

Particle Tracking Velocimetry in ondiep-watermenglagen

Door: E.T.L. van Noort

Begeleiders:

- Prof. Dr. Ir. J.A. Battjes
- Dr. Ir. W.S.J. Uijttewaal
- Dr. Ir. Schiereck
- Dr. Ir. J. Westerweel

Plaats : Laboratorium van Vloeistofmechanica

Kader:

Afstuderen sectie Vloeistofmechanica
Vakgroep Waterbouwkunde
TU Delft Civiele Techniek

Datum: 14 december 1998

Voorwoord

Dit verslag gemaakt in het kader van mijn afstuderen had niet kunnen worden gemaakt zonder de niet aflatende hulp van iedereen in het Laboratorium van Vloeistofmechanica. Van een luisterend oor tot aan het bouwen aan mijn opstelling. Ook mijn vrienden hebben dit verhaal al dik een jaar moeten aanhoren (BIJNA...). Mijn bijzonder dank aan Ivan, Erik, mijn ouders en mijn begeleiders die mijn verslag to be meerdere keren hebben door mogen ploeteren (voorwaar een rampzalige taak).

Samenvatting

In onderhavige studie is de meettechniek "Particle Tracking Velocimetry" (PTV) toegepast ten behoeve van het onderzoek naar ondiepe waterstromingen.

Het doel van het onderzoek was de meettechniek beschikbaar te krijgen voor studies aan ondiep-waterstromingen en de geschiktheid van de methode voor het meten van grootschalige structuren aan te tonen.

Eerst is er een literatuuronderzoek naar de PTV-methode geweest. De methode meet verplaatsingen van deeltjes in een medium over een bepaalde periode. Hiermee kunnen watersnelheden worden bepaald. Vervolgens is de PTV-methode gebruiksklaar gemaakt voor de metingen. Na het opzetten van de PTV-methode is een literatuuronderzoek gedaan naar de wervels in een menglaag. Hieruit is gekomen dat wervels zijn aan te tonen door samenhang in fluctuaties van snelheden in ruimte en tijd. Daarna is er een post processing methode opgezet om de PTV metingen om te zetten naar fluctuaties ten opzichte van een gemiddelde. Om deze methode uit te voeren is er een post processing programma geschreven. Als laatste is bij de opzet van de methode een uitgebreide foutenanalyse geformuleerd. Hiermee is aangetoond dat aanwezige fluctuaties gemeten kunnen worden.

Er zijn in twee opstellingen metingen met behulp van de PTV-methode verricht. Eerst is er in een havenmodel gemeten en vervolgens in een ondiep-watermenglaag. De opstelling in het havenmodel is gebruikt om de methode op te zetten en bekend te raken met de methode. De opstelling met de ondiep-watermenglaag is gebruikt als test voor het meten van de structuren. Hierin zijn eveneens LDA metingen verricht waarmee de PTV-methode is vergeleken.

Uit de resultaten van de metingen is gebleken dat:

- het opzetten van de meetmethode is gelukt;
- het meten van turbulente structuren in de menglaag niet is gelukt. Dit werd veroorzaakt doordat de afstand tussen de deeltjes groter is dan de grootte van de samenhang in de fluctuaties. De belangrijkste oorzaak hiervan was te ondiep water. Hierdoor konden de structuren zich niet in voldoende mate ontwikkelen om deze te kunnen waarnemen met deze methode.

Aanbevelingen voor de meting aan wervels: voer de experimenten uit met deeltjes die kleiner zijn en dichter bij elkaar liggen, zodat de wervels meetbaar zijn. Aanbevelingen voor de metingen: er zijn interessante effecten in de metingen zichtbaar geweest, deze kunnen met deze methode goed worden onderzocht.

Inhoudsopgave

Nomenclatuur	8
1 Inleiding	9
1.1 Achtergrondkader	9
1.2 Kader	9
1.3 Doelstelling	10
1.4 Probleemanalyse	10
1.5 Leeswijzer	11
2 Turbulentie in menglagen	13
2.1 Inleiding	13
2.2 Turbulentie	13
2.2.1 Open waterlopen (wandturbulentie)	14
2.2.2 Menglagen (vrije turbulentie)	14
2.2.3 Ondiep-watermenglagen	15
2.3 Structuren in een menglaag	16
2.3.1 Inleiding	16
2.3.2 Groeimechanisme	16
2.3.3 Onderzoek met LDA	19
2.4 Modellerings turbulentie	20
2.4.1 Tijdafhankelijkheid turbulentie	21
2.4.2 Benadering turbulente structuren	23
2.4.3 Benadering momentane snelheid	23
3 Meetmethode en meetopstelling	25
3.1 Inleiding	25
3.2 Meetmethode snelheden	25
3.2.1 Particle Tracking Velocimetry (momentane snelheden)	25
3.2.1.1 Tracking algoritme	26

3.2.1.2 Bepaling momentane snelheden uit deeltjespaden	27
3.2.1.3 Bepaling pixelcoördinaten	29
3.2.1.4 Omrekening naar wereldcoördinaten	29
3.2.2 Gemiddelde snelheden	29
3.2.3 Fluctuerende deel snelheden	32
3.2.4 Programma voor dataverwerking	33
3.2.4.1 Algoritme berekening gemiddelden	33
3.2.4.2 Algoritme berekening fluctuaties	33
3.2.4.3 Algoritme filter spurious vectors	33
3.2.4.4 Filtering ongematchte deeltjes	35
3.2.4.5 Algoritme geografisch filter	35
3.3 Meetopstellingen	37
3.3.1 Inleiding	37
3.3.2 Data acquisitie PTV	38
3.3.3 Opstelling data verwerking	39
3.3.4 De havenopstelling	40
3.3.4.1 Meting calibratiepunten havenmodel	42
3.3.4.2 Meetplan havenmodel	42
3.3.5 Opstelling menglaag	43
3.3.5.1 Calibratie snelheden in de goot	45
3.3.5.2 Meetplan menglaag	45
3.4 De foutenanalyse	47
3.4.1 De meetfouten	49
3.4.1.1 Inleiding	49
3.4.1.2 Meetfout apparatuur	49
3.4.1.3 Kwantificering foute matches	50
3.4.1.4 Kwantificering calibratiefout	51
3.4.2 Aannames	52
3.4.2.1 Opsomming aannames	52
3.4.2.2 Kwantificering aannames	53
3.4.3 Doorwerking van fouten en aannames	54

4 Resultaten	57
4.1 Inleiding	57
4.2 Meetresultaten havenmodel	59
4.2.1 Inleiding	59
4.2.2 Resultaten acquisitie	59
4.2.2.1 Kleur	59
4.2.2.2 Grootte	59
4.2.2.3 Inworp	60
4.2.2.4 Conclusies deeltjes	60
4.2.3 Resultaten verwerking havenmetingen	60
4.2.3.1 De gemiddelden	61
4.2.3.2 Meetfout gemiddelde	61
4.2.3.3 Conclusie gemiddelden	64
4.2.3.4 Fluctuaties havenmetingen	65
4.2.3.5 Meetfout fluctuaties	66
4.2.3.6 Conclusie fluctuaties haven	68
4.2.4 Aanbevelingen havenresultaten	69
4.2.4.1 Gebieden gemiddelde stroming	69
4.2.4.2 Vorm van de structuren	69
4.2.4.3 Problemen calibratie	70
4.2.4.4 Schatting grootte fluctuaties	71
4.3 Resultaten goot	72
4.3.1 Inleiding	72
4.3.2 Gemiddelde snelheden	73
4.3.2.1 Meetfout gemiddelde	74
4.3.2.2 Controle aannames	77
4.3.2.3 Vergelijking LDA PTV	78
4.3.2.4 Conclusie gemiddelde snelheden	81
4.3.3 Fluctuaties momentane snelheden	82
4.3.3.1 Meetfout fluctuaties	83
4.3.3.2 Conclusies fluctuaties in snelheden	84
4.3.4 Discussie goot	85

4.3.4.1 Gemiddelde snelheden	85
4.3.4.2 Turbulente structuren	88
5 Conclusies & Aanbevelingen	89
5.1 Conclusies	89
5.1.1 Deelconclusies	90
5.2 Aanbevelingen	92
5.2.1 Meting turbulente structuren	92
5.2.2 Aanbevelingen gemiddelden	93
5.2.3 Aanbevelingen meetopstellingen	94
5.2.4 Aanbevelingen verwerking	94
5.2.5 Aanbevelingen voor filtering van data	95
LITERATUUR	97

Nomenclatuur

α	=	factor afhankelijk van het filter dat is gebruikt om foute matches te filteren op fysieke gronden (-)
δ	=	imprecisie van de grootte
δu_m	=	meetfout ten gevolge van de apparatuur (ms^{-1})
$\delta u_{p/f}$	=	gemeten fout apparatuur in pixels per frame
$\delta \underline{x}$	=	imprecisie van $\underline{x}$ (m)
Δt	=	tijdsinterval tussen twee opeenvolgende metingen van de positie van een deeltje, ook wel de bemonsteringstijd genoemd (s)
Δx_{grid}	=	roosterafstand in x richting (m)
Δy_{grid}	=	roosterafstand in y richting (m)
$a..f$	=	de zes constanten die geschat moeten worden uit de calibratiepunten (-)
n	=	aantal gemeten datapunten $\underline{x}$ (-)
n'	=	Schatting voor het aantal metingen waaruit het gemiddelde in punt $\underline{x}$ is berekend (-)
$\underline{u}(\underline{x}, t)$	=	snelheid in een punt op een bepaald tijdstip (ms^{-1})
$\overline{\underline{u}(\underline{x}, t)}$	=	gemiddelde snelheid in een punt (ms^{-1})
$\tilde{\underline{u}}(\underline{x}, t)$	=	fluctuerende deel op een bepaald tijdstip (ms^{-1})
$\overline{\underline{u}(\underline{x}, t)}_{\text{max}}$	=	schatting van het maximum van alle gemeten gemiddelde snelheden (ms^{-1})
$\overline{\underline{u}(\underline{x})}$	=	de gemiddelde snelheid in een punt (ms^{-1})
$w(\underline{x}_g, \underline{x}_i)$	=	gewicht van datapunt op plaats $\underline{x}_i$ voor de gemiddelde snelheid op plaats $\underline{x}_g$ (-)
$\underline{x}(t)$	=	meting van positie van deeltje op tijdstip t (s)
$\underline{x}_g$	=	coördinaat van een roosterpunt (m)
x_g, y_g	=	wereldcoördinaten van meetpunt $\underline{x}$ (m)
x_p, y_p	=	pixelcoördinaten van meetpunt $\underline{x}$ (m)
C	=	de gemeten grootte van de pixels in meters (m)
Q	=	kwaliteit van de meting deze is gedefinieerd als het aantal fout gematchte deeltjes gedeeld door het totaal aantal gematchte deeltjes (-)

1 Inleiding

1.1 Achtergrondkader

Menglagen zijn in de waterloopkunde een algemeen verschijnsel. Ze ontstaan bijvoorbeeld bij obstakels in water, bij samenkomen van rivieren en bij havenmondingen. In veel gevallen zijn dit soort stromingen ondiep en turbulent. Deze menglagen dragen bij aan het transport van gesuspendeerde en opgeloste stoffen in het water loodrecht ten opzichte van de gemiddelde snelheid. Menglagen ontstaan eveneens bij obstakels in stroming. Deze menglaag veroorzaakt krachten op die obstakels en op obstakels benedenstrooms daarvan. Deze krachten en transporten worden grotendeels veroorzaakt door de grote turbulente wervels die kunnen ontstaan in de menglaag. Om deze krachten en transporten beter te kunnen voorspellen is de vraag wat is het mechanisme achter de structuur in de menglagen en hoe deze er uit zien. Deze structuur is tijdsafhankelijk en voor deze tijdsafhankelijkheid is nog geen geschikte modellering gevonden. Om deze stroming te kunnen modelleren is het nuttig om een tijdsafhankelijk signaal te meten waaraan een model kan worden getoetst.

1.2 Kader

Er zijn Laser Doppler metingen verricht aan een ondiep- watermenglaag in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica (Uijtewaald & Tukker, 1997). Uit deze metingen zijn structuren te herkennen op grond van correlaties van snelheden in ruimte en tijd. Om een adequate modellering te verkrijgen van het effect van turbulente structuren op de snelheden in de stroming is het nuttig om deze te meten. Om de turbulente structuren over de ruimte te beschrijven moeten meerdere metingen tegelijk over een ruimte verricht worden. Een beeldverwerkingsmethode, zoals Particle Tracking Velocimetry, kan meerdere metingen tegelijk uitvoeren over een ruimte en lijkt op voorhand geschikt voor metingen aan turbulente structuren. Het probleem hierbij was tweeledig:

- het opzetten van de PTV voor gebruik in het Laboratorium van Vloeistofmechanica
- het kwantitatief visualiseren van turbulente structuren

1.3 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het toepassen van Particle Tracking Velocimetry voor het kwantitatief visualiseren van de tijdsafhankelijke turbulente structuren in een ondiep-watmenglaag die van ordegrrootte van de menglaag zijn met behulp van Particle Tracking Velocimetry (PTV).

1.4 Probleemanalyse

Het probleem om met de gestelde beperkingen met PTV de watersnelheden tijdsafhankelijk te meten valt eenduidiger geformuleerd uiteen in twee onderdelen:

- het opzetten van de Particle Tracking Velocimetry (PTV) meetmethode;
- het interpreteren van PTV data zodanig dat er tijdsafhankelijke turbulente structuren gevisualiseerd kunnen worden.

Het opzetten van de PTV meetmethode is weer onder te verdelen in vijf deelproblemen:

- onderzoeken in literatuur waarop Particle Tracking Velocimetry is gebaseerd;
- hoe moet de computer worden aangesloten op de aangereikte apparatuur, zodat ze onderling kunnen communiceren om de PTV te kunnen uitvoeren;
- wat zijn geschikte deeltjes voor PTV;
- hoe kunnen de deeltjes gebruikt voor PTV het beste in de stroming worden gebracht voor een zo klein mogelijke fout;
- controle van de werkbaarheid van de PTV aan de hand van een stroming.

De bepaling van turbulente structuren uit de data verkregen met PTV valt weer uiteen in een aantal deelproblemen:

- wat wordt met PTV gemeten;
- wat zijn turbulente structuren;
- hoe kunnen deze structuren worden herkend in de PTV data;
- hoe kan de berekening worden getoetst.

De herkenning van de structuren uit PTV valt uiteen in twee deelproblemen:

- hoe kunnen uit de PTV data de turbulente structuren worden benaderd;
- verwerking van zeer grote hoeveelheden data in een computerprogramma;

De toetsing van de berekening kan ook worden onderverdeeld in twee deelproblemen:

- verificatie van de PTV aan de hand van LDA door te meten aan dezelfde opstelling.
- schatting van het 95% betrouwbaarheidsinterval van de berekende turbulente structuren uit doorwerkingsvergelijkingen en afschatting van meetfouten.

Om al deze problemen te kunnen oplossen is er gekozen om twee meetopstellingen te gebruiken. Een bedoeld om de PTV methode op te zetten. Deze had een complexe vorm zodat zoveel mogelijk problemen aan het licht komen. De tweede bestond uit een geïdealiseerde menglaag opgewekt in een stroomgoot. In deze opstelling zijn een aantal onderzoeken verricht naar de structuren in de turbulentie en de resultaten kunnen daardoor beter vergeleken worden.

1.5 Leeswijzer

Naast de inleiding is het onderzoeksverslag opgebouwd uit vier hoofdstukken. Na de inleiding komt hoofdstuk 2 “Turbulentie in menglagen”. Hierin is een uitgebreidere probleemanalyse beschreven en worden de uitgangspunten van dit onderzoek uiteengezet. Deze probleemanalyse bestaat uit: een inleiding over turbulentie, een samenvatting van het eerdere onderzoek naar turbulente structuren in een menglaag en uiteindelijk een uitleg hoe en onder welke aannames het mogelijk is om turbulente structuren te meten, met de gekozen meetmethode.

Hoofdstuk 3 “Meetmethode en meetopstelling” bevat de feitelijke bewerkingen die gebruikt zijn om van de werkelijke meting (het meten van willekeurige posities op een tijdstip) naar een schatting van de turbulente structuren, zoals die is aangenomen in de theorie, te komen. De manier waarop de metingen zijn uitgevoerd is eveneens in dit hoofdstuk opgenomen. Als laatste is hierin de foutenanalyse opgenomen waarmee het 95% betrouwbaarheidsinterval is geschat.

Vervolgens staan in hoofdstuk 4 “Resultaten” de resultaten van de metingen die uitgevoerd zijn, zowel van de proefmetingen in de haven als in de ondiepe menglaag in water. De resultaten zijn de bewerkte resultaten van de PTV. Vervolgens wordt er een korte interpretatie gegeven van de meetresultaten. Deze interpretatie is de onderbouwing van de conclusies die kunnen worden getrokken uit dit onderzoek. Ook worden een aantal opmerkelijke metingen belicht die niet direct met dit onderzoek te maken hadden, maar (hopelijk) wel vermeldenswaardig.

In hoofdstuk 5 “Conclusies en aanbevelingen” worden de resultaten getoetst aan de doelstelling. Als besluit van het geheel worden er een aantal aanbevelingen gedaan in verband met het verrichtte onderzoek.

2 Turbulentie in menglagen

2.1 Inleiding

Een van de problemen bij dit onderzoek is de definitie van turbulente structuren en hoe deze vervolgens in cijfers uitgedrukt kan worden. In dit hoofdstuk wordt gepoogd hierop een antwoord te geven. Om de turbulente structuren te kunnen definiëren moet er eerst uitgelegd worden wat turbulentie is. Turbulentie in menglagen is het beste te beschrijven door eerst iets te vertellen over wat turbulentie is, vervolgens wat in het algemeen turbulentie voor gevolgen heeft in open waterlopen in het algemeen en tenslotte over de menglaag zoals die is onderzocht. Om uit te kunnen leggen wat de turbulente structuren zijn is er een literatuuronderzoek verricht naar de structuren in de menglaag. Het kwantificeren houdt in dat er een methode van kwantificering van stroming moet worden gekozen. In de paragraaf modellering turbulentie wordt uitgelegd welke is gekozen en waarom.

2.2 Turbulentie

Turbulentie wordt beschouwd als een eigenschap van stroming. Wat is nu de turbulentie in deze stroming. Om dit te kunnen zien volgt hier een lijst van kenmerken van turbulentie zoals die wordt gegeven in het turbulentie dictaat van Booij (1992). Deze lijst is weer afgeleid van Tennekes & Lumley (1972):

Onregelmatigheid of toevalligheid. Turbulentie is niet exact te voorspellen

Diffusiviteit. Turbulentie veroorzaakt diffusie in de stroming. Deze diffusie veroorzaakt menging in de stroming van impuls en opgeloste stoffen.

Grote getallen van Reynolds. Het getal van Reynolds is een maat voor de verhouding tussen de traagheidskrachten en de viskeuze krachten.

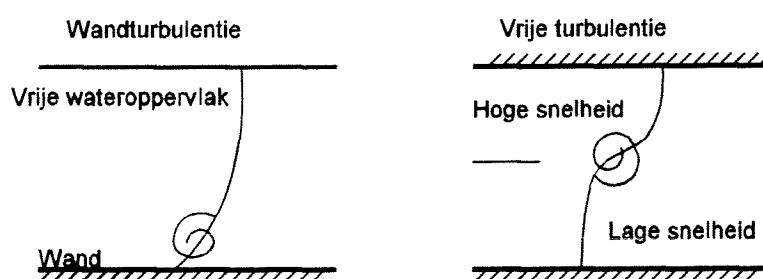
Driedimensionale wervelsterkte fluctuaties. De fluctuaties in de stroomsnelheden zijn in alle richtingen.

Dissipatie. Turbulentie veroorzaakt een verlies van energie van de hoofdbeweging van de stroming aan de warmte beweging van de stroming.

Continuüm. De snelheden hebben een zodanige schaal dat deze met het continuüm model zijn te beschrijven.

2.2.1 Open waterlopen (wandturbulentie)

In open waterlopen ontstaat het snelheidsverschil doordat de stroomsnelheid aan de wand (bodem) als nul te beschouwen is (de zogenaamde no-slip condition). Dit wordt wandturbulentie genoemd. Boven een bepaalde waarde van de snelheidsgradiënt in verhouding tot de viscositeit van de stroming ontstaan er turbulente fluctuaties bij de wand (zie figuur 1). Deze waarde wordt berekend met het Reynolds getal. Meestal reduceert het probleem daarmee tot een twee dimensioneel probleem, namelijk alleen diepte breedte afhankelijk, hierbij kan een



figuur 1. Plaats van ontstaan turbulentie in de waterloopkunde is aangegeven met de slingering.

tijdonafhankelijk gemiddelde worden gedefinieerd als de fluctuaties voldoende klein zijn. In de meeste gevallen kan door de grootte breedte diepte verhouding het probleem zelfs vereenvoudigd worden tot een eendimensionaal probleem. Hieruit kan het logaritmische profiel worden afgeleid. Verschillen in debiet kunnen hierbij worden verwaarloosd, omdat deze fluctuaties veroorzaakt met een veel grotere tijdschaal als de turbulente tijdschaal.

2.2.2 Menglagen (vrije turbulentie)

Een tweede oorzaak van snelheidsverschillen is het samenkomen van twee stromen die op dat moment nog verschillende snelheden bezitten. Ook hier ontstaat turbulentie bij grotere Reynolds getallen ter plaatse van het buigpunt in de stroming (zie figuur 1). Vanwege de

oorzaak van de snelheidsverschillen noemt men dit vrije turbulentie. Hierbij moet worden opgemerkt dat de wandturbulentie van invloed kan zijn op de menglaag.

In zijn meest elementaire vorm bestaat deze vrije turbulentie uit de diepe menglaag. In dit geval volstaat het tweedimensionale diepte breedte model niet meer. Er bestaat in dit specifieke geval een lineaire afhankelijkheid van stroomsnelheden met de afstand tot het begin van de menglaag. Deze afhankelijkheid van de menglaag is in diep water te beschrijven als een constante groeisnelheid in de breedte afhankelijk van de afstand tot het begin van de menglaag (Spencer & Jones 1971).

Samen met de afhankelijkheid in de ruimte van de stroming ontstaat er ook een afhankelijkheid in de tijd van de stroomsnelheden. Deze is wel te beschrijven met gemiddelde plaatsafhankelijke variabelen, maar dit strookt niet met het doel van dit onderzoek. De tijdsafhankelijkheid in de stroomsnelheden zijn de grote turbulente structuren die bedoeld worden in het doel van dit onderzoek.

2.2.3 Ondiep-watermenglagen

Zoals te verwachten heeft de wandwrijving invloed op de vrije turbulentie. Deze wandwrijving heeft een remmende invloed op de ontwikkeling van de menglaag. De invloed van de bodemwrijving op de ontwikkeling van de menglaag is onder andere onderzocht door Chu & Babarutsi (1988). Een van de conclusies in dat onderzoek is dat als gevolg van de bodemwrijving er een grotere initiële groeisnelheid van de menglaag bij lage waterdieptes (2-5cm) is. Metingen in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica (Uijttewaal&Tukker 1998) laten zien dat de initiële groeisnelheid hetzelfde blijft als bij de diep-watermenglaag en de wandwrijving een remmende werking heeft op de groeisnelheid benedenstrooms van de scheidingsplaat.

De wandwrijving heeft ook effect op de groei van de structuren in de menglaag. Hier is onderzoek naar gedaan met Laser Doppler metingen (Uijttewaal&Tukker 1998). Ook zijn er meer kwalitatieve tracer metingen uitgevoerd naar de structuren in de menglaag, welke hierna besproken worden.

2.3 Structuren in een menglaag

2.3.1 Inleiding

Voor het kwantificeren van de turbulente structuren is het nodig om eerst te definiëren wat de turbulente structuren zijn in het geval van menglagen. Hiertoe is het nuttig om eerst resultaten van voorgaand onderzoek gedaan naar structuren in menglagen te bekijken. Dit onderzoek heeft zich vooral toegespitst op het visualiseren van stroomlijnen met behulp van tracervloeistof en niet met kwantitatieve meting (Winant&Browand, 1974). De tracer vloeistof geeft inderdaad een redelijk goed beeld van de coherentie in waterbeweging die worden gezocht. De turbulente structuur kan worden gedefinieerd als een correlatie in ruimte en tijd. Om deze correlatie in de ruimte en tijd te visualiseren moeten momentane snelheden over een deze ruimte en deze ruimte op meerdere tijdstippen worden getoond

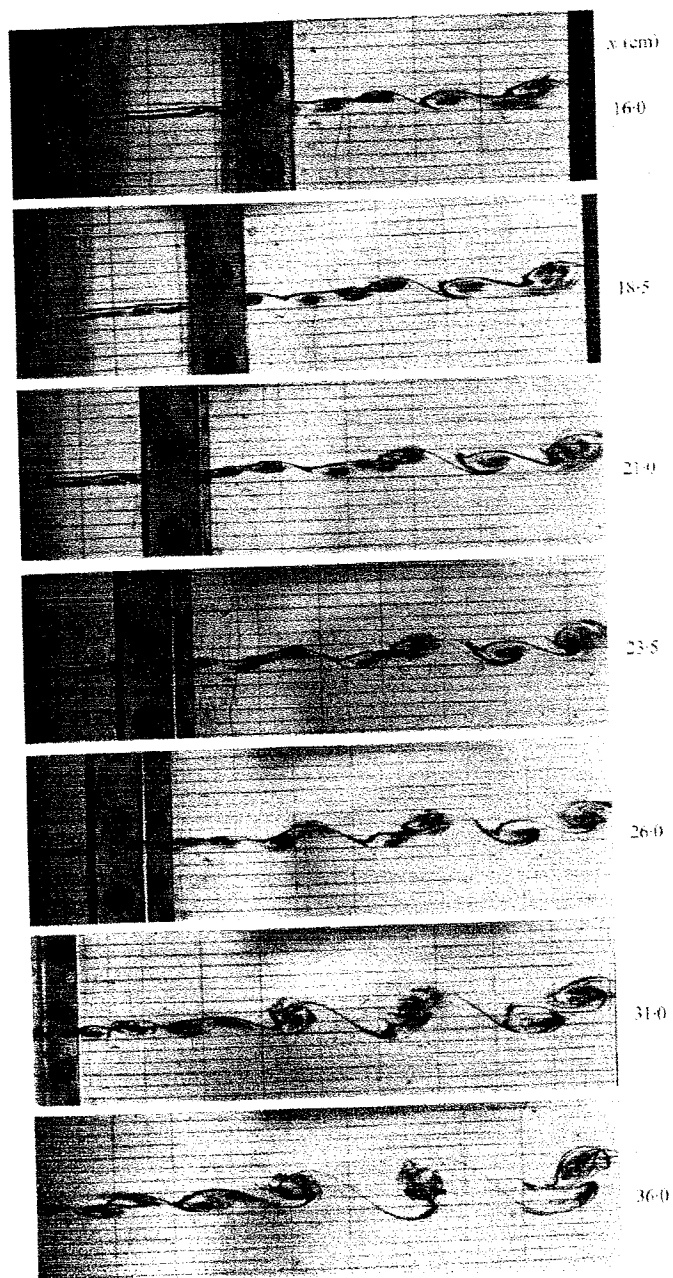
De structuren in de menglagen ontstaan doordat de laminaire sublaag loslaat van de scheidingsplaat (de von Karman wervelstraat). De snelheidsverschillen in de beide hoofdstromen en de kracht die de snelheidsverschillen op de menglaag uitoefent veroorzaakt de groei van de structuren in de menglaag. Deze structuren zijn te herkennen aan een lange levensduur en coherente bewegingen van lengteschalen van orde grootte van breedte van de menglaag.

2.3.2 Groeimechanisme

De structuren in een menglaag groeien door een effect dat in het engels “vortex pairing” wordt genoemd. In onderzoek door Winant & Browand (1974) is een schets van het principe van vortex pairing gegeven. In het Nederlands vertaald heet dit wervelparing. De wervels bewegen stroomafwaarts naar elkaar toe tot op een zeker ogenblik de wervels om elkaar heen gaan draaien (Winant & Browand, 1974). Hierbij wordt een zekere hoeveelheid water in de menglaag opgenomen. Dit effect wordt entrainment of meevoering genoemd. Deze wervels zorgen daardoor voor het belangrijkste deel het dwarstransport van materie in de menglaag. Volgens Winant & Browand (1974) is in het meeste voorgaande onderzoek slechts één

samenvoeging van wervels gesignaleerd. Hierbij refereren Winant & Browand aan Freymuth (1966), Browand (1966) & Miksad (1972). In hun onderzoek met tracer vloeistof kwam tot vier keer een samenvoeging voor. Dit proces stopt door de randeffecten in de meetopstelling.

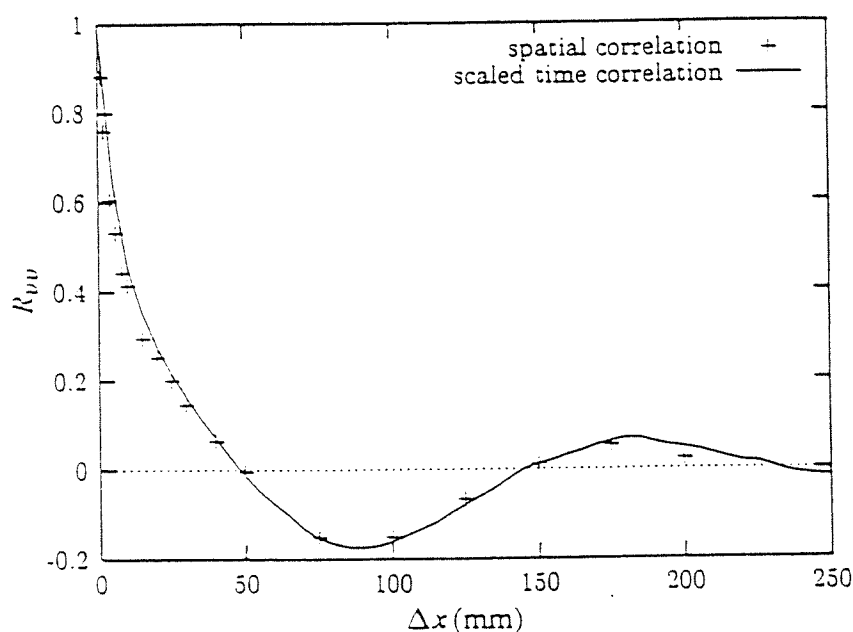
In figuur 2 zijn resultaten te zien van deze tracermetingen. De individuele plaatjes zijn foto's opeenvolgend in tijd, waarin is te zien dat de wervels inderdaad naar elkaar toe bewegen en rond elkaar gaan draaien. Ook in deze figuur is te zien dat er niet altijd twee wervels paren. Soms paren er drie opeenvolgende wervels (zie figuur 2). Soms blijft er een wervel alleen. Deze wervel wordt dan uiteen getrokken worden door de omliggende wervelparen. Het overslaan van wervels heeft tot gevolg dat de golflengte van de individuele wervel een willekeurig variatie heeft, omdat deze niet altijd uit twee wervels is opgebouwd, maar voor een deel uit meer wervels. Er is wel een gemiddelde golflengte te bepalen als functie van de afstand tot de scheidingsplaat. De oorzaak van deze variaties is dat turbulentie bij een instabiel evenwicht ontstaat en afwijkingen van het gemiddelde zodoende versterkt worden in plaats van afgezwakt. Dit betekent dat de afwijkingen in de structuren benedenstrooms steeds groter worden.



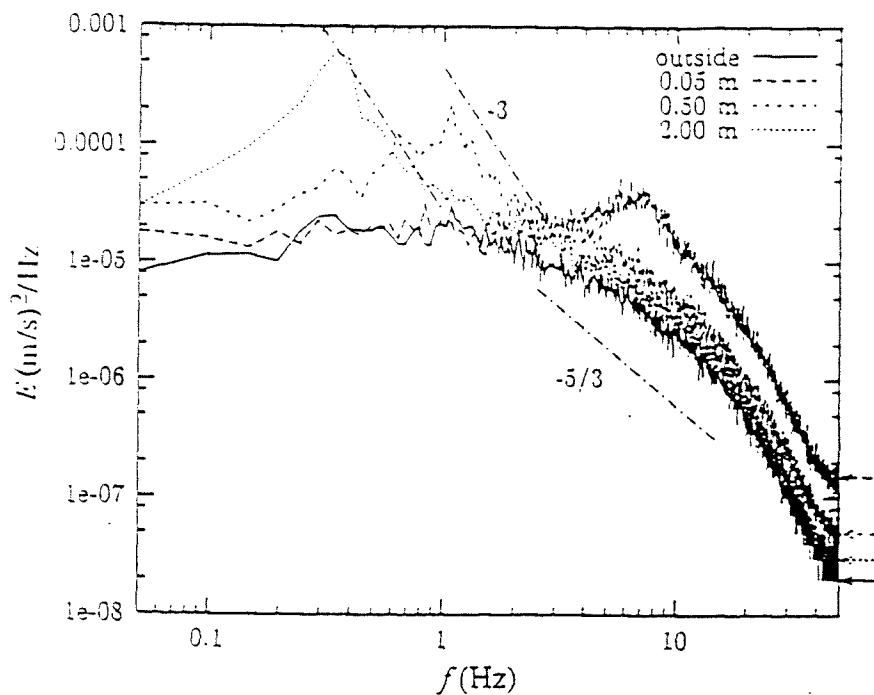
figuur 2. Wervel paring (Winant & Browand, 1974). De tracer vloeistof is midden in en net boven de menglaag geïnjecteerd. De camera beweegt mee met de gemiddelde stroomsnelheid. De positie van het midden van de individuele beelden is aangegeven in centimeters benedenstrooms van de scheidingsplaat.

2.3.3 Onderzoek met LDA

In de opstelling beschreven in de paragraaf “3.3.5 Opstelling menglaag” zijn eveneens Laser Doppler Anemometry (LDA) metingen verricht (Uijtewaal & Tukker, 1998). LDA is een meetmethode die gebruik maakt van een laserstraal die verstrooid wordt door een deeltje in de stroming. De beweging van dit deeltje veroorzaakt een frequentieverschuiving van het laserlicht, uit deze frequentieverschuiving kan de snelheid van het deeltje worden bepaald (Tukker 1997 beveelt Absil 1995, Adrian 1983, Durani & Greated 1977, Durst et al 1976 en Somerscales 1981 aan voor een gedetailleerdere beschrijving van LDA). Uit dergelijke metingen met een veel groter oplossend vermogen dan de PTV metingen kan een autocorrelatie functie worden berekend en een spectrum worden geschat. Er zijn eveneens metingen tegelijk op twee plaatsen verricht. Hieruit kunnen correlaties in de ruimte worden berekend. Zowel in de correlaties in de ruimte als in tijd is de lengteschaal en de tijdschaal van de structuren te bepalen (zie figuur 3). Deze is wel bepaald vanuit de stilstaande waarnemer. De verhouding van de ruimte schaal ten opzichte van de tijdschaal is gelijk aan de gemiddelde



figuur 3. *Correlaties in snelheidsfluctuaties in de menglaag dwars op de hoofdstroomse richting. De tijdsverschuiving in de autocorrelatie is met behulp van de gemiddelde advectionssnelheid omgerekend naar een verplaatsing (Uijtewaal & Tukker, 1998).*



figuur 4. Het één-dimensionale vermogensdichtheid-spectrum van de fluctuerende snelheidscomponent loodrecht op de stroming in het midden van de menglaag op diverse plaatsen benedenstrooms van de menglaag op tweederde van de diepte (Uijttewaal & Tukker, 1998-II).

transportsnelheid. In het onderzoek van Uijttewaal & Tukker (1998) zijn ook eendimensionale vermogensdichtheidsspectra bepaald. Deze vertonen een duidelijke piek in de dwarscomponent (zie figuur 4). De hoekfrequentie waar deze piek zich bevindt geeft ook een maat voor de tijdschaal van de structuur in het tijdsdomein. De oppervlakte onder de grafiek is een maat voor de energie opgeslagen in deze structuren.

2.4 Modellering turbulentie

Turbulentie is een grootte die onafhankelijk van de waarnemer beschouwd kan worden. Hiervoor zijn vele methoden beschikbaar. Enkele die de revue al zijn gepasseerd zijn correlatiemetingen en spectraalanalyses, waarbij de snelheden als een optelsom van sinussen wordt beschouwd. Ook is het mogelijk om turbulentie in het snelheidsdomein uit te drukken. Ook hier zijn legio mogelijkheden. Vaak wordt de snelheid onafhankelijk gemaakt van de tijd door een tijd middeling te gebruiken. Eveneens is het zeer gebruikelijk om bijvoorbeeld een

rivier als een eendimensionale grootheid te beschouwen. Effecten van turbulentie worden hierin dan uitgedrukt in een diffusiecoëfficiënt.

De turbulente structuren zijn in principe een tijdsafhankelijke grootheid en plaatsafhankelijke grootheid (In de Eulerse benadering is deze plaatsafhankelijkheid geparametriseerd aan het aardoppervlak, in de Lagrangeaanse benadering in stromingsafhankelijke parameters). Om de turbulente structuren te kunnen kwantificeren moet deze grootheid als functie van de tijd en ruimte worden gemeten.

In dit onderzoek is er gekozen voor snelheidsmetingen ten opzichte van een stilstaande waarnemer (Eulerse benadering).

2.4.1 Tijdsafhankelijkheid turbulentie

In de structuren is ook duidelijk een tijdsafhankelijkheid zichtbaar en aanwezig. Om deze tijdsafhankelijkheid te kunnen meten moet de momentane snelheid over meerdere opeenvolgende perioden worden gemeten. Bij de Reynolds decompositie wordt dit tijdsafhankelijke signaal opgedeeld in een gemiddelde en een fluctuatie ten opzichte van dit gemiddelde. Het doel hiervan is dat het gemiddelde goed te bepalen is en ook goed te modelleren de fluctuaties worden hierin geschat met de standaarddeviatie van de gemiddelde snelheid. Nu is de snelheid te beschrijven als een functie met een gemiddelde snelheid met fluctuaties:

$$\underline{u}(\underline{x}, t) = \overline{\underline{u}(\underline{x}, t)} + \tilde{\underline{u}}(\underline{x}, t) \quad (1)$$

waarin:

$$\begin{aligned} \underline{u}(\underline{x}, t) &= \text{snelheid in een punt op een bepaald tijdstip (ms}^{-1}\text{)} \\ \overline{\underline{u}(\underline{x}, t)} &= \text{gemiddelde snelheid in een punt (ms}^{-1}\text{)} \\ \tilde{\underline{u}}(\underline{x}, t) &= \text{turbulente fluctuaties op een bepaald tijdstip (ms}^{-1}\text{)}. \end{aligned}$$

De reden dat ook het gemiddelde afhankelijk van de tijd geschreven wordt is dat fluctuaties veroorzaakt door getijde en langzame debietvariaties zoals een hoogwatergolf niet beschouwd

worden als turbulentie. De turbulente fluctuaties kunnen dan benaderd worden ten opzichte van een fluctuerend gemiddelde (Booij 1992-II).

De reden dat de momentane snelheid verwerkt wordt tot een gemiddelde en een fluctatie is omdat de meeste modellen uitgaan van de gemiddelde snelheid. Uit de gemiddelde snelheid kan het netto transport van de gesuspendeerde stoffen en het water zelf worden geschat. De fluctuaties veroorzaken een verhoging van de opname capaciteit van gesuspendeerde stoffen. Ook de krachten kunnen vaak in termen van gemiddelde snelheden worden uitgedrukt. De fluctuaties veroorzaken buiten een verhoging van de visceuse term ook krachten die daar bovenop komen. Om deze krachten te modelleren als onafhankelijke krachten is het logisch om deze ook ten opzichte van de gemiddelde snelheid te meten. Hopelijk kunnen deze krachten dan gesuperponeerd worden op de gemiddelde krachten.

In geval van een constant debiet is te bewijzen dat ook de gemiddelde snelheid constant is. Dit is in een stroomgoot een zeer gebruikelijke instelling zo ook hier. Nu kan (1) worden herschreven als:

$$u(\underline{x}, t) = \overline{u(\underline{x})} + \tilde{u}(\underline{x}, t) \quad (2)$$

waarin,

$\overline{u(\underline{x})}$ = de gemiddelde snelheid in een punt (ms^{-1}).

Nu is de vraag wanneer de stroming als stationair beschouwd mag worden. Hierover heeft Booy in het collegedictaat “Turbulentie in de waterloopkunde” (1992-III) geschreven dat dit mogelijk is in het inertiaalgebied. In het kort komt het er op neer, in het geval dat de inwendige fluctuaties veel kleiner zijn dan de uitwendige fluctuaties en de periode van meten ook veel langer is dan de kleine fluctuaties en veel korter dan de lange (Dit geldt voor elke fluctuerende beweging ten opzichte van elke andere fluctuerende beweging van dezelfde massa).

In zijn algemeenheid betekent stationair in een stroomgoot dat de resultante van de uitwendige krachten als verwaarloosbaar mogen worden verondersteld. In dit specifieke geval betekent het dat het debiet dat de goot instroomt constant is en dat de overige uitwendige krachten ook niet

variëren.

2.4.2 Benadering turbulente structuren

Door de stroomsnelheid te beschrijven als een gemiddelde en een fluctuatie kan een fluctuerend deel worden gedefinieerd. Omdat dit gemiddelde in geval van een constant debiet volledig beschreven kan worden met een beschouwing van uitwendige krachten moeten de fluctuaties een gevolg zijn van inwendig krachtenspel. Het fluctuerende deel is de tweede term in (1). Als nu in dit fluctuerende deel een duidelijke correlatie in de ruimte en tijd gemeten kan worden gesproken van structuur in de turbulentie. De fluctuatie kan berekend worden uit (2) door:

$$\tilde{u}(x,t) = u(x,t) - \overline{u(x)} \quad (3)$$

De doorwerking van de imprecisie van de fout in deze vergelijking is:

$$(\delta \tilde{u}(x,t))^2 = (\delta u(x,t))^2 + (\delta \overline{u(x)})^2 \quad (4)$$

waarin:

δ = imprecisie van de grootte.

De imprecisie van een grootte is dat deel van de meetfout die bij een oneindig aantal keer herhalen van de proef geen gemiddelde bijdrage heeft aan het resultaat. Dit heet ook wel de willekeurige fout. In de meetmethode worden vergelijkingen gegeven voor de imprecisie in het gemiddelde en de imprecisie in de momentane snelheid.

2.4.3 Benadering momentane snelheid

De gebruikte meetmethode schat watersnelheden uit de in het water meebewegende deeltjes. Dit levert beperkingen voor de maximale fluctuatie die gemeten kan worden. De lengteschaal van de meetbare fluctuaties wordt beperkt door de grootte van de deeltjes de tijdschaal wordt beperkt door de traagheid van het deeltje in verhouding tot zijn frontaal oppervlak (zijn dichtheid). Deze effecten zijn in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Nu blijft het probleem over hoe de snelheid van de meegevoerde lichamen plaatsafhankelijk moet worden bepaald. Dit kan eenvoudigweg door de gemiddelde snelheid te nemen van de dichtstbijzijnde deeltjes rond dat punt. De schatters die hiervoor gebruikt zijn staan beschreven in het volgende hoofdstuk.

3 Meetmethode en meetopstelling

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de metingen zijn uitgevoerd. Om in zijn algemeenheid een meting uit te voeren is het noodzakelijk om een benadering te geven voor de stochast waarmee de gemeten grootheid (in dit geval de momentane snelheid en de gemiddelde snelheid) kan worden beschreven. Hiervoor moet ten minste een schatting van de gemiddelde van de grootheid en een schatting van de spreiding worden gegeven. Dit gebeurt met behulp van doorwerking van gemeten grootheden en benaderingen in berekende grootheden. De meetfout en de fout in de benaderingsmethode moeten eveneens worden geschat. Eveneens ontstaat er een fout door de aannames aangaande de meetopstelling. Hiertoe wordt er uitgelegd hoe de meting feitelijk is uitgevoerd.

3.2 Meetmethode snelheden

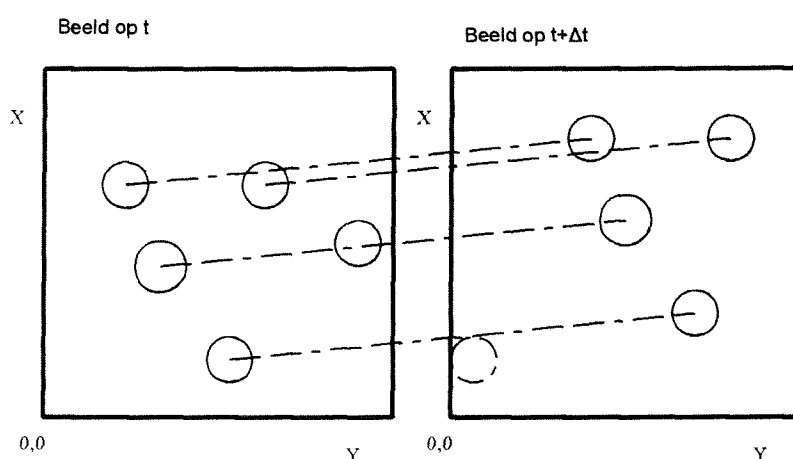
3.2.1 Particle Tracking Velocimetry (momentane snelheden)

De metingen zijn uitgevoerd als oppervlakte metingen. Dit betekent dat alle snelheden in hoogte niet gemeten worden. In principe is het met een opstelling met meerdere camera's mogelijk om posities en daarmee snelheden drie dimensionaal te bepalen. De metingen zijn uitgevoerd met een camera. Dit betekent dat de snelheden in slechts twee dimensies bekend zijn. De deeltjes volgen echter redelijk het water oppervlak. De snelheden loodrecht op dit vlak kunnen als nul beschouwd worden. Ook is in dit onderzoek het wateroppervlak als een plat vlak beschouwd.

Voor de meting van tijd en plaatsafhankelijke snelheden is gekozen voor Particle Tracking Velocimetry. De methode is gebaseerd op bepaling van posities van bepaalde deeltjes in een bepaalde stroming bepaald aan de hand van fotografisch materiaal.

De PTV methode begint met de meting van posities en vervolgens linkt een tracking algoritme de deeltjes tussen twee tijdstippen (zie figuur 5).

Omdat de individuele deeltjes nu verbonden zijn in de tijd kunnen deeltjes paden worden geconstrueerd. Door numerieke differentiatie kan de snelheid afhankelijk van de tijd van het deeltje worden geschat uit die deeltjespaden.



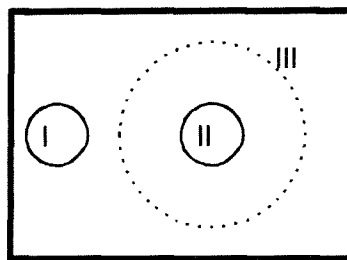
figuur 5. In deze figuur stellen de bollen de deeltjes voor. De lijnen geven aan welke deeltjes door het algoritme geïdentificeerd zijn als dezelfde deeltjes in opeenvolgende beelden.

3.2.1.1 Tracking algoritme

Het tracking-algoritme is gebaseerd op het transport algoritme. Dit betekent in het kort dat de positie van het deeltje in het eerstvolgende frame wordt gezocht binnen een zoekgebied. De positie van dit zoekgebied is gebaseerd op een schatting van de positie van het deeltje (zie figuur 6). Deze schatting kan gebeuren op grond van de snelheid die het deeltje bezat in het voorgaande beeld. Ook kan de positie worden geschat uit deeltjes in zijn omgeving. Als ook die niet bekend zijn is het mogelijk om de positie te schatten uit de correlatie van de deeltjes in de omgeving. Dit houdt in dat alle mogelijke combinaties worden onderzocht en de gemiddelde snelheid waarbij de grootste correlatie is wordt dan gebruikt om de deeltjes te

matchen.

De grootte van het zoekgebied is sterk bepalend voor het succes van de methode. Dracos (1996) heeft onderzoek gedaan naar het succes van de matching van deeltjes als functie van de verhouding tussen de afstand tussen de deeltjes en de grootte van het zoekvolume. Hierbij werd duidelijk dat voor voldoende kwaliteit beelden het noodzakelijk is dat de verhouding



figuur 6. I positie van deeltje op t , II geschatte positie van deeltje op $t + \Delta t$, III zoekvolume gebaseerd op geschatte positie.

deeltjes afstand grootte zoekvolume groter moet zijn dan 5 staat tot 1.

Ten gevolge van het matchingsalgoritme worden ook foute snelheden gevonden. Om deze fout te kunnen kwantificeren kan de kwaliteit worden gedefinieerd. De kwaliteit van de beelden wordt gedefinieerd als het percentage juist gematchte gedeeld het totaal aantal gematchte deeltjes.

3.2.1.2 Bepaling momentane snelheden uit deeltjespaden

Om de stromingssnelheid te bepalen op basis van posities van willekeurige deeltjes toegevoegd aan een willekeurige stroming is er een benaderingsmethode noodzakelijk. Vervolgens moet er een numerieke differentiatie methode worden gekozen. Na onderzoek is gebleken dat van drie onderzochte schema's (van der Plas & Janssen 1996) het tweede orde schema het beste voldoet:

$$\underline{u}(\underline{x}, t) = \frac{\underline{x}(t + \Delta t) - \underline{x}(t - \Delta t)}{2\Delta t} \wedge \underline{x} = \underline{x}(t) \quad (5)$$

- $\underline{u}(\underline{x}, t)$ = schatting voor momentane snelheid op plaats $\underline{x}$ (ms^{-1})
 $\underline{x}(t)$ = meting van positie van deeltje op tijdstip t (m)
 Δt = tijdsinterval tussen twee opeenvolgende metingen van de positie van een deeltje, ook wel de bemonsteringstijd genoemd (s).

De keuze voor een tweede orde schema is logisch gezien het doel van het onderzoek. Het tweede orde schema geeft een correcte benadering voor de richting van de snelheid. Zoals bekend is de benadering van een momentane snelheid met een gemiddelde gemiddeld een onderschatting en veroorzaakt daarmee een systematische fout voor de momentane snelheid. Voor de bepaling van de gemiddelde snelheid geeft deze methode een systematische fout als de stroming afhankelijk van de plaats verandert.

De discretisatiefout in de tijd van de momentane snelheid is van orde Δt^2 (Van der Plas & Jansen 1996). Dit is een fout in de benaderingsmethode. De tweede fout in de meting komt door de fout in de schatting van $\underline{x}(t)$. Deze is onder te verdelen in een meetfout van posities en een meetfout in verbinden van posities. De imprecisie doorwerking van (5) kan worden beschreven met:

$$\left(\frac{\delta \underline{u}}{\underline{u}} \right)^2 = \left(\frac{\delta \Delta \underline{x}}{\Delta \underline{x}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta t}{\Delta t} \right)^2 + (\alpha \cdot Q)^2 \quad (6)$$

en

$$(\delta \Delta \underline{x})^2 = (\delta \underline{x}_t)^2 + (\delta \underline{x}_{t+\Delta t})^2 \quad (7)$$

waarin:

- $\delta \underline{x}$ = imprecisie van $\underline{x}$ (m)
 Q = kwaliteit van de meting deze is gedefinieerd als het aantal fout gematchte deeltjes gedeeld door het totaal aantal gematchte deeltjes (-)
 α = factor afhankelijk van het filter dat is gebruikt om foute matches te filteren op fysische gronden (-).

3.2.1.3 Bepaling pixelcoördinaten

De bepaling van de posities in pixelcoördinaten gebeurt met behulp van het gewichten algoritme. Dit algoritme bepaalt de positie van het deeltje door het zwaartepunt te berekenen van alle pixels die als deel van het deeltje zijn geïdentificeerd. Het gewicht bij de berekening van het zwaartepunt van een deeltje is bepaald door de grijswaarde van de pixel. Deze methode geeft op zijn best een schatting van een positie van een deeltje tot op ongeveer 0.1 pixel nauwkeurig indien de pixelgrootte van het deeltje meer dan twee pixels in diameter bedraagt (zie Dracos, 1996).

3.2.1.4 Omrekening naar wereldcoördinaten

De omrekening van pixelcoördinaten naar wereld coördinaten gebeurt met behulp van een lineaire transformatiefunctie. Deze functie wordt met de kleinste kwadraten methode geschat uit een set calibratiepunten. In deze punten zijn zowel de pixelcoördinaten als de wereldcoördinaten bekend. Een lineaire transformatiefunctie heeft de volgende vorm:

$$\begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} = F \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ax_p + by_p + c \\ dx_p + ey_p + f \end{pmatrix} \quad (8)$$

waarin:

x_g, y_g = wereldcoördinaten van meetpunt $\underline{x}$

x_p, y_p = pixelcoördinaten van meetpunt $\underline{x}$

a..f = de zes constanten die geschat moeten worden uit de calibratiepunten.

De kleinste kwadraten methode betekent dat de constanten zodanig bepaald worden dat de kwadratische afwijking van de gemeten punten minimaal is ten opzichte van de geschatte functie.

3.2.2 Gemiddelde snelheden

Ook de gemiddelde stroming kan worden geschat uit de metingen van PTV, de metingen geven schattingen voor de snelheid en voor de plaats waar deze gemeten wordt. Om hieruit

een gemiddelde snelheid op een van tevoren bepaalde plaats te schatten kan dezelfde benadering gebruikt worden om snelheid te schatten als die voor turbulente beweging is gebruikt, namelijk door de snelheid te schatten uit gemeten snelheden uit zijn omgeving. Dit is in dit onderzoek gedaan met behulp van de volgende schatter:

$$\overline{u(\underline{x}_g)} = \frac{\sum_{i=1}^n w(\underline{x}_g, \underline{x}_i) \cdot u(\underline{x}_i)}{\sum_{i=1}^n w(\underline{x}_g, \underline{x}_i)} \quad (9)$$

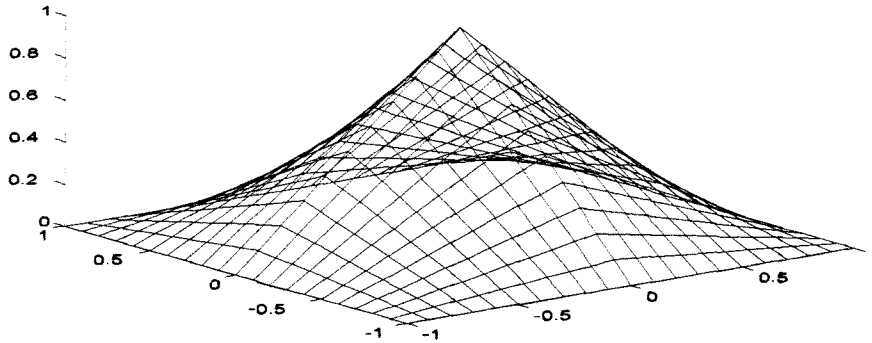
waarin:

$$w(\underline{x}_g, \underline{x}_i) = \left(1 - \frac{|\underline{x}_i - \underline{x}_g|}{\Delta x_{grid}}\right) \cdot \left(1 - \frac{|y_i - y_g|}{\Delta y_{grid}}\right) \forall \{ \underline{x}_i \wedge \underline{x}_g \mid |\underline{x}_i - \underline{x}_g| < \Delta x_{grid} \wedge |y_i - y_g| < \Delta y_{grid} \} \quad (10)$$

en:

- $\underline{x}_g$ = coördinaat van het roosterpunt (m)
- $\overline{u(\underline{x})}$ = de gemiddelde snelheid op plaats $\underline{x}_g$ (ms⁻¹)
- $w(\underline{x}_g, \underline{x}_i)$ = gewicht van datapunt op plaats $\underline{x}_i$ voor de gemiddelde snelheid op plaats $\underline{x}_g$
(-)
- n = aantal gemeten datapunten $\underline{x}$ (-)
- Δx_{grid} = roosterafstand in x richting (m)
- Δy_{grid} = roosterafstand in y richting (m).

Hier staat in wiskundige termen dat het gemiddelde in punt $\underline{x}_g$ wordt geschat uit alle metingen die vallen binnen de acht omliggende roosterpunten met een gewichtsfunctie die lineair afhangt van zijn x-coördinaat en lineair afhangt van zijn y-coördinaat. Ter verduidelijking van de gewichtsfunctie is er een driedimensionaal plaatje van deze functie in figuur 7 gegeven. De piek ligt op de plek van het punt van middeling.



figuur 7. Een drie-dimensionaal plaatje van de gewichtsfunctie zoals gebruikt bij de schatting van het gemiddelde. De x en y as zijn in roosterafstanden uitgedrukt ten opzichte van het punt van middeling.

De gewichtsfunctie is gekozen wegens het feit dat een meting verdeeld wordt over vier hoekpunten en een gemiddelde toename per hoekpunt 0.25 is waarmee alle gewichten toegekend aan een meting ook precies een toename van het totale gewicht van 1 heeft.

Deze wijze van middelen is feitelijk een tijd en ruimte middeling. Omdat de PTV ook gebaseerd is op een tijdmiddeling kan deze vergelijking ook worden gebruikt voor de ruimte middeling van de momentane beelden.

De doorwerking van het willekeurige deel van de fout (de imprecisie) in het gemiddelde wordt (afleiding zie APPENDIX afleidingen - foutformule gemiddelde):

$$(\delta \overline{u(x_g)})^2 = \frac{16}{9n'} \cdot (\delta \underline{u})^2 + \frac{\sum (\underline{u}_i - \overline{u(x_g)})^2}{n' \cdot \sum w(x_g, x_i)} \cdot (\delta w_i)^2 \quad (11)$$

waarin:

$$n' = \left\{ \frac{\sum w_i(x_g, x_i)}{\overline{w(x_g)}} \mid w(x_g) > 0 \right\} \quad (12)$$

n' = Schatting voor het aantal metingen waaruit het gemiddelde in punt $\underline{x}$ is berekend (-).

Hieruit is te zien dat de imprecisie net als bij de middeling op een plaats omgekeerd evenredig is met de wortel uit het gemiddeld aantal metingen waaruit het gemiddelde is berekend.

Bij gebruik van de vergelijking voor de momentane beelden is de benadering dat de deeltjes continu verdeeld zijn over de ruimte zeker niet geldig (benadering gebruikt om de factor 16/9 te berekenen). Voor gebruik van de schatting van de imprecisie in de momentane snelheden moet de volgende vergelijking gebruikt worden (zie ook APPENDIX afleidingen -foutformule gemiddelde):

$$\frac{\sum_{i=1}^n w(\underline{x}_g, \underline{x}_i)^2}{\left(\sum_{i=1}^n w(\underline{x}_g, \underline{x}_i) \right)^2} (\delta u(\underline{x}_i))^2 \quad (13)$$

Het gevolg van deze methode van middeling is dat het niet mogelijk is om de gemeten snelheid voor de turbulente structuren als continu te beschouwen, tenzij de structuren (veel) groter zijn dan de rooster afstand en de afstand tussen de deeltjes moet dan kleiner zijn dan de roosterafstand. Er was al geconstateerd dat de kleine turbulente fluctuaties niet te meten zijn dus dit is in principe geen bezwaar.

3.2.3 Fluctuerende deel snelheden

Voor de berekening van het fluctuerende deel van de momentane snelheid is het enkel nog nodig om de momentane snelheden in de roosterpunten te benaderen. Deze berekening naar de roosterpunten is met dezelfde vergelijking (zie vergelijking (9)) als de berekening van de gemiddelden. Nu kan de turbulente fluctuatie worden benaderd door het invullen van vergelijking (5) in vergelijking (9) en deze samen met vergelijking (9) in te vullen in vergelijking (3).

3.2.4 Programma voor dataverwerking

De verwerking tot gemiddelden en fluctuaties is uitgevoerd met behulp van met behulp van een computer programma. De hoeveelheid data is van dien aard dat dit onvermijdelijk is. De data worden aangeleverd in de vorm van meerdere bestanden per meetserie. In een individueel bestand zijn alle data gegeven van één beeld (tijdstip). In dit bestand staan zowel posities van ongematchte deeltjes als ook de gemeten snelheden. Hierna volgt de uitleg van de algoritmes die zijn gebruikt voor het berekenen van de fluctuaties. De listing van het programma is te vinden op de CD-ROM onder de naam kwfout5.pas.

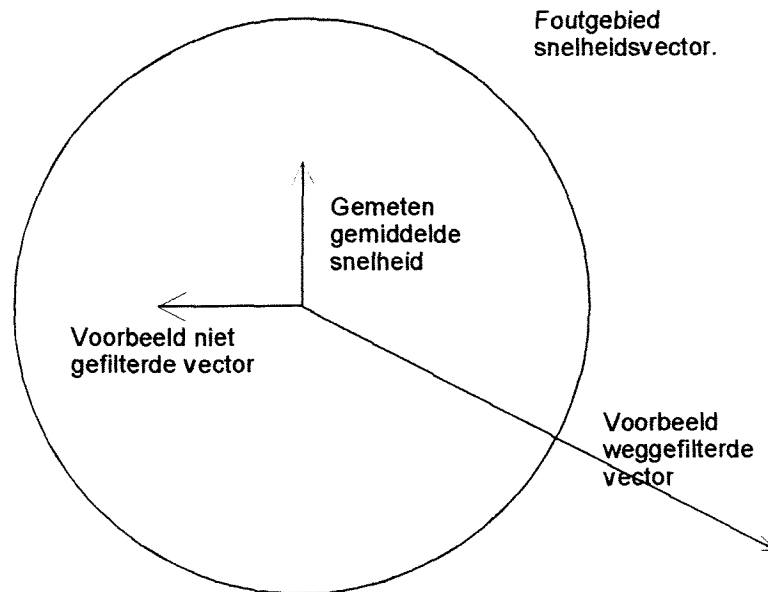
3.2.4.1 Algoritme berekening gemiddelden

Om te beginnen worden alle roosterpunten gedefinieerd waar een middeling wordt uitgevoerd. Dit gebeurt door een array te definiëren en alle punten in de array aan wereldcoördinaten te verbinden. Vervolgens kunnen de data worden ingelezen. Voor elk gemeten datapunt worden de gewichtsfuncties uitgerekend. Dit gebeurt aan de hand van de positie van het deeltje. De positie van het datapunt ten opzichte van het te berekenen roosterpunt bepaalt de waarde van het gewicht voor dat datapunt in dat roosterpunt (zie vergelijking (10)). De gewichtsfunctie is zo gekozen dat het totale gewicht in principe altijd één is. Nu wordt de waarde van de snelheid gewogen opgeteld bij de totale contributie van het roosterpunt. Uiteindelijk wordt het gewogen gemiddelde van elke arraypunt uitgerekend met behulp van vergelijking (9). De waarden worden weggeschreven naar een bestand.

3.2.4.2 Algoritme berekening fluctuaties

De berekening van het fluctuerende deel van de snelheid kan zodra de gemiddelde waarden bekend zijn. De berekening van het fluctuerende deel gebeurt door alle data van een bestand naar het rooster te middelen. Dit betekent dat alle metingen gedaan op één tijdstip worden gemiddeld naar een rooster en deze gemiddelde waarde afgetrokken wordt van het tijdsgemiddelde zoals hiervoor beschreven.

3.2.4.3 Algoritme filter spurious vectors



figuur 8. De grafische betekenis van de gebruikte filter voor foute matches.

Helaas is kwaliteit van het matchingsalgoritme niet 100%. Dit komt deels door de kwaliteit van de beelden (spurious particles) en deels door de dichtheid van de deeltjes. De afstand tussen de deeltjes moet immers ten minste groter zijn dan het matching gebied. Bij een willekeurige verdeling kan nooit volledig worden voldaan aan deze eis. Er is echter wel ontdekt dat bij een gemiddelde deeltjesafstand van groter dan vijf keer het matchingsgebied de kwaliteit al hoog is en bij zeven en een half de fout ten gevolge van de kwaliteit van de snelheden te verwaarlozen is (Dracos 1996). Verder is er het probleem van het ontstaan van de zogenaamde “spurious vectors”, doordat er in het matchingsalgoritme een correlatieterm zit en er een relatief hoog aantal “spurious particles” aanwezig zijn. Een aantal van deze foute vectoren kunnen op grond van positie en grootte worden uitgefilterd.

De spurious vectors hebben een min of meer willekeurige waarde en is in zijn algemeenheid veel groter dan de gemiddelde waarde van de snelheid. Deze spurious vectors kunnen worden gefilterd op de maximale grootte van de snelheid. Hierbij moet een schatting worden gegeven van de maximale waarde die de snelheid kan krijgen. Dit filter is grafisch gevisualiseerd in

figuur 8. In wiskundige termen is deze filtering te schrijven als:

$$|\underline{u}(x,t)| < 1.5 |\overline{\underline{u}(x,t)}_{\max}| \quad (14)$$

waarin:

$\overline{\underline{u}(x,t)}_{\max}$ = schatting van het maximum van alle gemeten gemiddelde snelheden (ms^{-1}).
 Er zijn ongematchte deeltjes die wel met de positie tussen de data staan.
 Deze ongematchte deeltjes kunnen worden gefilterd op grond van het feit dat de snelheid van die deeltjes exact nul is (het nulwaarde filter).

3.2.4.4 Filtering ongematchte deeltjes

Er zijn ongematchte deeltjes die als deeltjes met snelheid 0,0 tussen de gemeten waarden staan. Deze deeltjes kunnen voor de berekening van de snelheden worden gefilterd op grond van hun grootte.

3.2.4.5 Algoritme geografisch filter

Bij gebruik van PTV is het mogelijk dat niet het gehele deel van het opgenomen beeld uit het te meten oppervlak bestaat. Om het deel van het beeld wat niet water niet meet te tellen is er een filter ontwikkeld. Dit filter verwerpt metingen die binnen een gegeven vierkant vallen. Door deze vierkanten goed te kiezen kunnen de gebieden zonder water worden weggehaald uit de meetdata.

Het filter werkt met foutfuncties. Het te filteren vierkant wordt gedefinieerd door zijn vier hoekpunten. Door twee van de hoekpunten worden lijnen getrokken met behulp van:

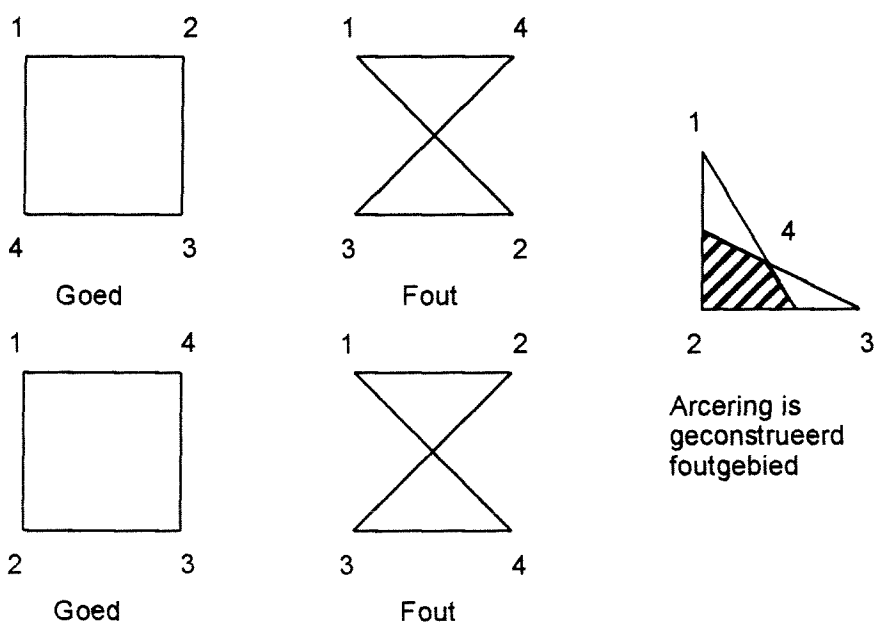
$$(\Delta x) \cdot y + (\Delta y) \cdot x + c = 0 \quad (15)$$

waarin

$\Delta x, \Delta y$ = de verschillen tussen de coördinaten van de hoekpunten is

c = constante bepaald door een van de twee hoekpunten in te vullen in x en y .

Vervolgens wordt er bepaald aan welke kant de meetpunten als fout worden aangemerkt met behulp van een derde hoekpunt. Door dit voor alle hoekpunten een keer te doen ontstaan er vier foutfuncties. Door te stellen dat alleen een meting fout is als alle foutfuncties inderdaad een meting als fout bestempelen wordt er een vierkant uitgesneden. Opgemerkt moet worden dat de foutfuncties worden gemaakt uit de opeenvolgende hoekpunten in te lezen. In figuur 9 is te zien wat daar mee mis kan gaan.



figuur 9. Invoeren hoekpunten foutgebied. Wat gaat goed wat gaat fout.

3.3 Meetopstellingen

3.3.1 Inleiding

Voor de meting van snelheden is de PTV methode gebruikt. Zoals al eerder gezegd gebruikt de methode fotografisch materiaal. In dit geval zijn dit digitale videobeelden van drijvende deeltjes om oppervlaktesnelheden te schatten van een stroming. Van belang voor de methode is de kwaliteit van de videobeelden. Deze kwaliteit bevat drie aspecten.

Ten eerste de grootte van de deeltjes ten opzichte van de pixel grootte. De diameter van de drijvende deeltjes moet ten minste twee bij twee pixels bedragen om bij de gebruikte schatting van de positie een voldoende kleine fout te krijgen. Bij een pixelgrootte van 1 pixel kan er geen interpolatie van de positie worden uitgevoerd en bedraagt de afbreekfout 0.5 pixel. Bij een pixel grootte van meer dan 1 pixel kan er wel worden geïnterpoleerd en daalt de fout naar 0.1 pixel.

Ten tweede de zichtbaarheid van de deeltjes ten opzichte van de achtergrond. Een pixel wordt herkend door verschil in lichtintensiteit ten opzichte van de achtergrond. Het intensiteitsverschil moet groter zijn dan de achtergrond ruis anders kan een deeltje niet worden geïdentificeerd.

Als laatste het tijdsinterval tussen de fotografische beelden. Dit moet voldoende kort zijn om de fluctuaties in de stroming te kunnen detecteren.

De opstelling van de meetapparatuur van de PTV methode is op te delen in de opstelling voor de data acquisitie en de opstelling voor de data verwerking. De data acquisitie is het fotografisch vastleggen van de te meten stroming met een bekend tijdsinterval. Voor het genereren van de stroming is er een meetopstelling nodig. Voor de data acquisitie is een digitale videocamera gebruikt. De specificaties van de camera staan beschreven in de appendix meetapparatuur.

Om goed te kunnen omschrijven welk deel van de opstelling is ontwikkeld voor de PTV en welk deel al aanwezig was is het nuttig om de proefopstelling te delen in de PTV opstelling en de opstellen van de stroming. Onder de PTV opstelling wordt verstaan de camera opstelling. Onder de stromingsopstelling wordt bedoeld de faciliteiten waarmee een stroming is opgewekt.

In de volgende paragraaf wordt eerst de PTV opstelling beschreven. Daarna wordt de opstelling van de twee stromingen beschreven. Ten eerste de stroming in de havenopstelling. Deze is gebruikt voor het integreren van de losse onderdelen zoals beschreven is in de PTV opstelling en de eerste optimalisatie van de beeldkwaliteit. Ten tweede de stroming in de ondiepwatergoot voor de metingen aan de ondiep- watermenglaag zelf. In deze opstellingen is ook beschreven hoe de calibratie voor de twee modellen is uitgevoerd.

3.3.2 Data acquisitie PTV

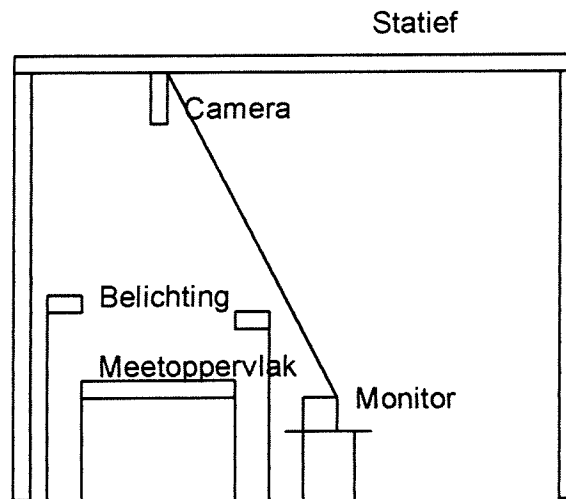
Voor de PTV data acquisitie zijn de volgende elementen gebruikt:

- een video camera;
- een monitor;
- beelddragers;
- deeltjes;
- belichting.

In figuur 10 is te zien hoe de onderdelen zijn opgesteld ten opzicht van het vlak van meting.

De video camera is met het oog recht boven het te meten oppervlak gehangen. Dit is gebeurd door optisch rechte hoeken ook recht te maken. Als de camera zo recht mogelijk is opgehangen is de fout ten gevolge van de scheefheid vrijwel lineair (de technische eigenschappen zijn opgenomen in APPENDIX Dataverwerking - Apparatuur).

Voor de ophanging is een statief gebruikt. Er zijn twee verschillende statieven gebruikt in de havenopstelling. Te weten een statief opgebouwd uit twee palen van instelbare lengte en een dwarsbalk. Plus een statief opgebouwd uit een fotostatief dat verbonden was aan een verrijdbare kraan. Het verschil tussen de beide statieven was dat het kraanstatief van grotere hoogte opnames maakt waardoor de vervorming van het beeldoppervlak minder is en het maximale beeldoppervlak groter kan zijn.



figuur 10. Een schematische weergave van de opstelling voor de PTV data acquisitie.

De belichting was verschillend voor beide stromingsopstellingen en wordt uitgelegd in de betreffende paragrafen.

3.3.3 Opstelling data verwerking

De dataverwerking geschiedt op een computer. Voor de dataverwerking zijn vier programma's vereist, een programma:

- voor het verplaatsen van de beelden van band naar de harddisk in een 24 bit kleuren bitmap formaat (BMP-formaat);
- voor het veranderen van BMP-formaat naar een grijswaarden bitmap (het PGM formaat 8 bit grijswaarden);
- voor het verwerken van PGM-formaat bitmaps naar plaatsbepaalde snelheden volgens het principe zoals beschreven in de voorgaande paragrafen;
- voor het verwerken van de plaatsbepaalde snelheden tot gemiddelde snelheden en fluctuerende delen, voor de foutenanalyse en de schatting van de standaard deviatie.

De opstelling van de dataverwerking bestaat uit:

- een computer voor het rekenwerk;
- een videorecorder voor het afspelen van de videobeelden;
- een videokaart in de computer voor de communicatie tussen computer en videorecorder;
- een monitor.

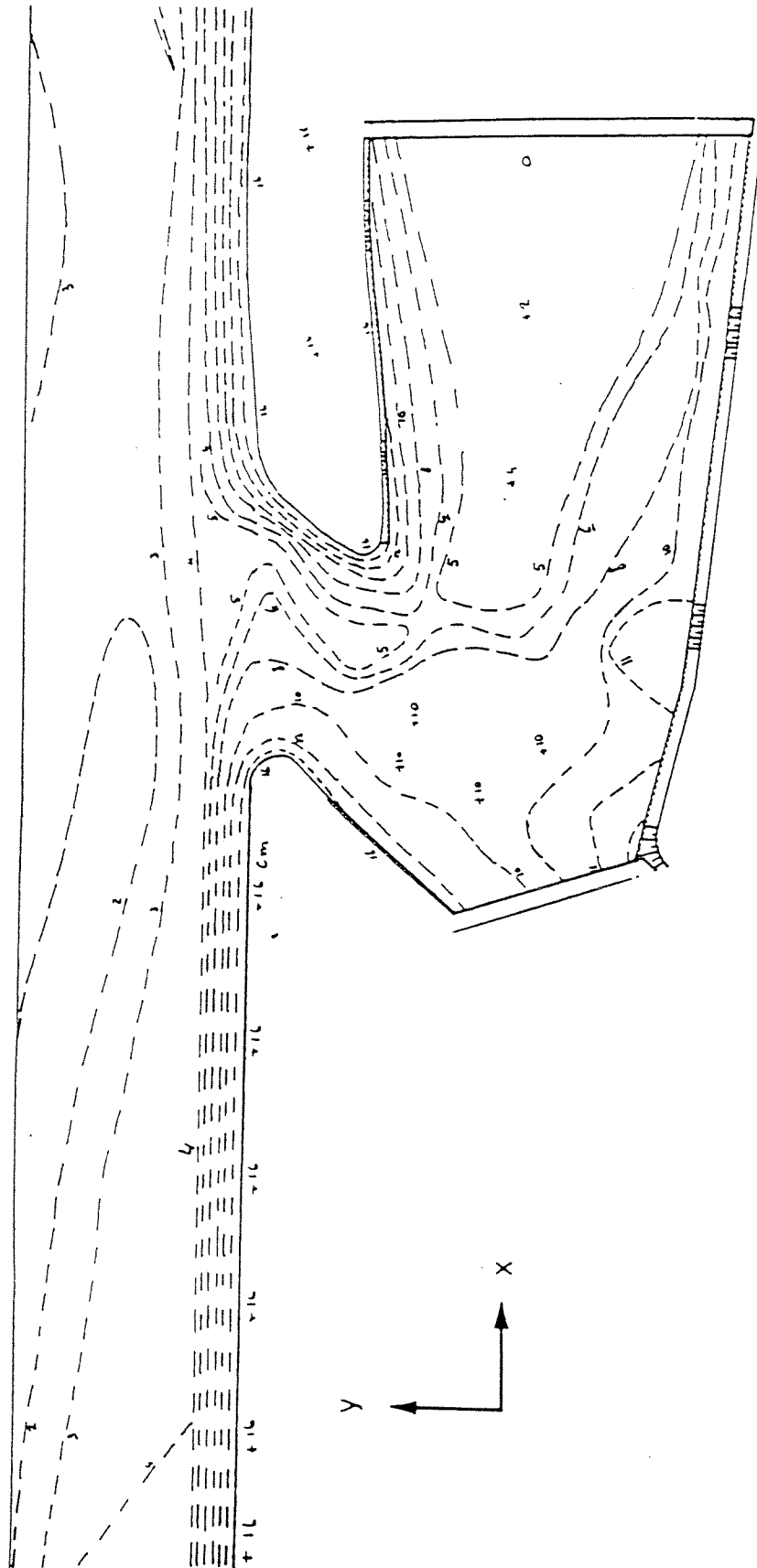
De videorecorder samen met de monitor wordt gebruikt voor het opzoeken van de gewenste beelden. Deze worden via de videokaart in de computer ingevoerd. De handleiding voor het gebruik van de programma's en de apparatuur die op de computer geïnstalleerd is te vinden in de appendix dataverwerking.

De belangrijkste instellingen voor de verwerking zijn:

- grootte van het zoekgebied (zie inleiding meetmethode);
- hoogte van de grenswaarde van de grijswaarde waarop een deeltje als deeltje herkend wordt (threshold);
- periode tussen twee opeenvolgende deeltjes (de bemonsteringstijd deze geeft een waarde voor de maximaal te meten fluctuaties in de tijd);
- duur van de meting (deze moet voldoende kort zijn om de aanname van stationaire stroming te rechtvaardigen);
- grootte van de roosterafstand (deze is een maat voor de maximaal te meten lengtemaat van de fluctuaties).

3.3.4 De havenopstelling

Het model gebruikt in de havenmetingen is een aanpassing van een model van de jachthavens 't Steel- Bon Aventura. Deze haven is gesitueerd aan de Maas bij Roermond. Een beschrijving van het haven model is te vinden in Van Schijndel (1997). De aanpassing van het model bestond uit het afsnijden van de haven 't Steel en het halveren van de haven Bon-Aventura. In figuur 11 is te zien hoe het model er uit ziet met de aanpassingen. De lijnen in de figuur zijn hoogtelijnen (Bijvelds, 1997).



figuur 11. Bijvelds (1997). Aangepast havenmodel van 't Steel- Bon Aventura

De instellingen van de stroming waren als volgt. De snelheid van de stroming in de hoofdstroom was ingesteld op ongeveer 0.3 ms^{-1} . De diepte was ingesteld op ongeveer 15 cm in de hoofdstroom. De belichting van het model bestond uit de bestaande tl verlichting van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica te Delft en zonlicht. De deeltjes gebruikt voor de metingen waren houten kraaltjes wit en rood geverfd met twee verschillende diameters, te weten 4 mm en 8 mm. Dit om een indicatie te krijgen van de invloed van kleur en grootte.

3.3.4.1 Meting calibratiepunten havenmodel

De calibratie van de positie van de deeltjes in de havenmetingen bestond uit het schatten van de pixel-meter verhouding uit een meetlat gefilmd in de haven en het aantal pixels dat de meetlat besloeg. Een tweede calibratiemethode is gebaseerd op de techniek zoals beschreven in transformatie van pixel- naar wereld-coördinaten. De wereld-coördinaten zijn geschat uit de figuur en de pixelcoördinaten zijn geschat door het opmeten van de markante punten (de hoeken in het model) en door interpolatie tussen de markante punten.

3.3.4.2 Meetplan havenmodel

Het meetplan van de haven heeft bestaan uit het uitproberen van diverse combinaties van achtergronden en kraaltjes om te onderzoeken of het mogelijk was om deze twee kleuren tegelijk te gebruiken. Namelijk de volgende combinaties:

- Rode kraaltjes op een witte achtergrond
- Witte kraaltjes op een zwarte achtergrond
- Rode kraaltjes op een zwarte achtergrond

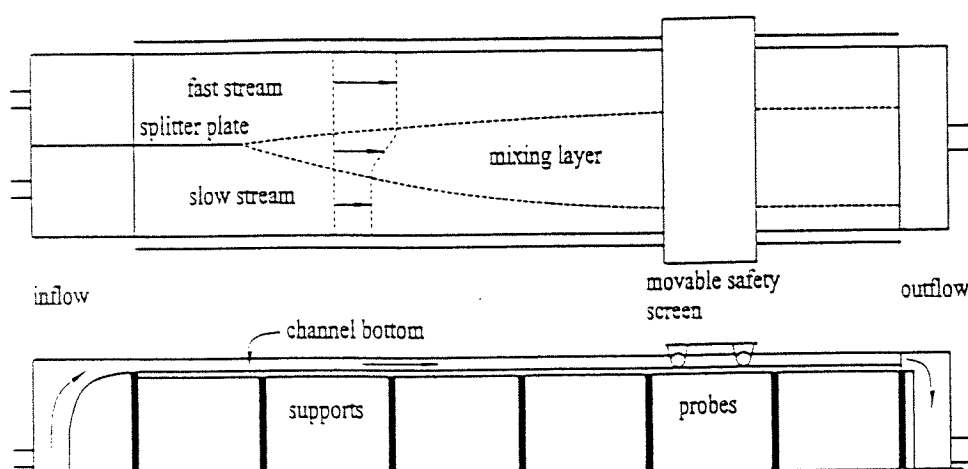
Vervolgens is er een meetsessie geweest om te analyseren wat de consequenties zijn van het inwerpen van de deeltjes op verschillende posities. Hierbij zijn eerst alleen deeltjes vanuit buiten beeld naar binnen beeld laten stromen. Vervolgens is ook het beeld zelf gevuld met deeltjes en het verlies van deeltjes bij de instromende kant is toegevoegd.

Ook zijn er verschillende hoogtes voor de positie van de camera uitgetest met twee verschillende opstellingen. De eerste opstelling was met twee uitschuifbare palen, hiermee is

geëxperimenteerd met verschillende hoogtes. Uiteindelijk bleek dat een zo groot mogelijke afstand het beste voldeed. In de tweede opstelling is de camera aan een kraan tegen het plafond gehangen.

3.3.5 Opstelling menglaag

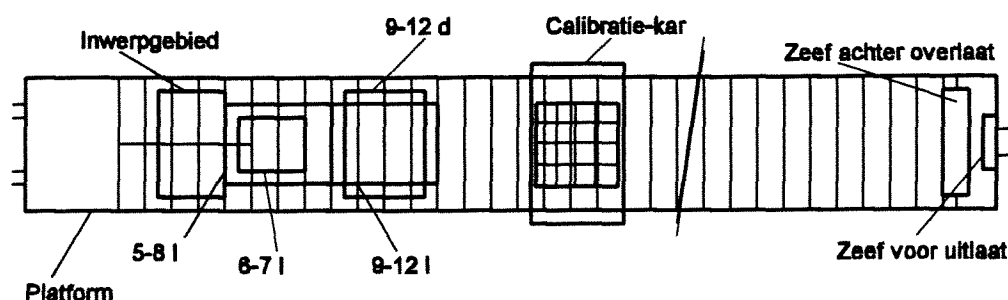
In figuur 12 is de opstelling schematisch weergegeven die is gebruikt om de stroming te genereren zoals beschreven in de theorie. In de opstelling wordt een menglaag gegenereerd die



figuur 12. Schematische weergave van de ondiepwatergoot (ontleend aan Tukker, 1997). De menglaag is hierin niet op schaal getekend. De menglaag is in werkelijkheid een stuk smaller.

ontstaat bij het samenkomen van twee waterstromen met verschillende snelheden. De verschillende snelheden zijn ingesteld met twee van elkaar gescheiden inlaten aan het begin van de glazen goot. De stroming in de goot is met een scheidingsplaat met een dikte van 6 mm en lengte tot drie meter benedenstrooms van het begin van het glazen gedeelte van de goot gescheiden. De lengte van de goot is 20 m. De breedte van de goot is 3 m. De glazen bodemplaten worden ondersteund door dwarsbalken met een hart op hart afstand van 60 cm.

Deze dwarsbalken verdelen de goot in segmenten van zestig centimeter.



figuur 13. Schets van bovenaanzicht goot met schematische weergave opname gebieden. Hierin staan ook de voorzieningen aangegeven voor het vangen van de deeltjes uit de stroming.

De gebruikte instellingen voor de PTV metingen waren voor de waterdiepte vier centimeter, voor de snelheid aan de hoge-snelheidskant bij benadering 0.25 ms^{-1} en voor de snelheid aan de lage-snelheidskant bij benadering 0.12 ms^{-1} .

Toevoegingen aan de opstelling ten behoeve van de PTV waren de calibratie-kar en de zeven om de ingeworpen deeltjes op te vangen (zie figuur 13).

De belichting van de opstelling bestond uit drie halogeenlampen (twee kleine en een grote) die zodanig waren opgesteld dat het wateroppervlak zo egaal mogelijk belicht werd, terwijl de reflecties op het water minimaal waren en de bodemplaat zo min mogelijk belicht werd.

De deeltjes gebruikt voor het volgen van de stroming waren wit geverfde houten kralen met een diameter van 4 mm. De deeltjes zijn met de hand toegevoegd aan de stroming. Dit is gebeurd door vanaf het platform bij de bovenstroomse zijde van de goot de deeltjes voor de menglaag in te werpen. Het inwerpgebied is aangegeven in figuur 13.

3.3.5.1 *Calibratie snelheden in de goot*

De calibratie van de goot is gebeurd met de methode zoals beschreven in transformatie van pixel- naar wereldcoördinaten. De pixelcoördinaten worden bepaald door deeltjes in beeld vast te leggen met behulp van een calibratie-kar die in en uit beeld geschoven kan worden (zie figuur 13). Door de pixel posities te schatten uit het zwaartepunt van de grijswaarden is de fout in schatting van de positie van de calibratiedeeltjes in pixelcoördinaten 0.1 pixel. De wereldcoördinaten worden gemeten ten opzichte van een punt van de kar. De positie van dat punt wordt bepaald door de positie van de kar ten opzichte van de oorsprong. Als oorsprong van de wereldcoördinaten is gekozen het middelpunt van de beginraai van de goot. De meting van de positie van de kar is gedaan met behulp van een meetlint bevestigd aan de rand van de goot en de rail waarop de kar was geplaatst.

3.3.5.2 *Meetplan menglaag*

Het meetplan had twee intenties. Ten eerste om een zo compleet mogelijk beeld te geven van de stroming in de goot. Hiervoor is er een aantal metingen uitgevoerd om een zo groot mogelijk deel van de goot te bestrijken. Ten tweede om te pogen turbulente structuren aan te tonen. De grootste kans hierop was het begin van de menglaag, zover mogelijk ingezoemd, omdat daar nog kleine structuren zichtbaar waren.

Videobeelden worden opgebouwd uit twee halve beelden, een met even lijnen en een met oneven lijnen. Dit wordt interlacing genoemd. Om een schatting te kunnen geven van de fout hierdoor is ook de oriëntatie van de camera 90 graden gedraaid. Ook is het begin van de menglaag gekozen om verschillende instellingen gebruikt bij het verwerken van de data, namelijk de lengte van de tijdsduur van de middeling en de grootte van de tijdstap tussen de opnamen.

De uitgevoerde series zijn als volgt gecodeerd. De segmenten van 60 cm waarin de goot verdeeld kan worden kunnen worden gebruikt om de plaats van de meting aan te duiden. Deze segmenten zijn genummerd vanaf het begin van de goot. De scheidingsplaat eindigt aan het begin van het zesde segment. De naam van de serie geeft ook aan welke oriëntatie van de

camera gebruikt is de indicatie d betekent dat de langste zijde van het camerabeeld in de breedte is gezet. L betekent dat de langste zijde in de lengte is gezet. De volgende PTV metingen zijn uitgewerkt in de menglaag in ondiep water:

- 5-8L van raai 5 tot 8 met de langste richting van het camerabeeld in de lengte van de goot;
- 6-7L van raai 6 tot 7 met de langste richting van het camerabeeld in de lengte van de goot;
- 9-12D van raai 9 tot 12 met de langste richting van het camerabeeld in de breedte van de goot;
- 9-12L van raai 9 tot 12 met de langste richting van het camerabeeld in de lengte van de goot.

In figuur 13 is een schets van de goot en met daarin ruwweg de gebieden aangegeven die werden beslagen door de camera bij de diverse metingen.

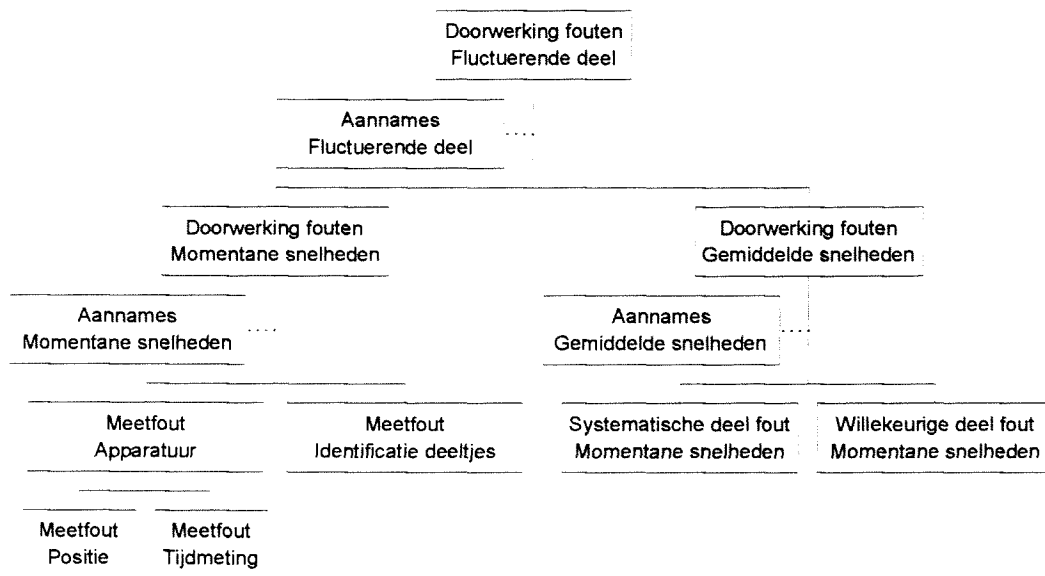
De serie 5-8L is uitgekozen om op verschillende manieren te verwerken. Deze verschillende manieren waren:

- verschillende tijdsintervallen tussen de beelden;
- verschillende tijdsintervallen waarover een tijdgemiddelde wordt bepaald;
- verschillende roosterafstanden waarover gemiddeld wordt.

Hieruit kan de invloed van die parameters worden geschat.

3.4 De foutenanalyse

Om een schatting te kunnen geven van de fout in de meting is het noodzakelijk om een foutenanalyse uit te voeren. De analyse resulteert in een foutenboom. Deze foutenboom is gegeven in figuur 14. Deze foutenboom is op te delen in de meetfouten. In fouten ten gevolge van aannames en doorwerking van deze fouten in het eindantwoord. De lijnen geven aan welke waarden er nodig zijn voor de berekening van de fout (een vak staat voor “de fout in”). De opzet van deze paragraaf bestaat uit de opsomming van de fouten en vervolgens een methode om de fouten in de opsomming te meten.



figuur 14. Foutenboom meetfouten een aannames

In de volgende paragrafen wordt uitgelegd wat in het kort de meetfouten en de fouten in de aannames zijn en hoe ze kunnen worden gekwantificeerd. Deze moeten dan worden ingevuld in de doorwerkingsvergelijkingen die bij de verschillende vergelijkingen horen om tot een kwantificering van de totale fout te komen.

De schatting van de imprecisie gebeurt algemeen met behulp van het 95% betrouwbaarheidsinterval. Normaal gesproken wordt deze geschat uit twee keer de

standaarddeviatie van de metingen. Dit is mogelijk voor de imprecisie van het gemiddelde. Voor de imprecisie van de momentane snelheden is dit niet mogelijk. Dit komt doordat de momentane snelheden uit zichzelf fluctueren ten opzichte van het gemiddelde en deze dus terugkomt in de standaarddeviatie. Om deze imprecisie in de meetfout te schatten is het noodzakelijk om de meetfout uit een onafhankelijke bron met een constante snelheid over de tijd te schatten (zie ook paragraaf meetfouten). De schatter voor de standaarddeviatie van heeft de volgende vorm:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \{w(\underline{x}_g, \underline{x}_i) \cdot (\underline{u}(\underline{x}_i) - \overline{\underline{u}(\underline{x}_i)})^2\}}{\sum_{i=1}^n \{w(\underline{x}_g, \underline{x}_i) - \overline{w(\underline{x}_g)}\}} \quad (16)$$

waarin:

$$\overline{\underline{u}(\underline{x}_i)} = w(\underline{x}_{g1}, \underline{x}_i) \cdot \overline{\underline{u}(\underline{x}_{g1})} + w(\underline{x}_{g2}, \underline{x}_i) \cdot \overline{\underline{u}(\underline{x}_{g2})} + w(\underline{x}_{g3}, \underline{x}_i) \cdot \overline{\underline{u}(\underline{x}_{g3})} + w(\underline{x}_{g4}, \underline{x}_i) \cdot \overline{\underline{u}(\underline{x}_{g4})} \quad (17)$$

$\overline{\underline{u}(\underline{x}_i)}$ = Schatting van de gemiddelde snelheid in het punt $\underline{x}_i$ uit de snelheden berekend in de gridpunten met de zelfde gewichtsfactor als waarmee is gemiddeld naar dat rooster.

$w(\underline{x}_{gn}, \underline{x}_i)$ = Gewicht van datapunt i voor roosterpunt n , waarbij n een van de vier omliggende roosterpunten is.

Deze schatter schat de standaarddeviatie uit de fluctuaties ten opzichte van een geschatte gemiddelde functie in de buurt van een gegeven roosterpunt. Vergelijking (17) is die geschatte gemiddelde functie. De schatting gebeurt uit de vier omliggende roosterpunten die met behulp van dezelfde gewichtsfunctie als gebruikt bij de schatting van de gemiddelde snelheid uit de willekeurige punten.

3.4.1 De meetfouten

3.4.1.1 Inleiding

De meetfouten zijn onder te verdelen in (zie figuur 14):

- meetfouten apparatuur;
- meetfouten deeltjesidentificatie.

de meetfout in de apparatuur is onder te verdelen in:

- meetfout posities;
- meetfout tijd;

de meetfout in de positie is onder te verdelen in:

- fout in calibratie
- afbreekfout van de meting

De meetfout in de deeltjesidentificatie staat voor de fout ten gevolge van de kwaliteit van de meting. De kwaliteit staat hier voor het aantal goed gematchte deeltjes ten opzichte van het totaal aantal metingen.

De fout in de calibratie staat voor de fout ten gevolge van de omzetting van lokale naar globale coördinaten.

De afbreekfout staat voor de fout ten gevolge van de discretisatie in pixels van het meetinstrument.

De meetfout in de tijd staat voor zowel de discretisatie in de meting van de periode als de fout ten gevolge van de sluitertijd.

3.4.1.2 Meetfout apparatuur

De gezamenlijke meetfout van de meetopstelling kan worden geschat door onder dezelfde

condities een constante snelheid te meten. Onder condities wordt verstaan: de camera afstand, de gemeten snelheid, het soort deeltjes wat is gebruikt en de achtergrond. De methode van meten is gebaseerd op de aanname dat de snelheden van de controle meting als constant beschouwd kunnen worden. Dit betekent dat de werkelijke fluctuaties als nul beschouwd mogen worden. De gemeten standaarddeviatie is dan een maat voor de meetfout ten gevolge van de apparatuur. Hiermee kan de meetfout ten gevolge van de apparatuur geschat worden. Dit zijn in dit geval de fout in de positie en de fout in de tijdschatting. Aangezien de fout in de calibratie onafhankelijk wordt gemeten kan de fout worden geschat in pixels per meter. De schatting van de fout in ms^{-1} kan dan worden geschat uit de pixel meter verhouding van het beeld en de bemonsteringstijd uit:

$$\delta u_m \approx \frac{\delta u_{p/f} \cdot C_{m/p}}{2\Delta t} \quad (18)$$

waarin:

δu_m = meetfout ten gevolge van de apparatuur (ms^{-1})

$\delta u_{p/f}$ = gemeten fout in pixels per frame

$C_{m/p}$ = de gemeten grootte van de pixels in meters (m)

Δt = de bemonsteringstijd (s)

2 = constante afhankelijk van de wijze van numerieke differentiatie (-).

Dit voorkomt ook dat er voor elke verandering in de zoom een nieuwe meting verricht moet worden voor een globale schatting van de meetfout. Voor een nauwkeurige schatting van de meetfout is dit wel noodzakelijk.

3.4.1.3 Kwantificering foute matches

De foute matches worden gekwantificeerd met de kwaliteit van de matches (100-Q), gedefinieerd als het percentage goede matches ten opzichte van het totaal aantal matches en een schatting van de fout die een gemiddelde foute match veroorzaakt. De kwaliteit is te schatten door op andere wijze de paden te bepalen, die bewezen beter is als het matchingsalgoritme en deze te vergelijken met de geschatte paden met behulp van het algoritme. De gemiddelde fout die een foute match veroorzaakt kan worden geschat uit de

filtering die is uitgevoerd.

Ook is onderzoek gedaan naar de kwaliteit van PTV algoritmen door Dracos et al. Hier kwam uit naar voren dat de kwaliteit van de matches een functie is die afhankelijk is van de gemiddelde afstand tussen de deeltjes en de grootte van het zoekgebied. Als de afstand tussen de deeltjes groter is dan zeven en een half keer de gemiddelde afstand tussen de deeltjes, kan worden gesteld dat de kwaliteit van de metingen als 100% beschouwd kan worden. De fout ten gevolge van de foute matches kan dan verwaarloosd worden.

3.4.1.4 Kwantificering calibratiefout

De fout ten gevolge van de calibratie is te schatten uit de standaarddeviatie van de meetpunten ten opzichte van de geschatte overdrachtsfunctie. Deze functie is te schatten met behulp van de uitkomst van de kleinste kwadraten methode. Deze methode schat de parameters van een overdrachtsfunctie door de kleinste kwadraten te minimaliseren ten opzichte van de parameters (zie bijvoorbeeld Natuurkundig practicum 1988-II).

De optelsom van de kleinste kwadraten is:

$$\sum (x_w - f(x_p, p))^2 \quad (19)$$

waarin

- x_w = de gemeten positie van het calibratiedeeltje in wereldcoördinaten
- x_p = de gemeten positie van het calibratiedeeltje in pixelcoördinaten
- p = de parameters van de overdrachtsfunctie.

Zoals te zien is kan hieruit eenvoudig de imprecisie ($=2 \cdot \sigma$) ten gevolge van de calibratie worden geschat:

$$\sigma^2 = \sum (x_w - f(x_p, p))^2 \quad (20)$$

Uit deze standaarddeviatie kan de imprecisie worden geschat veroorzaakt door de calibratie.

De systematische fout veroorzaakt door de calibratie is te schatten met behulp van de imprecisie. Deze is wortel $(1/n-v)$ keer de imprecisie van de meetfout in de punten waar de overdrachtsfunctie mee geschat is ($n-v$ is het aantal vrijheidsgraden van de meting). Deze systematische fout veroorzaakt een effect bij het opsplitsen in componenten. De verdeling van de systematische fout is als volgt afhankelijk van de hoek die de gemeten snelheid maakt ten opzichte van de as waarnaar wordt gesplitst:

$$\delta u_x = \sin(\alpha) \cdot \delta u_{\text{syst}} \quad (21)$$

waarin

α = de hoek die component x maakt met de gemeten snelheid

δu_x = de fout in de snelheid in de x component

δu_{syst} = de fout in de absolute waarde van de gemeten snelheid.

3.4.2 Aannames

3.4.2.1 Opsomming aannames

De aannames zijn onder te verdelen in:

- aannames momentane snelheden;
- aannames gemiddelde snelheden;
- aannames fluctuerende deel.

De aannames in de momentane snelheden zijn onder te verdelen in:

- discretisatie van de metingen in de ruimte en tijd (=de snelheid in de omgeving van een punt zijn representatief voor de snelheid in dat punt)
- de snelheid van de te volgen deeltjes is representatief voor de omliggende watersnelheden
- de snelheid heeft geen component loodrecht ten opzichte van het vlak van meting (het wateroppervlak)
- het vlak van meting is een plat vlak.

De aannames voor de gemiddelde snelheid zijn:

- discretisatie van de metingen in de ruimte en tijd(=de snelheden gemeten in de omgeving van een punt gedurende een bepaalde periode zijn representatief voor de gemiddelde snelheid in dat punt)
- De aanname dat de deeltjes uniform met oneindige dichtheid verdeeld zijn over de stroming.

De aanname voor het fluctuerende deel is:

- de gemiddelde snelheid is constant in de tijd.

3.4.2.2 Kwantificering aannames

De fout in de discretisatie in de ruimte kan worden geschat door de schatter als integraal uit te schrijven en deze af te trekken van de Taylor ontwikkeling in de ruimte. Vervolgens ontstaat er een vergelijking met daarin plaatsafgeleiden. Deze afgeleiden kunnen geschat worden uit de metingen. Hieruit volgt dat, in termen van gemeten grootheden, de fout geschat kan worden door (zie appendix afleidingen):

$$\epsilon_{discr}(x,y) \approx \frac{1}{3}(\overline{u(x+\Delta x_g, y)} + \overline{u(x, y+\Delta y_g)} + \overline{u(x-\Delta x_g, y)} + \overline{u(x, y-\Delta y_g)} - 4\overline{u(x,y)}) \quad (22)$$

De aannames die gebruikt zijn voor de afleiding van deze vergelijking zijn dat de tweede afgeleide ten opzichte van de discretisatie weinig varieert.

De fout dat de snelheid van de te volgen deeltjes gelijk is aan de snelheid van het wateroppervlak wordt gedomineerd door de gezonken deeltjes. Deze fout kan worden geschat door het visueel controleren van de hoeveelheid gezonken deeltjes in beeld. Deze grootte is meestal variabel in de tijd.

De fout ten gevolge van de aanname dat de deeltjes in het wateroppervlak zitten en geen beweging uitvoeren ten opzichte van het wateroppervlak is niet verder onderzocht.

De fout ten gevolge van de aanname dat het wateroppervlak als een plat vlak is op te vatten is eveneens niet verder onderzocht. Wel is geconstateerd dat dit rond de te meten structuren

duidelijk niet het geval is.

De fout in de aanname dat de gemiddelde waarde constant is kan worden geschat door herhaling van de proef op gelijke tijdsafstanden. Als er vanuit gegaan wordt dat de gemiddelde snelheid lineair fluctueert kan een schatting gemaakt worden van het verloop van de gemiddelde snelheid. De fluctuaties in het gemiddelde kunnen alleen komen door variatie in de stroming.

De fout in de aanname dat de momentane snelheid geschat kan worden met het tweede orde schema kan worden benaderd door aan te nemen dat fluctuaties in de momentane snelheid een optelsom van sinussen is. Deze benadering wordt de spectraal analyse genoemd. Om de transformatiefunctie van de het spectrum te bepalen kan de overdracht van een willekeurige sinus worden bepaald. Als er een schatting gegeven kan worden van de gemiddelde periode van de turbulente fluctuatie is het mogelijk om de maximale grootte van de bemonsteringstijd te bepalen.

De fout in de aanname dat de deeltjes uniform verdeeld zijn met een onderlinge afstand nul kan worden verwaarloosd als de gemiddelde dichtheid groter is als de discretisatie in de ruimte. Dit betekent dat er per roosterpunt meer dan één deeltje is. Afhankelijk van de variatie in de afstand tussen de deeltjes moeten er gemiddeld meer deeltjes per roosterpunt zijn. In dat geval kan worden gesteld dat de fout in de discretisatie groter is ten gevolge van het definiëren van het rooster als de grootte van de fout ten gevolge van de discretisatie in deeltjes.

3.4.3 Doorwerking van fouten en aannames

De doorwerking van de fouten is op te delen in de doorwerking van de afhankelijke systematische fout en de onafhankelijke willekeurige fout. De afhankelijke systematische fout werkt direct door op het eindantwoord en heeft geen vergroting door bewerkingen. De bewerkingen hebben wel effect op de willekeurige fout. In het geval van middeling wordt de standaarddeviatie in het gemiddelde evenredig kleiner met de wortel uit het aantal metingen (zie vergelijking (11)). In het geval van optellen en aftrekken van de willekeurige fout moeten de fouten kwadratisch worden opgeteld. Dit betekent voor de fout in het gemiddelde dat die

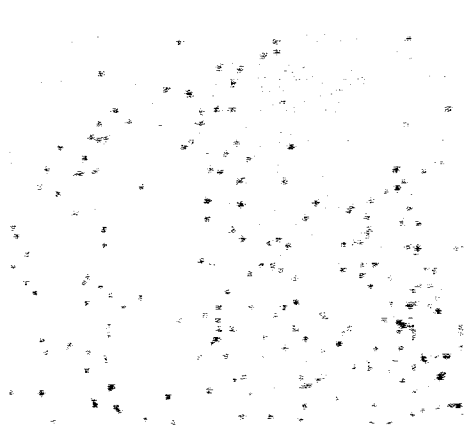
afhankelijk wordt van het aantal metingen en voor de fout in de momentane snelheid dat die moet worden geschat met behulp van de methode zoals beschreven in de alinea kwantificering meetfout.

De kwantificering van de fout kan snel worden uitgerekend doordat de grootte van de meetfout volkomen gedomineerd wordt door de grootte van de grootste fout. Zodra een van de fouten als de fout met de grootste orde is vastgesteld kan de fout met die waarde geschat worden. In het geval van twee fouten van dezelfde orde grootte moeten de fouten wortel kwadratisch worden opgeteld (dit houdt in dat twee fouten met dezelfde grootte een fout in het totaal leveren van wortel twee keer een van die fouten).

4 Resultaten

4.1 Inleiding

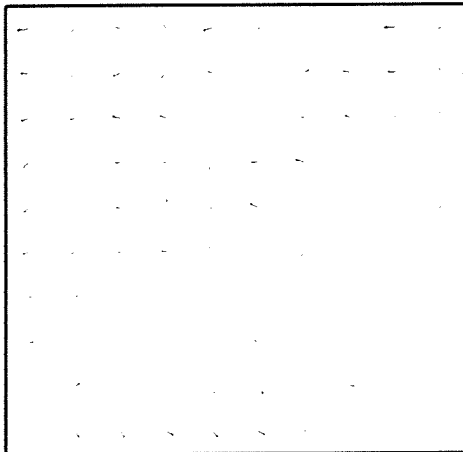
Ter verduidelijking van de meetmethode wordt er in stappen getoond hoe de beelden er uitzien



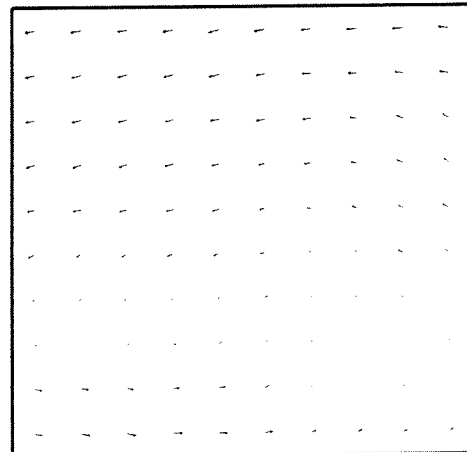
figuur 15. Video opname deeltjes



figuur 16. Momentane snelheden berekend uit videobeelden



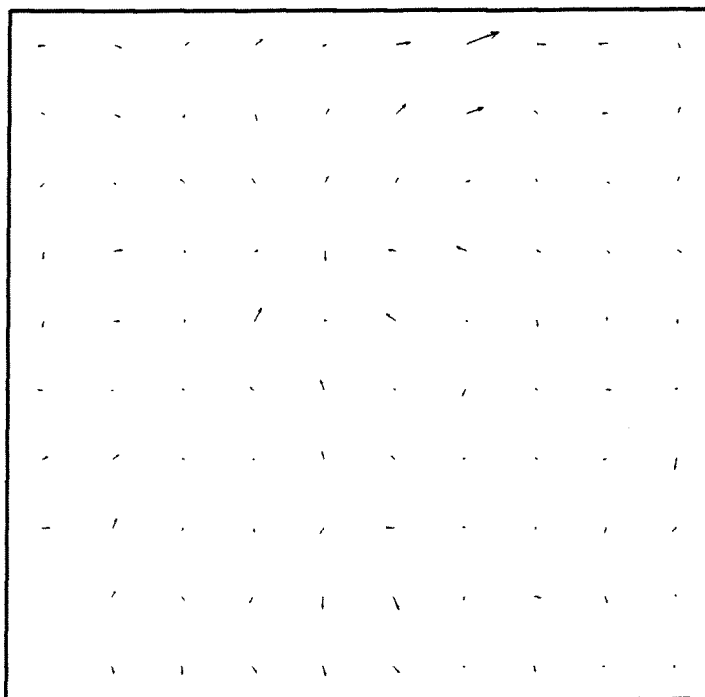
figuur 17. Momentane snelheden geïnterpoleerd naar een rooster.



figuur 18. Gemiddelde snelheid over meerdere beelden

en welke bewerkingen welke effecten hebben op de data. Deze plaatjes zijn naast elkaar opgenomen voor het overzicht van de bewerkingen die gedaan zijn. In figuur 15 is een video beeld te zien. Deze worden verwerkt tot snelheden met behulp van de PTV-code tot figuur 16. Vervolgens worden deze snelheden naar een rooster gemiddeld. In figuur 17 toont een

momentaan plaatje gemiddeld naar een rooster. Vervolgens worden een groot aantal plaatjes



figuur 19. Turbulente fluctuaties zoals berekend met (5).

gemiddeld om een tijdsgemiddelde te bepalen (figuur 18). Om de fluctuaties te bepalen ten opzichte van het tijdsgemiddelde wordt het gemiddelde afgetrokken van een momentaan beeld zoals in figuur 17. Het resultaat is figuur 19.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt. Eerst is er een tweedeling gemaakt in meetopstellingen. In het havenmodel zijn de metingen gericht geweest op beeldkwaliteit. De resultaten daarvan zijn eerst uitgewerkt. Vervolgens zijn er met de havendata later meerdere bewerkingen die bedoeld waren voor de gootmetingen. In de gootmetingen zijn deze beter uitgewerkt.

In de gootmetingen is het hoofddoel geweest het meten van turbulente structuren. Eerst wordt hiervoor de juistheid van de gemiddelde snelheid geverifieerd door vergelijking met onderlinge PTV data en door vergelijking met LDA metingen. Daarna worden de gemeten fluctuaties ten opzichte van dat gemiddelde besproken.

4.2 Meetresultaten havenmodel

4.2.1 Inleiding

De doelstelling voor de havenmetingen was ervaring opdoen met PTV in ondiep water. Hiertoe is dat probleem opgedeeld in het opzetten van het PTV systeem zodanig dat er beelden verkregen (data-acquisitie) worden en het verwerken van deze beelden tot snelheidsdata en deze snelheden verwerken tot interpreteerbare snelheden (data-verwerking).

4.2.2 Resultaten acquisitie

Bij de data-acquisitie was van belang de beeldkwaliteit en de verdeling van de deeltjes. Om hier inzicht in te verwerven zijn deze onderzocht. Met name de invloed van de grootte en kleur van de kraaltjes op de beeldkwaliteit is onderzocht (De meeste antwoorden op deze vragen zijn als aanwijzing opgenomen in het hoofdstuk meetopstelling). Het tweede deel bestond uit de invloed van de inworp van de deeltjes op de meetresultaten, de plaats en de wijze waarop.

4.2.2.1 Kleur

De resultaten van de metingen met de verschillende kleuren deeltjes kunnen worden samengevat in de volgende opsomming. Bruikbare combinaties van deeltjes en achtergronden waren:

- witte deeltjes op een zwarte achtergrond;
- rode deeltjes op een witte achtergrond.

Een onbruikbare combinatie was rode deeltjes op een zwarte achtergrond.

4.2.2.2 Grootte

Het effect van de grootte was zoals te verwachten afhankelijk van de pixelgrootte. Dit effect is niet verder cijfermatig uitgewerkt.

4.2.2.3 Inworp

Bij inworp in de havenneer werd geconstateerd dat er deeltjes vanuit de haven in de hoofdstroom terechtkwamen en omgekeerd. Vergelijking van de resultaten met metingen zonder beginconcentratie deeltjes met metingen met beginconcentratie gaf een indicatie dat een verschil in concentratie van de deeltjes van invloed is op de gemeten gemiddelde snelheid, met name indien er een snelheidsgradiënt is. Ook vergelijking met berekeningen (Bijvelds 1997-II) deed dit vermoeden. Om te kunnen toetsen of dit effect aanwezig is, zijn voor alle metingen de dichtheid in aantallen per roostervak bepaald. Als deze dichtheid sterk varieert kan dit effect niet meer worden verwaarloosd.

4.2.2.4 Conclusies deeltjes

Het grootste contrast was bij witte deeltjes een zwarte achtergrond. De geschatte grootte van de grootste fluctuaties in de goot was 20 cm. Om de kans op te meten fluctuaties zo groot mogelijk te maken is gekozen voor zo klein mogelijke deeltjes.

Voor de inworp is geconcludeerd dat voor de gootmetingen het maken van een doseerapparaat op dat moment te veel tijd in beslag zou nemen voor de te verwachten verbetering van de kwaliteit (met de hand inwerpen geeft al een redelijk goede spreiding van deeltjes).

4.2.3 Resultaten verwerking havenmetingen

Een tweede doelstelling bij de experimenten was het verwerken tot interpreteerbare waarden. Hiertoe is een computer programma gemaakt die PTV-data kon verwerken tot een tijdgemiddelde snelheid en een tijdsafhankelijke deel van de snelheid, de fluctuaties. Een voorbeeld daarvan is te zien in de inleiding. Om tot een kwantificering van de snelheden te komen was het schatten van een betrouwbaarheidsinterval noodzakelijk. Hoe deze schatting in zijn werk is gegaan is te lezen in de foutenanalyse.

4.2.3.1 De gemiddelden

In de haven zijn de data verwerkt met drie verschillende roosterafstanden, namelijk 0.1 m (zie figuur 20), 0.05 m (zie figuur 22) en 0.025 m (zie figuur 24). Hier is bij het inzoomen op de haveningang duidelijk meer detail te zien als op de overzichtsplot met de roosterafstand 0.1 m. Ook is duidelijk te zien dat de gemiddelde waarde steeds sterker gaat fluctueren. Dit kan meerdere oorzaken hebben. Duidelijk is dat alleen met de grootste roosterafstand er een goede kans is op het vaststellen van fluctuaties. Bij de kleinere roosterafstanden fluctueert het gemiddelde waarschijnlijk te veel. In alle gevallen van de haven metingen geldt dat door de gebrekkige kennis van de fout er geen eenduidige uitspraken gedaan kunnen worden over het vaststellen van fluctuaties.

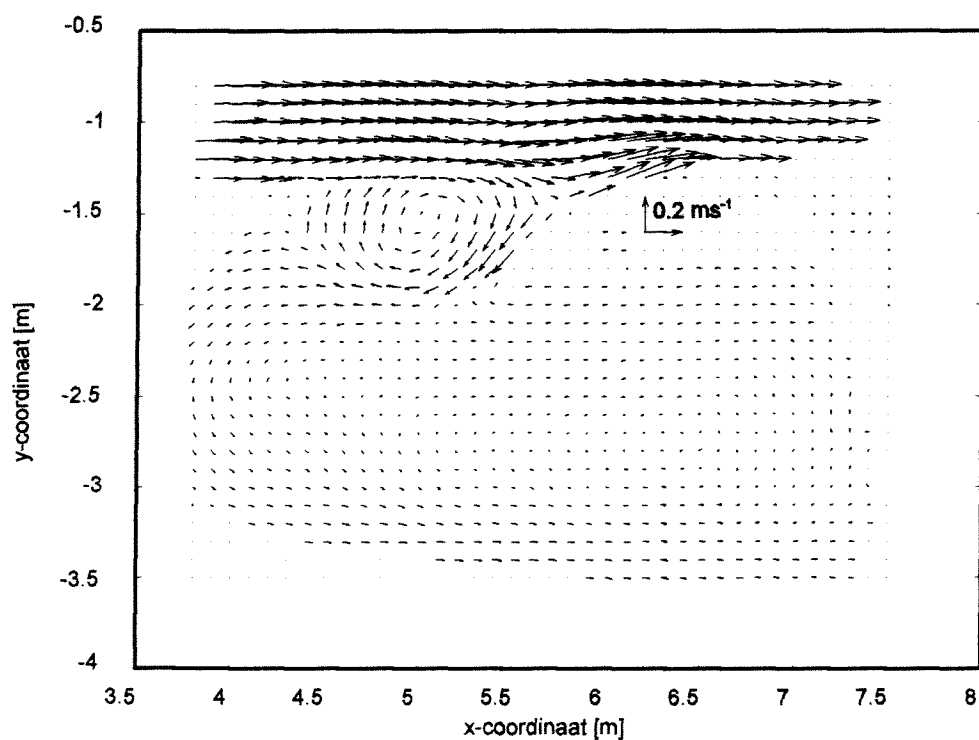
4.2.3.2 Meetfout gemiddelde

Om aan te geven of de biaseffecten ten gevolge van de inhomogene deeltjes te verwaarlozen is zijn de dichtheden in aantallen per roostervak geschat uit de som van de gewichten per roosterpunt. Hierin is te zien dat de aantallen deeltjes in de menglaag veel groter zijn als in de haven zelf. Dit heeft tot gevolg dat de gemeten snelheden een grotere binnenwaartse dan de werkelijke gemiddelde watersnelheid.

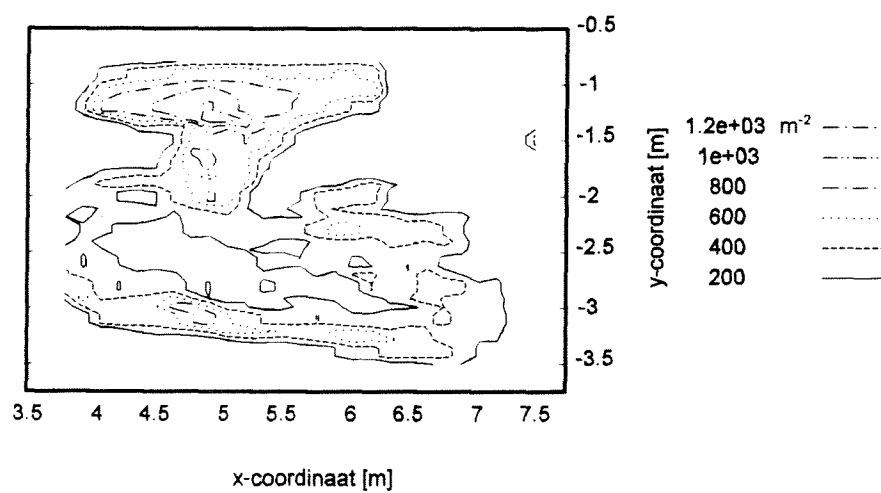
De imprecisie van de gemiddelde snelheid, te berekenen met vergelijking (11), is verwaarloosbaar voor de grootste roosterafstand (orde 0.05 keer de gemeten standaarddeviatie). Voor de kleinste roosterafstand is die van orde 0.4 keer de standaarddeviatie.

De calibratiefout (belangrijk voor vergelijking met ander metingen of theoretische schattingen) is ten minste van orde grootte van 10%. Deze schatting is gebaseerd op de meting van de vervorming van het beeld.

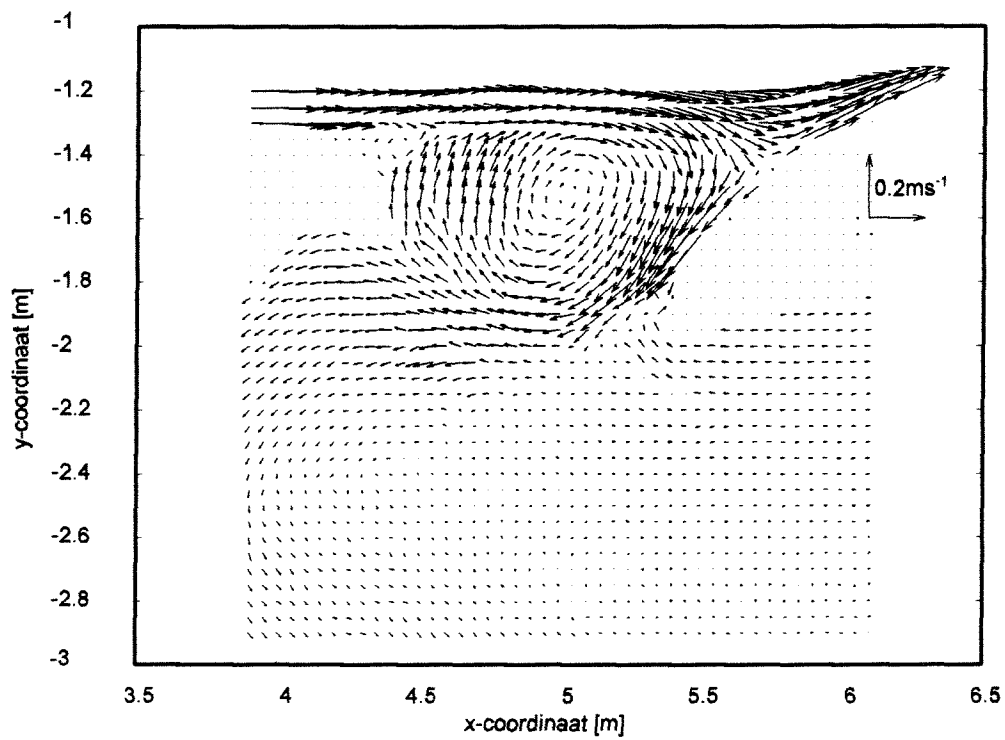
De discretisatiefout is ook verwaarloosbaar ten opzichte van de calibratiefout. Deze zou wel van belang kunnen worden voor de fout in de fluctuaties en is daar wel behandeld.



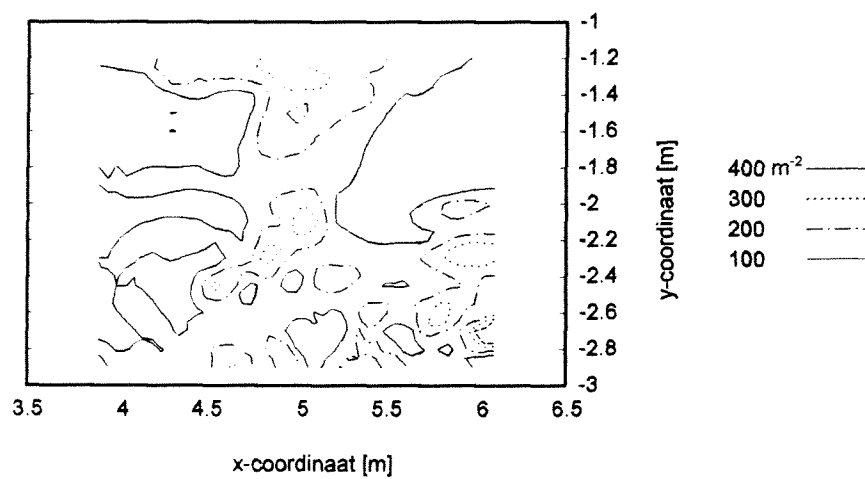
figuur 20. Gemiddelde snelheden haven met middelingsperiode 32s, bemonsteringstijd 0.08s en roosterafstand 0.1 m. Data in: \ptvdata\haven\s1t20100.avg



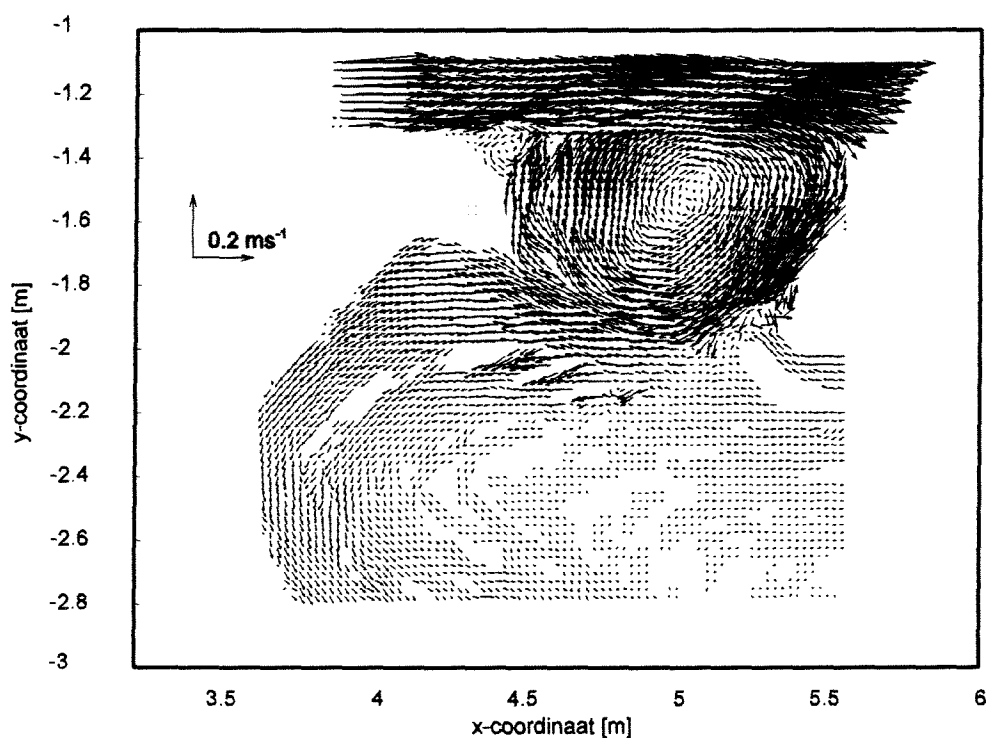
*figuur 21. Dichtheid van deeltjes in aantallen per roostervak (0.1 m*0.1 m).*



figuur 22. Havenneer met roosterafstand 0.05 m. Data in ..\ptvdata\haven\s1t20050.avg.



figuur 23. Dichtheid van deeltjes in aantallen per roostervak ($0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$)



figuur 24. Havenmetingen verwerkt met roosterafstand 25 mm en middelingperiode van 32 s. De orde grootte van de fout was 0.005 ms^{-1} .

4.2.3.3 Conclusie gemiddelden

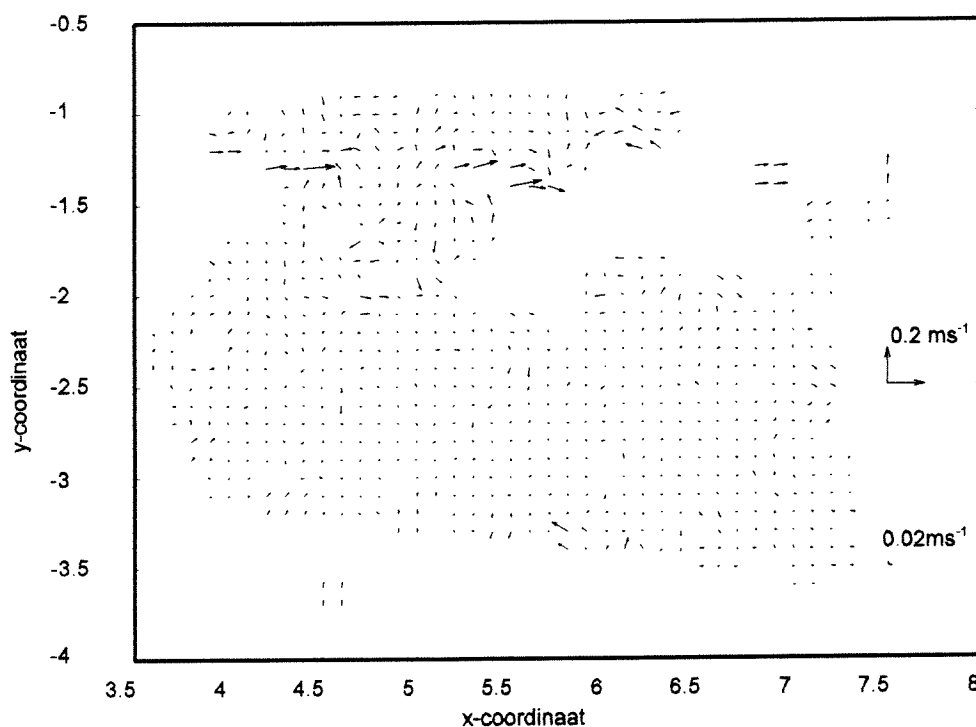
De gemiddelden geven voldoende kleine imprecisie voor het meten van fluctuaties. De verdeling van de deeltjes was minder homogeen dan verwacht. Dit heeft consequenties voor de systematische meetfout die in dit rapport niet zijn gekwantificeerd (de biaseffecten).

De maximale grootte van de fluctuaties is te schatten zijn uit de standaarddeviatie. Dit betekent dat voor de grootste roosterafstand (0.1 m) de fout ten minste 5% bedraagt. Voor de kleinste roosterafstand betekent het dat de fout bij de meting van de fluctuaties ten minste 40% bedraagt. Dit is de voornaamste reden dat er gekozen is om bij de verwerking tot fluctuaties te kiezen voor een 0.1 m als roosterafstand.

4.2.3.4 Fluctuaties havenmetingen

In de hierop volgende figuren staat het resultaat van de berekening van de fluctuerende delen zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken. Door dit te doen en een schatting te geven van de fout in de fluctuerende delen ten opzichte van de gemiddelde snelheid is het de bedoeling om aan te tonen dat als er voldoende metingen per oppervlak worden uitgevoerd er duidelijk een fluctuatie in de tijd kan worden gemeten ten opzichte van het gemiddelde om correlaties hierin te kunnen waarnemen.

In figuur 25 staat een schatting van de fluctuaties met een karakteristieke lengte groter dan 0.1 m en een karakteristieke periode groter dan 0.08 s. In de appendix resultaten~fluctuaties haven staan twintig opeenvolgende berekende fluctuaties om te kunnen controleren of de fluctuaties ook in de tijd gecorreleerd zijn. Dit lijkt het geval te zijn.



figuur 25. Berekende fluctuaties in de havenmonding. De getoonde vectoren van 0.02 ms^{-1} is een schatting van de meetfout in de meetapparatuur. Data in ..\ptvdata\haven\stap1\h11a0081.tur in de eerst vier kolomen.

4.2.3.5 Meetfout fluctuaties

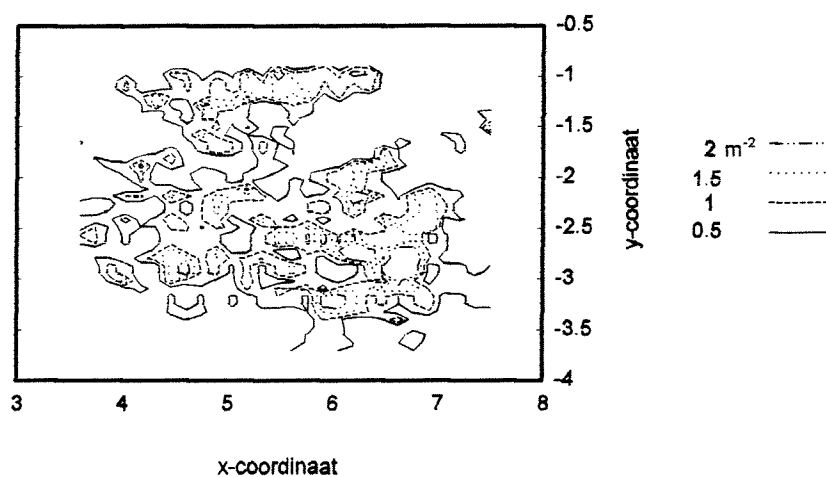
De fout door calibreren wordt voor het aantonen van fluctuaties buiten beschouwing gelaten. Deze is groot, maar om dat de fluctuaties zowel als de meetfout in pixels per frame zijn uit te drukken is voor het aantonen van fluctuaties calibratie niet van belang.

De meetfout ten gevolge van de apparatuur in het gemiddelde is verwaarloosbaar. De x-component van de meetfout ten gevolge van de discretisatie staat in figuur 27. Hierin is te zien dat de fout door de discretisatie in de ruimte van orde grootte 0.01 ms^{-1} . Voor een indicatie van die meetfout is een vector van 0.02 ms^{-1} getekend in de figuur.

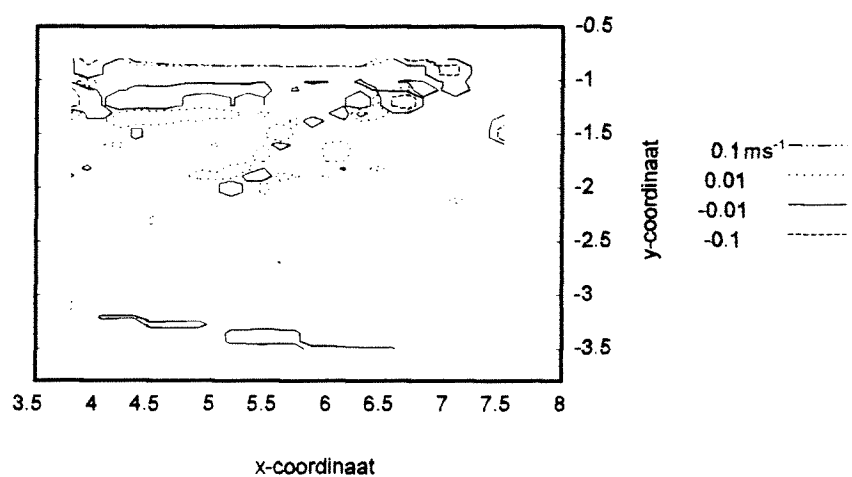
De fout ten gevolge van het bias effect is onbekend. De fout ten gevolge van het bias effect is echter maximaal ter plaatse van de grootste gemeten fluctuaties. De fout in de bias kan echter nooit groter zijn dan het snelheidsverschil tussen twee roosterpunten (hier ongeveer 0.1 ms^{-1}).

Een schatting van de discretisatiefout kan worden gegeven door vergelijking (22). Deze zijn met contourlijnen aangegeven in figuur 27. Te zien is dat bij $[x:y]=[5.5:-1.5]$ de fout ongeveer 0.01 ms^{-1} bedraagt.

De grootte van de fout door de meetapparatuur is ongeveer 0.1 pixel per frame ($\delta u_{p/t}$). Dit is gemeten door een constant snelheidsveld te genereren met dezelfde instellingen als in de gootmetingen. Hierbij geldt dat in dit geval de grootte van het meetgebied ongeveer 4 bij 3 meter was dus $C_{m/p}$ ongeveer 175 p/m is en de bemonsteringstijd was 0.08 s. Invullen in vergelijking (18) levert een meetfout per gemeten deeltje van ongeveer 0.01 ms^{-1} . De imprecisie van de momentane snelheden gemiddeld op een rooster met vergelijking kan worden berekend met vergelijking (13). Omdat dit lastig programmeren was is dit niet uitgerekend in plaats daarvan is de benaderingsvergelijking gebruikt (vergelijking (11)). In figuur 26 staan het aantal metingen die gebruikt zijn voor de schatten van de momentane snelheden. Te zien is dat het aantal deeltjes niet zeer groot is, het aantal deeltjes is minder dan 0.5 per roostervak, ter plaatse van de grote fluctuaties $[x:y]=[5.5:-1.5]$ gemeten. Dit doet vermoeden dat deze fluctuatie gebaseerd is op slechts één meting. Dit invullen in vergelijking (11) levert logischerwijze 0.01 ms^{-1} .



*figuur 26. Deeltjesdichtheid bij de schatting van de turbulente delen in aantallen per roostervak ($0.1m*0.1m$).*



figuur 27. Plot van de discretisatiefout in de havenmonding. Er is te zien dat de discretisatiefout vooral in de menglagen zit en daarbij vooral aan het begin. Data in ...|ptvdata\haven\st20100.avg kolom 5 en 6.

4.2.3.6 Conclusie fluctuaties haven

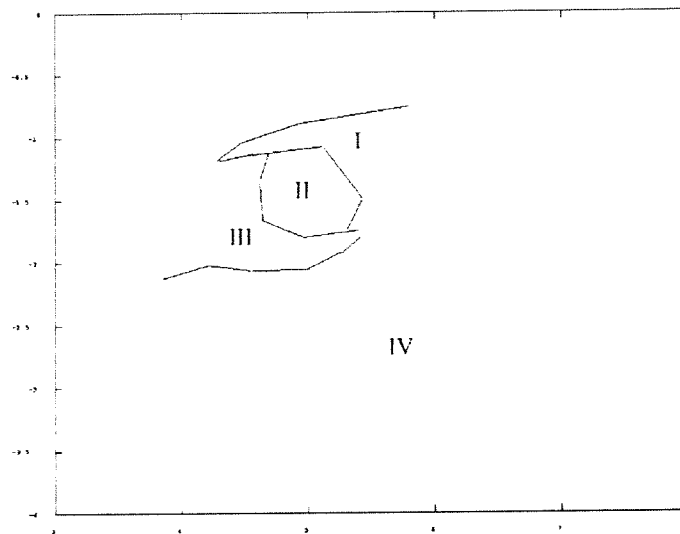
De fout in de calibratie is van ondergeschikt belang voor het aantonen van de fluctuaties. De grootte van de meetfout van een individuele meting is 0.01 ms^{-1} . Omdat de schatting in een roosterpunt op één is gebaseerd is de imprecisie van de fout eveneens 0.01 ms^{-1} . Hierin zitten echter niet verwerkt de fout ten gevolge van de inhomogene verdeling van deeltjes en de discretisatie. De fout ten gevolge van de ruimtelijke discretisatie is in die buurt van orde 0.01 ms^{-1} . Helaas is het de fout ten gevolge van de bias niet gekwantificeerd, maar maximaal 0.1 ms^{-1} . In de monding zijn de fluctuaties van orde 0.1 ms^{-1} . De conclusie is dan ook dat de kans bestaat dat de fluctuaties van 0.1 ms^{-1} ook werkelijk fluctuaties zijn. Dit is onvoldoende om van een eenduidige meting te spreken.

4.2.4 Aanbevelingen havenresultaten

In deze paragraaf staan een aantal problemen en resultaten die niet direct iets te maken hadden met de doelstelling van het rapport. De aanbeveling is om deze opmerkingen nader te bekijken en de problemen proberen op te lossen.

4.2.4.1 Gebieden gemiddelde stroming

In de resultaten in de haven zijn een aantal gebieden aan te geven. Deze zijn typisch voor



figuur 28. Schets van gebieden in de haven

stromingen in havens. Deze zijn de menglaag in de havenmonding (I in figuur 28), de primaire recirculatie neer in de monding (II in figuur 28) en de secundaire recirculatieneer in de haven zelf (IV in figuur 28). Tussen de primaire neer en de secundaire neer bevindt zich de secundaire menglaag (III in figuur 28). Hier is al zeer vaak naar gekeken. Dit type metingen is erg geschikt voor het meten aan dit soort complexe stromingen met grote ruimtelijke snelheidsverschillen.

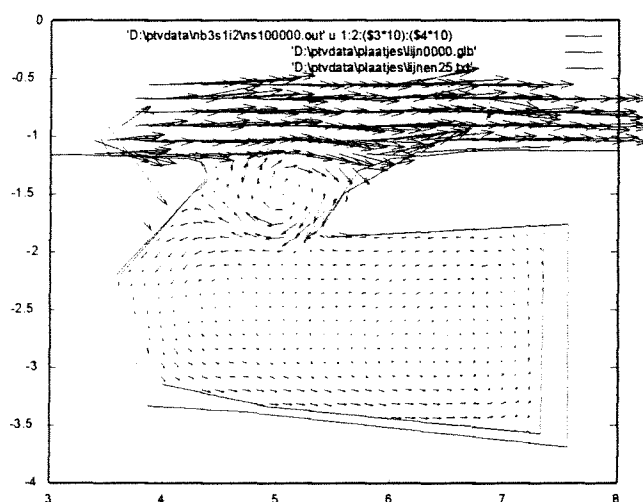
4.2.4.2 Vorm van de structuren

Optisch waren er duidelijke structuren zichtbaar. In het labjournaal zijn een aantal schetsjes

terug te vinden. Hierin is duidelijk ook een wervel paring effect zichtbaar, niet met twee wervels maar met meerdere wervels. Ze zijn niet geteld maar in de schetsen in mijn laboratorium journaal kunnen er met veel moeite ongeveer zes onderscheiden worden. Ook was er bij de eerste proeven een duidelijke stuwlijn zichtbaar aan de buitenkant van de menglaag. Later was die niet aanwezig, maar ontstonden er golven op ongeveer de plek waar de stuwlijn was. Vermoedelijk bestaat hierbij een verband al is onduidelijk waarom. Ik vermoed dat de paring van meerdere wervels tegelijk komt door de wijze van uitwisseling van water tussen de primaire neer en de hoofdstroom en de vorm van de haven.

4.2.4.3 Problemen calibratie

In figuur 29 staan resultaten van de havenmeting met een vorige versie van de PTV-code.



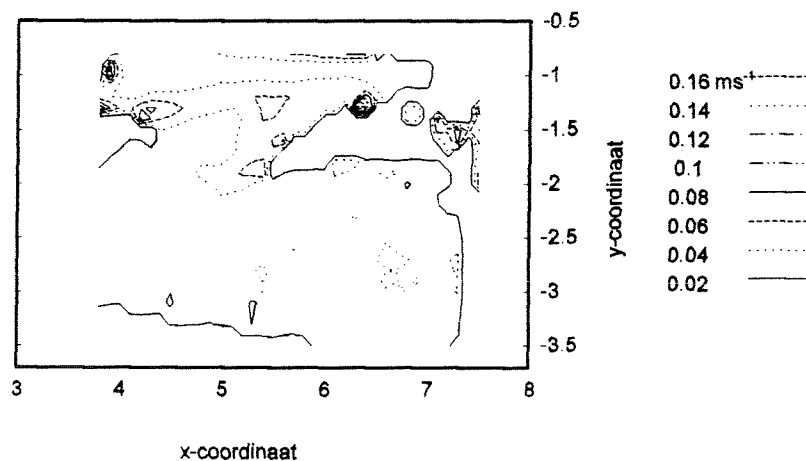
figuur 29. Berekening van de gemiddelde snelheden in de haven met het geografische filter.

Deze is bijgevoegd om aan te geven dat indien de metingen een grote calibratiefout bezitten (zoals deze havenmetingen) het nuttig is om de grenzen goed vast te leggen. Hierdoor kan de fout worden verkleind door op de plaats waar de gegevens met elkaar moeten worden vergeleken de grenzen zo goed mogelijk te fitten. Een voorbeeld van vergelijking van de havendata op deze wijze is te zien in Bijvelds, 1997-II. Hierdoor kan de fout in de positie van de meting en daarmee de richting van de snelheid worden verkleind. De fout in de grootte blijft ongeveer hetzelfde, tenzij er geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd kan worden tussen twee

metingen. Het vastleggen van de grenzen is bij de nieuwe PTV-code echter veel moeilijker. Dit komt omdat de meting van de grenzen in pixelcoördinaten niet met dezelfde functie kunnen worden gecalculeerd (de calibratie is niet toegankelijk voor de gebruiker).

4.2.4.4 Schatting grootte fluctuaties

In figuur 30 is een schatting gegeven van de grootte van de turbulente beweging. De meetfout moet hier nog vanaf getrokken worden (ongeveer 0.01 ms^{-1}). Ook hier is te zien dat de



figuur 30. Schatting van de gemiddelde grootte van de turbulente beweging in ms^{-1} uit de standaarddeviatie in x en y richting. Data in ..\ptvdata\haven\slt20100.var

fluctuaties bij $[x:y]=[5.5:-1.5]$ ongeveer 0.04 ms^{-1} zou moeten bedragen. Dit is veel kleiner dan de gemeten waarde dit geeft aan dat er inderdaad een grote bias fout moet zijn.

Ook kan de maximale meetfout exclusief de calibratie worden geschat uit de standaarddeviatie op een plaats waar geen grote tijdsafhankelijke fluctuaties worden verwacht. Dit is in dit geval in de haven zelf en ongeveer 0.02 ms^{-1} . Deze is vergelijkbaar in ordegrrootte met de geschatte waarden gemeten in een constant snelheidsveld.

4.3 Resultaten goot

4.3.1 Inleiding

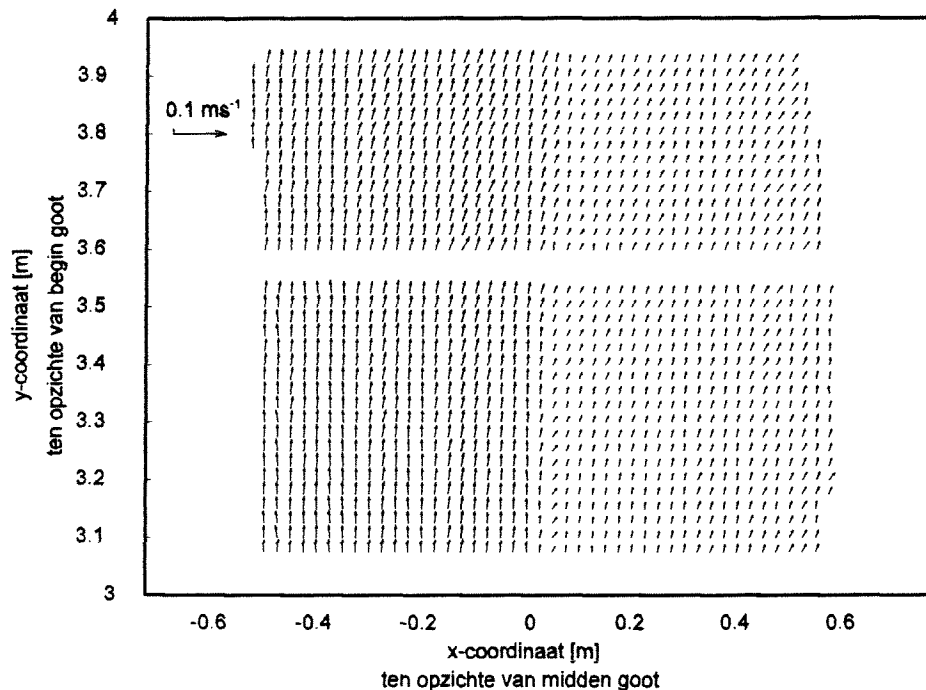
Het doel van de gootmetingen wat het meten van de fluctuaties om te kunnen zien of hier structuur in aanwezig is. Om dit te kunnen bereiken was het noodzakelijk om zo goed mogelijk een schatting te maken van de meetfout. De meetfout veroorzaakt immers ook fluctuaties ten opzichte van het gemiddelde. Hoe deze fout is opgebouwd is te vinden in de paragraaf “fout in fluctuaties gootmetingen”.

Eerst zijn de gemiddelde snelheden behandeld. De fout hierin is uitgebreid behandeld in het gemiddelde is van belang voor de fout in de fluctuaties, omdat die even groot terug komt in de fluctuaties. Ook is aandacht besteed aan de validatie van de metingen. Met name of de aannames valide waren en simpelweg door het vergelijken met een andere meetmethode die een zeer kleine meetfout heeft (LDA).

Vervolgens zijn de fluctuaties behandeld. Eerst of er structuren zichtbaar zijn, vervolgens hoe groot de fout daarin is. Deze is van belang voor het aantonen van fluctuaties. Immers als de fluctuaties ten opzichte van het gemiddelde ten gevolge van de meetfout groot is valt de fluctuatie ten gevolge van de waterbeweging weg in de ten opzichte van de meetfout.

4.3.2 Gemiddelde snelheden

In figuur 31 staan de gemiddelde snelheden ten opzichte waarvan de fluctuaties zijn berekend. Hierin is de schaal sterk vertrokken (10x) naar de dwarsrichting, zodat de te verwachten



figuur 31. Gemiddelde snelheden van meting 6-71 met middelingsperiode 32 s, bemonsteringstijd 0.04 s en roosterafstand 0.025 m. Data in ..\ptvdata\menglaag\1671\s2t10025.avg.

verhoging van de dwarssnelheid beter zichtbaar is. De schatting van de fout in het gemiddelde is van belang om te controleren of de PTV methode voldoet voor het meten van gemiddelde snelheden. Deze wordt dan ook hierna behandeld.

De verificatie van de fout in het gemiddelde is gebeurd door de Particle Tracking Velocimetry metingen te vergelijken met Laser Doppler metingen. Vervolgens is de fout geverifieerd door een aantal resultaten met elkaar vergeleken, met name verschillende middelingsperioden, verschillende bemonsteringstijden en verschillende roosterafstanden.

4.3.2.1 Meetfout gemiddelde

Inleiding

De meetfout is opgebouwd uit de fout in de metingen en de aannames. Met name van belang voor de grootte van de fout zijn kwaliteit, calibratie, discretisatie en de aanname van constant debiet. Deze zijn zoveel mogelijk geschat. In de volgende paragrafen wordt getoond wat de ordegrootte van de diverse fouten is. Daarna kan worden geconcludeerd welke fouten van belang zijn voor de ordegrootte van de meetfout.

Calibratie

De fout in de calibratie is berekend met de kleinste kwadraten (zie (20)). Deze is echter nog niet beschikbaar voor de gebruiker. In het verdere deel wordt deze verwaarloosd omdat ze niet van belang zijn voor het aantonen van de fluctuaties.

De systematische fout van de calibratie in de plaatsbepaling wordt veroorzaakt door de onnauwkeurige schatting van het referentiepunt ten opzichte van de goot. In langsrichting door de fout in de schatting van de plaats van het referentiepunt ten opzichte van de meetlint en de bepaling van het midden van de goot (Deze valt weg bij vergelijking tussen meetseries).

De willekeurige fout in de calibratie wordt bepaald door de afleesfout van het meetlint (2mm) en de speling van de wieltjes van de calibratiekar (orde 1mm). Deze fout is per meetserie systematisch (de punten worden 1 keer per serie bepaald en valt dus weg bij vergelijking binnen een meetserie).

Imprecisie gemiddelde

De imprecisie in het gemiddelde door de eindigheid van het aantal deeltjes waarop de berekening van het gemiddelde is gebaseerd is gegeven in (11). Hierin staat dat de imprecisie in het gemiddelde evenredig aan de imprecisie van de meting gedeeld door de wortel uit het aantal metingen (zie (11)). De imprecisie van de meting worden geschat met ongeveer twee keer de standaarddeviatie = het 95% betrouwbaarheidsinterval (zie bijvoorbeeld Natuurkundig Practicum 1988). Doordat het gemiddelde een optelling is kan ervan worden uitgegaan dat dit een normaalverdeelde stochast is. Hiermee kan het aantal metingen worden aangegeven

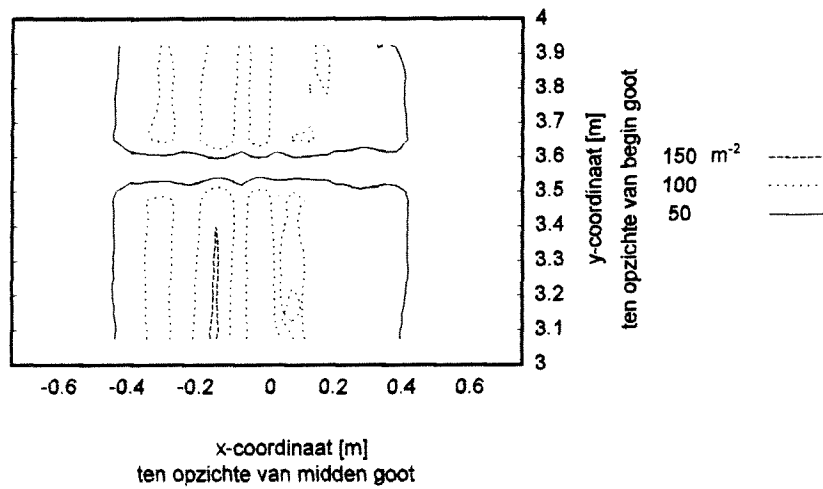
hoeveel metingen er minimaal noodzakelijk zijn om te voldoen aan een voldoende nauwkeurige meting van het gemiddelde. In het geval van deze metingen is deze fout verwaarloosd.

De schatting van het aantal deeltjes per berekend gemiddelde is te zien in figuur 32. Deze waarde moet met vier worden vermenigvuldigd omdat het gemiddelde gewicht per meting een kwart is.

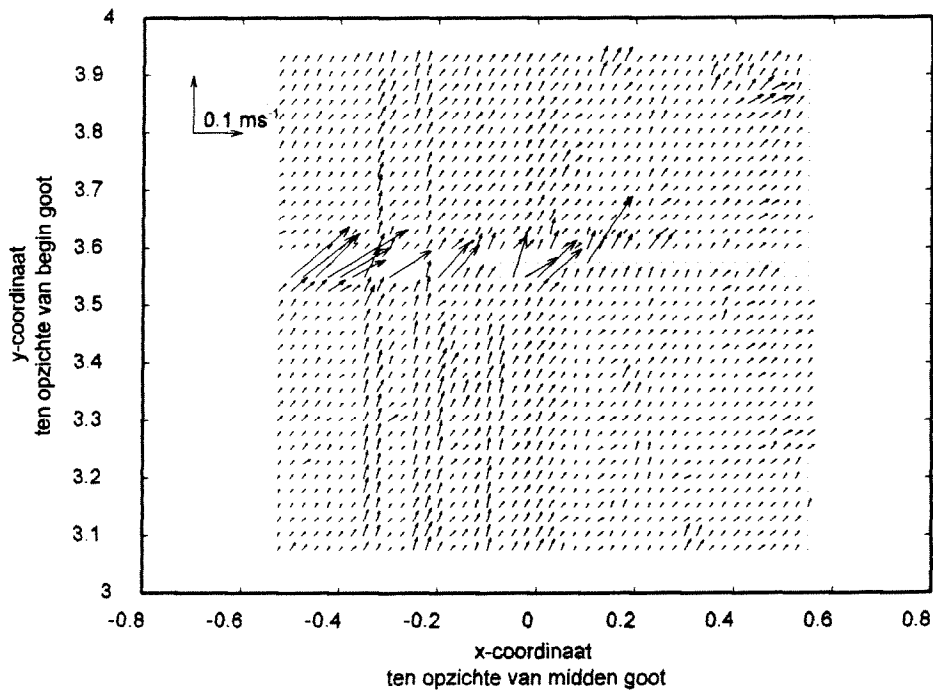
De grootte van de standaarddeviatie staat in figuur 33, daarmee wordt de imprecisie in het gemiddelde ongeveer 0.0002 ms^{-1} . Dit is verwaarloosbaar ten opzichte van de imprecisie in de PTV metingen zelf.

In figuur 33 staat de standaarddeviatie van de meting gegeven. Hierin is te zien dat snelheden aan de hoge snelheidskant veel grotere fluctuaties laten zien als verwacht. Deze komen niet voor in de andere series die zijn verwerkt. Dit betekent vermoedelijk dat in dit gebied er gezonken deeltjes voorkomen of dat er andere onvermoede fouten optreden. Indien het gezonken deeltjes zijn veroorzaakt deze een systematische fout naar beneden omdat de snelheden onder de water spiegel lager zijn dan erboven. Een schatting van de grootte kan gegeven worden uit de grotere waarde van de standaarddeviatie ter plaatse van de gezonken deeltjes.

Ook is in figuur 33 te zien dat de kwaliteit boven de balken slechter wordt met name aan de hoge snelheidskant.



figuur 32. Dichtheid van deeltjes in aantal deeltjes per roostervak ($0.025\text{m} \times 0.025\text{ m}$) van serie 6-7L. Data in ..\ptvdata\menglaag\167l\s2t10025.avg kolommen 1,2,7



figuur 33. Standaarddeviatie van serie 6-7L. Middelperiode 32s bemonsteringstijd 0.04 s en roosterafstand 0.025 m. Data in ..\ptvdata\menglaag\167l\t2s10025.var.

4.3.2.2 Controle aannames

Uit de verificatie van de aannames is op te maken dat (In de appendix resultaten):

- de kwaliteit voor 6-7L zeer hoog is en de fout daarin verwaarloosd kan worden;
- de discretisatiefout te verwaarlozen is in de hoofdstroming, maar niet in de menglaag;
- het debiet varieert op individuele plaatsen de gemeten snelheden licht variëren met een waarde van 0.003ms^{-1} ;
- de grootte van deeltjes in pixelgrootte is gecontroleerd en voldoende (meer dan 4 pixels in diameter).

4.3.2.3 *Vergelijking LDA PTV*

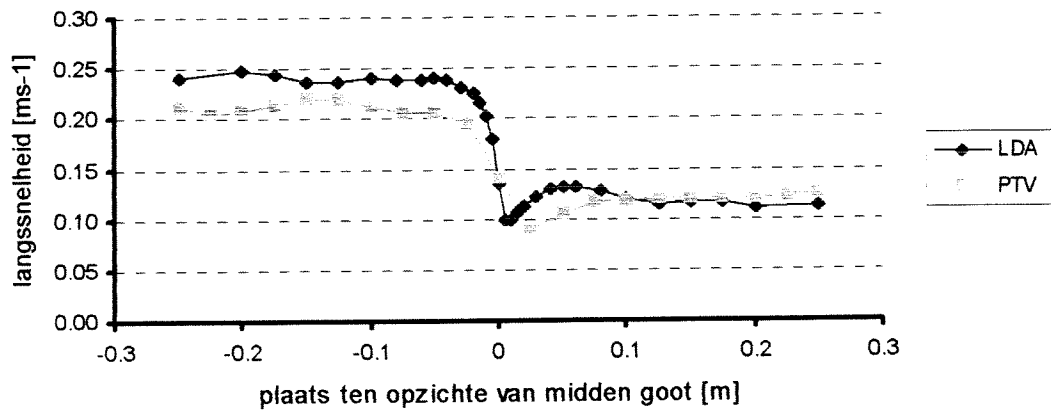
Om de meetmethode te verifiëren is er een vergelijking uitgevoerd van de PTV methode ten opzichte van de metingen van de LDA deze vergelijkingen zijn te vinden in de zes volgende figuren. Hierin is te zien dat de metingen van de snelheden in langsrichting vergelijkbaar zijn. Vooral verder benedenstrooms van het begin van de menglaag is de vergelijking goed te maken. De verschillen die op die plaats in de dwarsrichting optreden kunnen volledig worden toegeschreven aan de calibratiefout in de PTV metingen. Deze fout is te benaderen met de standaarddeviatie van het signaal.

De foutmarges in de langssnelheden (snelheden in de lengterichting van de goot) liggen binnen de markering van het datapunt. In de foutmarge zijn de fouten ten gevolge van de discretisatie niet meegenomen. Voor de fout in de snelheden van de LDA metingen geldt hetzelfde. Hiermee is duidelijk dat de fout ten gevolge van de discretisatie niet te verwaarlozen is.

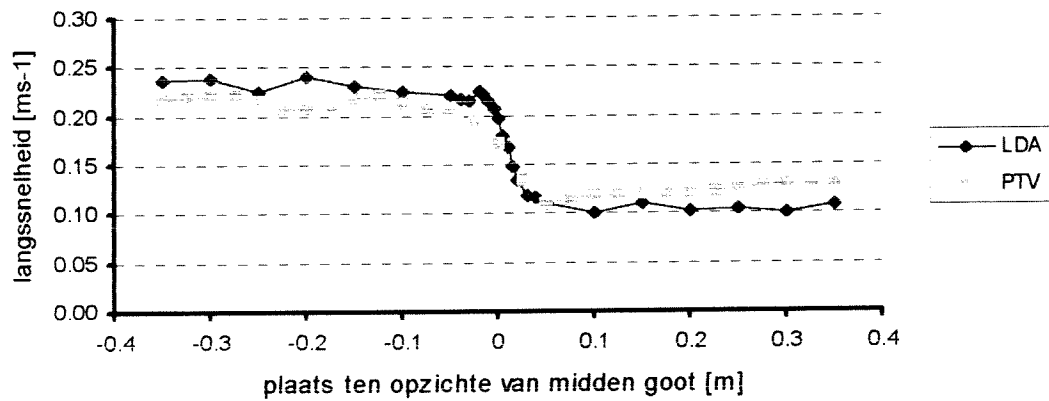
Uit de vergelijking tussen LDA en PTV komt naar voren dat de snelheden vergelijkbare resultaten geven in vorm en grootte. Gemeten naar hun imprecisie zijn ze echter strijdig. Dit zou verklaard kunnen worden door:

- de metingen zijn op verschillende diepte gemeten
- de versturende effecten van het inwerpen van deeltjes

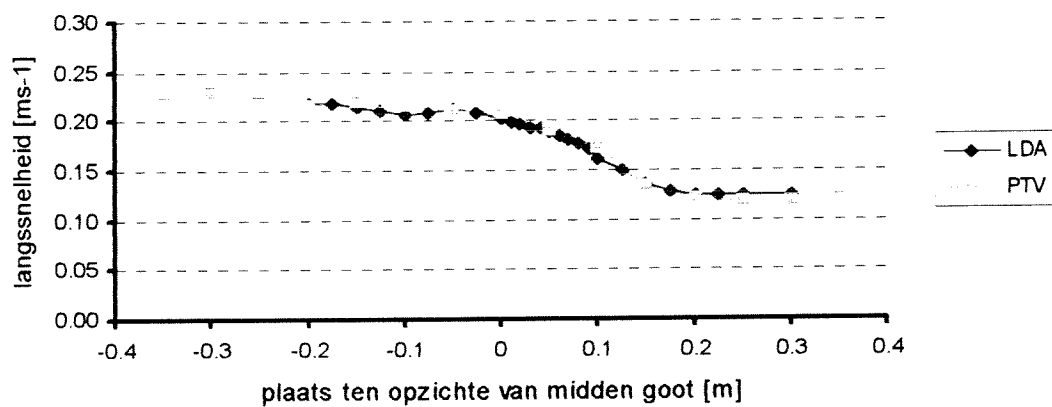
Vooral de laatste geeft een verklaring waarom de metingen verder vanaf het begin van de menglaag beter op elkaar gaan lijken (de effecten van de inworp dempen uit). Dit zou ook kunnen verklaren waarom in dwarssnelheden grotere verschillen aanwezig zijn.



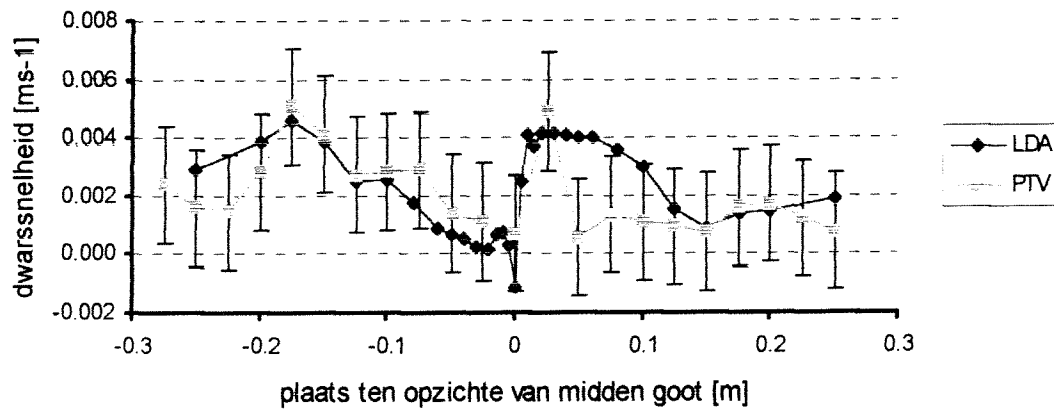
figuur 34. Vergelijking langssnelheden op 5 cm vanaf het begin van de menglaag.



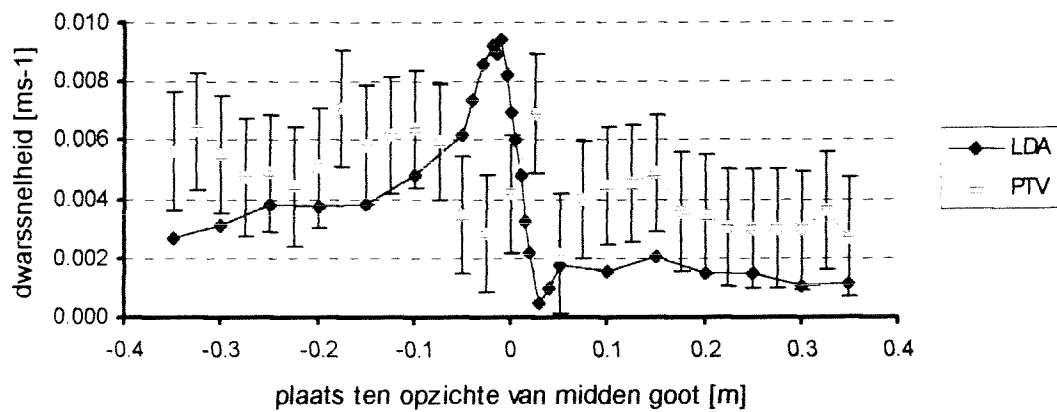
figuur 35. Vergelijking langssnelheden op 50 cm vanaf het begin van de menglaag.



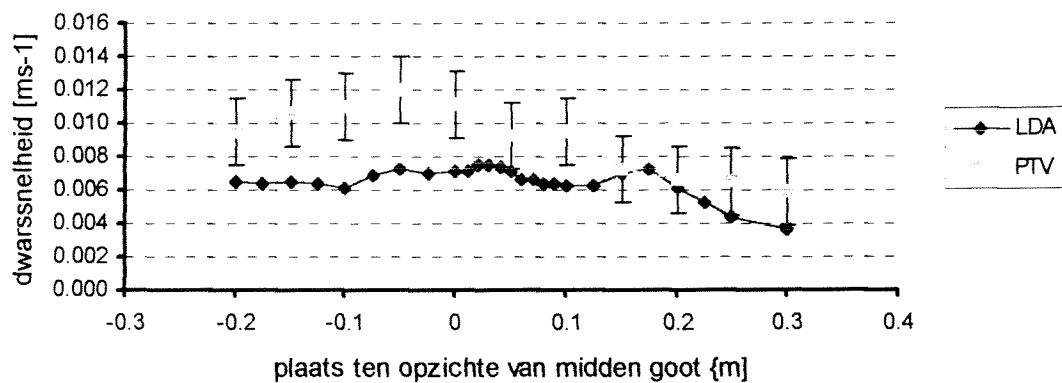
figuur 36. Vergelijking langssnelheden op 200 cm vanaf het begin van de menglaag.



figuur 37. Vergelijking dwarsnelheden op 5 cm vanaf het begin van de menglaag.



figuur 38. Vergelijking dwarsnelheden op 50 cm vanaf het begin van de menglaag.



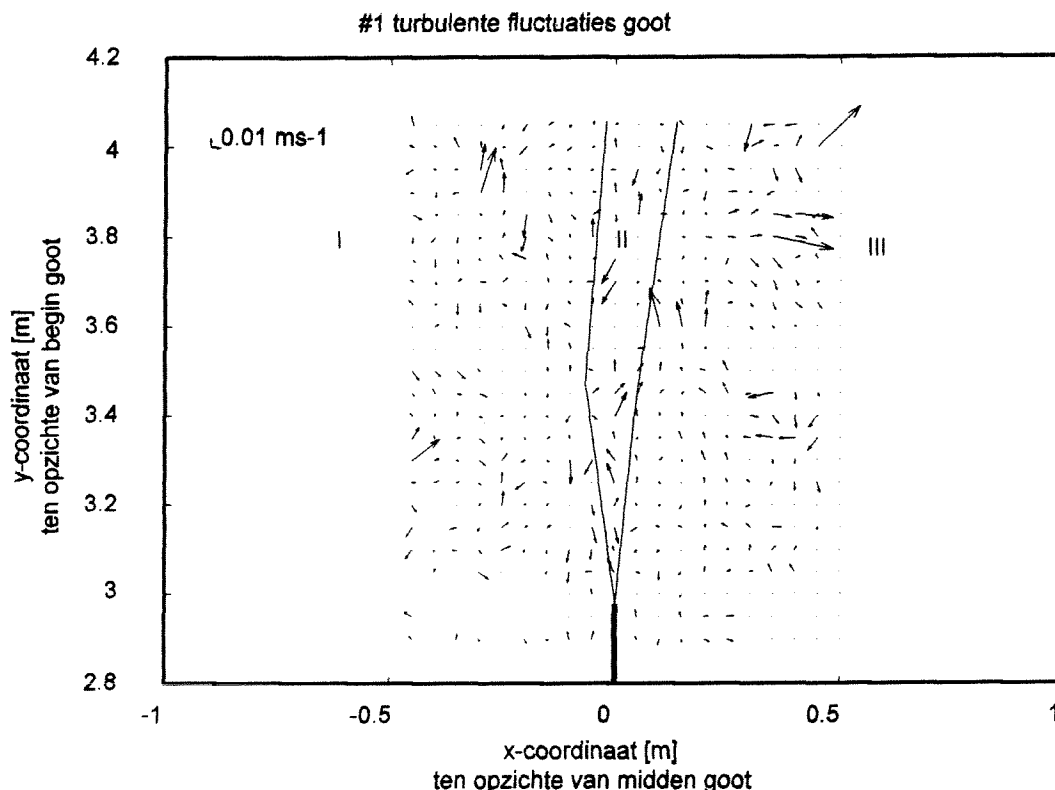
figuur 39. Vergelijking dwarsnelheden op 200 cm vanaf het begin van de menglaag.

4.3.2.4 Conclusie gemiddelde snelheden

Vergelijking met LDA en met andere meetfouten geeft aan dat de meetmethode bruikbaar is. Wel lijkt de inworp van deeltjes invloed te hebben op de gemeten snelheden. Als dit zo is kan dat voorkomen worden door de deeltjes verder bovenstrooms in te werpen.

4.3.3 Fluctuaties momentane snelheden

De fluctuaties in figuur 40 zijn berekend uit serie 6-71 met behulp van vergelijking (3). Deze



figuur 40. Fluctuaties uit serie 6-71 middelperiode 16 s, bemonsteringstijd 0.04 s en roosterafstand 0.05 m. Data in ..\ptvdata\menglaag\1671\z11a0081.tur.

serie is met de kleinste beeldgrootte genomen en is daarmee de beste kandidaat voor het meten van de fluctuaties. In de figuur staat de menglaag aangegeven (II). De hogesnelheidskant is I en de lage snelheidskant is III. De knik in de menglaag (het beging van de menglaag neigt eerst naar de hogesnelheidskant) is voor het eerst geconstateerd door van der Wegen (199?). In de figuur staat een vector met een grootte van 0.01 ms^{-1} . Metingen groter dan deze kunnen vermoedelijk worden beschouwd als turbulente fluctuaties. In Appendix resultaten - Gootfluctuaties zijn opeenvolgende metingen in de tijd getoond om correlaties in de tijd te kunnen constateren. De gemeten fluctuaties vertonen nauwelijks coherentie in de tijd. Dit doet vermoeden dat coherentie in de ruimte slechts op toeval berust. Ook is zichtbaar dat er ondanks de aanname van 100% kwaliteit er toch foute vectoren zichtbaar zijn.

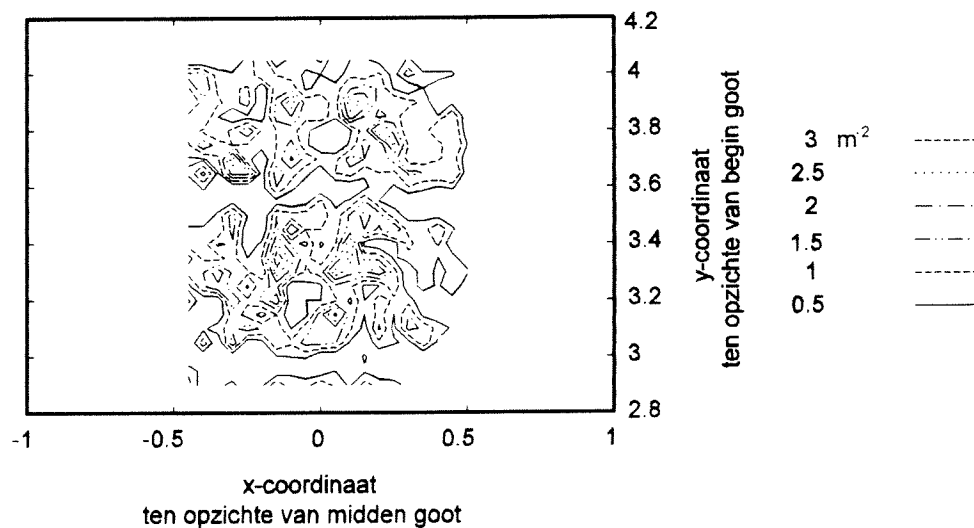
In de volgende bladzijden wordt gepoogd om duidelijk te maken in hoeverre deze fluctuaties als fluctuaties ten opzichte van de gemiddelde stroming op te vatten zijn.

4.3.3.1 Meetfout fluctuaties

De meetfout in de fluctuaties in op te delen in de imprecisie van de PTV-metingen en de dichtheid van de deeltjes per roostervak, de imprecisie in het gemiddelde (zie (4)) en de systematische fout van de meting.

Imprecisie PTV-meting

De imprecisie ten gevolge van de schatting van de snelheid op een equidistant rooster kan worden geschat uit (11). Dit is de vergelijking voor de schatting van de imprecisie in het



figuur 41. Schatting van de dichtheid van de deeltjes in aantal metingen per roostervak ($0.05m \times 0.05m$). Data in ..\ptvdata\menglaag\167l\z11a0081.tur 1:2:7.

gemiddelde. Het is mogelijk om deze te gebruiken doordat ook de momentane snelheden naar een rooster worden gemiddeld. De imprecisie kan zodoende worden berekend uit de schatting van het aantal deeltjes gebruikt voor de berekening van het gemiddelde en de imprecisie van de

meting net als het gemiddelde.

Vergelijking (11) gaat ervan uit dat de deeltjes uniform verdeeld zijn over het roostervak en in het geval van de momentane snelheden mag deze benaderingsvergelijking eigenlijk niet gebruikt worden. In de afleiding van de vergelijking staat echter de niet benaderde vergelijking. Deze is beter omdat die er meer rekening mee houdt wat de werkelijke gemiddelde grootte is van het gewicht van de deeltjes.

In figuur 41 is te zien hoeveel metingen er gebruikt zijn voor de schatting van het aantal metingen per berekende snelheid. Hierin is te zien dat de meeste gewichten een grootte hebben van 1 dit betekent dat de meetfout ongeveer 0.002 ms^{-1} is en er van uitgaande dat de meetfout ongeveer 0.1 pixel per frame is (zie (18)). Eis hiervoor is dat de deeltjes pixel verhouding tenminste 2 pixels per deeltje is. Bij controle blijken de metingen hieraan te voldoen (zie APPENDIX Resultaten - controle aannames).

De fout in de kwaliteit is op 100% geschat. Bij het bekijken van de fluctuaties lijkt deze aanname niet valide.

4.3.3.2 Conclusies fluctuaties in snelheden

Door de beperkte geldigheid van vergelijking (11) is er een extra foutmarge ingesteld. Alle metingen met een grootte van 0.005 ms^{-1} kunnen worden beschouwd als turbulente fluctuaties. Vanwege de grote onzekerheden in de schatting van de diverse fouten is het “zeker” als 2 keer de fout wordt meegenomen. In de figuur is een vector geplot van 0.01 ms^{-1} . Deze is twee keer de meetfout.

Doordat er enige correlatie is tussen een aantal snelheidsvectoren bestaat het vermoeden dat er grootschalige structuren aanwezig zijn, maar dit is niet eenduidig te constateren.

Voor zover de metingen betrouwbaar zijn kunnen de fouten worden samengevoegd door de foutvergelijkingen in te vullen die bij de diverse vergelijkingen zijn gegeven. Het komt er op neer dat de fouten wortel kwadratisch worden opgeteld. Dit levert een fout van 0.003 ms^{-1} .

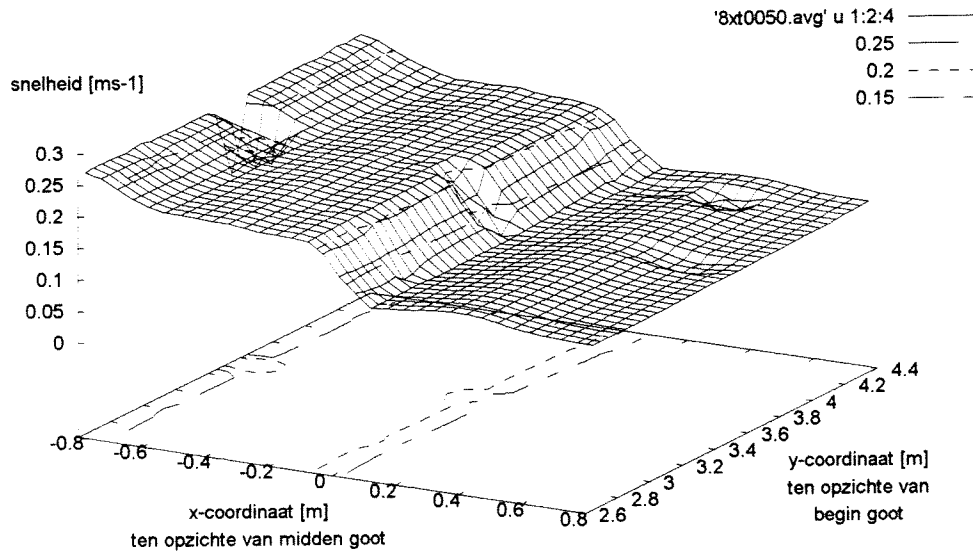
4.3.4 Discussie goot

4.3.4.1 Gemiddelde snelheden

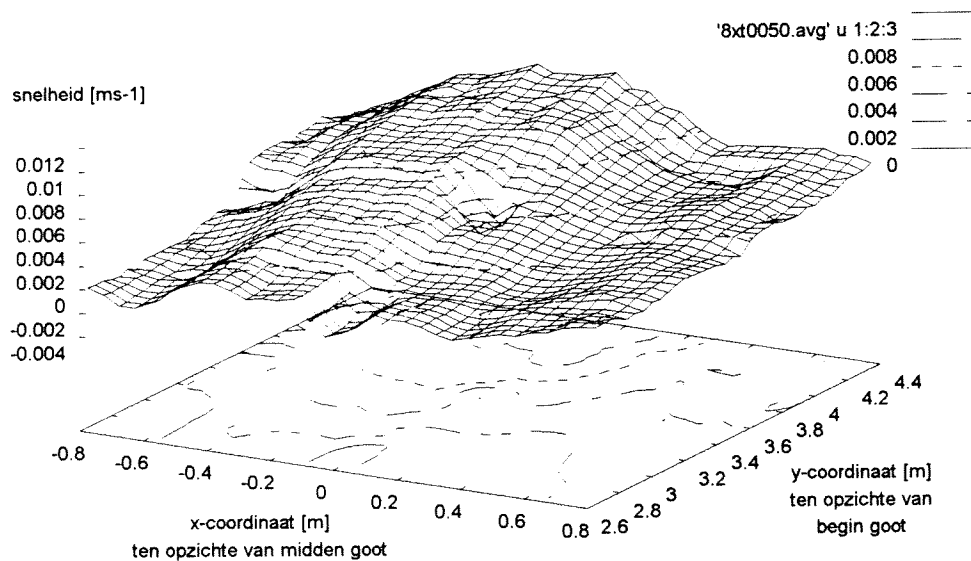
In het overzichtsplaatjes is een netto massatransport zichtbaar naar de lage snelheidskant. Uitgaande van de aanname dat uiteindelijk er weer een uniforme stroming zal ontstaan moet er wel massa over de vertikaal verplaatst worden ten gevolge van de turbulente menging. Dit gebeurt door de menging van de twee stromingen. Deze verplaatsing is hier niet volledig mee te verklaren. Er zijn immers ook netto snelheden richting lagesnelheidskant gemeten buiten de menglaag. Tukker (1997-II) stelt voor dat dit komt door de bodemwrijving. Het is ook mogelijk dat het komt door het verschil in energiehogte tussen de lage en de hogesnelheidskant.

Er is een strijdigheid met de Laser Doppler meting bij het begin van de menglaag. Deze is van orde grootte 0.02 ms^{-1} . Deze zouden verklaard kunnen worden door de calibratiefout. Dit verklaart echter niet de hogere gemiddelde snelheden aan de lagesnelheidskant. De consequent hogere snelheden in de dwarssnelheden zou kunnen betekenen dat ten gevolge van het inwerpen van de deeltjes er een groter massatransport naar de lage snelheidskant ontstaat en zodoende de menglaag sneller dempen. Deze verklaring is echter weer in strijd met de snelheden op twee meter afstand van de scheidingsplaat.

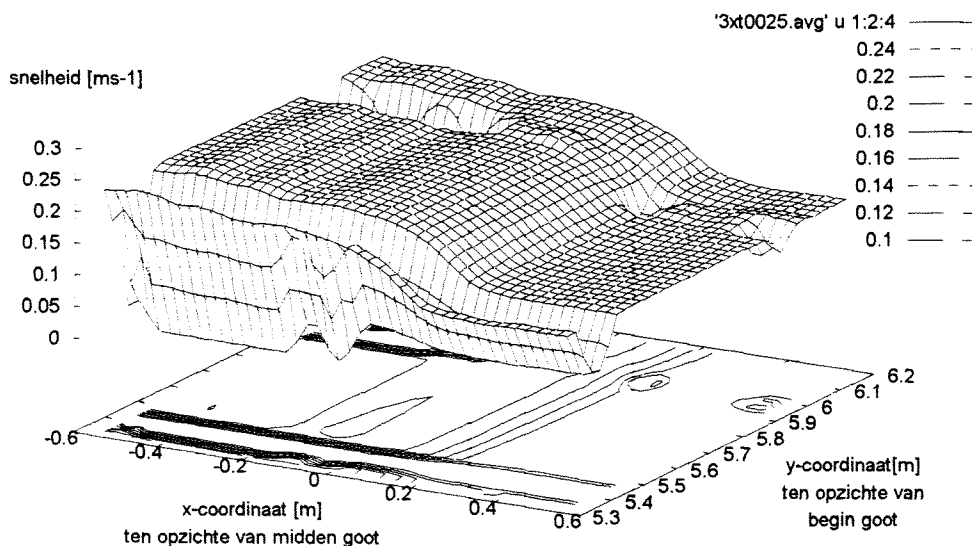
In de driedimensionale overzichtsfiguren komt naar voren dat er een onverklaarbare stijging van de snelheid optreedt. Dit is mogelijk een verklaring voor de verschillen met de LDA metingen. Het zou ook een verklaring zijn voor de ongebruikelijke verdeling van de deeltjes die gevonden is. Deze kwamen namelijk vrijwel allemaal aan de lagesnelheidskant naar buiten.



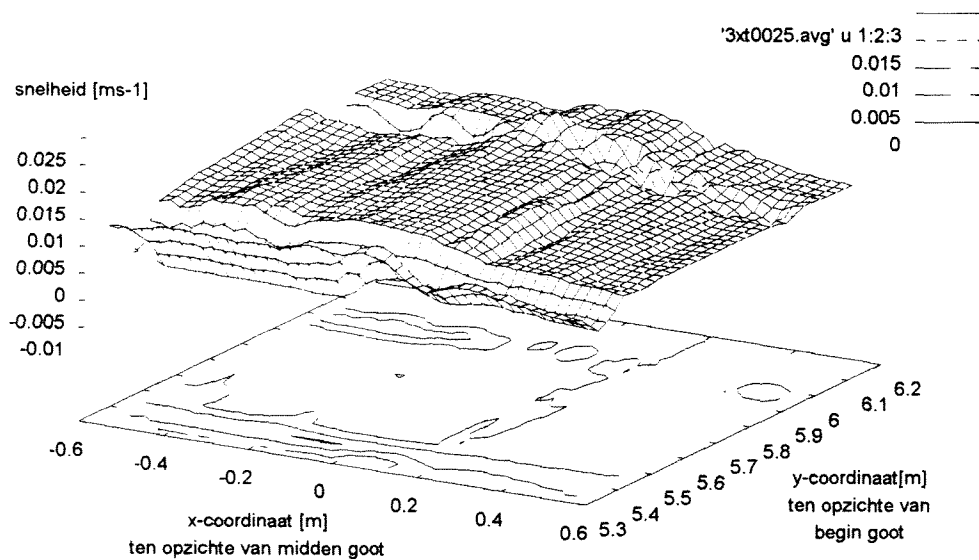
figuur 42. Gemiddelde langssnelheden van serie 5-81 met een middelingsperiode van 96 s en een bemonsteringstijd van 0.08 s. De rooster afstand bij het middelen was 0.05 m.



figuur 43. Gemiddelde dwarssnelheden van serie 5-81 met een middelingsperiode van 96 s en een bemonsteringstijd van 0.08 s. De rooster afstand bij het middelen was 0.05 m.



figuur 44 . Gemiddelde langssnelheden van 9-12d gemeten met een periode van 48 s, een bemonsteringstijd van 0.08 s en een roosterafstand van 0.025 m.



figuur 45 . Dwarssnelheden in serie 9-12D gemeten met een middelingsperiode van 48 s, een bemonsteringstijd van 0.08 s en een roosterafstand van 0.025 m.

4.3.4.2 Turbulente structuren

De kwaliteit van de metingen was goed. Hiermee is de basis gelegd voor het meten van turbulente structuren.

De fluctuaties in de menglaag zelf zijn niet als turbulente structuren op te vatten. Ten eerste door de zeer beperkte aantal metingen in de menglaag zelf (door de geringe concentratie van deeltjes in de menglaag). En ten tweede omdat de structuren in de turbulentie niet terug te vinden waren in de LDA metingen bij de gegeven waterdiepte (zie Uijttewaal & Tukker 1998-III). Dit kwam pas na de metingen aan het licht (ze zijn gemeten op hetzelfde tijdstip).

In de fluctuerende delen is wel een coherentie te vinden zowel in plaats als in tijd aan de lage snelheidskant. Deze zijn zoals verwacht niet veel groter dan de meetfout waardoor ze zeer moeilijk te herkennen zijn. Ook zijn er een aantal fluctuaties in de snelheden gevonden die onrealistisch groot zijn (turbulente fluctuaties zijn ten hoogste $1/3$ van de gemiddelde snelheid). Dit doet andere oorzaken voor de fluctuaties vermoeden, zoals gezonken deeltjes.

5 Conclusies & Aanbevelingen

5.1 Conclusies

Het doel van dit onderzoek was op te delen in twee belangrijke onderdelen:

- het opzetten van de PTV voor gebruik in het Laboratorium van Vloeistofmechanica
- het kwantitatief visualiseren van turbulente structuren

Het doel van het onderzoek bleek gaandeweg de metingen niet haalbaar, omdat in de gegeven opstelling er geen turbulente structuren ontstonden die voldoende groot waren. Het doel is daarom bijgesteld tot het aan te geven hoe de turbulente structuren in ondiep-watermenglagen meetbaar zijn met PTV.

Het eerste onderdeel, de opzet van de PTV, is grotendeels geslaagd. De metingen kunnen worden uitgevoerd en er komen geloofwaardige waarden uit. Deze zijn geverifieerd aan LDA metingen en hier komen geen onverklaarbare verschillen uit. De verschillen in de metingen kunnen verklaard worden doordat de metingen niet op exact hetzelfde tijdstip en op verschillende dieptes zijn gemeten. Ook is de verstoring van de stroming kleiner bij de LDA dan bij de PTV.

Om de aangepaste doelstelling te verwezenlijken kan nu worden gesteld dat de tijdsafhankelijkheid van de watersnelheden kan worden aangetoond als de meetfout van de momentane snelheid (veel) kleiner is als de grootte van de te meten fluctuaties (de meetfout veroorzaakt ook een fluctuatie ten opzichte van het gemiddelde). Hiervoor is een uitgebreide foutenanalyse uitgevoerd. Hiermee kan de meetfout worden geschat. Door de fluctuaties te berekenen en de meetfout daarin kan worden aangetoond hoe groot de relatieve fout in de tijdsfluctuaties is. In de menglaag zelf waren zoals verwacht geen turbulente structuren in de menglaag te constateren (daar was de meetfout te groot door de discretisatie in de ruimte). Aan de lagesnelheidskant in de gootmetingen zijn wel snelheidsfluctuaties aangetoond (met een fout van orde 50%). Deze vertonen een coherentie. Het is niet mogelijk om hier duidelijke conclusies aan te verbinden door de grote fout in de meting.

Ook in de havenmetingen zijn fluctuaties geconstateerd. Doordat de fout ten gevolge van de bias onbekend is kunnen daar geen conclusies aan verbonden worden. Deze fluctuaties zijn, als het fluctuaties zijn en geen meetfout, vermoedelijk wel de structuren waarnaar gezocht worden. Omdat ze een sterke fluctuatie in de richting van de hoofdstroom hebben is het zeer wel mogelijk dat de fluctuaties ontstaan zijn doordat de meting gebaseerd zijn op te weinig deeltjes.

5.1.1 Deelconclusies

Om tot de bovenstaande conclusies te komen zijn de problemen opgedeeld in kleinere onderdelen die allen onafhankelijk zijn onderzocht.

Voor het meten van de watersnelheden is gekozen voor PTV. Dit hield in dat de volgende problemen opgelost moesten worden:

- wat doet PTV exact
- hoe goed voldoen de te gebruiken deeltjes voor de PTV metingen
- hoe kunnen deze deeltjes het beste worden toegevoegd aan de stroming
- de controle van de gebruikte meetmethode door vergelijking met Laser Doppler Anemometry

Geconcludeerd kan worden uit de literatuur dat PTV snelheden schat uit verplaatsingen over een gegeven periode. Dit is feitelijk de gemiddelde snelheid over die periode.

Geconstateerd is dat de deeltjes voldoen voor het meten van gemiddelde snelheden maar niet voldoen voor de te meten fluctuaties. Conclusie in verband met de deeltjes is dat de geschiktheid van de deeltjes afhangt van het type stroming en de grootte van de te meten structuren.

Conclusie over de toevoeging van deeltjes aan de stroming is dat afhankelijk van de gewenste stapgrootte in de ruimte er een uniforme verdeling nodig is. Deze is ook afhankelijk van de te meten stroming

Conclusie uit vergelijking met LDA is dat deze metingen niet strijdig zijn. De verschillen groter

dan de meetfout zijn te verklaren uit de meting op verschillende diepte en de variaties in debiet

Bij de meting van turbulente structuren is ook een aantal problemen opgemerkt:

- PTV meet snelheden gemiddeld over in dit geval twee keer de bemonsteringsperiode
- hoe herken je turbulente structuren
- in hoeverre zijn de gemeten fluctuaties betrouwbaar

Geconcludeerd kan worden dat fluctuaties met een kortere periode dan de bemonsteringstijd niet meer eenduidig te constateren zijn.

Aangenomen is dat deze te herkennen zijn uit coherentie in de snelheden, tijd en ruimte afhankelijk.

De tijdsafhankelijkheid is zo duidelijk mogelijk gemaakt door de fluctuaties in de tijd ten opzichte van de gemeten gemiddelde snelheid te meten. De ruimtelijke afhankelijkheid in de tijdfluctuaties zijn hierin ook zichtbaar (zie bijvoorbeeld de havenfluctuaties in de havenmonding).

In de tijdgemiddelde snelheden zijn watersnelheden gemeten die ook coherentie vertonen in de ruimte (de neren en de menglagen) deze zijn ook ten gevolge van de turbulentie ontstaan. De vraag is of deze ook te beschouwen zijn als turbulente structuren (volgens de gekozen aanname wel)

Geconcludeerd kan worden dat de gemeten fluctuaties in de tijd zijn niet eenduidig te constateren ten opzichte van de foutschatting. Dit komt door de onbekende fout in de bias en de discretisatiefout.

5.2 Aanbevelingen

5.2.1 Meting turbulente structuren

De belangrijkste aanbeveling is om de meetopstelling zodanig te veranderen dat de turbulente structuren wel te meten zijn.

De belangrijkste waarden voor het meten met behulp van PTV zijn:

- de grootte van de te meten fluctuaties in de stroming
- de bemonsteringstijd;
- de afstand tussen de deeltjes;
- de benodigde grootte van het zoekgebied;
- de grootte van de deeltjes;
- de grootte van het beeldoppervlak in pixels.

Hiervoor kunnen vergelijkingen worden opgesteld waarmee een schatting gegeven kan worden van de benodigde waarden om de fluctuaties te kunnen meten. Van belang hierbij is de grootte van het zoekgebied is afhankelijk van de grootte van de te meten fluctuaties en de bemonsteringstijd. De afstand tussen de deeltjes is afhankelijk van de grootte van de te meten fluctuaties. Voor de grootte van de deeltjes in verhouding tot het beeldoppervlak is al een vergelijking gevonden.

Bij het meten van turbulente structuren moeten er eerst metingen uitgevoerd worden om vast te stellen hoe groot de turbulente structuren zijn en welke periode ze ongeveer bezitten. Aan de hand hiervan kan de grootte van de te volgen deeltjes worden bepaald. Aan de hand van de grootte van de te volgen deeltjes kan de maximale beeldgrootte worden bepaald.

Het is interessant om te onderzoeken of de gemeten fluctuaties buiten de menglaag te maken hebben met de turbulente structuren in de menglaag. De Laser Doppler metingen in de menglaag in ondiep water doen vermoeden dat dit inderdaad het geval is. Ook de observaties in de haven doen vermoeden dat de golfslag opgewekt bij de menglaag in de havenmonding

(door visuele constatering) gecorreleerd is met de structuren in die menglaag.

De structuren worden veroorzaakt door wervel paring. In het havenmodel is geconstateerd (weer visueel) dat deze paring structureel met meer dan twee wervels tegelijk gebeurt. Het is interessant om te onderzoeken wat daar de oorzaak van is.

De aanname dat de deeltjes de stroming oneindig goed volgen is principieel onjuist. Voor fundamenteel onderzoek met deze methode is het onontbeerlijk dat er tenminste een schatting kan worden gegeven in hoeverre deze aanname geldig is en welke fout er dan bij gemaakt wordt.

5.2.2 Aanbevelingen gemiddelden

In de metingen in de goot is geconstateerd dat de snelheidsverdeling anders is dan vooraf aangenomen. Er is hier nog geen afdoende verklaring voor gevonden (of het is een meetfout die niet is gevonden of de snelheid is inderdaad anders dan aangenomen enkele aanwijzingen daarvoor zijn de ongewone verdeling van de te volgen deeltjes in de zeef zoals geconstateerd bij de gootmetingen en de hogere gemiddelde snelheid als verwacht bij de LDA metingen)

Een van de constatering bij middeling van snelheden is dat voor een juist gemiddeld plaatje er een egale verdeling moest zijn. Het is nog niet duidelijk hoe groot het effect is als de verdeling niet egaal is. Berekening van de gemiddelde concentratie op een plaats is van belang om eventueel dit effect te kunnen kwantificeren.

Een andere aanbeveling is dat er nog verder gekeken moet worden naar de methode van middeling. In verband hiermee is ervoor gekozen om niet de standaard methode te gebruiken, maar om de middeling met een gewichtsfactor uit te voeren. Dit levert een betere schatting voor de gemiddelde snelheid op een plaats. De vergelijking met de gemiddelde snelheid in een vak, zoals die meestal wordt uitgerekend in een Eulerse benaderingsmethode wordt daardoor slechter.

De meetmethode is zeer geschikt voor het bepalen van gemiddelde snelheden aan het oppervlak. Dit maakt het een zeer geschikt hulpmiddel voor het analyseren van de complexe stroming rond een obstakel in de stroming. Hierbij moet wel in gedachten worden gehouden dat het niets zegt over de snelheidsverdeling over de diepte. Voor een volledig beeld moet deze op een andere wijze bepaald worden.

5.2.3 Aanbevelingen meetopstellingen

Ter verhoging van de dichtheid van deeltjes is het mogelijk om verschillende kleuren te gebruiken voor de deeltjes. Hiermee wordt een grotere afstand tussen gelijke deeltjes bewerkstelligd. Het succes van de methode is in hoge mate afhankelijk van de afstand tussen de deeltjes. Dit is een van de belangrijkste eisen voor het matchen van deeltjes.

Een aantal aanbevelingen zijn verwerkt in het hoofdstuk meetopstellingen deze houden verband met de kwaliteit van de beelden. Hoe deze kan worden onderverdeeld en wat de belangrijke aandachtspunten zijn:

- De aanbeveling dat er een zo hoog mogelijk contrast moet worden bewerkstelligd tussen de achtergrond en de te volgen deeltjes;
- egale verdeling deeltjes.

Er kan een verbetering in de beeldkwaliteit worden bewerkstelligd door de belichting van de opstelling. Er is al gesproken van demping van het licht dit vergroot de diffusie van het licht en is daarmee een goede egalisator. Daglicht is een zeer egale belichter. Als er voor gezorgd zou kunnen worden dat zonlicht voldoende egaal is levert dit de beste beeldkwaliteit. Zodra dit niet mogelijk is zal het zonlicht moeten worden gedempt en liefst worden verwijderd. Ook hier wordt al mee geëxperimenteerd.

5.2.4 Aanbevelingen verwerking

Bij de verwerking is de tijdsduur een beperkende factor. Deze kan worden verbeterd door meer te automatiseren. Als belangrijkste is het aan te bevelen om alle te gebruiken software

onder hetzelfde Operating System te laten draaien. Dit voorkomt veel ergernis en in mindere mate tijd. Het geeft ook de mogelijkheid om meer te automatiseren. Dit is voorlopig echter niet haalbaar: er zijn te veel programma's noodzakelijk voor de bewerking die door teveel verschillende mensen is geschreven.

Een tweede aanbeveling is de aanbeveling dat er nog veel te winnen is met het verbeteren van de calibratiemethode. Het grote probleem van de calibratie methode zoals gebruikt in de gootmetingen is dat het niet mogelijk is om in pixelcoördinaten geografisch te filteren. Dit omdat de geografische punten in zijn algemeenheid nauwkeuriger in pixelcoördinaten te meten is als in wereldcoördinaten. Dit moet redelijk eenvoudig te verhelpen zijn door de calibratie bijvoorbeeld na de matching uit te voeren. (en de snelheden daarmee eerst in pixels per frame uit te rekenen en vervolgens om te rekenen naar wereldcoördinaten).

Bij de opzet zijn nog enkele losse eindjes. Met name wat zijn de dimensies van de invoer van het PTV verwerkingsprogramma geschreven door van der Plas en Bastiaanse.

5.2.5 Aanbevelingen voor filtering van data

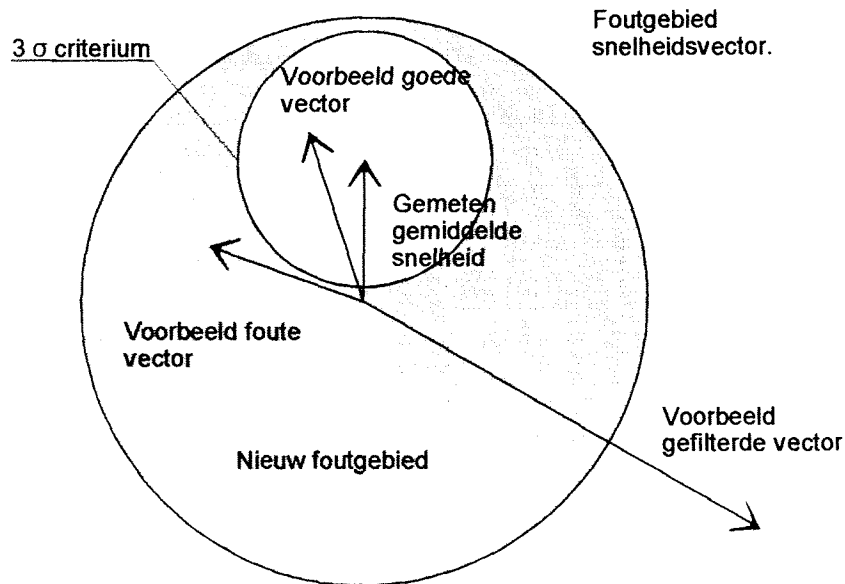
De filtering van data gebeurt nu op basis van een grove schatting van wat de gemiddelde snelheid zou moeten zijn. Nu kwam het ter sprake dat het mogelijk moest zijn om vanuit de gemiddelde waarde en de standaarddeviatie een foutfilter te maken. Dit is zeer goed mogelijk. In de handleiding van het natuurkundig practicum (1988) wordt gesproken over het uitschieters criterium. Zeker nu er geconstateerd is dat deze uitschieters bestaan is het mogelijk om deze te filteren volgens het volgende criterium:

$$|u(x,t) - \bar{u}(x)| < 3\sigma \quad (23)$$

waarin:

- $u(x,t)$ = gemeten snelheid
- $\bar{u}(x)$ = schatting van de gemiddelde snelheid u op plaats x uit de metingen met behulp van vergelijking (17)
- σ = schatting standaarddeviatie met behulp van vergelijking (16)

In figuur 46 is te zien wat de grafische betekenis is van het filter zoals gebruikt is in de metingen. Dit is de grote cirkel. De grafische betekenis van de gemiddelde snelheid is gegeven door de kleine cirkel. Het voordeel van deze methode is dat de fout veroorzaakt door de



figuur 46. De grafische betekenis van het filter voor foute matches afhankelijk van de geschatte gemiddelde snelheid.

filtering afhankelijk is van de gemiddelde snelheid en daarmee geen netto resultaat op het gemiddelde heeft (het is een nauwkeurige schatter).

Vergelijking (23) is een versie van de voorwaarde dat alle waarden die meer dan 3 keer de standaard afwijking zijn als uitschieters mogen worden opgevat (zie bijvoorbeeld Natuurkundig practicum 1988). Het voordeel is dat ook de gezonken deeltjes hiermee kunnen worden gefilterd .

LITERATUUR

Absil, L.H.J. 1995. Analysis of the Laser Doppler measurement technique for application in turbulent flows, dissertation, Delft University of Technology, Department of Aerospace Engineering, Delft.

Adrian, R.J. 1983. Laser Velocimetry, Chapter 5 in Goldstein, R.J. (editor), Fluid Mechanics Measurement, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, pp 155-244.

Bijvelds, M.D.J.P. 1997. Recirculating steady flow in harbours: comparison of numerical computations to laboratory measurements. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Hydromechanics and Geotechnical Engineering Division, Hydromechanics Section, Report no 1-97 p.16 figure 3.1

Bijvelds, M.D.J.P. 1997-II. Recirculating steady flow in harbours: comparison of numerical computations to laboratory measurements. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Hydromechanics and Geotechnical Engineering Division, Hydromechanics Section, Report no 1-97 p.54,55,58,59 and figures F.10,F.11,F.19,F.20

Booij, R. 1992. Turbulentie in de waterloopkunde. Blz 6. Diktatenverkoop Civiele Techniek.

Booij-II, R. 1992. Turbulentie in de waterloopkunde. Blz 26. Diktatenverkoop Civiele Techniek.

Booij-III, R. 1992. Turbulentie in de waterloopkunde. Blz 24. Diktatenverkoop Civiele Techniek.

Chu, V.H. & Babarutsi, S. 1988. Confinement and Bed-Friction Effects in Shallow Turbulent Mixing Layers. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No 10 October 1988.

Dracos et Al, 1996. A. Gruen Videogrammetry: Methodology and PTV/LIF Applications, part of ERCOFTAC Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measurements and Image Analysis

Techniques, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-4256-9. p. 183.

Dracos et Al, 1996-II. A. Gruen Videogrammetry: Methodology and PTV/LIF Applications, part of ERCOFTAC Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measurements and Image Analysis Techniques, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-4256-9. p. 182.

Durani, T.S. & Greated, C.A. 1977. Laser systems in flow measurements, Plenum Press, New York.

Durst, F., Melling, F.A. & Whitelaw, J.H. 1976. Principles and practice of Laser-Doppler Anemometry, Academic Press Inc., London.

Natuurkundig practicum 1988. Algemene instructie 5 betrouwbaarheidsintervallen paragraaf 9 blz 70-78.

Natuurkundig practicum 1988-II. Algemene instructie 5 betrouwbaarheidsintervallen paragraaf 10 blz 82-88.

Plas, G.A.J. van der & Janssen, A.J. 1996. Matching Algorithms for Particle Tracking Velocimetry, Third quinquennial review of the dutch society for pattern recognition and image processing.

Schijndel, S.A.H. van 1997. Aanslibbing van een rivierhaven. Delft University of Technology. Department of Civil engineering, Hydromechanics and Geotechnical Engineering Division, Hydromechanics Section, Graduation report. p.15-23

Somerscale, E.F.C. 1981. Tracer Methods, in Emrich, R.J., Methods of experimental physics, Vol. 18 part A, Academic Press Inc. New York, p. 1-239

Spencer, B.W. & Jones, B. G. 1971. Statistical investigation of pressure and velocity fields in the turbulent two-stream mixing layer. A.I.A.A. Paper, no 71-613.

Tennekes, H. & Lumley, J.L. 1972. A First Course in Turbulence. Cambridge, The M.I.T. Press

Tukker, J. 1997. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering (Turbulence structures in shallow free-surface mixing layers). ISSN 0169-6548 Report No. 97-2 p.45

Uijttewaal, W.S.J. & Tukker, J. 1998. Developement of quasi 2-D structures in shallow free-surface turbulence with lateral shear. Experiments in fluids 24, fig 8 p 196. Springer-Verlag 1998.

Uijttewaal, W.S.J. & Tukker, J. 1998-II. Developement of quasi 2-D structures in shallow free-surface turbulence with lateral shear. Experiments in fluids 24, fig 11 p 198. Springer-Verlag 1998.

Uijttewaal, W.S.J. & Tukker, J. 1998-III. Developement of quasi 2-D structures in shallow free-surface turbulence with lateral shear. Experiments in fluids 24, . Springer-Verlag 1998.

Winant, C.D. & Browand, F.K. 1974. Vortex pairing: the mechanism of turbulent mixinglayer growth at moderate Reynolds number. J. Fluid Mech. no 63 part 2-p243.

Winant, C.D. & Browand, F.K. 1974-II. Vortex pairing: the mechanism of turbulent mixinglayer growth at moderate Reynolds number. J. Fluid Mech. no 63 part 2 p249.

APPENDIX Afleidingen 1

APPENDIX Afleidingen

INHOUDSOPGAVE

Discretisatiefout in de ruimte	2
Foutformule gemiddelde	5

APPENDIX Afleidingen 2

APPENDIX afleidingen - Discretisatiefout in de ruimte

De fout veroorzaakt door discretisatie is te schrijven als de schatting dat het gemiddelde over die discretisatie gelijk is aan de meting in een punt. Deze fout is te schatten door de functie uit te schrijven als zijn Taylor ontwikkeling in een punt en vervolgens te controleren of de schatting gelijk is aan de werkelijke waarde:

$$V(x,y) + e_d = \frac{\int_{-\Delta a_x}^{\Delta a_x} \int_{-\Delta a_y}^{\Delta a_y} V(x+a_x, y+a_y) da_x da_y}{\int_{-\Delta a_x}^{\Delta a_x} \int_{-\Delta a_y}^{\Delta a_y} da_x da_y} = \quad (1)$$

$$\frac{\iint V(x,y) + (a_x \frac{\partial}{\partial x} + a_y \frac{\partial}{\partial y}) V(x,y) + \frac{1}{2!} (a_x \frac{\partial}{\partial x} + a_y \frac{\partial}{\partial y})^2 V(x,y) + O(a_x^3, a_y^3) da_x da_y}{4\Delta a_x \Delta a_y} = \quad (2)$$

de eerste twee termen van deze vergelijking zijn $V(x,y)$ en 0 de derde term vervalt tot:

$$\frac{\iint (a_x^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + a_x a_y \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + a_y^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2}) da_x da_y}{4\Delta a_x \Delta a_y} = \quad (3)$$

$$\frac{\int [\frac{1}{3} a_x^3 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{2} a_x^2 a_y \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + a_x a_y^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2}]_{-\Delta a_x}^{\Delta a_x} V(x,y) da_y}{4\Delta a_x \Delta a_y} = \quad (4)$$

$$\frac{\int (\frac{2}{3} \Delta a_x^3 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2\Delta a_x a_y^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2}) V(x,y) da_y}{4\Delta a_x \Delta a_y} = \quad (5)$$

$$\frac{[(\frac{2}{3} \Delta a_x^3 a_y \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{2}{3} \Delta a_x a_y^3 \frac{\partial^2}{\partial y^2}) V(x,y)]_{-\Delta a_y}^{\Delta a_y}}{4\Delta a_x \Delta a_y} = \quad (6)$$

APPENDIX Afleidingen 3

$$\left(\frac{1}{3}\Delta a_x^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{3}\Delta a_y^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)V(x,y) \quad (7)$$

Voor de fout ten gevolge van de discretisatie is nu te schrijven:

$$e_{discr} = \left(\frac{1}{3}\Delta a_x^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{3}\Delta a_y^2 \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)V(x,y) + O(\Delta a_x^3, \Delta a_y^3) \quad (8)$$

De tweede partiele afgeleide is te schatten als. Hierin is de stap in de grid gelijkgesteld aan het integratie oppervlak:

$$\frac{\partial^2 V(x,y)}{\partial x^2} \approx \frac{V(x+\Delta a_x, y) - 2V(x,y) + V(x-\Delta a_x, y)}{\Delta a_x^2} \quad (9)$$

en

$$\frac{\partial^2 V(x,y)}{\partial y^2} \approx \frac{V(x, y+\Delta a_y) - 2V(x,y) + V(x, y-\Delta a_y)}{\Delta a_y^2} \quad (10)$$

Deze schatter is afgeleid door eerst de twee afgeleiden rond het punt te schatten uit:

$$\frac{\partial V(x - \frac{1}{2}\Delta a_x, y)}{\partial x} \approx \frac{V(x,y) - V(x-\Delta a_x, y)}{\Delta a_x} \quad (11)$$

en

$$\frac{\partial V(x + \frac{1}{2}\Delta a_x, y)}{\partial x} \approx \frac{V(x+\Delta a_x, y) - V(x,y)}{\Delta a_x} \quad (12)$$

Nu kan de dubbele afgeleide geschreven worden als de afgeleide van de afgeleide en de afgeleide van de afgeleide van V in x,y kan op dezelfde wijze worden geschat als de afgeleide van V. Ingevuld levert dit de bovenstaande schatter voor de dubbele afgeleide.

Invullen van deze schatters voor de dubbele afgeleide van V in .. geeft:

$$e_{discr} \approx \frac{1}{3}(V(x+\Delta a_x) + V(x, y+\Delta a_y) + V(x-\Delta a_x, y) + V(x, y-\Delta a_y) - 4V(x,y)) \quad (13)$$

Dit is onder de aanname dat de fout ten gevolge van hogere afgeleiden te verwaarlozen is (=de term van $O(x^3y^3)$ veel kleiner is dan de voorgaande termen). Bij deze aanname is de schatter van de tweede afgeleide ook geldig. Hierbij wordt eveneens aangenomen dat de gemiddelde

APPENDIX Afleidingen 4

snelheid niet gewogen gemiddeld wordt. Dit zou de berekening ingewikkelder maken eveneens is het duidelijk dat de fout ten gevolge van de gewogen middeling kleiner is als de fout die hierboven geschat wordt.

In deze afleiding is verwaarloosd dat de ruimte middeling gebeurd is met een gewichtsfactor. Deze zou als volgt ingevuld moeten worden:

$$V(x,y)+e_d = \frac{\int_{-\Delta a_x}^{\Delta a_x} \int_{-\Delta a_y}^{\Delta a_y} w(x+a_x, y+a_y) V(x+a_x, y+a_y) da_x da_y}{\int_{-\Delta a_x}^{\Delta a_x} \int_{-\Delta a_y}^{\Delta a_y} w(x+a_x, y+a_y) da_x da_y} = \quad (14)$$

Dit levert echter een boel meer reken werk en in mijn geval gegarandeerd een fout antwoord. Omdat de gebruikte benaderingsmethode een nauwkeurigere schatting geeft van de benadering in het punt zal de fout zeker kleiner zijn dan zoals benaderd in (13).

APPENDIX Afleidingen 5

APPENDIX Afleidingen - Foutformule gemiddelde

Te beginnen met de doorwerking van imprecisie algemeen.

Schatting van de doorwerking van de imprecisie in het geval van $z=f(x,y)$ waarin x en y onafhankelijke stochastische variabelen zijn.

Zie

In het geval van onafhankelijk gemeten grootheden kan in benadering gesteld worden voor de schatting van de fout van de berekende grootheid z uit x en y:

$$(\delta z)^2 \approx \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 (\delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 (\delta y)^2 \quad (15)$$

voor afleiding zie natuurkundig practicum.

In geval van metingen kan de imprecisie van het gemiddelde worden uitgeschreven als de som van alle individuele metingen in termen van bovenstaande vergelijking wordt dit:

$$(\delta z)^2 \approx \sum \left(\frac{\partial f}{\partial u_n} \right)^2 (\delta u_n)^2 + \sum \left(\frac{\partial f}{\partial w_n} \right)^2 (\delta w_n)^2 \quad (16)$$

De schatter van het gemiddelde is als volgt

$$u(x_g^-) = \frac{\sum_{i=1}^n w(x_g, x_i) \cdot u(x_i)}{\sum_{i=1}^n w(x_g, x_i)} \quad (17)$$

Invullen van vergelijking (17) in (16) levert de vergelijking:

$$(\delta u(x_g^-))^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^n w(x_g, x_i) \cdot u(x_i)}{\partial u(x_i)} \right)^2 (\delta u(x_i))^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^n w(x_g, x_i) \cdot u(x_i)}{\partial w(x_g, x_i)} \right)^2 (w(x_g, x_i))^2 \quad (18)$$

APPENDIX Afleidingen 6

De eerste term wordt met de quotient regel:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{r=1}^n w(x_g, x_r) \cdot u(x_r)}{\sum_{r=1}^n w(x_g, x_r)} \right)^2 (\delta u(x_i))^2 = \quad (19)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n w(x_g, x_i)^2}{\left(\sum_{i=1}^n w(x_g, x_i) \right)^2} (\delta u(x_i))^2 \quad (20)$$

nu is het gemiddelde van $w=1/4$ en het gemiddelde van $w^2=4/9$ voor alle metingen met een gewicht groter dan nul.

Benaderen van optelsom van gewichten met n' *gemiddelde levert. Waarin n' het aantal metingen waarop het gemiddelde is gebaseerd (om dit te mogen moet de berekening van het gemiddelde gebaseerd zijn op minstens tien metingen of daaromtrent)

$$\frac{16}{9n'} (\delta u(x_i))^2 \quad (21)$$

Uiteraard is het veel beter om formule (20) uit te laten rekenen door de computer in geval van weinig metingen. Voor de schatting van de fout in het gemiddelde is (21) wel veel makkelijker en het kost nogal wat programmeertijd extra om formule (20) uit te rekenen (w^2 moet worden berekend wat niet direct gebeurt).

De tweede term:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{r=1}^n w(x_g, x_r) \cdot u(x_r)}{\sum_{r=1}^n w(x_g, x_r)} \right)^2 (\delta w(x_g, x_i))^2 = \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{u(x_i)}{\sum_{r=1}^n w(x_g x_r)} - \frac{\sum_{r=1}^n w(x_g x_r) \cdot u(x_r)}{\sum_{r=1}^n w(x_g x_r)^2} \right)^2 (\delta w(x_g x_i))^2 = \quad (23)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (u(x_i) - (u(x_g^-))^2)}{n' \left(\sum_{i=1}^n w(x_g x_i) \right)^2} (\delta w(x_g x_i))^2 \quad (24)$$

Gezamenlijk wordt de foutformule:

$$\frac{16}{9n'} (\delta u(x_i))^2 + \frac{\sum_{i=1}^n (u(x_i) - (u(x_g^-))^2)}{n' \left(\sum_{i=1}^n w(x_g x_i) \right)^2} (\delta w(x_g x_i))^2 \quad (25)$$

APPENDIX Dataverwerking 1

APPENDIX Dataverwerking

INHOUDSOPGAVE

Apparatuur data-acquisitie	3
Digital Video Camera Recorder	3
Digital Video Still Image Capture Board	3
Digital Video Cassette Recorder	4
Computer	4
Opstelling verwerkingscomputer	5
Hardware	5
Software	5
Handleiding Maken Portable Gray Maps (PGM)	6
Inleiding	6
Selecteren van beelden	6
Inhalen van de beelden.	6
Omzetten van DVA naar BMP formaat.	6
Omzetten van BMP formaat naar PGM formaat	6
Transport naar UNIX	7
Handleiding PTV-code	8
Inleiding	8
Invoereisen voor de grijswaarde bitmaps	8
Vertaling van dos naam naar invoernaam van de PGM files	8
Aansturen van de ptv code	9
Runnen van de ptv-code.	11
Parameterschatting	12
Optimalisering van de parameters	12
Post processing	12
Help fpost	13
Handleiding calibratie	15
Inleiding	15
Meting van pixel-coördinaten.	15
Meting van wereldcoördinaten.	15
Invoeren van coördinaten in de configuratiefile	15
Fout in calibratie	16
Handleiding middeling	17
Start van het programma	17
Instellingen programma	18
Programma menu	18
Uitvoer middelingsprogramma	21
Uitvoer na middeling	22

APPENDIX Dataverwerking 2

Uitvoer na berekening standaarddeviatie	22
Uitvoer na berekening van de turbulente delen	22
Uitvoer na omzetting naar wereld-coördinaten.	23

APPENDIX Dataverwerking 3

APPENDIX Dataverwerking - Apparatuur data-acquisitie

Hieronder volgt een korte beschrijving van de eigenschappen en namen van de diverse apparatuur die gebruikt zijn bij het filmen en het verwerken van de gefilmde beelden tot BMP-formaat.

. Digital Video Camera Recorder. SONY Digital Handycam serienr. DCR-VX700E.

Technische gegevens:

video opnamesysteem:	Twee draaiende koppen, helical scanning.
Audio opnamesysteem:	Draaiende koppen, PCM-systeem.
Videosignaal:	PAL-kleuren, CCIR-normen
Bruikbare cassette:	miniDV cassette met logo
Bandsnelheid:	Ong. 18,81 mm/s
Beeldsysteem:	ICCD (Charge Coupled Device)
Beeldzoeker:	Electronische beeldzoeker
Lens:	10x (Optisch), $f = 6,1$ mm tot 61 mm Filterdiameter 52 mm TTL autofocus systeem. Inner focus wide macro system.
Kleurtemperatuur:	Auto/ Hold /binnen (3200K) /buiten (5800K)
Minimale belichting:	31x(F1.6)
Belichtingsbereik:	3 lx tot 100.000 lx (aanbevolen >100 lx)
regelbare sluitertijd:	1/4 tot 1/4000

. Digital Video Still Image Capture Board. SONY serienr DVBK-1000E

Technische gegevens:

Capturer:	
Vastgelegd bestandsformaat:	DV-standaard (SD-specificatie)
Maximaal aantal vastgelegde beelden:	100 per album
Voorbeeld venster:	160x120 pixels
Viewer:	
Decoderings formaat:	DV full decode 768x567 pixels (normaal beeld) 1024x 567 (breedbeeld)
Opslagformaat:	BMP (=16000 kleuren bitmap)formaat

Informatie conversie filters:

van DV-formaat naar BMP formaat.

van rechthoekige pixels (720x567) naar vierkante pixels (768x567) met beeldverhouding 3:4

Deinterlace filters

Adaptive:

Veldbeelden worden vergeleken en samengevoegd.

Field:

Een van beide halve beelden wordt gebruikt voor het maken van een compleet beeld, door

APPENDIX Dataverwerking 4

interpolatie tussen de halve beelden.

. Digital Video Cassette Recorder. SONY serie nr DHR-1000VC

Technische gegevens:

Opname formaat: DV standaard (SD specificaties)

Videosignaal: CCIR STANDAARD, PAL kleursysteem, B/G.

Bruikbare cassettes: DV cassettes en DV mini cassettes
video

Kwantiseringswoordlengte: 8-bit

Sample frequentie: 13.5 MHz

Compressiesysteem: Inner field/frame discrete cosine transform (DCT) 24.948
Mbps.

Horizontale resolutie: meer dan 500 lijnen.

. Computer

technische gegevens:

128 meg DIMM geheugen

200 Mhz kloksnelheid MMX

Opstelling verwerkingscomputer

Hardware

Het aansluiten van de hardware is gebeurd en staat in het Laboratorium van Vloeistofmechanica. De hardware bestaat uit:

- een videocamera;
- een computer;
- een video recorder voor minicassettes van DVCam;
- een videokaart te installeren in de computer;
- een extra monitor aangesloten op de recorder.

Software

Op de computer is een aantal programma's geïnstalleerd die zijn gebruikt voor de verwerking van de beelden:

- 1 DV-Capture;
- 2 Paint Shop Pro;
- 3 UNIX omgeving;
- 4 PTV programma;
- 5 NORTON COMMANDER 5.0;
- 6 Middelingsprogramma;
- 7 GNUPLOT.

1 is een videograbber, die in staat is de opnames om te zetten naar een BMP formaat.

2 is een tekenprogramma waarin een batchprogramma voor het in batch converteren van BMP (xxx kleuren bitmap) naar PGM formaat.

3 UNIX is geïnstalleerd omdat het PTV programma onder unix werkt.

4 Het PTV programma vertaalt de PGM's naar snelheden (in combinatie met een calibratie).

5 NORTON COMMANDER 5.0 heeft een dos-emulator die ervoor zorgt dat windows 95 op de achtergrond mee blijft draaien, zodat tegelijk gnuplot en het middelingsprogramma kan draaien.

6 middelingsprogramma Dit programma middelt de snelheden gevonden met het PTV programma naar een rooster.

7 Gnuplot visualiseert de diverse files naar een leesbaar formaat. Dit betekent dat de snelheden die gegeven zijn in meters per seconde geplot worden op de plek waar ze zijn gemeten in meters.

Voor een korte handleiding over het gebruik van deze programma's voor het traject beelden - verwerken snelheden wordt verwezen naar de handleidingen in deze bijlage.

APPENDIX Dataverwerking 6

APPENDIX Dataverwerking - Handleiding Maken Portable Gray Maps (PGM)

Inleiding

In deze handleiding staat beschreven hoe metingen, gefilmd met een Sony DVCam, verwerkt kunnen worden tot een Portable Gray Map (PGM).

De Sony DVCam schrijft de gefilmde beelden naar een tape in een speciaal formaat, het DVA formaat.

Om deze beelden verwerkbaar te maken op een computer is er een videokaart nodig om de beelden die op de band staan over te kunnen zetten op een computer. Deze videokaart komt met software om deze beelden te kunnen selecteren en om te zetten naar een gangbaar bitmap formaat.

In de handleiding van de beeld grabber van Sony staat hoe de beelden geselecteerd kunnen worden.

Selecteren van beelden

Voor het selecteren van beelden is het nuttig om een monitor aan te sluiten op de videorecorder. De grabber heeft wel een ingebouwde monitor, maar deze heeft twee nadelen om die de draaien kost extra rekentijd en geheugen, waardoor het grabben langer duurt en het beeld de monitor heeft onvoldoende resolutie. Nu kunnen de gewenste beeldframes worden uitgekozen.

Inhalen van de beelden.

Nu bekend is welke beelden gebruikt gaan worden kunnen ze in een album op de D partitie in de computer worden opgeslagen. Dit gebeurt door de beelden te grabben met behulp van de capture auto knop. Omdat de beelden niet exact het aantal beelden overslaat is het makkelijk om de band te vertragen en de autoknop daarna in te drukken. Vervolgens kunnen dan de ongewenste beelden worden gewist door ze te selecteren en te verwijderen.

Omzetten van DVA naar BMP formaat.

De DV-Capturer leest de beelden in in DVA formaat dit is een comprimeringsmethode. De software bij DV-Capture kan de beelden niet naar PGM formaat converteren. Wel naar een 16 miljoen kleuren bitmap (BMP). Dit doe je door eerst alle beelden te selecteren en vervolgens de knop conversie naar BMP in te drukken.

Omzetten van BMP formaat naar PGM formaat

Dit kan bijvoorbeeld met Paint Shop Pro. Deze heeft de functie batch conversion. Door deze aan te klikken komt er een menu in beeld. In dit menu moet eerst de directory waarin de BMP files staan worden aangegeven. Nu kunnen deze files worden geselecteerd. Vervolgens kan de uitvoerdirectory worden gegeven. Dit kan rechtstreeks op de C-partitie, maar het is aan te

APPENDIX Dataverwerking 7

bevelen om de PGM files eerst in dezelfde directory te schrijven als de BMP files in verband met mogelijk ruimte gebrek op C:. Als bij kopiëren blijkt dat de schijf nog vol is kan er eest ruimte gemaakt worden zonder dat weer de files geconverteerd hoeven te worden.

Transport naar UNIX

Nu kunnen de PGM files worden getransporteerd naar de UNIX omgeving. Dit gebeurt door de computer opnieuw op te starten en vervolgens als er naar gevraagd wordt F3 in te tikken. In UNIX kan de C-schijf worden gelezen. Zodoende kunnen de PGM files worden gekopieerd en worden omgezet naar de juiste naam. Dit is te lezen in handleiding PTV-code.

APPENDIX Dataverwerking 8

APPENDIX Dataverwerking - Handleiding PTV-code

Inleiding

Deze handleiding beschrijft de handelingen die verricht moeten worden om van de meetgegevens (De portable graymaps) snelheidsvelden te verkrijgen. Ook zal daarna worden beschreven hoe deze snelheidsvelden worden verwerkt met het postprocessing programma.

Invoereisen voor de grijswaarde bitmaps

De portable graymaps moeten een bepaalde naam krijgen om te kunnen worden verwerkt in de PTV programmatuur aanwezig in het laboratorium voor vloeistofmechanica.

Deze naam bestaat uit drie delen: xxx.#####.pgm.

xxx is een willekeurige seriecode die de opeenvolgende beelden krijgen. Het is belangrijk dat deze met enige zorg gekozen wordt, omdat je al snel veel series hebt.

is een teller bestaand uit vijf getallen, dus 1 is 00001 enz. anders herkent het programma de file niet.

pgm betekent dat het een Portable Gray Map is.

Vertaling van dos naam naar invoernaam van de PGM files

Het is te prefereren om direct in het capture programma de juiste naam te gebruiken. Indien dit niet mogelijk is, bijvoorbeeld doordat het capture programma geen lange namen ondersteunt, kan de naam aangepast worden met de awk. Dit is een programmataal die systeem commando's uit kan voeren (zoals een batchfile maar dan uitgebreider). Er is in deze taal een eenvoudig programma geschreven, om de namen om te zetten.

Dit programma is te vinden in de file t.awk en ziet er als volgt uit:

```
BEGIN{
    for(i=0;i<100;i++)
    {
        command = sprintf("mv xxx%04d.pgm xxx.%05d.pgm\n",i,i);
        system(command);
    }
}
```

Het is makkelijk om de naam van de pgm-files zo dicht mogelijk bij de gewenste naam te houden. In dit geval was de gewenste naam 113.#####.pgm. De gekozen naam in het capture programma was 113####.pgm.

In de regel:

```
sprintf("mv xxx%04d.pgm xxx.%05d.pgm\n",i,i);
```

staat dat de filenaam xxx####.pgm vervangen moet worden door xxx.#####.pgm voor een bepaalde waarde van i.

".. ..%04d\n",i betekent vul de waarde i in op plaats d met 4 getallen.

Ook als een andere seriecode gewenst is kan dat door in de tweede filenaam bij xxx een andere code in te voeren.

APPENDIX Dataverwerking 9

Nu kunnen de pgm files worden gelezen door het ptv programma.

Aansturen van de ptv code

Het programma wordt aangestuurd door een invoerfile. Deze moet met de vi-editor worden veranderd. De invoerfile heeft in het algemeen een toevoegsel .cfg. Deze ziet er als volgt uit:

```
# This is a commentline.
# Commentlines start with "# ".
# Their maximumlength is 254 characters.
#
# A configfile exists out of configchunks.
# Each chunk starts with a configtag as chunkheader and is followed with
# the correct number and type of parameters. Commentlines should stand
# outside configchunks.
#
# EExperimentTag needs respectively:
# basefilename
# sample start number
# sample end number
# sample step
# samplespacing
#
# the program uses this to read imagefiles named. basefilename.####.pgm
# ##### running from sample start number to sample end number with
# increments of sample step.
#
# samplespacing is the time between two samplenumbers
EExperimentTag
111
0
99
1
0.08
# End of a chunk. Comments may be placed here.
# EInterlaceFilterTag
# 1
# 0
EBlobValidatorTag
1
40
EBlobDetectorTag
1
40
40          <*****
EMatcherTag
0.008       <*****
ECostSort
EMinMaxSubFilterTag
3
3
# Estimation type, number of data points, xpixel ypixel xworld yworld
ECalibratorTag
EBiLinear
18
380.514 541.326 0.7325 3.4960
548.753 543.178 0.7415 3.9960
717.738 541.814 0.7305 4.4960
299.719 461.132 0.5000 3.2565
380.795 461.897 0.5000 3.4960
```

APPENDIX Dataverwerking 10

```
549.545 461.947 0.5000 3.9960
717.742 462.095 0.5000 4.4960
294.332 287.357 0.0000 3.2415
381.355 288.175 0.0000 3.4960
551.106 288.760 0.0000 3.9960
719.412 289.945 0.0000 4.4960
300.016 113.388 -0.5000 3.2555
381.538 114.022 -0.5000 3.4960
551.748 115.027 -0.5000 3.9960
720.879 115.812 -0.5000 4.4960
381.830 30.3008 -0.7305 3.4960
551.769 32.0930 -0.7495 3.9960
721.959 30.0073 -0.7425 4.4960
# EPredictorTag contains:
# 1) the maximum order of extrapolation for position prediction [1..5].
# 2) maximum neighbourdistance, 0.0 = off
# 3) SumOfNeighbourWeights, 1.0 default
# 4) NeighbourWeightType; ETophat, EGaussian, or EFourier
# 5) backgrounddistance, 0.0 = off
# 6) BackgroundWeightType; ETophat, EGaussian, or EFourier
EPredictorTag
2
32.0
1.0
EGaussian
0.0
EGaussian
# EExecutorTag
# fptvpiv %d
EEndTag
```

De file is opgebouwd uit tags. Hier volgt in het kort wat deze doen:

EExperimentTag

Hier wordt vastgelegd hoe de pgm files heten. Ook kun je aangeven wat het tijdsinterval is tussen twee beelden.

EBlobValidatorTag

EBlobDetectorTag

Niet geheel duidelijk geworden is waarom er verschillende waarden voor Blob validatie en blob detectie wordt gemaakt. Hier vul je voor beiden hetzelfde getal in de waarden moeten voor zover ik kan nagaan in pixels worden gegeven. Ik heb hier niet geprobeerd verschillende waarden in te vullen.

Bij EBlobDetectorTag is de derde waarde (met pijl er achter) als het goed is de thresholdwaarde voor het detecteren van een deeltje. Deze is van groot belang voor de kwaliteit van de gevonden waarden.

Een te lage waarde geeft te veel ruis in het onderscheiden van deeltjes waardoor er teveel foute waarden gevonden worden.

Een te hoge waarde zorgt ervoor dat er te weinig deeltjes worden gevonden zodat er eveneens teveel foute waarden komen (of zelfs geen waarden als de waarde boven de grens van de deeltjes komt).

De waarde is gerelateerd aan de pgm grijswaarde (deze schaal loopt van 0 255). Meestal is een waarde van tussen de 40 en de 100 redelijk acceptabel. Er moet door invullen van meerdere waarden een optimum gevonden worden.

EMatcherTag

Deze waarde geeft het zoekvolume (in dit geval zoek oppervlak) aan waar de matching nog mogelijk is. De waarde wordt aangegeven in maximale afstand tot de verwachte verplaatsing, deze moet gegeven worden in de lengte maat waaring gecalibreerd is.

ECostSort is kennelijk de waarde welke manier van kosten minimalisatie is gebruikt.

EMinMaxSubFilterTag

Hier wordt de grootte van het gebied waar de minmaxsub filter over filtert. De twee getallen zijn de grootte van de box waarover deze filter wordt uitgevoerd in pixel coördinaten te onderscheiden in x en y pixels. De grootte van de getallen houdt in dat er in beide richtingen wordt bedoeld. Ergo de grootte van het rechthoekje is in het geval dat x en y wordt ingevoerd wordt de grootte van het rechthoekje: $(2x+1)*(2y+1)$ pixel².

De consequenties voor een groter blok is een grotere rekentijd met als voordeel een hoger contrast.

ECalibratorTag

EBiLinear

Dit is de wijze waarop de waarden worden geïnterpoleerd naar bekende waarden. Er zijn voor zover bekend twee mogelijkheden geprogrammeerd: EBiLinear en EBiQuadratic.

EBiQuadratic is wat erg "instabiel" c.q. doet het niet (Het is wel de meest geëigende methode daar de systematische lensfout ook een kwadratische functie is).

EBiLinear bepaalt een lineair transferfunctie uit de punten die zijn ingevoerd met behulp van de kleinste kwadraten methode. Deze werkt wel.

EPredictorTag

Hier staat bij wat er bedoeld wordt. Het is alleen onduidelijk wat bedoeld wordt met neighbourdistance (Vermoedelijk de afstand tot de meting waarbij deeltjes nog meegerekend worden als burens). Evenmin is duidelijk in welke dimensie deze waarde ingevuld moet worden (de gok was pixels)

SumOfNeighbourWeights.

Ik neem aan dat hiermee bedoeld wordt dat het gewicht van de correlatie berekening in de kostenfunctie die gebruikt wordt meetelt met een gewicht van 1 (Ten opzichte waarvan is niet geheel duidelijk).

ETophat, EGaussian, or EFourrier.

Ik kan me voorstellen dat bedoeld wordt dat het gewicht van een buur afhankelijk is van de afstand tot de meting en dat die volgens een bepaalde formule afneemt. Welke deze formules zijn is nog compleet onduidelijk al vermoed ik bij EGaussian een Gauss hoedje. Daarom(?) is er gekozen voor EGaussian.

backgrounddistance.

Ik vermoed dat er bedoeld is dat er een achtergrond snelheid wordt gebruikt die in afstanden moet worden ingevuld. Iets anders invullen dan 0.0 levert slechte resultaten.

Runnen van de ptv-code.

Als de configuratiefile naar tevredenheid is ingevuld kan het programma gerund worden. Dit

APPENDIX Dataverwerking 12

wordt gedaan door bij de prompt in te tikken:

```
[username]~/>fptv <configfile> <outputfile>
```

Probeer zoveel mogelijk dezelfde basefilenaam te gebruiken ook voor configuratiefiles en uitvoerfiles. Meestal wordt voor de configfile <basefilenaam>.cfg (als in ConFiGuratiefiler) gebruikt. Voor de uitvoerfile wordt meestal de extensie <basefilenaam>.ptd (als in Particle Tracking Datafile) gebruikt. Het is overigens mogelijk om willekeurige namen te kiezen.

Parameterschatting

Voor zover bekend zijn de belangrijkste twee parameters voor het verbeteren van de kwaliteit en het matching percentage de twee die met een <*****> zijn aangegeven.

Het verdient de voorkeur om deze parameters te optimaliseren door waarden uit te proberen. Hierbij moeten de waarden zo klein mogelijk gehouden worden zonder dat de kwaliteit van de snelheden achteruit gaat (met kwaliteit wordt bedoeld het percentage juiste vectoren van het totaal aantal gevonden vectoren).

Ook het aantal gevonden snelheden moet vergelijkbaar zijn met het aantal gevonden deeltjes (in het geval van mijn metingen waren er veel "spook"deeltjes door de dwarsbalken in het beeld. Dit resulteerde in het vinden van ongeveer 200 deeltjes te veel. Normaal gesproken is dit te veel, tenzij er andere vervuillingsbronnen aanwezig zijn (bijvoorbeeld als niet het gehele meet gebied water is en er buiten het gebied deeltjes gevonden worden).

Optimalisering van de parameters

Het optimaliseren van de parameters gebeurt door een aantal snelheidsvelden te creëren met de particle tracking code. Daarna kan visueel worden gecontroleerd hoe de beelden veranderen ten opzichte van de vorige instelling. Verander niet meer dan een parameter tegelijk. Als het optimum voor de ene parameter is gevonden kan de andere parameter worden geoptimaliseerd. Controleer daarna weer de eerste parameter. Als de kwaliteit niet meer verbetert is het optimum gevonden voor de betreffende beelden. Als de kwaliteit nog wel verbetert zoek dan het nieuwe optimum voor de parameter en controleer daarna weer de andere. Vervolg dit totdat er geen verbetering meer zichtbaar is.

Neem voor het optimaliseren van de parameters niet alle beelden uit een serie. Veel beelden geven geen duidelijker beeld dan een beperkt aantal beelden. Meestal is de kwaliteit al redelijk te beoordelen bij 15 beelden.

Als de parameters geoptimaliseerd zijn kan de complete serie worden verwerkt. Pas de waarden van de filetelletter aan en verwerk de serie met de geoptimaliseerde parameters.

Post processing

Er wordt door fptv een datafile aangemaakt. Uit deze data file kunnen diverse data worden geëxtraheerd. Dit gebeurt met behulp van het programma fpost (geschreven door G. van der Plas en R. Bastiaanse). Dit programma kan worden aangeroepen vanaf de prompt.

```
[username]~/pathname>fpost
```

Om fpost te kunnen aansturen is er een extra awk script nodig. Deze maakt het in feite overbodig om te weten hoe het programma aangestuurd wordt, omdat deze awk script fpost

APPENDIX Dataverwerking 13

aanstuurt met de argumenten die u invoert. Voor de volledigheid is deze aan het eind van deze alinea toegevoegd.

In het helpscherm van fpost is te lezen welke benadering gebruikt is voor de snelheid. De benadering houdt in dat er altijd een dubbele tijdstap wordt gebruikt om de gemiddelde snelheid over het interval $\{s-1\}$ tot $\{s+1\}$ te schatten met de verplaatsing in een tijdinterval gedeeld door dat interval (zie ook formule 3.1 in het verslag). De plaats van deze snelheid wordt benaderd met de plaats van het deeltje op $t=s$.

De awk script file die de fpost aanstuurt ziet er als volgt uit:

```
#!/usr/bin/awk -f
BEGIN{

    if(ARGV[1]=="v")
    {
        print "Please have patient, calculating
velocityfields";
        for(i=ARGV[2];i<ARGV[3];i+=ARGV[4]){
            command = sprintf("fpost %d %d r %s
>%s%04d.vel"
, i, ARGV[5],ARGV[6],ARGV[7],i);
            print command;
            system(command);
        }
    }
    if(ARGC == 1 || ARGV[1]=="-h")
    {
        print "movie mode startsample endsample step
pathlength
datafile basefilenaam";
        print "mode: v = raw velocities, a = averaged
velocities
, p = paths";
    }

}
```

movie startsample endsample stap pathlength datafile basefilenaam

Help fpost

[username]~/pathname>fpost

Het aanroepen van het programma zonder parameters geeft de hulp voor het programma.

De help van fpost is hieronder afgebeeld:

```
*** TERMINAL ERROR:  wrong number of arguments

usage: fpost <s> <p> <option> <tracking_datafile.ptd>

option is:
f: writing forward particle paths
s = starting sample number
```

APPENDIX Dataverwerking 14

```
p = maximum pathlength (= occurred matches)
b: writing backward particle paths
s = starting sample number
p = maximum pathlength (= occurred matches)
r: writing raw velocities
s = sample number for velocity calculation
p = pathlength (= occurred matches)
calculating:
x_{U} = x_{s}
y_{U} = y_{s}
U_{x} = (x_{s+1} - x_{s-1}) / (t_{s+1} - t_{s-1})
U_{y} = (y_{s+1} - y_{s-1}) / (t_{s+1} - t_{s-1})
```

copyright 1997 Eindhoven University, Gert van der Plas & Rob Bastiaans.

In het helpscherm is te lezen welke benadering gebruikt is voor de snelheid. De benadering houdt in dat er altijd een dubbele tijdstap wordt gebruikt om de gemiddelde snelheid over het interval $\{s-1\}$ tot $\{s+1\}$ te schatten met de verplaatsing van het deeltje in dat interval gedeeld door de tijd die die erover doet (zie ook formule 3.1 in het verslag). De plaats van deze snelheid wordt benaderd met de plaats van het deeltje op $t=s$.

APPENDIX Dataverwerking - Handleiding calibratie

Inleiding

De calibratie van de PTV data is gebaseerd op het schatten van een lineaire transformatiefunctie uit een aantal punten gemeten in zowel globale als pixel coördinaten. Zie hoofdstukst.

Hiervoor moeten ten minste tien punten in zowel pixel als globale coördinaten worden gemeten. Bij tien kan de fout in de meting van de coördinaten worden verwaarloosd.

Meting van pixel-coördinaten.

De pixel-coördinaten worden gemeten met behulp van de PTV-code. Het komt er op neer dat er punten worden vastgelegd met behulp van de tracker deeltjes die zijn gebruikt bij de PTV-metingen. Dit wordt gedaan door de PTV code te runnen met een aantal opeenvolgende beelden van de calibratie deeltjes.

Meting van wereldcoördinaten.

De globale coördinaten worden vastgelegd door ze op te meten met behulp van een meetlat. (In het geval van de ondiepwatergoot was dit door de y positie van de kar te meten en vast te leggen in kar coördinaten wat de posities van de calibratiedeeltjes zijn). Deze moeten bij de hand worden gehouden tijdens het invoeren in de configuratiefile van de PTV-code.

Invoeren van coördinaten in de configuratiefile

Het invoeren in een configuratie file vereist enige zorgvuldigheid. Het is erg lastig om alle waarden juist af te lezen. Om de kans op juist aflezen te verhogen is de volgende methode ontwikkeld.

In UNIX is het mogelijk om in meerdere windows tegelijk te werken. Dit is ongeveer op dezelfde manier als bij windows.

In beeld kunnen nu de globale en de pixel coördinaten worden weergegeven.

Ook is het handig om de calibratie punten te benoemen in een figuur. Deze zou eventueel op het beeldscherm kunnen, maar door plaatsgebrek heb ik deze als zelfgetekend plaatje er bij gehouden.

Vervolgens kan ook in beeld via gnuplot een afbeelding geplot worden van de file met pixel coördinaten. Dit kan door alleen de plaats van de gemeten punten te plotten. In het algemeen heeft een bitmap zijn nulpunt in de linker bovenhoek van het beeld. Normaal plotten van de gemeten punten zou een spiegelbeeld opleveren. Door range van de y-as omgekeerd in te voeren keer ook de plot om. Dit kan door het commando `set yrange [600:0]` in gnuplot). Let ook op hoe de camera positie is. Dit betekent dat de gnuplot 90 graden gedraaid kan zijn ten

opzichte van de tekening. Handig is dan om de tekening ook op dezelfde manier te draaien. Dit voorkomt misverstanden.

De meting gaat nu als volgt. Het calibratiepunt wat als eerst is benoemd is in de tekening wordt als eerste in de configuratie file ingevoerd. Eerst worden de pixel coördinaten van het eerste punt geschat met behulp van de gnuplot door aflezen ook de x en y assen. Vervolgens wordt het dichtstbijzijnde punt opgezocht in de PTV-file. Om deze sneller terug te kunnen vinden kan deze worden gehighlight met een blok. Vervolgens kunnen zowel de pixel als de globale coördinaten achtereenvolgens worden ingevoerd. Dit wordt herhaald totdat alle coördinaten van alle punten zijn ingevoerd.

Fout in calibratie

De fout in de meting van de coördinaten is vrijwel volledig afhankelijk van de meting van de globale coördinaten. Deze coördinaten kunnen niet nauwkeuriger worden geschat dan tot op 1 mm. De meting van de pixel coördinaten is tot op 0.1 pixel dit betekent $600 \cdot 0.1 = \text{orde } 0.3$ mm. Dit is veel minder dan de fout in de globale coördinaten. Verder is nog steeds geldig dat de fout in de benadering dat de overdrachtsfunctie lineair is nog steeds vele malen groter is dan de fout in de meting van de coördinaten. Ik neem aan dat dit in de toekomst anders zal worden.

APPENDIX Dataverwerking - Handleiding middeling

Start van het programma

Ga naar de directory waar het aangepaste middelingsprogramma staat en start het programma door de naam in te tikken op de prompt. Als alles goed gaat zal er het volgende op uw beeldscherm verschijnen:

```
geef een naam voor de file met de seriecodes;
```

Nu moet U een naam invoeren voor de invoerfile waar de serie zijn gegeven.

Indien U een nieuwe serie wilt beginnen moet U een nieuwe naam opgeven. Helaas is het nodig om het volledige pad op te geven voor de file seriecodes. Anders wordt deze file bijgeschreven in de current directory (meestal D:\tp als u van daaruit het programma heeft gestart). Het volgende verschijnt op uw beeldscherm

```
Wilt u deze seriecodefile aanmaken  
Druk J/j voor ja of andere toets voor nee
```

Druk op J of j gevolgd door enter als u een nieuwe file wilt aanmaken. Druk anders op enter.

Het volgende zal op uw beeldscherm verschijnen:

```
Geef de vier letters waarmee de serie is gecodeerd:  
Of druk enter als u alle gewenste series heeft ingevoerd
```

Helaas wordt hiermee bedoeld dat het gehele padnaam voor de seriecode erbij moet, (zoals D:\ptvdata\menglaag\581\stap2c\b12) anders zoekt het programma alleen in het current pad. Ook is het niet verplicht om vier letters te gebruiken. Het mogen er ook minder zijn.

Kies de vier letters waarmee gecodeerd wordt zodanig dat uit de naam op te maken is welke serie is gebruikt. Het zijn normaal gesproken de eerste vier letters van de uitvoerfile. De overige vier worden gebruikt om aan te geven in millimeters wat de gridafstand is. Dit kan problemen leveren als de coördinaten in pixels zijn. Dit moet of in het programma worden verholpen of je definieert een nieuwe uitvoerfile bij elke serie die wordt verwerkt. Anders kunnen er illegale karakters worden gemaakt in de naam zoals spaties ? * enz.

Vervolgens verschijnt in beeld:

```
Welke files gaat u gebruiken uit de serie?  
van:
```

hier kunt u het eerste volgnummer van de serie invoeren gevolgd door enter

```
tot en met:
```

APPENDIX Dataverwerking 18

en het laatste volgnummer uit de serie gevolgd door enter

Dit wordt herhaald totdat u alle series die u wenst te middelen ingevoerd zijn. Indien u klaar bent drukt u op enter bij de vraag:

```
Geef de vier letters waarmee de serie is gecodeerd:  
Of druk enter als u alle gewenste series heeft ingevoerd
```

{Het is in principe niet mogelijk om het programma te draaien zonder invoerfile. Als u toch wilt kijken naar de mogelijkheden drukt u net zo lang enter totdat het menu in beeld verschijnt.}

Instellingen programma

Het programma is menugestuurd. Het programma heeft twee programma's in zich. De belangrijkste is het berekenen van de statistische gegevens van een meting van een snelheidsveld berekend met de PTV-code. De tweede is het omzetten van metingen gemeten in pixel-coördinaten omzetten naar wereld-coördinaten. Daarbij moeten een aantal waarden worden ingesteld. Dit gebeurt met behulp van een menu.

Programma menu

Nu verschijnt als er een seriecodefile is aangemaakt dit menu in beeld. Deze ziet er als volgt uit:

```
0. Einde  
1. Geef de invoerfiles aan  
2. De uitvoer  
3. Filtercriteria  
4. Rekenwaarden  
5. Bereken  
6. Schrijf defaultwaarden  
7. Lees defaultwaarden  
8. Schrijf naar globale coord
```

hierna volgt hoe de instellingen veranderd kunnen worden en waar op gelet moet worden bij het invullen van de waarden.

0. Einde.

Hiermee beëindigt u het programma. Tegelijk worden hiermee de serierekenwaarden opgeslagen in de defaultseriecodefile.

1. Geef de invoerfiles aan.

Indien u klaar bent met een serie kunt u hier een nieuwe serie mee beginnen (Niet aan te bevelen. Het is veiliger om het programma opnieuw op te starten. Als u dezelfde waarden wilt gebruiken kunt u de waarden als default wegschrijven met menukeuze 6.)

2. De uitvoer.

Indien u de uitvoerfile zelf wilt kiezen kan dat hier. Dit geldt alleen voor de gemiddelde

waarden. De overige namen worden gegenereerd.

3. Filtercriteria.

Hier kunt u aangeven wat de file is met filterwaarden. Dit is niet goed uitgewerkt. Het was de bedoeling om meer filtermethoden te gaan implementeren. Alleen het geografisch filter kan hiermee worden aan of uitgezet. Hoe u het fysisch filter moet veranderen staat als in paragraaf fysisch filter.

Als u deze optie kiest komt het volgende op uw scherm:

```
Welke filters wilt u gebruiken
1: een bepaald gebied
2: een maximaal verschil over een bepaalde afstand
3: mediaan filter
geen = 0, alleen 1 = 1, alleen 2 = 2, alleen 3 = 3, 1 en 2 = 4, 1 en
3 = 6, 2 en 3 = 5 en allen = 6
geef hier uw keuze: invoer is niet tussen 0 en 8 maak opnieuw een
keuze:
```

Als hier een bepaald gebied wordt gekozen (optie 1,4,6) moet er een filterfile aanwezig zijn. Deze heeft standaard de naam mask.flt maar er kan ook een andere gekozen worden. De file moet handmatig worden aangemaakt. De overige opties hebben als effect dat het geografisch filter wordt uitgezet.

Het filter is gebaseerd op het wegsnijden van vierkanten uit de meetdata. Dit gebeurt door

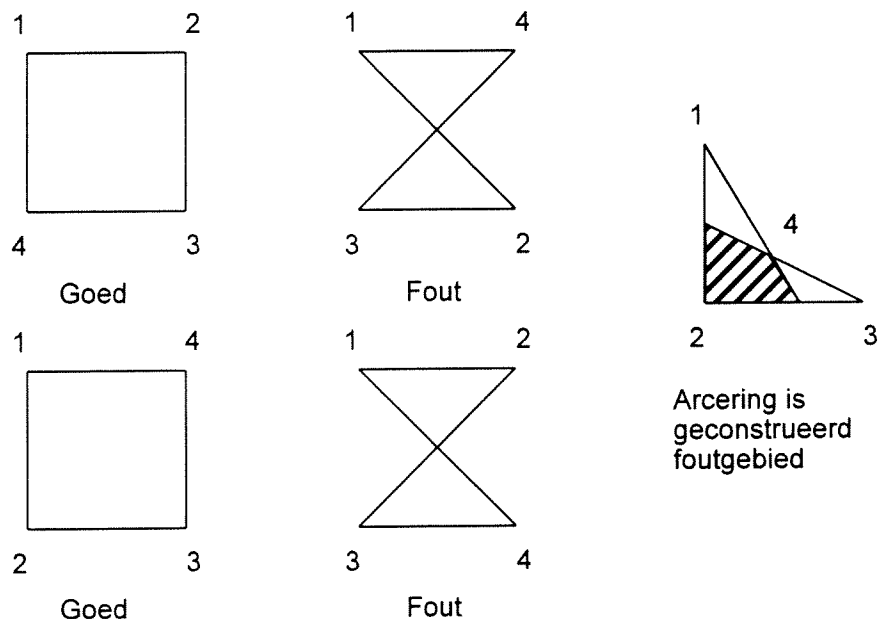


Figure 1. Invoeren hoekpunten foutgebied. Wat gaat goed wat gaat fout.

middel van het trekken van lijnen om dat vierkant. Hiervoor moeten de punten opeenvolgend

APPENDIX Dataverwerking 20

worden ingevoerd. Ter verduidelijking staat aangegeven in figuur 1 welke volgorde goed gaat en welke volgorde fout. Het filteren gebeurt op basis van de coördinaten zoals aangeleverd.

4. Rekenwaarden

Hier moet de gridafstand worden aangepast.

Het kiezen van deze menuoptie zorgt ervoor dat het volgende menu in beeld verschijnt:

```
0. terug naar hoofdmenu
1. gridafstand = .....
2. tijdstap = .....
   schaalfactor = .....
3. minimale waarde voor de snelheid = .....
   maximale waarde voor de snelheid = .....
4. Verplaatsing nulpunt Xas = .....
   Verplaatsing nulpunt Yas = .....
   Rotatie lokale assenstelsel = .....
   ten opzichte van globale assenstelsel
   wat wilt u veranderen
```

Bij de puntjes staan de waarden ingevuld zoals ze nu zijn. Dit menu is heel onhandig als je alleen de gridafstand wilt veranderen. Vergeet dan niet om de tijdstap en schaalfactor te controleren als je alleen de gridafstand wilt wijzigen (op 1 zetten als er een externe calibratie wordt uitgevoerd).

Als de calibratie met het programma gebeurt moeten de gemeten schaalfactor en de verplaatsingen en rotatie van het assenstelsel hier worden ingevuld. De calibratie gebeurt door het meten van de verplaatsing van het nulpunt van de pixel coördinaten ten opzichte van de globale coördinaten, het meten van de rotatie van de pixel coördinaten ten opzichte van de globale coördinaten (ik meen van x naar y de positieve draairichting is, maar het is veeeeeeeeeeel sneller om het uit te proberen dan om te begrijpen welke richting dit is) en het meten van de schaalfactor van pixels naar meters.

5. Bereken.

Als alle waarden zijn ingevuld kan de berekening beginnen. Eerst worden de gemiddelden berekend. Daarna kunt u kiezen voor het berekenen van de standaarddeviatie en de fluctuaties ten opzichte van het gemiddelde. De keuze hiervoor is zeer onhandig tussen de procedures geplakt.

De gemiddelden zijn terug te vinden in de file met de naam die opgebouwd is uit (voor uitgebreide informatie zie uitvoer middelingsprogramma:

```
<eerste vier letters van de file seriecodes> +
<gridafstand in millimeters> + .AVG
```

Het is ook mogelijk om deze waarde zelf in te voeren met behulp van menukeuze 2. In plaats van de gegenereerde uitvoerfile wordt de ingegeven filenaam gebruikt.

Indien de roosterafstand zodanig gekozen is dat niet alle waarden binnen een 39 bij 49 rooster vallen wordt er een waarschuwing gegeven. Daarna bent u verplicht om het middelpunt van

APPENDIX Dataverwerking 21

het gebied te geven wat u wilt zien. Er zit een onlogica in dus het is even uitproberen. De uitvoer is overigens een 35 bij 45 rooster.

Als de data gemiddeld zijn komt het volgende bericht in beeld:

```
Wilt u de gridvariantie weten. Druk dan enter:
```

Vervolgens kan u ervoor kiezen de standaarddeviatie wel of niet te laten berekenen. Dit doet u door enter te drukken als u het wel wilt laten berekenen en een willekeurige toets behalve enter gevolgd door enter. Deze waarden zijn terug te vinden in de file:

```
<eerste vier letters van de file seriecodes> +  
<gridafstand in millimeters> + .VAR
```

Als u de standaarddeviatie wel of niet hebt laten berekenen komt het volgende bericht in beeld:

```
Wilt u het turbulente deel weten. Druk dan enter:
```

Deze keuze geschiedt op dezelfde wijze als bij de keuze voor de standaard deviatie. De naam van de uitvoerfile hiervoor is:

```
<naam van de serie die gemiddeld wordt> +  
<volgnummer van de file die berekend is> + .TUR
```

Dit betekent dat voor elke file die gemiddeld wordt er een extra file wordt aangemaakt. Denk hier aan. Het kan zijn dat de harddisk volloopt, maar nog waarschijnlijker is dat het aantal files die in een directory geschreven kunnen worden door windows 95 overschreden wordt en al uw data worden verminkt. Let hier op (bij 1600 files ging het fout).

6. Schrijf defaultwaarden

Deze schrijft de rekenwaarden en het aan of uit van de filter naar een defaultfile. Deze file wordt gelezen als de serie nog geen serie defaultwaarde heeft.

7. Lees defaultwaarden

Deze leest de defaultwaarden in. Dit kan handig zijn als u voor elke serie dezelfde rekenwaarden wilt gebruiken.

8. Schrijf naar globale coord

Deze routine schrijft een file met pixel coördinaten naar globale coördinaten met de ingevoerde instellingen voor de calibratie. De uitvoer is dezelfde filenaam met de extensie .glb.

Uitvoer middelingsprogramma

Het programma bezit vier mogelijke uitvoerfiles.

APPENDIX Dataverwerking 22

Uitvoer na middeling

Een file met daarin de uitvoer van de berekening van de gemiddelde waarden en waarden die met het gemiddelde te berekenen zijn (de discretisatiefout) en de gewichtsfactor voor het berekenen van de gemiddelde waarden per roosterpunt. De naam van de file is opgebouwd uit:

```
<eerste vier letters van de file seriecodes> +  
<gridafstand in millimeters> + .AVG
```

Het formaat van de uitvoer is in 8 kolommen, waarin [kolomnummer]:

[1] x-coördinaat roosterpunt; [2] y-coördinaat roosterpunt;
[3] x-component snelheid; [4] y-component snelheid;
[5] x-component discretisatiefout; [6] y-component discretisatiefout;
[7] gewicht van berekening gemiddelde; [8] schatting imprecisie ten gevolge van meetfout apparatuur.

Uitvoer na berekening standaarddeviatie

In de file staat de berekening van de standaarddeviatie met daarbij een schatting van de imprecisie van het gemiddelde uit de standaarddeviatie en de gewichtsfactor die er voor het gemak ook maar is bij geschreven. De waarden berekend bij de standaarddeviatie zijn terug te vinden in de file:

```
<eerste vier letters van de file seriecodes> +  
<gridafstand in millimeters> + .VAR
```

De uitvoer is in 9 kolommen, waarin [kolomnummer] :

[1] x-coördinaat roosterpunt; [2] y-coördinaat roosterpunt;
[3] x-component standaarddeviatie; [4] y-component standaarddeviatie;
[5] schatting x-component imprecisie gemiddelde; [6] schatting y-component imprecisie gemiddelde; {uit standaarddeviatie gemiddelde}
[7] schatting x-component imprecisie fluctuaties ; [8] schatting y-component imprecisie fluctuaties; {enkel ten gevolge van meetfout en gemiddelde}
[9] gewicht bij berekening standaarddeviatie + 0.25 (dezelfde als bij het gemiddelde)

Uitvoer na berekening van de turbulente delen

In deze file staan de grootte van de individuele fluctuaties. Hierbij staat een schatting van de dichtheid van de deeltjes uit de gewichtsfunctie. De naam van de uitvoerfile hiervoor is:

```
<naam van de serie die gemiddeld wordt> +  
<volgnummer van de file die berekend is> + .TUR
```

Ook deze file is opgebouwd in kolommen, waarin [kolomnummer]:

[1] x-coördinaat roosterpunt; [2] y-coördinaat roosterpunt;
[3] x-component fluctuaties; [4] y-component fluctuaties;

APPENDIX Dataverwerking 23

[5] x-component discretisatiefout; [6] y-component discretisatiefout;
[7] gewicht van berekening fluctuaties; [8] schatting imprecisie ten gevolge van meetfout
apparatuur.

Hierin is de discretisatiefout nonsens, maar ik had geen zin om nog een hele procedure te
schrijven voor de fluctuaties.

Uitvoer na omzetting naar wereld-coördinaten.

In deze uitvoer staan de coördinaten van de punten die ingevoerd zijn in pixel-coördinaten
uitgevoerd in wereld-coördinaten. De naam van de file is opgebouwd uit:

`<naam invoerfile zonder extensie> + .GLB`

De uitvoerfile is opgebouwd uit 2 kolommen:

[1] x-coördinaat in wereld-coördinaten; [2] y-coördinaat in wereld-coördinaten

APPENDIX Resultaten 1

APPENDIX Resultaten

INHOUDSOPGAVE

Havenfluctuaties	2
Fluctuaties gootmetingen	12
Getallen van dataverwerking	17
Opgenomen beelden	18
Nummers gebruikte beelden voor PTV verwerking	19
Instellingen van PTV bij verwerking van de series.	21
Controle aannames	22
Controle aanname constant debiet	22
Discretisatiefout gemiddelde	24
Kwaliteit meting 6-7l	25

Voor de figuren in de haven-metingen zijn de volgende files gebruikt

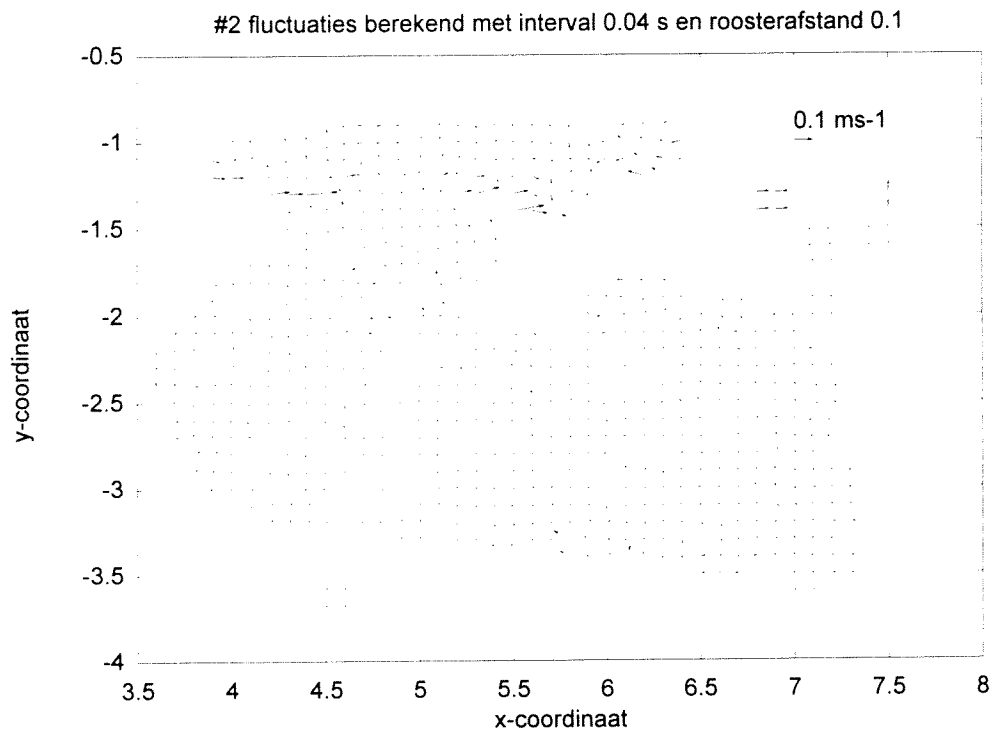
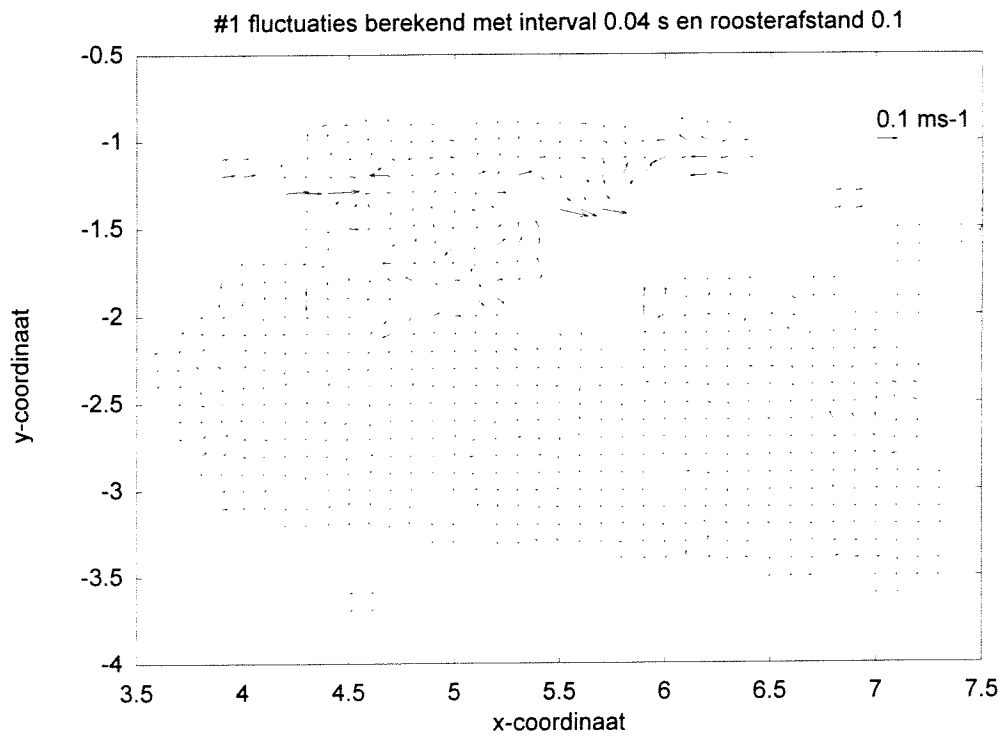
>>>\ptvdata\haven\stap1\h11a00XX.tur, waarbij XX van 80 tot 99 loopt beginnende bij 80
(=#1) en eindigend bij 99 (=#20).

Voor de figuren in de goot-metingen zijn de volgende files gebruikt

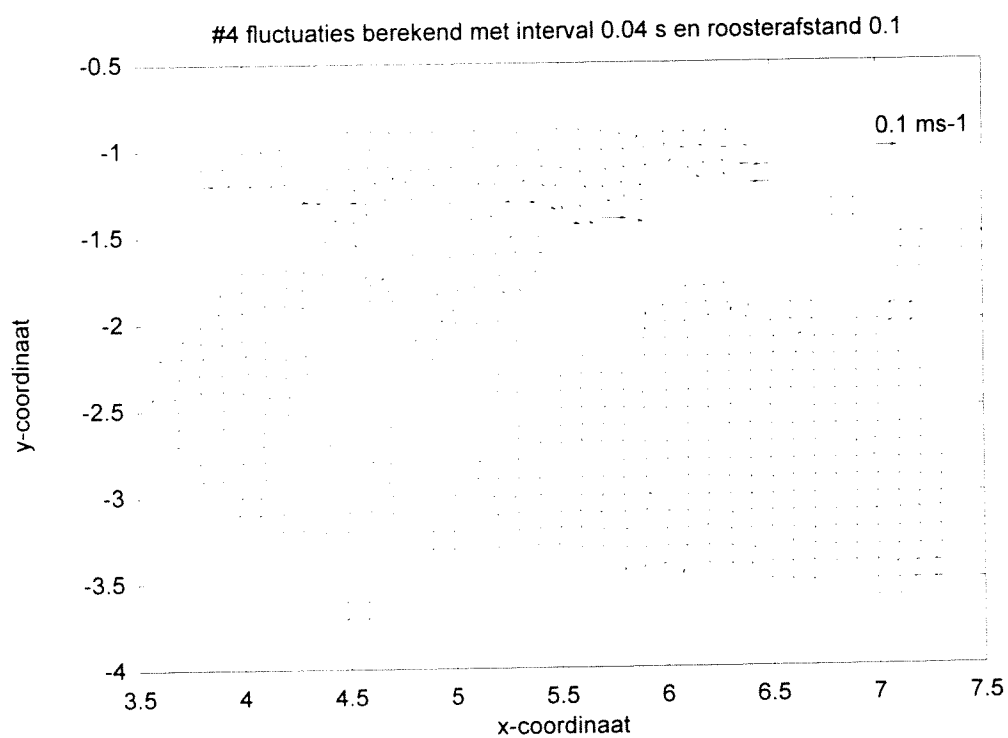
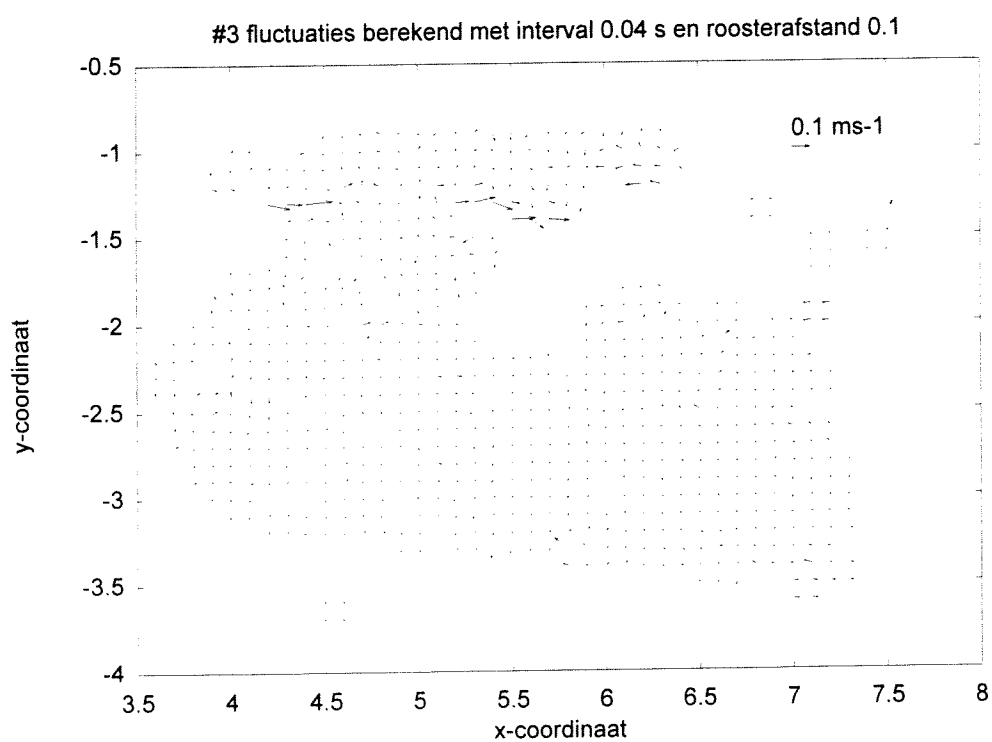
>>>\ptvdata\haven\stap1\h11a00XX.tur, waarbij XX van 81 tot 90 loopt beginnende bij 80
(=#1) en eindigend bij 90 (=#10).

APPENDIX Resultaten 2

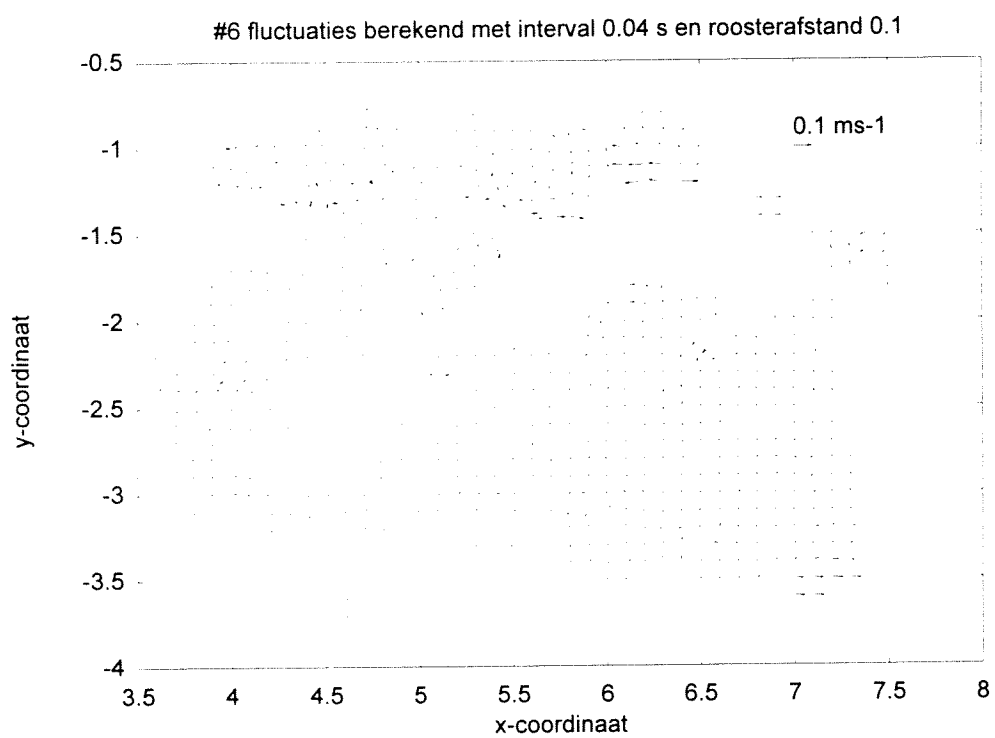
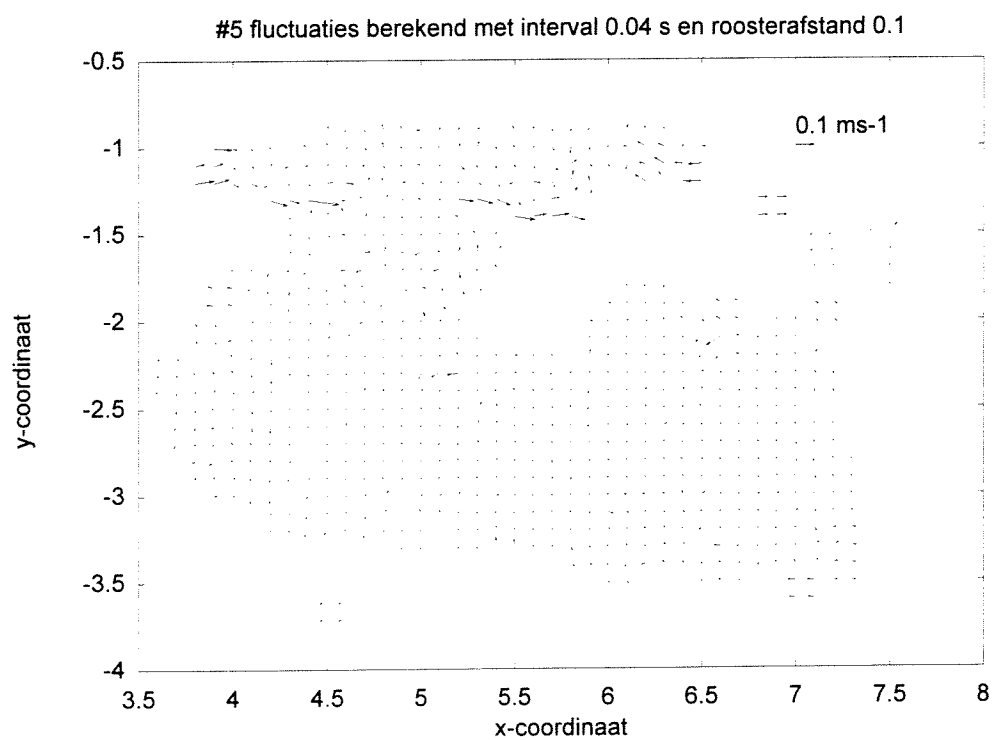
APPENDIX Resultaten - Havenfluctuaties



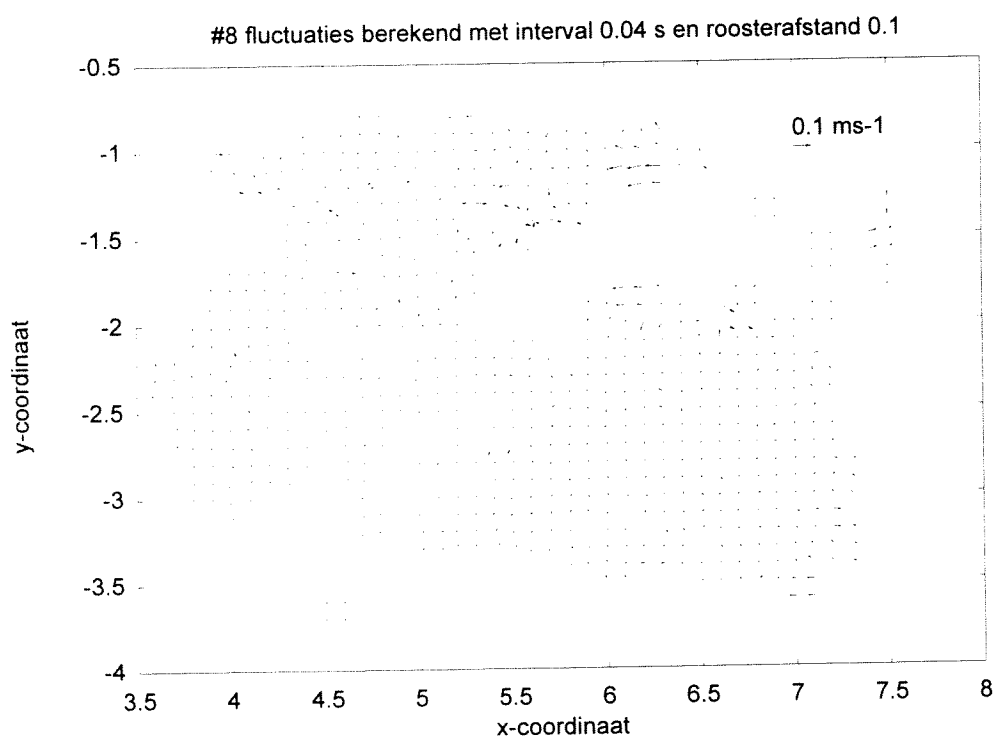
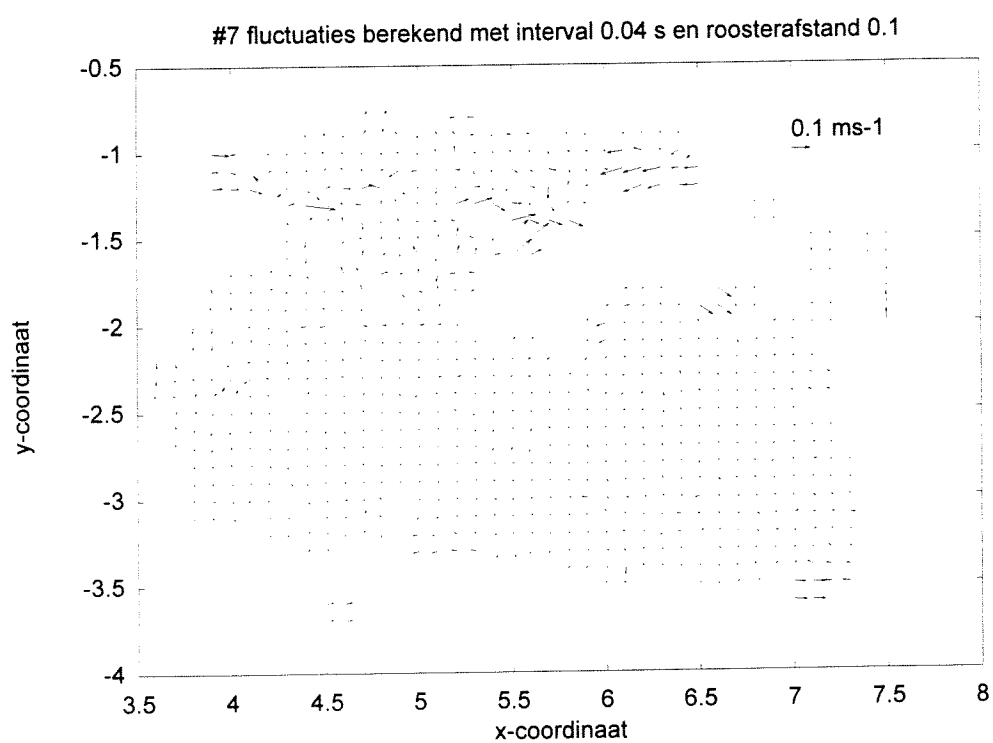
APPENDIX Resultaten 3



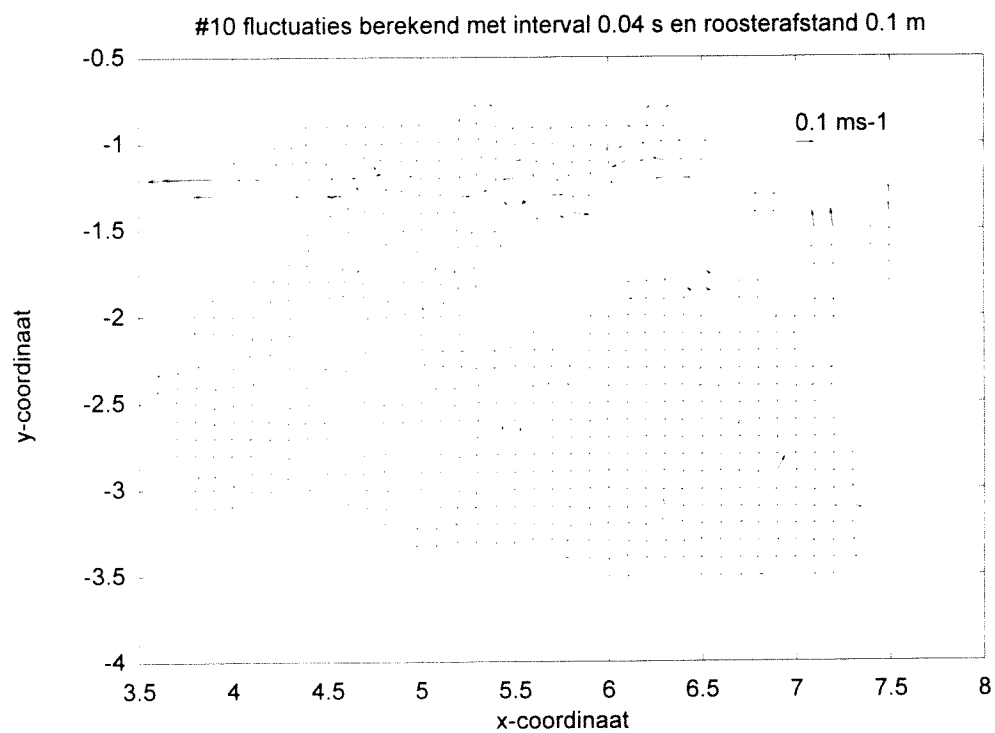
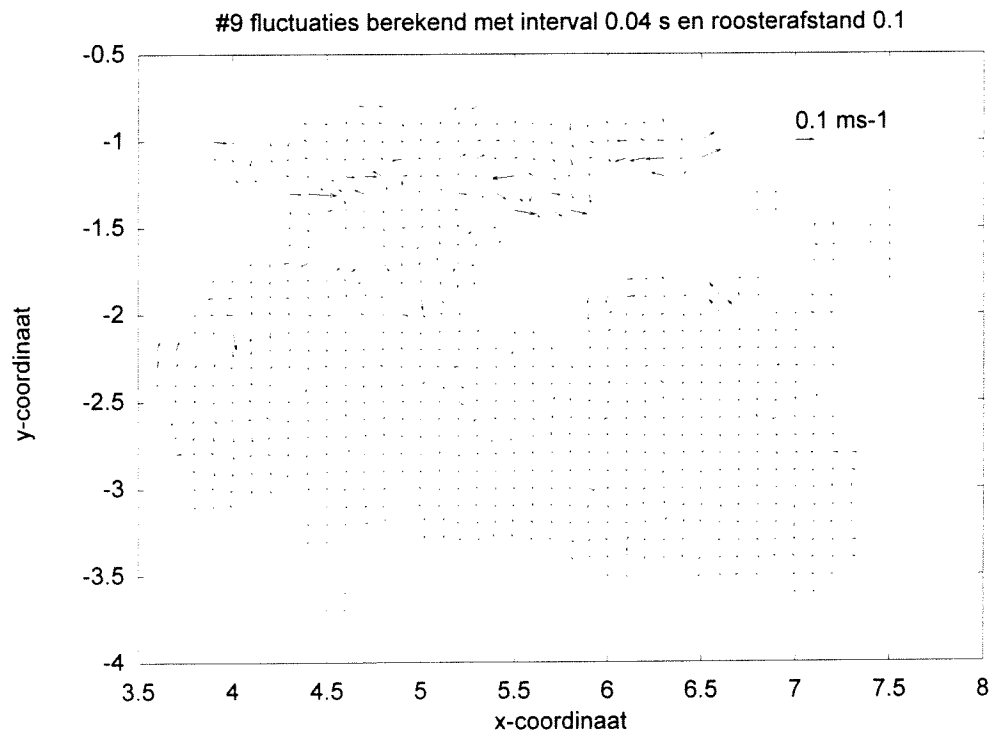
APPENDIX Resultaten 4



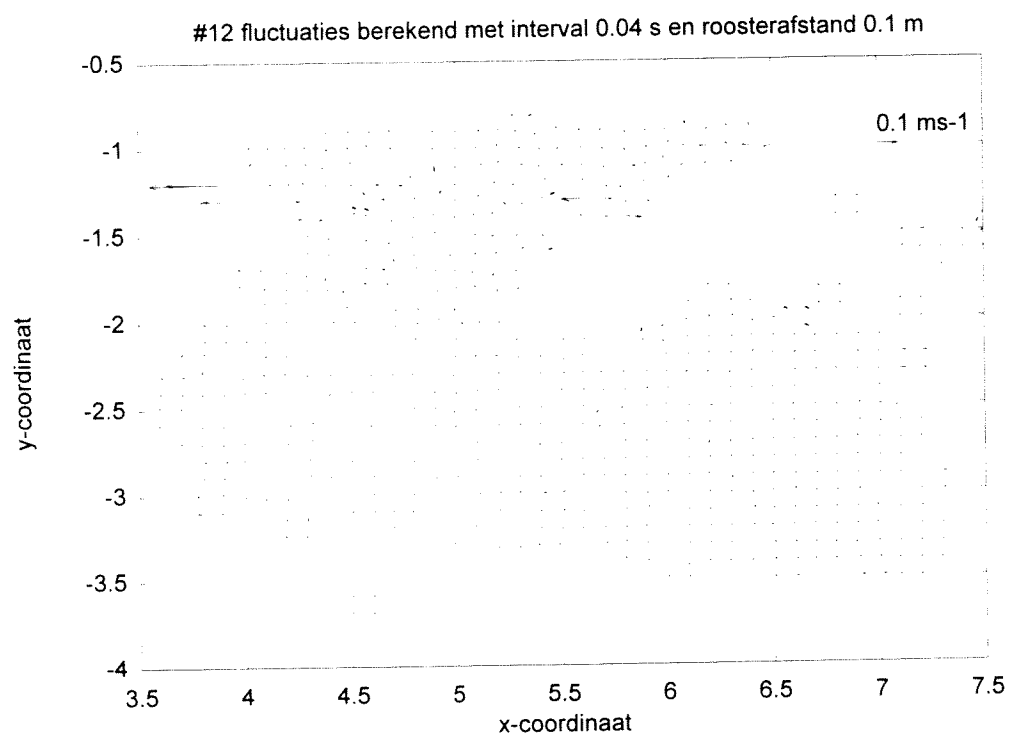
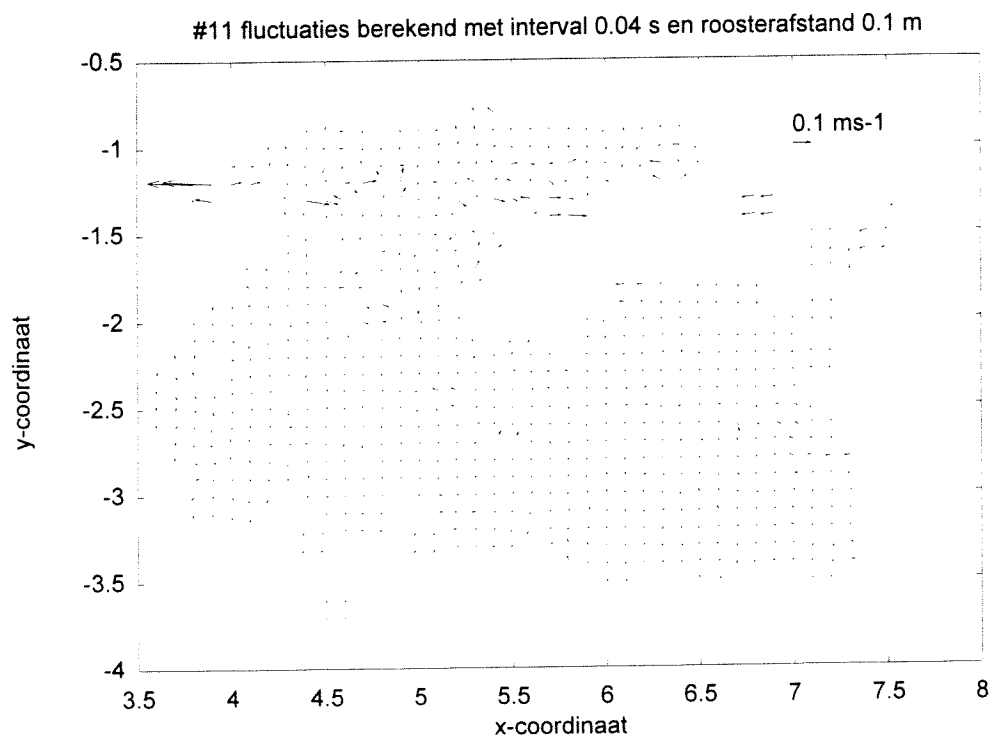
APPENDIX Resultaten 5



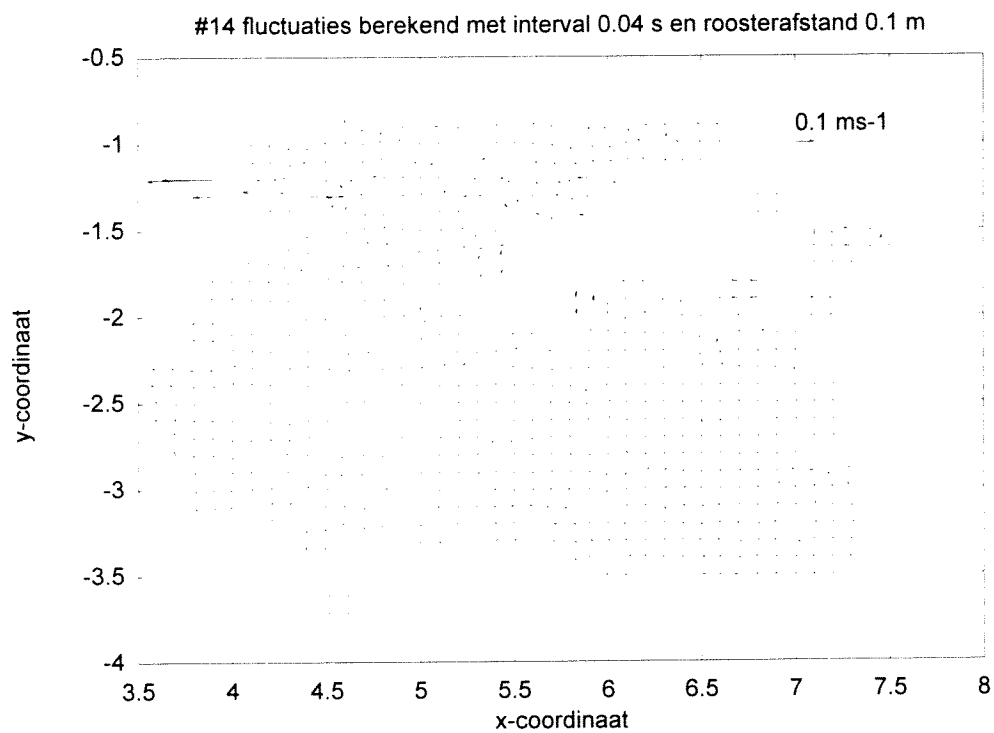
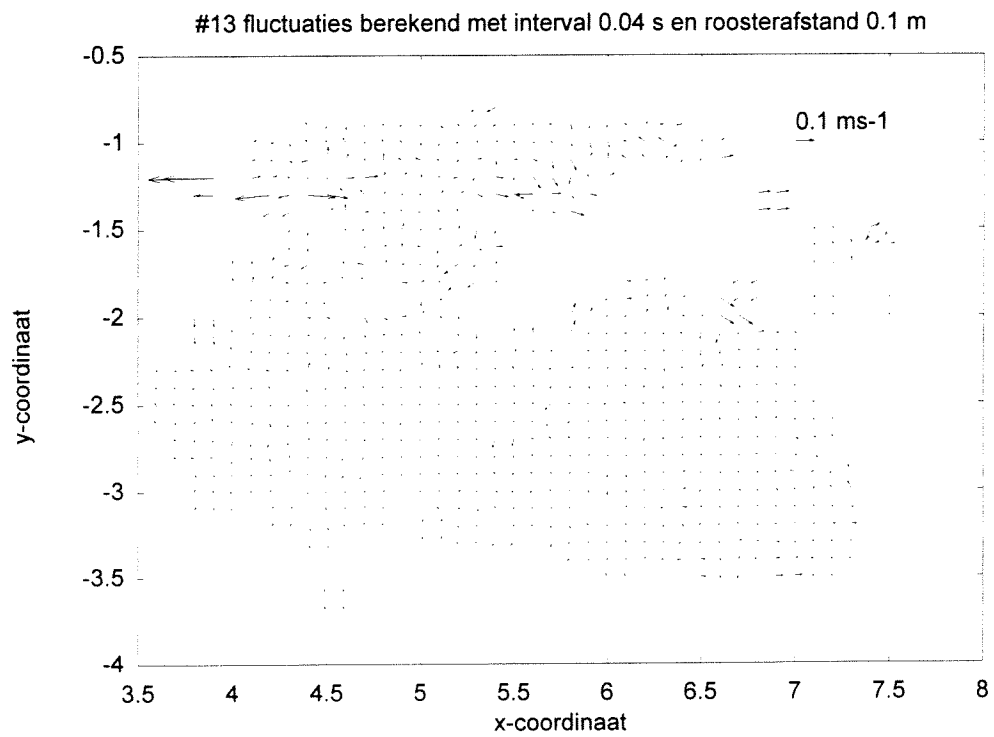
APPENDIX Resultaten 6



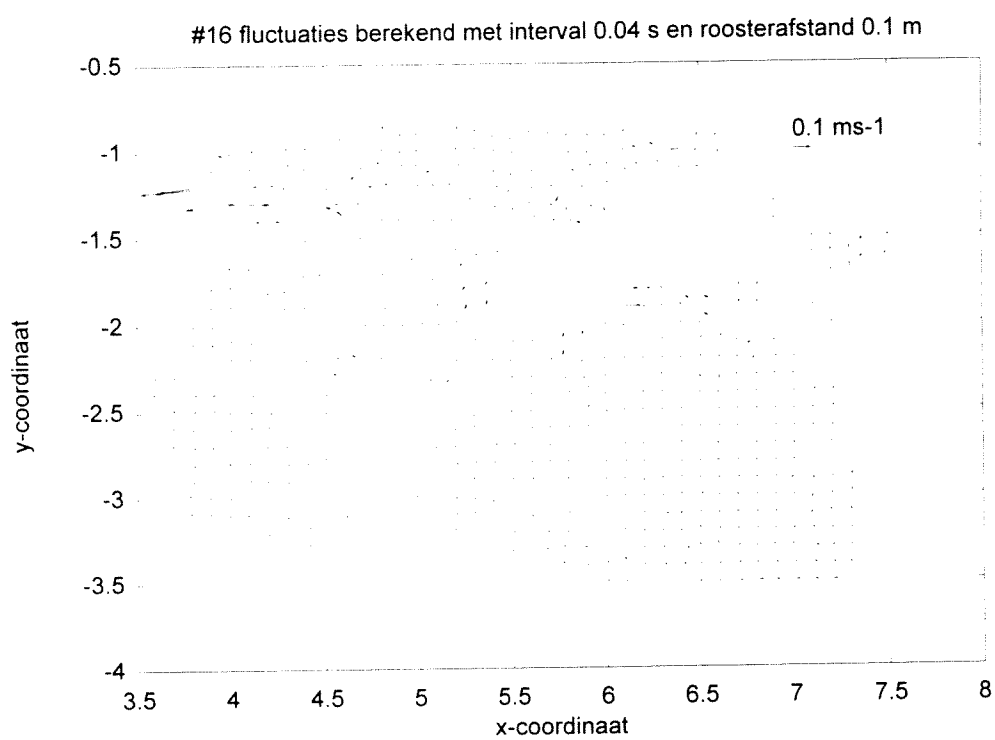
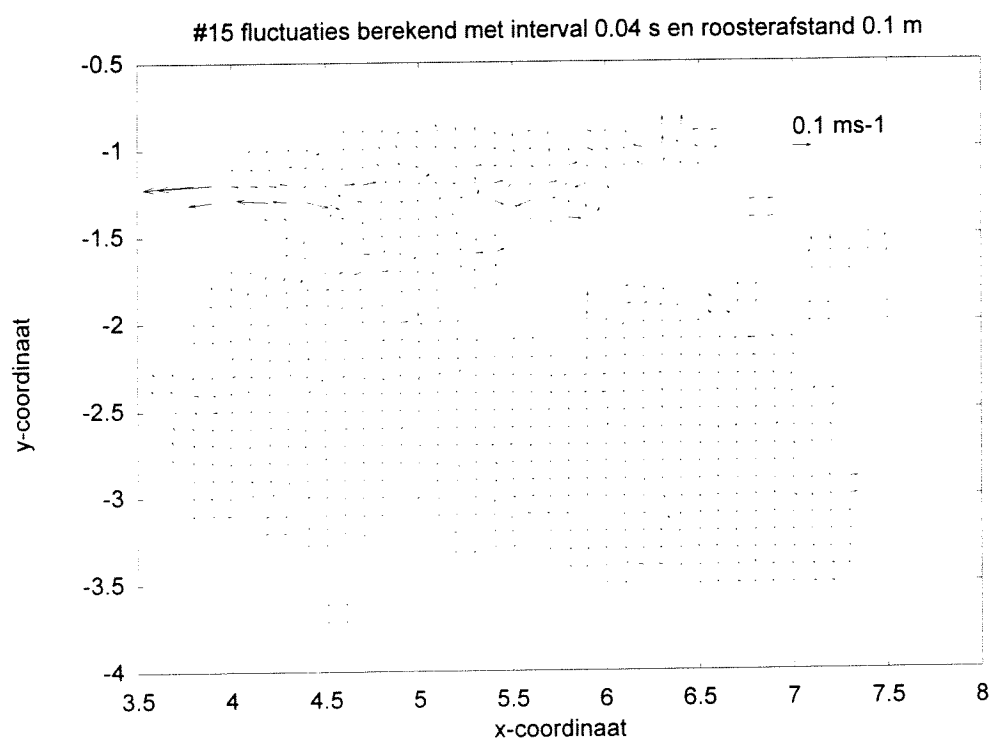
APPENDIX Resultaten 7



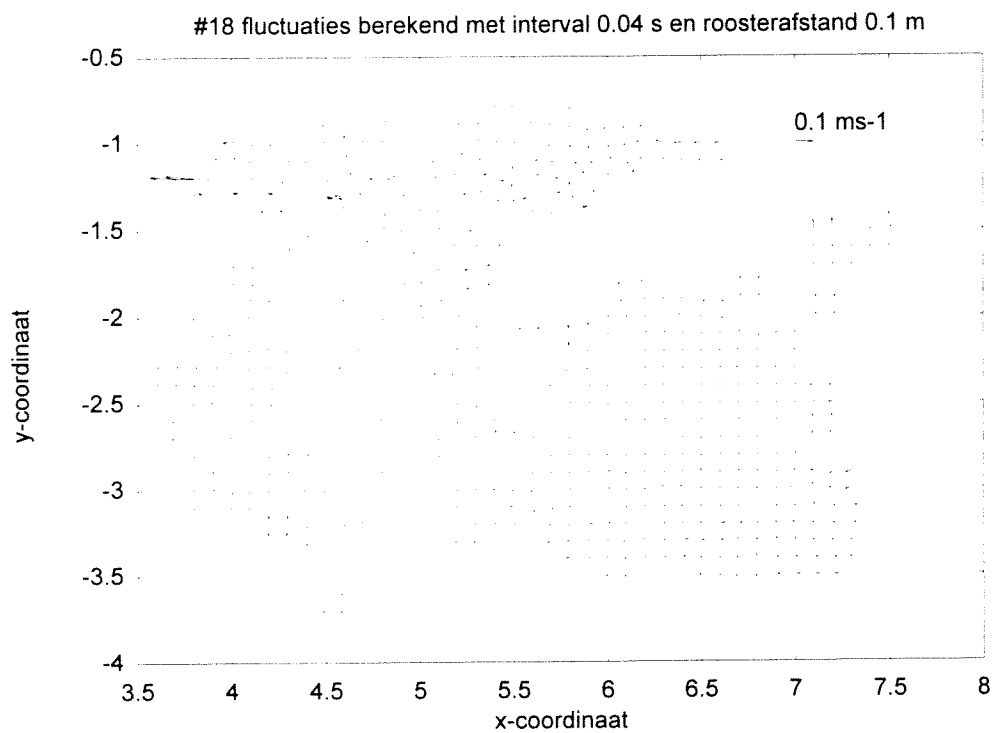
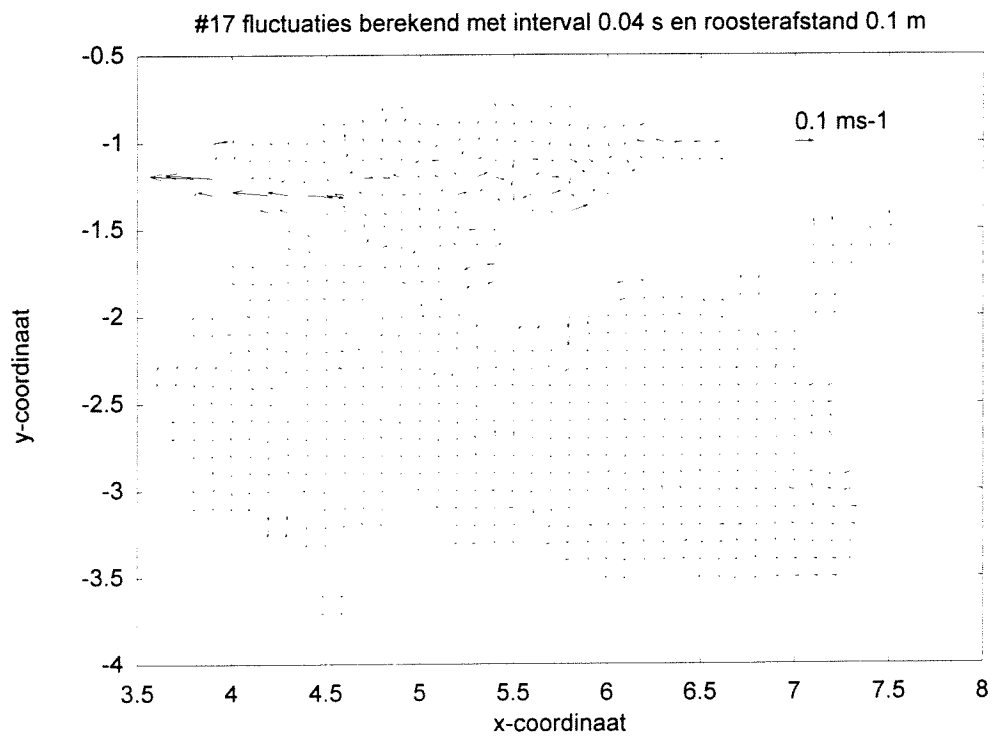
APPENDIX Resultaten 8



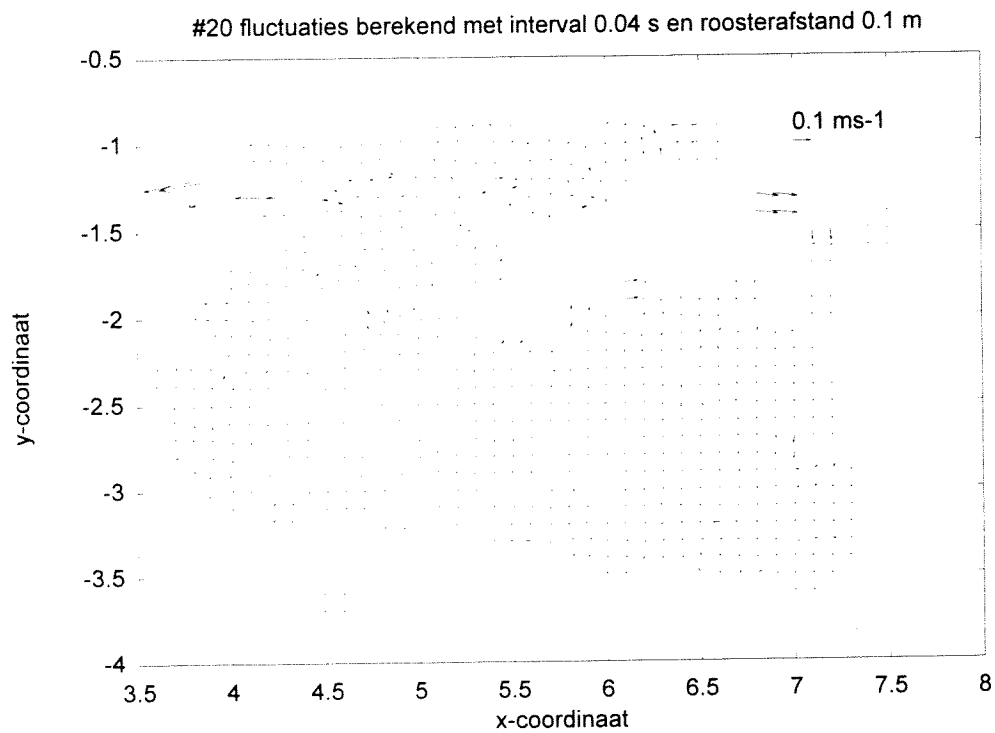
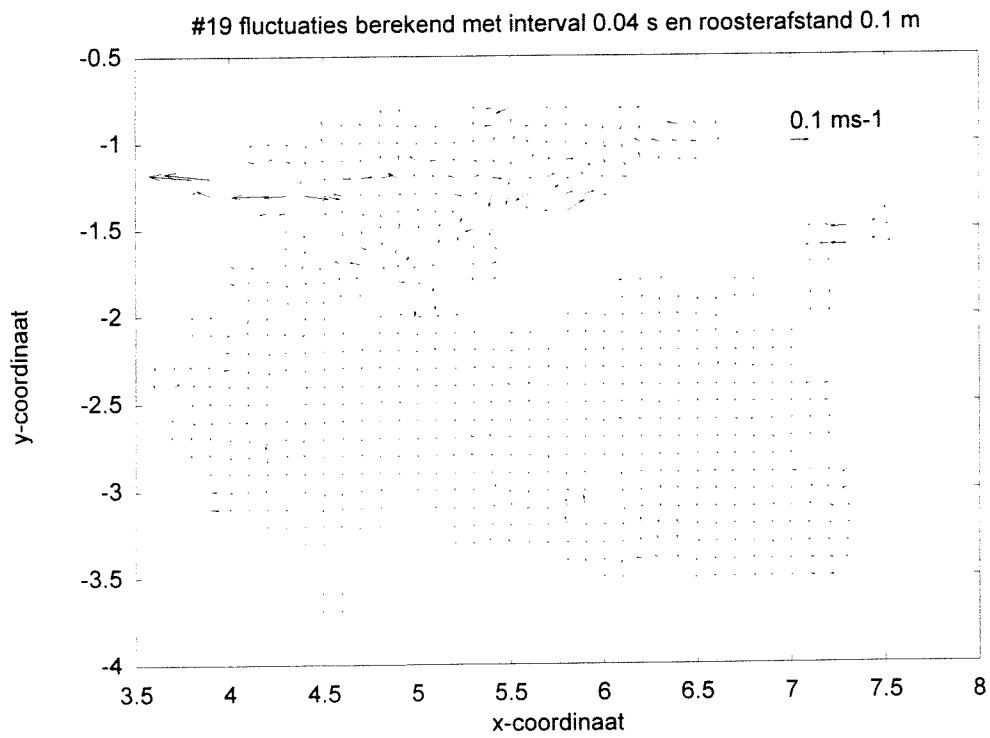
APPENDIX Resultaten 9



APPENDIX Resultaten 10

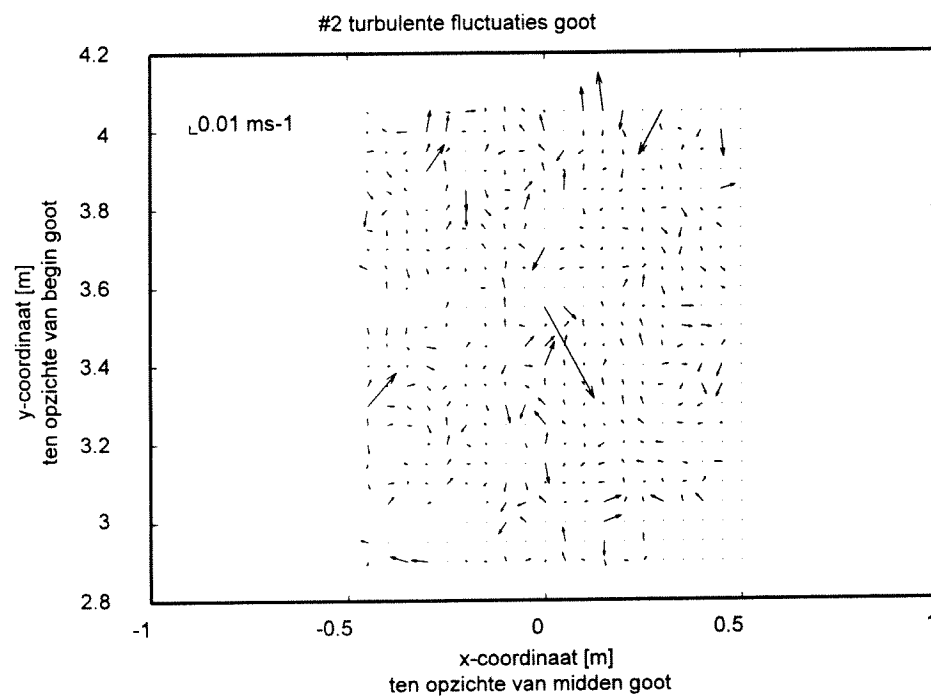
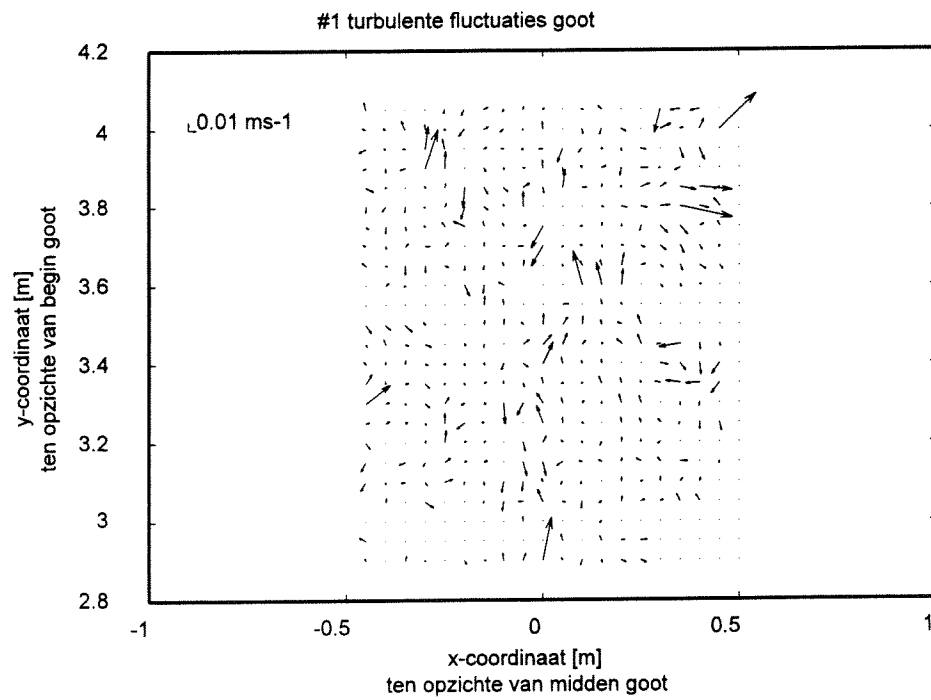


APPENDIX Resultaten 11

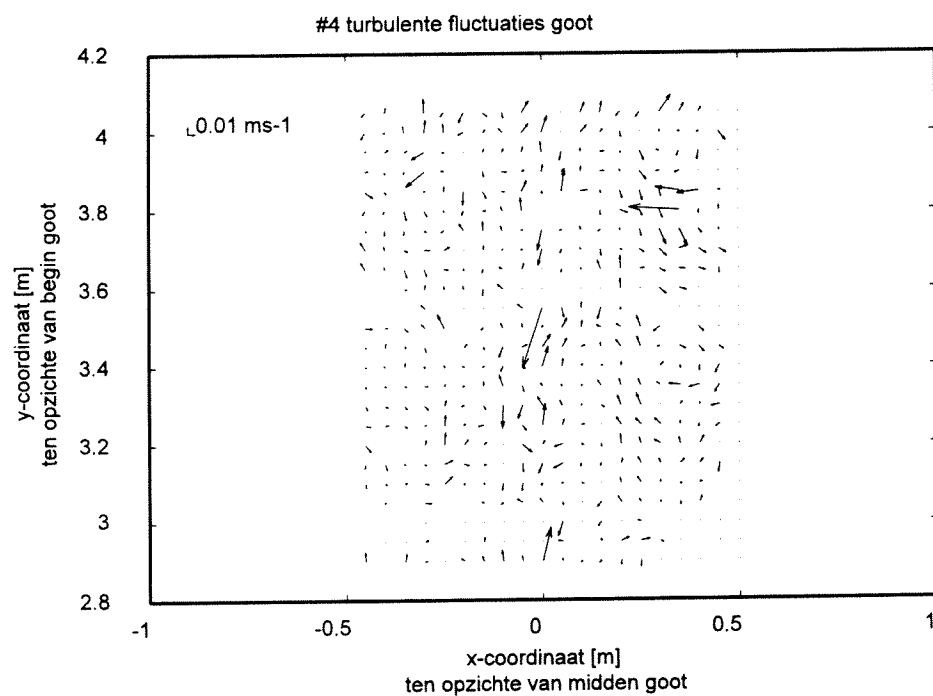
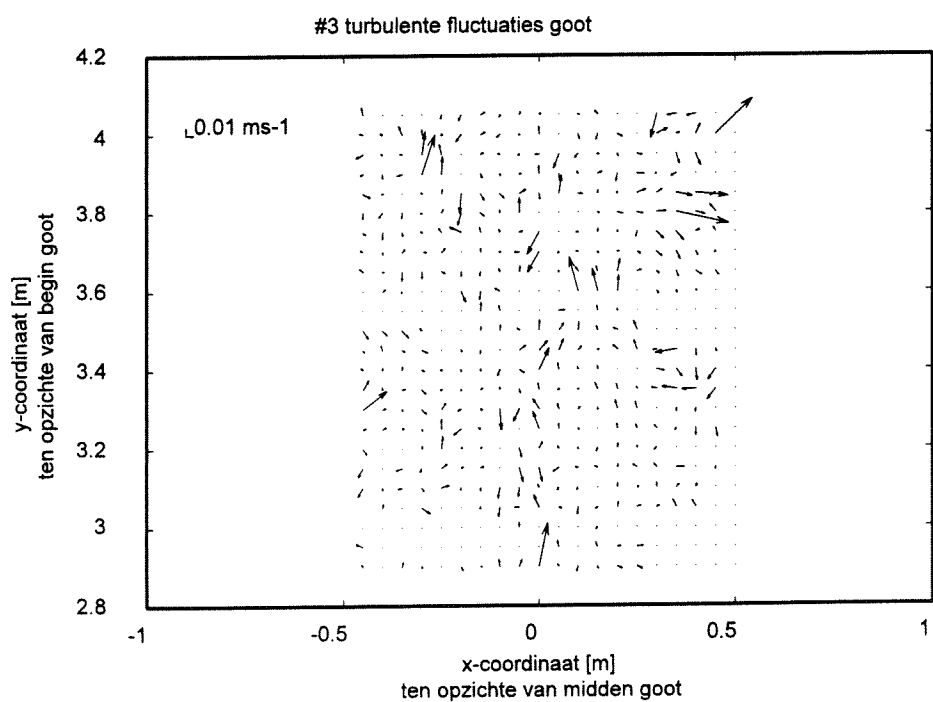


APPENDIX Resultaten 12

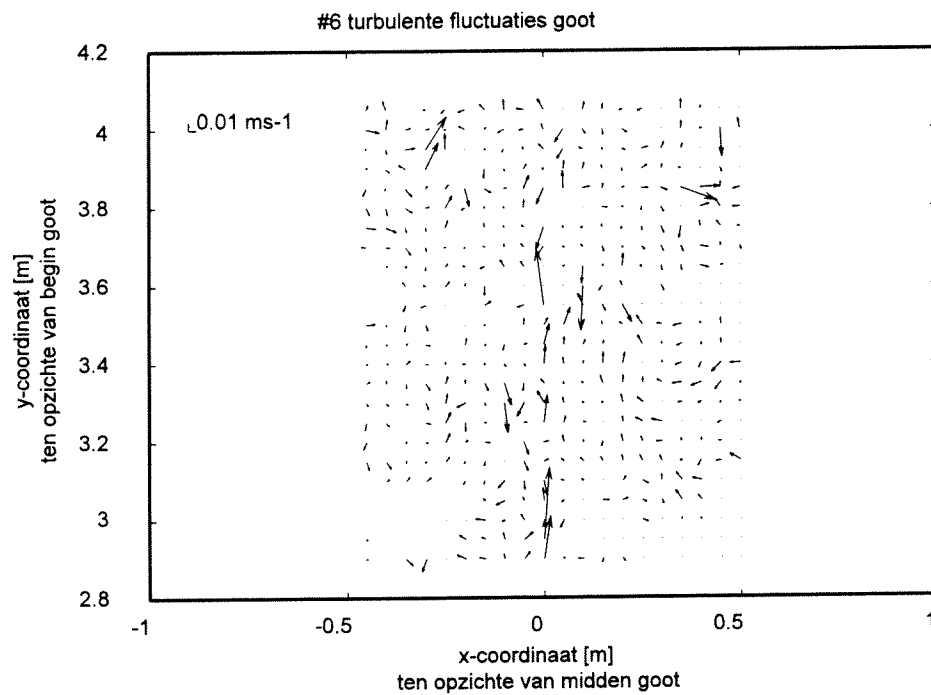
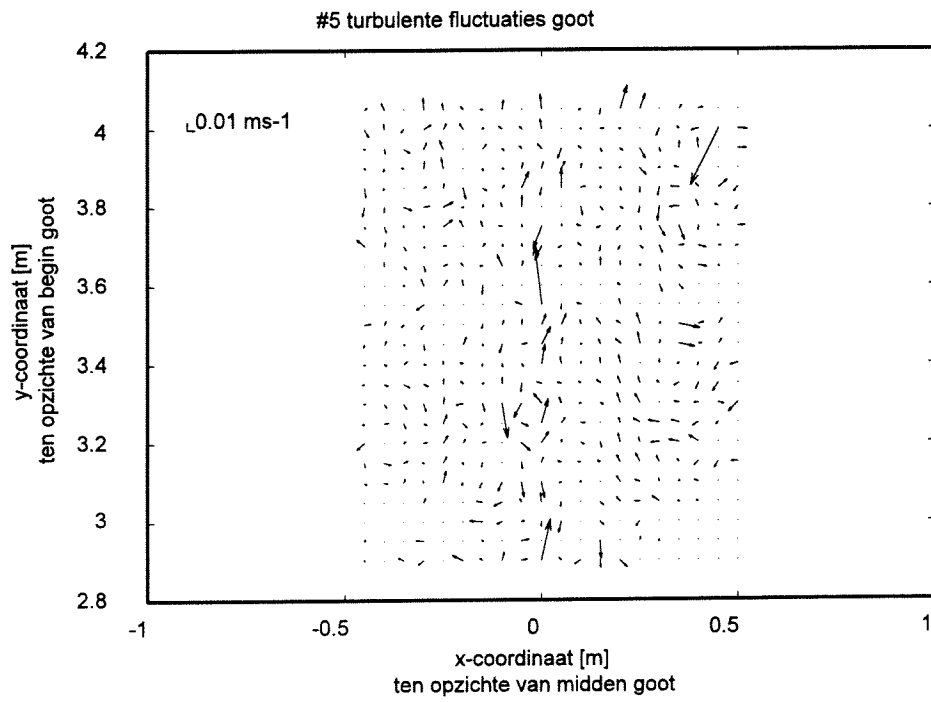
APPENDIX Resultaten - Fluctuaties gootmetingen



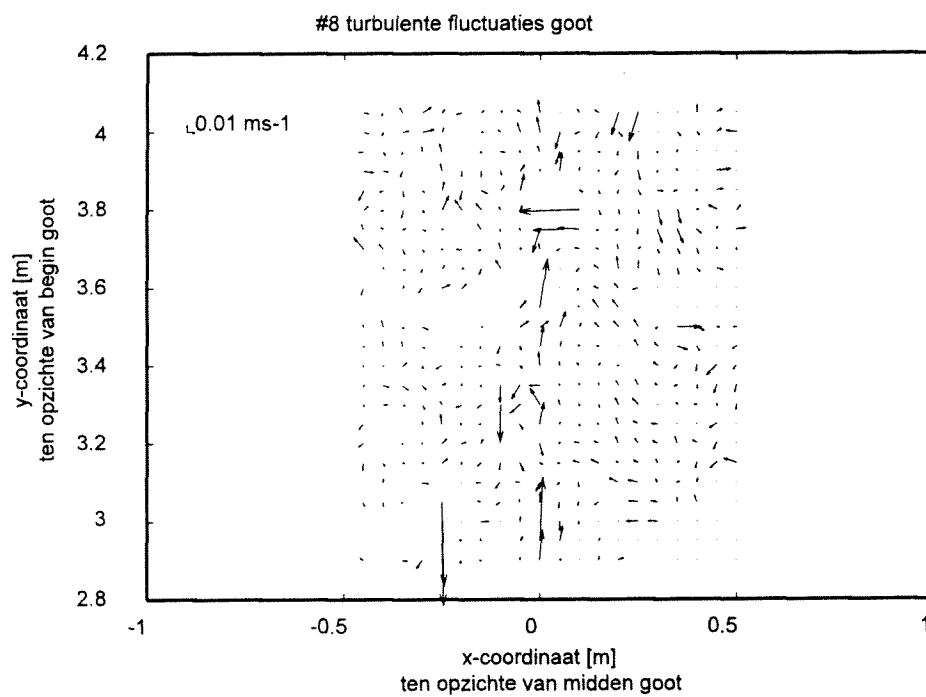
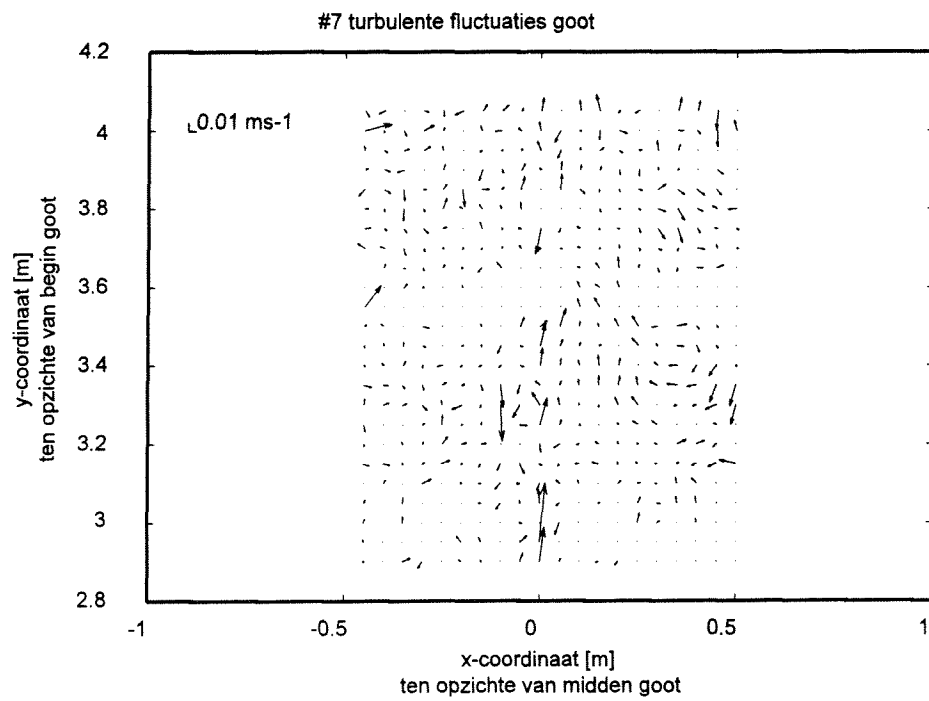
APPENDIX Resultaten 13



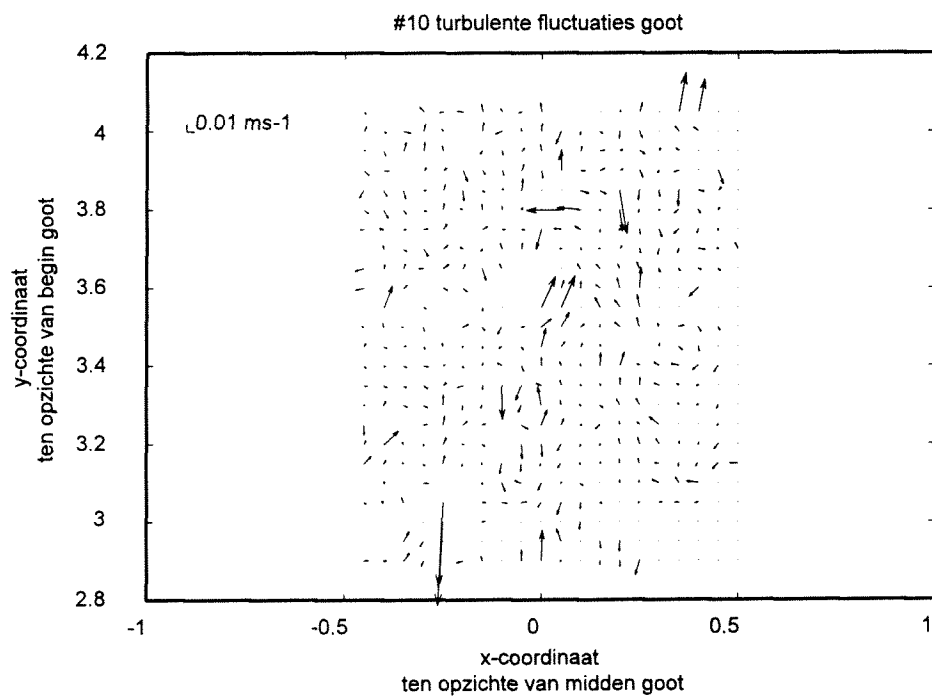
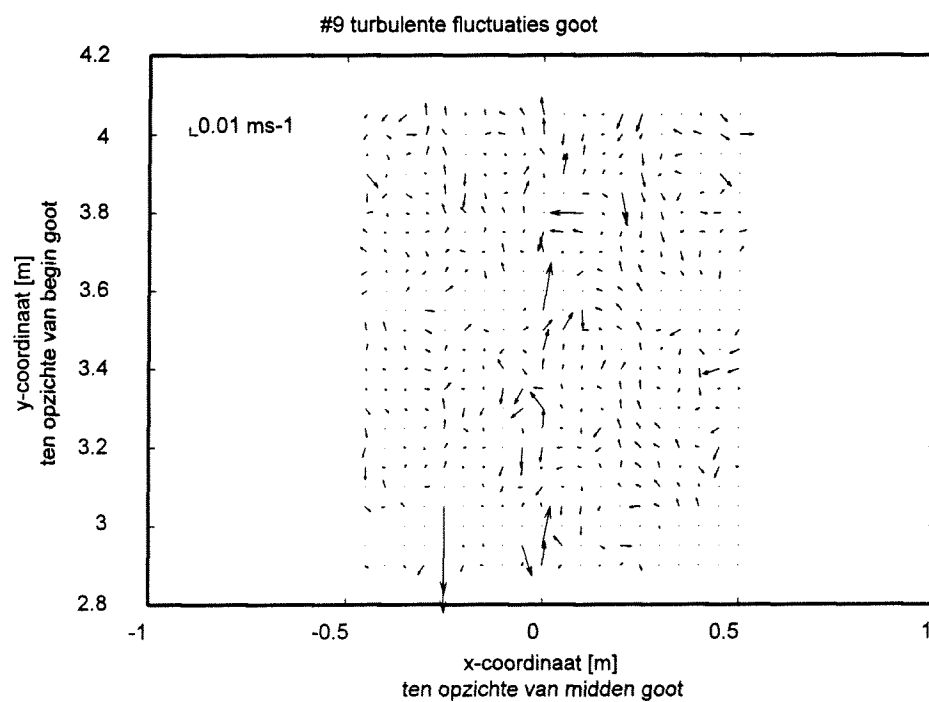
APPENDIX Resultaten 14



APPENDIX Resultaten 15



APPENDIX Resultaten 16



APPENDIX Resultaten 17

APPENDIX Resultaten - Getallen van dataverwerking

Inhoud

Hierin in de eerste tabel alle opnames die wanneer zijn uitgevoerd

Vervolgens welke beelden zijn gebruikt bij de verwerking in PTV.

En als laatste welke instellingen zijn gebruikt bij de PTV.

APPENDIX Resultaten 18

Tabel 1. Opgenomen beelden

Serie	Band-nummer	Raai nummers	Camera opstelling	take	positie kar	bijzonderheden
1912L1	1	9-12	L	1	4912	Bovenlicht aan
1912L2	1	9-12	L	2	4914	Bovenlicht
1912L3	1	9-12	L	3	4924	
1912L4	1	9-12	L	4	4924	ingezoomd
1912L5	1	9-12	L	5	4924	
1912L6	1	9-12	L	6	4924	
158L1	1	5-8	L	1	2994	
158L2	1	5-8	L	2	2994	vreemde distributie
158L3	1	5-8	L	3	2994	
167L1	1	6-7	L	1	2996	
167L2	1	6-7	L	2	2996	
267L3	2	6-7	L	3	2996	
268D1	2	6-8	D	1	2996	
268D2	2	6-8	D	2	2996	
268D3	2	6-8	D	3	2996	
21316D1	2	13-16	D	1	7324	
21316D2	2	13-16	D	2	7324	
21316D3	2	13-16	D	3	7324	
21316L1	2	13-16	L	1	7318	
21316L2	2	13-16	L	2	7318	
21720L1	2	1720	L	1	9726	

APPENDIX Resultaten 19

Tabel 2. Nummers gebruikte beelden voor PTV verwerking

Serie	grab interval	Band	datum	Begin beeld nr	Eind beeld nr
158l1	1	1		00:28:31.17	00:28:55.16
	2			00:28:55.18	00:30:07.16
158l11	1	1	18-12-97	00:28:18.21	00:28:20.02
				00:28:37.17	00:28:38.23
L110				00:28:54.03	
L112	2	1	18-12-97	00:28:33.23	00:28:37.21
L113	3	1	18-12-97	00:28:42.10	00:28:46.06
158l1	1	1	18-12-97	00:28:33.02	00:28:35.01
				00:28:50.16	00:28:52.15
158l2	1	1	18-12-97	00:32:34.04	00:32:35.03
				00:32:51.12	00:32:53.11
158l3	1	1	18-12-97	00:37:50.18	00:37:52.17
				00:38:02.14	00:38:04.13
1912l3	1	1		00:16:23.09	00:16:35.08
				00:16:35.10	00:16:59.08
				00:16:35.09	00:16:59.07
1912L3	1	1	15-12-97	00:16:22.18	00:16:23.11
				00:16:28.04	00:16:28.22
				00:16:34.17	00:16:35.10
				00:16:40.04	00:16:40.22
				00:16:46.04	00:16:46.22

APPENDIX Resultaten 20

Serie	grab interval	Band	datum	Begin beeld nr	Eind beeld nr
1912L5	1	1	15-12-97	00:23:25.01	00:23:25.14
				00:23:30.24	00:23:31.17
				00:23:37.13	00:23:38.06
				00:23:42.06	00:23:42.24
				00:23:47.14	00:23:48.07
1912L6	1	1	15-12-97	00:26:09.10	00:26:10.03
				00:26:15.11	00:26:16.04
				00:26:24.24	00:26:25.17
				00:26:29.21	00:26:30.14
				00:26:36.22	00:26:37.15
1912D2				00:07:00.18	00:07:01.11
				00:07:15.20	00:07:16.13
				00:07:26.05	00:07:26.23
				00:07:38.09	00:07:39.02
				00:07:51.09	00:07:52.02
1912D2	1	1 na ond	11-12-97	00:01:41.19	00:01:57.18
1912D1	1	1 voor	8-12-97	00:02:04.04	00:02:12.03
				00:02:11.04	00:02:19.03
1912D2?	2			00:01:57.20	00:02:45.18
Calibratie			11-12-97	00:00:12.22	00:00:13.16
167L	1	1	18-12-97	00:43:21.18	00:43:53.17
Calibratie	1			00:42:12.19	00:42:13.03

APPENDIX Resultaten 21

Tabel 3. Instellingen van PTV bij verwerking van de series.

serie- code	serie	Δt [s]	min blob	max Blob	tres- hold	Mtch dist [m]	min maxf	xtrpol atie	Neigds t
z11	6-7L	0.04	1	40	60	0.02	3 3	2	32
111	5-8L	0.04	1	40	40	0.008	3 3	2	32
b11	9-12D	0.04	1	40	30	0.009	3 3	2	32
211	9-12L	0.04	1	40	50	0.009	3 3	2	32
h11	haven	0.04	1	40	90	0.02	3 3	2	0.5

De meeste configuratiefiles zijn nog beschikbaar in principe zouden al deze waarden voor alle verschillende stappen hetzelfde moeten zijn of dit ook werkelijk het geval is valt te betwijfelen.

Om enigszins het overzicht ? te bewaren zijn alle configuratie- (.cfg) en snelheids-(.vel)files met een drie letterige code genummerd. De eerste letter staat voor de camera opstelling de tweede letter staat voor stapgrootte en de derde letter staat voor de take. Waarbij weer opgemerkt moet worden dat take 3 5 en 6 voor 9-12L als 1 2 en 3 zijn genummerd.

De camera posities waren:

- a 5-8d
- b 9-12d
- c 13-16d
- 1 5-8 l
- 2 9-12l
- 3 13-16l
- z 6-7l

APPENDIX Resultaten - Controle aannames

Controle aanname constant debiet

Op de volgende pagina vindt u de controle van de aanname dat de snelheden een constante snelheid bezitten. Deze is niet geschat door tien of meer verschillende perioden te meten zoals het hoort maar door de middelingsperiode te verlengen. Als de gemiddelde snelheid constant is zoals aangenomen zal de gemiddelde snelheid convergeren naar een bepaalde waarde. Zoals te zien kan deze conclusie niet echt worden getrokken. De fluctuaties zijn daarvoor in zijn maximale waarde iets te groot (namelijk 0.003 ms^{-1}) en in een richting. Deze zijn echter zeer lokaal en zouden ten gevolge van een meetfout kunnen zijn. Hiermee is aangetoond dat de snelheid binnen bepaalde marges als constant beschouwd kan worden. Bij serie 6-7L worden vergelijkbare waarden gevonden.

APPENDIX Resultaten 23

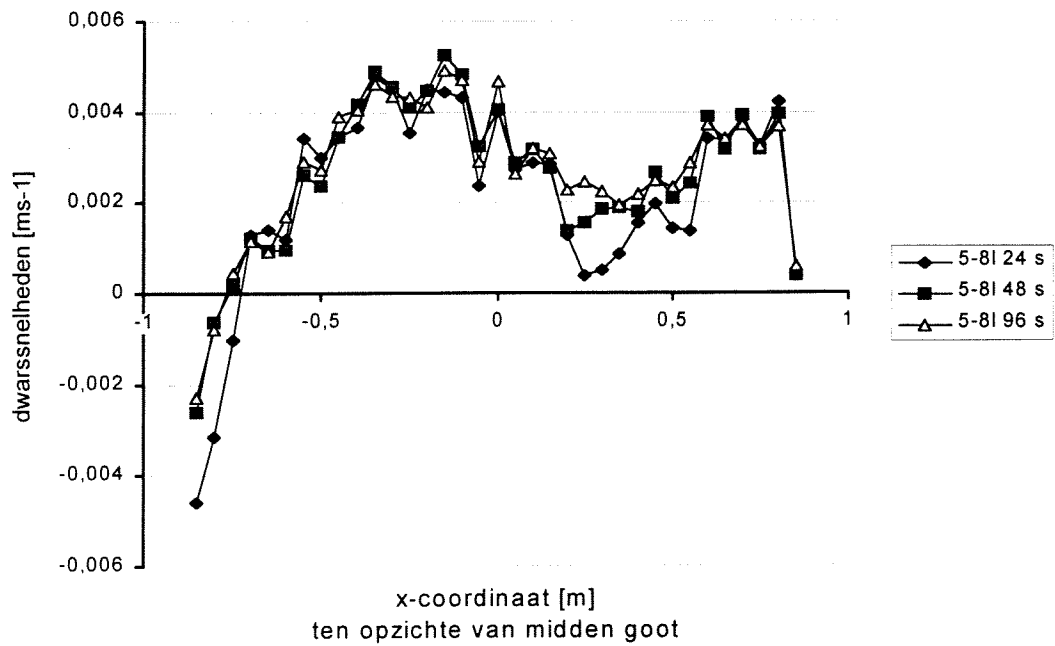


Figure 31. Vergelijking van dwarsnelheden van serie 5-8l op 3.3 meter vanaf het begin van de goot met verschillende middelingsperioden. Data in middelingsperiode.xls

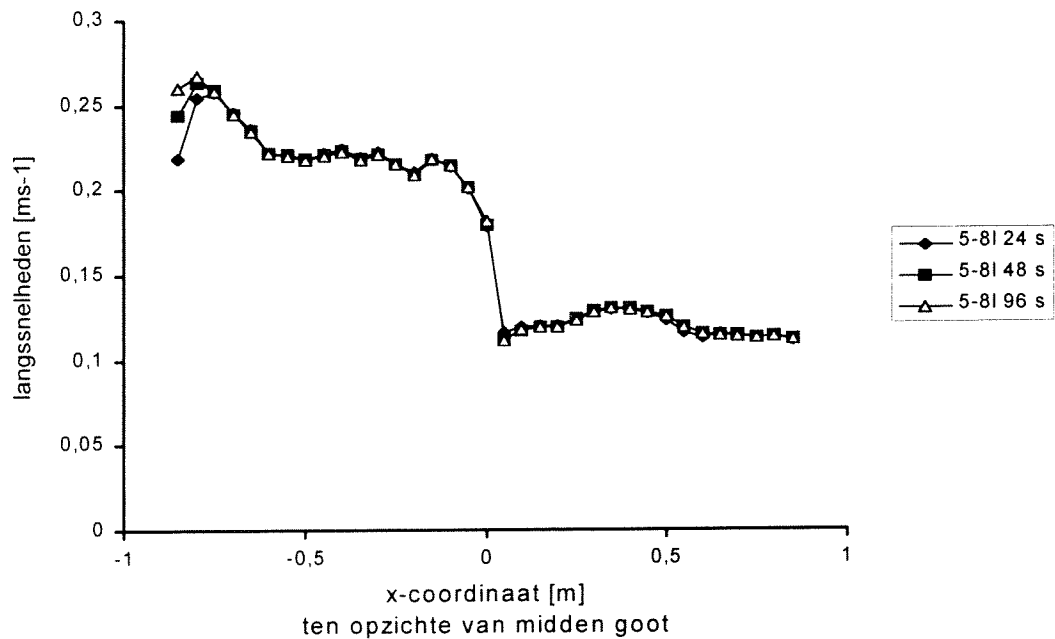


Figure 32. Vergelijking van langssnelheden van serie 5-8l op 3.3 meter vanaf het begin van de goot met verschillende lengte middelingsperioden. Data in middeling.xls

Discretisatiefout gemiddelde

Een schatting van het effect van de stapgrootte is onderzocht door een serie volledig uit te werken voor drie verschillende stapgroottes. Om de vergelijking zo goed mogelijk uit te kunnen voeren is de stapvergroting uitgevoerd door niet alleen dezelfde serie te gebruiken maar ook dezelfde hoeveelheid data. Nu is dit niet geheel mogelijk, maar door drie series te maken uit de data door in plaats van drie keer zo lang te meten kan dat wel worden benaderd. Door deze langere middelingsperiode zouden de fluctuaties die kleiner zijn dan de

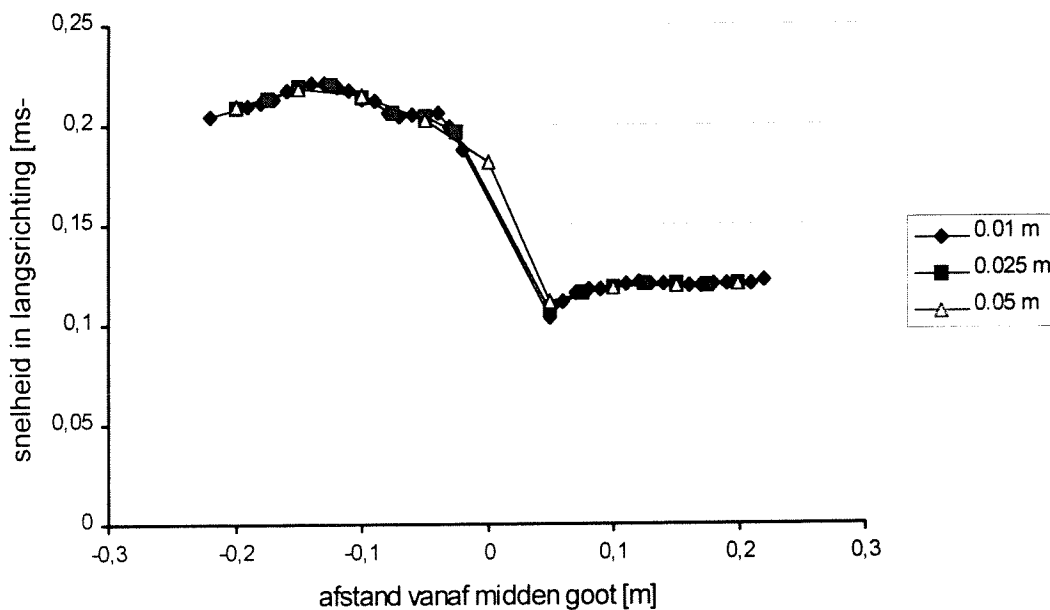


Figure 33. Vergelijking van PTV metingen met verschillende stapgrootte. Data in roosterafstand.xls.

middelingsperiode sterk moeten dalen ook de fout in de snelheid zou moeten dalen.

Ook is er een vergelijking afgeleid die de grootte van deze fout kan geven, maar zoals te zien is kan de discretisatiefout verwaarloosd worden buiten de menglaag en binnen de menglaag zijn er in dit geval onvoldoende meetpunten geweest voor een goed schatting en kan de discretisatiefout ook worden verwaarloosd.

Kwaliteit meting 6-7l

Bij controle van de deeltjespaden is te zien dat de kwaliteit van vijf opeenvolgende beelden geen enkele foute match te zien geeft, behalve in de buurt van de dwarsbalken. Hieruit kan worden geconcludeerd dat deze fout te verwaarlozen is.

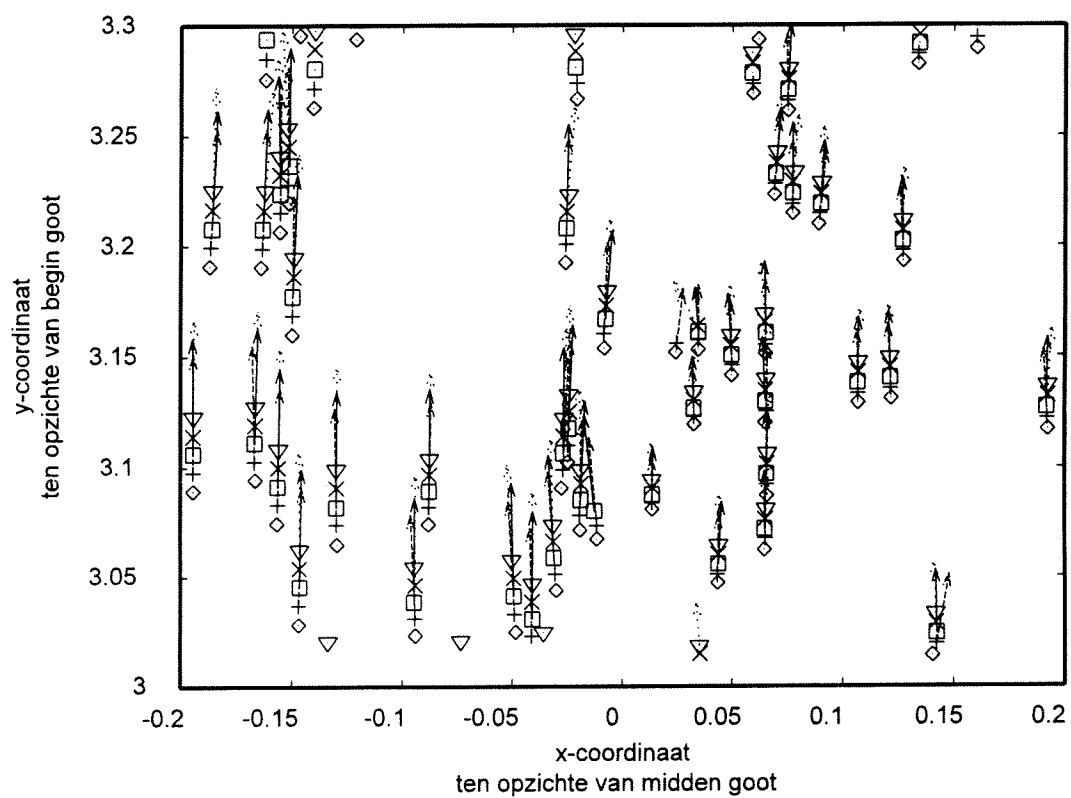


Figure 34. Schatting foute matches van serie 6-7L. Data in
 ..\ptvdata\menglaag\167l\z11a0081.vel tot en met\z11a0085.vel 1:2:3:4