereren.

4.2.2 PTV-techniek

Met de PTV-techniek worden *snelheidsvelden* aan het oppervlak gemeten (i.t.t. tot de *puntmetingen* met LDA en EMS). Het opnamegebied is ongeveer 4.5 bij 4.5 meter en bevat de menglaag met aan weerszijden een uniform gedeelte van de hoofdgeul respectievelijk de uiterwaard. Voor meer informatie over de PTV-methode wordt verwezen naar paragraaf 3.4: Meetapparatuur en het werk van *Van Prooijen* [19].

Twee soorten meetseries worden met de PTV-methode geproduceerd:

- Series voor tijdsgemiddelde snelheden met vectorvelden waarbij van elke drie seconden de vectorvelden van één seconde worden opgeslagen.
- Series voor momentane snelheden met vectorvelden waarbij voor de totale meetduur

alle vectorvelden worden opgeslagen.

Tijdsgemiddelde snelheden

Door op een aantal plaatsen in langsrichting een dwarsprofiel van de horizontale langssnelheid te bepalen, wordt de ontwikkeling van de menglaag zichtbaar. De snelheden zijn plaatsgemiddeld over het opnamegebied in langsrichting en over 0.1 m. in dwarsrichting wat een rooster van 1 bij 40 cellen oplevert. De plaats wordt gedefinieerd als de x-coördinaat in het midden van het opnamegebied. De snelheden zijn tijdsgemiddeld over de totale meetduur van de series van het opnamegebied (ongeveer 100 seconden).

Momentane snelheden

Om de wervels zichtbaar te maken, wordt op een plaats waar de stroming quasi-uniform is een tijdserie van ongeveer 30 s met vectorvelden geproduceerd. De snelheden zijn plaatsgemiddeld over ca. 0.18 m in langsrichting en ca. 0.14 m. in dwarsrichting in een rooster van 25 bij 25 cellen. De vectorvelden zijn tijdsgemiddeld over 1 seconde en kunnen in series met verschillende tijdstappen worden gepresenteerd. Om de voortplanting van de wervels goed te kunnen volgen, wordt meestal een tijdstap van 3 seconden aangehouden - gebaseerd op een wervel met een karakteristieke periode van 30 s.. De wervels worden zichtbaar door de voortplantingssnelheid van het vectorveld af te trekken.

Voortplantingssnelheid

De voortplantingssnelheid van de wervels wordt bepaald uit de correlatie tussen de dwarssnelheden (v) van twee vectorvelden (rooster van 25x25). De correlatiecoëfficiënt is gedefiniëerd als:

$$R(\Delta x, \Delta t) = \frac{\sum v(x, t) \cdot v(x + \Delta x, t + \Delta t)}{\sqrt{\sum v(x, t)^2 \cdot \sum v(x + \Delta x, t + \Delta t)^2}}$$

Er is sprake van een gebied 2 dat ten opzichte van gebied 1 over een afstand Δx en een interval Δt is verschoven. Een maximum correlatie treedt op bij een zekere $\Delta x / \Delta t$. De gevonden $\Delta x / \Delta t$ is de voortplantingssnelheid van de wervels, uitgaande van een 'bevroren structuur' met constante snelheid in stroomafwaartse richting.

4.2.3 Golfhoogtemeter

De golfhoogtemeter wordt alleen in opstelling 1 gebruikt ten behoeve van verhangmetingen en waterstandsvariëaties in de tijd die door de wervels veroorzaakt kunnen worden (zie Ikeda&Sano [12]). Op drie langsgaaiën (op overgang, in uiterwaard en hoofdgeul) wordt op locaties met onderlinge afstand van twee meter de waterstanden gemeten. In hoofdgeul en uiterwaard bedraagt de meettijd twee minuten terwijl in de menglaag een meettijd van 5 minuten wordt aangehouden. Het werkelijke verhang wordt bepaald door het gemeten verhang te corrigeren met het brughoogteverloop.

4.3 Ontwikkeling van de menglaag

De menglaag is uitontwikkeld als een quasi-uniforme stroming wordt bereikt. Een constante tijdsgemiddelde breedte is bereikt. Voor alle opstellingen in fase 1 en 2 wordt de ontwikkelafstand van de menglaagstroming bepaald. Voor een uitontwikkelde stroming moeten de volgende parameters in stroomafwaartse richting constant worden:

- De breedte van de menglaag in hoofdgeul ($\delta_{\text{hoofdgeul}}$) en uiterwaard ($\delta_{\text{uiterwaard}}$)

Op een raai in langsrichting (in de menglaag, bijv. op de overgang $y=0$):

- de horizontale langssnelheid (u)
- de turbulente intensiteit (u')
- aandeel van de grootschalige wervels in de totale turbulente kinetische energie (u'^2_w/u'^2)

De ontwikkeling van de menglaag wordt het best en het snelst in kaart gebracht met behulp van de PTV-techniek. Daarmee wordt op een snelle manier een ruimtelijke verdeling van de horizontale snelheid in langsrichting gemaakt. De ontwikkeling van $\delta_{\text{uiterwaard}}$ en $\delta_{\text{hoofdgeul}}$ kan uit de dwarsprofielen van de horizontale snelheid worden afgelezen. Het doormeten van dwarsraai met LDA zou teveel tijd vragen (800 minuten voor 25 meetpunten op een dwarsraai; PTV: 120 minuten voor een dwarsraai). De LDA wordt wel gebruikt om op langssraai de andere gevraagde parameters u , u' en u'^2_w/u'^2 te bepalen. Omdat in *Van Prooijen* [19] bleek dat het centrum van de menglaag verschoof in dwarsrichting, wat betekent dat de ontwikkeling niet op een vaste y -coördinaat kan worden afgelezen, wordt in opstellingen 1 en 3 ook op andere nabijgelegen langssraai gemeten.

4.4. Grootschalige horizontale wervels

Het bepalen van de eigenschappen van de grootschalige wervels vindt plaats op een afstand voldoende stroomafwaarts waar aangenomen wordt dat de menglaag is uitontwikkeld en de wervels gemiddeld niet meer groeien. In dit uniforme gebied is het nog wel mogelijk dat een wervel kan groeien maar doordat wervels ook afbreken is in dit gebied de gemiddelde groei nul.

Om inzicht te krijgen in de uitwisseling van stoffen waarvoor de wervels kunnen zorgen, moet een aantal aspecten van de wervels onderzocht worden. *Van Prooijen* [19] heeft een aantal eigenschappen van de wervels bestudeerd. Hier wordt meer toepassingsgericht te werk gegaan, met het oog op de mate van uitwisseling van stoffen tussen hoofdgeul en uiterwaard die tot sedimentatie in de uiterwaard kan leiden. Met dit doel voor ogen wordt aan de volgende eigenschappen van de wervels aandacht gegeven:

- Periodiciteit en regelmatigheid
- Intensiteit
- Afmetingen en samenhang
- Ligging ten opzichte van de overgang
- Waterstandsfluctuaties

- Uitwisseling en mogelijke sedimentatie in uiterwaard

Voor het bepalen van de eigenschappen wordt gebruik gemaakt van de bewerkingen van de meetresultaten die in par. 4.2 genoemd zijn. Voor elk aspect wordt aangegeven op welke wijze deze wordt bepaald en wat het doel ervan m.b.t. de uitwisseling is. Het geheel van eigenschappen geeft een indicatie voor de mate van uitwisseling van impuls en stoffen. De eigenschappen worden eerst nader toegelicht.

4.4.1 Periodiciteit en regelmatigheid

In *Van Prooijen* [19] is reeds aangetoond dat de grootschalige horizontale wervels een karakteristieke tijdschaal, een 'eigenperiode', hebben. Deze kan bepaald worden uit:

1. het meetsignaal:

$$T_k = \frac{t}{N}$$

met:

T_k = karakteristieke tijdschaal van de wervels

t = tijdsduur van de meting

N = aantal waargenomen wervels

2. het energiedichtheidsspectrum:

$$T_k = \frac{1}{f_p}$$

met:

f_p = piekfrequentie

3. het autocorrelatiediagram, waarin de karakteristieke tijdschaal bij de maximale correlatie wordt afgelezen

Een aspect dat met name van belang is voor de uitwisseling tussen hoofdgeul en uiterwaard is de regelmatigheid waarmee de wervels optreden. Onder een regelmatig optreden van wervels wordt verstaan dat de individuele periodes van de wervels onderling niet veel verschillen. Omdat de generatie van grootschalige wervels in het quasi-uniforme gebied een random proces is, zal er altijd wel enige variatie van de periode van de wervels in tijd en plaats blijven bestaan. De regelmatigheid kan kwalitatief worden bepaald uit:

- het meetsignaal (LDA) waarin het patroon van pieken en dalen in de snelheid zichtbaar is
- vectorvelden (PTV)

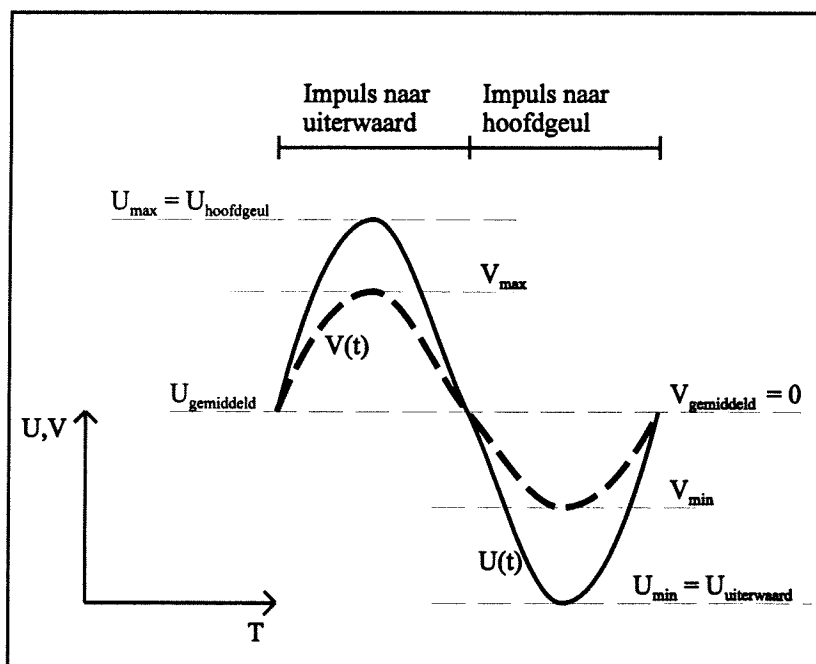
Voor opstelling 6 (kribben) bevinden zich aan beide zijden van het kribvak, op de lijn $y = 0$ en $y = -1.0$ m, buigpunten in het snelheidsprofiel. Uitgaande van de Kelvin-Helmholtz-theorie

zouden op op beide posities wervels gegenereerd moeten worden. Het mogelijke faseverschil in periode van de wervels tussen $y = 0$ en $y = -1.0$ wordt bepaald uit de correlatiecoëfficiënt tussen de langssnelheden op $y = 0$ en $y = -1.0$.

4.4.2 Intensiteit

De fluctuaties van de dwarssnelheid v geven de mate van uitwisseling tussen hoofdgeul en uiterwaard weer. De intensiteit van deze uitwisseling wordt uitgedrukt in de turbulente intensiteit v' . De turbulente intensiteit v' kan met de beschikbare meetapparatuur echter niet bepaald worden (tenzij de onnauwkeurige EMS wordt gebruikt). Het is wel mogelijk om op basis van de turbulente intensiteit u' (in langsrichting) de intensiteit van de uitwisseling door grootschalige horizontale wervels te analyseren. De turbulente intensiteit u' wordt vooral bepaald door het snelheidsverschil tussen uiterwaard en hoofdgeul. Er bestaat een verband tussen u en v . Dit wordt het best duidelijk op de overgang. Daar zijn u' en v' tevens in hoge mate positief gecorreleerd (zie *Knight&Shiono* [15]). Figuur 4.1 geeft een nogal schematisch verloop van u en v weer. In werkelijkheid is het verloop veel onregelmatiger, grilliger. Het op- en neer pendelen van de snelheid u impliceert dat uitwisseling van impuls plaats vindt tussen uiterwaard en hoofdgeul. De netto uitwisseling van impuls in dwarsrichting is vanwege behoud van impuls uiteindelijk 0 (over een bepaalde tijd of plaats).

De intensiteit van uitwisseling in dwarsrichting door de grootschalige wervels kan dus uitgedrukt worden in de turbulente intensiteiten u' uit LDA-metingen. Evenals voor de ontwikkeling in langsrichting wordt het aandeel van de grootschalige wervels in de totale turbulente kinetische energie (u'^2/u^2) bepaald, maar nu in dwarsrichting. Opgemerkt dient nog te worden dat u' niet zomaar gelijk kan worden gesteld aan de intensiteit van de



Figuur 4.1: Schematisch verloop van u en v in de tijd op de overgang uitgaande van een faseverschil van 0

individuele wervels. U' is een ensemblagemiddelde (tijdschaal van 30 minuten waarin grote en kleine fluctuaties elkaar kunnen afwisselen).

4.4.3 Afmetingen en samenhang

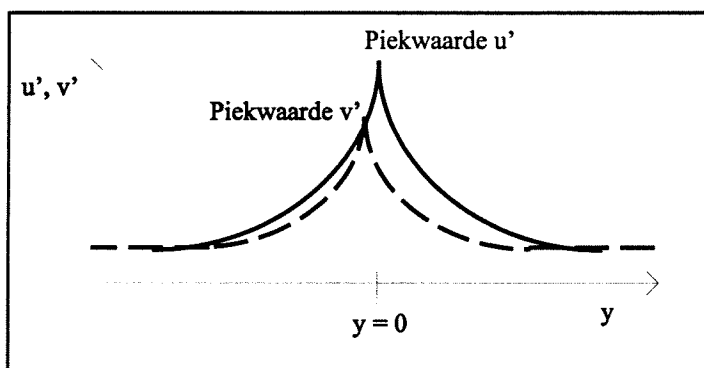
De afmetingen van een wervel kunnen alleen goed bepaald worden als sprake is van samenhangende wervels. Hiervan is sprake als de wervels in PTV-vectorvelden goed zichtbaar zijn. De mate van samenhang kan kwantitatief bepaald worden uit autocorrelatiediagrammen (LDA). Zoals in *Van Prooijen* [19] al bleek, moet rekening worden gehouden met tijdseries (30 minuten) waarin de individuele wervels samenhangend zijn maar relatief klein in aantal. Het autocorrelatiediagram wijst in zo'n geval toch op een geringe mate van samenhang. De lengte van een wervel zegt iets over de grote van het gebied in langsrichting waarop uitwisseling plaatsvindt. De lengte van de wervels kan zowel kwalitatief als kwantitatief bepaald worden. Uit PTV-snelheidsvelden en kleurstofmetingen kan voor individuele wervels de lengte afgeschat worden. Op basis van de periode (T_k) en voortplantingssnelheid (c_w) van de wervels kan kwalitatief een gemiddelde lengte van de wervels worden berekend:

$$L = T_k \cdot c_w$$

De breedte van een wervel geeft aan over welke breedte de uitwisseling plaatsvindt. Deze kan bepaald worden uit PTV-snelheidsvelden en kleurstofmetingen. De breedte waarover de kleurstof zich verspreid is echter afhankelijk van de plaats waar ingespoten wordt.

4.4.4 Ligging ten opzichte van de overgang

De ligging van de wervels ten opzichte van de overgang. De ligging van het middelpunt wordt kwalitatief bepaald uit PTV-vectorvelden indien het middelpunt van de individuele wervel goed zichtbaar is. Deze positie wordt vergeleken met de positie van het buigpunt in het dwarsprofiel van de horizontale langssnelheid.



Figuur 4.2: Schematisch verloop van u' en v' op een dwarsraai met overgang op $y = 0$. Piekwaarde en -breedte kunnen worden afgelezen.

4.4.5 Waterstandsfluctuaties

Waterstandsfluctuaties met een periode gelijk aan die van de wervels zijn het gevolg van de draaiing. De waterstand varieert van laag in het middelpunt van een wervel tot hoog aan de randen van de wervels (in langsrichting). Afhankelijk van de grootte van deze fluctuaties kunnen in veldonderzoek door middel van waterstandsmetingen wervels gedetecteerd worden.

4.4.6 Uitwisseling en mogelijke sedimentatie in uiterwaard

Aan de hand van de eerder genoemde eigenschappen wordt inzicht verkregen in de mate van uitwisseling van stoffen als gevolg van de grootschalige wervels. De mate van uitwisseling van impuls is in dit stadium nog niet in kwantitatieve termen uit te drukken. Mede omdat voor grootheden in dwarsrichting zoals v' nog geen bruikbare meetresultaten zijn. Wel kunnen de opstellingen op een aantal aspecten die betrekking hebben op uitwisseling en de mogelijke sedimentatie in de uiterwaard, onderling vergeleken worden.

Met betrekking tot de uitwisseling zijn de volgende aspecten van belang:

- de piekwaarde in de turbulente intensiteit u' (en piekenergiedichtheid S)
- de breedte en ligging van de menglaag

De piekwaarde voor u' geeft een indicatie voor de piekwaarde van v' . Op de locatie waar de piekwaarde wordt bereikt is de intensiteit van de uitwisseling tussen hoofdgeul en uiterwaard het grootst (figuur 4.2). Deze locatie komt meestal goed overeen met het middelpunt van de grootschalige wervel. De breedte van de menglaag is een maat voor de tijdsgemiddelde breedte van de grootschalige wervels. Daarbij kan nog onderscheid gemaakt worden tussen de breedte in de uiterwaard en de breedte in de hoofdgeul. Een grootschalige wervel die zich voor een groot gedeelte in de uiterwaard bevindt, levert waarschijnlijk een grotere bijdrage aan de sedimentatie in de uiterwaard dan een wervel die meer in de hoofdgeul is gelegen.

Bij het maken van een schatting van mogelijke sedimentatie in de uiterwaard moet met de volgende punten rekening worden gehouden:

- Tijdens hoogwater bestaat het sedimenttransport voor het grootste gedeelte uit zwevend transport (zie paragraaf 2.2.3).
- Alleen stoffen die zich hoog in de waterkolom - boven het niveau van de uiterwaard - bevinden, kunnen naar de uiterwaard getransporteerd worden.
- De karakteristieke tijdschaal geeft een indicatie van de tijd die het sediment dat door de uitwisseling in de uiterwaard komt, heeft om daar te bezinken. Er wordt uitgegaan van een impuls- en stoffen overdracht waarbij tijdsduur en intensiteit naar beide richtingen, uiterwaard en hoofdgeul, gelijk zijn (vanwege behoud van impuls).

Aan de hand van de meetresultaten wordt getracht enkele algemene formules af te leiden waarmee de eigenschappen van grootschalige wervels in praktijksituaties kwalitatief bepaald kunnen worden. Als praktijksituatie wordt de rivier de Bovenrijn genomen, waarvan een horizontale snelheidsprofiel op een dwarsraai in de rivier beschikbaar is. Uit het snelheidsprofiel wordt de gemiddelde snelheid u_c en de menglaagbreedte δ afgelezen. Door de afgeleide formules op de praktijksituatie toe te passen, wordt een kwalitatief inzicht verkregen in de uitwisseling door de wervels en de sedimentatie die daar het gevolg van is.

Hoofdstuk 5 Resultaten en interpretatie fase 1

5.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 is aangegeven hoe de ontwikkeling van de menglaag geanalyseerd kan worden. Daarnaast is aangegeven op welke eigenschappen de grootschalige horizontale wervels onderzocht worden en hoe deze eigenschappen vervolgens gekwantificeerd kunnen worden. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de opstellingen 1, 2 en 3 gepresenteerd en geïnterpreteerd waarbij ze vergeleken worden met de resultaten van de equivalente opstellingen (op het overgangstalud na) van *Van Prooijen* [19]. Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

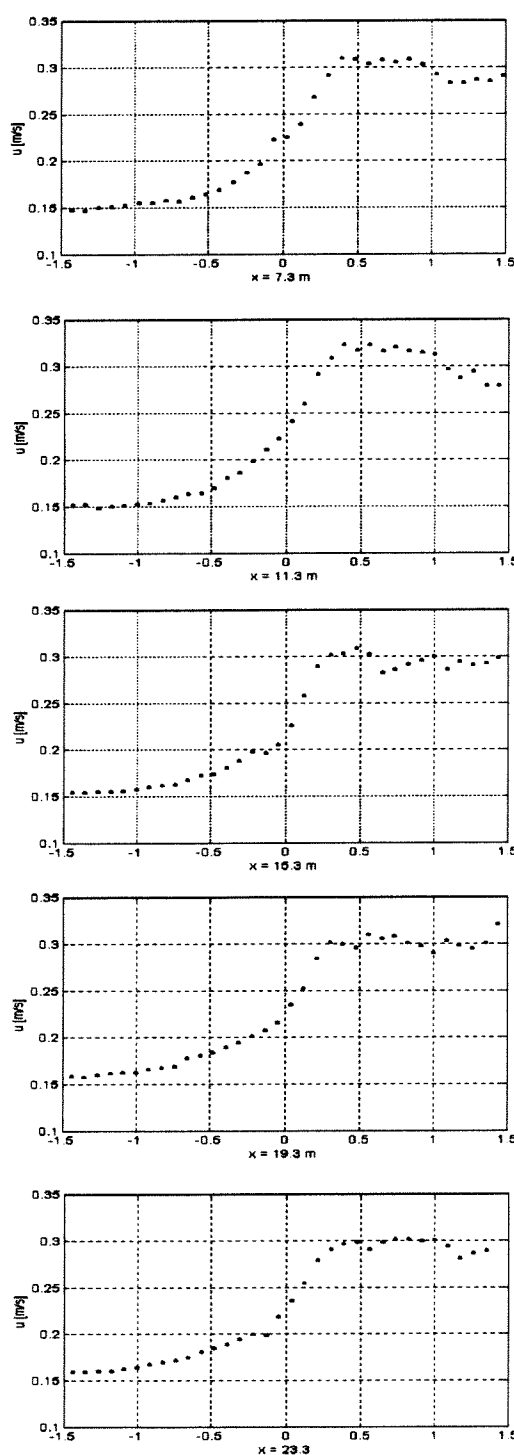
Paragraaf 5.2 behandelt de resultaten en de interpretatie betreffende de ontwikkeling van de menglaag tot een quasi-uniforme stroming. Paragraaf 5.3 behandelt de resultaten en de interpretatie betreffende de grootschalige horizontale wervels in het quasi-uniforme gebied.

5.2 Ontwikkeling van de menglaag

Opstelling 1 wordt in subparagraaf 5.2.1 uitgebreid behandeld terwijl de opstellingen 2 en 3 in 5.2.2 kort aan de orde komen. Voor specificaties van gebruikte methoden wordt verwezen naar hoofdstuk 4 en *Van Prooijen* [19].

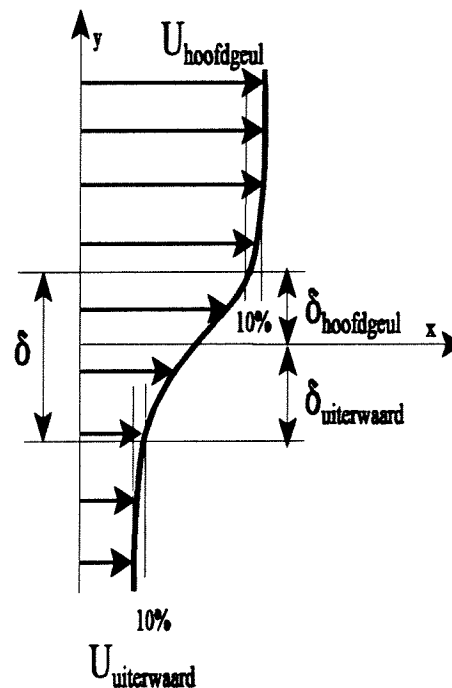
5.2.1 Opstelling 1: rechte stroming

In tijds- en plaatsgemiddelde PTV-snelheidsprofielen voor $x = 7.3$ m tot $x = 22.3$ m, in figuur 5.1 is de ontwikkeling van de menglaag te zien. Het snelheidsverloop in langsrichting blijft in uiterwaard en hoofdgeul vrijwel constant zodat aan de eis



Figuur 5.1: Dwarsprofielen van de horizontale langssnelheid aan het oppervlak (PTV) voor opstelling 1. De y-coördinaten in de hoofdgeul zijn positief.

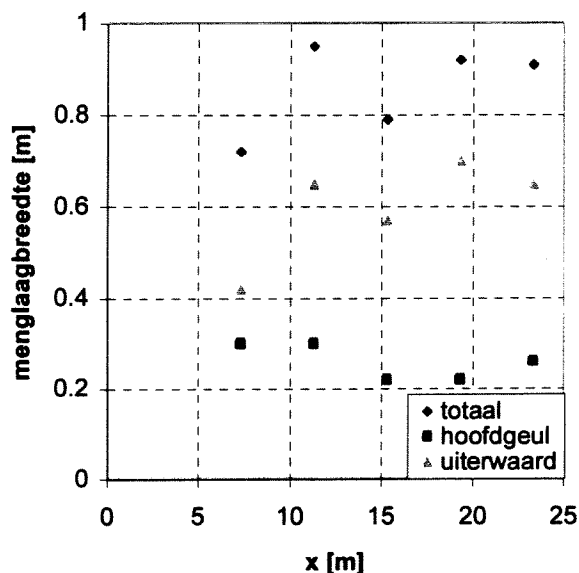
van uniformiteit van de stroming buiten de menglaag is voldaan. Slechts een lichte stijging en daling van de snelheid in de uiterwaard respectievelijk de hoofdgeul treedt op als gevolg van de menging. Aan het begin zijn voor de snelheden in de hoofdgeul lokale maxima te zien die stroomafwaarts verdwijnen. Een duidelijk knik op de overgang ($y = 0$) zoals in de opstelling met verticale stap (*Van Prooijen* [19]) is afwezig. Daarmee vertoont het experiment overeenkomsten met andere experimenten met een 1:2 talud die gedaan zijn in de FCF (*Wormleaton* [28], *Knight&Shiono* [15], *Ervine et al.* [10]) waarin een duidelijke knik ook niet aanwezig is. Evenals in de FCF-series en in de experimenten van *Van Prooijen* is hier wel sprake van een significant verschil in steilheid in y-richting (de gradient du/dy) tussen uiterwaard en hoofdgeul. Op grond van de resultaten van het FCF en dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat het 1:2 talud zorgt voor een geleidelijker overgang van een kleine gradiënt in de uiterwaard naar een grote gradiënt in de hoofdgeul.



Figuur 5.2: Definitieschets van de menglaagbreedte

Bepaling van de menglaagbreedte

Voor het bepalen van de menglaagbreedte wordt een andere methode dan de gradiëntenmethode van *Van Prooijen* [19] toegepast. Volgens deze methode wordt voor hoofdgeul en uiterwaard apart de gradiënt in het buigpunt dat samenvalt met een duidelijke knik in het snelheidsprofiel (meestal op de overgang) bepaald. Omdat in dit onderzoek geen duidelijke knik op de overgang aanwezig is, wordt deze methode niet toegepast. Omdat er toch een significant verschil in steilheid van het snelheidsprofiel en breedte van de menglaag tussen uiterwaard en hoofdgeul bestaat, wordt de menglaagbreedte voor hoofdgeul en uiterwaard wel apart bepaald. De totale menglaagbreedte wordt nu gedefinieerd als de afstand tussen een punt in de hoofdgeul en een punt in de uiterwaard waar de snelheid 10%



Figuur 5.3: Verloop van de menglaagbreedte in stroomafwaartse richting

lager respectievelijk hoger is dan de snelheid in het uniforme gebied (zie figuur 5.2).

Het verloop van de met behulp van de genoemde methode bepaalde menglaagbreedtes is in figuur 5.3 weergegeven. De ontwikkeling van de menglaagbreedte in een enkelvoudig kanaal is te benaderen met:

$$\delta(x) = \delta_{\max} \left(1 - e^{-\frac{1}{\lambda}x} \right)$$

(Bron: Van Prooijen [19], pag. 16)

waarin:

λ = karakteristieke lengtemaat

$\delta_{\max}$ = maximale menglaagbreedte

Uit figuur 5.3 worden $\delta_{\max} = 0.96$ m. en $\lambda = 6.1$ m. voor de totale menglaagbreedte bepaald door de formule door de meetwaarden te 'fitten'. De waarde voor λ van 6.5 m. in de uiterwaard, berekend met

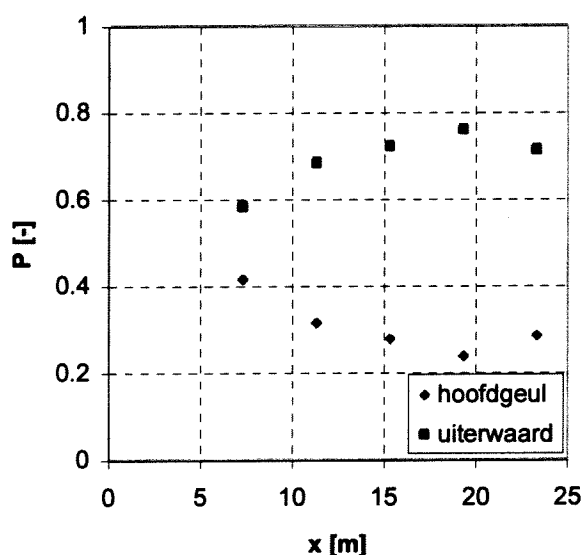
$$\lambda_{\text{uiterwaard}} = \frac{h_{\text{uiterwaard}}}{2c_{f;\text{uiterwaard}}}$$

(Bron: Van Prooijen [19], pag. 16)

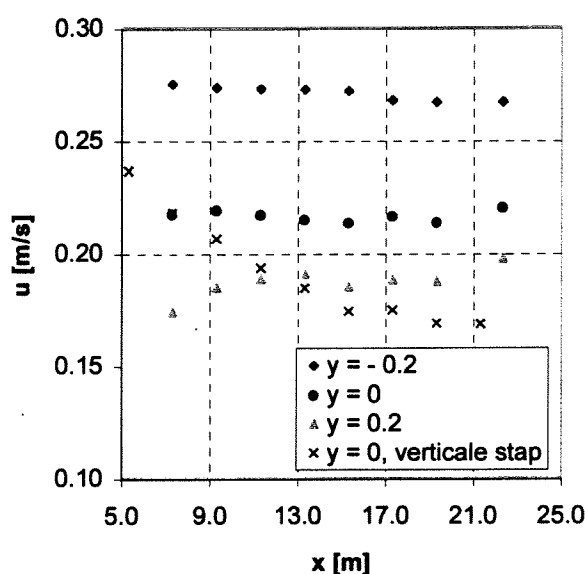
is hier vrijwel gelijk aan. De ontwikkeling van de totale menglaagbreedte wordt dus vrijwel alleen door de uiterwaard bepaald. Het relatieve aandeel P van de uiterwaard (of de hoofdgeul) in de totale menglaagbreedte kan worden geschat, uitgaande van de continuïteitsvoorwaarde, met:

$$P_{\text{hoofdgeul(uiterwaard)}} = \frac{h_{\text{uiterwaard(hoofdgeul)}}}{h_{\text{hoofdgeul}} + h_{\text{uiterwaard}}}$$

De geschatte waarden voor $P_{\text{hoofdgeul}}$ (0.26) en $P_{\text{uiterwaard}}$ (0.74) blijken overeen te



Figuur 5.4: Relatieve aandeel P van de hoofdgeul en de uiterwaard in de totale menglaagbreedte



Figuur 5.5: Verloop van horizontale langssnelheid op langsvaaien in stroomafwaartse richting (LDA)

komen met de waarden die in figuur 5.4 op $x = 15.3$ m. kunnen worden afgelezen.

In PTV-verwerking en -analyse kunnen bij het bepalen van de menglaagbreedte onnauwkeurigheden sluipen. Voor het bepalen van de *ontwikkellengte* wordt daarom ook het verloop van parameters die uit de LDA-metingen (die nauwkeuriger zijn dan de PTV-metingen) op de langsgaaen zijn bepaald, meegenomen. In figuur 5.5 is te zien dat de langssnelheid op de overgang $y = 0$ vrijwel constant blijft (0.21- 0.22 m/s). In de hoofdgeul ($y = - 0.2$ m.) is het verloop ook vrij constant terwijl in de uiterwaard ($y = 0.2$ m.) een licht stijgend verloop is te zien. Dit laatste wijst op een toename van de menglaagbreedte in de uiterwaard en komt dus overeen met de analyse op grond van de PTV-metingen.

Een verschil is echter dat de LDA-resultaten op een snellere ontwikkeling wijzen dan de PTV-resultaten. De totale menglaagbreedte lijkt op basis van de PTV-metingen vanaf $x = 19.3$ m. constant te zijn (figuur 5.3) terwijl op grond van LDA-metingen (figuur 5.5) de stroming vanaf $x = 11.3$ m. al uitontwikkeld lijkt te zijn. Ook het verloop van het aandeel van de grootschalige wervels in de turbulente kinetische energie $u'_w{}^2/u'^2$ (bijlage 5) wijst op een uitontwikkelde stroming vanaf $x = 11.3$ m. Als we echter rekening houden met onnauwkeurigheden in de analyse met PTV kan mede op basis van figuur 5.3 uitgegaan worden van een uitontwikkelde stroming vanaf $x = 11.3$ m. De ontwikkeling van de menglaag in de opstelling van *Van Prooijen* [19] (opstelling_{stap}) vertoont duidelijke verschillen met de ontwikkeling in dit onderzoek (opstelling_{stalud}):

- een duidelijke afname van de snelheid op $y = 0$ m. in stroomafwaartse richting die duidt op een verschuiving van de menglaag naar de hoofdgeul (figuur 5.5)
- een groei van de totale menglaagbreedte tot $x = 11.8$ m. en daarna een afname (zie *Van Prooijen* [19], menglaagbreedtes)
- een langere ontwikkelingslengte van 19.3 m. (figuur 5.5)

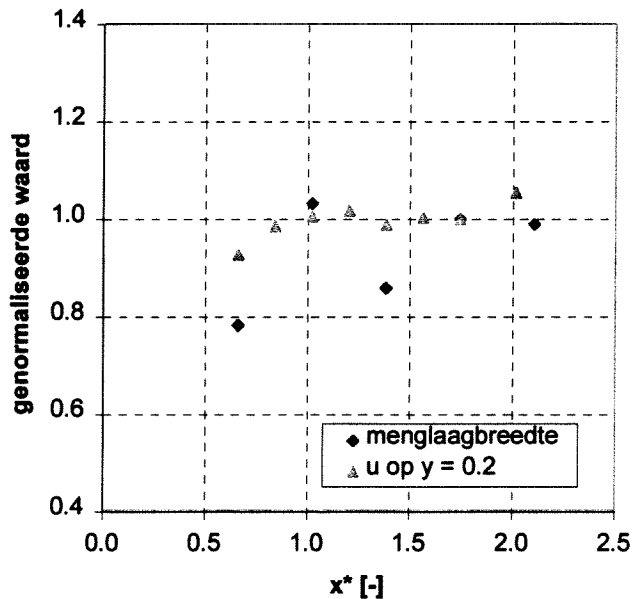
Schalingsanalyse

Voor *enkelvoudige* kanalen wordt vaak een schalinganalyse (figuur 5.6) gedaan waarbij de afstand in langsrichting verondersteld wordt evenredig te zijn met h/c_f :

$$x^* = \frac{2c_f}{h} x$$

In een *samengesteld* kanaal - waarin h en c_f voor hoofdgeul en uiterwaard verschillend zijn - kan deze analyse grofweg benaderd worden door voor h en c_f gewogen gemiddelde waarden te nemen en vervolgens een gemiddelde h/c_f te berekenen. Daarbij wordt uitgegaan van de verhouding in menglaagbreedte tussen hoofdgeul en uiterwaard op $x = 15.3$ m (figuur 5.4) van 0.26:0.74. Op basis van deze verhouding worden gewogen gemiddelde waarden voor h en c_f bepaald waarmee dan x^* wordt berekend. De y -waarden zijn geschaald ten opzichte van de waarde voor de betreffende grootte (menglaagbreedte, snelheid) op $x = 19.3$ m (met $x^* = 1.74$).

Er is een vrij groot verschil te zien tussen de ontwikkeling van menglaagbreedtes en die van de snelheid op $y = 0.2$ m.. (De snelheden op $y = 0$ m. en $y = -0.2$ m. zijn niet meegenomen omdat deze vanaf het begin al nagenoeg constant zijn). Gelet op de snelheid op $y = 0.2$ m. (LDA) zou de menglaagstroming op $x^* = 1.0$ uitontwikkeld zijn wat overeenkomt met de experimenten van *Uittewaal&Booij* [24] in een *enkelvoudige* menglaag. Op basis van de menglaagbreedte (PTV) moet de ontwikkelengte op $x^* = 1.5$ gesteld kan worden. *Van Prooijen* [19] stelt dat de menglaagstroming in zijn experiment is uitontwikkeld bij $x^* = 1.1$. Hij heeft echter geen gebruik gemaakt van een gewogen gemiddelde zodat vanwege het grotere aandeel van de uiterwaard in de menglaagbreedte, de geschaalde ontwikkelengte een factor 1.1 groter zal zijn: $x^* = 1.2$.



Figuur 5.6: Menglaagbreedtes (PTV) en snelheden (LDA) geschaald t.o.v. de waarde op $x = 19.3$ m. tegen de dimensieloze afstand x^*

Er zijn drie mogelijke verklaringen voor de verschillen in ontwikkeling(slengete) tussen beide opstellingen:

- De ontwikkelingslengte benaderd met $h/2c_f$ is voor opstelling_{talud} kleiner vanwege een kleinere waterdiepte h (-19 % voor uiterwaard en - 8 % voor hoofdgeul) en een vrijwel gelijkblijvende c_f . Omdat het aandeel van de uiterwaard in de menglaagbreedte groter is in opstelling_{talud} wordt dit effect versterkt (uitgaande van een over uiterwaard en hoofdgeul gewogen gemiddelde h en c_f). Na schaling van de ontwikkelengte met de gewogen waterdiepte blijkt deze in opstelling_{talud} nog steeds kleiner dan in opstelling_{stap}.
- Het 1:2 talud zorgt voor een snellere menging dan de verticale stap waardoor de uitwisseling sneller verloopt met als gevolg dat de stroming onder invloed van de bodemwrijving eerder uitontwikkeld is.
- De instelling van de stroming wat betreft de verdeling van het debiet over uiterwaard en hoofdgeul is in opstelling_{talud} beter. In de opstelling_{stap} is immers een herverdeling van de menglaag tussen uiterwaard en hoofdgeul te zien i.t.t. tot opstelling_{talud}.

Uit de analyse van de volgende opstellingen moet blijken welke verklaringen houdbaar zijn.

Dwarsprofiel in uitontwikkelde stroming

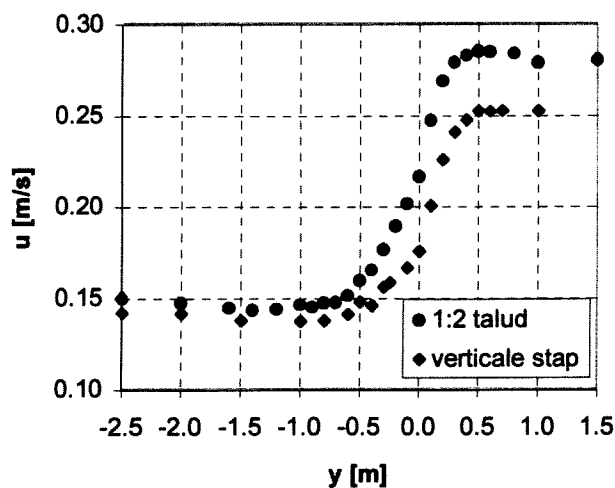
In figuur 5.7 is het dwarsprofiel van de horizontale langssnelheid (LDA) in de uitontwikkelde menglaagstroming voor beide opstellingen weergegeven.

Hierin zijn een paar overeenkomsten te zien:

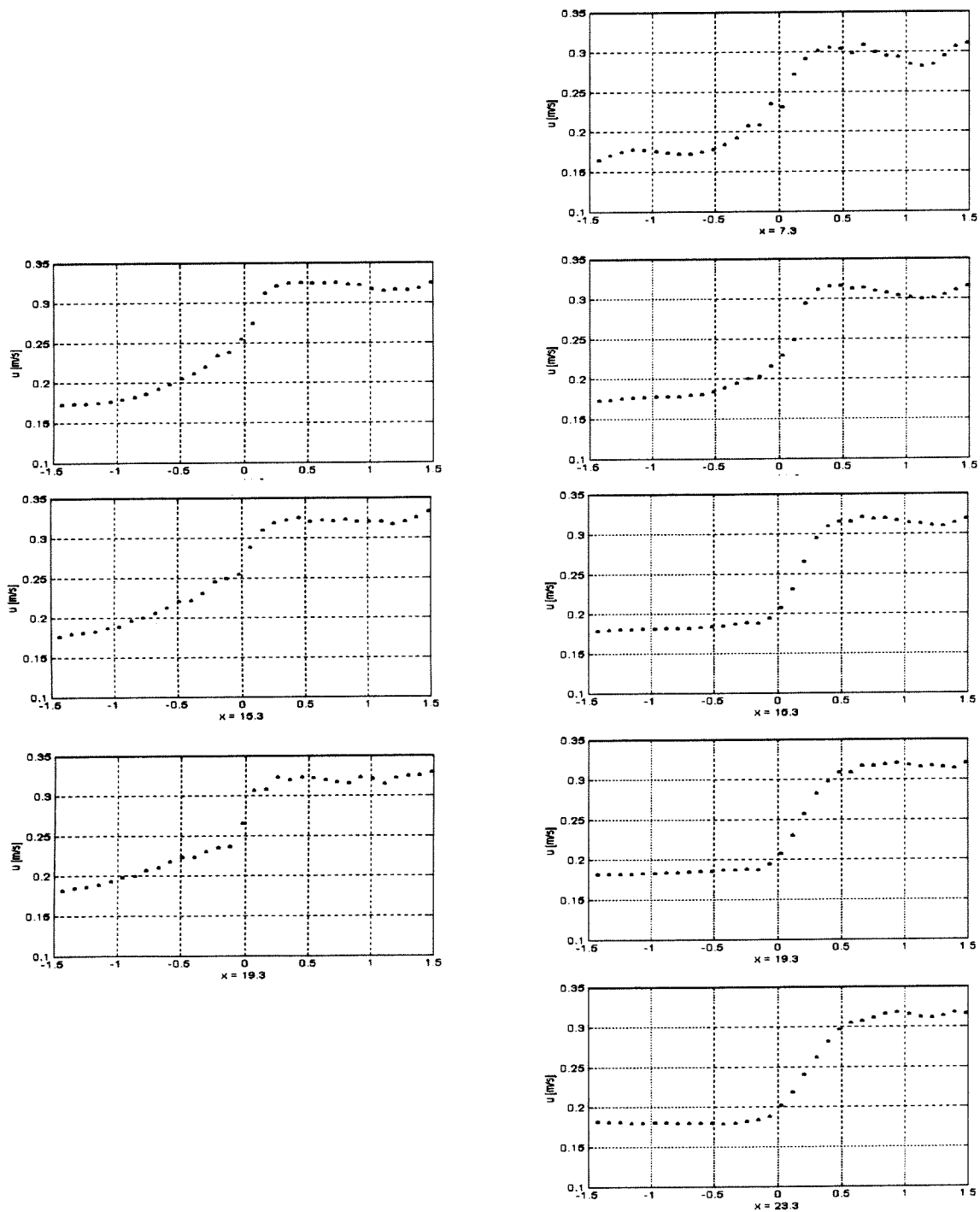
- De totale menglaagbreedte is ongeveer even groot.
- De snelheid in de uiterwaard is ongeveer even groot.

Belangrijke verschillen voor opstelling_{talud} ten opzichte van opstelling_{stap} zijn:

- een groter snelheidsverschil en daardoor een grotere gemiddelde snelheidsgradiënt.
- een relatief grote snelheidsgradiënt in de uiterwaard.
- Een groter aandeel van de uiterwaard in de totale menglaagbreedte.
- Geen duidelijke knik in het snelheidsprofiel op de overgang.



Figuur 5.7 : Dwarsprofiel van de horizontale langssnelheid (LDA) op $x = 17.3$ m. Positieve y -coördinaten in de hoofdgeul. De meetpunten liggen 2 cm onder het wateroppervlak.

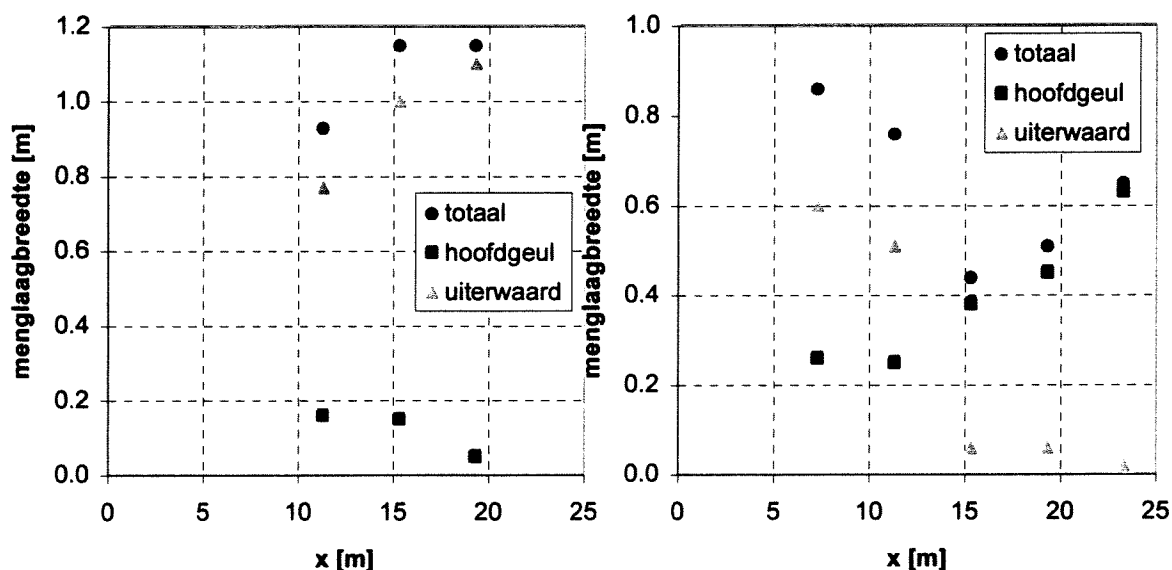


Figuur 5.8 Dwarsprofielen van de horizontale langssnelheid aan het oppervlak (PTV) voor de opstelling 2 (links) en opstelling 3 (rechts). De y -coördinaten in de hoofdgeul zijn positief.

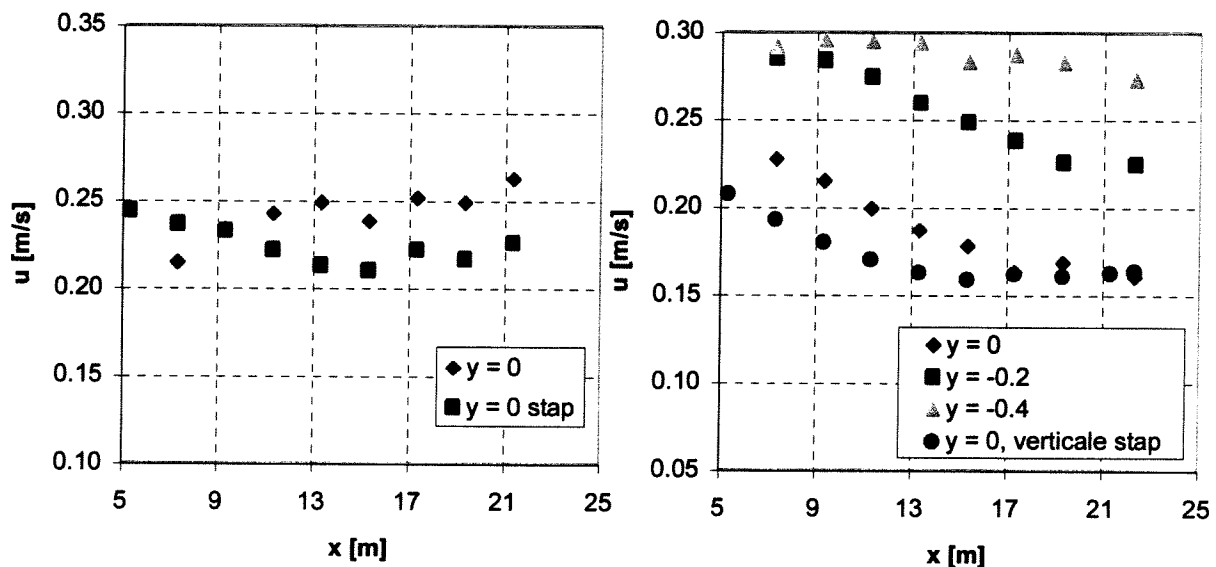
5.2.2 Opstelling 2 en 3: schuine aanstromingen

In figuur 5.8 is de ontwikkeling van het snelheidsprofiel in de opstellingen 2 en 3 te zien. Voor opstelling 3 (stroming richting hoofdgeul) blijven de snelheden buiten de menglaag niet zo mooi constant in langsrichting als in opstelling 1. De stroming is echter ook lastiger in te stellen vanwege de schuine muurtjes aan weerszijden.

De menglaagbreedtes voor beide opstelling zijn uitgezet in figuur 5.9. De schuine aanstromingen in de opstellingen 2 en 3 hebben in dit onderzoek ongeveer hetzelfde effect op de ontwikkeling van de menglaag als bij *Van Prooijen* [19]: in opstelling 2 komt de menglaag meer in de uiterwaard (t.o.v. opstelling 1) en in opstelling 3 uiteindelijk geheel in de hoofdgeul te liggen. De stroming in opstelling 2 is voor beide onderzoeken vanaf ongeveer $x = 16$ m. quasi-uniform. De snelheid op de overgang blijft in opstelling_{talud} echter vanaf $x = 13.3$ m. al min of meer constant met enige variaties (figuur 5.10). Het grote aandeel van de uiterwaard in de totale menglaagbreedte zou tot gevolg moeten hebben dat de stroming eerder uitontwikkeld is dan in opstelling 1, wat hier niet het geval is (bij *Van Prooijen* [19] wel). Misschien is een minder goede instelling hierin een belangrijke factor. Voor opstelling 3 groeit de menglaag in opstelling_{talud} sneller dan in opstelling_{stap} vanwege het grotere snelheidsverschil zodat de menglaag al relatief breed kan worden op de uiterwaard voordat schuine aanstroming significant effect heeft op de positie van de menglaag. De verschuiving van de totale menglaag naar de hoofdgeul verloopt hierdoor langzamer dan in opstelling_{stap}. De menglaag ligt vanaf $x = 15.3$ m. bijna geheel in de hoofdgeul terwijl voor opstelling_{stap} de menglaag vanaf $x = 15.3$ m. al volledig in de hoofdgeul ligt. Het talud zorgt daarbij i.t.t. de verticale stap voor een geleidelijke overgang tussen uiterwaard en hoofdgeul. De snellere ontwikkeling in opstelling_{stap} is ook te zien in het verloop van de snelheid in langsrichting (figuur 5.10). Vanaf $x = 15.3$ m. wordt de snelheid voor opstelling_{stap} constant terwijl vanaf $x = 23.3$ m. dit het geval lijkt te zijn voor opstelling_{talud}. Aan het verloop van de snelheid op $y = 0$ kan echter niet meer de ontwikkeling van de menglaag worden afgelezen



Figuur 5.9 Verloop van de menglaagbreedte in stroomafwaartse richting voor opstelling 2 (links) en opstelling 3 (rechts).



Figuur 5.10 Verloop van de horizontale langssnelheid (LDA) in stroomafwaartse richting voor opstelling 2 (links) en opstelling 3 (rechts).

als deze volledig in de hoofdgeul ligt (omdat het punt $y=0$ zich dan buiten de menglaag bevindt). Doordat de menglaag meer in de hoofdgeul ligt wordt de bodemwrijving minder hetgeen een grotere ontwikkelengte tot gevolg heeft. De stroming bereikt in beide gevallen geen quasi-uniforme toestand omdat de menglaagbreedte op $x=23.3$ m. nog groeit. Hiermee dient rekening gehouden te worden bij het onderzoek naar de horizontale wervels. De menglaag in de hoofdgeul lijkt zich *lineair* te ontwikkelen vanaf $x=19.3$ (in opstelling_{stap} al vanaf het begin het geval). Bij invullen van de meetdata voor gemiddelde snelheden en de groei van de menglaag in de formules van *Brown&Roshko* [6] voor lineaire groei:

$$\frac{\partial \delta}{\partial x} = 0.181 \frac{u_{\text{hoofdgeul}} - u_{\text{uiterwaard}}}{u_{\text{hoofdgeul}} + u_{\text{uiterwaard}}}$$

blijkt de verbredingscoëfficiënt van 0.181 hier een waarde van 0.178 te hebben (voor snelheden aan het oppervlak een waarde van 0.160).

Het talud blijkt in de gevallen van opstelling 2 en 3 niet tot een snellere ontwikkeling te leiden zoals in opstelling 1. Vanwege een groter aandeel van de uiterwaard in de menglaag voor opstelling 2 zou de ontwikkelingslengte korter moeten zijn dan in het geval een verticale stap. Dit is niet het geval. Van de genoemde drie mogelijke verklaringen in subparagraaf 5.2.1 voor het sneller uitontwikkeld zijn van de stroming in opstelling 1 blijkt de derde verklaring 'dat een goede instelling een snelle ontwikkeling bevordert' veruit de belangrijkste te zijn. De andere twee zijn tot dusver nog discutabel.

Dwarsprofiel in uitontwikkelde stroming

In figuur 5.11 zijn de dwarsprofielen van de horizontale langssnelheid (LDA) in de uitontwikkelde menglaagstroming voor opstellingen 2 en 3 weergegeven. Opvallend is dat

voor opstelling_{stap} de snelheid in de hoofdgeul buiten de menglaag blijft stijgen. Dit is niet het geval in PTV-snelheidsprofielen (zie *Van Prooijen* [19]). Vooral in opstelling 3 heeft dit gevolgen voor de definiëring van het snelheidsverschil en de menglaagbreedte in de hoofdgeul met behulp van de gradiëntenmethode.

Belangrijke verschillen voor opstelling_{2talud} ten opzichte van opstelling_{2stap} zijn:

- een veel grotere gradiënt in de uiterwaard.
- een grotere menglaagbreedte en een groter aandeel van de uiterwaard in de totale menglaagbreedte
- geen duidelijke knik in het snelheidsprofiel op de overgang maar een flauwe overgang

Belangrijke verschillen voor opstelling_{3talud} ten opzichte van opstelling_{3stap} zijn:

- een grotere gradiënt in de hoofdgeul.
- een kleinere menglaagbreedte in de hoofdgeul

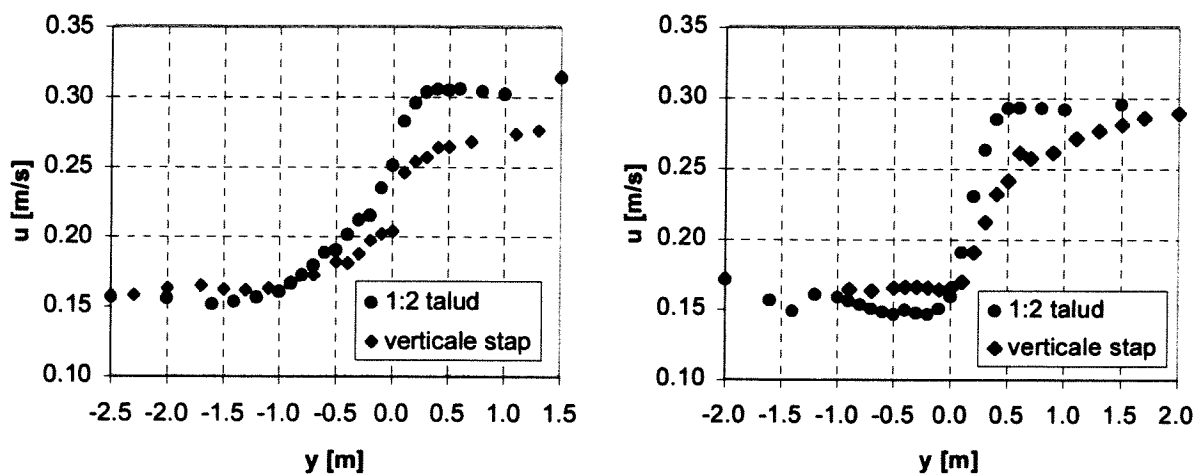
In tabel 5.1 zijn enkele verschillen gekwantificeerd.

5.2.3 Vergelijking opstellingen 1, 2 en 3

De menglaagbreedtes in experimenten_{talud} zijn groter dan in de experimenten_{stap} als gevolg van:

- een groter snelheidsverschil: factor 1.2 voor snelheden aan het oppervlak
- een grotere verhouding in menglaagbreedte tussen uiterwaard en hoofdgeul

Het verschil in grootte van de snelheidsgradiënt tussen uiterwaard en hoofdgeul is voor de experimenten_{talud} kleiner. Dit wijst op een grotere uitwisseling tussen uiterwaard en



Figuren 5.11: Dwarsprofiel van de horizontale langssnelheid (LDA) op $x = 17.3$ m. voor opstelling 2 (links) en opstelling 3 (rechts). Positieve y -coördinaten in de hoofdgeul. Meetpunten liggen 2 cm onder het wateroppervlak.

hoofdgeul. Dit wordt veroorzaakt door het 1:2 talud dat i.t.t. de verticale stap voor een geleidelijke overgang in diepte tussen hoofdgeul en uiterwaard zorgt, hetgeen de uitwisseling blijkbaar bevordert. De verticale stap daarentegen werkt als een wand waardoor een zekere wandturbulentie, een grenslaag, ontstaat (zie figuur 5.7 en 5.11).

In opstelling 1 is het aandeel van de uiterwaard in de totale menglaagbreedte groter dan dat van de hoofdgeul. Bij een meer in de uiterwaard gelegen menglaag (opstelling 2) is de totale menglaagbreedte groter. Voor het geval dat de menglaag meer (geheel) in de hoofdgeul ligt (opstelling 3) is niet bekend wat de menglaagbreedte is. Gelet op het bodemwrijvingsgetal

$$S = \frac{c_f \delta \frac{1}{2}(u_{\text{hoofdgeul}} + u_{\text{uiterwaard}})}{h \frac{u_{\text{hoofdgeul}} - u_{\text{uiterwaard}}}{2}}$$

zou de maximale waarde voor S (zie paragraaf 2.3) in de hoofdgeul bij een grotere menglaagbreedte moeten worden bereikt dan in de uiterwaard - c_f is namelijk kleiner en h is groter dan in de uiterwaard. In opstelling 3 zou de menglaagbreedte in uitontwikkelde situatie dan ook groter moeten zijn dan in opstelling 1 en 2. Om de aandrijvende kracht (veroorzaakt door het diepteververschil) te behouden, moet de menglaag echter aan de uiterwaard blijven grenzen. Dit kan een beperkende invloed op de menglaagbreedte hebben.

Dat in opstelling 1 de menglaag in de uiterwaard breder is dan in de hoofdgeul ($P_{\text{hoofdgeul}}:P_{\text{uiterwaard}} = 3:7$), is het gevolg van de continuïteitsvoorwaarde (zie paragraaf 5.2.1), die slechts voor een rechte aanstroming geldt. Opstelling 1 in *Van Prooijen* ($P_{\text{hoofdgeul}}:P_{\text{uiterwaard}} = 4:6$) blijkt hier niet helemaal aan te voldoen als gevolg van een minder goede instelling.

opstelling	ontwikkel- lengte [m]	menglaagbreedte δ [m]			$P_{\text{hoofdgeul}}:P_{\text{uiterwaard}}$	max. snelheidsgradiënt [1/s]	
		hoofdgeul	uiterwaard	totaal		hoofdgeul	uiterwaard
1 talud	11	0.25	0.65	0.9	3 : 7	0.35	0.14
1 stap	20	0.3	0.45	0.75	4 : 6	0.25	0.07
2 talud	16	0.1	1.1	1.2	1 : 9	0.3	0.16
2 stap	16	0.3	0.6	0.9	3 : 7	0.18	0.08
3 talud	> 23	> 0.65	0	> 0.65	1 : 0	< 0.39	< 0.08
3 stap	> 23	> 0.65	0	> 0.65	1 : 0	< 0.18	0

Tabel 5.1: Ontwikkelengtes, menglaagbreedtes, verhouding menglaagbreedtes (P) en snelheidsgradiënten voor de drie opstellingen.

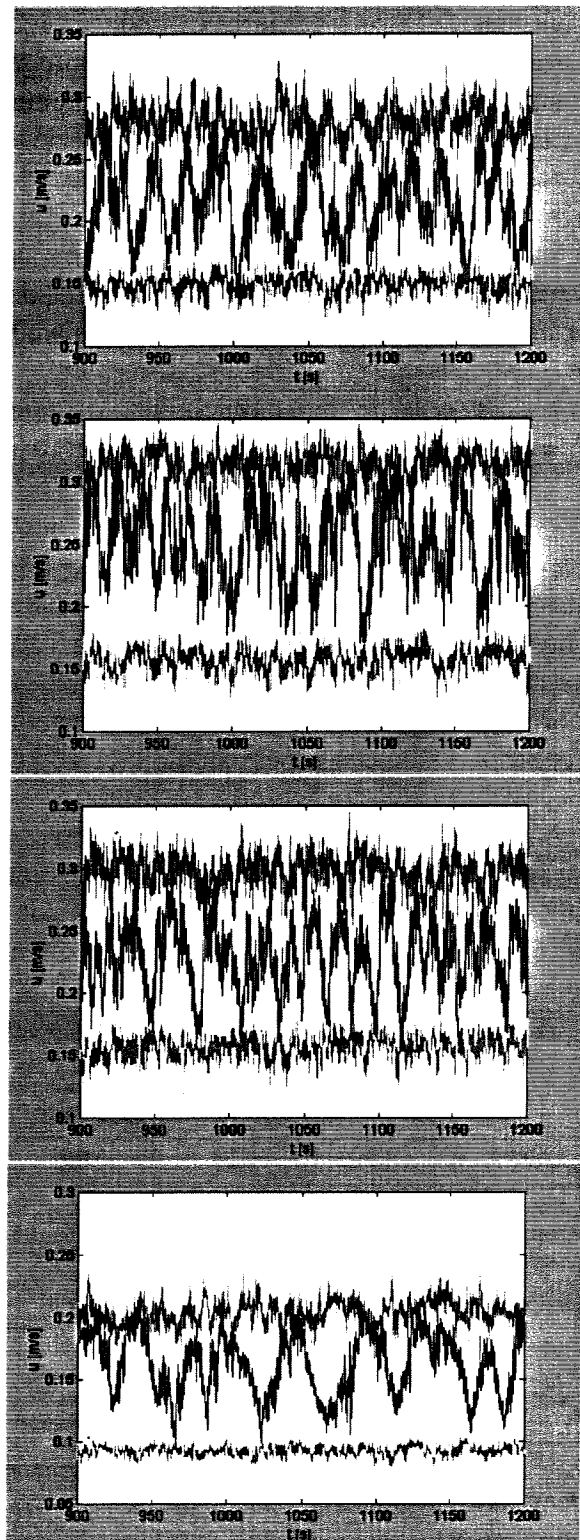
5.3 Grootschalige horizontale wervels

5.3.1 Periodiciteit en regelmatigheid

In het meetsignaal (figuur 5.12) van de horizontale langssnelheid u (LDA) is in alle drie opstellingen op de overgang een patroon van pieken en dalen te zien die wijzen op het periodieke karakter van de stroming. In dat patroon is duidelijk een onregelmatigheid zichtbaar: er komen korte en langere periodes voor en de amplitudes variëren in grootte. In opstelling 2 zijn de fluctuaties onregelmatiger (zowel in periode als in amplitude) dan in de opstellingen 1 en 3.

Op kwalitatieve wijze kunnen periodes van individuele wervels bepaald worden. In het *meetsignaal* van de LDA, de *PTV-vectorvelden* (tijdseries in bijlage 2) en de *kleurstofopnamen* kunnen individuele periodes worden bepaald. Voor elke meetmethoden verschillen de gevonden periodes echter van elkaar omdat sprake is van een 'random' proces waarin in de tijd nu eens korte dan weer langere wervels ontstaan.

De karakteristieke tijdschaal wordt kwantitatief bepaald uit het autocorrelatiediagram (zie par. 5.3.3, figuur 5.20) en de piekfrequenties (figuur 5.13) in het energiedichtheidsspectrum (tabel 5.2). De twee methodes blijken onderling verschillende waarden voor de tijdschaal te geven. De oorzaak van de verschillen is waarschijnlijk de fout die gemaakt wordt bij het bepalen van de piekfrequentie (bijvoorbeeld uit figuur 5.14) en bij het aflezen van een gemiddelde piekfrequentie (figuur 5.13). Daarom is de

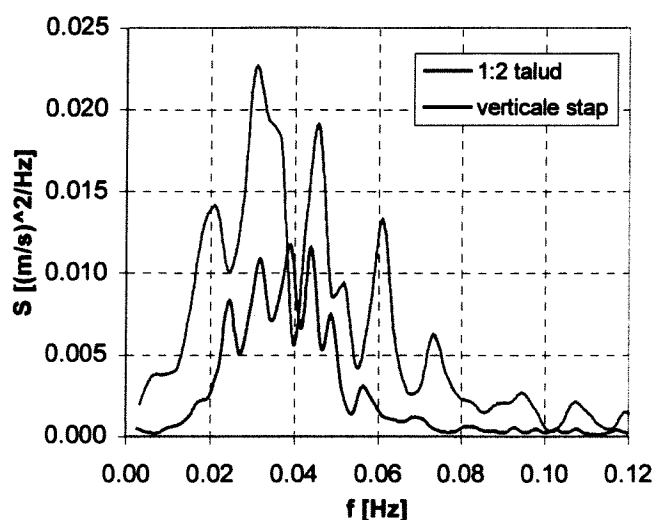


Figuur 5.12 : Meetsignaal van horizontale langssnelheid (LDA) voor opstelling 1 (boven), opstelling 2 (midden-boven) opstelling 3 (midden-onder) en opstelling 1 met lagere waterstand (onder), in hoofdgeul (boven), op overgang (midden) en in uiterwaard (onder), $x = 17.3$ m (niet-simultaan). Voor opstelling 3 is het meetsignaal op $y = -0.2$ i.p.v. op de overgang

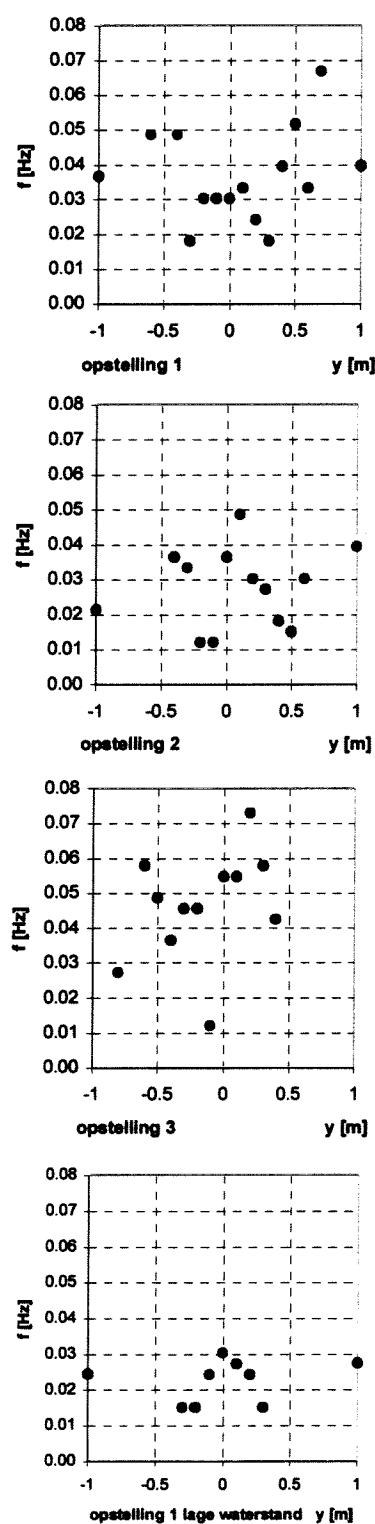
karakteristieke tijdschaal, bepaald uit autocorrelatie, het meest betrouwbaar.

De periode is in opstelling 3 een stuk kleiner dan in de andere opstellingen. De karakteristieke tijdschaal bedraagt voor de opstellingen 1 en 2 ruim 30 s. en voor opstelling 3 ongeveer 20 s. (zie tabel 5.2). Voor opstelling 1a - is gelijk aan opstelling 1 met waterstandsverlaging van 1 cm, lagere snelheden en een kleiner snelheidsverschil - wordt een grotere periode gevonden: ongeveer 45 s. De grotere periode is het gevolg van een kleinere voortplantingssnelheid dan in de andere opstellingen.

De piekfrequenties vertonen behoorlijk wat spreiding in y-richting. Daarbij zijn de piekfrequenties niet afhankelijk van y; de spreiding heeft namelijk een 'random' karakter. Voor opstelling 1 met lage waterstand lijkt er wel een verband te bestaan tussen f en y . Er zijn echter te weinig meetpunten om hieruit conclusies te trekken. Bij Van Prooijen [19] was deze spreiding minder groot. In het meetsignaal voor opstelling $_{stap}$ zijn de fluctuaties ook regelmatig. Een vergelijking van de energiedichtheidspectra in figuur 5.14 laat zien dat de pieken in opstelling $_{talud}$ over een groter frequentiebereik zijn verspreid. Omdat de meeste pieken van dezelfde orde van grootte zijn, kan het voorkomen dat in het ene geval een



Figuur 5.14 : Energiedichtheidspectra op $y = -0.1$ m. voor opstelling $_{talud}$ op $x = 17.3$ m. en opstelling $_{stap}$ op $x = 22.3$ m..



Figuur 5.13: Piekfrequenties (LDA) voor opstellingen 1, 2 en 3 op $x = 17.3$ m.

laagfrequente piek de hoogste is, en in het andere geval juist een hoogfrequente piek. Om in de praktijk uit het snelheidsprofiel een periode af te kunnen leiden, wordt voor de karakteristieke tijdschaal de volgende formule afgeleid:

$$T_k = c \frac{\delta}{u_{\text{gem}}}$$

met:

c = nader te bepalen constante

u_{gem} = gemiddelde van snelheid in uiterwaard en hoofdgeul

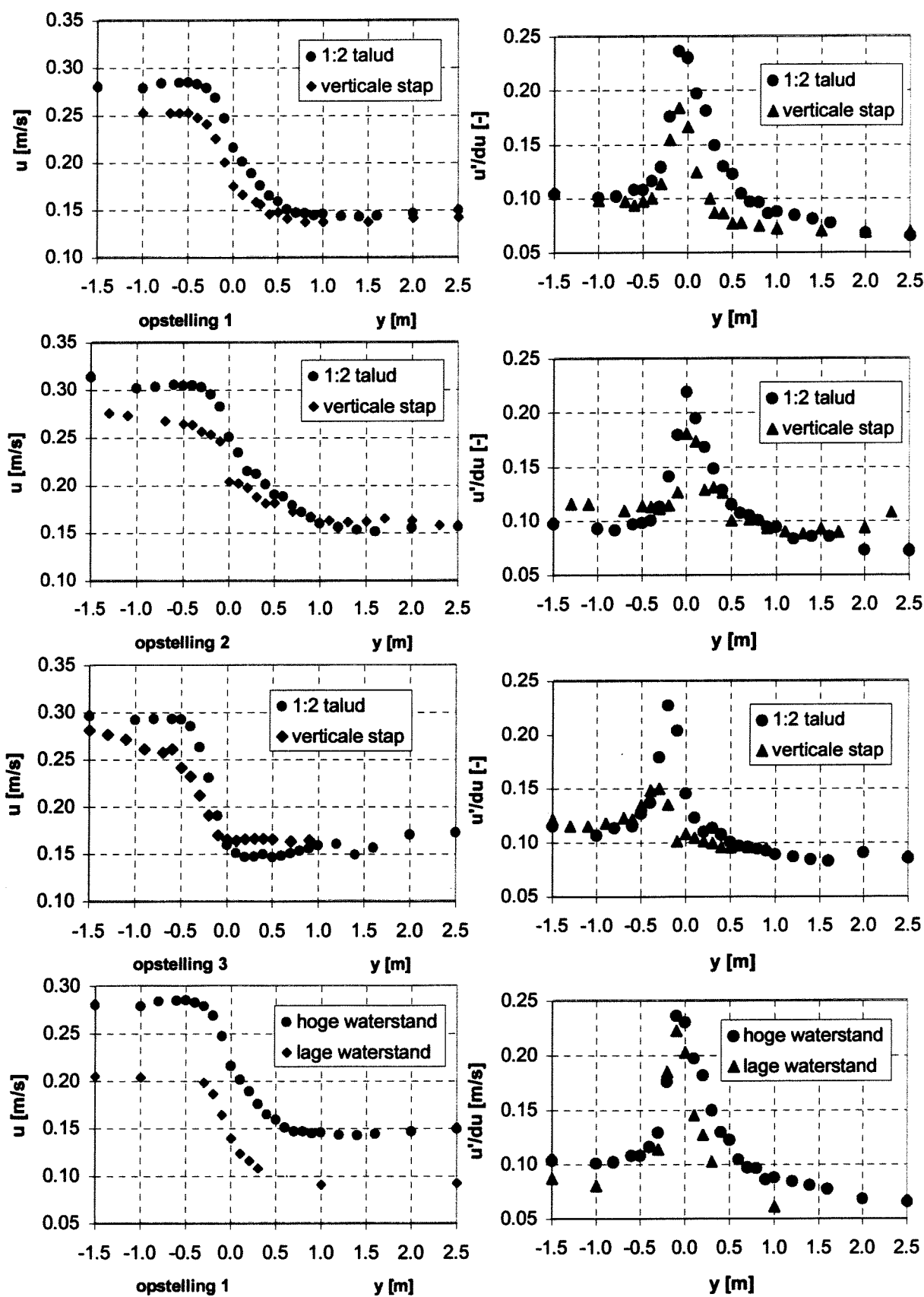
In plaats van u_{gem} zou beter de voortplantingssnelheid c_w gebruikt kunnen worden. Deze kan echter niet worden afgelezen uit het snelheidsprofiel i.t.t. u_c en de menglaagbreedte δ . Voor de constante c is op basis van de waarden van T_k (bepaald uit autocorrelatiediagrammen) en de menglaagbreedte (bepaald uit PTV-metingen) voor opstellingen 1 t/m 5 een waarde van 8 bepaald (tabel 5.2). Tussen de rechte opstellingen 1, 4 en 5 blijkt weinig variatie in c te bestaan. Grote afwijkingen worden geconstateerd bij opstellingen 2 en 3 met 1:2 talud.

Opstelling	$T_{k;\text{spectrum}} [\text{s}]$	$T_{k;\text{autocorrelatie}} [\text{s}]$	$\delta [\text{m}]$	$u_{\text{gem}} [\text{m/s}]$	$c [-]$
1, talud	33	34	0.9	0.215	8.12
1, stap	33	33	0.75	0.2	8.80
2, talud	29	33	1.2	0.225	6.19
2, stap	37	37	0.9	0.22	9.04
3, talud	20	19	0.65	0.225	6.58
3, stap	25	25	0.65	0.22	8.46
1a, talud	40	49	0.8	0.15	9.19
4, talud	29	32	0.9	0.215	7.64
5, talud	25	18	0.5	0.22	7.92

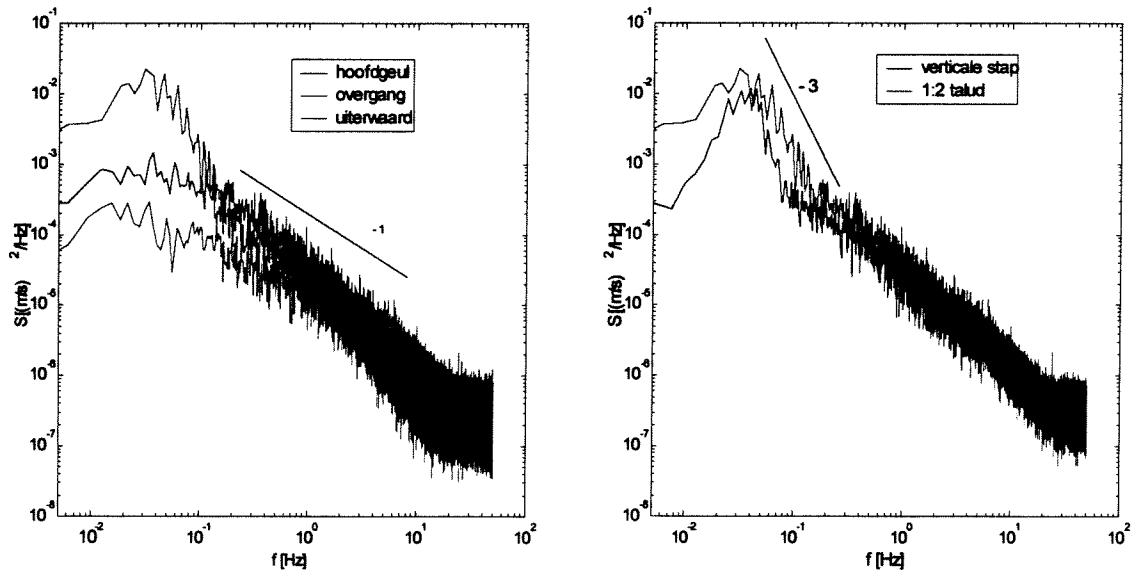
Tabel 5.2: Karakteristieke tijdschaal T_k van de wervels en c berekend uit T_k (autocorrelatie), δ en u_{gem} . Met $\mu_c = 8$ en $\sigma_c = 1$.

5.3.2 Intensiteit

In figuur 5.16 is het verloop van de turbulente intensiteit (geschaald met het snelheidsverschil tussen hoofdgeul en uiterwaard) in dwarsrichting te zien. Door met het snelheidsverschil te schalen zijn alleen effecten van het 1:2 talud t.o.v. de verticale stap en de kleinere waterdiepte zichtbaar. De grootste intensiteit treedt op rondom de overgang. Voor opstelling 1 is dat precies op de helft van het overgangstalud, voor opstelling 2 op de overgang, en voor opstelling 3 op iets minder dan 0.2 m. in de hoofdgeul. Deze posities komen overeen met de locaties van de buigpunten in het snelheidsprofiel maar niet met het centrum van de menglaag (waar $u = u_c$). De pieken voor de geschaalde turbulente intensiteiten voor de opstellingen 1, 1a, 2 en 3 zijn vrijwel even groot. Er is wel een groot verschil in intensiteit te zien met de opstellingen van Van Prooijen [19]. Mogelijke factoren voor dit verschil zijn de kleinere waterdiepte en het 1:2 talud in dit onderzoek. In paragraaf 5.2 is



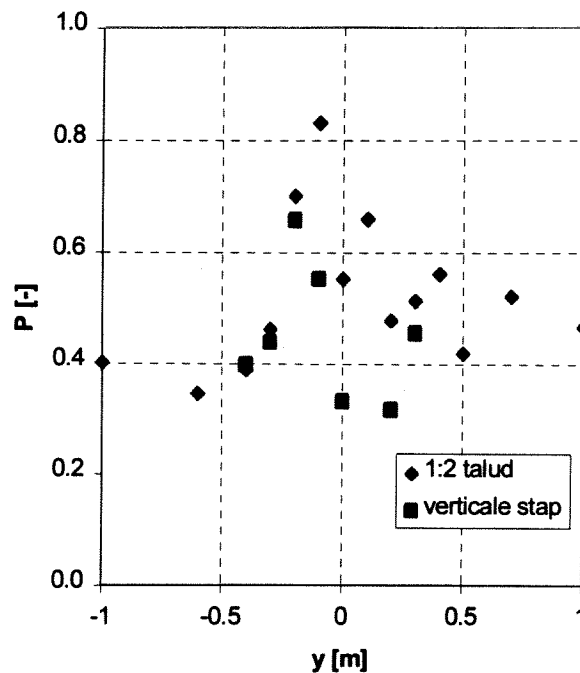
Figuur 5.16: Dwarsprofielen van horizontale langssnelheid u (links) en turbulente intensiteit u' (rechts). Voor $1:2$ talud op $x = 17.3$ m. en voor verticale stap op $x = 22.3$ m.



Figuur 5.17 Energiedichtheidsspectra voor opstelling 1_{talud} (links) en vergelijking op overgang met opstelling 1_{stap} (rechts).

al genoemd dat in het geval van een verticale stap een soort grenslaag ontstaat die leidt tot een relatief flauwe snelheidsgradiënt in de uiterwaard. Hierdoor is de groei van de Kelvin-Helmholtz-instabiliteiten minder sterk wat tot uitdrukking komt in de gemiddelde afwijking, de turbulente intensiteit. Het grote verschil voor opstelling 3 is waarschijnlijk dan ook te wijten aan de veel kleinere snelheidsgradiënt in de hoofdgeul voor opstelling_{stap}.

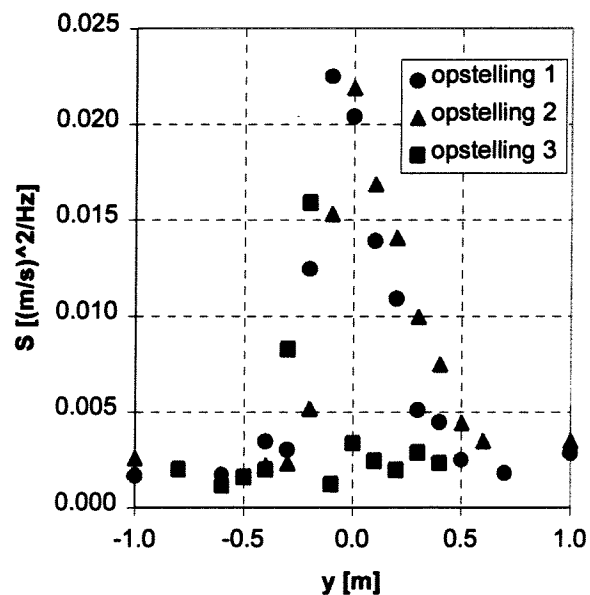
In figuur 5.17 is voor de locaties 1.5 m. in de hoofdgeul, op de overgang en 2.5 m. in de uiterwaard het energiedichtheidsspectrum op logaritmische assen uitgezet voor opstelling 1. In het laagfrequente gebied waarin de grootschalige horizontale wervels voorkomen, bevindt zich een piek in het spectrum op de overgang terwijl deze in uiterwaard en hoofdgeul buiten de menglaag niet voorkomt. De grootte van deze piek is een maat voor de intensiteit van de grootschalige wervels. De oppervlakte onder het energiedichtheidsspectrum is gelijk



Figuur 5.18: Aandeel (P) van de grootschalige wervels in de turbulente kinetische energie voor opstelling 1.

aan de totale turbulente kinetische energie u'^2 . Er kan dus een relatie worden gelegd tussen de turbulente intensiteit u' en de turbulente kinetische energie die in de grootschalige wervels zit.

In het op lineaire assen uitgezette spectrum (figuur 5.14) is duidelijk te zien dat het grootste gedeelte van deze energie in de grootschalige wervels zit. Dit aandeel is voor opstelling 1 gekwantificeerd weergegeven in figuur 5.18. Op de overgang blijkt dit ongeveer 80 % te zijn. Het is daarom gerechtvaardigd om u' op de overgang als een maat voor de uitwisseling (naast de lengteschaal) door de grootschalige wervels te nemen. In figuur 5.19 waarin de piekenegedichtheid is uitgezet t.o.v. de y -as, blijkt de intensiteit evenals voor de turbulente intensiteit u' naar beide zijden af te nemen. De -3 helling in het energiedichtheidspectrum begint voor opstelling_{stap} bij een lagere frequentie dan voor opstelling_{talud}. Ook de piek valt kleiner uit. Er zit dus minder turbulente kinetische energie in de grootschalige wervels voor opstelling_{stap} en het aandeel van de grootschalige wervels in de totale turbulente kinetische energie is kleiner dan in opstelling_{talud} (figuur 5.18).



Figuur 5.19: De piekenegedichtheid S_u voor opstelling 1, 2 en 3 op $x = 17.3$ m.

Voor opstelling 1 is de correlatie tussen langssnelheid (u) en dwarssnelheid (v) met EMS bepaald. De correlatiecoëfficiënt heeft op $x = 17.3$ m. een waarde oplopend van 0.5 op $y = -0.4$ m. (in de hoofdgeul) tot 0.9 op $y = -0.1$ m. Op de overgang en verder in de uiterwaard is de waterdiepte voor de EMS te klein, zodat daar de correlatie niet is bepaald. In een SGM-computermodel [25] dat de stroming nabootst, is dezelfde trend ook zichtbaar in de uiterwaard: de correlatie neemt van beide zijden toe naar de overgang tot een waarde van ongeveer 0.8. In het SGM-model blijken u en v' (in experimenten niet gemeten) bovendien van dezelfde orde van grootte zijn. Op grond hiervan wordt aangenomen dat de snelheidsfluctuaties van u en v op de overgang ongeveer in fase zijn (correlatiecoëfficiënt = 1). Dit betekent dat bij een maximale positieve uitwijking van u , v ook een maximale positieve uitwijking (naar de uiterwaard) heeft. Bij een snelheid in langsrichting (u) die hoger is dan het tijdsgemiddelde is er transport van massa en impuls naar de uiterwaard en bij een lagere snelheid transport naar de hoofdgeul. Op de overgang is de schuifspanning $\rho u'v'$ het grootst en daarmee ook de mate van uitwisseling in dwarsrichting. Aan beide zijden van de overgang neemt de schuifspanning en de mate van uitwisseling af. Hier spelen twee reducerende factoren een rol:

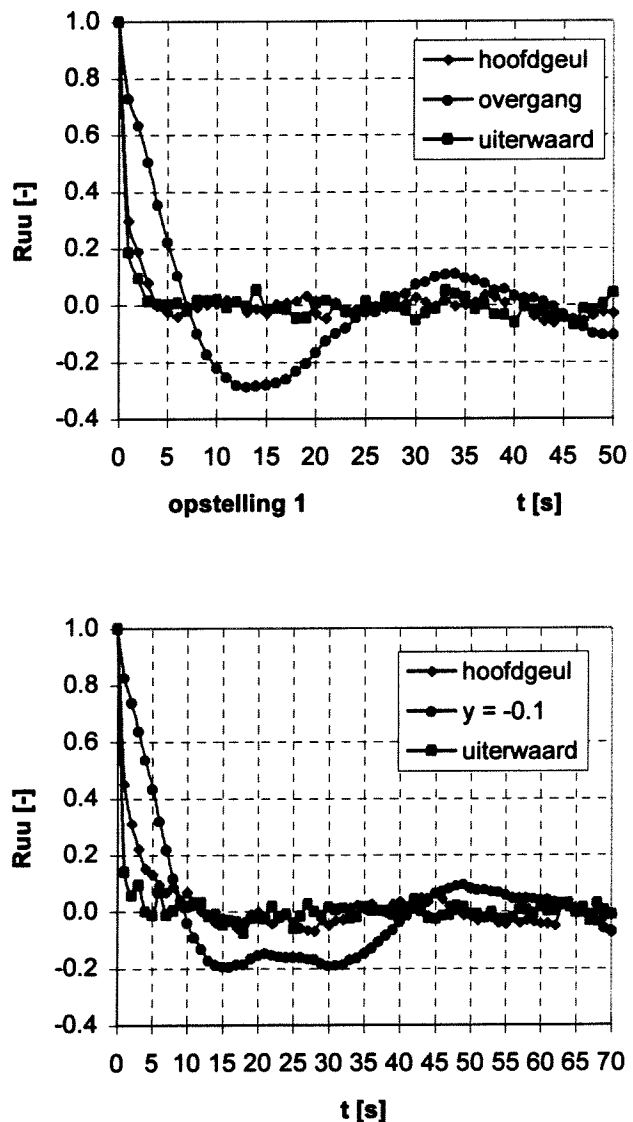
- het toenemende faseverschil tussen u en v

- kleiner wordende uitwijkingen u'en v'

Een onzekerheid hierbij is echter de onbetrouwbaarheid en onnauwkeurigheid van de EMS-metingen. Ze zijn onbetrouwbaar omdat de EMS een fouthoek van $\pm 10^\circ$ heeft wat grote gevolgen heeft voor de gemeten snelheden in dwarsrichting. De uitwijkingen die met de EMS in dwarsrichting worden gemeten, zijn te groot. Ze zijn onnauwkeurig omdat de fout in de EMS-metingen 0.01 m/s bedraagt wat op een gemiddelde uitwijking van v' van ± 0.02 m/s (uit PTV) behoorlijk is. Op andere dwarsraaien wordt op $y = -0.1$ m. eveneens een correlatiecoëfficiënt van 0.9 gevonden hetgeen meer zekerheid geeft over de gevonden waarde. In de experimenten van Knight&Shiono [15] is sprake van een correlatiecoëfficiënt van ongeveer 1. Rekening houdend met de genoemde onzekerheden en onnauwkeurigheden kan geconcludeerd worden dat de correlatie tussen u en v en de uitwisseling op de overgang het grootst is en naar beide zijden afneemt.

5.3.3 Afmetingen en samenhang

Uit de autocorrelatiediagrammen in figuur 5.20 en 5.21 blijkt dat in alle opstellingen (1,2 3 en 1a) samenhangende wervels in het gebied rond de overgang voorkomen. In hoofdgeul en uiterwaard (buiten de menglaag) is de correlatiecoëfficiënt ongeveer gelijk aan nul wat wijst op de afwezigheid van samenhangende wervels. De samenhang van de wervels blijkt ook duidelijk uit de PTV-vectorvelden (zie bijlage 2). Voor opstelling 2 van Van Prooijen [19] was in het autocorrelatiediagram nog sprake van een correlatiecoëfficiënt van nul op de overgang. Dat dit nu niet het geval is, valt wellicht te verklaren uit het feit dat het 1:2 talud in vergelijking tot de verticale stap een gemakkelijker te nemen hindernis is voor de grootschalige wervels als ze de uiterwaard op geduwd worden. Er waren echter ook bij Van Prooijen samenhangende wervels voor opstelling 2 te zien maar dan in de PTV-vectorvelden. Er lijkt hier sprake te zijn van tegenstrijdigheden wat betreft de verschillende meetresultaten.



Figuur 5.20: Autocorrelatiediagrammen voor opstellingen 1 (boven) en 1a (onder).

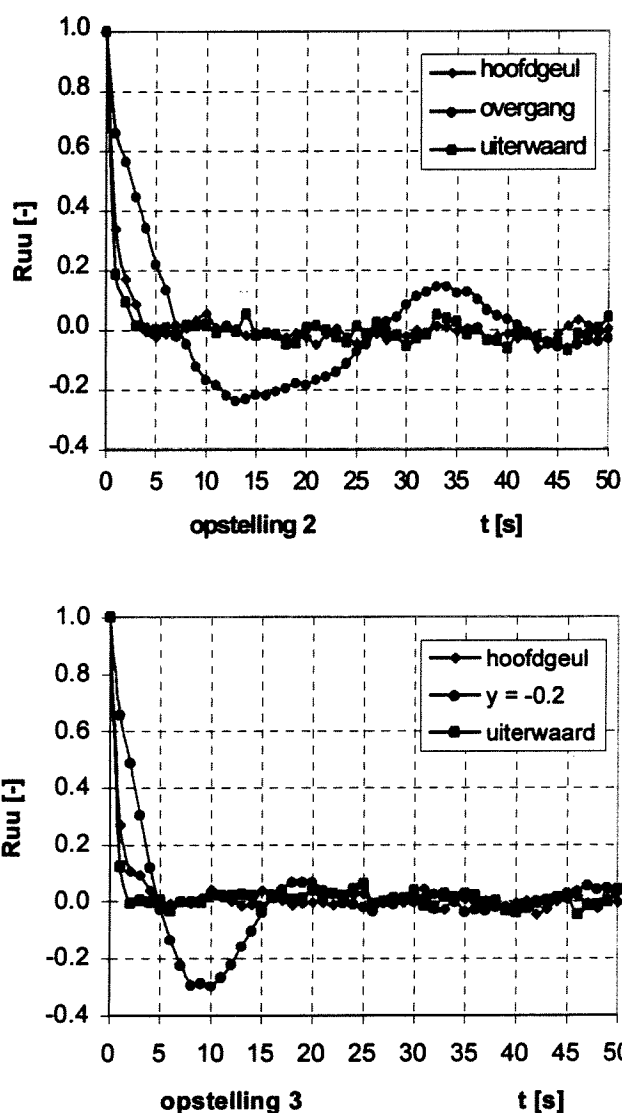
Hierbij moet echter rekening worden gehouden met het tijdsafhankelijke aspect van de metingen - wat vooral geldt voor de kortdurende PTV-metingen.

De afmetingen van de samenhangende wervels kunnen op verschillende manieren bepaald worden, zowel kwalitatief als kwantitatief. De breedte kan slechts kwalitatief geschat worden en wel uit de PTV-vectorvelden (bijlage 2) en de kleurstofopnames. Voor opstelling 1 kan een maximale breedte van 1.0 meter in de uiterwaard en 0.3 m. in de hoofdgeul worden afgelezen uit de kleurstofopname (figuur 5.22).

Er komen ook smallere wervels voor. Omdat voor de andere opstellingen geen kleurstofopnames zijn gemaakt is daarvoor slechts op basis van vectorvelden iets over de breedte te zeggen. In de vectorvelden is voor eenzelfde opstelling al een behoorlijke variatie in de breedte van de wervels te zien wat het moeilijk maakt een vergelijking tussen de verschillende opstellingen te maken. Voor opstelling 3 worden in vergelijking tot de andere opstellingen slechts wervels met een kleine breedte gevonden. Dit is te verwachten aangezien de in paragraaf 5.2 bepaalde menglaagbreedte een stuk kleiner is dan in de andere opstellingen. De reikwijdte van de uitwisseling is in opstelling 3 dus beduidend kleiner dan in de andere opstellingen.

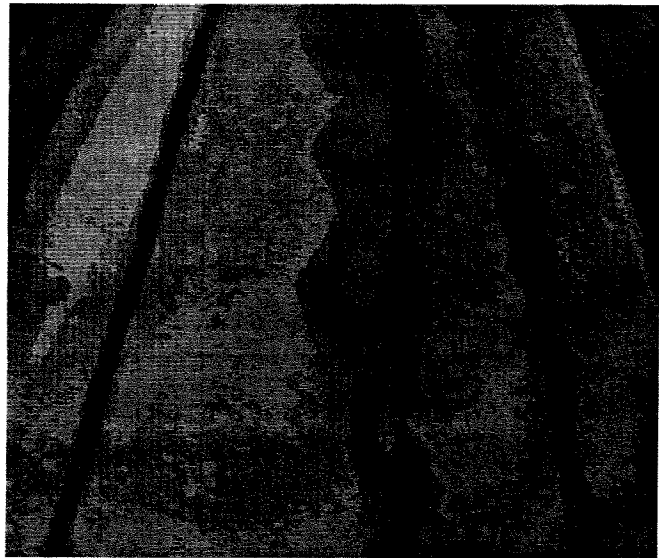
Voor het bepalen van de lengte van de wervels moet rekening worden gehouden met het zogenaamde 'paren' van de wervels. Dit proces wordt in hoofdstuk 8 beschreven. De wervels lijken elkaar te verdringen zodat de effectieve lengte die afgelezen wordt uit PTV-vectorvelden vaak kleiner blijkt te zijn dan de lengte die kwantitatief bepaald wordt:

$$L = T_k \cdot c_w$$



Figuur 5.21: Autocorrelatiediagrammen voor opstellingen 2 en 3.

Bij een voortplantingssnelheid c_w van 0.23 m/s, en een karakteristieke periode T_k van 30 s. is de lengte 7 m. In kleurstofopname is deze lengte alleen voor de eerste meters vanaf het inspuitspunt goed af te lezen. Voor de uitwisseling is van belang zowel wat op een moment in een bepaald gebied als hetgeen 'in de tijd' gebeurt. Voortplantingssnelheden en kwantitatief bepaalde lengtes staan in tabel 5.3.



Figuur 5.22: Momentopname uit kleurstofproef voor opstelling 1.

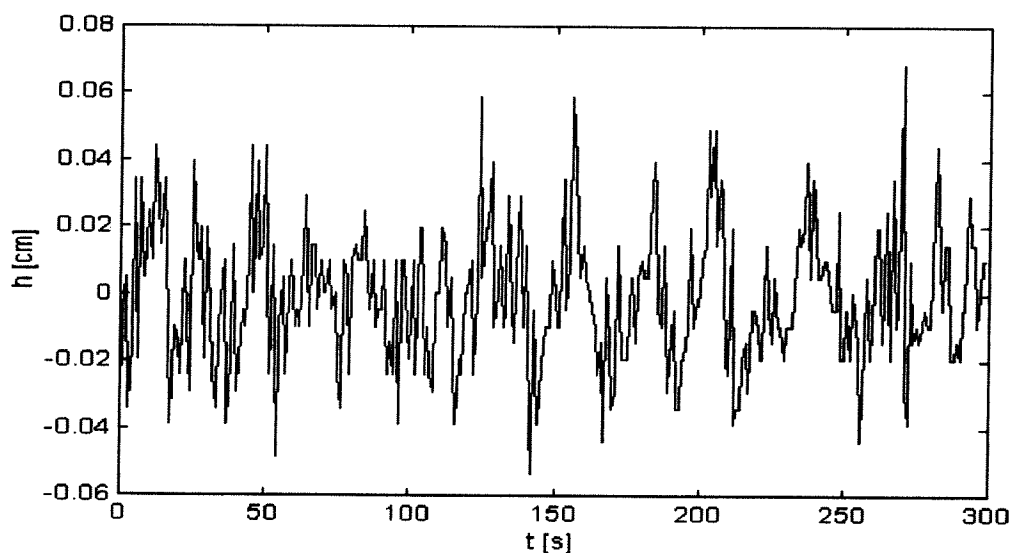
5.3.4 Ligging ten opzichte van de overgang

De ligging van het middelpunt van een wervel ten opzicht van de overgang ($y=0$) is in de vectorvelden meestal goed zichtbaar. Er is echter wel enige variatie in ligging van de wervel binnen eenzelfde opstelling in tijd en plaats. Dit is voor een deel te wijten aan de grofheid van het gebruikte rooster met roosterafstand van ongeveer 0.15 m. in y-richting. Daarnaast speelt mee dat de voortplantingssnelheid van een individuele wervel niet gelijk is aan de snelheid die van het vectorveld is afgetrokken. Is de eerstgenoemde hoger, dan verplaatst het middelpunt naar de lage snelheidskant en vice versa.

De ligging ten opzichte van de overgang wordt mede daarom met een nauwkeurigheid van 5 cm bepaald (tabel 5.3). Deze plaatsen komen ongeveer overeen met de plaats van het buigpunt in het snelheidsprofiel. Alleen in opstelling 1a is de ligging van het middelpunt daarvoor te ver in de hoofdgeul.

opstellingsnummer en omschrijving		T_k [s]	c_w [m/s]	L [m]	ligging t.o.v. $y = 0$ [m]
1	recht	30	0.23	7	-0.1
1a	recht, lage waterstand	45	0.16	7	-0.2
2	stroming naar uiterwaard	30	0.27	8	0
3	stroming naar hoofdgeul	20	0.25	5	-0.25

Tabel 5.3: Eigenschappen T_k , voortplantingssnelheid c_w , lengte L en ligging voor opstellingen 1, 1a, 2 en 3



Figuur 5.23: Waterstandfluctuaties voor opstelling 1 ten opzichte van gemiddelde waterstand ($h = 0$) op de overgang op $x = 17.3$ m.

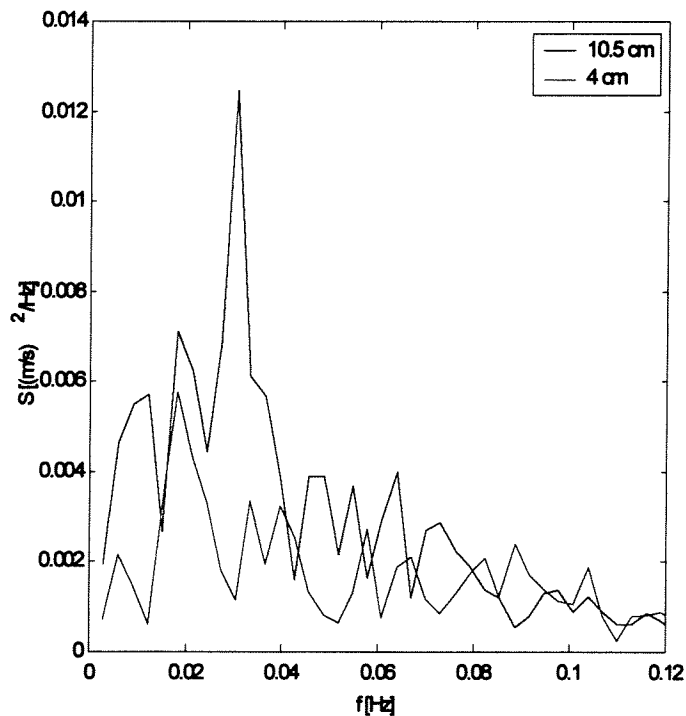
5.3.5 Waterstandsfluctuaties

Met de golfhoogetemeter zijn fluctuaties van de waterstand gemeten. In figuur 5.23 is vanaf $t = 120$ s. duidelijk een periode van ongeveer 25 seconden waar te nemen voor de waterstandsfluctuaties die dan ook wat heviger zijn dan daarvoor. Deze periode is ongeveer even groot als die van de grootschalige wervels. Deze wervels zouden dus de oorzaak van de waterstandverschillen kunnen zijn. Er moet echter ook rekening gehouden worden met ruis. In het meetsignaal op 2 m. in de hoofdgeul waar de wervels niet voorkomen, zijn namelijk dezelfde orde grootte van afwijkingen geconstateerd, zonder een duidelijke periode in de buurt van de 25-30 s. waar te nemen. De maximum uitwijking wordt rekening houdend met de ruis gesteld op ca. 0.02 cm. Ikeda&Sano [12] hebben waterstandsfluctuaties gemeten met maximale uitwijkingen van + 0.02 cm en - 0.04 cm. Dit is een factor 1.5 groter. Voor de relatief (in verhouding tot de waterdiepte) veel grotere waterstandsfluctuaties bij Ikeda&Sano kan het grotere snelheidsverschil van 0.23 m/s als oorzaak worden aangewezen. De laagste waterstand wordt bij Ikeda gevonden in het midden van de wervel (zoals verwacht mag worden). In dit onderzoek kan deze koppeling tussen snelheden en waterstanden niet gemaakt worden omdat niet gelijktijdig waterstanden en snelheden zijn gemeten. Bij het detecteren van grootschalige wervels in een Nederlandse rivier, zoals de Waal, moet worden uitgegaan van een maximaal waterstandsverschil (tussen top en dal) van $100 \cdot 2 \cdot 0.02 \text{ cm} = 4 \text{ cm}$.

5.3.6 Uitwisseling en mogelijke sedimentatie in uiterwaard

Bij het bepalen van de uitwisseling van stoffen door de grootschalige wervels wordt uitgegaan van zwevend transport (zie paragraaf 2.2.3). Bodemtransport kan om twee redenen achterwege gelaten worden:

1. De invloed van de grootschalige wervels is op de bodem zeer gering.
2. Het bodemmateriaal kan de 'stap' van hoofdgeul naar uiterwaard niet maken.



Figuur 5.24: Energiedichtheidsspectra voor opstelling 1 op $x = 17.3$ m. en $y = -0.2$ m. op locaties 10.5 cm en 4 cm boven de bodem.

Voor de eerste reden zijn twee aanwijzingen te geven:

- 1) De intensiteit van de grootschalige wervels neemt naar de bodem sterk af (figuur 5.24). Een duidelijke piek is op 4 cm boven de bodem nog wel aanwezig bij een wat lagere frequentie (de snelheid neemt naar de bodem toe immers af). Dichter bij de bodem zal de piek waarschijnlijk nog kleiner zijn.
- 2) Er is een proef gedaan met wollen draadjes op de bodem die de stroomrichting aangeven. De draadjes zijn op platen vastgemaakt. Observaties (CD2) wijzen uit dat de draadjes in de

richting van de hoofdstroom staan. Er treedt wel enige variatie in de stroomrichting op maar deze is van een veel kleinere orde dan aan het oppervlak.

In hoofdstuk 4 werd voor de opzet van een analyseprogramma voor het bepalen van de mate van uitwisseling uitgegaan van het positief gecorreleerd zijn van langs- en dwarssnelheid op de overgang. De metingen met EMS wijzen inderdaad op een correlatiecoëfficiënt naderend tot 1 op de overgang. De mate van uitwisseling mag afgelezen worden uit grootheden die afgeleid zijn van de (fluctuaties van de) snelheid in langsrichting. De piekwaarde voor u' geeft daarom een indicatie voor de piekwaarde van v' . De volgende conclusies worden getrokken:

In opstelling 1 en 2 is de mate van uitwisseling en de beschikbare bezinktijd voor het sediment gelijk.

- de karakteristieke tijdschaal wat betreft opstelling 1 gelijk en in het geval van opstelling 2 en 3 iets groter.

Opmerkingen:

- De beschikbare bezinktijd voor sedimentatie lijkt voor opstelling_{stap} 2 iets groter te zijn vanwege de grotere periode (37 s. t.o.v. 30 s.).
- Rekening moet worden gehouden met het feit dat bij een geschaalde tijdschaal de periodes in opstellingen_{stap} nog maximaal 20 % kleiner kunnen worden.
- Voor opstelling 3 lijkt het verschil in mate van uitwisseling extra groot te zijn. Omdat in beide gevallen geen sprake is van een uitontwikkelde stroming, mogen harde conclusies niet getrokken worden.

Schuine aanstromingen (bij geringe hoeken, orde 5°) hebben alleen invloed op de de ligging en de breedte van de piek in de turbulente intensiteit en niet op de grootte van piekwaarde in u' .

De tijdschaal wordt sterk bepaald door de breedte van de menglaag.

Schaling naar Bovenrijn

Om een indruk te krijgen van sedimentatie in de praktijk wordt uitgaande van opstelling 1 de karakteristieke tijdschaal voor de Bovenrijn bepaald:

$$T_{k;bovenrijn} = c \frac{\delta_{bovenrijn}}{u_{bovenrijn}}$$

met

$\delta_{bovenrijn} = 100 \text{ m.}$	menglaagbreedte verkregen door schaling (1:100) van menglaagbreedte in opstelling 1, tevens af te lezen uit figuur 5.25
$u_{bovenrijn} = 1.25 \text{ m/s}$	gemiddelde snelheid van uiterwaard en hoofdgeul, afgelezen uit figuur 5.25
$c = 8$	constante bepaald in subparagraaf 5.3.2

Voor beide opstellingen zijn ongeveer gelijk:

- de piekwaarde voor u' die zich op de overgang bevindt, wat de beste locatie voor een sterke uitwisseling tussen hoofdgeul en uiterwaard is
- de breedte van de menglaag
- de karakteristieke tijdschaal (als maat voor beschikbare bezinktijd)

In opstelling 3 is de mate van uitwisseling en de beschikbare bezinktijd kleiner dan in opstellingen 1 en 2.

In vergelijking met opstellingen 1 en 2 is

- de piekwaarde in u' even groot
- de menglaag significant opgeschoven naar de hoofdgeul waardoor de uitwisseling tussen hoofdgeul en uiterwaard kleiner is (zie vectorvelden in bijlage 2)
- de karakteristieke tijdschaal (20 s.) kleiner

Opmerking:

Omdat de stroming in opstelling 3 nog niet is uitontwikkeld, zou de periode (en de afmetingen) echter nog kunnen toenemen. Dit heeft dan ook consequenties voor de mate van uitwisseling.

In opstelling 1a is de mate van uitwisseling kleiner dan in opstelling 1.

In vergelijking met opstelling 1 is

- de piekwaarde relatief groter
- de menglaagbreedte kleiner in de uiterwaard waardoor de uitwisseling tussen hoofdgeul en uiterwaard kleiner is
- de geschaalde karakteristieke tijdschaal gelijk

Opmerkingen:

- Het relatieve snelheidsverschil is in geval van opstelling 1a iets groter (verhouding $h_{\text{uiterwaard}}/h_{\text{hoofdgeul}}$ is kleiner) waardoor de piekwaarde relatief groter is.
- De karakteristieke tijdschaal is evenredig met de snelheid op de overgang (voortplantingssnelheid) en zou voor opstelling 1 met lagere waterstand ongeveer $0.22/0.14 \cdot 30 \text{ s.} = 47 \text{ s.}$ moeten bedragen. In subparagraaf 5.3.1 is een karakteristieke tijdschaal van 45 s. bepaald. Er kan daarom vanuit gegaan worden dat de opstelling met lagere waterstand in principe geen invloed heeft op de karakteristieke tijdschaal (na schaling met voortplantingssnelheid).

In de opstellingen_{stop} is de mate van uitwisseling kleiner dan in de opstellingen_{talud}

In vergelijking met opstellingen_{talud} is

- de piekwaarde kleiner.
- de breedte van de menglaag kleiner.
- de ligging van de grootschalige wervels ongeveer gelijk (behalve voor opstelling 3).

zodat $T_k = 640$ s.

$h_{\text{uiterwaard}} = 3$ m. = waterdiepte in de uiterwaard
 $w_{s;100\mu\text{m}} = 0.01$ m/s = valsnelheid van korrel met diameter $D_{50} = 100$ μm
 $w_{s;300\mu\text{m}} = 0.04$ m/s = valsnelheid van korrel met diameter $D_{50} = 300$ μm

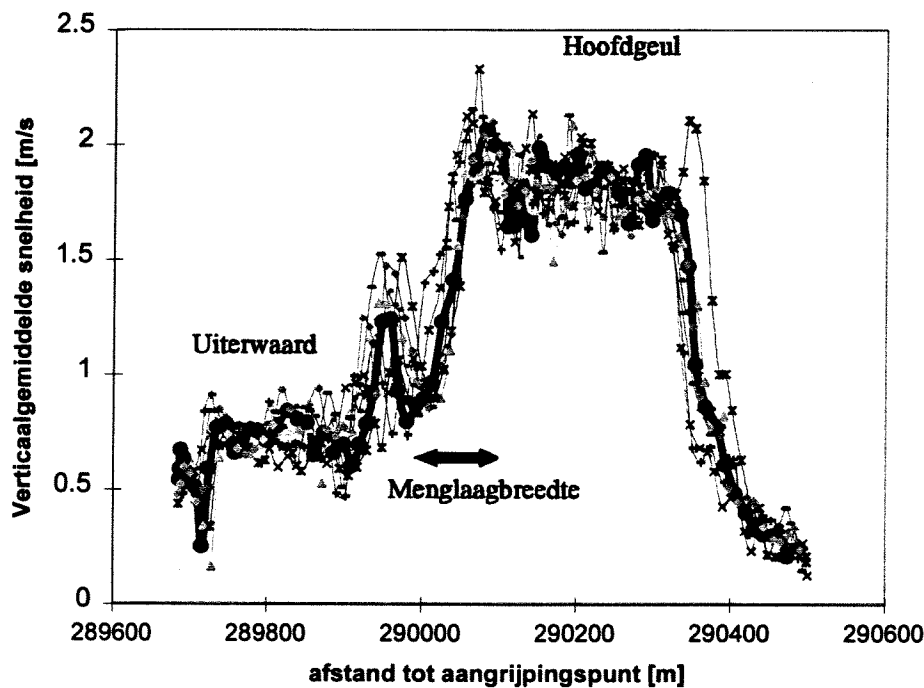
In de uiterwaard wordt voor het grootste gedeelte sediment met een D_{50} van 300 μm (zand) aangetroffen. Sporadisch is ook sediment met een D_{50} van 100 μm of kleiner (klei) gevonden. Gedurende een halve periode heeft het sediment de tijd om te bezinken. De beschikbare bezinktijd bedraagt dus 320 s. Voor een korreltje bovenin de waterkolom is de benodigde bezinktijd:

$$T_{\text{bezink}} = \frac{h_{\text{uiterwaard}}}{w_{s;100/300\mu\text{m}}}$$

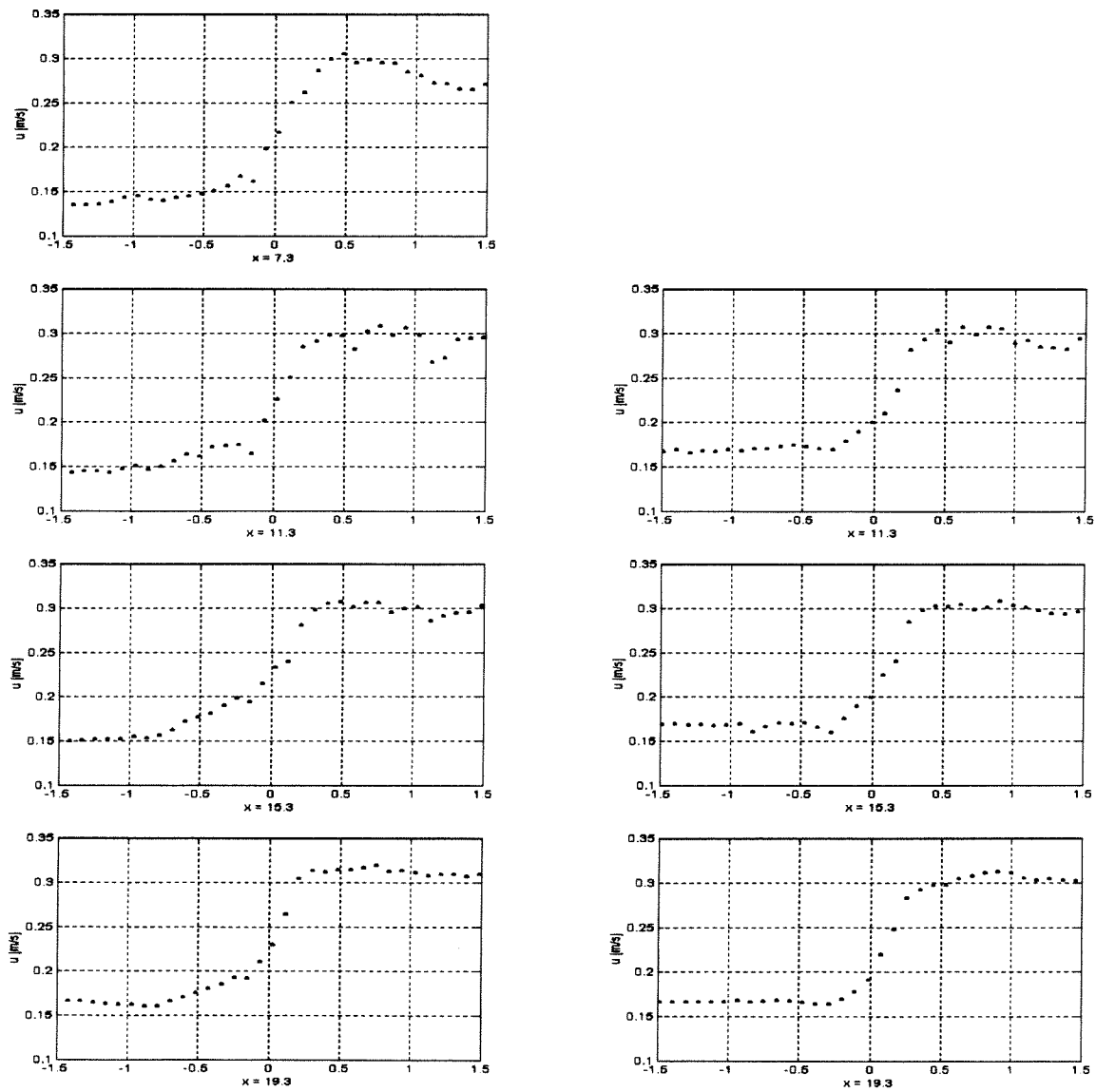
voor $w_{s;100\mu\text{m}}$: 300 s.

voor $w_{s;300\mu\text{m}}$: 75 s.

Bij deze benadering zal al het materiaal bezinken.



Figuur 5.25: Gemeten stroomsnelheden in de Bovenrijn, km 864.5 (4 nov. 1998). bron: Aqua Vision [17]



Figuur 6.1 Dwarsprofielen van de horizontale langssnelheid aan het oppervlak (PTV) voor opstelling 4 (links) en opstelling 5 (rechts). De y -coördinaten in de hoofdgeul zijn positief.

Hoofdstuk 6 Resultaten en interpretatie fase 2

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de rechte opstellingen met zomerkades (4 en 5) gepresenteerd en geïnterpreteerd. Onderlinge vergelijking vindt plaats met opstelling 1 (rechte opstelling) als referentieopstelling. De invloed van de (ligging van de) zomerkades op de ondiepe menglaagstroming en de grootschalige horizontale wervels wordt onderzocht. De consequenties voor de praktijk - als er bijvoorbeeld sprake is van het verwijderen van zomerkades - worden belicht.

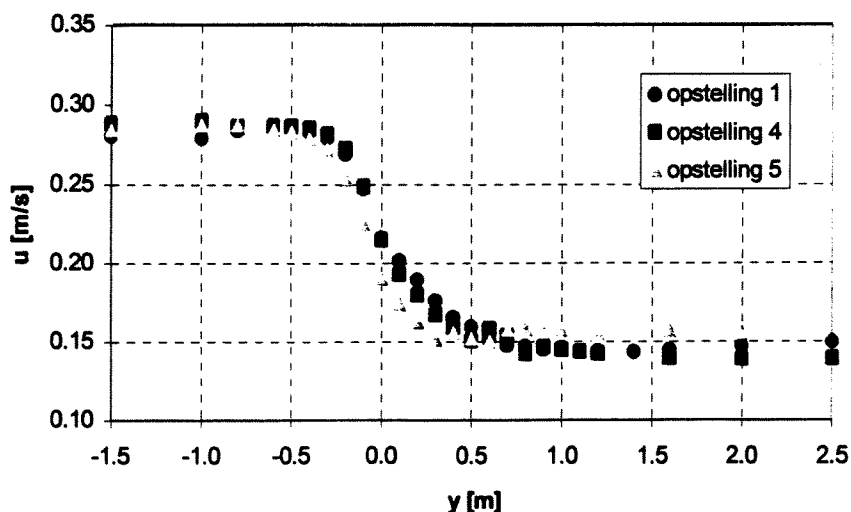
Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

- paragraaf 6.2 behandelt de resultaten en de interpretatie betreffende de ontwikkeling van de menglaag tot een quasi-uniforme stroming
- Paragraaf 6.3 behandelt de resultaten en de interpretatie betreffende de grootschalige horizontale wervels in het quasi-uniforme gebied.

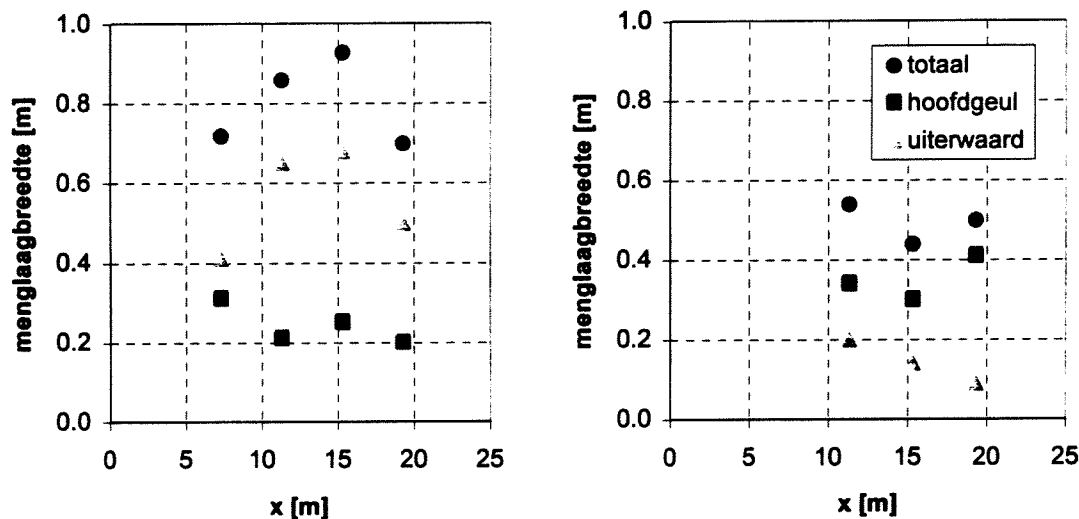
6.2 Ontwikkeling van de menglaag

De ontwikkeling van de menglaagbreedte in stroomafwaartse richting wordt weergegeven door PTV-snelheidsprofielen die opgenomen zijn in figuur 6.1. In deze paragraaf worden de analyseresultaten uit PTV- en LDA-metingen gepresenteerd.

De snelheden in hoofdgeul en uiterwaard buiten de menglaag in de opstellingen 4 en 5 (in uitontwikkelde stroming) komen overeen met die in opstelling 1 hetgeen een onderlinge vergelijking van de drie opstellingen ten goede komt (figuur 6.2). In de opstelling 4 is ter plaatse van de zomerkade ($y = 0.8$ m.) een kleine vervorming van het snelheidsprofiel te zien. De snelheid ter hoogte de zomerkade is iets lager en aan weerszijden heeft het snelheidsprofiel een wat onregelmatig verloop. Dit is ook (duidelijker) zichtbaar in de PTV-snelheidsprofielen (figuur 6.1).



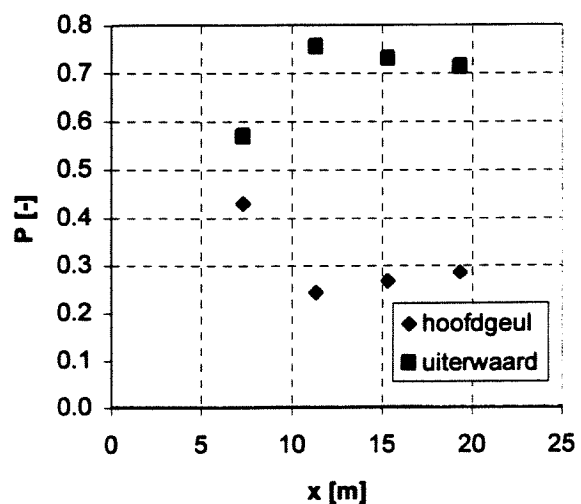
Figuur 6.2: Dwarsprofielen van de horizontale langssnelheid (LDA) op $x = 17.3$ m. voor opstellingen 1, 4 en 5.



Figuur 6.3 Verloop van de menglaagbreedte in stroomafwaartse richting voor opstelling 4 (links) en opstelling 5 (rechts)

Uit figuur 6.2 blijkt dat in opstelling 4 de breedte en ligging van de menglaag vrijwel identiek zijn aan die in opstelling 1, de basisopstelling. In het gebied rond de overgang is sprake van een geleidelijker verloop van de snelheidsgradiënt. Het snelheidsprofiel is te vergelijken met het snelheidsprofiel in een enkelvoudig kanaal. In figuur 6.3 is het verloop van de menglaagbreedte uitgezet voor opstelling 4 op basis van metingen met PTV. (De waarden op $x = 19.3$ voor opstelling 4 lijken niet helemaal juist te zijn omdat de stroming al ruim daarvoor is uitontwikkeld.) De verhouding tussen het aandeel van de hoofdgeul en dat van de uiterwaard in de totale menglaag is hetzelfde als in opstelling 1 (figuur 6.4). De stroming is waarschijnlijk ongeveer even snel ontwikkeld als in opstelling 1, vanaf $x = 11.3$ m. Dit blijkt ook uit het verloop van de langssnelheid in stroomafwaartse richting op de overgang (figuur 6.5).

In opstelling 5, met zomerkade dichtbij, op 0.25 m. van de overgang, wordt de menglaagbreedte juist aanzienlijk beperkt door de zomerkade. De menglaag wordt in de uiterwaard begrensd door de zomerkade. Volgens de gebruikte methode voor het bepalen van de ontwikkeling van de menglaagbreedte zou de menglaag maar 10 cm breed zijn in de uiterwaard. Hier wordt een waarde van 25 cm aangehouden. De abrupte overgang in de snelheidsgradiënt ter plaatse van de



Figuur 6.4: Verloop van het relatieve aandeel van hoofdgeul en uiterwaard in de totale menglaagbreedte in stroomafwaartse richting voor opstellingen 4.

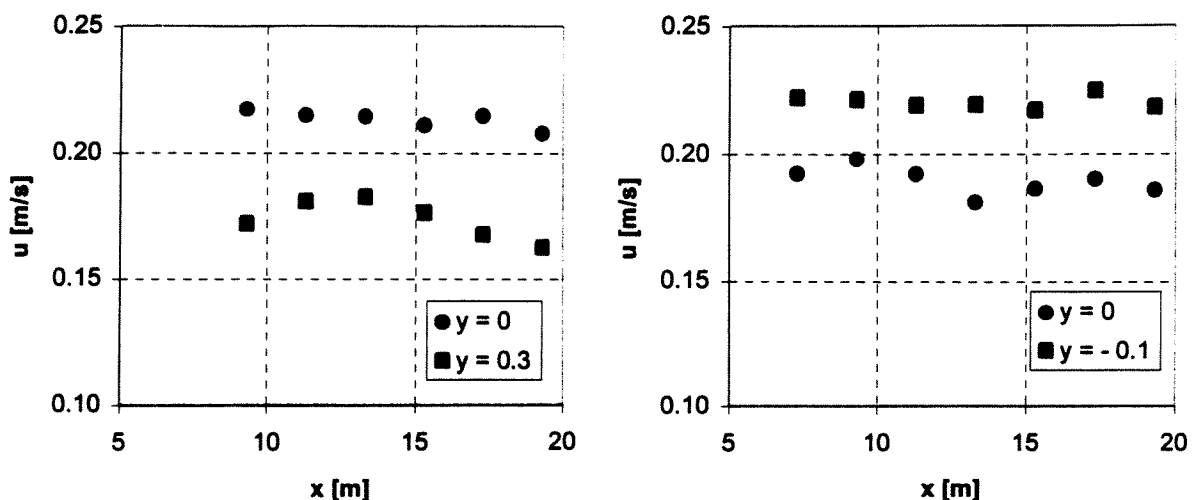
zomerkade duidt op een grenslaag door een wandeffect van de zomerkade.

Het snelheidsverloop (LDA) op $y = -0.1$ m. voor opstelling 5 wijst erop dat vanaf $x = 15$ m. de stroming is uitontwikkeld. De ontwikkelingslengte voor opstelling 5 zou langer moeten zijn dan voor opstelling 1 en 4 vanwege een grotere $h/2c_f$ (gewogen gemiddelde voor h en c_f).

Er is immers sprake van een kleinere bodemwrijving als gevolg van een ligging meer in de hoofdgeul ($h >$ en $c_f <$).

Het volgende kan geconcludeerd worden:

- Een zomerkade op $y = 0.75$ m. heeft nauwelijks invloed op de ligging en de breedte van de menglaag terwijl de deze op $y = 0.25$ m. wel invloed heeft en leidt tot een smallere menglaag en een verschuiving naar de hoofdgeul.
- De zomerkade heeft in opstelling 4 geen invloed op de ontwikkelingslengte van de menglaag. De ontwikkelingslengte is gelijk aan die voor opstelling 1 (ongeveer 11 m.). In opstelling 5 is de invloed wel merkbaar. Doordat de menglaag meer in de hoofdgeul komt te liggen is de bodemwrijving kleiner wat een grotere ontwikkelingslengte tot gevolg heeft (ongeveer 15 m.).
- Op de plaats van de zomerkade is in opstelling 4 een kleine vervorming van het snelheidsprofiel (lagere snelheid) te zien in LDA- en PTV-snelheidsprofielen.
- De abrupte overgang in het snelheidsprofiel op de plaats van de zomerkade in opstelling 5 duidt op een door de zomerkade veroorzaakte grenslaag.

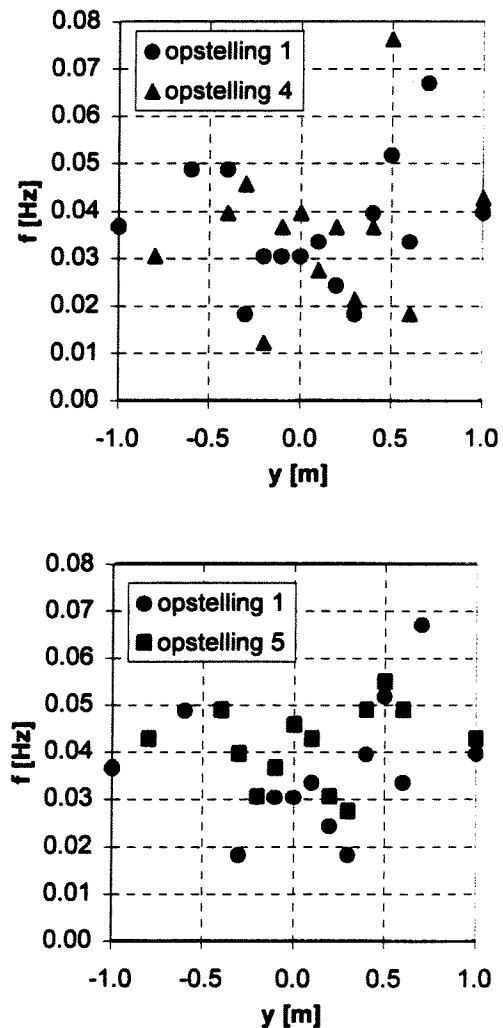


Figuur 6.5: Verloop van de horizontale langssnelheid in stroomafwaartse richting voor opstelling 4 (links) en opstelling 5 (rechts).

6.3 Grootschalige horizontale wervels

6.3.1 Periodiciteit en regelmatigheid

Zoals in paragraaf 6.2 al is gebleken, verschilt opstelling 4 wat betreft de eigenschappen van de menglaag niet veel van opstelling 1. Het is dan ook niet te verwachten dat ten aanzien van de eigenschappen van de grootschalige wervels tussen opstelling 1 en 4 grote verschillen optreden. De periode (tabel 6.1) ligt evenals voor opstelling 1 in de buurt van de 30 seconden. De spreiding van de piekfrequenties is ongeveer even groot als voor opstelling 1 en de grote van de piekfrekwentie blijkt onafhankelijk te zijn van de positie op de dwarsraai (y) (figuur 6.6). Voor opstelling 5 is de spreiding van piekfrequenties iets minder groot. Het is echter lastig om een karakteristieke tijdschaal te bepalen aangezien het resultaat voor de periode die uit autocorrelatie wordt bepaald (figuur 6.11) niet eenduidig is. Het verschil tussen de periodes voor $y = 0$ (27 s.) en $y = -0.1$ m. (18 s.) is groot. Een periode van 18 s. komt overeen met een frequentie van 0.056 Hz en bevindt zich daarmee aan de rand van het spreidingsgebied van de piekfrequenties in figuur 6.5. Deze periode is zodoende enigszins onbetrouwbaar. Het energiedichtheidspectrum op $y = -0.1$ m. (figuur 6.7) blijkt twee hoge pieken met piekfrequenties van ongeveer 0.035 respectievelijk 0.06 Hz overeenkomend met periodes van 28 respectievelijk 17 s. Voor de piekfrequenties in figuur 6.6 is de frequentie bij de hoogste piek aangehouden. Omdat de piek bij 0.06 Hz (overeenkomend met de uit autocorrelatie bepaalde periode) ongeveer even groot is als de piek bij 0.035 Hz, zou even goed eerstgenoemde frequentie als piekfrekwentie kunnen worden aangehouden. Op de overgang ($y = 0$) blijkt de piekfrekwentie 0.045 Hz te zijn. Omdat niet te verwachten is dat over een afstand van 0.1 m. in dwarsrichting significante verschillen in de

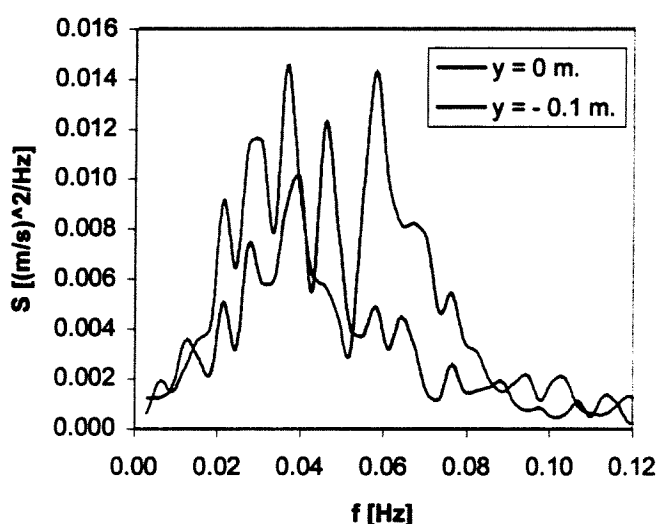


Figuur 6.6: Piekfrequenties (LDA) voor opstellingen 4 en 5 vergeleken met die voor opstelling 1, op $x = 17.3$ m.

Opstelling	Energiedichtheidspectrum	Autocorrelatie
1	33 s.	34 s.
4	29 s.	32 s.
5	25 s.	18/27 s.

Tabel 6.1: Karakteristieke tijdschaal bepaald uit energiedichtheidspectra en autocorrelatiediagrammen

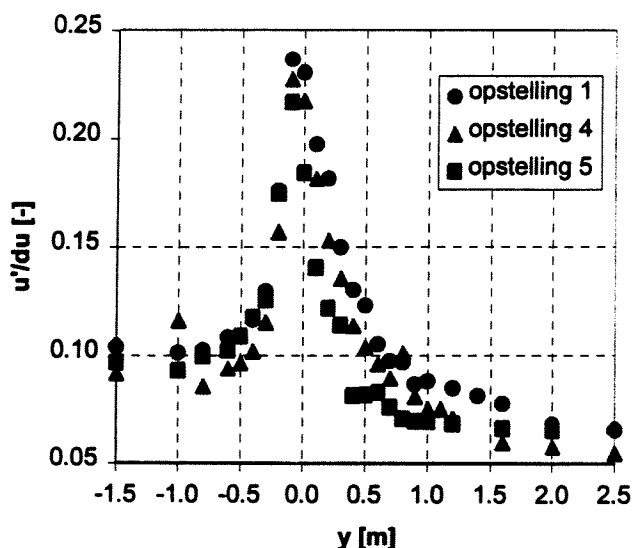
karakteristieke tijdschaal zullen optreden, moet geconcludeerd worden dat de oorzaak van de verschillen tussen $y = 0$ en $y = -0.1$ in een te korte meettijd liggen. Het zwaartepunt van de pieken ligt in het energiedichtheidsspectrum op $y = 0$ m. ongeveer bij de piekfrequentie van 0.045 Hz (periode = 23 s.). Het zwaartepunt voor $y = -0.1$ ligt ook in de buurt van deze frequentie. Een periode van ongeveer 23 s. kan aangehouden worden als karakteristieke tijdschaal. Daarmee is de karakteristieke periode voor opstelling 5 dus kleiner dan voor de opstellingen 1 en 4, wat te verwachten is aangezien de menglaag smaller is zodat de afmetingen van de wervels (en daarmee de periode) kleiner zijn.



Figuur 6.7 : Energiedichtheidsspectra op $y = -0.1$ m. en $y = 0$ m. voor opstelling 5 op $x = 17.3$ m..

6.3.2 Intensiteit

De grootte van de piek in de geschaalde turbulente intensiteiten (fig. 6.8) in de buurt van de overgang is voor de opstellingen 4 en 5 gelijk aan die voor opstellingen 1, 2 en 3. De breedte van de piek wordt voor opstelling 5 in de uiterwaard beperkt door de zomerkade: Een sprong in de turbulente intensiteit is te zien op $y = -0.3$ m. De piek lijkt evenals de menglaag meer in de hoofdgeul te liggen. Voor opstelling 4 is een locale piek te zien ter plaats van de zomerkade. De zomerkade blijkt dus in beide gevallen geen significante invloed te hebben op de grootte van piek van de turbulente intensiteit op de overgang (alleen lokaal ter plaats van de zomerkade). Uit figuur 6.9, waarin de piekenergiedichtheid is uitgezet tegen de y -as, blijkt dat voor opstelling 5 de maximale piekenergiedichtheid (bij de overgang) significant kleiner is dan voor de opstelling 1 terwijl het aandeel van de grootschalige wervels in de totale turbulente kinetische energie (bijlage 5) voor alle drie opstellingen in de buurt



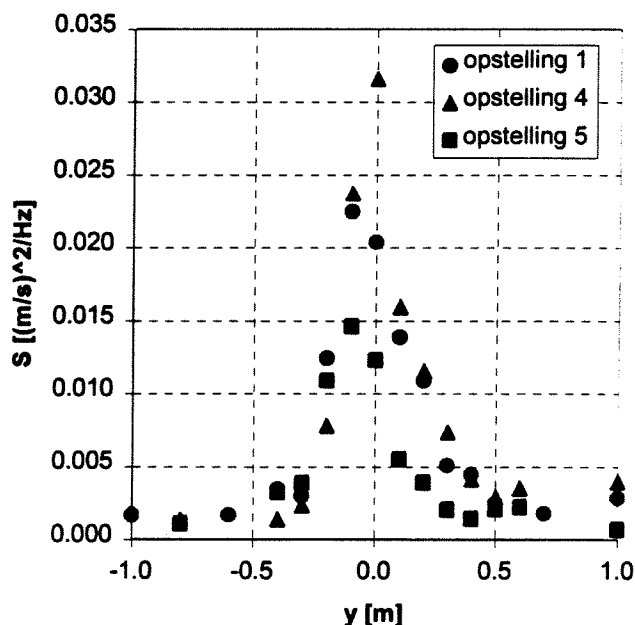
Figuur 6.8: Turbulente intensiteit (geschaald met het snelheidsverschil) op $x = 17.3$ m. voor opstellingen 1, 4 en 5.

van de overgang nagenoeg gelijk is. Dit valt niet te verklaren uit een kleiner snelheidsverschil omdat deze voor alle drie opstellingen nagenoeg gelijk zijn. Een duidelijke verkleining en verschuiving richting de hoofdgeul van de piekenergiedichtheid treedt in opstelling 5 als gevolg van de zomerkade op. De hogere energiedichtheid voor opstelling 4 is waarschijnlijk een uitschieter aangezien de overige punten goed overeenkomen met die van opstelling 1.

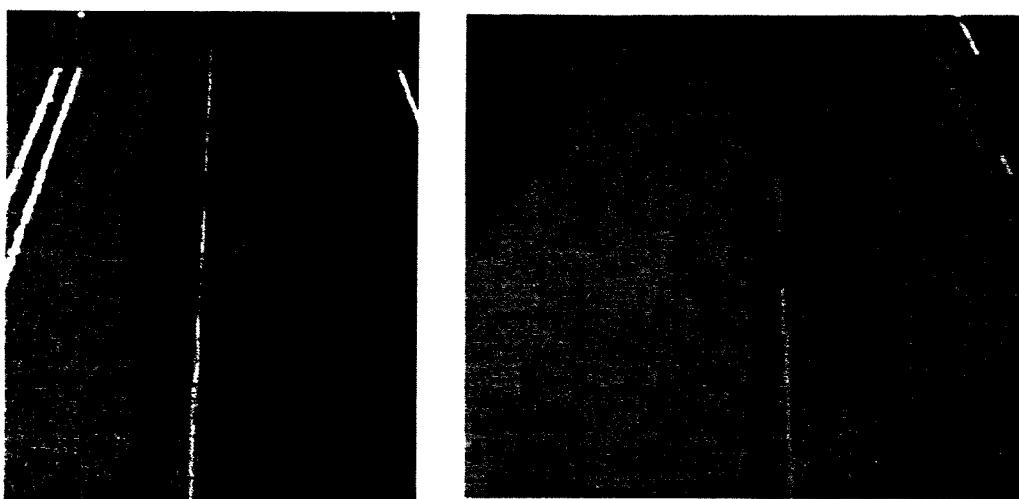
6.3.3 Afmetingen en samenhang

Uit kleurstofproeven blijkt dat de breedte van grootschalige wervels voor opstelling 5 beduidend kleiner is dan voor de opstellingen 1 en 4. In opstelling 4 vindt uitwisseling dwars over de zomerkade plaats.

De afmetingen van de grootschalige horizontale wervels in opstelling 4 komen overeen met die in opstelling 1. In de PTV-series worden zelfs wervels met een grotere breedte gevonden dan voor opstelling 1. Deze wervels kunnen echter ook in opstelling 1 voorkomen. Dat ze niet in de PTV-serie voorkomen is te wijten aan de tijdsafhankelijkheid van de PTV-opnames. De afmetingen van de grootschalige wervels in opstelling 5 zijn beduidend kleiner dan in opstelling 1 en 4. Uit de kleinere periode van 23 s. is met de voortplantingssnelheid van 0.23 m/s een lengte van ongeveer 5 meter te berekenen. Deze lengte kan ook uit de vectorvelden



Figuur 6.9: Piekenergiedichtheid op $x = 17.3$ m. voor opstellingen 1, 4 en 5.



Figuur 6.10 : Momentopnames van kleurstofproef voor opstelling 4 (links) en opstelling 5 (rechts).

bepaald worden. Naast de lengte is ook de breedte een stuk kleiner. In figuur 6.10 is het verschil in breedte tussen opstelling 4 en 5 goed te zien. In opstelling 5 reikt de breedte van de wervels tot ongeveer 0.8 m. in de uiterwaard (in opstelling 1 en 4 tot 1.5 m.). In beide gevallen vormt de zomerkade geen belemmering voor de wervels. In beide opstellingen is sprake van samenhangende wervels zoals blijkt uit de vectorvelden en de autocorrelatiediagrammen (figuur 6.11). Voor opstelling 5 lijken samenhangende wervels voor $t = 19$ s. en $t = 27$ s. voor te komen (zie toelichting in subparagraaf 6.3.1).

6.3.4 Ligging ten opzichte van de overgang

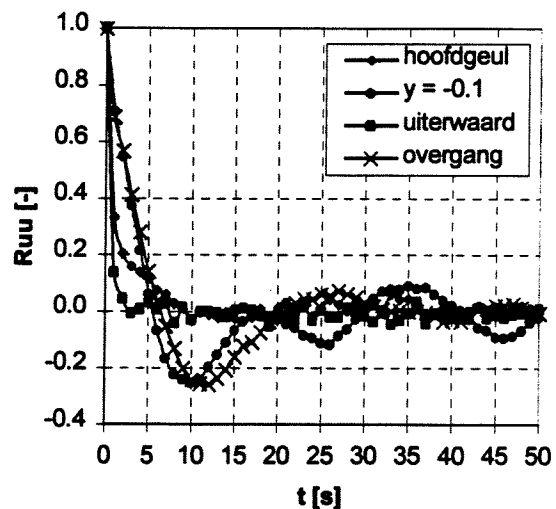
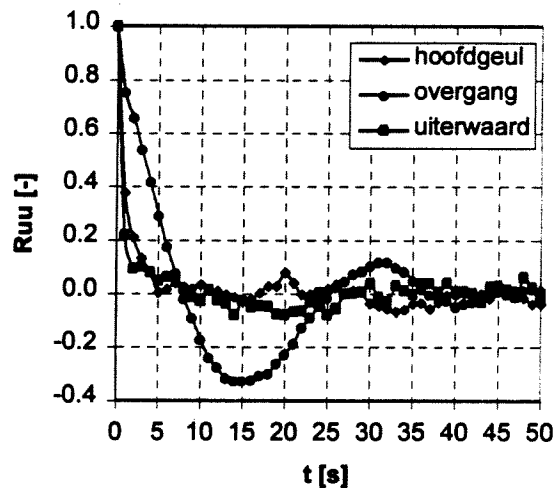
Voor opstelling 1 liggen de grootschalige wervels evenals in opstelling 1 op ongeveer 0.1 m. in de hoofdgeul. Voor opstelling 5 ligt het middelpunt van de wervels iets verder in de hoofdgeul, op 0.2 m. In paragraaf 6.2 werd al duidelijk dat in opstelling 5 het aandeel van de hoofdgeul in de menglaagbreedte groter is dan dat van de uiterwaard, zowel absoluut als relatief gezien. Het is dan ook niet verrassend dat het middelpunt van de grootschalige wervels voor opstelling 5 meer in de hoofdgeul ligt dan voor opstelling 4. Deze positie komt echter niet overeen met de locatie van het buigpunt in het snelheidsprofiel.

6.3.5. Uitwisseling en mogelijke sedimentatie in de uiterwaard

De volgende conclusies ten aanzien van uitwisseling van stoffen en het bezinken van sediment in de uiterwaard kunnen worden getrokken:

De uitwisseling en de beschikbare bezinktijd zijn in opstelling 4 (met zomerkade op 0.75 m. in de uiterwaard) bijna even groot als in opstelling 1.

De piekwaarde $u'_{\max}$, breedte van menglaag en de karakteristieke tijdschaal T_k zijn voor de opstellingen 1 en 4 even groot. In vergelijking met opstelling 1 is alleen de hoogte van de zomerkade in geometrische zin een beperkende maat voor de uitwisseling.



Figuur 6.11 : Autocorrelatiediagrammen voor opstelling 4 (boven) en opstelling 5 (onder).

De uitwisseling en beschikbare bezinktijd zijn in opstelling 5 (met zomerkade op 0.25 m. in de uiterwaard) kleiner dan in opstelling 1.

In vergelijking met opstelling 1 is

- de piekwaarde in u' kleiner
- de breedte van de menglaag kleiner in de uiterwaard.
- de karakteristieke tijdschaal van de wervels kleiner, ongeveer 25 s, zodat het sediment minder tijd heeft om in de uiterwaard te bezinken.
- de hoogte van de zomerkade in geometrische zin een beperkende maat voor de uitwisseling.

De zomerkade beperkt de breedte van de menglaag (is de gemiddelde breedte van de wervels) in de uiterwaard. De zomerkade is echter geen begrenzing van het gebied waarin de individuele grootschalige wervels zich voordoen.

Opmerking:

Uit de proeven kan niet geconcludeerd worden vanaf welke afstand tot de overgang de zomerkade significant invloed krijgt op de uitwisseling door de grootschalige wervels. Het is echter wel te verwachten dat hoe dichter de zomerkade bij de overgang ligt, des te kleiner de sterkte van uitwisseling en des te kleiner de periode en breedte waarover de uitwisseling plaats vindt, zullen worden.

Hoofdstuk 7 Resultaten en interpretatie fase 3

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van *opstelling 6*, een rivier met kribben in de hoofdgeul, gepresenteerd en geïnterpreteerd. In afwijking van de vorige twee hoofdstukken wordt hier geen paragraaf gewijd aan de ontwikkeling van de menglaag aangezien er van een menglaag zoals in de vorige opstellingen geen sprake is. Het in dwarsrichting niet-uniforme gebied wordt daarom aangeduid met 'menggebied'. Er is slechts gemeten in het gebied waar aangenomen wordt dat de stroming zich voldoende heeft ontwikkeld. Dit hoofdstuk besteed vooral aandacht aan de eigenschappen van de grootschalige horizontale wervels. Andere optredende verschijnselen, zoals het loslaten van de stroming bij de kribkoppen, worden kort aangestipt. Voor meer informatie verwijs ik naar het rapport '*Experimenteel onderzoek naar waterbeweging in een rivier met kribvak en uiterwaard*' van Bos&Havinga [5]. Opgemerkt dient nog te worden dat het onderzoek een verkennend karakter draagt om daarmee een eerste indruk van de stroming bij overstroomde kribben te krijgen (zie hoofdstuk 3).

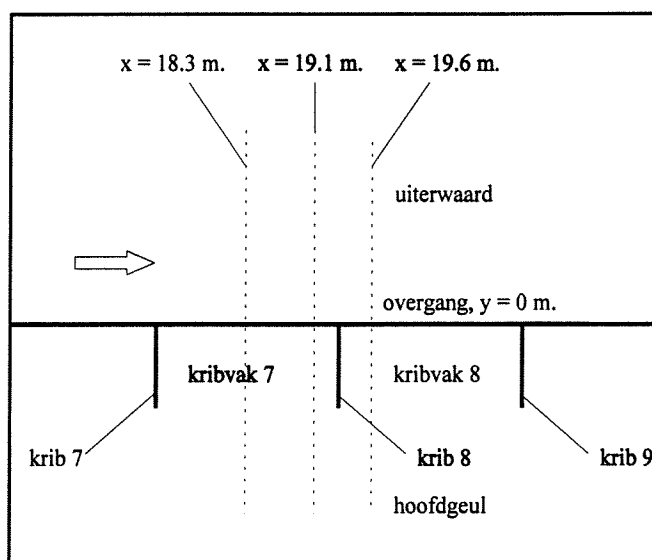
7.2 Tijdsgemiddeld horizontaal snelheidsveld

De figuren 7.1 en 7.2 geven de locaties van de met de LDA gemeten dwarsraaien respectievelijk het opnamegebied voor de PTV-metingen weer. Met de LDA zijn drie dwarsraaien gemeten:

1. $x = 18.3$ m. in het midden van kribvak 7
2. $x = 19.1$ m. 0.2 m. stroomopwaarts van krib 8
3. $x = 19.6$ m. 0.3 m. stroomafwaarts van krib 8

Getracht is om de snelheden in uiterwaard en hoofdgeul ongeveer gelijk te houden aan die in opstelling 1. In figuur 7.3, waarin de dwarsprofielen voor opstelling 1 en 6 zijn opgenomen, is te zien dat deze inderdaad niet veel van elkaar verschillen. Een belangrijk verschil daarentegen is de vorm van het snelheidsprofiel in het *menggebied* - in de opstellingen 1 t/m 5 *menglaag* genoemd - voor opstelling 6. De opstelling bestaat uit drie secties te weten:

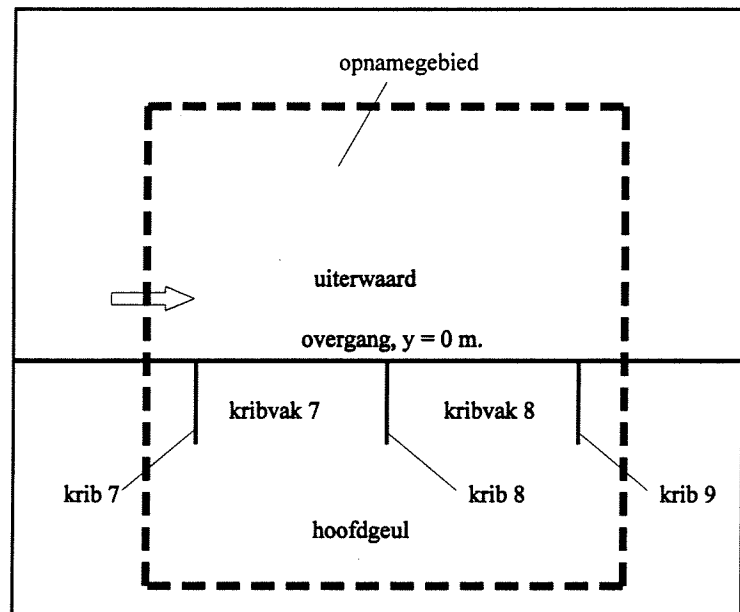
1. hoofdgeul



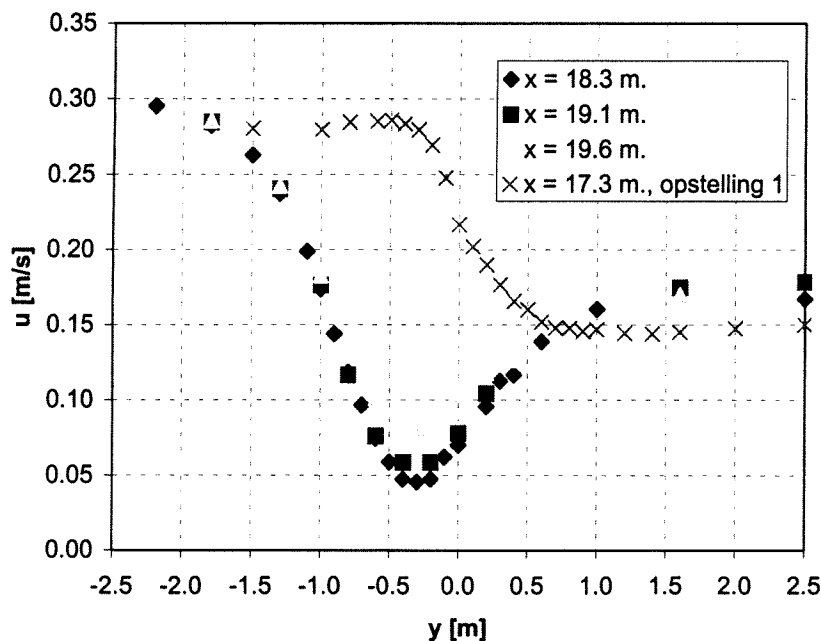
Figuur 7.1: Locatieschets van de LDA-metingen

2. kribvak
3. uiterwaard

Er bestaat zowel een snelheidsverschil tussen uiterwaard en kribvak als tussen kribvak en hoofdgeul. Er zijn dan ook twee buigpunten in het snelheidsprofiel aan te wijzen waar Kelvin-Helmholtz-instabiliteiten kunnen ontstaan (Lesieur [16]). Dit betekent dat zowel op de overgang tussen uiterwaard en kribvak ($y = 0$) als op de overgang tussen kribvak en hoofdgeul ($y = -1.0$) grootschalige horizontale wervels kunnen voorkomen. Hierbij is belangrijk dat het snelheidsprofiel in langsrichting wijzigt als gevolg van de niet-uniforme bodemtopografie in



Figuur 7.2: Locatieschets van de PTV-metingen



Figuur 7.3 Dwarsprofielen van de tijdsgemiddelde langssnelheid (LDA) op drie dwarsraaien voor opstelling 6 en een dwarsraai voor opstelling 1.

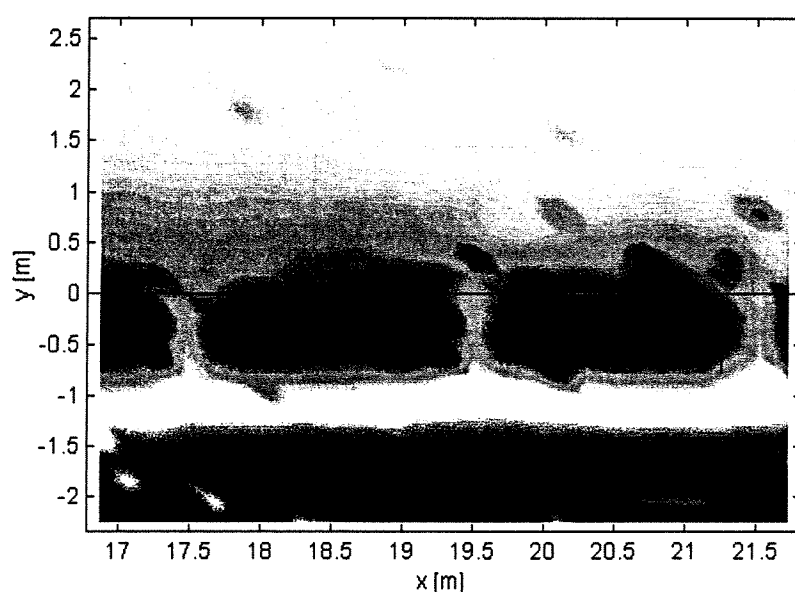
langsrichting. Dit kan consequenties hebben voor de ligging van de wervels hoewel de buigpunten voor alle drie raaien ongeveer op dezelfde posities liggen.

In figuur 7.2 is het opnamegebied voor de PTV-metingen te zien. Met de beschikbare camera kunnen twee kribvakken en een deel van hoofdgeul en uiterwaard in beeld worden gebracht. Figuur 7.4 geeft een tijdsgemiddeld snelheidsveld (absolute snelheden), bepaald uit PTV-metingen met een totale tijdsduur van ongeveer 8 minuten, weer. De volgende verschijnselen zijn waar te nemen in de kribvaksectie:

- een versnelling net achter de krib
- lage snelheden verder stroomafwaarts in het kribvak
- en stuweffecten voor de volgende benedenstrooms krib

In de hoofdgeul treedt een versnelling op bij de kribkoppen, gevolgd door een vertraging meer benedenstrooms. Ook treedt er een versnelling op, net achter de wortel van de krib op de overgang kribvak-uiteerwaard. Dit stroombeeld correspondeert met figuur 7.3 waarin de versnelling in het kribvak zichtbaar is tussen $x = 19.1$ m. (voor de krib) en $x = 19.6$ m. (na de krib).

Voor de tijdsgemiddelde stroomrichting (figuur 7.5) is in beide kribvakken min of meer hetzelfde patroon te zien: een stroming richting geul benedenstrooms van de krib en een stroming richting uiterwaard bovenstrooms van de daarop volgende krib. Op de overgang tussen kribvak en uiterwaard varieert de stroomrichting - in langsrichting - het sterkst. De richtingvariaties nemen vanaf de overgang zowel naar de kant van de uiterwaard als de kant van de hoofdgeul af. (De richtingen links- en rechtsonder in de figuur zijn niet juist).

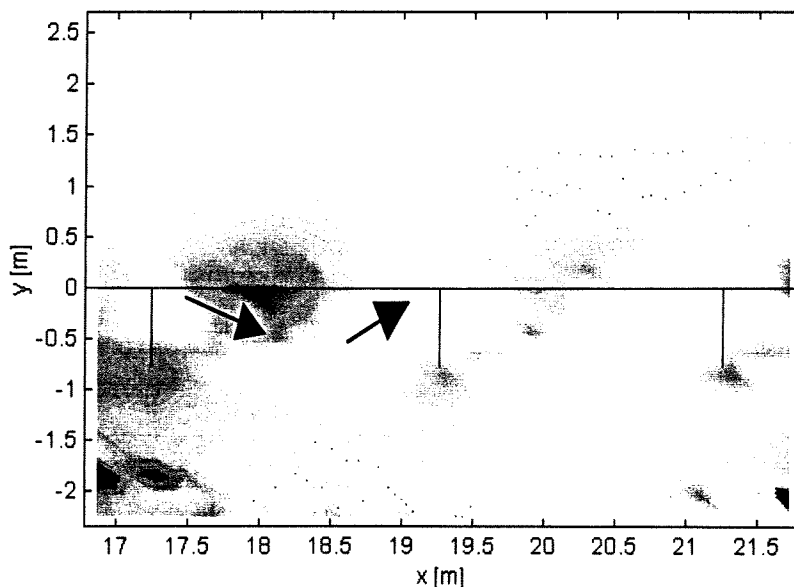


Figuur 7.4 *Tijdsgemiddeld veld van absolute snelheden aan het oppervlak (PTV) in kribvak 7 en 8, in de range van 5 cm/s (blauw) tot 30 cm/s (rood) .*

Voor de morfologie moet rekening worden gehouden met erosie bij de kribkop en de wortel van de krib als gevolg van een versnelling daar. Sedimentatie kan optreden in het gebied achter de krib als gevolg van de vertraging van de stroming. Ook de verticale neer die zich achter de krib bevindt kan ter plekke voor erosie zorgen. Door de eenvoudige rechthoekige geometrie van de krib is de neervorming sterker dan in werkelijkheid het geval is. De steile rand van de krib in het model zorgt voor een sterke neervorming. Een krib in de rivier heeft aan weerszijden een talud dat voor een veel geleidelijkere overgang met minder sterke neervorming zorgt.

In vergelijking met de opstelling zonder kribben zijn er de volgende verschillen en overeenkomsten:

- Er is sprake van een breder menggebied, waarin evenals in de vorige opstellingen sprake is van een niet-stationaire stroming.
- In het mengbied is sprake van twee overgangsgebieden van hoge naar lage snelheid: uiterwaard-kribvak en hoofdgeul-kribvak. In beide overgangsgebieden zouden Kelvin-Helmholtz instabiliteiten kunnen ontstaan.
- De stroming is i.t.t. in de vorige opstellingen (in uitontwikkelde situatie) niet-uniform in langsrichting.



Figuur 7.5 Tijdsgemiddeld veld van stroomrichtingen (richting uiterwaard geel met van maximum 14° t.o.v. de x-as, richting hoofdgeul blauw met maximum van 16°)

7.3 Grootschalige horizontale wervels

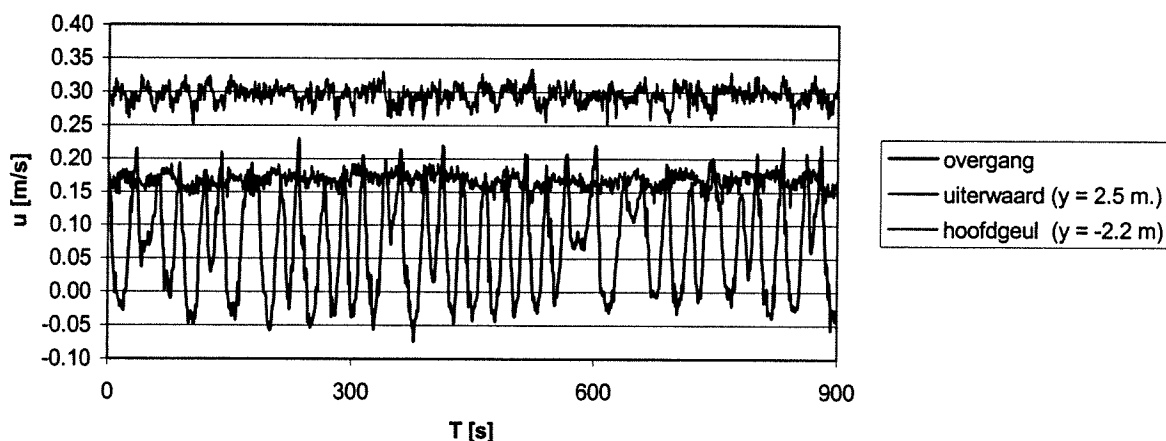
7.3.1 Inleiding

Deze paragraaf behandelt de eigenschappen van de grootschalige horizontale wervels. Voor zover mogelijk wordt dit gedaan volgens de in hoofdstuk 4 genoemde analysemethoden. Omdat de stroming in de opstelling met kribben complexer is dan die in de vorige opstellingen wijkt de analyse op bepaalde punten af. Wat betreft de LDA-metingen worden de eigenschappen op de dwarsraai midden in kribvak 7, $x = 18.3$ m., bepaald. Omdat de eigenschappen in langsrichting kunnen veranderen - als gevolg van de niet-uniforme geometrie - worden ook kort de andere twee dwarsraaien in het onderzoek meegenomen.

7.3.2 Periodiciteit

De karakteristieke tijdschaal van de grootschalige horizontale wervels kan in principe bepaald worden uit meetsignaal, energiedichtheidspectra en autocorrelatiediagrammen. Omdat ook andere verschijnselen met een periodiek karakter voorkomen, zoals loslating en een advectieve stroming in dwarsrichting, is de karakteristieke tijdschaal van de grootschalige wervels niet met zekerheid vast te stellen.

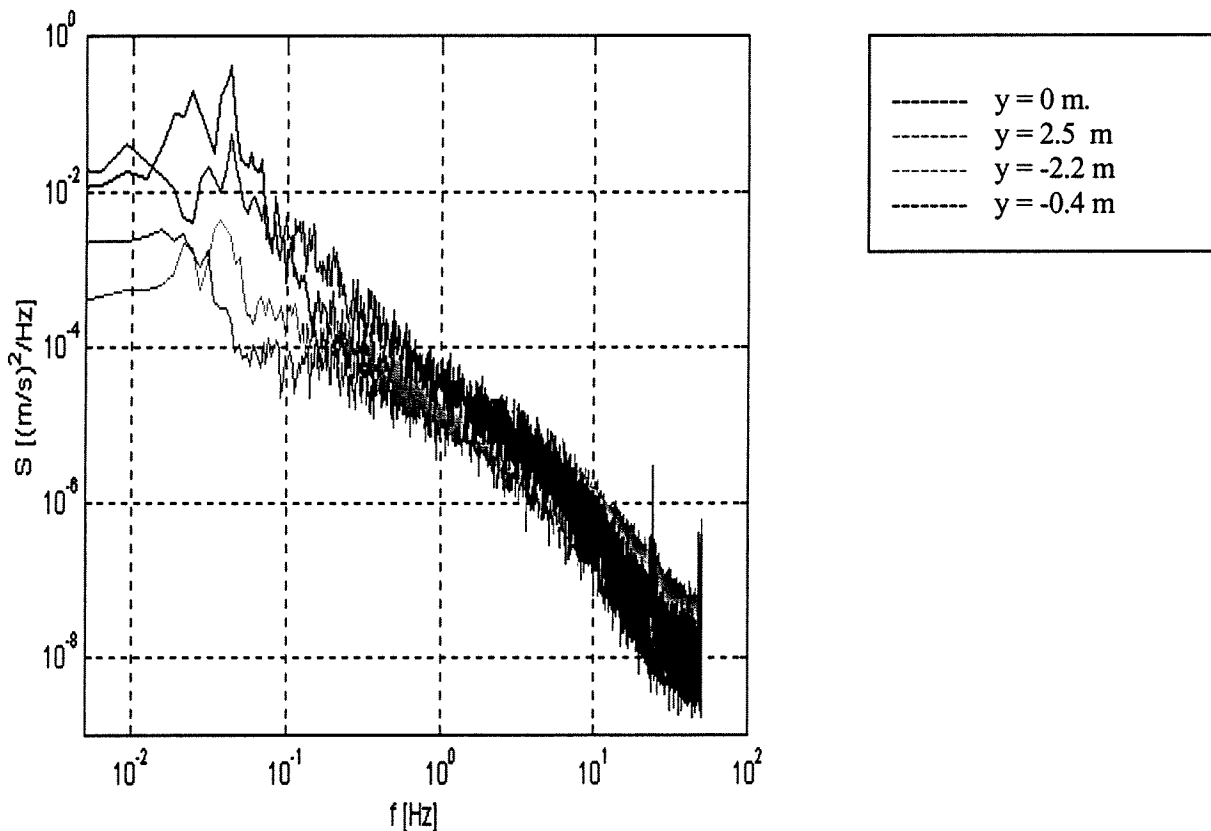
Uit het meetsignaal kan de tijdschaal geschat worden door het aantal toppen of dalen (= aantal wervels) te tellen voor de tijdsduur van de meting. In het meetsignaal op de overgang (figuur 7.6) komen in 30 minuten 62 wervels voor. Dit levert een karakteristieke tijdschaal van 29 s. op. In het meetsignaal blijken zowel kleine als wat grotere periodes voor te komen van respectievelijk 25 s. en 40 s.. De snelheid op pendelt niet op en neer tussen de snelheid in het kribvak en de snelheid in de uiterwaard zoals in een menglaag het geval zou moeten zijn (figuur 7.6). Er is sprake van extreme maxima en minima. Het negatief worden van de snelheid wijst wellicht op horizontale neervorming in het kribvak. Naast het voorkomen van horizontale wervels moet dus ook met andere verschijnselen rekening worden gehouden.



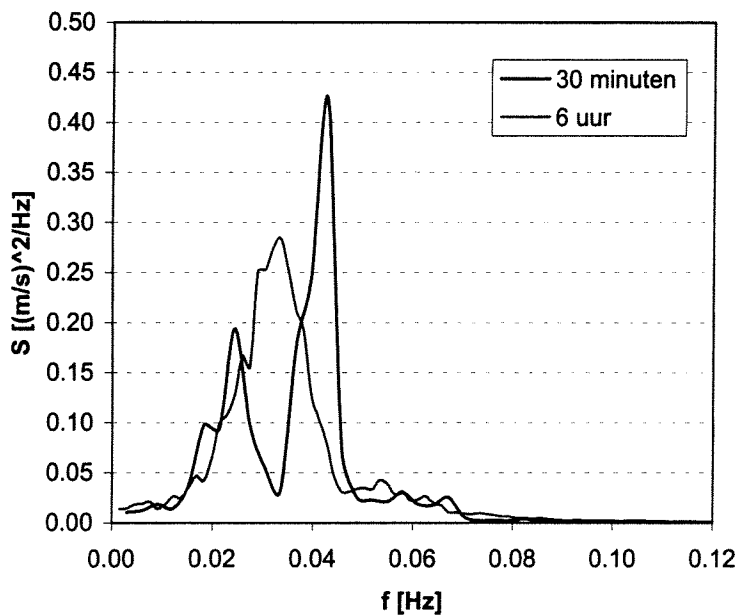
Figuur 7.6: Meetsignaal (LDA) voor hoofdgeul, overgang ($y = 0$) en uiterwaard

Variaties in dwarsrichting

In het energiedichtheidsspectrum van de horizontale langssnelheid u (figuur 7.7) is voor een paar posities op de dwarsraai de *piekfrequentie* af te lezen. Opgemerkt dient te worden dat soms twee pieken van dezelfde orde van grootte voorkomen wat aangeeft dat er nogal wat spreiding in periode bestaat. De rechterflank van de piek heeft een helling van ongeveer -4 terwijl voor de grootschalige horizontale wervels in de vorige opstellingen altijd een helling van -3 werd gevonden. Het feit dat op een locatie 2.5 meter in de uiterwaard nog een duidelijke piek aanwezig is, wijst er op dat tevens andere verschijnselen zoals hiervoor genoemd een rol spelen - die ook buiten het menggebied een duidelijke invloed hebben. Een helling van -1 vanaf ongeveer 0.2 Hz wijst op een *overgangsgebied*. In figuur 7.8 is het energiedichtheidsspectrum (op lineaire assen) voor een meetduur van 6 uur weergegeven. Verschil met de kortere 30-minuten-meting is de duidelijke piek bij één frequentie. De karakteristieke tijdschaal van ongeveer 30 s. komt overeen met de periode bepaald uit het meetsignaal. Deze waarde is vanwege de langere meetduur betrouwbaarder en nauwkeuriger dan die voor de meting over 30 minuten.



Figuur 7.7 Energiedichtheidsspectra voor verschillende y -posities op $x = 18.3$ m.



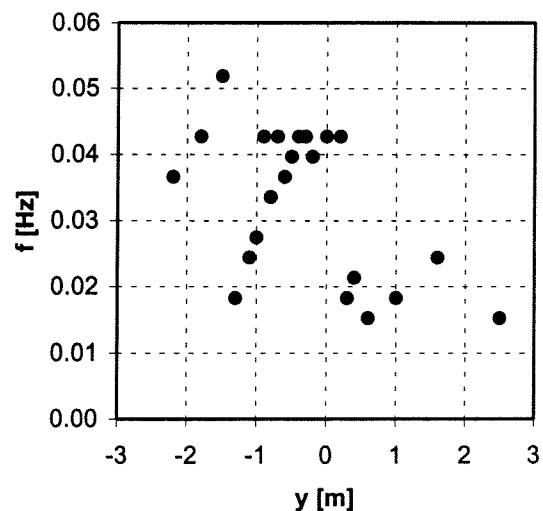
Figuur 7.8 Energiedichtheidsspectrum voor 30- minuten- en 6-uur-meting op overgang $y=0$ en $x=18.3$ m.

De periode uit autocorrelatie (figuur 7.12) is op

- de overgang ongeveer 27 s.
- in het kribvak, $y = -0.3$ m., 25 s.
- en in de hoofdgeul, $y = -1.0$ m., ongeveer 32 s.

In de vorige opstellingen is uitgegaan van een karakteristieke tijdschaal die voor alle posities in de menglaag zou moeten gelden. In de opstelling met kribben hoeft dit niet het geval te zijn omdat:

- de karakteristieke periodes van de grootschalige wervels op de overgangen kribvak-uiteerwaard en kribvak-hoofdgeul van elkaar kunnen verschillen.
- andere verschijnselen dan de horizontale wervels de periode kunnen beïnvloeden.



Figuur 7.9 Piekfrequenties, raai 9, y-coördinaten positief in de uiterwaard

Voor de 30-minuten-metingen varieert de piekfrequentie nogal sterk in dwarsrichting (figuur 7.9). Er is geen duidelijk verband tussen frequentie en positie op de dwarsraai zichtbaar. In het kribvak lijkt de frequentie echter vrij constant te zijn: ongeveer 0.04 Hz overeenkomend met een periode van 25 s..

Variaties in langsrichting

Uit autocorrelatie blijkt dat de periode op de overgang ook op $x = 19.1$ m. (voor de krib) en $x = 19.6$ m. (na de krib) 27 à 28 s. bedraagt. Voor de positie $y = -1.0$ blijkt de periode af te nemen van 32 s. op $x = 18.3$ m. tot 26 s. op $x = 19.6$ m. De afname van de periode is wellicht te wijten aan een verstoring van de horizontale wervels door de krib(kop) of aan loslatingsverschijnselen bij de kribkop.

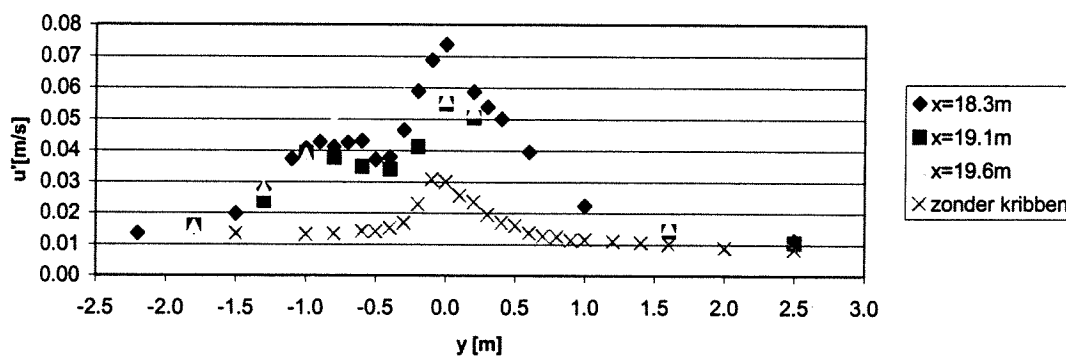
7.3.3 Intensiteit

Uit figuur 7.10 waarin de turbulente intensiteit is weergegeven voor verschillende locaties op de drie dwarsraaien is het volgende op te maken:

- een piek op de overgang uiterwaard-kribvak ($y = 0$) voor de dwarsraaien $x = 18.3$ en 19.1 m. terwijl in het kribvak de intensiteit nagenoeg gelijk blijft.
- een piek in het kribvak voor de dwarsraai $x = 19.6$ m.
- Een significante afname - vooral op de overgang - van de intensiteit tussen $x = 18.3$ en 19.1 m..
- een significante toename van de intensiteit in het kribvak tussen $x = 19.1$ m. en 19.6 m.

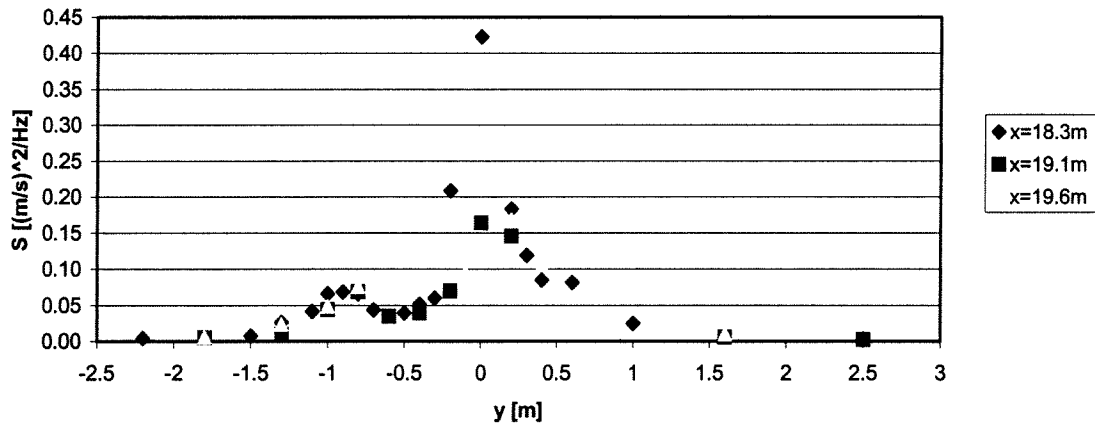
De piekenergiedichtheid (figuur 7.11) geeft ongeveer hetzelfde beeld als de turbulente intensiteit. Voor $x = 18.3$ m. en 19.1 m. is bovendien een duidelijke piek op $y = -1.0$ m. te zien. Opvallend is dat de piek op deze positie kleiner is dan die op de overgang terwijl het snelheidsverschil en de steilheid van het snelheidsprofiel juist groter zijn in de hoofdgeul. Vergeleken met opstelling 1 is hier sprake van een snelheidsverschil tussen hoofdgeul en kribvak dat bijna twee maal zo groot is. De turbulente intensiteit zou dan tevens een factor 2 groter moeten zijn hetgeen hier niet het geval is. De oorzaak voor deze onevenredigheid kan weer gezocht worden in het optreden van andere verschijnselen zoals loslating van de stroming bij de kribkop.

Uit de vectorvelden (bijlage 3) is af te leiden dat de richtingsvariatie in het midden van het kribvak groter is dan net voor de krib. In het midden van het kribvak heeft de stroming immers meer vrijheidsgraden wat betreft de stroomrichting terwijl bij de krib de stroomrichting min of meer gefixeerd is in langsrichting. Omdat een grotere variatie in



Figuur 7.10 Turbulente intensiteit voor drie dwarsraaien op verschillende posities, positieve y-coördinaten in uiterwaard

stroomrichting een grotere turbulente intensiteit tot gevolg heeft, zijn u' en S_u in het midden van het kribvak groter dan net voor de krib. Benedenstrooms van de krib ($x = 19.6$ m.), in het vertragsgebied, is in het kribvak een sterke toename van de turbulente intensiteit te zien terwijl de piekenergiedichtheid daar niet toeneemt. Hier is sprake van een toename van de turbulentie als gevolg van de vertraging achter de krib. Er treedt secundaire stroming in het verticale vlak op. De piekenergiedichtheid neemt pas weer toe in het midden van het kribvak.



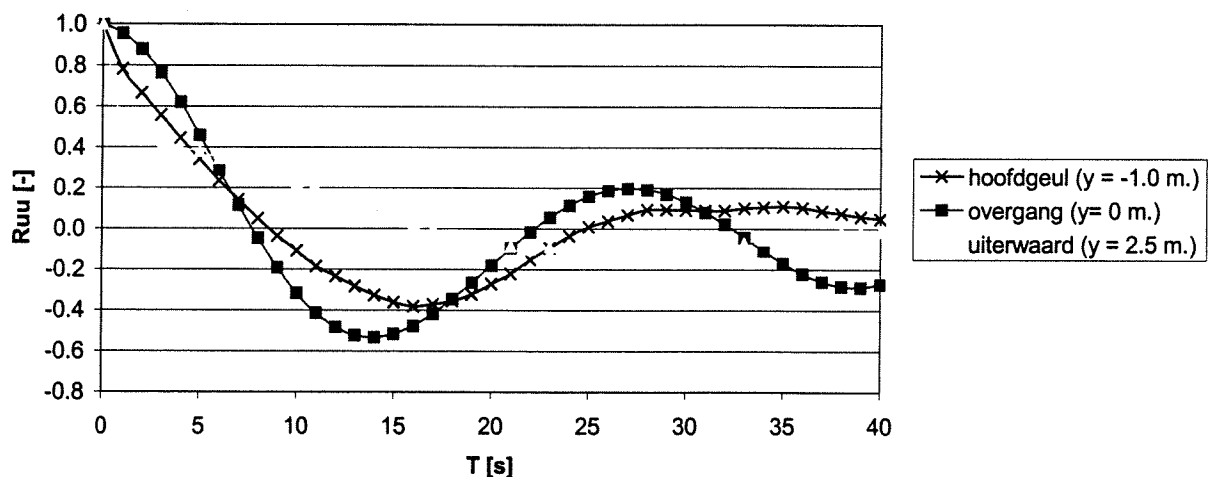
Figuur 7.11: piekenergiedichtheid voor drie dwarsraaien op verschillende posities, positieve y-coördinaten in uiterwaard

7.3.4 Afmetingen en samenhang

Uit autocorrelatie blijkt dat er sprake is van samenhangende wervels op $x = 18.3$ m., zowel op de overgang $y = 0$ als op $y = -1.0$ m. (figuur 7.12). Op de overgang is de correlatiecoëfficiënt het grootst. Ook ver op de uiterwaard, op $y = 2.5$ m., en in de hoofdgeul, op $y = -2.2$ m., is nog sprake van enige samenhang hoewel in de vectorvelden (bijlage 3) hier geen horizontale wervels worden gezien (zie bijlage 3). Op de overgang neemt de samenhang stroomafwaarts van de krib iets af en in de hoofdgeul (op $y = -1.0$ en -2.2) neemt ze juist toe tot een waarde gelijk aan die op de overgang. In de vectorvelden is waar te nemen dat de kribben een versturende werking op de wervels hebben waardoor ze de samenhang (tijdelijk) verliezen. Tussen de twee in bijlage 3 opgenomen tijdseries bestaan verschillen:

- In tijdserie 1 zijn sterk samenhangende wervels te onderscheiden (figuur 7.13a)
- In tijdserie 2 zijn de afmetingen van de wervels groter en vertonen ze minder samenhang (figuur 7.13b)

De wervels op overgang uiterwaard-kribvak in tijdserie 1 draaien met de klok mee en de wervels op de overgang kribvak-hoofdgeul tegen de klok in. De twee soorten wervels grijpen in elkaar. Ze kunnen daardoor onderling massa en impuls uitwisselen. Bij de PTV-proef is inderdaad ook waar genomen dat dit gebeurt: de kraaltjes die bij de PTV-techniek worden gebruikt, werden van de hoofdgeul naar het kribvak getransporteerd en vervolgens van het kribvak naar de uiterwaard. Dit gebeurt tevens omgekeerd van uiterwaard naar hoofdgeul. De wervels op de overgang uiterwaard-kribvak in serie 2 zijn onvolledig aan kant van het kribvak en erg langgerekt op de uiterwaard. Dit is ook waar te nemen in kleurstofproeven. De uitwisseling lijkt in deze serie sterker te zijn dan in serie 1.

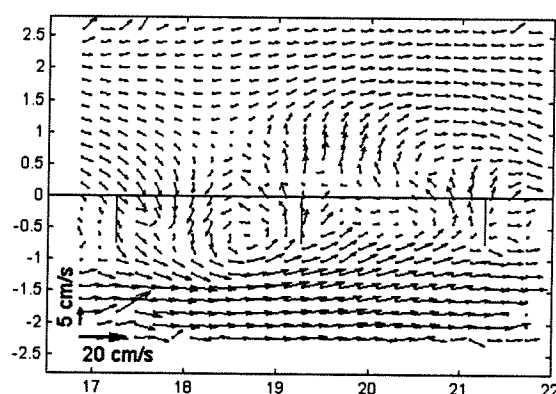
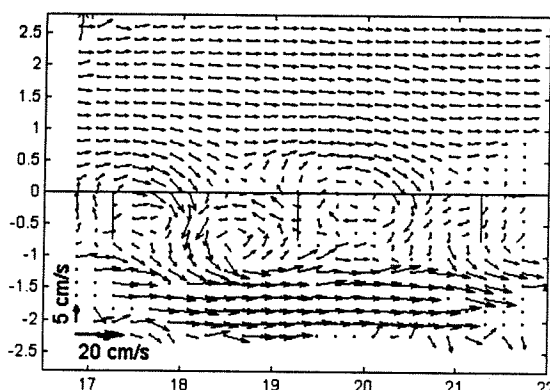


Figuur 7.12 Autocorrelatiediagram voor $x = 18.3$ m.

De afmetingen van de wervels worden kwalitatief bepaald uit de vectorvelden en uit de kleurstofproef. De lengte van de wervels bedraagt voor serie 1 voor beide overgangen ongeveer 2.5 meter. In de serie 2 is het moeilijker om de lengte van een wervel te bepalen aangezien de wervels op de overgang uiterwaard-kribvak minder samenhang vertonen. Voor de wervels op de overgang kribvak-hoofdgeul is een langere lengte van ongeveer 4.5 meter te bepalen. De wervels zijn ook breder dan in serie 1. De lengte is ook te kwantitatief te bepalen:

$$L_k = T_k \cdot c_w$$

Met een voortplantingssnelheid c_w van ongeveer 0.15 m/s en een periode T_k van 29 s. is de lengte L_k 4.35 m.. Deze waarde komt het beste overeen met de uit serie 2 bepaalde waarde van 4.5 m.. De verschillen in waargenomen lengtes zijn te wijten aan de variatie in grote van de wervels in de tijd en de de tijdafhankelijkheid van de series - wat ook in de vorige opstellingen duidelijk het geval was. De kribben onderdrukken waarschijnlijk het vrije gedrag van de wervels en leggen een bepaalde beweging op. Op dit laatste wijzen ook de gevonden lengtes van 2.5 m. en 4.5 meter die overeenkomen met één respectievelijk twee kribvaklengtes. Evenals in de vorige opstellingen moet hier rekening worden gehouden met het groeien van de wervels waardoor ze elkaar gaan verdringen zodat de effectieve lengte afneemt. Een gezamenlijke breedte van de wervels op overgang kribvak-uiterwaard en kribvak-hoofdgeul wordt bepaald omdat voor de uitwisseling tussen hoofdgeul en uiterwaard deze breedte maatgevend is (tabel 7.1).



Figuur 7.13: Vectorveld uit PTV-tijdserie 1 (boven) en tijdserie 2 (onder) waarvan de snelheid op de overgang (0.11 m/s) is afgetrokken. Y-coördinaten in de uiterwaard zijn positief. Waarden op x- en y-as in meters.

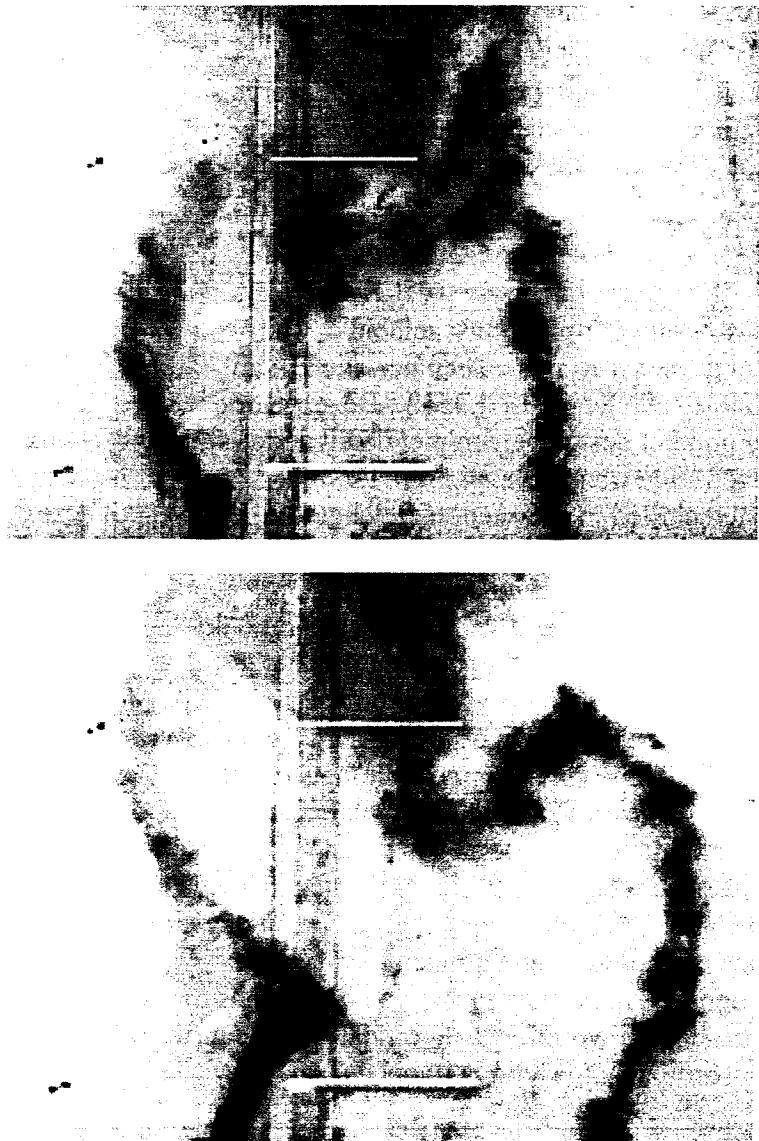
	breedte in uiterwaard	breedte in kribvak en hoofdgeul	totale breedte
tijdserie 1	0.75 m.	1.5 m.	2.25 m.
tijdserie 2	1.5 m.	1.5 m.	3.0 m.

Tabel 7.1: Breedte van de wervels

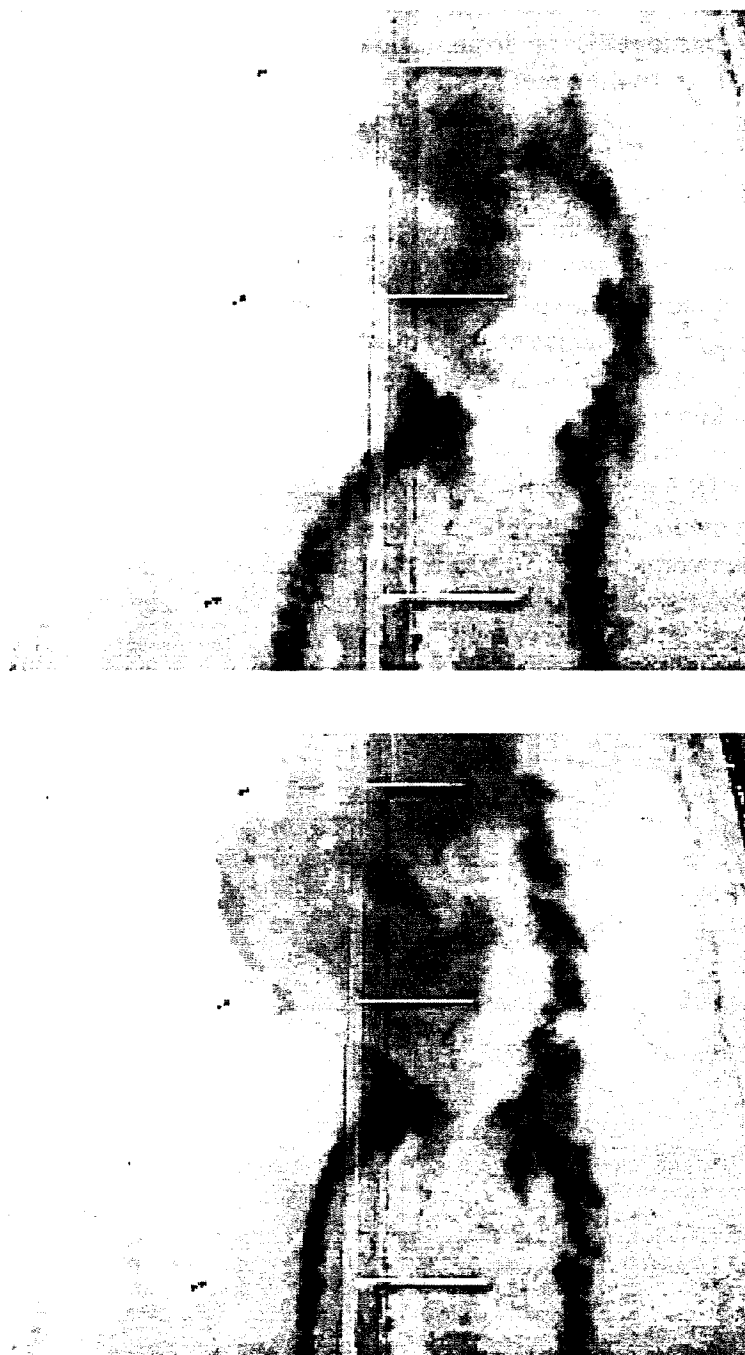
In de kleurstofproeven is loslating bij de kribkoppen goed zichtbaar. De wervels op de overgang kribvak-hoofdgeul worden door de kribkoppen verstoord, verliezen samenhang en zijn daardoor niet goed te onderscheiden (figuur 7.14). Op de uiterwaard zijn ze wel goed te zien zodat lengte en breedte daar bepaald kunnen worden. Zowel de lengte als de breedte blijken in de tijd nogal te variëren wat gezien de verschillen tussen de PTV-vectorseries 1 en 2 ook wel is te verwachten. De breedte varieert in de uiterwaard tussen 0.5 en 1.0 m.

7.3.5 Ligging ten opzichte van de overgang op $y=0$

Voor serie 1 is de ligging van de middelpunten van de wervels goed te bepalen. Het middelpunt van de wervels op de overgang uiterwaard-kribvak ligt ongeveer op de overgang ($y = 0$). Het middelpunt van de wervels op de overgang kribvak-uiteraard bevindt zich gemiddeld op $y = -0.7$ m. Voor series 1 en 2 is voor de overgang kribvak-hoofdgeul de ligging hetzelfde. Voor de overgang uiterwaard-kribvak is geen middelpunt zichtbaar vanwege de geringe samenhang zodat de ligging niet is te bepalen. De bepaalde posities komen overeen met de ligging van de buigpunten in het snelheidsprofiel.



Figuur 7.14: Twee momentopnames uit kleurstofproef met inspuitpunten in de uiterwaard ($y = 0.3$ m.) en in de hoofdgeul ($y = -1.0$ m.). De breedte van de wervels in de uiterwaard varieert. In het kribvak is door vertraging veroorzaakte diffusie zichtbaar.



Figuur 7.15: Momentopnames uit kleurstofproef: sterke stroming van uiterwaard naar kribvak (boven) en wervels die de in elkaar gaan haken (onder).

7.3.6 Uitwisseling en mogelijke sedimentatie in uiterwaard

De uitwisseling in de opstelling met kribben is aanzienlijk groter dan in de opstellingen zonder kribben. Dit is zichtbaar gemaakt door drijvertjes (kraaltjes) in het water te strooien in hoofdgeul en uiterwaard. Kraaltjes worden van de hoofdgeul naar de uiterwaard en vice versa getransporteerd. Het water slingert tussen hoofdgeul en uiterwaard via de kribvakken heen en weer. Het menggebied met twee overgangsgebieden waarin grootschalige wervels voorkomen is breder dan in de stroming zonder kribben. Doordat de wervels in elkaar grijpen kunnen ze onderling stoffen uitwisselen. Een wervel op de overgang hoofdgeul-kribvak kan zodoende bijvoorbeeld zand uit de hoofdgeul overdragen aan een wervel op de overgang kribvak-uiteraard zodat het zand meteen naar de uiterwaard wordt getransporteerd waar het vervolgens afgezet kan worden.

Er bestaat voor $x = 18.3$ m. (midden van het kribvak) een positieve correlatie tussen langssnelheid u en dwarssnelheid v in hoofdgeul (op $y = -1.0$ m.) en een negatieve correlatie tussen u en v op de overgang ($y = 0$). De dwarssnelheid is hierbij positief richting de uiterwaard. Dit betekent dat als de snelheid u groot is in hoofdgeul of uiterwaard, de dwarssnelheid v meestal naar het kribvak is gericht.

Een negatieve correlatie tussen $u_{y=0}$ en $u_{y=-1.0}$ wijst er dan ook op dat een sterke stroming van hoofdgeul naar kribvak een sterke stroming van uiterwaard naar kribvak op dat moment uitsluit en vice versa (figuur 7.15). Het gevolg is een effectieve uitwisseling tussen uiterwaard en hoofdgeul.

Hoofdstuk 8 Gedrag van individuele grootschalige wervels

8.1 Inleiding

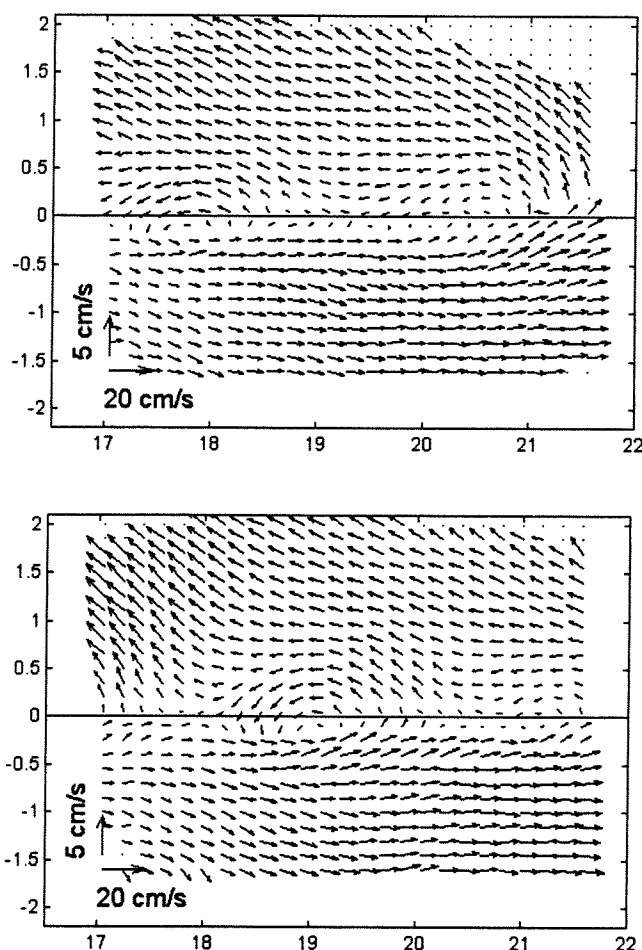
In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan het gedrag van de individuele wervels. Daarbij wordt aandacht gegeven aan de invloed die de wervels in de ruimte onderling op elkaar kunnen uitoefenen. Het gedrag wordt bepaald uit kleurstofproeven en bewerkte (door voortplantingssnelheid van het snelheidsveld af te trekken) momentane vectorvelden (PTV) omdat deze juist de individuele wervels zichtbaar maken. De kwantitatieve methoden die in de vorige paragrafen naar voren kwamen zijn hier niet voor geschikt. In dit hoofdstuk komen in principe alle opstellingen behalve de opstelling met kribben aan bod. Vanwege de complexiteit van de stroming kan laatstgenoemde opstelling niet in deze analyse worden meegenomen. Vanwege de korte meettijd is een onderlinge vergelijking van de verschillende opstellingen statistisch niet verantwoord. Voor een zelfde opstelling bestaan bovendien tussen de series PTV-vectorvelden onderling al grote verschillen.

8.2 Groei en afname

Tijdsgemiddelde groei van grootschalige wervels komt alleen voor in de zich ontwikkelende stroming. In de uitontwikkelde stroming, de quasi-uniforme stroming, is de tijdsgemiddelde groei per definitie gelijk aan 0. Dat neemt niet weg dat individuele wervels in de quasi-uniforme stroming

a) in grootte van elkaar kunnen verschillen,
b) kunnen groeien of afnemen in grootte.

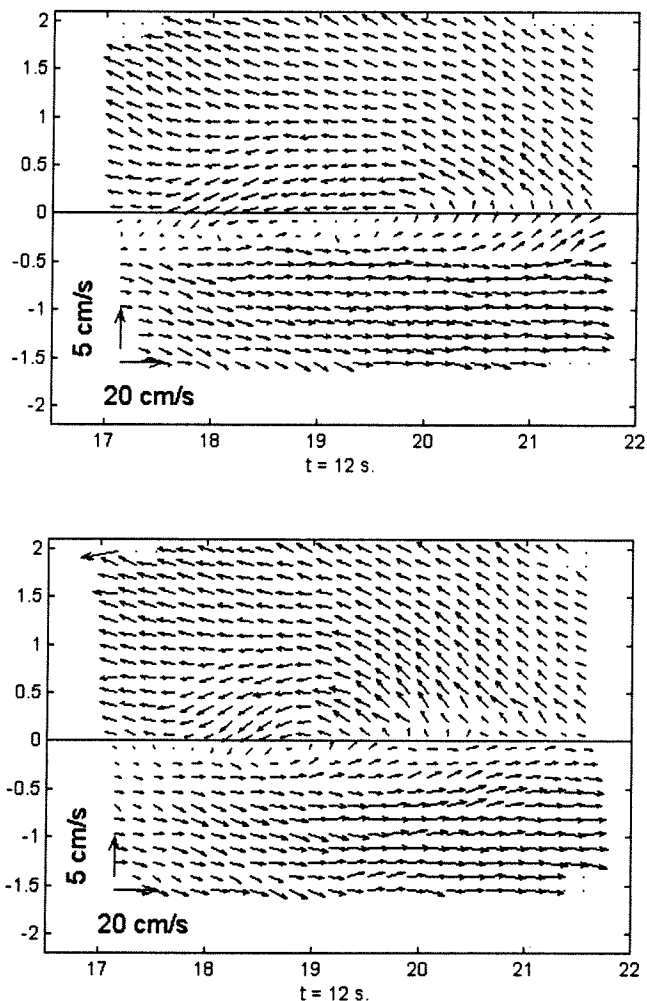
In figuur 8.1 worden twee momentopnames (opstelling 1) met een tussentijd van 6 s. getoond waarin dezelfde wervels (voor een deel) zichtbaar zijn. Ten eerste kan gezien worden dat de meest stroomafwaartse wervel op $t = 0$ groter is dan de achterste wervel (a). De achterste wervel groeit in de tussentijd van 6 s. terwijl de andere wervel juist afneemt in grootte (b).



Figuur 8.1: Momentane vectorvelden (PTV) voor opstelling 1 met een tussenperiode van 6 s.

8.3 Asymmetrie

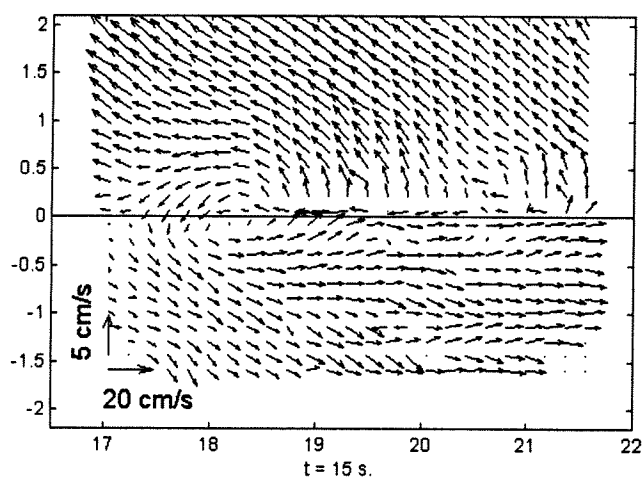
Tijdens de voortplanting van een wervel stroomafwaarts kunnen de afmetingen in lengte en breedte toe- of juist afnemen (zoals in de vorige paragraaf werd aangetoond). Hierdoor ontstaat een zekere asymmetrie of onregelmatigheid. Deze onregelmatigheid is reeds in paragraaf 5.1 geconstateerd voor het meetsignaal van de horizontale langssnelheid. In figuur 8.2 zijn voor opstelling 5 (zomerkade op 0.25 m. van de overgang) twee momentopnames uit verschillende tijdseries opgenomen. De ene wervel (bovenste plaatje) is langgerechter dan de andere. Dit geeft niet alleen aan dat de wervels onderling in grootte kunnen verschillen maar ook dat er geen vaste verhouding tussen lengte en breedte is te bepalen. Asymmetrie kan ook ontstaan doordat de ene wervel zich sneller voortplant dan de andere. Er treedt zodoende lokaal en tijdsafhankelijk ook een zekere asymmetrie op in de uitwisseling tussen uiterwaard en hoofdgeul. In figuur 8.3 is de asymmetrie in een vectorveld (voor opstelling 2) goed te zien: Het achterwaartse gedeelte van de wervel is veel korter dan het voorwaartse gedeelte waardoor tijdelijk in dit gebied netto uitwisseling naar de uiterwaard optreedt. Vanwege behoud van impuls is tijdsgemiddeld overigens geen netto uitwisseling naar uiterwaard of hoofdgeul mogelijk.



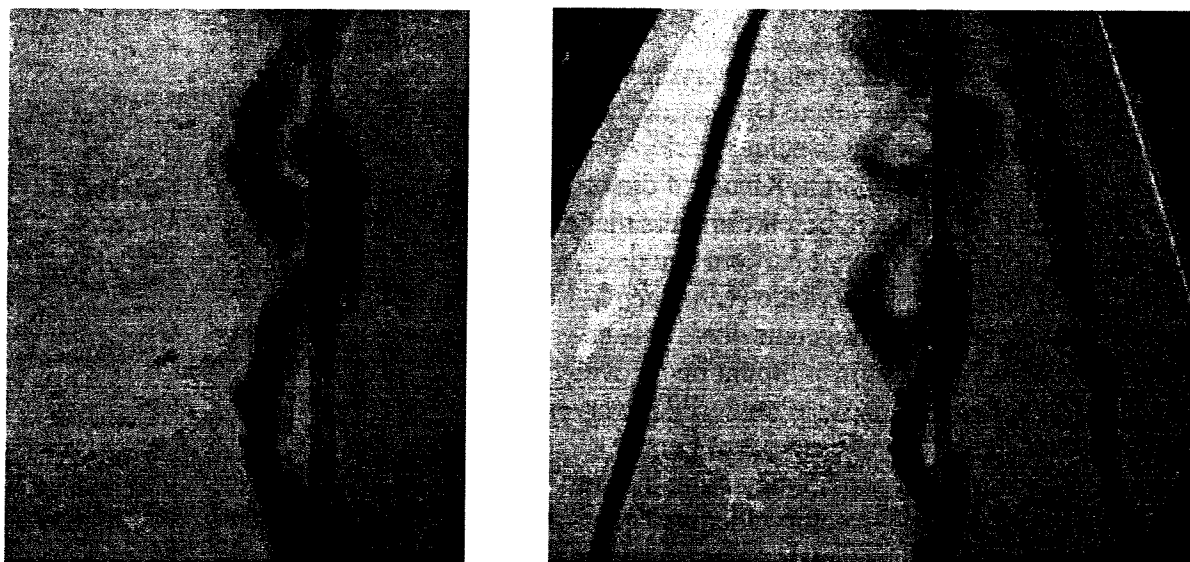
Figuur 8.2: Twee momentane vectorvelden (PTV) voor opstelling 5 uit twee verschillende tijdseries.

8.4 Paargedrag

Bij een sterke groei kunnen wervels zo groot worden dat ze elkaar gaan verdringen. In paragraaf 5.3 werd bij het bepalen van de lengte uit vectorvelden en kleurstofopnames al geconstateerd dat deze vaak korter is dan de berekende waarde met:



Figuur 8.3: Momentaan vectorveld (PTV) voor opstelling 2.

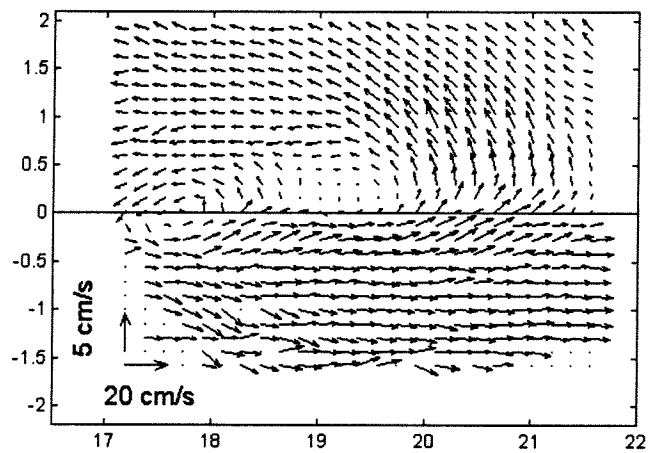


Figuur 8.4: Momentopnames van kleurstofproef voor opstelling 1. Links is begin van paren van twee wervels zichtbaar. Rechts is een aantal wervels zichtbaar die paargedrag vertonen.

$$L_k = T_k \cdot c_w$$

In figuur 8.4 is te zien dat de ene wervel de andere als het ware wil passeren. Dit wordt aangeduid met 'begin van paren'. Een soort oproleffect is waar te nemen. Het paargedrag zet echter niet door; de achteropkomende wervel ziet geen kans de ander te passeren. Dit paargedrag is overigens niet waarneembaar in de opstellingen van *Van Prooijen* [19]. Door

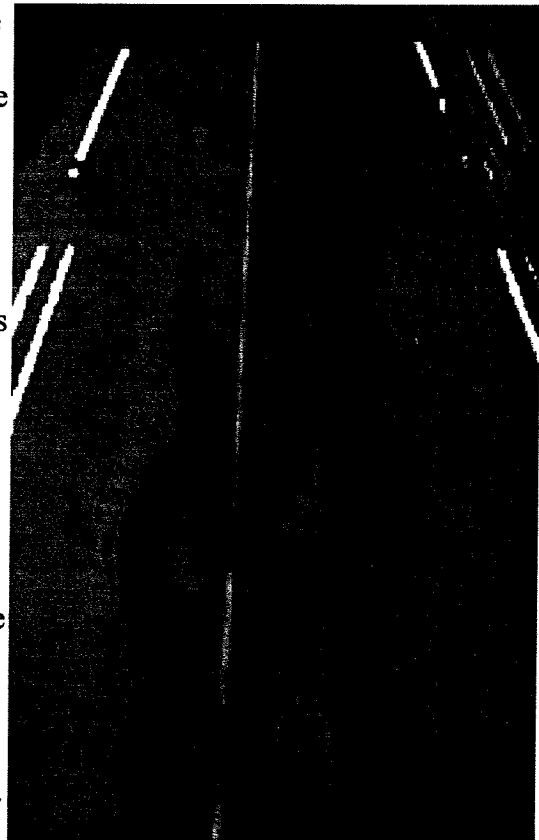
de schuifspanning die de wervels op elkaar uitoefenen zal de voorste wervel richting de uiterwaard worden geduwd en de achterste naar de hoofdgeul. Deze schuifspanning wordt groter naarmate de afstand tussen de middelpunten van de grootschalige wervels kleiner wordt. In figuur 8.5 zijn twee wervels te zien met een onderlinge afstand tussen de beide middelpunten van slechts 1.5 m. De voorste wervel ligt meer in de uiterwaard (door de schuifspanning). Het paargedrag is hier ver gevorderd.



Figuur 8.5: Momentaan vectorveld (PTV) voor opstelling 4.

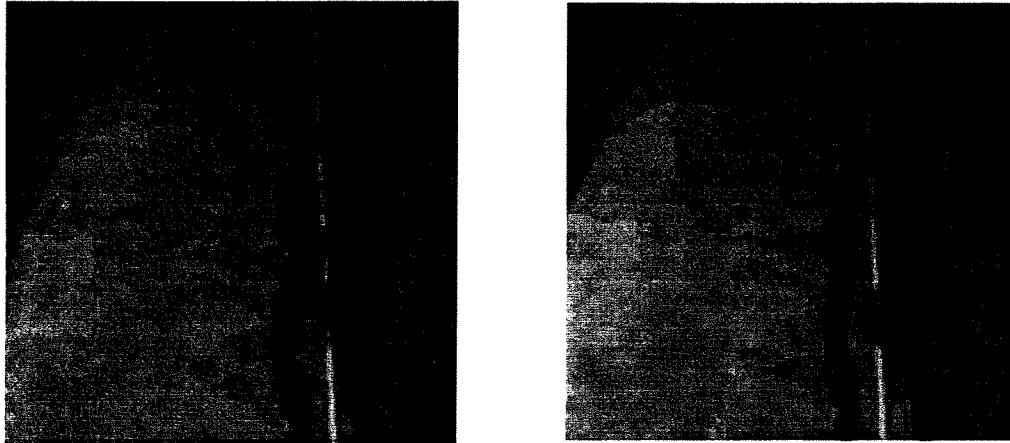
8.5 Afmetingen

Uit figuur 8.6 is een breedte van de wervels van ongeveer twee meter af te lezen. De waarde van de breedte die afgelezen wordt is echter sterk afhankelijk van het inspuitspunt. Kleurstof die op de overgang wordt ingespoten, bereikt immers niet de maximale breedte. De kleurstofstroom aan de uiterwaardzijde van de zomerkade (vanaf een tweede inspuitspunt) is sterk gecorreleerd met de kleurstofstroom vanaf het inspuitspunt op de overgang. Uit deze stroom zijn de afzonderlijke wervels duidelijk van elkaar te onderscheiden. Een wervellengte van ongeveer 3.5 meter kan hieruit worden afgelezen. Uit de vectorvelden kan een lengte variërend van 3 tot 6 meter worden bepaald. Zoals in hoofdstuk 5 al is opgemerkt, is de variatie in frequenties van de grootschalige wervels een stuk groter en daardoor tevens de variatie in lengte dan bij *Van Prooijen* [19]. Hij bepaalde een breedte van 2 meter en een lengte van 6 meter uit kleurstofmetingen. De wervels zijn bij hem 3 maal zolang als breed. Hier lijkt de breedte/lengte verhouding ongeveer 1:2 te zijn. In *Ikeda&Sano* [12] is de breedte-lengte verhouding 1:2.5. De duur van de kleurstofmetingen is echter relatief kort zodat het trekken van harde conclusies niet mogelijk is. In figuur 8.4 (rechts) en 8.6 en in de



Figuur 8.6: Momentopname uit kleurstofproef voor opstelling 4.

vectorvelden zijn zowel brede als smalle wervels te zien. Hieronder staan nog twee momentopnames voor opstelling 5 waarin de breedte van de wervels aanzienlijk beperkt wordt door de zomerkade.



Figuur 8.7: Momentopnames uit kleurstofproef voor opstelling 5

Hoofdstuk 9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Inleiding

Dit onderzoek naar uitwisselingsprocessen in een fysisch model van een rivier met uiterwaard, zomerkades en kribben wordt afgesloten met een aantal conclusies en aanbevelingen. De meeste onderzoeksresultaten kunnen niet direct in de praktijk worden toegepast omdat een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid is gemaakt. Numeriek onderzoek is de brug tussen dit experimentele onderzoek en de toepassing in de praktijk. Daarom zijn de conclusies en aanbevelingen vooral bedoeld voor diegenen die zich bezig houden (of dat willen gaan doen) met numeriek onderzoek naar grootschalige horizontale wervels. Er is echter ook experimenteel vervolgonderzoek gewenst, en dan met name wat betreft de rivier met kribben.

Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

paragraaf 9.2 geeft de conclusies van dit onderzoek;

paragraaf 9.3 gaat in op aanbevelingen t.a.v. vervolgonderzoek;

9.2 Conclusies

In vergelijking met het onderzoek van *Van Prooijen* [19] kunnen hier extra conclusies worden getrokken t.a.v. de *inrichting van het fysisch model en de meetapparatuur*. Voor eerdere conclusies wordt verwezen naar het afstudeerverslag van *Van Prooijen*.

- Ook in dit onderzoek is het fysisch model voldoende lang om een quasi-uniforme situatie in te stellen voor bijna alle opstellingen. Alleen voor de opstelling met een schuine aanstroming richting de hoofdgeul is het model ook nu niet lang genoeg.
- Het model kent beperkingen wat betreft de instelling van de stuw. De stuw is in de periode tussen de proeven door *Van Prooijen* en de metingen t.b.v. dit onderzoek gaan zakken hetgeen lagere waterstanden, hogere snelheden en een groter langsverhang tot gevolg heeft gehad (bij hetzelfde debiet). Hierdoor was het niet mogelijk dezelfde instellingen als bij *Van Prooijen* te realiseren.
- De opstelling en instelling van snelheden voor de rivier met kribben zijn niet helemaal representatief voor die in werkelijkheid. Doordat de uiterwaard niet ruw genoeg is t.o.v. het kribvak, zijn de snelheden in de uiterwaard hoger dan in het kribvak (in werkelijkheid vaak lager dan in het kribvak). De vormgeving van de kribben en kribvakken is bovendien sterk vereenvoudigd.
- De PTV-techniek is voor de opstelling met kribben gebleken een handige methode te zijn om een tijdsgemiddeld snelheidsveld voor een niet-uniforme stroming te bepalen. (Voor stromingen die quasi-uniform zijn in langsrichting volstaat een met LDA gemeten dwarsraai). Het doormeten van een flink aantal dwarsraaien met de LDA zou veel meer tijd kosten.
- De EMS is een meetinstrument dat niet in de uiterwaard is te gebruiken vanwege de geringe diepte daar. Daarnaast voldoet de EMS niet aan de vereiste nauwkeurigheid in dwarsrichting. Bovendien is er een te grote onzekerheid over de richting die wordt

gemeten (fouthoek van $\pm 10^\circ$). Een voordeel in vergelijking met de LDA voor de toepassing in dit experiment is dat twee horizontale componenten gemeten kunnen worden.

- Het gelijktijdig gebruik van EMS en LDA bleek handig te zijn om de correlatie tussen snelheden op twee verschillende posities op een dwarsraai te bepalen. Dit kwam vooral van pas in de opstelling met kribben waarin op twee posities op een dwarsraai grootschalige horizontale wervels voorkwamen.

De volgende conclusies kunnen getrokken worden t.a.v. de *meetresultaten*:

Algemeen (opstellingen zonder kribben, 1 t/m 5)

- In een recht samengesteld kanaal blijkt de formule $h/2c_f$ met over uiterwaard en hoofdgeul gewogen gemiddelde waarden voor h en c_f een goede schatting te geven voor de ontwikkellengte.
- Een snelle ontwikkeling van de stroming hangt voor een belangrijk deel af van een goede instelling van de waterbeweging.
- Bij een groter aandeel van de uiterwaard in de menglaag neemt de totale menglaagbreedte toe.
- Voor 'rechte' stromingen en in mindere mate voor schuine stromingen kan de karakteristieke tijdschaal uit de gemiddelde snelheid van hoofdgeul en uiterwaard en de menglaagbreedte (uit het snelheidsprofiel afgelezen) redelijk nauwkeurig bepaald worden met: $T_k = c \delta/u_c$ met $c = 8$.
- Het aandeel van de grootschalige horizontale wervels in de totale turbulente energie is in het midden van de menglaag maximaal 75 % en neemt naar de zijanten af tot ongeveer 40 %.
- In de uitontwikkelde stroming is sprake van een dynamisch groei- en afbraakproces. In plaats en tijd optredende individuele grootschalige wervels kunnen zodoende voor een opstelling onderling sterk in afmetingen verschillen. In de opstellingen waarin kleurstofmetingen zijn gedaan, is sprake van wervels die de neiging hebben om te gaan 'paren' (hetgeen in de opstellingen met verticale stap niet is geconstateerd).

Versillen tussen verticale stap en 1:2 talud

- In de opstellingen met verticale stap kan het verloop van de horizontale langssnelheid in de hoofdgeul in dwarsrichting vanaf de overgang vergeleken worden met een grenslaag die zich bij een verticale wand voordoet. Een duidelijke knik in het snelheidsprofiel t.p.v. de overgang is te zien. Als gevolg van de meer geleidelijke overgang van diep naar ondiep is het wandeffect van de overgang bij een 1:2 talud veel minder. Een duidelijke knik in het snelheidsprofiel is daardoor afwezig en de overgang van hoge snelheid in de hoofdgeul naar een lage snelheid in de uiterwaard verloopt geleidelijker. De snelheidsgradiënt in de uiterwaard is daardoor een stuk groter. Dit wijst op een relatief sterke groei van de wervels in de uiterwaard.
- De met het snelheidsverschil geschaalde turbulente intensiteit u' van de grootschalige horizontale wervels is bij een 1:2 talud groter dan bij een verticale stap. De turbulente intensiteit v' drukt de mate van uitwisseling uit en wordt verondersteld evenredig te zijn met u' . Het 1:2 talud heeft dus een significant grotere uitwisseling tot gevolg

vergeleken met de verticale stap. Het effect van het talud wordt vooral duidelijk in opstelling met schuine aanstroming richting uiterwaard: in het geval van een 1:2 talud ligt de menglaag een stuk verder in de uiterwaard dan bij de verticale stap het geval is. Tevens is er sprake van een groter percentage samenhangende wervels. Het 1:2 talud blijkt hier dus een gemakkelijker te nemen hindernis voor de grootschalige wervels te zijn dan de verticale stap.

- Een grotere geschaalde turbulente intensiteit wijzen erop dat de mate van uitwisseling en de sedimentatie in de uiterwaard, die daarvan het gevolg is, in geval van een 1:2 talud groter zijn dan in het geval van een verticale stap.

Zomerkades

- Een zomerkade reduceert de menglaagbreedte en de afmetingen van de grootschalige horizontale wervels als deze zich op een geringe afstand (op 0.25 m.) van de overgang tussen uiterwaard en hoofdgeul bevindt. Tevens treedt een verschuiving naar de hoofdgeul op. Een zomerkade heeft geen effect op menglaagbreedte en grootschalige wervels als deze op ruime afstand (op 0.75 m.) van de overgang ligt.
- De zomerkade vormt geen begrenzing van het gebied waar de grootschalige wervels voorkomen. In beide opstellingen met zomerkades passeren de wervels de zomerkade in dwarsrichting.
- Een zomerkade kan, afhankelijk van z'n ligging, de mate van uitwisseling en de sedimentatie in de uiterwaard die daarvan het gevolg is, beperken.

Kribben

- Bij overstroomde kribben in een rivier met uiterwaard zijn grootschalige horizontale wervels te verwachten. In het experiment treden op twee plaatsen grootschalige horizontale wervels op:
 - 1) overgang kribvak - uiterwaard
 - 2) overgang kribvak - hoofdgeul
- De kribben forceren in de hoofdgeul een grote gradiënt van de horizontale langssnelheid. Hierdoor worden de horizontale wervels gevormd. Door de impulsuitwisseling van de wervels onderling is er een grote impulsoverdracht van de hoofdgeul naar kribvak en uiterwaard.
- Een eenduidige analyse van de grootschalige wervels is niet mogelijk omdat er ook andere fenomenen zoals loslating een rol spelen. De grootte van de maxima in turbulente intensiteit of piekenergiedichtheid kan bijvoorbeeld niet gerelateerd worden aan de grootte van de bijbehorende snelheidsverschillen.
- In het kribvak vindt een grote richtingsvariatie in ruimte en tijd plaats. Deze variatie zorgt voor een grote uitwisseling van impuls, wat in de praktijk kan leiden tot uitwisseling van stoffen en fijn sediment. De uitwisseling is groter dan bij een stroming zonder kribben.

9.3 Aanbevelingen t.b.v. vervolgonderzoek

De volgende aanbevelingen worden gedaan ter *nadere verwerking van de uit dit project verkregen meetdata*:

- Naast een horizontale component van de snelheid (LDA) is ook de verticale component (w) gemeten. Uit de meetseries naar de verticale component kan meer inzicht verkregen worden in de invloed van de bodemwrijving (door u/w te bepalen). Bovendien kan uit deze metingen bepaald worden in hoeverre secundaire stroming (in het verticale vlak) rond de overgang aanwezig is (bijvoorbeeld d.m.v. spectraalanalyse).
- Het aandeel van de grootschalige horizontale wervels in de totale hoeveelheid turbulente energie kan nauwkeuriger bepaald worden door voor elk meetpunt (LDA) in het energiedichtheidsspectrum de maximum frequentie (ongeveer gelijk aan u/δ) van de grootschalige wervels te bepalen en vervolgens de oppervlakte onder het spectrum te berekenen.
- De piekfrequentie van de grootschalige wervels kan nauwkeuriger bepaald worden door in het energiedichtheidsspectrum (LDA) het zwaartepunt (de piekfrequentie) van de turbulente kinetische energie in de grootschalige wervels te bepalen i.p.v. de piekfrequentie af te lezen bij de piekenergiedichtheid.
- Van de momentane snelheidsvelden (PTV) kunnen vorticiteitsplaatjes gemaakt worden waaruit de sterkte van de wervels en de ligging van het middelpunt (beter) bepaald kunnen worden.

De volgende aanbevelingen voor *verder experimenteel onderzoek* worden gedaan:

- Voor het bepalen van de effecten van de door IVR voorgestelde maatregelen in het kader van 'Ruimte voor de rivier' kunnen de volgende experimenten gedaan worden:
 - 1) experiment met verhoogde hoofdgeul (wat gelijk staat aan het verlagen van de uiterwaard, wat uitvoeringstechnisch ingrijpender is). Door vergelijking met de vorige experimenten kan het effect van verlaging van de uiterwaard bepaald kan worden. Ook het effect van verdieping van de hoofdgeul is zodoende te bepalen.
 - 2) experiment met ruwere uiterwaard, lokale hoogwatervrije terreinen of lokale verruwingen (ooibos)
 - 3) experiment met kribben waarbij de kribhoogte wordt gevarieerd waarmee het effect van kribverlaging wordt bepaald
- Het is aan te bevelen een kribtalud aan te brengen in het kribvak om zodoende een meer praktijkgetrouwe stroming te kunnen bewerkstelligen.
- Een beter gestroomlijnde en praktijkgetrouwe vormgeving van de kribben zal leiden tot minder energieverlies aan de verticale neer achter de krib. Een beter gestroomlijnde vormgeving van de kribkop zal het energieverlies aan de kleine wervels verminderen. Beide aanpassingen zullen leiden tot grotere horizontale wervels en een vergrootte uitwisseling tussen geul, kribvak en uiterwaard.
- Door de kribvaklengte te variëren, wordt inzicht gekregen in de mate waarin de kribvaklengte bepalend is voor de turbulente waterbeweging.

Tenslotte wordt nog aanbevolen numeriek onderzoek te verrichten. Daarbij worden de

volgende aanbevelingen gedaan:

- Validatie en calibratie van computermodellen met de beschikbare meetdata dient te gebeuren zodat duidelijk wordt in hoeverre de huidige modellen de experimenten kunnen narekenen. Ten aanzien van de stroming met kribben is waarschijnlijk nog meer experimenteel onderzoek gewenst voordat aan numerieke simulatie kan worden begonnen.
- Vervolgens kunnen met de computermodellen de effecten van de door IVR voorgestelde maatregelen berekend worden. Als zich hierbij geen problemen voordoen, kan experimenteel onderzoek op deze punten achterwege blijven.
- Als de waterbeweging goed gemodelleerd is, kunnen berekeningen van sedimenttransport uitgevoerd worden.

Literatuur en referenties

1. Alavian, V. and Chu, V.H., "Turbulent exchange flow in shallow compound channel", in Proceedings of the 21th I.A.H.R. congress, Melbourne, pp. 19-23, 1985.
2. Battjes, J.A., "Vloeistofmechanica", Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde, februari 1995.
3. Booij, R. and Tukker, J. (1999), "Integral model of shallow mixing layers" , to be published.
4. Booij, R., "Turbulentie in de waterloopkunde", Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Sectie Vloeistofmechanica, december 1992.
5. Bos, R.M. en Havinga, F., "Experimenteel onderzoek naar waterbeweging in een rivier met kribvak en uiterwaard", Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Waterbouwkunde en Offshore, maart 2000.
6. Brown, G.L. and Roshko, A., "On density effects and large structure in turbulent mixing layers", J. Fluid Mech. 64, 775 (1974).
7. Chen, D. and Jirka, G. H.(1998), "Linear stability analysis of turbulent mixing layers and jets in shallow water layers", Journal of hydraulic research, Vol. 36, No. 5
8. Chu, V.H. and Babarutsi, S. (1988), "Confinement and bed-friction effects in shallow turbulent mixing layers", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 10, October 1988. Pp 1257-1274.
9. Chu, V.H., Wu, J.-H. and Khayat, R.E. (1991), " Stability of transverse shear flows shallow open channels", J. Of hydr. Eng. Vol. 117, No. 10, October 1991
10. Ervine, D.A., Willetts, B.B., Sellin, R.J.H. and Lorena, M. (1993), "Factors affecting conveyance in meandering compound flows" Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 119, No. 12, December 1993. Pp 1383-1399.
11. Godreche, C. and Manneville, Paul (editors) (1997), "Hydrodynamics and nonlinear instabilities", Cambridge University press, ISBN 0 521 45503 0
12. Ikeda, S. and Sano, T., "LES Simulation of flow and suspended sediment transport in two-stage channels", I.A.H.R. Symposium on river, coastal and estuarine morphodynamics Genova, September 1999, Vol. 1, pp 131-140
13. Kleinhans, M.G., "Sedimenttransport in de Waal: Hoogwater maart 1997", Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie, juli 1997.
14. Kleinhans, M.G., "Sedimenttransport in de Waal: Hoogwater november 1998", Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie, september 1999.
15. Knight, D.W. and Shiono, K.(1990), "Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel", J. of Hydr. Res. Vol. 28, 1990, No. 2
16. Lesieur, M. (1990), "Turbulence in fluids", ISBN 0-7923-0645-7
17. Meijer, P.E. en Schroevers, M., "AQUA Vision AV65, meting Bovenrijn", december 1999.
18. Muto, Y., Shiono, K., Imamoto, H. and Ishigaki, T. (1998), "Three-dimensional flow structure for overbank flow in meandering channels.", Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol. 16, No. 1, May 1998. Pp 97-108.
19. Prooijen, B.C. van, "Grootschalige horizontale structuren in een rivier met uiterwaarden", Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en

- Geowetenschappen, mei 1999.
20. Schiereck, G.J., Introduction to bed, bank and shore protection, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Waterbouwkunde, January 1998.
21. Sellin, R.J.H. (1964). "A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its floodplain." *La Houille Blanche*, Vol. 7, pp 793-807.
22. Silva, W. en Kok, M., "Integrale Verkenning inrichting Rijntakken, hoofdrapport 'Een weegschaal voor rivierbeheer'", Ministerie van Verkeer en Waterstaat, mei 1996
23. Sorber, A.M., "Oeversedimentatie tijdens de hoogwaters van 1993/1994 en 1995", RIZA rapport 97.015, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, maart 1997.
24. Uijtewaai, W.S.J. and Booij, R.(2000), "Effects of shallowness on the development of free-surface mixing layers", *Physics of Fluids*, Vol. 12, No. 2, February 2000, pp 392-402.
25. Uittenbogaard, R.E. (1998), "Model for eddy diffusivity related to subgrid velocity and bed topography: draft version for communication between Delft Hydraulics and Delft University of Technology only".
26. Vriend, H.J. de, "Rivierwaterbouwkunde", Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Waterbouwkunde, april 1998.
27. Wormleaton and P.R., Merrett, D.J. (1990), "An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel /flood plain sections", *J. of Hydr. Res.* Vol. 28, 1990, No. 2
28. Wormleaton, P.R. (1996), "Floodplain secondary circulation as a mechanism for flow and shear stress redistribution in straight compound channels.", *Coherent flow structures in open channels*, John Wiley & Sons LTD., pp 581-608.

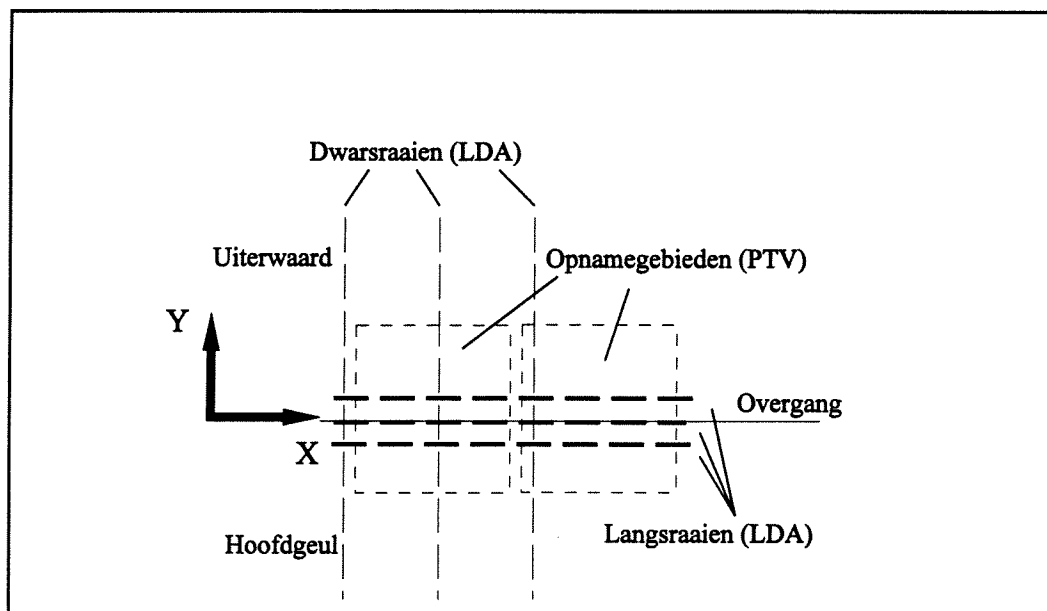
Bijlage 1 Overzicht van metingen

Locatie van de metingen in xy-assenstelsel

- x is positief en oplopend in stroomafwaartse richting
- y is 0 op de overgang en positief in de uiterwaard
- raainummers zijn oplopend in stroomopwaartse richting (in meters) vanaf 0 t.p.v. de stuw

Raainummers met bijbehorende x-coördinaten:

raainummer	x [m]
4	23.3
5	22.3
6	21.3
8	19.3
10	17.3
12	15.3
14	13.3
16	11.3
18	9.3
20	7.3



Figuur 1: Principeschets van locaties metingen

Gemiddeld snelheidsprofiel (PTV)

Voorbeeld: DR 1-510: dit is een serie die bestaat uit 170 PGM-files (geinverteerde foto's van de kraaltjes in het opnamegebied) en ongeveer evenveel .vel-files (bevat snelheden u en v), en een file drmeanus.asc (gemiddeld snelheidsprofiel uit verwerking met programma Matlab). Er is gemeten met een frequentie van 15 Hz zodat de totale meetduur 34 seconden (510/15) is waarvan 11 seconden opgeslagen is (1 van elke 3 s.: 170/15).

	$x = 7.3$	$x = 11.3$	$x = 15.3$	$x = 19.3$	$x = 23.3$
Opstelling 1	DR 1-510 DS 1-375 DT 1-195 DU 1-420 DV 1-465 DW 1-420	DA 136-960 DB 91-960 DC 1-645 DD 1-1095	DE 91-735 DF 91-870 DG 1-600 DH 136-735	DI 46-690 DJ 46-645 DK 1-465	DL 226-735 DM 181-735 DN 1-645
Opstelling 2		HA 1-420 HB 451-1455 HC 1-645	HD 1-1410 HE 1-1410	HF 1-1185 HG 1-1005	
Opstelling 3	EA 1-465 EB 1-285 EC 1-330 ED 1-285 EE 1-195 EF 1-240	EG 1-240 EH 1-195 EI 1-330 EJ 1-420 EK 1-285 EL 1-240 EM 1-195	EN 1-240 EO 1-240 EP 1-240 EQ 1-240 ER 1-240 ES 1-195 ET 1-240	EU 1-240 EV 1-285 EW 1-195 EX 1-285 EY 1-195 EZ 1-240	E1 1-240 E2 1-240 E3 1-240 E4 1-240 E5 1-195 E6 1-240
Opstelling 4	FA 1-465 FB 1-555 FC 1-465	FD 1-510 FE 1-555 FG 1-330	FF 1-465 FH 1-825 FI 1-780	FJ 1-690 FK 1-420 FL 1-600 FM 1-1050	
Opstelling 5		GA 1-1725 GB 316-2220	GC 46-1230 GD 631-2445	GE 1-690 GF 1-600 GG 1-1050	
Opstelling 6				JC 91-1455 JD 1-825 JE 1-1860 JF 1-2265	

Momentane vectorvelden (PTV)

Voorbeeld: DX 1-350: dit is een serie die bestaat uit 350 PGM-files (geinverteerde foto's van de kraaltjes in het opnamegebied) en ongeveer evenveel .vel-files (bevat snelheden u en v), vectoru. en vectorv. files (uit verwerking met programma Matlab) met een frequentie van 15 Hz zodat 350 files overeenkomen met een meetduur van ongeveer 23 sec.

	$x = 19.3$	$x = 23.3$	$x = 18.3$
Opstelling 1	DX 1-350 DY 1-350	DO 1-450 DP 1-450 DQ 1-450	
<i>lage waterstand</i>	IA 1-400 IB 1-600 IC 1-650		
Opstelling 2	HH 1-450 HI 1-400		
Opstelling 3	Z1 1-370 Z2 1-370 Z3 1-370	E7 1-400 E8 1-370 E9 1-400	
Opstelling 4	FN 1-375 FO 1-300 FP 1-350 FQ 1-400		
Opstelling 5	GH 1-750 GI 1-350 GJ 1-350		
Opstelling 6	JA 1-400 JB 1-800 JG 250-600 JH 150-500		JJ 2350-2650 JJ 550-1000

LDA-metingen

De dwarsraaien worden aangeduid met de x-coördinaat. De y-coördinaten variëren afhankelijk van de opstelling van minimaal $y = -2.50$ m. in de uiterwaard tot maximaal $y = 2.20$ m. in de hoofdgeul. In de menglaag is de afstand tussen de meetpunten 0.1 m terwijl daarbuiten de onderlinge afstanden groter zijn.

De langsraaien worden aangeduid met de y-coördinaat. De x-coördinaten variëren afhankelijk van de opstelling van minimaal $x = 5.3$ m. tot maximaal $x = 22.3$ m..

In de hoofdgeul zijn y-coördinaten positief en in de uiterwaard negatief. Voorbeeldcodes voor maximum en minimum y-coördinaat en voor dieptemetingen in de hoofdgeul worden weergegeven. Voor langsraaimetingen worden de codes met raainummers voor minimum en maximum x-coördinaat vermeld voor een of meerdere langsraaien vermeld.

44 : $z = 10.5$ cm (z = hoogte in de waterdiepte voor de hoofdgeul)

450 : $z = 9.5$ cm

480 : $z = 6.5$ cm

505: $z = 4$ cm

u = uiterwaard, o = overgang, h = hoofdgeul

	<i>x = 13.3 (raai 14)</i>	<i>x = 17.3 (raai 10)</i>	<i>x = 22.3 (raai 5)</i>	<i>langsraaien</i>
Opstelling 1	01425044.asc 91415044.asc d1410450.asc d1420450.asc d1420480.asc d1420505.asc	01025044.asc 91015044.asc d1010450.asc d1020450.asc d1020480.asc d1020505.asc	00525044.asc 90515044.asc d0510450.asc d0520450.asc d0520480.asc d0520505.asc	u0502044.asc u2002044.asc o0500044.asc o2000044.asc h0502044.asc h2002044.asc
Opstelling 1a (lagere waterstand)		01250455.asc 91100455.asc		
Opstelling 2		01025044.asc 91015044.asc		90600044.asc 92000044.asc
Opstelling 3	d1410450.asc d1420450.asc d1420480.asc d1420505.asc	01025044.asc 91015044.asc d1010450.asc d1020450.asc d1020480.asc d1020505.asc	00525044.asc 90515044.asc d0510450.asc d0520450.asc d0520480.asc d0520505.asc	h0500044.asc h2000044.asc h0502044.asc h2002044.asc h0504044.asc h2004044.asc
Opstelling 4		01025044.asc 91015044.asc 7 dieptemetingen: 455: 0 95, 0 65, 0 40, 9 00 9 10 480: 9 20 500: 9 20	01025044.asc 91015044.asc 7 dieptemetingen: 455: 0 95, 0 65, 0 40, 9 00, 9 10 480: 9 20 500: 9 20	90800044.asc 91800044.asc 00803044.asc 01803044.asc
Opstelling 5		01020044.asc 91015044.asc 5 dieptemetingen: 455: 9 10, 0 15, 0 40 480: 9 20 500: 9 20		90600044.asc 92000044.asc 90601044.asc 92001044.asc
Opstelling 6	<i>x = 18.3 (raai 9)</i>	<i>x = 19.1 (raai 8.2)</i>	<i>x = 19.6 (raai 7.7)</i>	
	00925044.asc 90922044.asc	08225044.asc 98218044.asc	07716044.asc 97718044.asc	

Extra metingen alleen voor opstelling 1

Waterhoogten

Waterhoogten met meetfrequentie van 10 Hz op langsraaien in hoofdgeul, uiterwaard en op de overgang. Voorbeeld: 00520002: in uiterwaard (0), raainummer (05), afstand tot overgang in cm (200), aantal minuten (002)

uiterwaard	overgang	hoofdgeul
00520002.asc	90500005.asc	905200002.asc
02420002.asc	92400005.asc	924200002.asc

Gelijktijdige metingen LDA-u en EMS-u-v

De metingen zijn uitgevoerd op raai 10 ($x = 17.3$ m.). De afstand tussen EMS en LDA is 50 cm. Voorbeeld: 01004044 en 01040185: LDA 40 cm in de uiterwaard en EMS 10 cm in de hoofdgeul.

LDA (20 Hz)

01004044.asc
01003044.asc
01002044.asc
01001044.asc
91000044.asc

EMS (10 Hz)

01040185.asc
01030185.asc
01020185.asc
01010185.asc
91000175.asc

LDA (100 Hz)

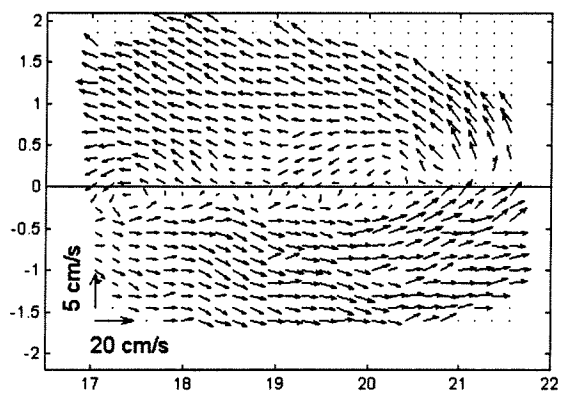
91003044.asc
91002044.asc
91001044.asc

EMS (50 Hz)

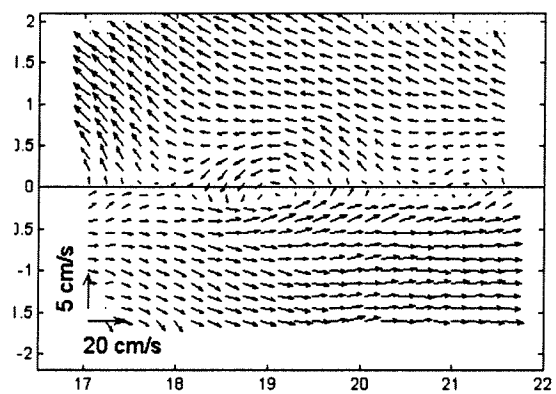
91030185.asc
91020185.asc
91010185.asc

Bijlage 2 Vectorvelden opstellingen 1 t/m 5

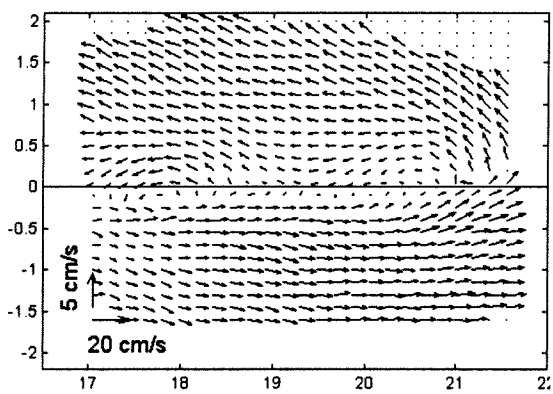
Deze bijlage bestaat uit bewerkte momentane vectorvelden (PTV) voor opstellingen 1 t/m 5. De bewerking houdt in dat de voortplantingssnelheid van de wervels van de onbewerkte vectorvelden is afgetrokken. Voor elke opstelling zijn één of meerdere series gemaakt. Elke serie heeft een code (zie bijlage 1).



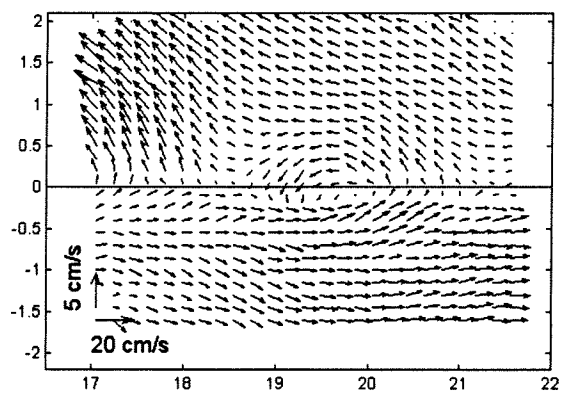
$t = 0$ s.



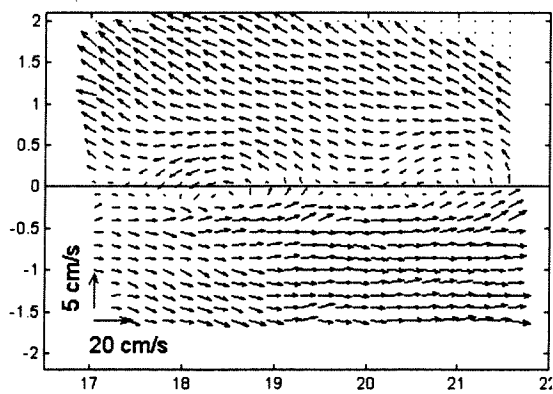
$t = 9$ s.



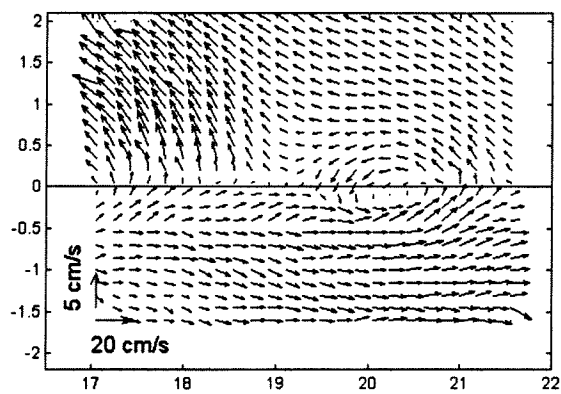
$t = 3$ s.



$t = 12$ s.

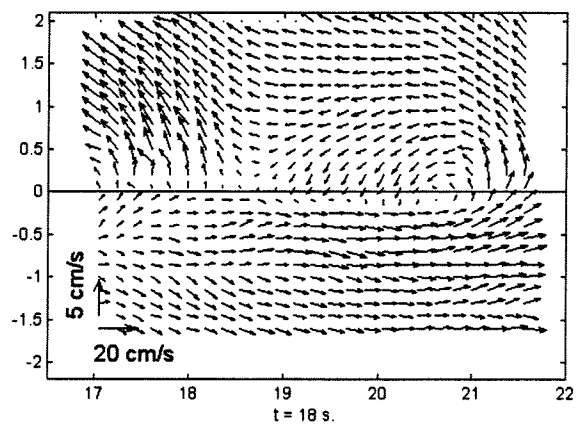
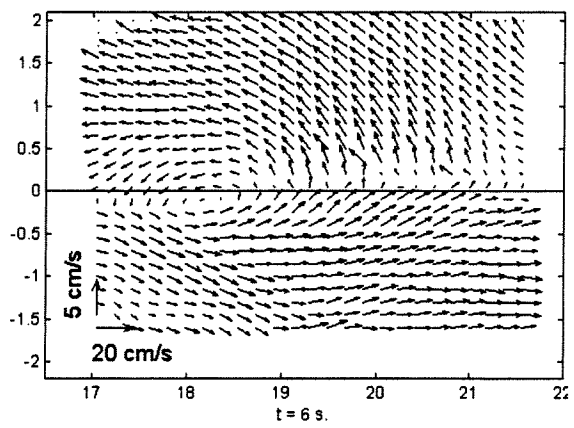
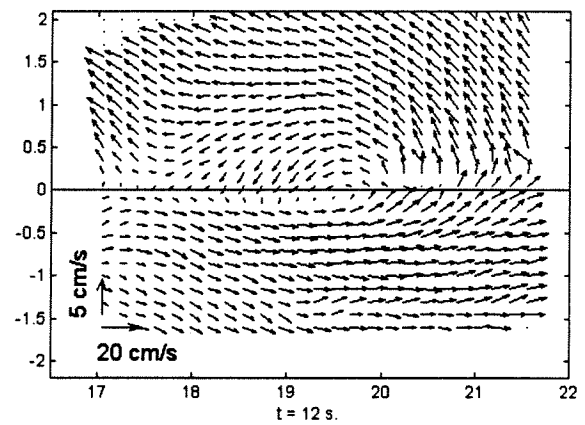
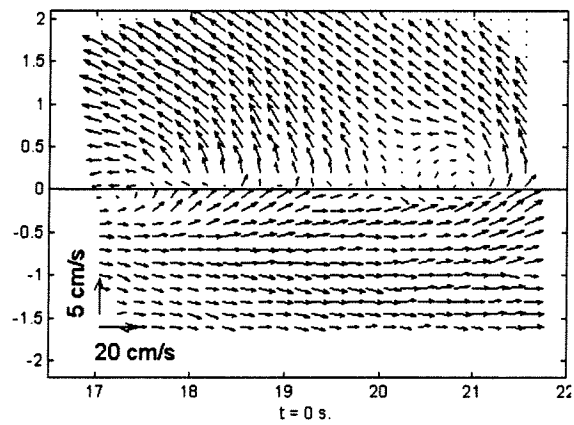


$t = 6$ s.

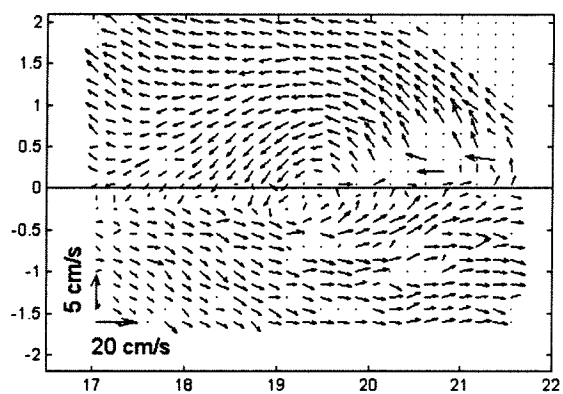


$t = 15$ s.

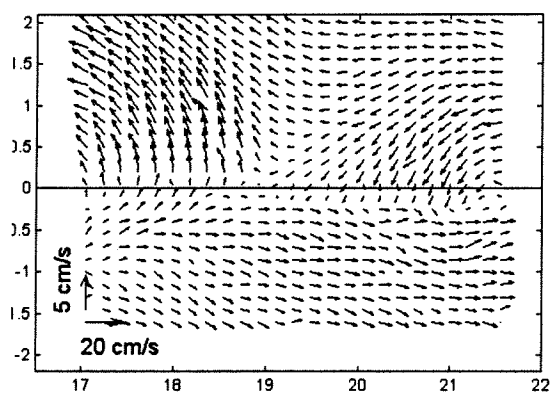
Opstelling 1, serie 1 (DX)



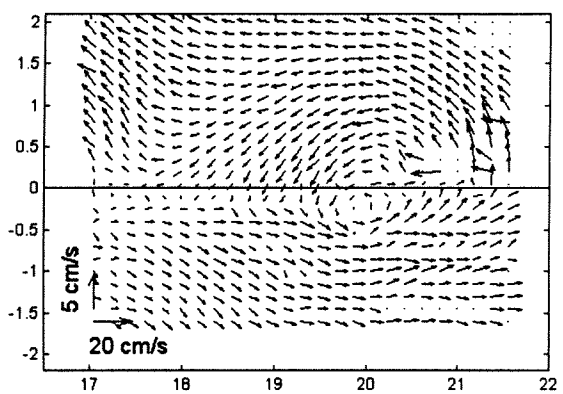
Opstelling 1, serie 2 (DY)



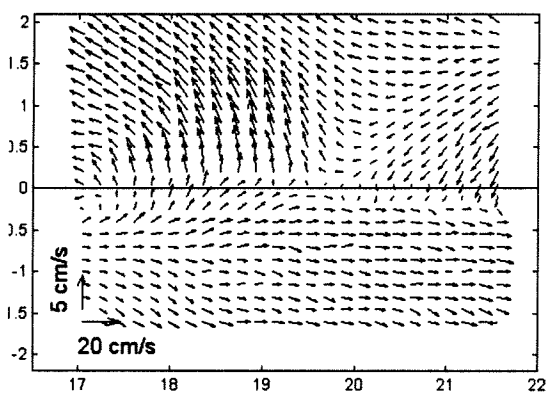
$t = 0$ s.



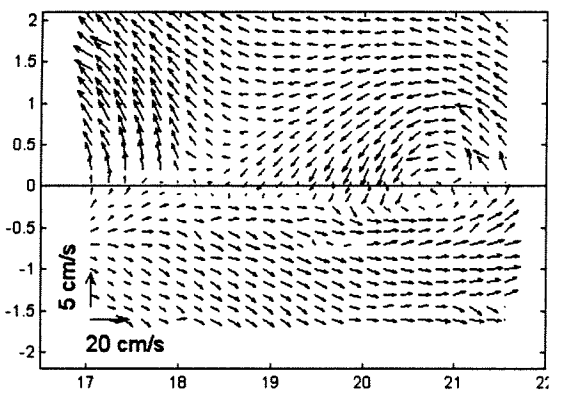
$t = 18$ s.



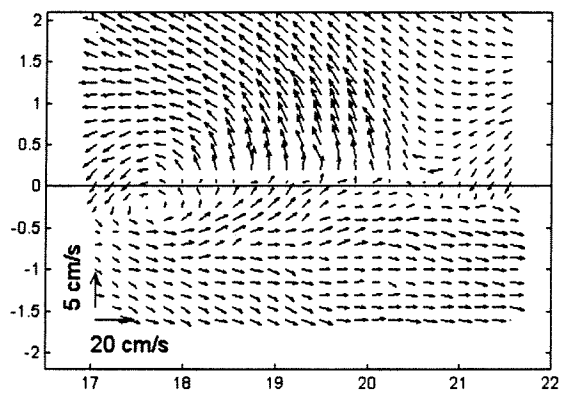
$t = 6$ s.



$t = 24$ s.

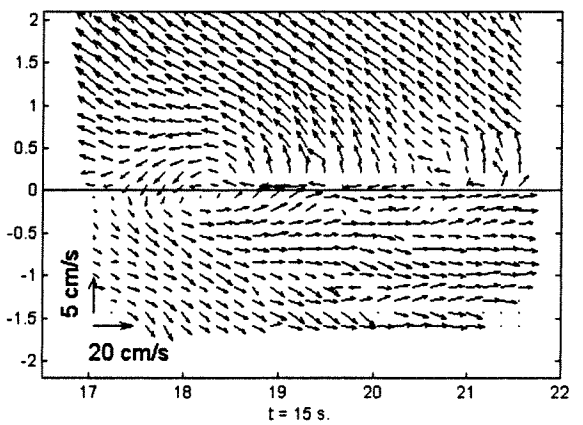
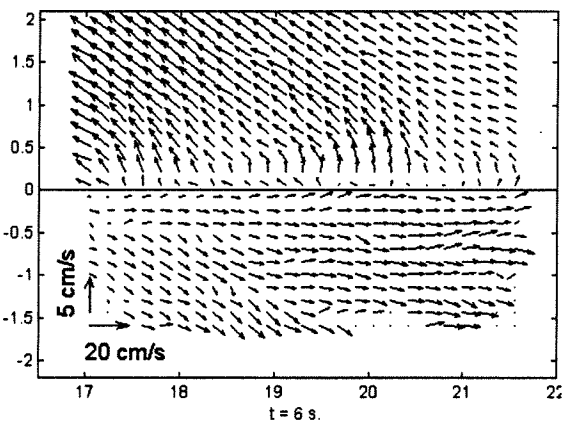
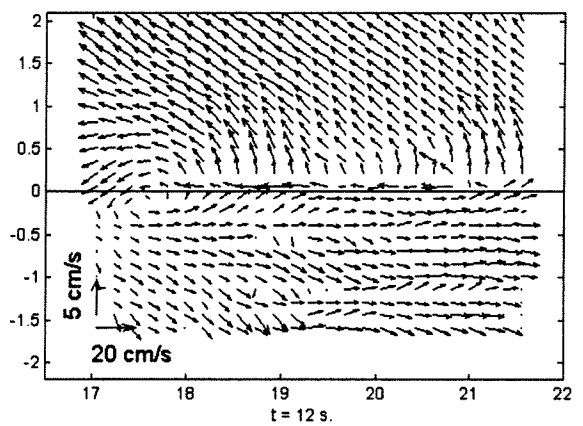
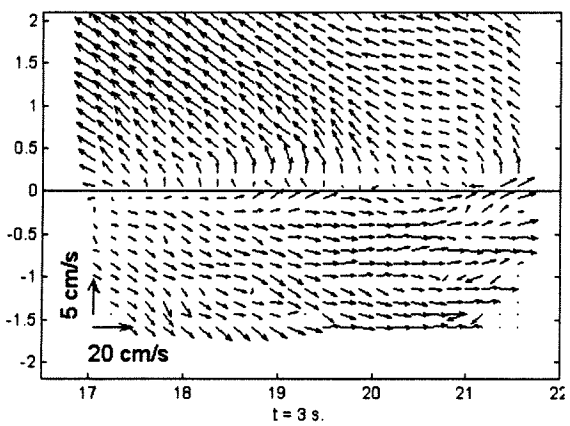
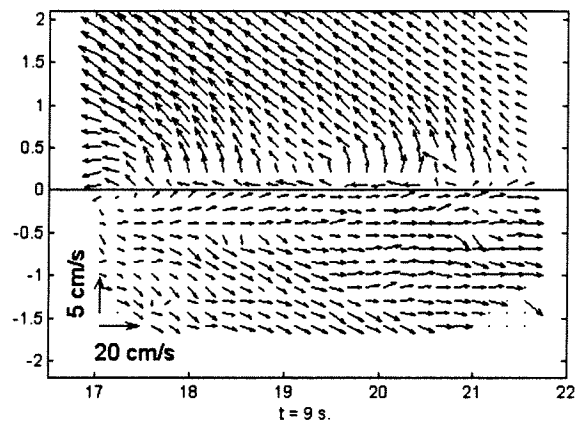
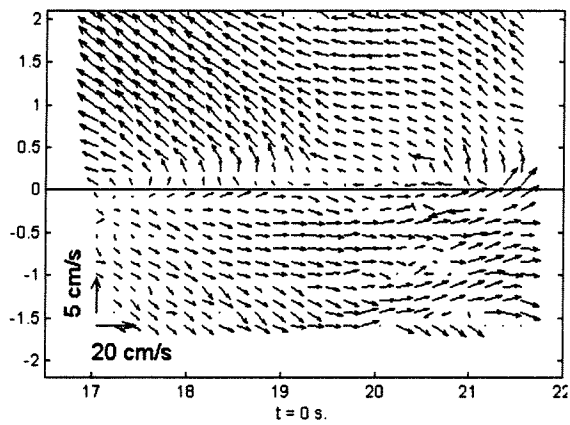


$t = 12$ s.

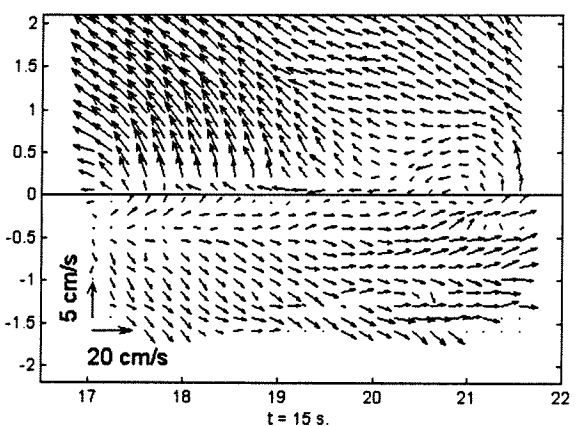
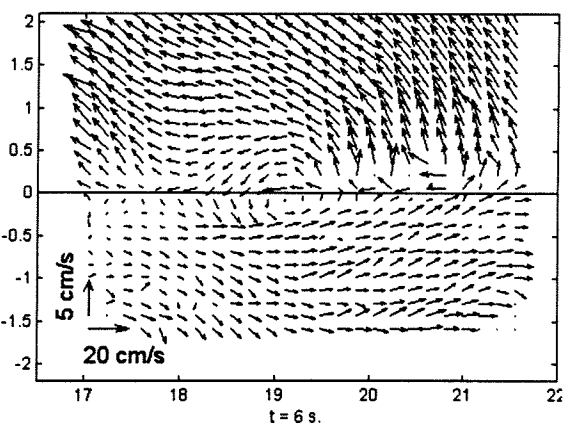
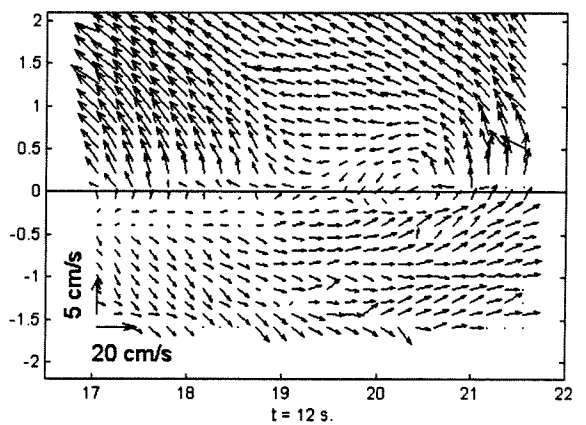
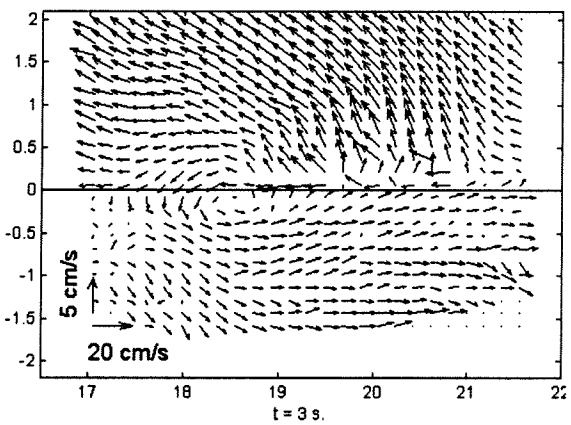
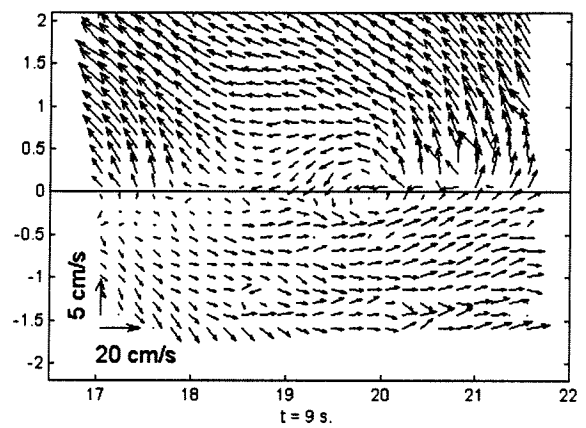
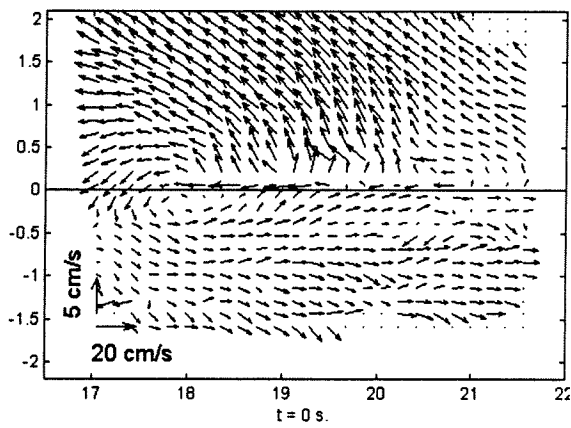


$t = 30$ s.

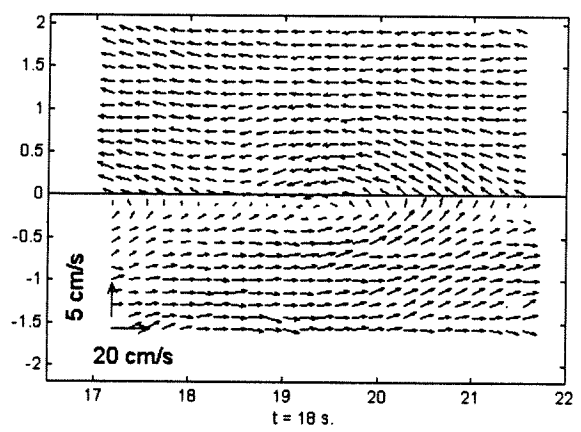
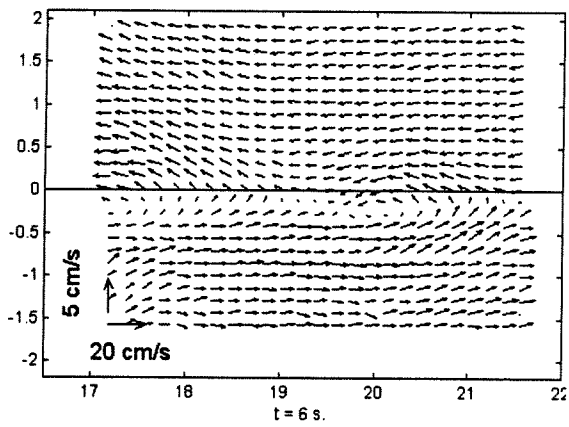
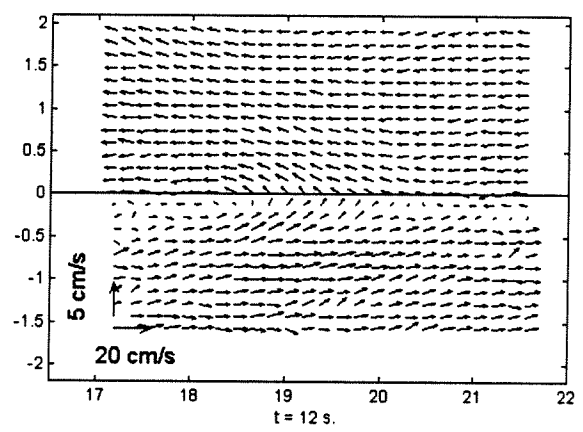
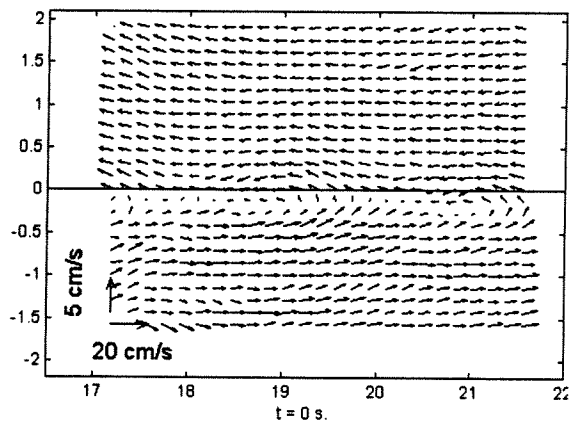
Opstelling 1 met lagere waterstand, serie 1 (IB)



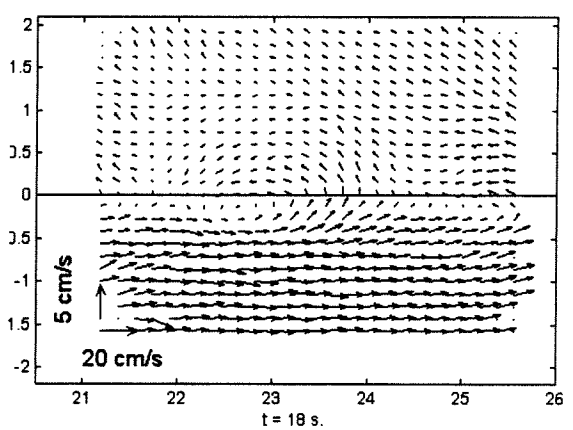
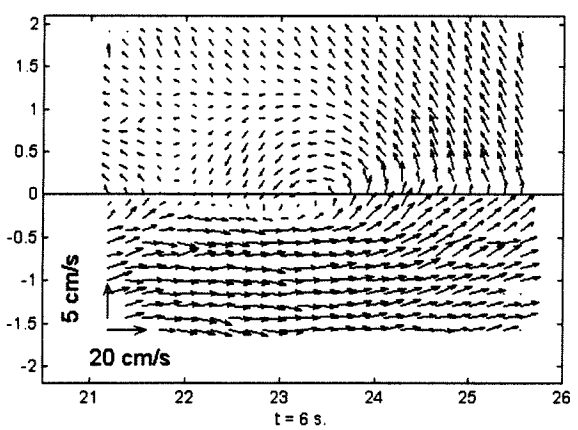
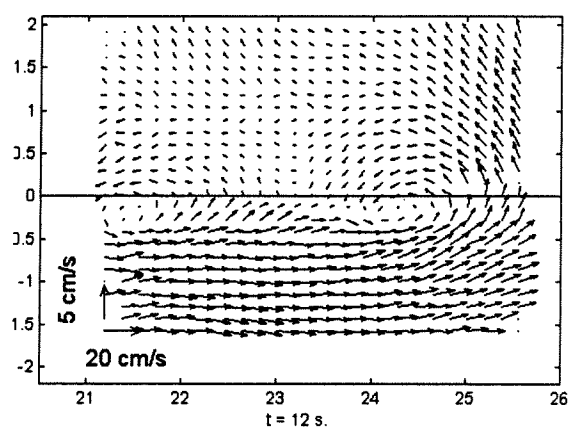
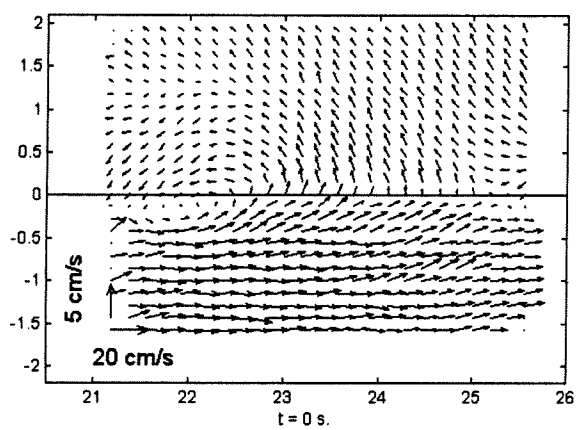
Opstelling 2, serie 1 (HH)



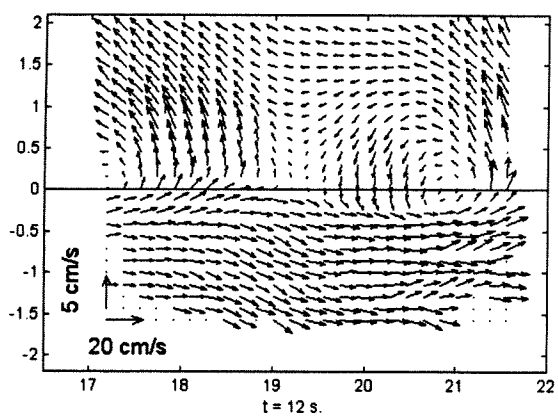
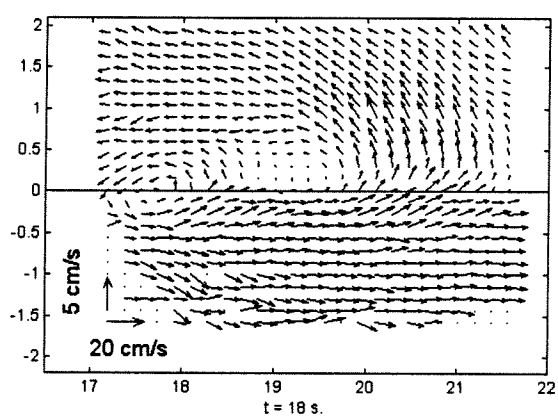
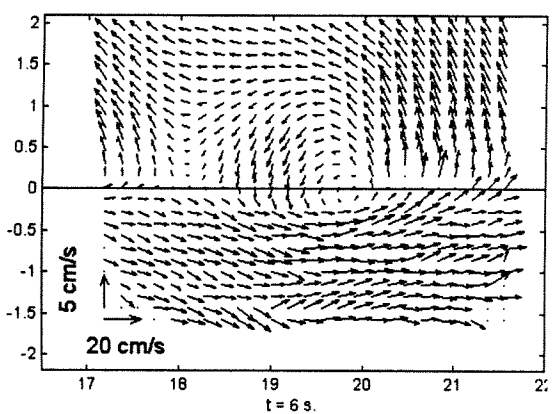
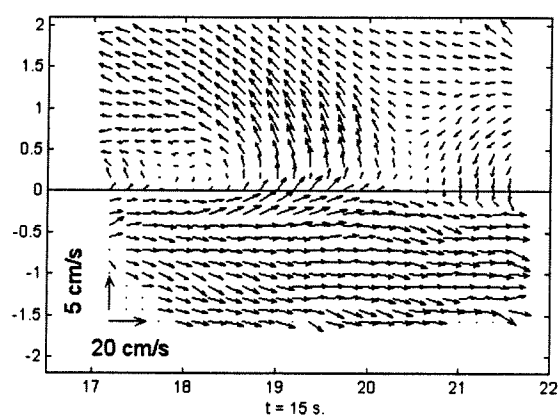
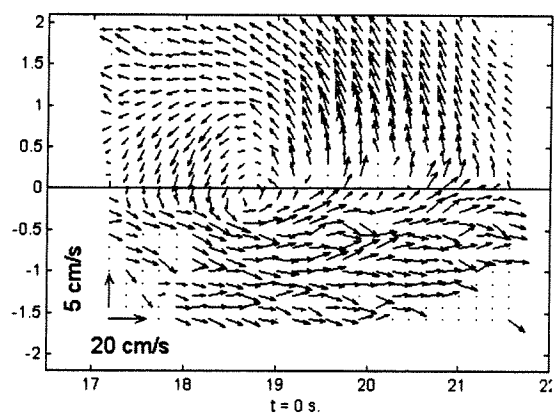
Opstelling 2, serie 2 (HI)



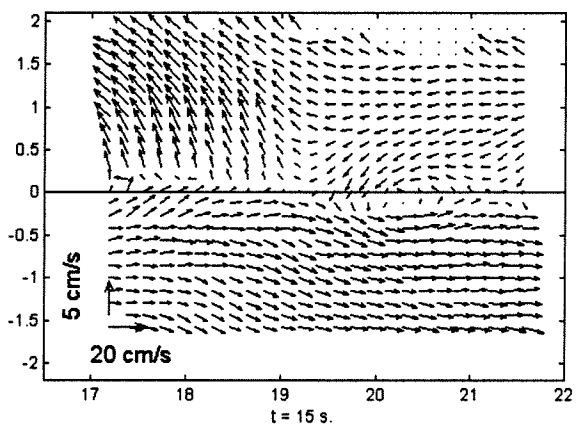
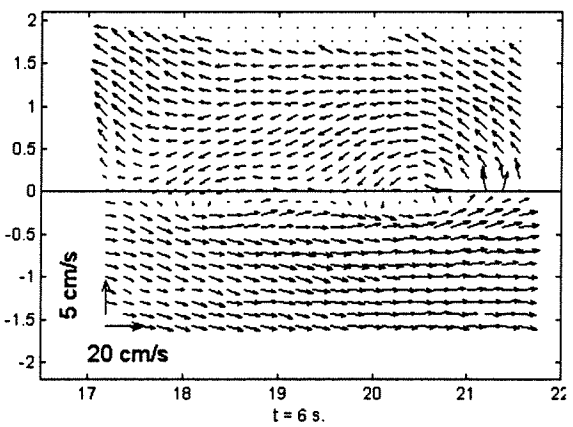
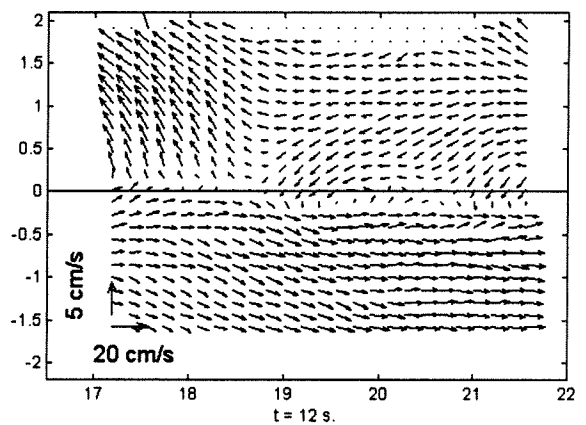
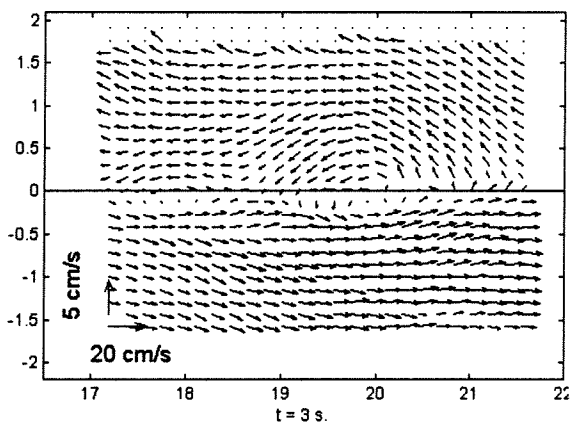
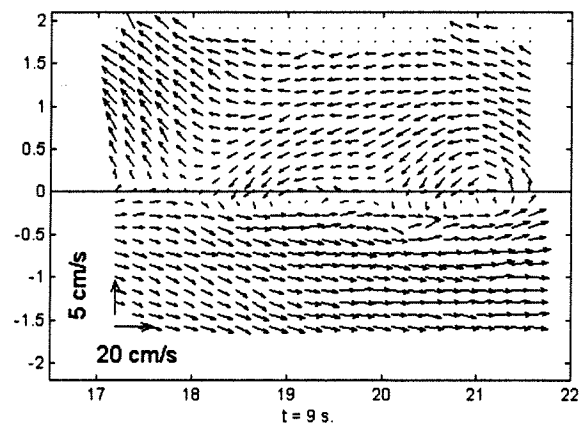
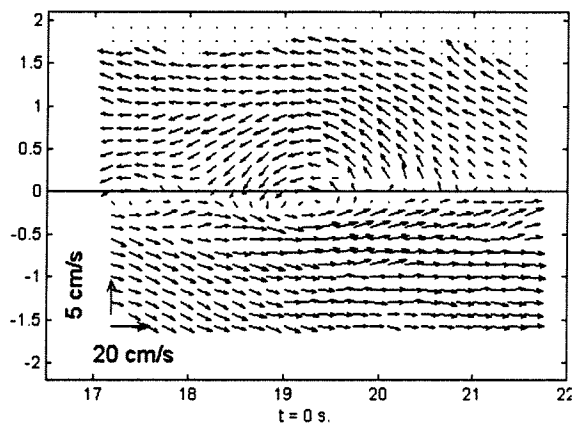
Opstelling 3, serie 1 (Z2)



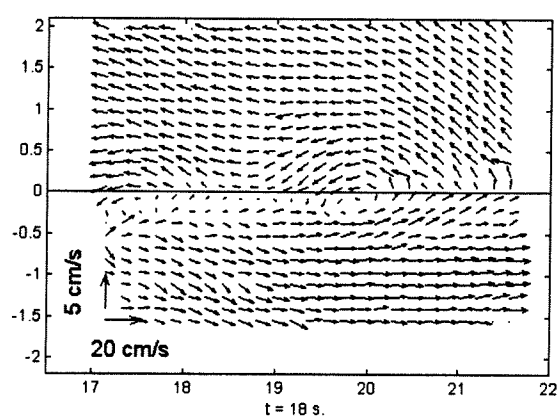
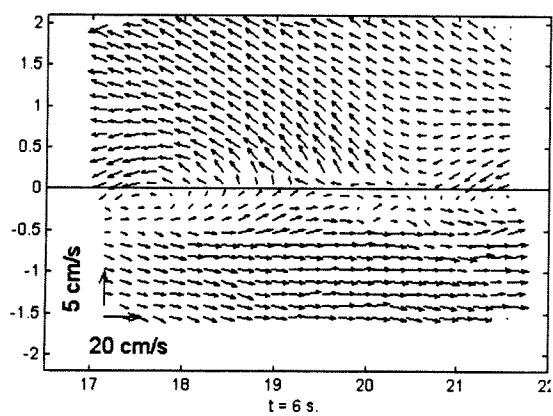
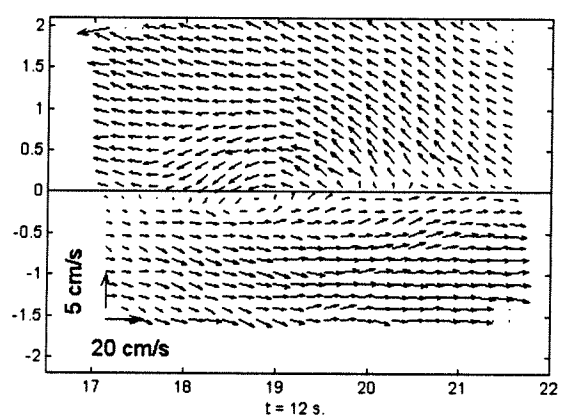
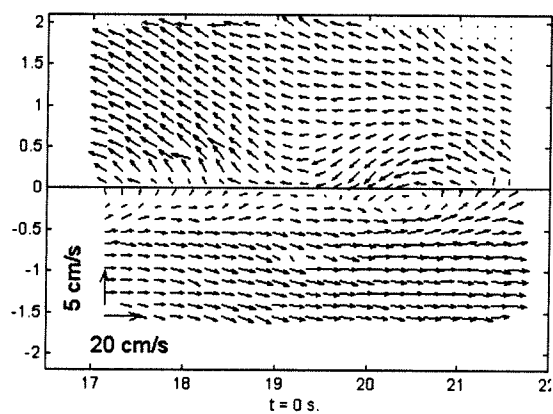
Opstelling 3, serie 2 (Z1)



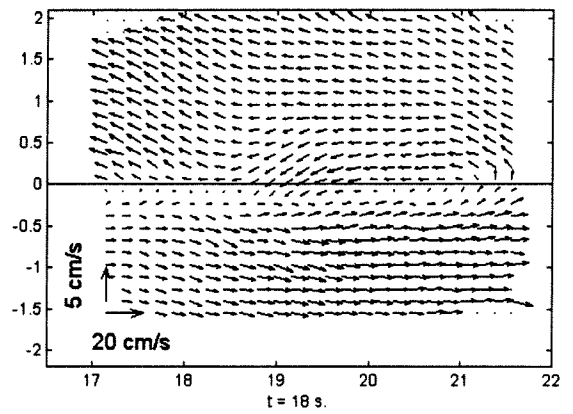
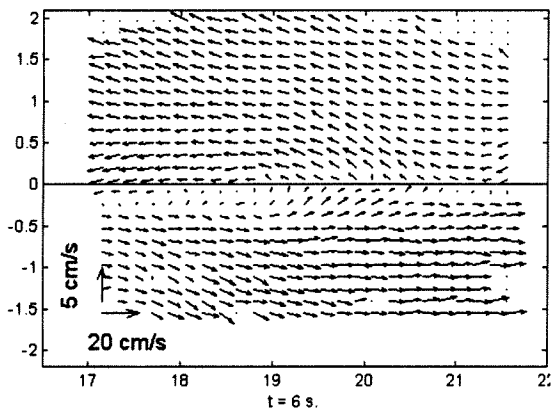
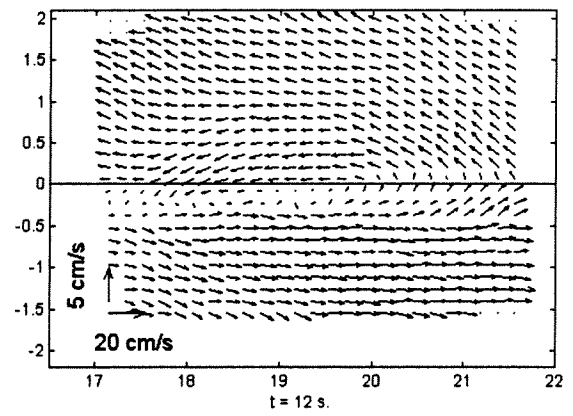
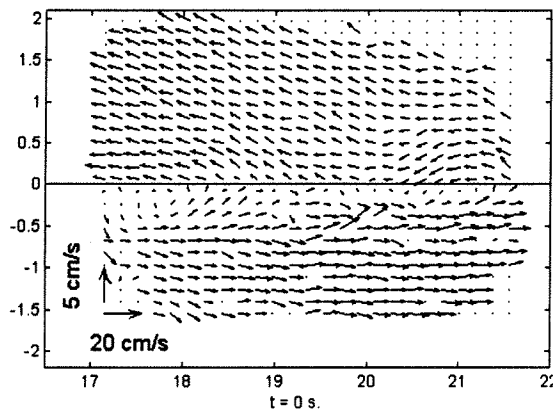
Opstelling 4, serie 1 (FQ)



Opstelling 4, serie 2 (FN)



Opstelling 5, serie 1 (GI)



Opstelling 5, serie 2 (GJ)

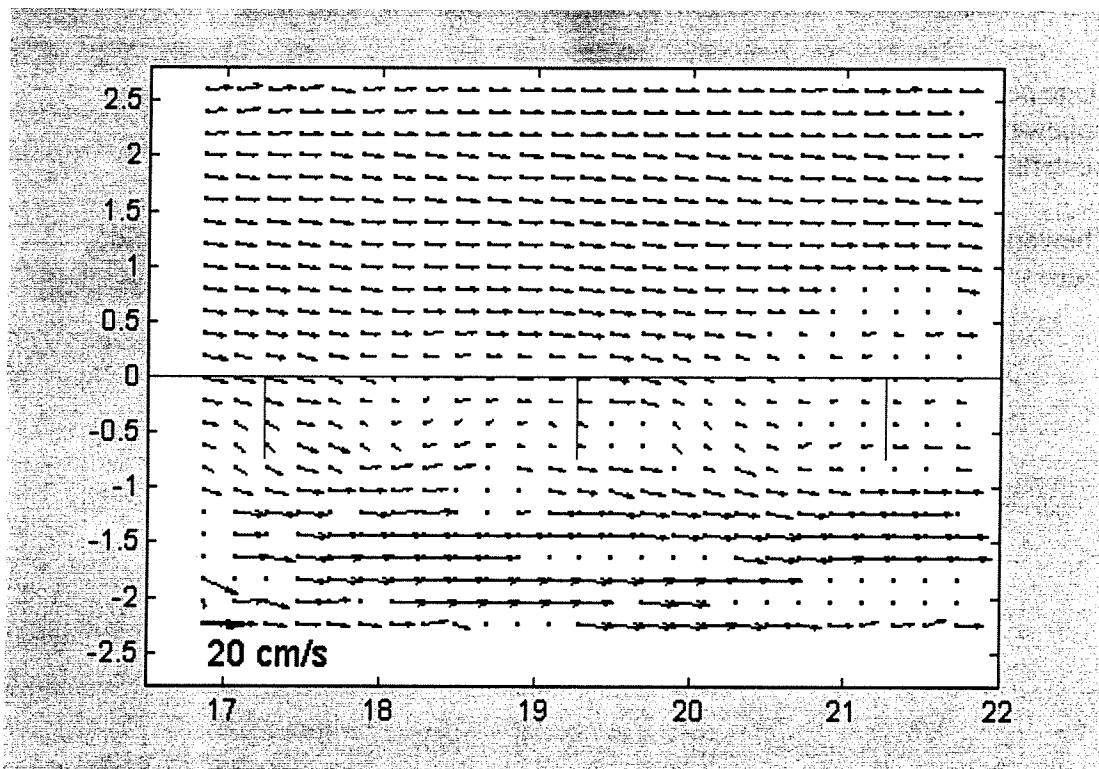
Bijlage 3 PTV-Vectorvelden opstelling 6

Deze bijlage bestaat uit:

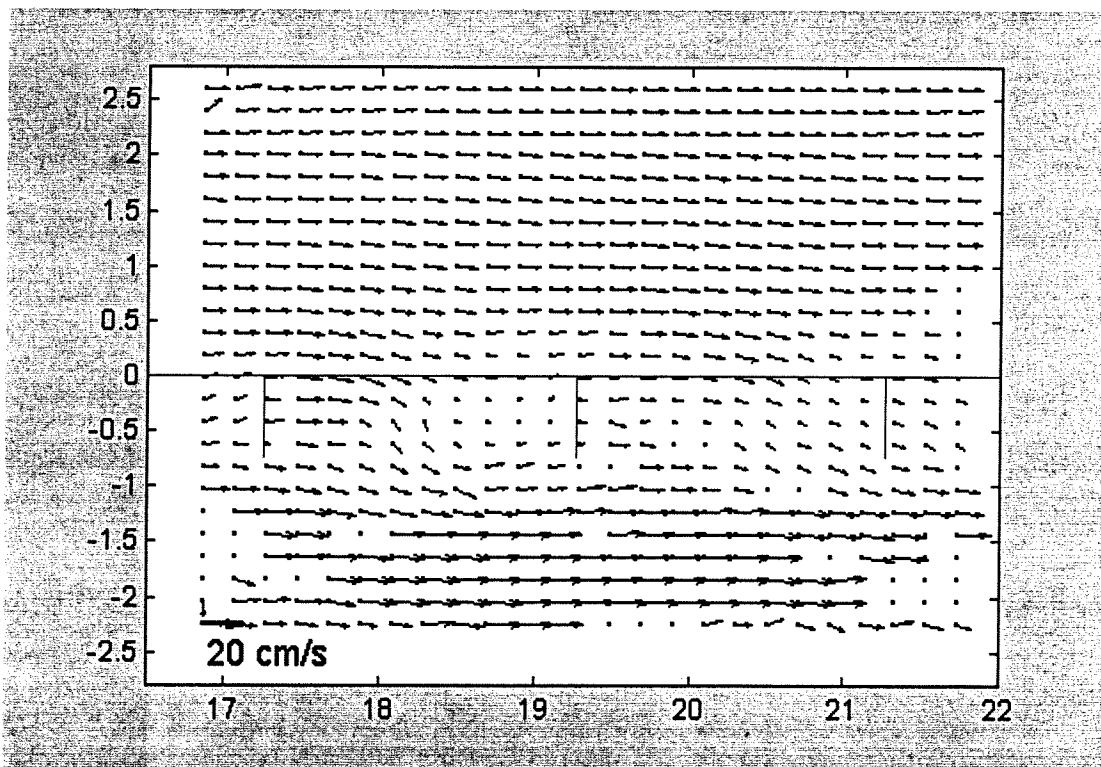
1. onbewerkte vectorvelden voor opstelling 6, serie 1 en 2 (JB, JG)
2. bewerkte vectorvelden voor opstelling 6, serie 1 en 2 (JB, JG)

Voor de bewerkte vectorvelden is de snelheid op de overgang (0.11 m/s) van het veld afgetrokken.

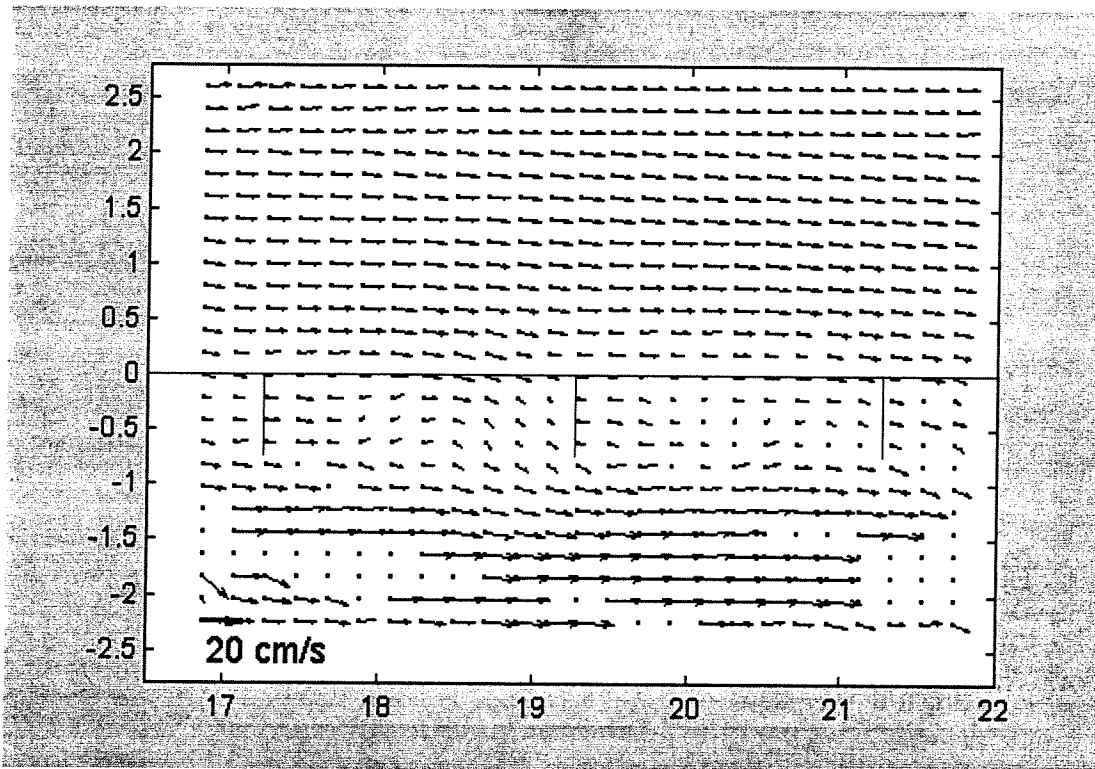
Onbewerkte vectorvelden serie 1



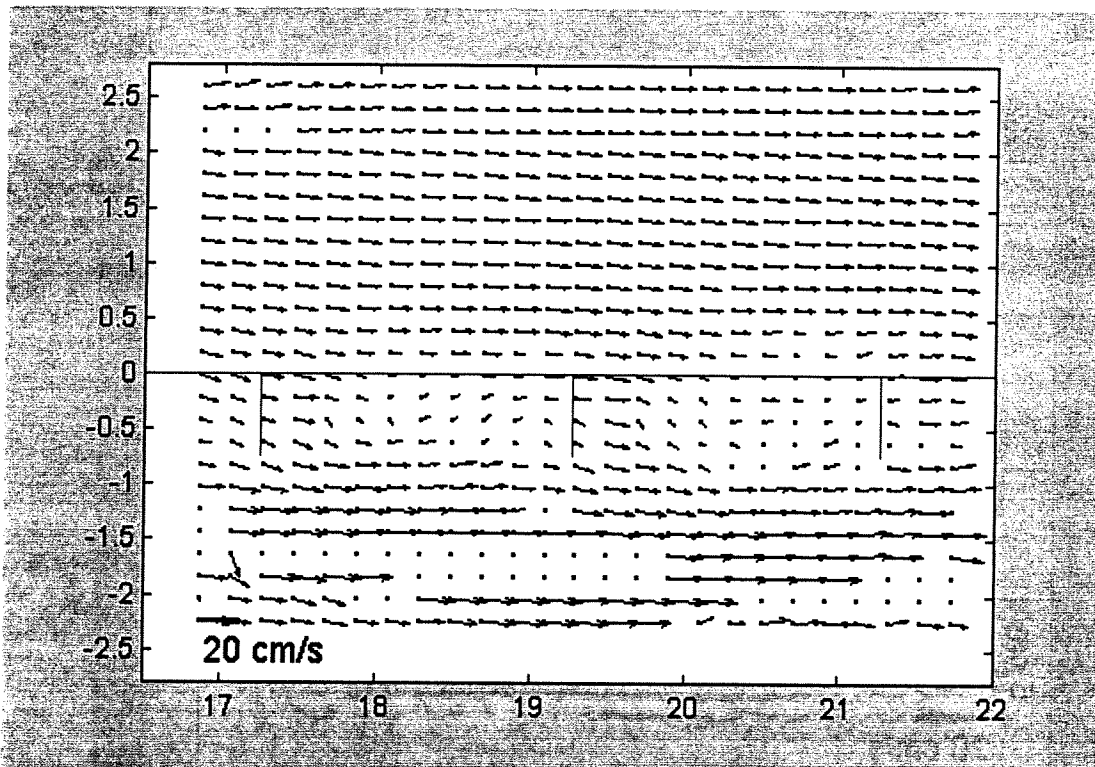
$T = 0$



$T = 6$

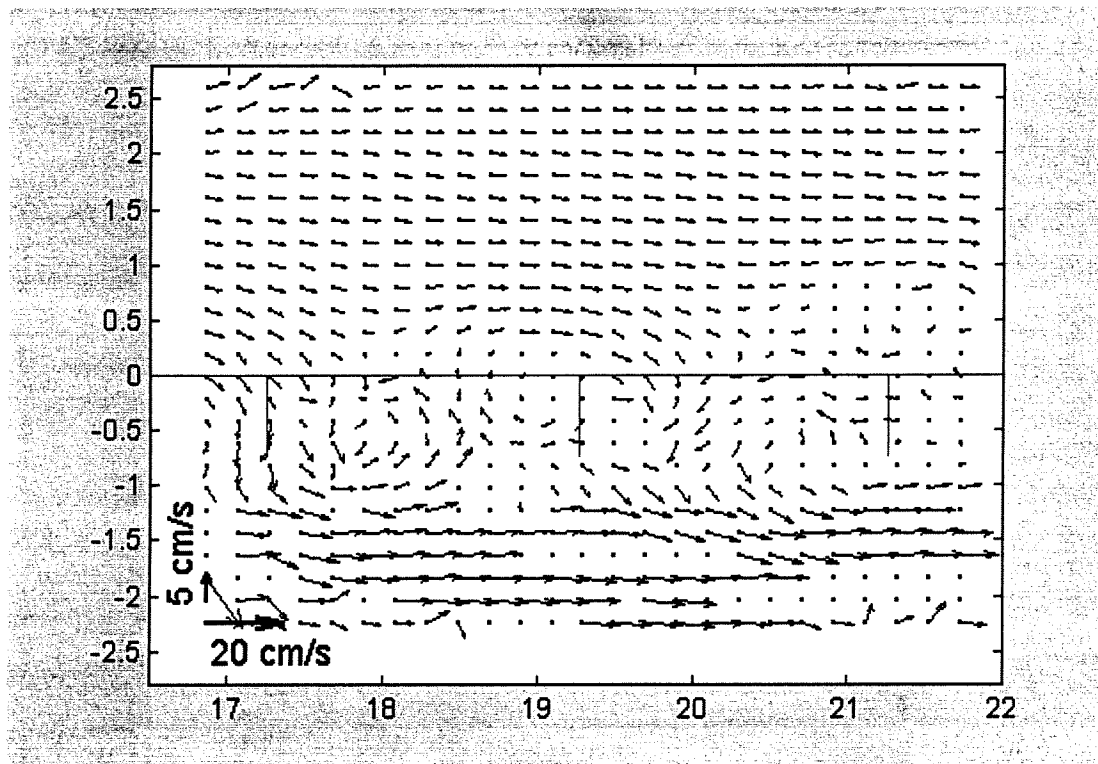


$T = 12$

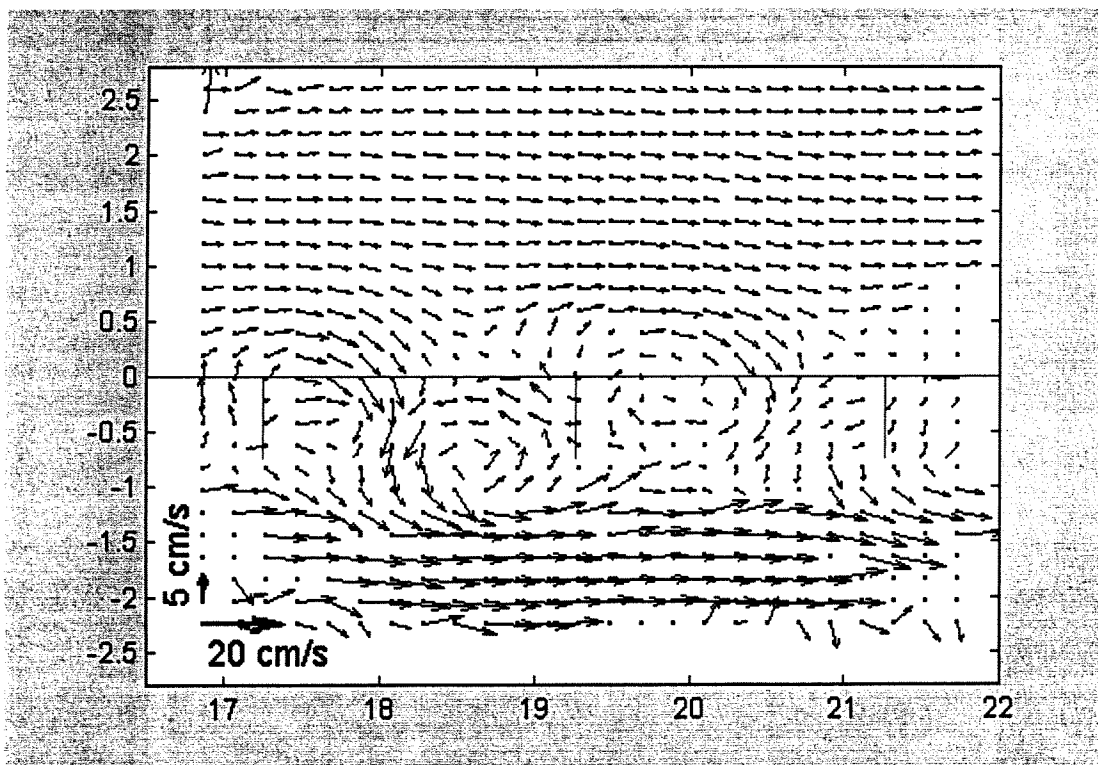


$T = 18$

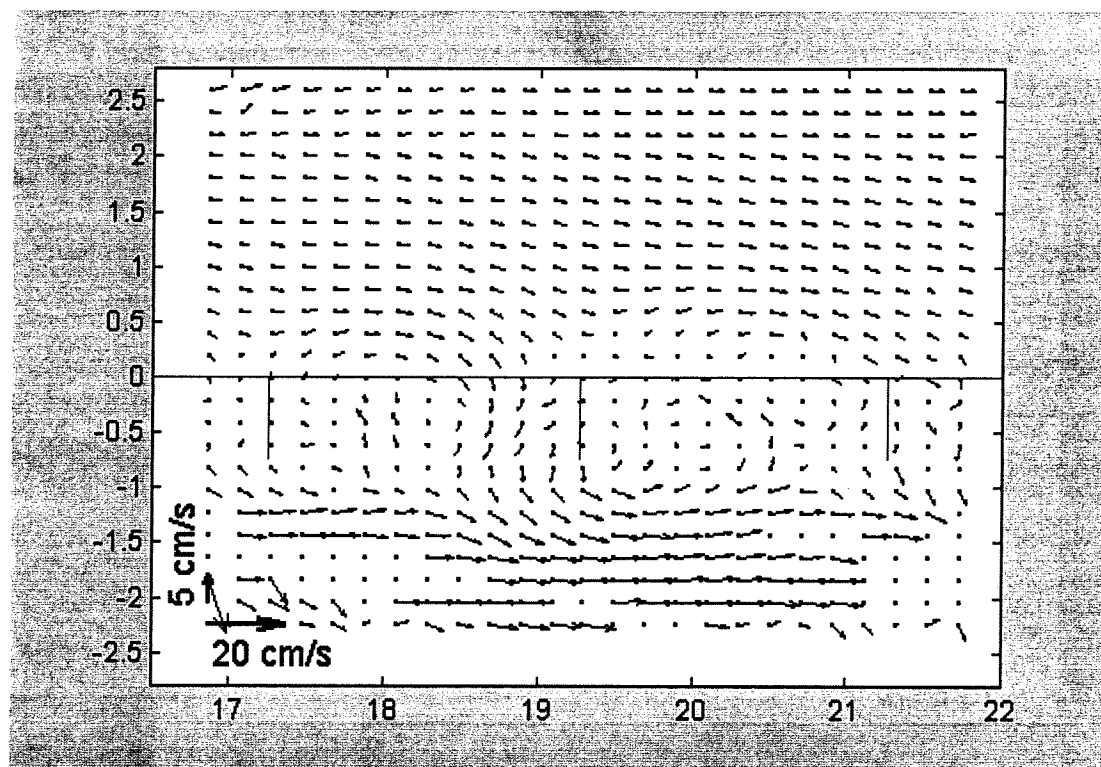
Bewerkte vectorvelden serie 1



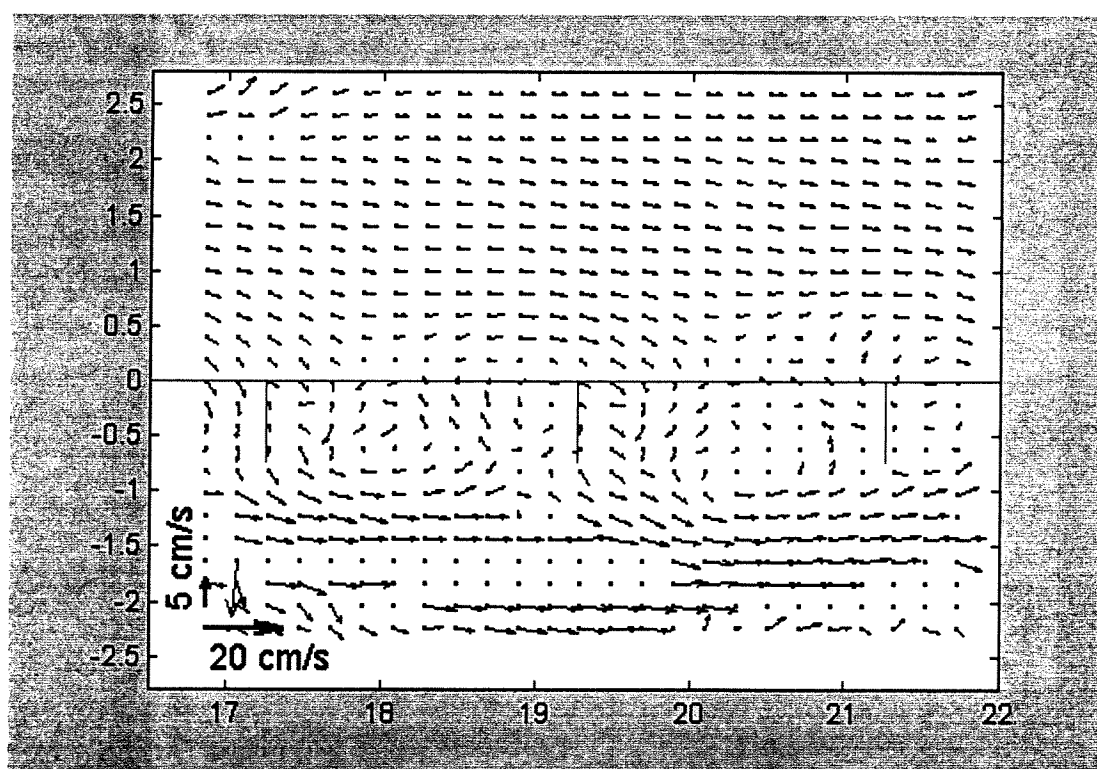
$T = 0$



$T = 6$

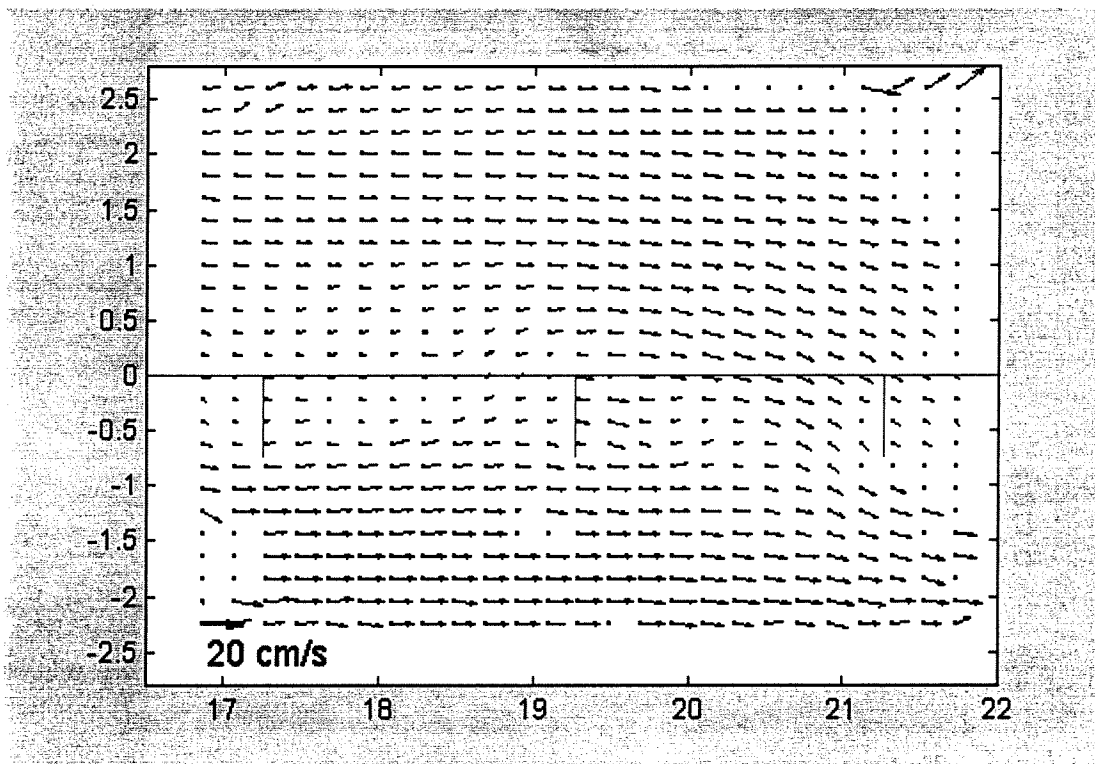


$T = 12$

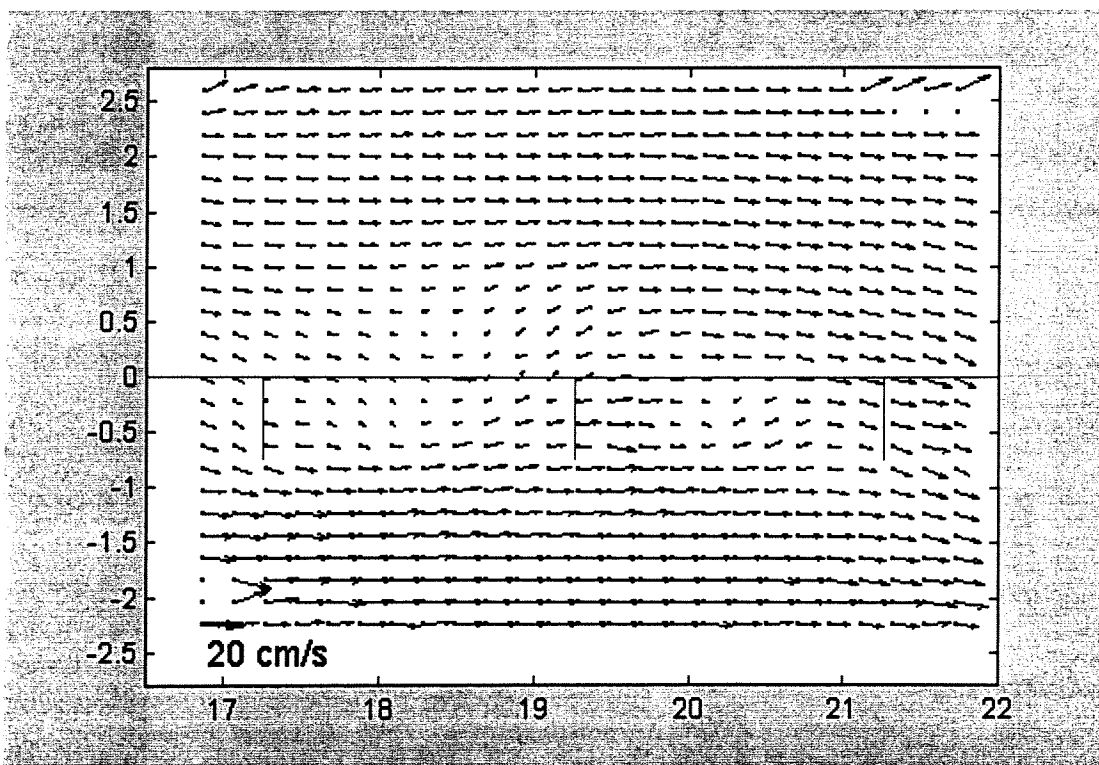


$T = 18$

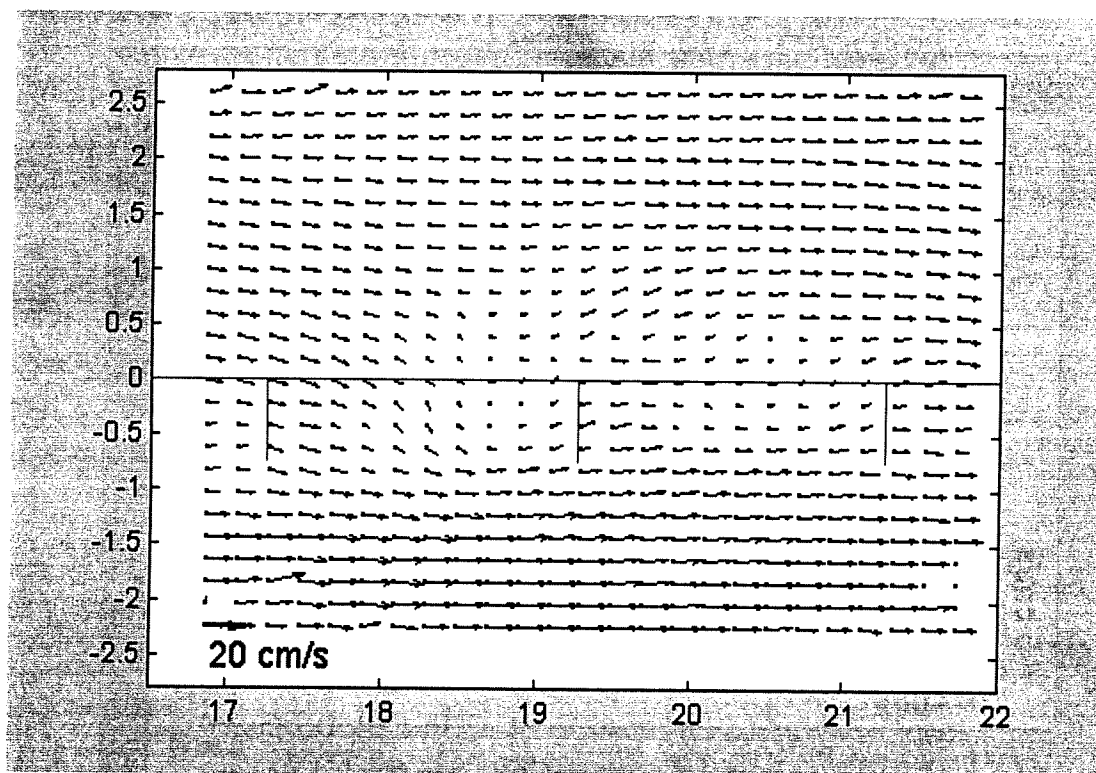
Onbewerkte vectorvelden serie 2



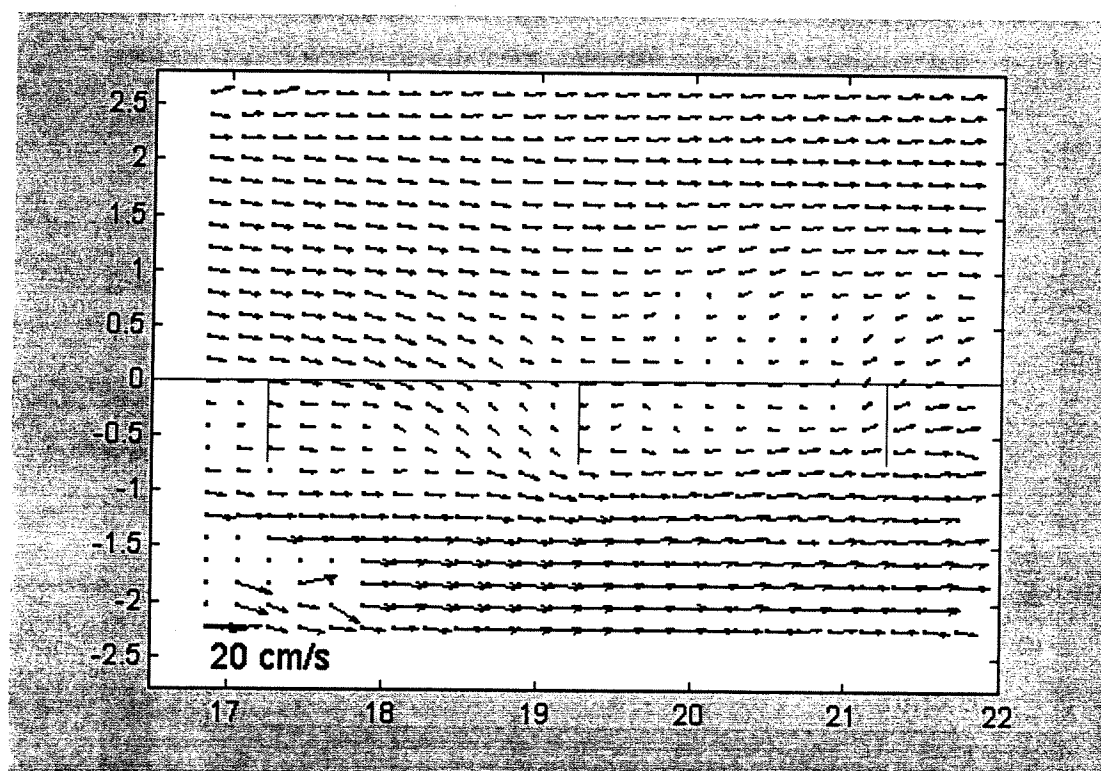
$T = 0$



$T = 6$

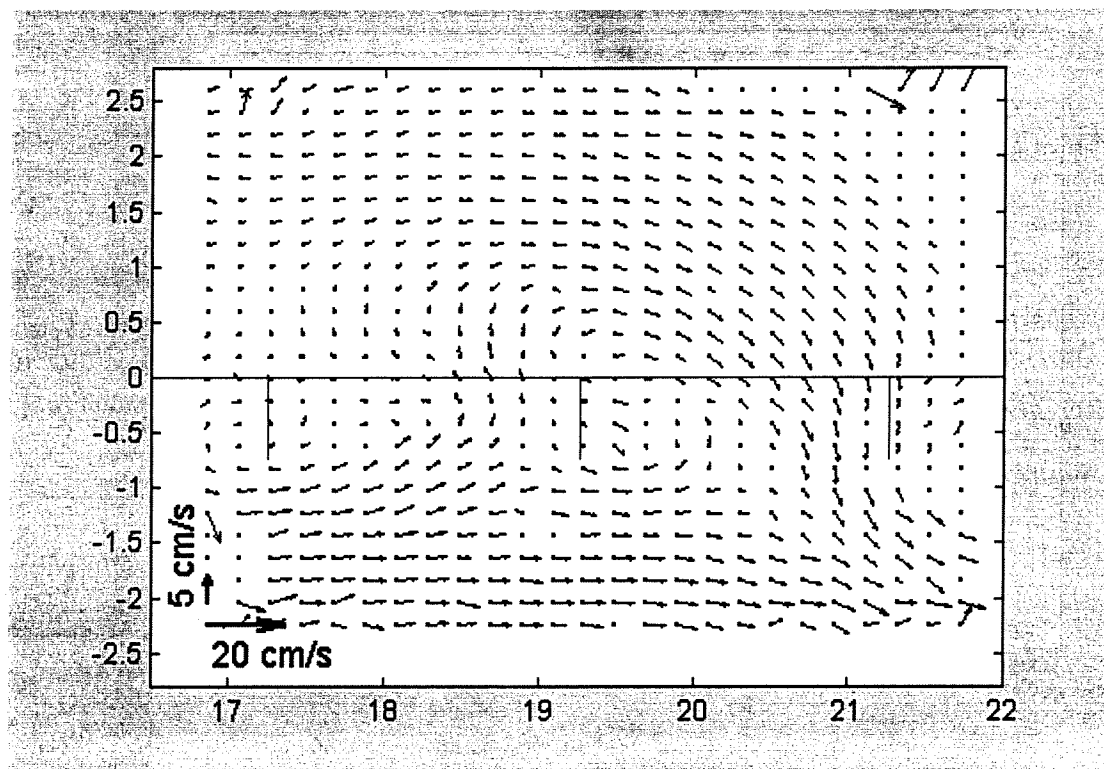


$T = 12$

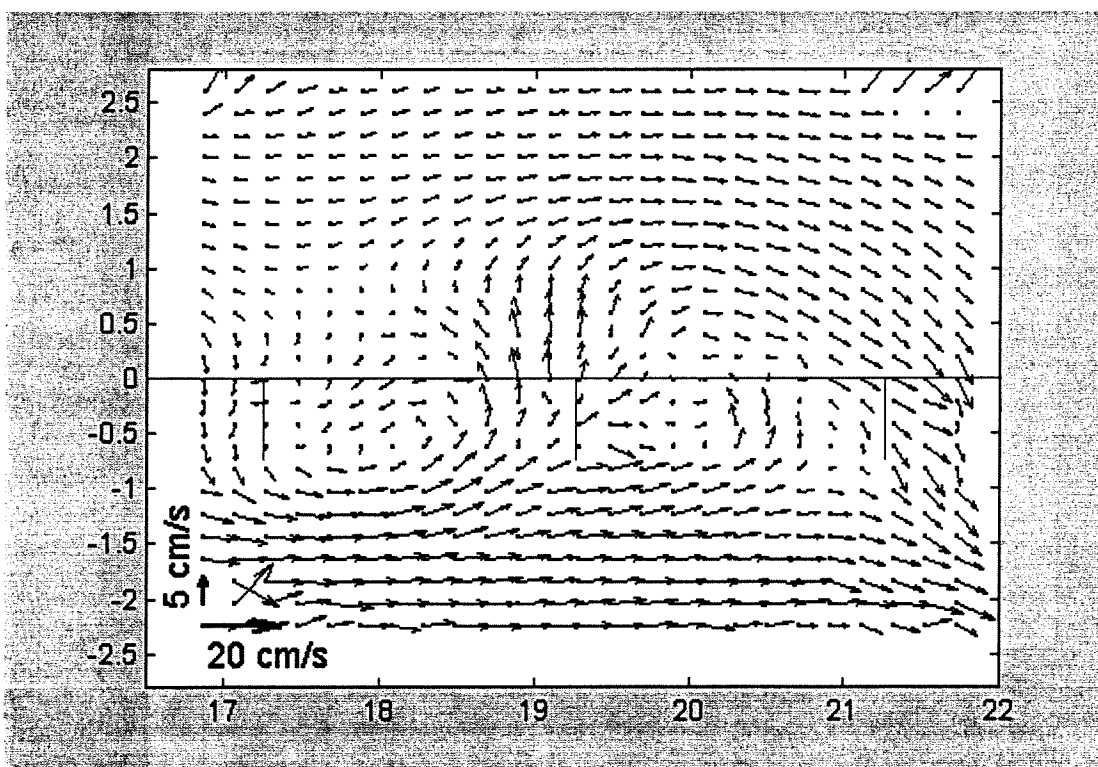


$T = 18$

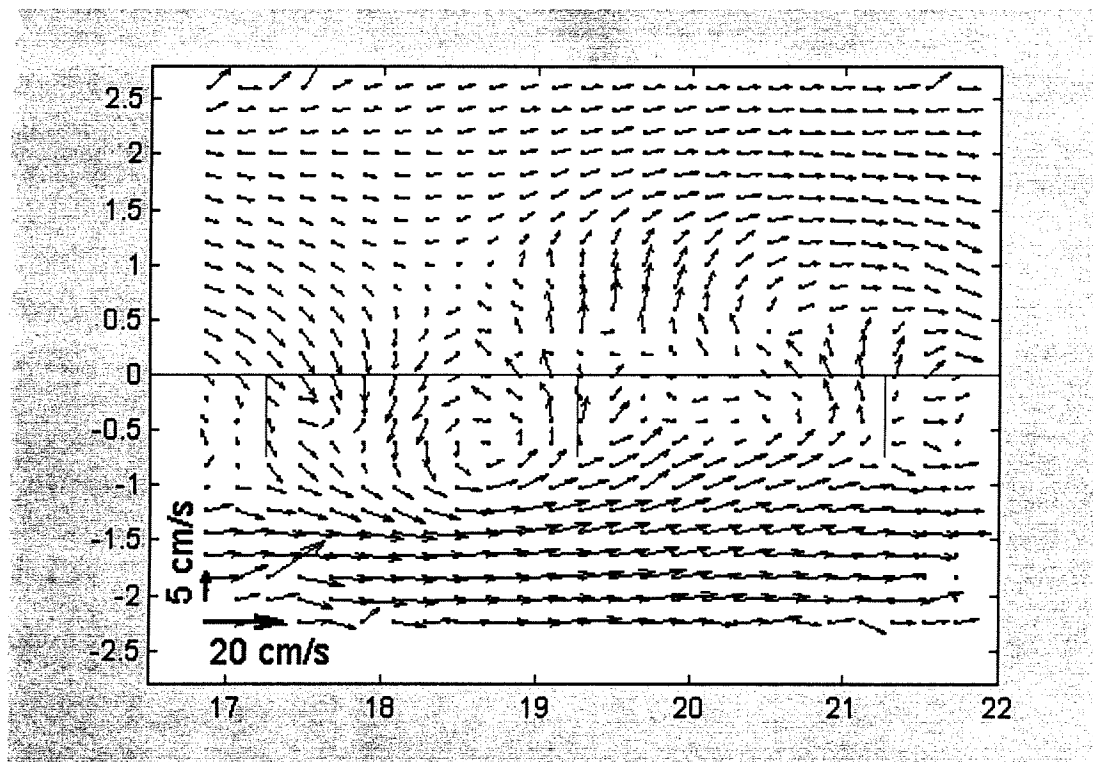
Bewerkte vectorvelden serie 2



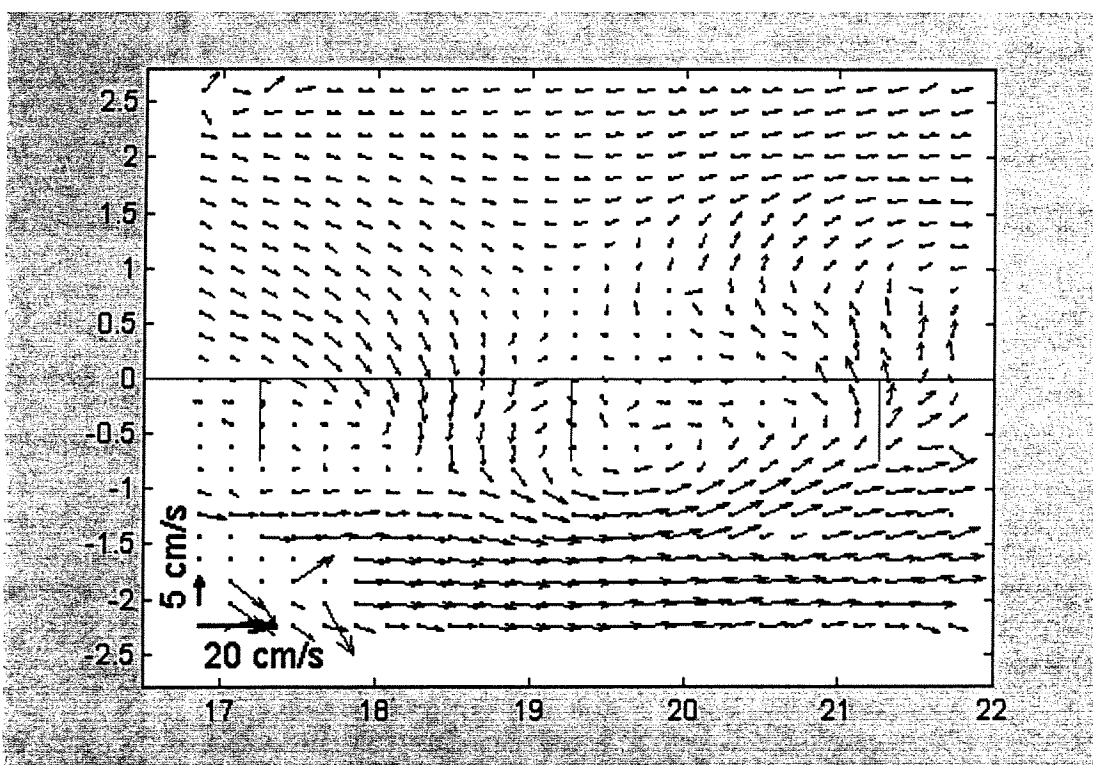
$T = 0$



$T = 6$



$T = 12$



$T = 18$

Bijlage 4 Inhoud cdrom's met video-opnames

	Bestandsnaam	Beschrijving
CD 1	dye_0.avi dye_var1.avi dye_var2.avi	Kleurstofopnames opstelling 1 (afspeelsnelheid varieert)
CD 2	opstellingDdraadjes.avi opstellingF.avi opstellingG.avi opstellingG4s.avi opstellingGa.avi	Opname richtingfluctuaties draadjes op plaat op bodem Kleurstofopname opstelling 4 Kleurstofopname opstelling 5 idem, afspeelsnelheid 4x zo snel Kleurstofopname opstelling 5, alleen links van zomerkade

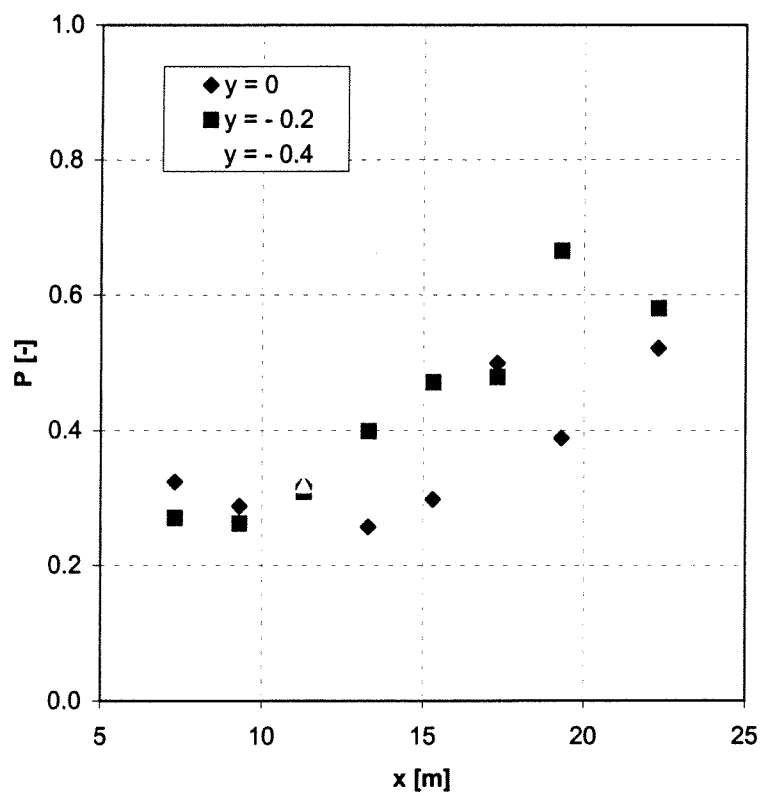
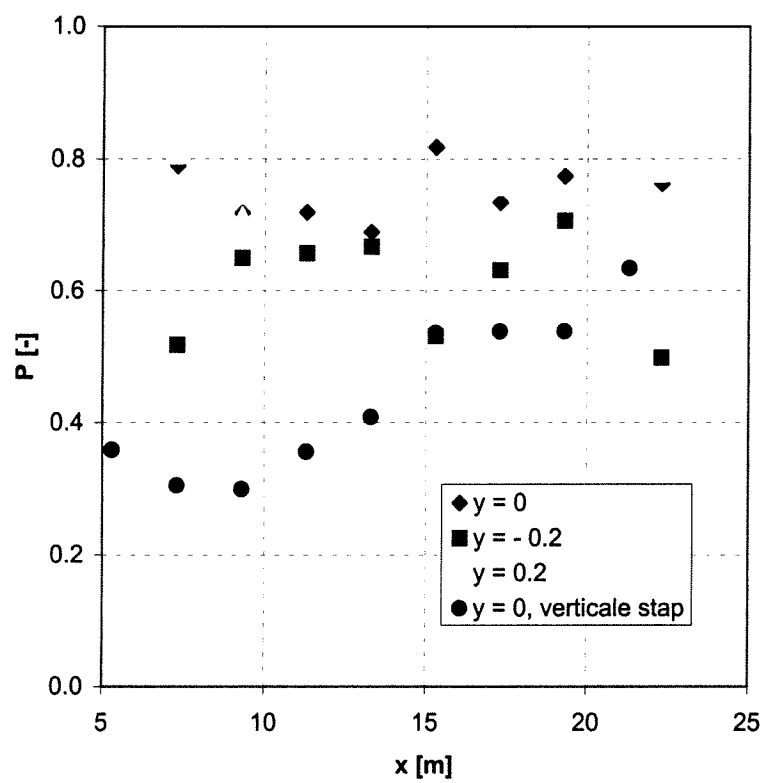
Voor de (inhoud van) cdrom's van opstelling 6, stroming met kribben, wordt verwezen naar het rapport "Experimenteel onderzoek naar waterbeweging in een rivier met kribvak en uiterwaard" met bijgesloten cdrom's.

Bijlage 5 Energieaandeel van de grootschalige wervels

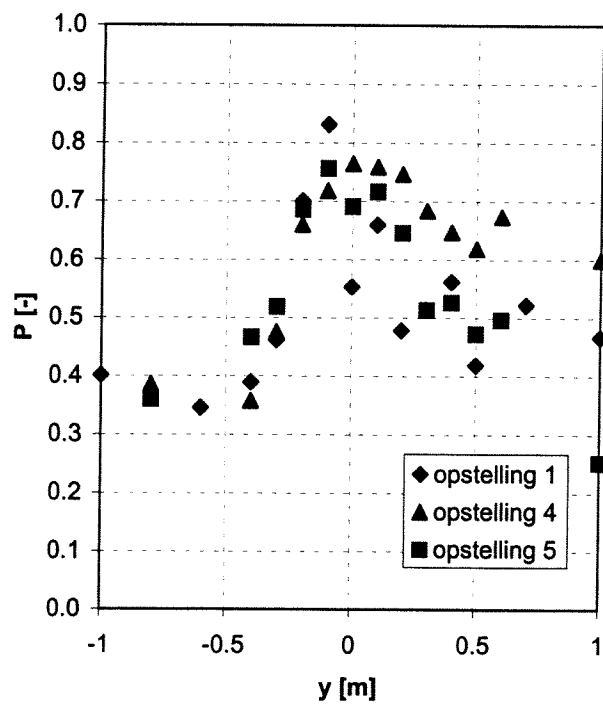
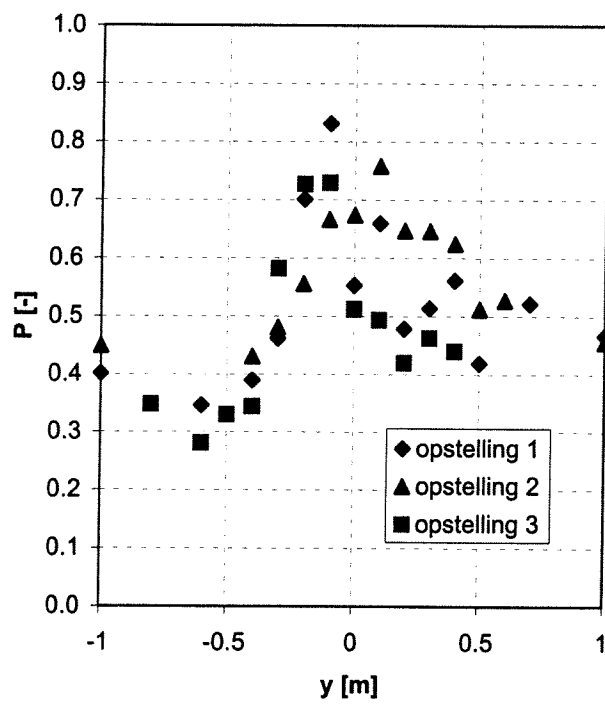
In deze bijlage is opgenomen:

- De ontwikkeling in langsrichting van het aandeel $P (= u_w'^2/u'^2)$ van de grootschalige horizontale wervels in de turbulente kinetische energie voor opstelling 1 en 3.
- Het aandeel $P (= u_w'^2/u'^2)$ op een dwarsraai in uitontwikkelde stroming voor opstellingen 1 t/m 5.

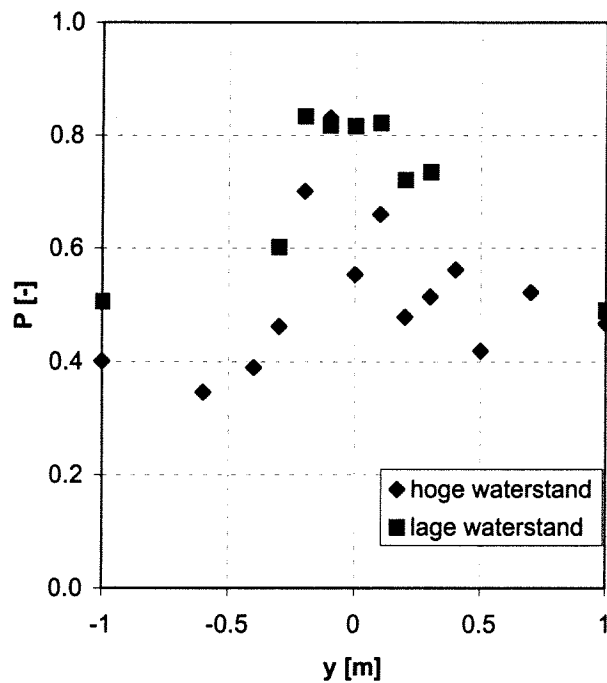
Positieve y-coördinaten in de uiterwaard.



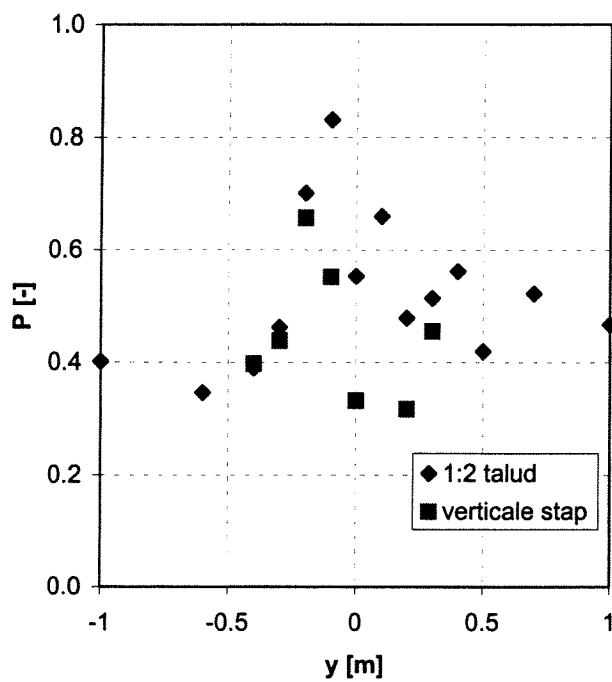
Ontwikkeling P in langsrichting opstelling 1 (boven) en opstelling 3 (onder)



P op dwarsraai $x=17.3$ m.

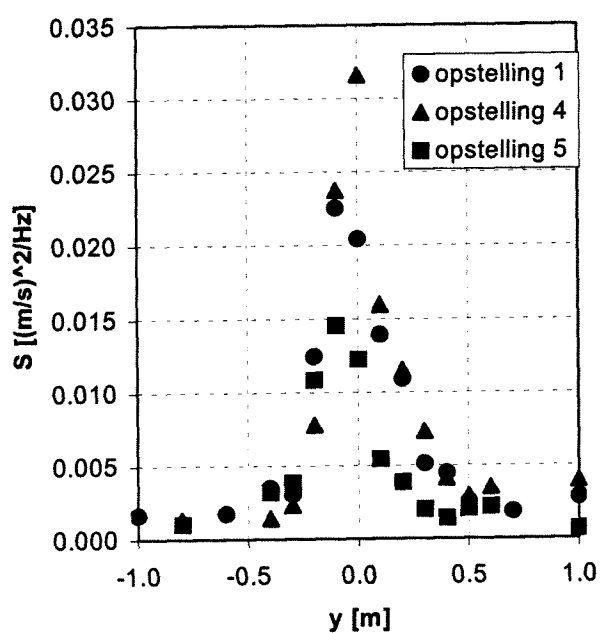
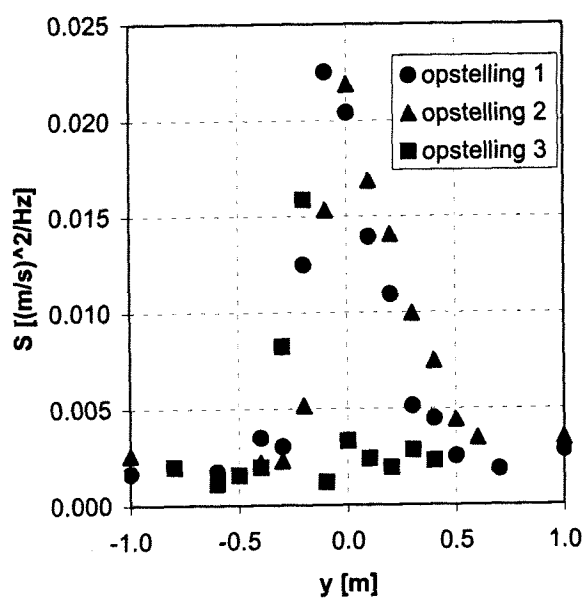


Opstelling 1: P voor waterstand van 124 mm en 114 mm op dwarsraai $x = 17.3$ m.

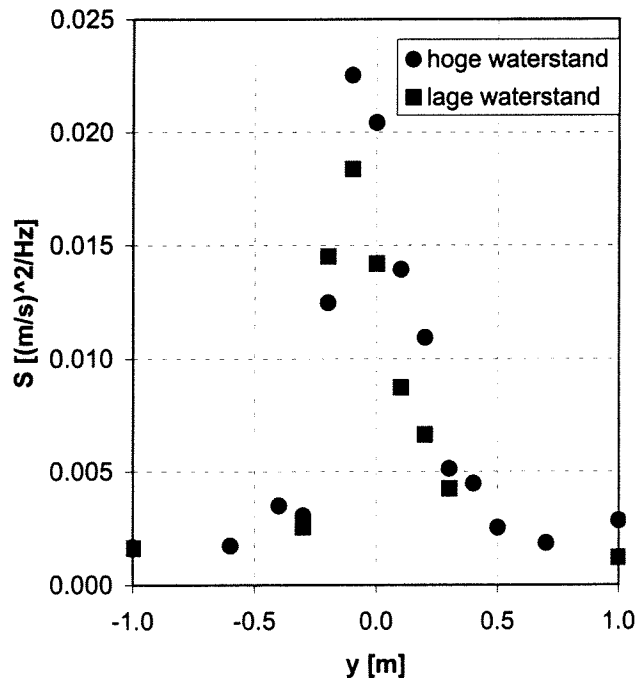


Opstelling 1: P voor 1:2 talud op dwarsraai $x = 17.3$ m. en voor verticale stap op dwarsraai $x = 22.3$ m.

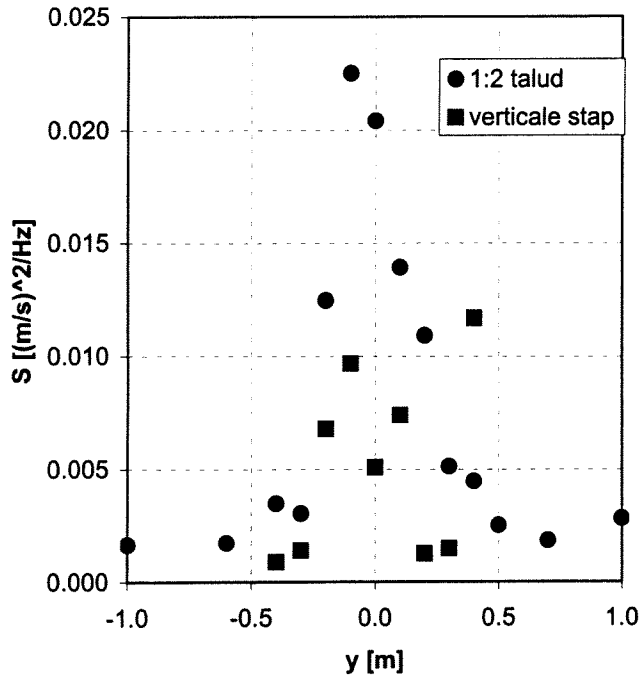
Bijlage 6 Piekennergiedichtheid



Piekennergiedichtheid S op dwarsraai $x = 17.3$ m. Y-coördinaten in de uiterwaard zijn positief.



Opstelling 1 en 1a: waterstand van 124 mm en 114 mm. Dwarsraai $x = 17.3 \text{ m}$.



Opstelling 1: 1:2 talud met dwarsraai op $x = 17.3 \text{ m}$. en verticale stap met dwarsraai op $x = 22.3 \text{ m}$.