

BEPALING VAN HET SNELHEIDSVELD IN EEN
HORIZONTALE GIETVORM MET PARTICLE
IMAGE VELOCIMETRY EN COMPUTATIONAL
FLUID DYNAMICS

A. J. Hoekstra

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Technische Natuurkunde

Delft, Juli 1995

Kramers Laboratorium voor
Fysische Technologie
Prins Bernhardlaan 6
2628 BW Delft

Samenvatting

In stromingsexperimenten met vloeibaar aluminium is de bepaling van het snelheidsveld niet mogelijk. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een visualisatietechniek, Particle Image Velocimetry (PIV), en numerieke simulaties met het CFD-pakket FLOW-3D voor het kwantitatief bepalen van het snelheidsveld tijdens het vullen van een horizontale, dunwandige gietvorm.

Voor de PIV-experimenten wordt het gietproces gesimuleerd met water, waarmee een perspex model van de gietvorm onder vergelijkbare stromingscondities wordt gevuld. Met behulp van een interrogatiemethode wordt de verplaatsing van de met het water meegevoerde deeltjes berekend. Er zijn experimenten uitgevoerd voor twee uitvoeringen van het gietsysteem met zowel fotografische als digitale registratie. De betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de PIV-data wordt beoordeeld met criteria voor een optimale PIV-analyse, die door Adrian (1991) en Westerweel (1993) zijn gedefinieerd.

De gemeten snelheidsfluctuaties treden op bij de overgang van het aansnijsysteem naar de gietholte en in de bocht van de gietvorm. De vorm en de verplaatsing van het vrije oppervlak bevestigt de aanwezigheid van een snelheidsprofiel over de breedte van de vorm.

Er zijn simulaties verricht in FLOW-3D voor de uitvoeringen van het aansnijsysteem met een constante snelheid in de choke, waarin het snelheidsprofiel over de breedte van de vorm kwantitatieve overeenkomst vertoont met de resultaten van de experimenten. Voor het beschrijven van de vloeistofstroming is in de simulaties gebruik gemaakt van het Mixing Length Model van Prandtl.

De combinatie van experimentele snelheidsmetingen met Particle Image Velocimetry en numerieke simulaties in FLOW-3D maakt een kwantitatieve bepaling van het snelheidsveld en het lokaliseren van snelheidsfluctuaties in de gietvorm mogelijk tijdens het gietproces in een horizontale, dunwandige gietvorm.

Inhoudsopgave

Samenvatting	iii
1 Inleiding	1
1.1 Het gieten in dunwandige, horizontale gietvormen	1
1.2 Simulatie van het gietproces	2
1.2.1 Particle Image Velocimetry	2
1.2.2 Computational Fluid Dynamics	2
1.3 Doelstelling van het onderzoek	3
1.4 Indeling van het verslag	3
2 Particle Image Velocimetry	4
2.1 Kwantitatieve visualisatie van de vloeistofstroming	4
2.1.1 Principe	4
2.1.2 Het optische systeem	5
2.1.3 Registratie van het snelheidsveld	6
2.2 Analyse van de PIV-opnamen	7
2.2.1 Young's fringes	7
2.2.2 Directe correlatie	8
2.3 Schatting van de verplaatsing met de autocorrelatiefunctie	9
2.4 Schatting van de verplaatsing op sub-pixel niveau	13
2.5 Parameters van een PIV-systeem	14
2.5.1 De resolutie van een digitale PIV-opname	15
2.5.2 Het aantal deeltjes in een interrogatiegebied	16
2.5.3 Het loss of pairs effect	17
2.5.4 De signaal-ruis verhouding en de valid-data yield	17

2.5.5	Aanwezigheid van een snelheidsgradiënt	19
2.6	Detectie van afwijkende vectoren	20
2.6.1	Het PIV-signaal	21
2.6.2	De mediaantest	21
3	Experimentele opzet en procedure	24
3.1	Opzet van de experimenten	24
3.1.1	Het gietmodel	24
3.1.2	De experimentele opstelling	28
3.1.3	Het visualisatiemiddel	30
3.1.4	De lichtbron en het registratiemiddel	31
3.2	Experimentele procedure	31
3.2.1	Beeldacquisitie	33
3.2.2	Beeldbewerking	34
3.2.3	Interrogatie	37
3.2.4	Postprocessing	39
4	Experimentele resultaten	40
4.1	Het snelheidsveld vlak na de aansnijding	40
4.2	Experimenten met hoge snelheid	41
4.2.1	Metingen met behulp van de CCD-camera	41
4.2.2	Metingen met behulp van de fotocamera	50
4.3	Experimenten met lage snelheid	55
4.3.1	Metingen met behulp van de CCD-camera	55
4.4	Het snelheidsveld in de gietvorm	59
4.4.1	Het vrije oppervlak	60
4.4.2	Het integrale snelheidsveld	63
4.5	Beschouwing van de systeemparemeters	68
4.5.1	Resolutie	70
4.5.2	Betrouwbaarheid	70
4.5.3	Nauwkeurigheid	72
4.6	De systematische fout in PIV-snelheidsmetingen	73

5	Computational Fluid Dynamics	74
5.1	Inleiding	74
5.2	Theorie van Computational Fluid Dynamics	75
5.2.1	Bewegingsvergelijkingen	75
5.2.2	Bepaling van het vrije oppervlak	76
5.2.3	Numerieke benadering	76
5.2.4	Algorithmen voor de druk	77
5.2.5	Structuur van FLOW-3D	77
5.3	Randvoorwaarden en simulatiecriteria	78
5.3.1	Geometrische randvoorwaarden	78
5.3.2	Convergentie en stabiliteit	80
5.4	Resultaten van de simulaties	80
5.4.1	Laminair vs. turbulent	81
5.4.2	Oppervlaktespanning en contacthoek	81
5.4.3	Andere aspecten	84
6	Vergelijking experimentele en numerieke simulaties	86
6.1	Inleiding	86
6.2	Experimenten met PIV en simulaties met FLOW-3D	86
6.3	Stromingsexperimenten met water en vloeibaar metaal	87
7	Conclusies	89
7.1	Conclusies	89
7.2	Aanbevelingen	90
A	De invloed van opnamecorrectie op de autocorrelatiefunctie	94
B	Postprocessing software	97

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Het gieten in dunwandige, horizontale gietvormen

De metaalindustrie is in toenemende mate geïnteresseerd in het wetenschappelijk beschrijven van het gietgedrag van metalen, bij voorbeeld aluminium, in gietstukken. In veel praktische toepassingen wordt vooral gebruik gemaakt van empirische kennis voor het bepalen van gietcondities als temperatuur en inlaatsnelheid van het vloeibare metaal. Kennis van het gietgedrag van metaal voor een specifiek gietstuk maakt een constante produktkwaliteit mogelijk.

Op het Laboratorium voor Materiaalkunde van de TU Delft wordt met behulp van stromingsexperimenten onderzoek verricht naar het gietgedrag van aluminium in een horizontale, dunwandige gietvorm met de vorm van een hoefijzer [van Tol, 1995]. Het aluminium wordt met een temperatuur van ongeveer 700°C ingegoten. Het aansnijsysteem zorgt voor een constante toevoer van het vloeibare metaal, zodat een gelijkmatige vulling van de gietvorm tot stand wordt gebracht. De gietvorm heeft een volume van 130cm^3 en wordt in ongeveer twee seconde gevuld.

Door warmteuitwisseling van het vloeibare aluminium met de gietvorm treedt afkoeling van de vloeistof op aan de wand, zodat het aluminium tijdens het gieten plaatselijk kan gaan stollen. Deze stolling werkt het gelijkmatig vullen van de gehele gietvorm tegen, zodat het gietproces onderbroken kan worden. Behalve aan de wand kan stolling optreden op plaatsen in de vloeistof waar relatief lage snelheden heersen. Dergelijke stollingsverschijnselen beïnvloeden de vorm en de verplaatsing van het vrije oppervlak van het aluminium.

Een manier om de verplaatsing van het vrije oppervlak bij een gieting te volgen is detectie met behulp van contacten die aangebracht worden in de wand van de gietvorm. Een methode om het vullen van de gietvorm zichtbaar te maken is door de bovenkant van de gietvorm met glas af te dekken. Door het vullen van de vorm te registreren met een videocamera wordt inzicht gekregen in de invloed van het aansnijsysteem en de geometrie van de gietvorm op het stromingsgedrag. Een voorbeeld van een dergelijke meting wordt afgebeeld in figuur 1.1.

De beperking van deze technieken ligt in de ondoorzichtbaarheid van vloeibaar aluminium.



Figuur 1.1: Opname van het vullen van een horizontale, dunwandige gietvorm met vloeibaar aluminium [Van Tol, 1995].

Een kwantitatieve interpretatie van het snelheidsveld is niet mogelijk. Informatie over het snelheidsveld en de aanwezigheid van snelheidsfluctuaties in de vloeistof kan inzicht verschaffen in het stollingsgedrag. Daartoe moet het gietproces gesimuleerd worden.

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van twee soorten simulaties. Met de experimentele techniek Particle Image Velocimetry (PIV) kan het snelheidsveld kwantitatief gemeten worden, waarbij water als simulatievloeistof functioneert. Een andere benadering is het numeriek simuleren van het gietproces met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD).

1.2 Simulatie van het gietproces

1.2.1 Particle Image Velocimetry

Met behulp van Particle Image Velocimetry is een kwantitatieve visualisatie van het snelheidsveld bij het vullen van de gietvorm mogelijk. Daartoe wordt het gietproces gesimuleerd met water, waarmee onder stromingscondities, die zoveel als mogelijk overeenkomen met de werkelijke situatie, een perspex model van de gietvorm wordt gevuld. Aan het water worden kleine, lichtreflecterende deeltjes toegevoerd voor de visualisatie van de vloeistofstroming. De verplaatsing van de deeltjes wordt digitaal vastgelegd of op fotografische film. Per opname wordt de perspexvorm meerdere malen belicht, zodat de deeltjes meerdere malen worden afgebeeld op één opname.

Met behulp van een interrogatieprocedure wordt de verplaatsing van de deeltjes berekend voor kleine gedeelten van de opname. Het snelheidsveld kan worden geconstrueerd door de verplaatsing te delen door het tijdsinterval tussen twee belichtingen en de vergroting van het optische systeem. Op deze wijze is een kwantitatieve bepaling van het snelheidsveld mogelijk.

1.2.2 Computational Fluid Dynamics

Simulatie van het gietproces met behulp van Computational Fluid Dynamics is gebaseerd op het numeriek oplossen van de bewegingsvergelijkingen voor de vloeistofstroming. Met behulp van het CFD-softwarepakket FLOW-3D kan een beschrijving gegeven worden van

het snelheidsveld in de gietvorm en de vorm en verplaatsing van het vrije oppervlak. In dit onderzoek zijn simulaties gedaan voor het gietmodel dat toegepast wordt in de experimenten met Particle Image Velocimetry. Er is geen rekening gehouden met stollingsverschijnselen die in het gieten met vloeibare aluminium kunnen optreden als gevolg van warmteuitwisseling met de omgeving.

De experimentele resultaten die verkregen zijn met Particle Image Velocimetry kunnen gebruikt worden voor de validatie van de computersimulaties.

1.3 Doelstelling van het onderzoek

Stromingsexperimenten met aluminium geven geen informatie over het snelheidsveld van de vloeistof tijdens het vullen van de gietvorm. Met behulp van een kwantitatieve visualisatie-techniek als Particle Image Velocimetry wordt deze aanvullende informatie wel verkregen. Daarnaast biedt deze techniek inzicht in de kwaliteit van computersimulaties met Computational Fluid Dynamics software.

Doel van dit onderzoek is een kwantitatieve bepaling van het snelheidsveld tijdens het vulproces in een horizontale, dunwandige gietvorm. Deze informatie moet dienen tot een beter begrip van het gietproces met vloeibare aluminium.

1.4 Indeling van het verslag

In hoofdstuk 2 wordt de theoretische achtergrond van Particle Image Velocimetry beschreven en wordt een uiteenzetting gegeven van de systeemparameters en optimalisatie van een PIV-systeem. Op grond van de parameteranalyse wordt in hoofdstuk 3 de opzet van de voor dit onderzoek verrichte experimenten behandeld met een beschrijving van de gebruikte software. De resultaten van de metingen met Particle Image Velocimetry worden besproken in hoofdstuk 4. Er zijn experimenten verricht voor twee verschillende uitvoeringen van het aansnijsysteem met zowel digitale als fotografische registratie.

In hoofdstuk 5 volgt een uiteenzetting van de simulaties die gedaan zijn met Computational Fluid Dynamics. In hoofdstuk 6 worden de computersimulaties vergeleken met de experimentele resultaten die verkregen zijn met Particle Image Velocimetry en wordt een vergelijking getrokken met de stromingsexperimenten voor vloeibaar metaal. In hoofdstuk 7 worden ten slotte de conclusies uit het onderzoek vermeld en aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het afstuderen aan de faculteit der Scheikundige Technologie en der Materiaalkunde van de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek heeft plaatsgevonden op het Kramers Laboratorium voor Fysische Technologie onder begeleiding van drs. R. van Tol. De afstudeerhoogleraar is prof. dr. ir. H.E.A. van den Akker.

Hoofdstuk 2

Particle Image Velocimetry

In dit hoofdstuk wordt eerst de methode van beeldacquisitie bij Particle Image Velocimetry (PIV) behandeld. Vervolgens wordt het begrip interrogatiemethode geïntroduceerd en wordt nader ingegaan op de systeemparameters. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een methode voor de detectie van afwijkende vectoren.

2.1 Kwantitatieve visualisatie van de vloeistofstroming

2.1.1 Principe

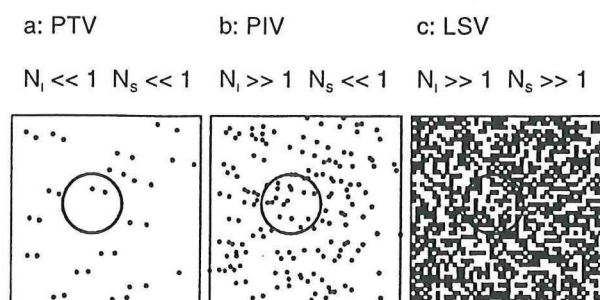
Particle Image Velocimetry is een experimentele techniek voor het instantaan bepalen van het snelheidsveld in een doorsnede van de vloeistofstroming. Visualisatie van de vloeistofstroming vindt in het algemeen plaats door lichtreflecterende deeltjes (diameter $\approx 10 - 500\mu m$) in de stroming te brengen. Van belang is dat de stroming goed wordt gevolgd en niet door de aanwezigheid van de deeltjes wordt beïnvloed. Met behulp van een lichtbron wordt een doorsnede van de stroming belicht, zodat een twee-dimensionaal beeld wordt gevormd van de deeltjes die zich in het lichtvlak bevinden. Dit beeld wordt vastgelegd op fotografische film of door middel van directe digitale registratie.

Het meetprincipe is gebaseerd op het registreren van de verplaatsing, $\Delta\vec{x}$ van de deeltjes in een bepaald tijdsinterval, Δt . In het algemeen wordt de stroming daartoe twee maal belicht, zodat elk deeltje twee maal op de opname wordt afgebeeld. De lokale snelheid volgt uit de volgende vergelijking:

$$\vec{v}(\vec{x}, t) = \frac{\Delta\vec{x}(\vec{x}, t)}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Van belang bij het toepassen van vergelijking 2.1 is de hoeveelheid informatie waarin de verkregen opname voorziet. Dit wordt uitgedrukt in twee dimensieloze kentallen, te weten de deeltjesdichtheid N_S en de beelddichtheid N_I .

De deeltjesdichtheid geeft weer of de opname uit individuele afbeeldingen van deeltjes zal bestaan ($N_S \ll 1$) of dat er sprake is van overlap ($N_S \gg 1$). Het andere dimensieloze kental, de beelddichtheid N_I , geeft het aantal afbeeldingen van deeltjes weer binnen een bepaald



Figuur 2.1: De opname in: (a) particle tracking velocimetry (PTV), (b) particle image velocimetry (PIV), (c) laser speckle velocimetry (LSV). De kentallen N_I en N_S zijn bepalend voor respectievelijk de informatie-inhoud van de opname en de onderscheidbaarheid van de afzonderlijke deeltjes. De cirkel geeft een interroгатiegebied aan [Westerweel, 1993].

gebied rond een punt waar men de stromingssnelheid wil bepalen. Dit gebied wordt het *interroгатiegebied* genoemd.

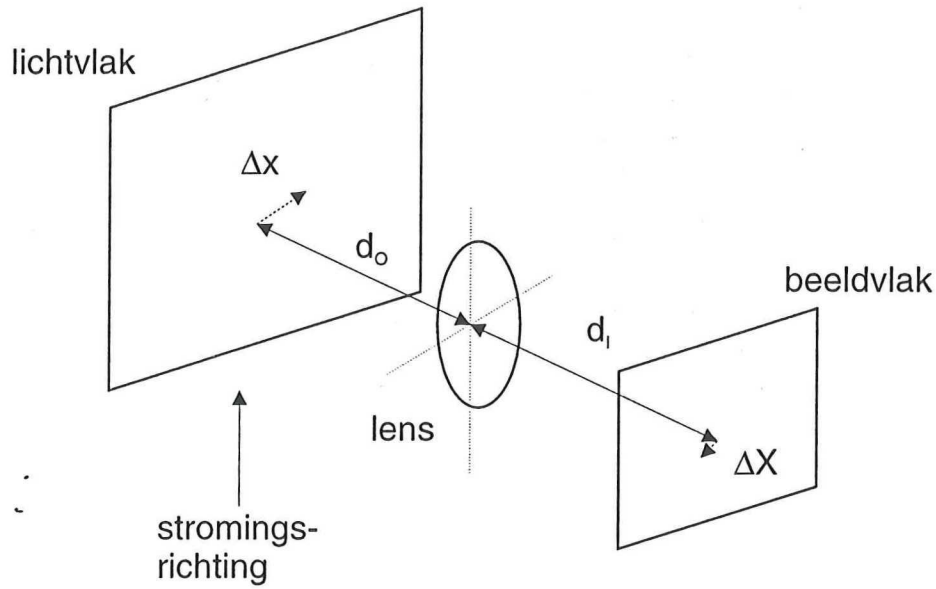
Op grond van de waarde van de kentallen N_S en N_I wordt onderscheid gemaakt in drie optische meettechnieken, te weten Particle Tracking Velocimetry (PTV), Particle Image Velocimetry (PIV), en Laser Speckle Velocimetry (LSV). Deze indeling wordt geïllustreerd in figuur 2.1.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van Particle Image Velocimetry. In de verkregen opnamen zijn de individuele deeltjes goed van elkaar te onderscheiden ($N_S \ll 1$), maar is de beeld dichtheid in een interroгатiegebied zo groot ($N_I \gg 1$) dat een statistische methode wordt gehanteerd voor het bepalen van de meest waarschijnlijke verplaatsing in een interroгатiegebied.

2.1.2 Het optische systeem

Een lichtbron, bij voorbeeld een laser of een stroboscoop, wordt gebruikt voor het verlichten van de deeltjes die met de stroming worden meegevoerd. Voor een dubbelbelicht systeem wordt elke opname twee maal met een korte lichtpuls afkomstig van de lichtbron belicht. Met behulp van een optisch systeem worden deze deeltjes vastgelegd in het beeldvlak. In figuur 2.2 wordt een schematische weergave gegeven van het optische systeem.

Het lichtvlak wordt parallel aan de stromingsrichting gericht, zodat de meeste deeltjes ook bij een tweede belichting worden geregistreerd. De verplaatsing in het beeldvlak, $\Delta \vec{X}$ is gerelateerd aan de deeltjesverplaatsing in de vloeistofstroming, $\Delta \vec{x}$ door de lineaire vergroting, M . Deze kan worden berekend uit de verhouding van de beeldafstand, d_I , en de voorwerpafstand, d_O . Deze afstanden zijn door middel van de lenzenformule gerelateerd aan de



Figuur 2.2: Schematische weergave van het optische systeem voor Particle Image Velocimetry

brandpuntsafstand van de lens, f . In formulevorm:

$$\frac{1}{d_I} + \frac{1}{d_O} - \frac{1}{f} = 0 \quad (2.2)$$

$$M = \frac{d_I}{d_O} \quad (2.3)$$

Volgens [Adrian, 1991] heeft naast de geometrie van het optische systeem ook de intensiteitsverdeling over een deeltje invloed op de afmetingen van het deeltje in het beeldvlak. De deeltjesdiameter, d_p , en de *point response function* ten gevolge van het optische systeem, d_s , leveren beide een bijdrage aan de diameter van een deeltje in het beeldvlak, d_e :

$$d_e = \sqrt{M^2 d_p^2 + d_s^2} \quad (2.4)$$

De invloed van het lensstelsel komt tot uitdrukking in de *point response function*, d_s , waarvoor de volgende relatie geldig is:

$$d_s = 2.44(1 + M)\lambda \frac{f}{D_{lens}} \quad (2.5)$$

Hierin staat λ voor de golflengte van het gebruikte licht en D_{lens} voor de diameter van de lens. De invloed van de twee termen in vergelijking 2.4 wordt duidelijk uit een voorbeeld.

Voor een optisch systeem waarvoor geldt dat $M = 1$, $f/D_{lens} = 8$ en $\lambda = 700$ nm, zal d_s gelijk zijn aan $25 \mu\text{m}$ (vergelijking 2.5). Voor deeltjes met een diameter van $10 \mu\text{m}$ of minder levert de *point response function*, d_s , de overheersende bijdrage aan de beelddiameter. Voor deeltjes met een diameter van $50 \mu\text{m}$ of meer is de beelddiameter gelijk aan Md_p .

2.1.3 Registratie van het snelheidsveld

Voor de registratie van de vloeistofstroming wordt in de Particle Image Velocimetry voor veel toepassingen gebruik gemaakt van fotografische film. Het voordeel van fotografische film

is de hoge ruimtelijke resolutie. Een negatief met afmetingen van 24 bij 36 mm heeft een gemiddelde resolutie van ongeveer 150 lijnen per millimeter en bestaat daardoor uit ruim 20 miljoen korrels. De beperking van het gebruik van fotografische film ligt in het *aantal* opnamen dat gemaakt kan worden. Een fotocamera met eenvoudige motordrive is slechts in staat enkele opnamen per seconde vast te leggen.

Een andere mogelijkheid is directe digitale registratie met behulp van een CCD-camera. Dit is een camera waarin het objectvlak door een lens wordt geprojecteerd op een array Charge Coupled Device sensoren. De beperking van de CCD-camera ligt in de geringe ruimtelijke resolutie. Standaard CCD-camera's hebben een resolutie van maximaal 512 bij 512 pixels¹. De CCD-camera die in dit onderzoek is gebruikt heeft een resolutie van 256 bij 256 pixels en is in staat om 200 opnamen (frames) per seconde te registreren. Ten opzichte van de registratie met een fotocamera is directe registratie met een CCD-camera vooral geschikt voor toepassingen, die een groot aantal opnamen per tijdseenheid vereisen.

Een belangrijke overweging naast de resolutie van de opname en het aantal opnamen dat per seconde verkregen wordt is de vereiste analysetijd. Door het gebruik van een CCD-camera voor het vastleggen van het snelheidsveld kan de beeldacquisitie en de analyse van de opnamen in een digitale omgeving plaatsvinden. Het gebruik van fotografische film vereist het behandelen van het negatief en mechanische manipulaties voordat de PIV-data geanalyseerd kan worden. Het gebruik van een CCD-camera kan in plaats van een fotocamera een aanzienlijke kostenbesparing (rekentijd, chemicaliën e.d.) opleveren.

Beide methoden van registratie zijn in dit onderzoek toegepast. Op de analysemethode van de PIV-data wordt in de volgende paragraaf nader ingegaan.

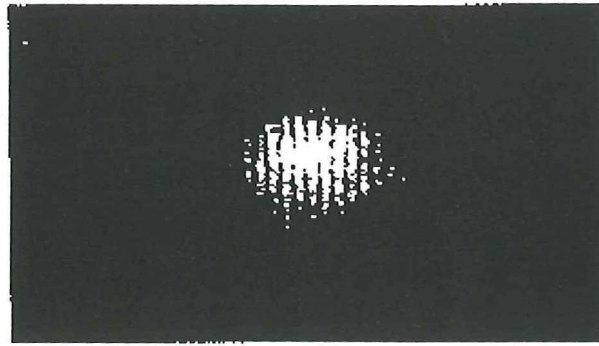
2.2 Analyse van de PIV-opnamen

De analyse van PIV-opnamen vindt plaats door de opname in een aantal interrogatiegebieden op te delen, waarbij voor elk gebied afzonderlijk de meest waarschijnlijke verplaatsing wordt berekend met behulp van een interrogatiemethode. De afmetingen van een interrogatiegebied zijn zodanig dat verondersteld kan worden dat de verplaatsing van de afbeeldingen van deeltjes uniform is over dit gebied. In de Particle Image Velocimetry wordt overwegend gebruikt gemaakt van twee soorten interrogatiemethoden, te weten de analyse van de Young's fringes en de directe digitale correlatie.

2.2.1 Young's fringes

Het snelheidsveld wordt op fotografische film vastgelegd met behulp van een optisch systeem (zie figuur 2.2). Na ontwikkeling wordt het filmnegatief in een traverseersysteem geplaatst. Een klein gedeelte van het negatief (het interrogatiegebied) wordt door een laserstraal belicht. Door een lens wordt het doorgelaten licht geprojecteerd op een CCD-camera. De afgebeelde

¹Er zijn hoge-resolutie CCD-camera's verkrijgbaar met een resolutie van 2048 bij 2048 pixels, maar zijn op dit moment kostbaar en relatief langzaam.



Figuur 2.3: Typisch Young's fringes patroon [Adrian, 1991].

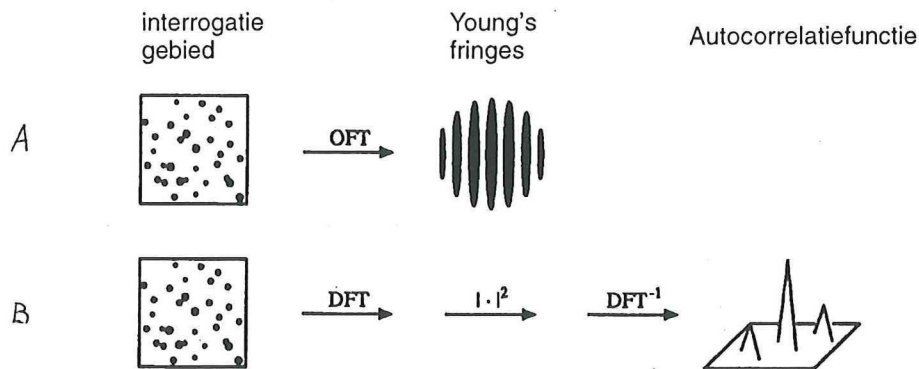
deeltjes op het negatief hebben de werking van een diffractierooster, zodat in het beeldvlak een patroon van afwisselend donkere en lichte banden ontstaat. Dit patroon staat bekend als het Young's fringes patroon. Een typisch Young's fringes patroon wordt weergegeven in figuur 2.3.

De richting van deze fringes staat loodrecht op de richting van de deeltjesverplaatsing en de afstand tussen de fringes is omgekeerd evenredig met de grootte van de verplaatsing. De fringes worden gedigitaliseerd door de CCD-camera en geanalyseerd door een computer. Na analyse van het patroon wordt het negatief getraverseerd naar een volgend interrogatiegebied. Aangezien deze analysemethode gebruik maakt van een optisch inleessysteem van PIV-negatieven wordt aan deze methode in het algemeen gerefereerd als *optische Particle Image Velocimetry*.

2.2.2 Directe correlatie

Een andere methode voor het analyseren van opnamen op fotografische film maakt gebruik van hetzelfde inleessysteem, maar nu projecteert de lens gedeelten van het negatief afzonderlijk op het beeldvlak van de CCD-camera. Op deze manier wordt de hoge resolutie van het negatief voor een groot deel behouden. Voor het berekenen van de verplaatsing van de deeltjes in het beeldvlak wordt voor elk interrogatiegebied een correlatietechniek gebruikt, zoals bij voorbeeld de autocorrelatiefunctie. Een digitale implementatie is mogelijk door het toepassen van het Fast Fourier Transform (FFT) algoritme.

Door digitale registratie van het snelheidsveld met een CCD-camera wordt het fotografisch proces en de mechanische handelingen bij het inlezen vermeden. De digitale opnamen worden door een computer opgeslagen, waardoor directe correlatie met de autocorrelatiefunctie van een interrogatiegebied mogelijk is. Het nadeel van deze manier van registratie is dat een maximale resolutie haalbaar is gelijk aan de resolutie van de CCD-camera. De afwezigheid van de fotografische bewerkingen betekent echter een forse toename van de analysesnelheid. Bij het onderzoeken van een grote hoeveelheid PIV-data (een groot aantal opnamen per seconde) zal digitale registratie door de sterk verkorte analysetijd de voorkeur hebben boven



Figuur 2.4: Schematische weergave van (a) de Young's fringes methode, en (b) directe correlatie met autocorrelatie. De gebruikte afkortingen verwijzen naar: optische Fourier transformatie (OFT) en discrete Fourier transformatie (DFT). De operator $| \cdot |^2$ staat voor de gekwadraterde absolute waarde van een complex veld. [Westerweel, 1993].

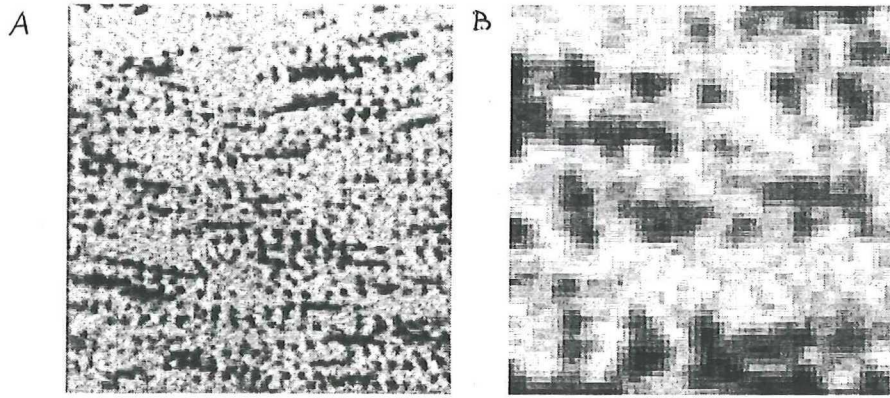
fotografische registratie.

Het gebruik van een directe correlatietechniek als de autocorrelatiefunctie voor het analyseren van PIV-opnamen wordt in het algemeen *digitale* Particle Image Velocimetry genoemd. Bij alle experimenten, die in dit onderzoek zijn verricht, is directe correlatie gebruikt voor de PIV-analyse. In figuur 2.4 wordt het verschil tussen de twee analysetechnieken schematisch weergegeven. In de volgende paragraaf volgt een beschouwing van de wijze waarop door middel van een interrogatiemethode als autocorrelatie de meest waarschijnlijke verplaatsing van een deeltje in een interrogatiegebied wordt gevonden.

2.3 Schatting van de verplaatsing met de autocorrelatiefunctie

Een veel toegepaste interrogatiemethode voor twee of meer maal belichte PIV-opnamen is de autocorrelatiefunctie. In figuur 2.5 (a) wordt een typische opname weergegeven die verkregen is door directe digitale registratie met behulp van een CCD-camera: De opname bestaat uit 224 bij 224 pixels. De vloeistofstroming is gericht van links naar rechts. Voor het bepalen van het snelheidsveld wordt de opname opgedeeld in interrogatiegebieden van 64 bij 64 pixels. Een dergelijk interrogatiegebied staat afgebeeld in figuur 2.5 (b).

Bij de beschouwing van de statistische eigenschappen van de autocorrelatiefunctie is het van belang dat bij het digitaliseren van het door de lens geprojecteerde lichtvlak een *continu* signaal overgaat in een *discreet* signaal. Voor het bepalen van de autocovariantiefunctie, $R_{II}[r, s]$,



Figuur 2.5: Drie maal belichte opname verkregen met digitale Particle Image Velocimetry (a) en interrogeringsgebied (b)

gebruikt. De autocovariantiefunctie is de niet-genormeerde autocorrelatiefunctie [Westerweel, 1993; Priestley, 1975].

Een interrogeringsgebied zoals in figuur 2.5(b) is opgebouwd uit $N \times N$ pixels (in dit geval 64 bij 64 pixels), waarbij elke pixel beschreven kan worden met twee coördinaten, i en j , en een intensiteit, $I_{i,j}$. De intensiteit van een pixel kan variëren op een grijswaardeschaal van 0 (wit) tot 255 (zwart).

Een goede schatter voor het gemiddelde van de intensiteit van het interrogeringsgebied is het aantalgemiddelde:

$$\bar{I} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I_{i,j} \quad (2.6)$$

Met het aantalgemiddelde, \bar{I} wordt de autocovariantiefunctie bepaald. Voor een interrogeringsgebied met de afmetingen $N \times N$ pixels kan de autocovariantiefunctie met de volgende schatter worden bepaald voor een verplaatsing over $[r, s]$:

$$\hat{R}_{II}[r, s] = \frac{1}{N^2} \sum_i^{N-|r|} \sum_j^{N-|s|} (I_{i,j} - \bar{I})(I_{i+r,j+s} - \bar{I}) \quad (2.7)$$

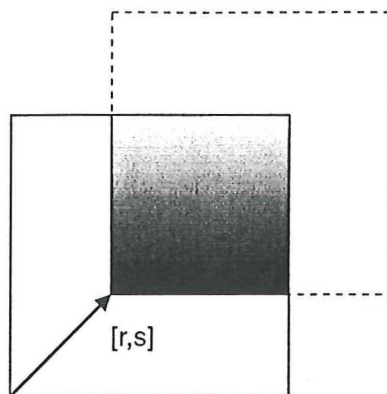
De sommatietermen in vergelijking 2.7 hebben de volgende betekenis:

$$\sum_i^{N-|r|} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N-r} & \text{voor } r \geq 0 \\ \sum_{i=1-r}^N & \text{voor } r < 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

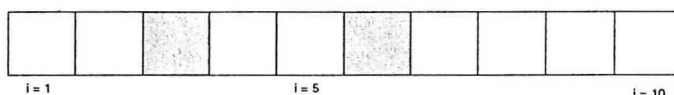
Dit betekent dat bij voorbeeld in dit geval met $r = 8 \text{ pixels}$ gesommeerd wordt over de pixels met i -coördinaat $1, \dots, 56 \text{ pixels}$. De tweede sommatieterm in op een vergelijkbare manier te interpreteren.

Als van de schatter \hat{R} in vergelijking 2.7 de verwachtingswaarde wordt bepaald, blijkt het een *biased* schatter te zijn:

$$E\{\hat{R}_{II}[r, s]\} = \left(1 - \frac{|r|}{N}\right) \left(1 - \frac{|s|}{N}\right) R_{II}[r, s] \quad (2.9)$$



Figuur 2.6: Verklaring van het *in-plane loss of pairs* effect in de autocovariantiefunctie. Het gearceerde deel geeft het gedeelte aan dat bijdraagt aan de correlatieschatter.



Figuur 2.7: Eén-dimensionale weergave van een interrogatiegebied met tien pixels. De gearceerde pixels hebben een intensiteit van 5, de andere pixels 0.

De bias van de schatter ten opzichte van de autocovariantie is volgens vergelijking 2.9 afhankelijk van de waarde van de verplaatsing ten opzichte van de afmetingen van het interrogatiegebied. De bias is $O(1/N)$ en verdwijnt voor $N \rightarrow \infty$.

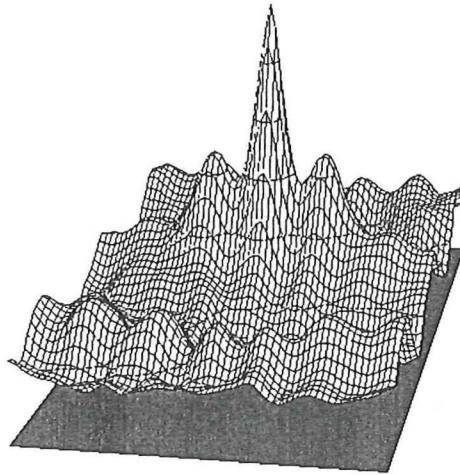
[Adrian, 1988] noemt deze bias het *in-plane loss of pairs* effect. In figuur 2.6 wordt dit schematisch weergegeven. Voor een interrogatiegebied met bepaalde afmetingen en een deeltjesverplaatsing over vector $[r, s]$ zal alleen het gearceerde gedeelte van het interrogatiegebied in figuur 2.6 bijdragen aan de verplaatsingspiek in het correlatiespectrum. Het effect van *in-plane loss of pairs* is goed duidelijk als een grote snelheidsgradiënt in het meetgebied aanwezig is. Een interrogatiegebied zal in dat geval meer deeltjes met een relatief kleinere dan met een grotere verplaatsing bevatten. Er is zodoende sprake van ruimtelijke filtering, omdat de meting de neiging heeft de laagste snelheid in het interrogatiegebied weer te geven. De variatie in verplaatsing binnen één interrogatiegebied moet dus binnen zekere grenzen liggen. Op deze eigenschappen van een PIV-systeem wordt teruggekomen in paragraaf 2.5.

Het gebruik van vergelijking 2.7 voor het berekenen van de meest waarschijnlijke verplaatsing in een interrogatiegebied wordt verduidelijkt met een één-dimensionaal voorbeeld. In figuur 2.7 is een rij pixels gegeven, waarvan twee pixels een intensiteit hebben van 5 en de andere acht pixels achtergrond zijn met een intensiteit 0.

Met behulp van vergelijking 2.6 kan de gemiddelde intensiteit berekend worden: $\bar{I} = 1$. De waarde voor de niet-genormaliseerde autocorrelatiefunctie kan nu worden bepaald voor elke verplaatsing r door vergelijking 2.7 toe te passen. In tabel 2.1 zijn de resultaten weergegeven. De intensiteitsfluctuaties ten opzichte van de gemiddelde intensiteit, \bar{I} , worden voor elke waarde van de verplaatsing, r , met elkaar vermenigvuldigd en gesommeerd. Als bij een bepaalde verplaatsing twee pixels beide een grote afwijking van de gemiddelde intensiteit

$\hat{R}[r]$	waarde	commentaar
$\hat{R}[-3]$	0.25	verplaatsingspiek
$\hat{R}[-2]$	-0.16	ruis
$\hat{R}[-1]$	-0.15	ruis
$\hat{R}[0]$	0.58	zelf-correlatiepiek
$\hat{R}[1]$	-0.15	ruis
$\hat{R}[2]$	-0.16	ruis
$\hat{R}[3]$	0.25	verplaatsingspiek

Tabel 2.1: Autocovariantiefunctie voor één-dimensionaal voorbeeld.



Figuur 2.8: Autocorrelatiefunctie van interroгатiegebied.

kennen, zal dit een hoge bijdrage leveren aan de sommatieterm. Dit is uiteraard het geval voor $r = 0$; de zelf-correlatiepiek. Dit is ook het geval als de waarde van r gelijk is aan de werkelijke verplaatsing in het interroгатiegebied; een verplaatsingspiek. Uit tabel 2.1 wordt tevens duidelijk dat twee verplaatsingspieken ontstaan.

[Adrian, 1988] leidt af dat de autocorrelatiefunctie voor een twee maal belichte opname kan worden opgedeeld in vijf termen:

$$\hat{R}_{II}[u, v] = \hat{R}_P[u, v] + \hat{R}_{D+}[u, v] + \hat{R}_{D-}[u, v] + \hat{R}_F[u, v] + \hat{R}_C[u, v] \quad (2.10)$$

De term \hat{R}_P staat voor de zelfcorrelatiepiek, de termen \hat{R}_{D+} en \hat{R}_{D-} voor de verplaatsingspieken aan weerszijden van de zelfcorrelatiepiek, de term \hat{R}_F staat voor de verzameling ruispieken, en \hat{R}_C is de gemiddelde achtergrondcorrelatie. De niet-genormeerde autocorrelatiefunctie van het interroгатiegebied in figuur 2.5 is grafisch weergegeven in figuur 2.8.

Aangezien er sprake is van een drie maal belichte opname zouden er behalve de zelfcorrelatiepiek en twee verplaatsingspieken nog twee extra pieken zichtbaar moeten zijn die een verschuiving ten opzichte van het midden hebben van twee maal de verplaatsing. Deze pieken zijn voor de autocovariantiefunctie in figuur 2.8 echter nauwelijks meer onderscheidbaar

van de ruispieken.

De symmetrie van de autocorrelatiefunctie wordt uit deze figuur goed duidelijk. Bij het bepalen van de verplaatsingsvector zal een 180° dubbelzinnigheid bestaan. De aanwezigheid van circulatielussen in een stroming is hierdoor slecht waar te nemen. In veel toepassingen echter heeft de stroming een bepaalde hoofdrichting en is men geïnteresseerd in afwijkingen van de gemiddelde snelheid in deze richting.

Er bestaat een alternatieve manier om de autocorrelatiefunctie te berekenen door gebruik te maken van een discrete Fourier transformatie. Dit is een aantrekkelijke methode, omdat gebruik kan worden gemaakt van een snel algoritme, de *Fast Fourier Transform* (FFT). Het gebruik van de Fourier transformatie is een toepassing van de *Wiener-Khinchin* stelling [Steward, 1983]. De procedure voor het berekenen van de autocovariantiefunctie met FFT's kan als volgt worden samengevat:

$$\hat{R}_{II}[r, s] = FFT^{-1} (S_{i,j} \cdot S_{i,j}^*) \quad (2.11)$$

met:

$$S_{i,j} = FFT (I_{i,j}) \quad (2.12)$$

In vergelijking 2.11 staat $S_{i,j}^*$ voor de complex geconjugeerde van $S_{i,j}$. Het grote voordeel van het gebruik van deze procedure is de efficiency van het FFT algoritme. Directe berekening van $\hat{R}_{II}[r, s]$ met vergelijking 2.7 vereist $O(N^4)$ vermenigvuldigingen, terwijl de FFT-procedure $O(N^2 \log N)$ vermenigvuldigingen vereist voor hetzelfde resultaat.

Een eerste schatting van de meest waarschijnlijke verplaatsing vindt plaats door de posities van de lokale maxima in het autocorrelatiespectrum te bepalen en op te slaan. Gezien de symmetrie van de autocorrelatiefunctie worden slechts twee van de vier kwadranten afgezocht. Het hoogste lokale maximum zal de zelfcorrelatiepiek op $[r, s] = [0, 0]$ vertegenwoordigen. Verondersteld wordt dat de op één na hoogste piek de verplaatsingspiek is op $[m, n]$. Het bepalen van dit maximum zal de verplaatsing opleveren met een nauwkeurigheid van maximaal 1 pixel. Voor een verplaatsing van 10 pixels zal dit een relatieve nauwkeurigheid opleveren van 10 %.

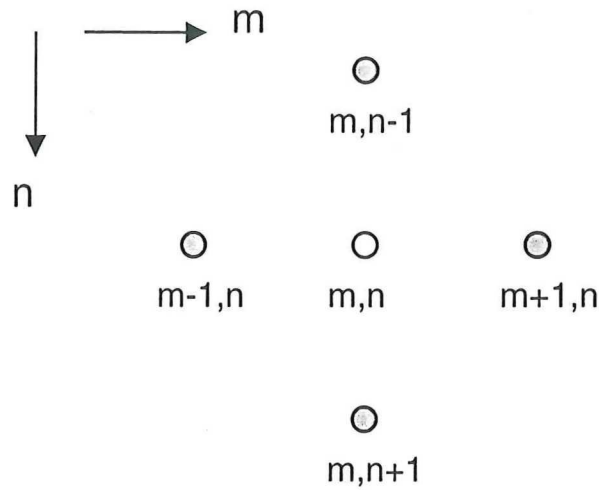
Door de waarden van de autocorrelatiefunctie voor omringende pixels van de verplaatsingspiek mee te nemen kan de nauwkeurigheid op *sub-pixel* niveau afgeschat worden. Van belang voor de nauwkeurigheid van de bepaling is over hoeveel pixels de verplaatsingspiek wordt uitgespreid. Op deze nauwkeurigheid wordt teruggekomen in paragraaf 2.6.2.

2.4 Schatting van de verplaatsing op sub-pixel niveau

Het op één na hoogste lokale maximum zal bij aanwezigheid van voldoende afbeeldingen van deeltjes in het interrogiatiegebied de positie weergeven van de verplaatsingspiek in discrete (gehele) waarden, $[m, n]$. De werkelijke verplaatsing, $[r_D, s_D]$, is dan als volgt te beschrijven:

$$r_D = (m + \epsilon_m)\Delta \quad (2.13)$$

$$s_D = (n + \epsilon_n)\Delta \quad (2.14)$$



Figuur 2.9: De vier omringende pixels van de verplaatsingspiek in het autocorrelatiespectrum.

In deze vergelijking staan ϵ_m en ϵ_n voor de fractionele verplaatsingen, waarvoor geldt dat ze groter zijn dan -0.5 en kleiner of gelijk aan 0.5 . Het symbool Δ staat voor de afmetingen van een pixel en wordt bepaald door de resolutie. Deze fractionele verplaatsingen worden geschat door te interpoleren rond het lokale maximum van $\hat{R}_{II}[r, s]$. De fractionele verplaatsingen kunnen onafhankelijk van elkaar berekend worden, zodat een schatter één-dimensionaal kan worden gedefinieerd.

[Westerweel, 1993] heeft drie zogenaamde drie-puntsschatters voor de fractionele verplaatsing onderzocht. De verplaatsing op sub-pixel niveau wordt berekend door de intensiteit van de vier omringende pixels mee te nemen. Dit wordt schematisch weergegeven in figuur 2.9.

[Westerweel, 1993] stelt dat de Gaussische schatter het beste resultaat geeft bij lage resolutie. Beschouwen we de punten in de m -richting, dan wordt de Gaussische schatter als volgt gedefinieerd:

$$\hat{\epsilon}_G = \frac{\ln \hat{R}_{m-1} - \ln \hat{R}_{m+1}}{2(\ln \hat{R}_{m-1} + \ln \hat{R}_{m+1} - 2 \ln \hat{R}_m)} \quad (2.15)$$

Voor een verplaatsing van $1/4$ van de afmetingen van een interrogatiegebied is met deze schatter een relatieve nauwkeurigheid haalbaar van beter dan 1% .

2.5 Parameters van een PIV-systeem

Het gebruik van Particle Image Velocimetry vereist het instellen van een aantal experimentele parameters, zoals het aantal deeltjes dat met de vloeistofstroming wordt meegeleid, de afmetingen van het interrogatiegebied en de ruimtelijke resolutie. Deze parameters hebben invloed op de nauwkeurigheid en de betrouwbaarheid van de verkregen PIV-data. [Keane and Adrian, 1990] en [Keane and Adrian, 1991] hebben deze parameters gedefiniëerd en hebben op grond van Monte Carlo simulaties optimale instellingen bepaald. De theoretische achtergrond van deze parameteranalyse is in het kader van dit onderzoek onderdeel van een literatuurstudie geweest.

De kwaliteit van een PIV systeem wordt beoordeeld op grond van drie criteria:

- De *ruimtelijke resolutie*, die gedefinieerd wordt als de afmetingen van het meetvolume ten opzichte van de lengteschaal van het stromingsveld.
- De *betrouwbaarheid* van de berekende snelheidsvectoren, of het aantal interrogatiegebieden in een meetgebied dat goede vectoren oplevert.
- De *nauwkeurigheid* waarmee de snelheidsvectoren worden berekend.

Deze criteria staan niet los van elkaar; bepaalde parameters kunnen meerdere criteria tegelijk beïnvloeden. In de volgende paragrafen zal nader worden ingegaan op de systeemparemeters en hun operatiegebied.

2.5.1 De resolutie van een digitale PIV-opname

Bij het digitaliseren van een opname of het direct registreren van de vloeistofstroming met behulp van een CCD-camera moet een keuze gemaakt worden voor de lineaire pixeldichtheid van de opname, ofwel het aantal pixels gedeeld door de afmetingen van het meetgebied. De keuze van de pixeldichtheid bepaalt in hoeverre de digitale opname een goede representatie is van de originele, *continue* opname. Van belang bij de keuze voor de pixeldichtheid is, dat het doel van het digitaliseren van een PIV-opname *niet* het exact reconstrueren van de continue opname is. Voor de interrogatie van een opname is men immers niet geïnteresseerd in de exacte vorm van de afbeelding, maar in de *positie* van de afgebeelde deeltjes.

Een optisch systeem, zoals afgebeeld in figuur 2.2, wordt gekarakteriseerd door de zogenaamde optische bandbreedte W , die afhankelijk is van onder andere de lineaire vergroting M , en de golflengte van het licht λ . Voor de exacte reconstructie van een continue opname is een pixeldichtheid $2W$ nodig.

[Westerweel, 1993] stelt dat de interrogatiemethode voor de Particle Image Velocimetry niet geïnteresseerd is in een exacte reconstructie van de continue opname, zodat de pixeldichtheid van een digitale opname niet wordt bepaald door de *optische bandbreedte*, maar door een bandbreedte W_P , die afhankelijk is van de breedte van het afgebeelde deeltje σ_h :

$$\sigma_h = \frac{d_e \sqrt{2}}{2.44\pi} \quad (2.16)$$

$$W_P = F \frac{1}{2\pi\sigma_h} \text{ met } 0.71 < F < 1.00 \quad (2.17)$$

Hierin staat d_e voor de diameter van een deeltje in het beeldvlak (zie vergelijking 2.4). De factor F is een verhouding die het gevolg is van de afbeelding op een vierkant rooster van pixels. De minimale pixeldichtheid is gelijk aan twee keer de bandbreedte W_P .

[Westerweel, 1993] stelt dat de bandbreedte W_P voor veel PIV-systemen een factor 3 – 4 lager is dan de optische bandbreedte W . Dit betekent een vergelijkbare reductie in de pixeldichtheid.

2.5.2 Het aantal deeltjes in een interrogatiegebied

De begrippen deeltjesdichtheid, N_S , en beelddichtheid, N_I , zijn in paragraaf 2.1.1 geïntroduceerd voor het positioneren van PIV ten opzichte van PTV en LSV. [Keane and Adrian, 1990] geeft de volgende omschrijving van de deeltjesdichtheid, N_S :

De deeltjesdichtheid wordt gedefinieerd als het *gemiddelde* aantal deeltjes in een *volume* dat zich in het lichtvlak bevindt, met een diameter, d_e/M , gelijk aan een deeltje in het beeldvlak dat terug in de vloeistof wordt geprojecteerd.

In formulevorm:

$$N_S = C \Delta Z_0 \frac{\pi}{4} \frac{d_e^2}{M^2} \quad (2.18)$$

waarin C voor het aantal deeltjes per eenheid volume staat, ΔZ_0 voor de dikte van de lichtlaag, en d_e voor de diameter van het deeltje in het *beeldvlak*. [Adrian, 1991]) stelt dat de waarschijnlijkheid om een bepaald aantal deeltjes in een vloeistofvolume te vinden aan een Poisson verdeling voldoet.

Bij een lage deeltjesdichtheid ($N_S \ll 1$) is de gemiddelde afstand tussen deeltjes veel groter dan de diameter van een deeltje in het *beeldvlak* en is de waarschijnlijkheid dat er zich twee of meer deeltjes in dit volume bevinden laag. De opname bestaat uit geïsoleerde afbeeldingen. Voor een hoge waarde van de deeltjesdichtheid ($N_S \gg 1$) zullen de afbeeldingen van deeltjes met elkaar overlappen in het beeldvlak (*speckle* patroon).

Bij het gebruik van een interrogatiemethode als de autocorrelatiefunctie is de dichtheid en de verdeling van deeltjes in het beeldvlak van belang. [Adrian, 1991] hanteert de volgende definitie voor de beelddichtheid, N_I , die grote overeenkomst vertoont met de deeltjesdichtheid:

De beelddichtheid staat voor het aantal deeltjes in een volume met diameter d_I/M , die geprojecteerd worden op een interrogatiegebied van het beeldvlak.

In formulevorm:

$$N_I = C \Delta Z_0 \frac{\pi}{4} \frac{d_I^2}{M^2} \quad (2.19)$$

Als $N_I \gg 1$ zal de waarschijnlijkheid dat er zich meer dan één afbeelding van een deeltje in het interrogatiegebied bevindt groot zijn. Voor $N_I \ll 1$ zal deze waarschijnlijkheid laag zijn. Het gebruik van een interrogatiemethode als autocorrelatie vereist meerdere afbeeldingen binnen een interrogatiegebied.

Voor meervoudig belichte systemen wordt in plaats van de beelddichtheid, N_I , gebruik gemaakt van de dichtheid van de gepaarde afbeeldingen van deeltjes, N_P . Voor een n maal belicht systeem geldt: $N_P = (n - 1)N_I$.

Door de voorwaarde die bovenstaande parameters opleggen aan de operatie van het PIV-systeem, te weten $N_S \ll 1$ en $N_I \gg 1$, kunnen experimentele instellingen, zoals het aantal deeltjes in de vloeistofstroming, C , de dikte van het lichtvlak, ΔZ_0 , en de lineaire vergroting, M , vastgelegd worden. De invloed van de beelddichtheid op de signaal-ruisverhouding komt in paragraaf 2.5.4 aan de orde.

2.5.3 Het loss of pairs effect

Bij het bepalen van de schatter, \hat{R}_{II} , van de autocorrelatiefunctie in paragraaf 2.3 is de achtergrond van het *in-plane* loss of pairs effect belicht. Dit effect is afhankelijk van de gemiddelde verplaatsing in het beeldvlak, ΔX , ten opzichte van de afmetingen van het interrogatiegebied, d_I . Toegepast op de vloeistofstroming is de verplaatsing gelijk aan de lokale snelheid, v_I , in de vloeistof vermenigvuldigd met het tijdsinterval tussen twee belichtingen, Δt en de lineaire vergroting, M :

$$F_I = \frac{M v_I \Delta t}{d_I} \quad (2.20)$$

[Adrian, 1991] rapporteert een tweede loss-of-pairs effect, dat gebaseerd is op het verlies van deeltjes uit het lichtvlak (*out-of-plane*) bij meervoudig belichte opnames. Dit effect is afhankelijk van de verplaatsing van deeltjes het lichtvlak uit, Δz_0 . Deze verplaatsing is het produkt van de snelheid het lichtvlak uit, v_O en het tijdsinterval, Δt :

$$F_O = \frac{v_O \Delta t}{\Delta z_0} \quad (2.21)$$

Op grond van Monte Carlo simulaties stellen [Keane and Adrian, 1990] de volgende voorwaarden aan beide loss of pairs effecten: $F_O \leq 0.25$ en $F_I \leq 0.25$.

Beide loss of pairs effecten zijn bepalend voor het aantal gepaarde afbeeldingen dat aanwezig is in een interrogatiegebied. Met een verplaatsing $[r, s]$ geldt voor het *effectieve* aantal deeltjesparen (μ) in een interrogatiegebied de volgende relatie:

$$\mu = N_I F_I F_O \quad (2.22)$$

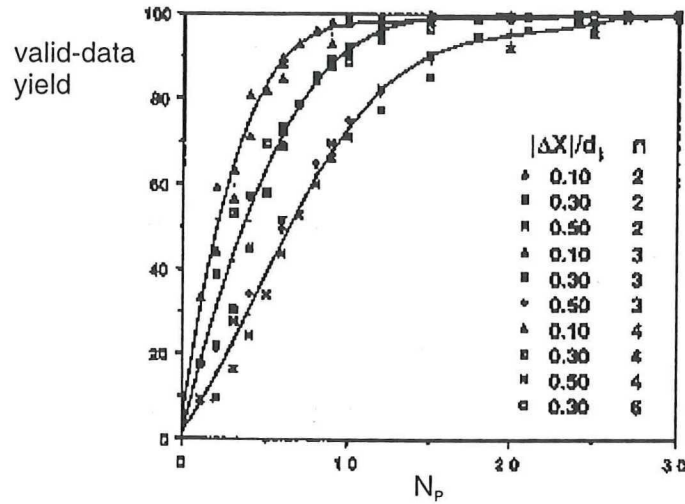
Deze parameter kan ook worden uitgedrukt in experimenteel in te stellen variabelen: $\mu = \mu(C, \Delta z_0, d_I, \Delta t)$. Op de betekenis van het effectieve aantal deeltjesparen wordt in de volgende paragraaf nader in gegaan.

2.5.4 De signaal-ruis verhouding en de valid-data yield

Een maat voor de betrouwbaarheid van een meting is de signaal-ruisverhouding. [Keane and Adrian, 1990] definieert de signaal-ruisverhouding van een autocorrelatiefunctie als de verhouding van de intensiteit van de verplaatsingspiek, R_D , ten opzichte van de hoogste ruispiek, R_N :

$$\sigma_{SR} = \frac{R_D}{\max \{R_N\}} \quad (2.23)$$

[Keane and Adrian, 1990] stelt dat een meting verworpen wordt waarvoor geldt: $\sigma_{SR} < 1.2$. Het nadeel van de signaal-ruisverhouding in vergelijking 2.23 is dat de op één na hoogste piek in sommige gevallen geen verplaatsingspiek, maar een ruispiek is. In een dergelijk geval wordt een afwijkende vector berekend, ondanks het feit dat de meting aan de voorwaarde voor de signaal-ruisverhouding voldoet. De waarschijnlijkheid dat een meting op grond van de signaal-ruisverhouding *werkelijk* goed is, wordt de *valid-data yield* genoemd.



Figuur 2.10: De valid-data yield, Γ , als functie van het aantal gepaarde afbeeldingen, N_P , voor gegeven waarde van de in-plane loss of pairs fractie, $\Delta X/d_I$ en het aantal lichtpulsen, n [Keane & Adrian, 1991].

De valid-data yield, Γ , is afhankelijk van het aantal gepaarde afbeeldingen, N_P en de verplaatsing ten opzicht van de afmetingen van het interrogatiegebied. [Keane and Adrian, 1991] hebben door gebruik te maken van Monte Carlo simulaties het verband tussen de valid-data yield en de beeld dichtheid N_P , bepaald voor meervoudig belichte systemen. Dit verband wordt weergegeven in figuur 2.10.

Uit de figuur blijkt dat de valid-data yield afneemt bij toenemende grootte van het in-plane loss of pairs effect. Het aantal lichtpulsen, n , heeft geen invloed op Γ . Bij een lage waarde voor de in-plane loss of pairs fractie is een valid-data yield haalbaar van 95 % als de waarde voor N_P groter is dan 15.

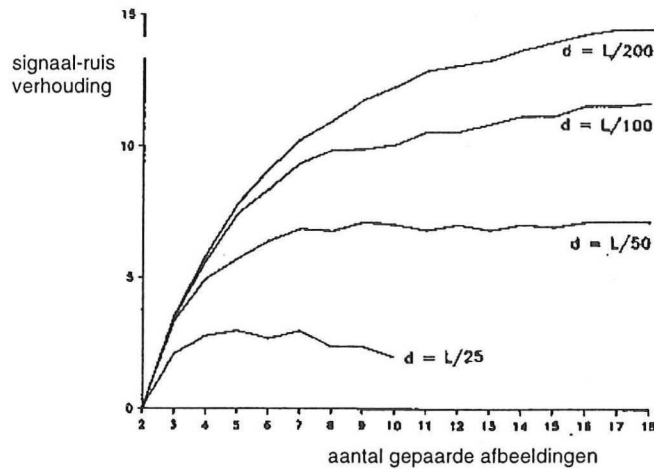
Door [Coupland and Pickering, 1988] wordt de volgende relatie opgesteld voor de signaal-ruisverhouding:

$$\sigma_{SR} = 20 \log \frac{R_C}{\max\{R_N\}} \quad (2.24)$$

Hier wordt de signaal-ruisverhouding gerelateerd aan de zelf-correlatiepiek, R_C . [Coupland and Pickering, 1988] stellen op grond van de autocorrelatiefunctie een bovengrens aan de signaal-ruisverhouding: Vergelijking 2.24 ziet er dan als volgt uit:

$$\sigma_{SR} \leq 20 \log \frac{\mu}{2} \quad (2.25)$$

Volgens vergelijking 2.25 is de signaal-ruisverhouding afhankelijk van het effectieve aantal beeldparen, μ , in een interrogatiegebied. Een groter aantal beeldparen draagt bij aan de amplitude van de verplaatsingspiek, en op deze manier aan een betere signaal-ruisverhouding. Daarnaast zorgen deeltjes met een relatief grote diameter voor een bredere verplaatsingspiek, en een slechtere signaal-ruisverhouding. Deze invloed is zichtbaar in figuur 2.5.4.



Figuur 2.11: Signaal-ruisverhouding als functie van het aantal gepaarde afbeeldingen in een interrogatiegebied [Coupland & Pickering, 1988]. De curves zijn gevonden voor verschillende waarden van de verhouding van deeltjesdiameter, d , tot de afmetingen van het interrogatiegebied, L .

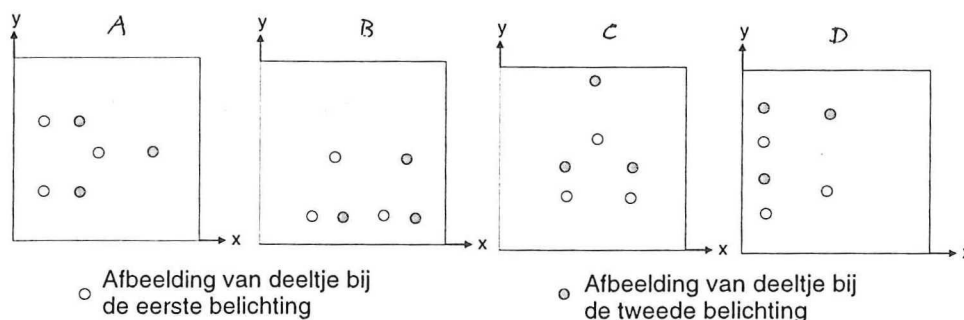
Voor een vierkant interrogatiegebied met afmetingen van ongeveer 50 maal de diameter van de deeltjes blijft de signaal-ruisverhouding boven de 7 gepaarde deeltjes vrijwel constant. Dit komt overeen met de waarde voor de beeld dichtheid die [Keane and Adrian, 1990] aanbeveelt: $N_I \geq 15$. Een groter aantal gepaarde afbeeldingen zal geen betere signaal-ruisverhouding opleveren.

2.5.5 Aanwezigheid van een snelheidsgradiënt

In veel experimentele toepassingen is het loss-of-pairs effect gering, maar voor bepaalde toepassingen, bij voorbeeld bij turbulente stroming, zijn de afmetingen van het interrogatiegebied, d_I , en de dikte van het lichtvlak, ΔZ_0 , niet klein genoeg om sterke variaties in de snelheid binnen een meetvolume te voorkomen. Door het in-plane loss of pairs effect, zoals beschreven in paragraaf 2.5.3 en 2.2.2, zal de autocorrelatiefunctie geneigd zijn een te lage snelheid voor het interrogatiegebied te berekenen. Dit verschijnsel wordt *gradiënt bias* genoemd.

Bovendien veroorzaakt de snelheidsvariatie Δv een piekverbreding en een afname van de amplitude van de verplaatsingspiek. Bij sterke snelheidsgradiënten kan de signaalsterkte zo klein worden, dat detectie niet meer mogelijk is. Dit wordt omschreven als *detectie bias*. Het effect van een sterke snelheidsgradiënt in een interrogatiegebied wordt in figuur 2.12 geïllustreerd.

[Keane and Adrian, 1990; Keane and Adrian, 1993] hebben twee dimensieloze kentallen gedefinieerd die het effect van de gradient bias en de detectie bias uitdrukken. Op grond van



Figuur 2.12: Het effect van snelheidsgradiënten in een interrogatiegebied voor (a) $\partial v_x/\partial x > 0$, (b) $\partial v_x/\partial y > 0$, (c) $\partial v_y/\partial x > 0$, en $\partial v_y/\partial y > 0$ [Huang et al., 1993].

simulaties zijn de volgende voorwaarden aan deze parameters gesteld:

$$\frac{M|\Delta v|\Delta t}{d_I} < 0.1 \quad (2.26)$$

$$\frac{M|\Delta v|\Delta t}{d_e} < 1 \quad (2.27)$$

In deze vergelijking staat δv voor de snelheidsvariatie over een interrogatiegebied; d_I en d_e zijn de afmetingen van respectievelijk het interrogatiegebied en de afbeelding van een deeltje. Door gebruik te maken van de eis met betrekking tot de verplaatsing in het interrogatiegebied, zoals vastgelegd in vergelijking 2.20, kan een eis worden opgelegd aan het snelheidsverschil:

$$\frac{\Delta v}{v_I} < 4 \frac{d_e}{d_I} \quad (2.28)$$

Met deze vergelijking kan voor een gegeven snelheidsgradiënt de maximale afmeting van een interrogatiegebied worden bepaald.

2.6 Detectie van afwijkende vectoren

In Particle Image Velocimetry kan een meting voor een klein gedeelte uit afwijkende vectoren bestaan. Dit zijn vectoren die sterk in richting en grootte afwijken van hun omliggende vectoren en die in het algemeen afkomstig zijn van interrogatiegebieden die onvoldoende gepaarde afbeeldingen bevatten. Volgens [Westerweel, 1993] is het het aantal afwijkende vectoren in een PIV-dataset in de praktijk laag.

Met behulp van een postprocessing procedure worden deze afwijkende vectoren geïdentificeerd en uit de data-set verwijderd. Een methode om de betrouwbaarheid van elke vector te bepalen is het berekenen van de signaal-ruisverhouding, σ_{SR} (zie vergelijking 2.23). In de praktijk blijkt deze methode niet erg robuust. In plaats daarvan wordt elke vector vergeleken met zijn omliggende vectoren om bij een geconstateerde relatief grote afwijking deze vector aan te merken als een uitbijter.

Voor het behandelen van de experimentele resultaten is in dit onderzoek gebruik gemaakt van de mediaantest van [Westerweel, 1993]. In paragraaf 2.6.2 wordt de theoretische achtergrond van deze mediaantest beschreven.

2.6.1 Het PIV-signaal

[Westerweel, 1993] heeft een aantal statistische methoden onderzocht voor het lokaliseren van afwijkende vectoren in een PIV-meting. Gesteld kan worden dat een interrogatiegebied op positie (i, j) met een waarschijnlijkheid gelijk aan de valid-data yield een goede vector dan wel een foute vector oplevert.

Een *goede* vector, weergegeven door $\vec{V}_{i,j}$, wordt bepaald met een zekere meetfout, $\vec{\varepsilon}_{i,j}$. Een *afwijkende* vector is gelijk aan het midden van een bepaalde ruispiek, $\vec{U}_{i,j}$, die zich bevindt binnen een bepaald gebied rond de verwachte verplaatsing. Dit gebied wordt het zoekraam genoemd.

De gemeten snelheid, $\vec{V}'_{i,j}$, wordt op grond van het voorafgaande beschouwd als een stochastisch signaal:

$$\vec{V}'_{i,j} = \gamma_{i,j} \cdot (\vec{V}_{i,j} + \vec{\varepsilon}_{i,j}) + (1 - \gamma_{i,j}) \cdot \vec{U}_{i,j} \quad (2.29)$$

Hierin is de coëfficiënt $\gamma_{i,j}$ een variabele met de waarde 0 of 1. Voor $\gamma_{i,j} = 1$ zal vergelijking 2.29 een goede vector voor $\vec{V}'_{i,j}$ opleveren. De waarschijnlijkheid hiervan is de *valid-data yield*, Γ . Voor $\gamma_{i,j} = 0$ levert vergelijking 2.29 een foute vector $\vec{V}_{i,j}$.

[Westerweel, 1993] gebruikt vergelijking 2.29 voor het beschrijven en testen van statistische detectiemethoden voor de afwijking van een vector met zijn omgeving. Voor de afwijking van $\vec{V}'_{i,j}$ ten opzichte van $\vec{V}_{i,j}$ wordt het residu, $r^2_{i,j}$, als volgt gedefinieerd:

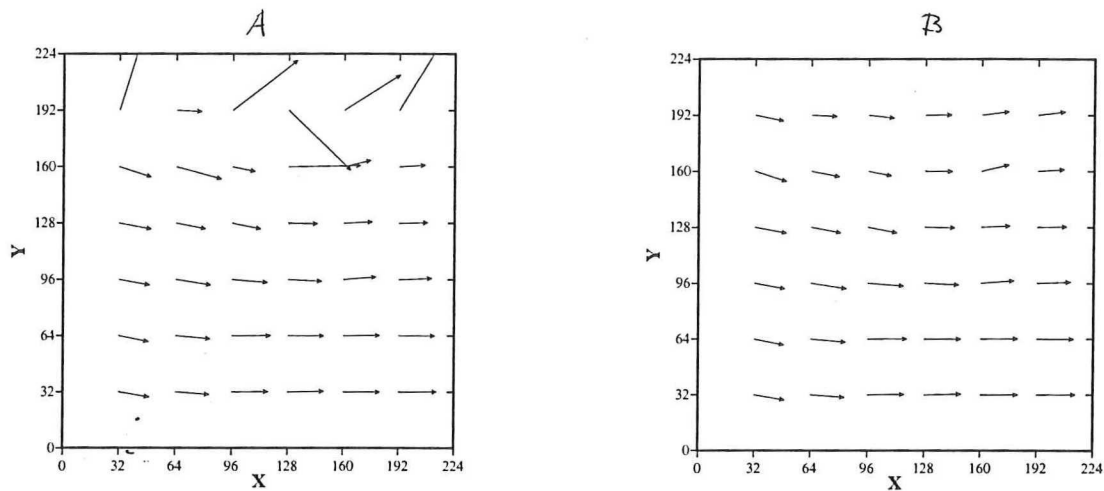
$$r^2_{i,j} = \|\vec{V}'_{i,j} - \vec{V}_{i,j}\|^2 \quad (2.30)$$

In de praktijk is de waarde van de goede vector, $\vec{V}_{i,j}$, niet *a priori* bekend, zodat een schatter, $\hat{\vec{V}}_{i,j}$, gebruikt wordt. [Westerweel, 1993] heeft drie verschillende testen voor deze schatter onderzocht, gebaseerd op respectievelijk de globaal-gemiddelde, de lokale gemiddelde en de lokale mediaanschatters. De lokale mediaantest bleek het meest efficiënt.

2.6.2 De mediaantest

De mediaan is een niet-lineaire schatter voor $\vec{V}_{i,j}$. Van een rij van $2n + 1$ scalaire elementen, gerangschikt in toenemende of afnemende grootte, is de mediaan het middelste element (n^{de} element). Bij een even aantal elementen wordt de gemiddelde van de twee middelste elementen genomen. [Westerweel, 1993] definieert de mediaan van een vector, $med[\vec{V}']_{i,j}$, door voor de afzonderlijke componenten — in de x- en y-richting — de mediaan te kiezen van de acht omliggende vectoren. Voor vectoren aan de rand en de hoeken van het snelheidsveld worden respectievelijk vijf en drie data-punten meegenomen. Op deze manier wordt voor elke vector het residu \hat{r}^2 berekend.

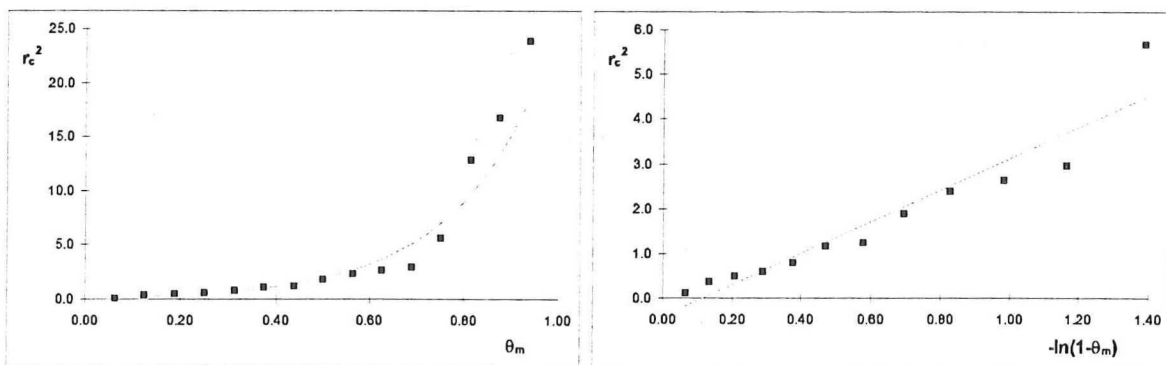
Een praktische manier om de verdeling van \hat{r}^2 over een data-set te beschouwen is het uitzetten van de berekende residuen in een cumulatief histogram. Met de voorwaarde $\gamma = 1$ in vergelijking 2.29 is het residu gelijk aan de meetfout, $\varepsilon_{i,j}$. Dit wordt beschouwd als de normale witte ruis van de meting. Het residu, \hat{r}^2 , zal dan een *exponentiële* verdeling hebben.



Figuur 2.13: Een snelheidsveld verkregen door interrogatie van een PIV opname (a) en na correctie van de afwijkende vectoren met de mediaantest (b). De afmetingen van de opname zijn 224 bij 224 pixels. De vectoren worden getekend in het midden van elk interrogatiegebied.

Ter illustratie staat in figuur 2.13 (a) een snelheidsveld afgebeeld dat niet gecorrigeerd is voor afwijkende vectoren.

In deze figuur is duidelijk de aanwezigheid van afwijkende vectoren op te merken. Met behulp van de bovenstaand beschreven mediaantest worden de residuen bepaald en in een histogram uitgezet. De data-set wordt opgedeeld in m klassen, waarbij aan elke klasse, θ_m , de waarde van het laagste residu in de betreffende klasse wordt toegekend. Het histogram voor de residuen van figuur 2.13 (a) staat afgebeeld in figuur 2.14 (a). [Westerweel, 1993] geeft het



Figuur 2.14: Histogram van de residuen van het vectorveld, uitgezet (a) tegen 15 klassen, en (b) op logaritmische schaal (zie tekst)

volgende verband tussen het residu, r_m^2 , en een bepaalde klasse, θ_m :

$$r_m^2 = 2\sigma^2 \ln \frac{1}{1 - \theta_m} \quad (2.31)$$

Hierin staat σ voor de variantie van het residu. Door r_m^2 voor elke klasse in een figuur uit te zetten tegen de logaritme van $1/(1 - \theta_m)$ wordt op grond van vergelijking 2.31 een rechte lijn verwacht met een richtingscoëfficiënt gelijk aan $2\sigma^2$. Dit verband wordt zichtbaar in figuur 2.14 (b).

Het is mogelijk een kritieke waarde vast te stellen, waarboven het residu van een vector niet meer aan experimentele ruis kan worden toegeschreven. In vergelijking 2.29 geldt nu de voorwaarde: $\gamma_{i,j} = 0$. In deze situatie is er sprake van een afwijkende vector.

De kritieke waarde wordt berekend met het *Bayes decision criterion*. [Westerweel, 1993] geeft de volgende relatie tussen de Bayes kritieke waarde, r_c^2 , en de variantie van het residu, σ^2 :

$$\frac{r_c^2}{R_I^2} = -\frac{2\sigma^2}{R_I^2} \ln \left[\frac{1 - \Gamma \frac{2\sigma^2}{R_I^2}}{\Gamma} \right] \quad (2.32)$$

Hierin staat R_I voor de equivalente diameter van het zoekraam en Γ voor de valid-data yield, die bepaald wordt met figuur 2.10. Het snelheidsveld in figuur 2.13 is afkomstig van een drie maal belichte vloeistofstroming, met een relatieve verplaatsing van de afbeeldingen ten opzichte van de afmetingen van het interrogatiegebied van ~ 0.3 en een aantal gepaarde afbeeldingen van ~ 13 . Volgens [Keane and Adrian, 1991] geldt in dit geval voor de valid-data yield: $\Gamma \sim 95\%$. De richtingscoëfficiënt in figuur 2.14 (b) geeft voor het snelheidsveld in figuur 2.13 een waarde voor $2\sigma^2$ van 3.5.

Toegepast op het snelheidsveld van figuur 2.13 (a) wordt de waarde voor r_c^2 gelijk aan 10.8 voor een zoekraam met een diameter van 2 pixels (zie vergelijking 2.32). Er worden zes vectoren aangemerkt als afwijkend (16 %). Zij worden vervangen door het gemiddelde van de omliggende vectoren, die niet afwijkend zijn. Het snelheidsveld ziet er na gebruik van deze mediaantest uit als in figuur 2.13 (b).

Het voordeel van het toepassen van deze mediaantest ligt in de mogelijkheid de gehele procedure voor het vervangen van afwijkende vectoren te automatiseren. Voor elke PIV-meting kan op relatief eenvoudige manier het Bayes criterium worden berekend. Dit is aantrekkelijk voor het behandelen van grote hoeveelheden PIV-data.

Er is een ander voordeel gelegen in het berekenen van de variantie van de mediaan. [Westerweel, 1993] geeft de volgende benadering voor het verband tussen de variantie van de mediaan, σ^2 , en de variantie van de snelheidsvector, σ_V^2 :

$$2\sigma^2 \simeq 2.1\sigma_V^2 \quad (2.33)$$

De variantie van de berekende vector is ongeveer gelijk aan de variantie van de mediaan. Vergelijking 2.33 geeft informatie over de *nauwkeurigheid* van de verrichte metingen.

Hoofdstuk 3

Experimentele opzet en procedure

Bij de beschrijving van de theoretische achtergrond van Particle Image Velocimetry zijn een aantal eisen geformuleerd ten aanzien van de experimentele instellingen. In dit hoofdstuk wordt de opzet van de experimenten besproken. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van de gehanteerde procedure voor het verwerken en interpreteren van PIV-data.

3.1 Opzet van de experimenten

Een goede vergelijkbaarheid tussen PIV-metingen met water en stromingsexperimenten met vloeibaar aluminium heeft consequenties voor de opstelling en de experimentele parameters, de keuze voor het visualisatiemiddel en het registrerend medium.

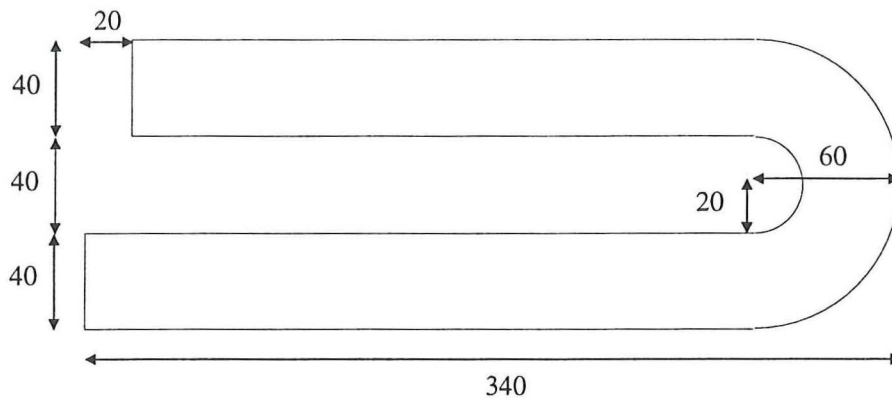
3.1.1 Het gietmodel

Bij de keuze voor het gietmodel dient de doelstelling van het onderzoek in aanmerking genomen te worden. Als uitgangspunt dient het model, waarvoor stromingsexperimenten met vloeibaar aluminium zijn uitgevoerd. Dit is een horizontaal dunwandig gietstuk, waarvan de gietvorm hoefijzervormig is. In figuur 3.1 worden afmetingen van de gietvorm weergegeven.

In Particle Image Velocimetry is het gebruik van een doorzichtige vloeistof zoals water noodzakelijk. Van belang is in hoeverre water gelijksoortig gedrag vertoont als vloeibaar aluminium.

Zowel vloeibaar aluminium als water zijn Newtonse vloeistoffen met een vrijwel gelijke kinematische viscositeit, ν . In soortelijke dichtheid ρ en oppervlaktespanning σ verschillen beide vloeistoffen aanzienlijk. In tabel 3.1 wordt een overzicht gegeven van de waarden voor deze stoffeigenschappen. Vergelijking van de stoffeigenschappen zegt niet genoeg over een overeenkomst in stromingsgedrag tussen water en aluminium. Een betere manier is het gebruik van dimensieloze kentallen.

Twee dimensieloze kentallen zijn bepalend voor het gietgedrag bij horizontaal vullen van een gietvorm. Het Reynoldsgetal, Re , relateert de traagheidskrachten aan de viskeuze krachten,



Figuur 3.1: Afmetingen van de gietvorm in millimeter.

grootheid	symbool	eenheid	water	aluminium
dynamische viscositeit	η	$Pa \cdot s$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$3.0 \cdot 10^{-3}$
dichtheid	ρ	kg/m^3	$1.0 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^3$
kinematische viscositeit	ν	m^2/s	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
oppervlaktespanning	σ	N / m	0.074	1.0

Tabel 3.1: Stofeigenschappen van vloeibaar aluminium en water

en het Webergetal, We , is de verhouding van de kracht ten gevolge van de oppervlaktespanning en de traagheidskrachten. Deze kentallen zijn van toepassing op de stroming in de gietholte. In formulevorm:

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (3.1)$$

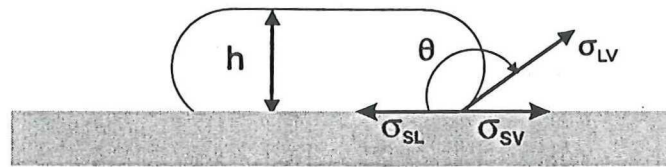
$$We = \frac{\rho v^2 R}{\sigma} \quad (3.2)$$

Hier staat D voor de hydraulische diameter van de dwarsdoorsnede van de gietvorm en R voor de kromtestraal van het (vrije) oppervlak. De hydraulische diameter voor de rechthoekige inlaat van de gietholte is $(2bh_{vorm})/(b + h_{vorm})$, waar b voor de breedte en h_{vorm} voor de hoogte van de vormholte staat. Op de betekenis van de kromtestraal R wordt nog nader ingegaan.

De mate van bevochtiging van het vormmateriaal door de vloeistof heeft invloed op het stromingsgedrag en wordt uitgedrukt in de contacthoek tussen een druppel vloeistof en het vormmateriaal. In figuur 3.2 wordt het verband tussen de oppervlaktespanning en de contacthoek weergegeven. De oppervlaktespanning wordt ontleend in drie componenten, afhankelijk van de fasen waar zij betrekking op hebben. Voor de componenten van de oppervlaktespanning in de evenwichtssituatie geldt:

$$\sigma_{LV} \cos \theta = \sigma_{SV} - \sigma_{SL} \quad (3.3)$$

Dit verband staat bekend als de vergelijking van Young. Over een gebogen oppervlak, zoals de druppel in figuur 3.2, bestaat een drukverschil ten gevolge van de oppervlaktespanning, $\Delta p = \sigma/R$ of $\Delta p = 2\sigma/h$ (vergelijking van Laplace voor een druppel op een vlakke plaat). Dit drukverschil wordt gecompenseerd door de hydrostatische druk, $\Delta \rho gh$, waarbij $\Delta \rho$ staat



Figuur 3.2: De hoogte van een druppel, h , en de contacthoek, θ .

voor het dichtheidsverschil tussen gas en vloeistof. Voor de hoogte van de druppel op een vlakke plaat is de volgende vergelijking af te leiden [Hiemenz, 1986]:

$$h = \sqrt{\frac{2\sigma}{\Delta\rho g}(1 - \cos\theta)} \quad (3.4)$$

Uit deze vergelijking volgt dat naarmate de bevochtigingshoek groter wordt, de laagdikte, h , van de vloeistof toeneemt. Als er helemaal geen bevochtiging plaatsvindt, ($\theta = 180^\circ$), zal de laagdikte voor vloeibaar aluminium ca. 12 mm bedragen. Dit is de minimale laagdikte.

De gietvorm, die in de stromingsexperimenten met vloeibaar aluminium toegepast is, heeft een hoogte van 5 mm. Er zal daardoor een zekere dwang nodig zijn om het vloeibare metaal door de vormholte te krijgen. Deze druk is omgekeerd evenredig met de hoogte van de gietvorm:

$$P = \frac{2\sigma \cos\theta}{h_{vorm}} \quad (3.5)$$

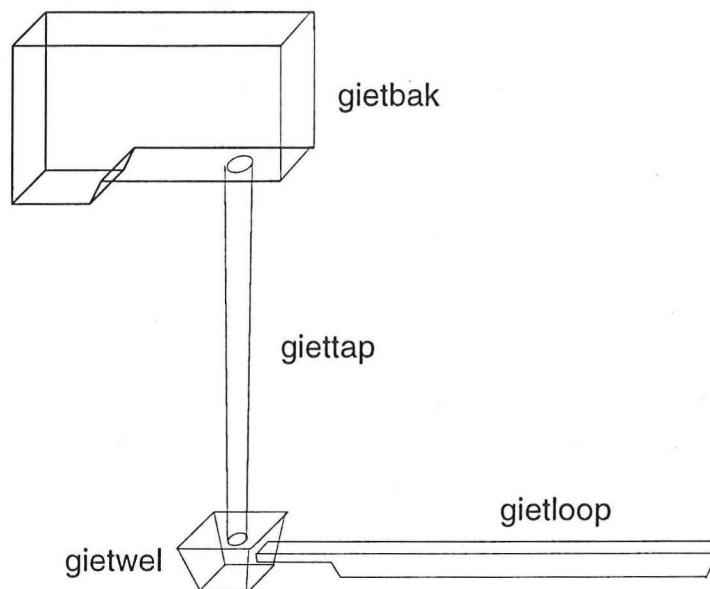
Het aansnijsysteem moet deze druk leveren.

Als er geen bevochtiging optreedt zal de hoogte van een druppel water niet groter zijn dan 5 mm. Voor een vergelijkbare situatie met vloeibaar aluminium — waarbij een druk als in vergelijking 3.5 moet worden geleverd — zal de hoogte van de gietholte minder dan 5 mm zijn. Een praktische waarde voor de vormhoogte is 3 mm. Er wordt op deze manier een eis gesteld aan de bevochtiging van de perspexvorm door het water: $\theta \geq 67^\circ$.

De vergelijking tussen de PIV-metingen met water in een perspexvorm en de stromingsexperimenten met vloeibaar aluminium heeft tot doel inzicht te krijgen in het snelheidsveld. Uitgangspunt voor deze vergelijking is daarom de vultijd van de gietholte ($t \sim 1/v$). Het benodigde debiet wordt geleverd door het aansnijsysteem. In figuur 3.3 is een eenvoudig aansnijsysteem schematisch weergegeven.

Het aansnijsysteem bestaat uit de volgende onderdelen:

- De *gietbak* heeft als doel het ingieten van het vloeibaar metaal te vergemakkelijken. Het heeft een rechthoekige vorm waarin de monding van de giettap hoger ligt dan de bodem van de gietbak. Op deze manier wordt het meesleuren van zogenaamde slakdeeltjes voorkomen. De constante hoogte van het metaal in de gietbak levert een constant debiet bij de uitstroming.
- De *giettap* is het kanaal dat de gietbak met de rest van het gietsysteem verbindt. De



Figuur 3.3: Schematische weergave van een aansnijsysteem.

gietspout heeft een conische geometrie die eindigt in een *gietwiel* om de kinetische energie van de vallende metaalstroom grotendeels te elimineren.

- De *gietloop* is de verbinding tussen gietspout en aansnijding met de gietvorm. In de gietloop is vlak achter de gietwiel een vernauwing aangebracht, de *choke*. De verhouding van de *choke* tot de opening van de aansnijding bepaalt of er sprake is van een druksysteem of een drukloos systeem. Het gietsysteem dat voor de experimenten gebruikt wordt, is een *drukloos* systeem, waarbij de *choke* het kleinste oppervlak in het aansnijsysteem is.

Als aangenomen wordt dat het vloeistofniveau in de gietbak constant blijft en het gehele systeem gevuld is met vloeistof kan met de wet van Bernoulli de snelheid loodrecht op de *choke* afgeschat worden. Dit levert het volgende verband, dat bekend staat als de wet van Torricelli:

$$v_{choke} = \alpha \sqrt{2gH} \quad (3.6)$$

In deze vergelijking staat H voor de hoogte van het metaalniveau in de gietspout inclusief de gietbak en g voor de gravitatieconstante. De factor α dient ter compensatie voor het energieverlies in het gehele gietsysteem en wordt de verliesfactor genoemd. [Nieswaag et al., 1991] vinden voor een gietsysteem met een *choke* achter de gietwiel voor de verliesfactor waarden van 0.2 tot 0.3 afhankelijk van de hoogte van de vormholte. In de meeste gevallen is de waarde voor deze verliesfactor niet precies bekend en moet deze worden geschat op grond van de ervaring van de gieterijtechnicus. Dit systeem maakt het lastig om een gewenst debiet ($Q = (Av)_{choke}$) op te leggen door middel van de hoogte in de gietbak.

Om dit probleem te omzeilen wordt in de stromingsexperimenten met vloeibaar metaal de gietbak losgekoppeld van de gietspout, zodat een vrije uitstroom van metaal mogelijk is. Het debiet wordt vastgelegd door de hoogte van het vloeibare metaal in de gietbak. Vergelijking 3.6 is voor dit systeem niet langer geldig. In de experimenten met Particle Image Velocimetry is gekozen voor twee verschillende uitvoeringen van het aansnijsysteem:

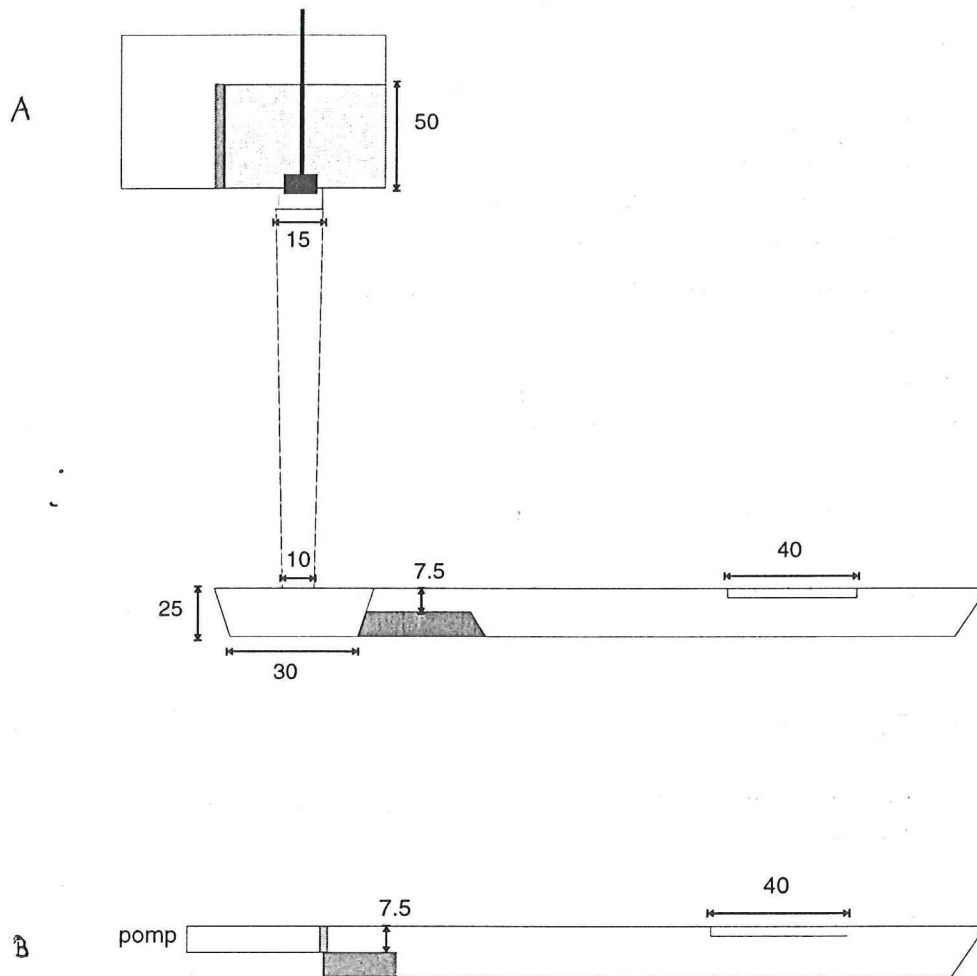
- Hetzelfde aansnijsysteem als bij de stromingsexperimenten met vloeibaar metaal, waarbij de uittreesnelheid uit de *gietbak* vastgelegd wordt. De gietbak is gescheiden van de gietsap, zodat er vrije uitstroom van het water mogelijk is. Op deze manier is het debiet eenvoudiger te kalibreren dan bij een gesloten systeem. In de experimenten is met een betrekkelijk laag debiet (ongeveer 10 ml / s) gewerkt omdat bij een hoger debiet een grote hoeveelheid lucht met de vloeistofstroming werd meegevoerd. De consequentie is dat de vultijd van de gietvorm ongeveer een factor drie groter is dan in de stromingsexperimenten met vloeibaar aluminium. In dit verslag zal naar de experimenten met deze configuratie verwezen worden als de experimenten voor *lage snelheid*.
- Een aansnijsysteem waarbij de snelheid direct wordt opgelegd aan de choke. Het aansnijsysteem bestaat nu enkel uit de gietloop vanaf de choke, waarbij het debiet rechtstreeks op de choke wordt opgelegd met behulp van een pomp. Met deze configuratie zijn *hoge snelheid* PIV metingen verricht.

Beide configuraties staan afgebeeld in figuur 3.4. De afmetingen staan vermeld in millimeters. De gietholte staat loodrecht op het afgebeelde zij aanzicht.

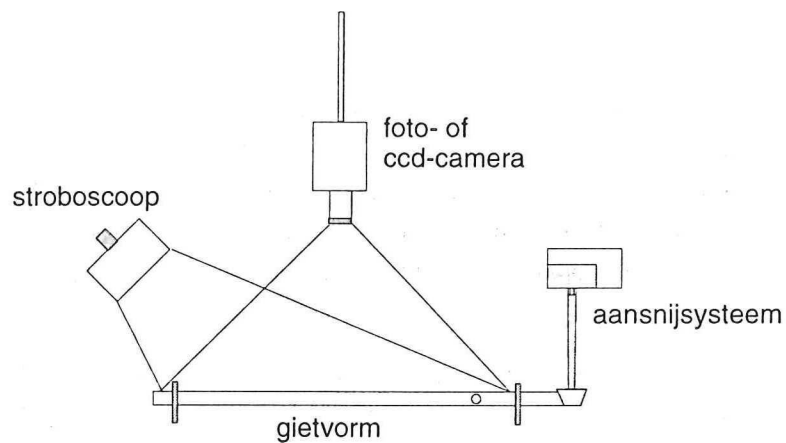
3.1.2 De experimentele opstelling

De experimentele opstelling bestaat uit drie onderdelen, zoals schematisch weergegeven in figuur 3.5. Deze onderdelen kunnen als volgt omschreven worden:

- Onder het *gietsysteem* wordt de gietvorm, het aansnijsysteem en het toevoersysteem van de dispersie van water en deeltjes beschouwd. Er zijn twee gietsystemen mogelijk afhankelijk van de gewenste configuratie van het aansnijsysteem. Voor de lage snelheidsexperimenten wordt de dispersie van water met deeltjes met de hand aan de gietbak toegevoerd gedurende het experiment, waarbij een constante hoogte in de gietbak in stand wordt gehouden. Bij hoge snelheidsexperimenten wordt een pomp met een bypass direct verbonden met de choke. Het pompdebiet legt een constante snelheid aan de choke op.
- Het *belichtingssysteem* bestaat uit een stroboscoop met frequentieregelaar. De stroboscoop wordt schuin boven de gietvorm aangebracht, zodat de camera geen enkelvoudige reflecties zal opvangen. Om de opstelling tegen omgevingslicht te beschermen, worden de experimenten uitgevoerd in een verduisterde ruimte. Het frequentiebereik van de stroboscoop bestaat uit drie gebieden, waarbij het maximum van elk gebied tevens de hoogste lichtopbrengst levert.
- De wijze van operatie is bepalend voor het gebruikte *registratiesysteem*. Voor de meeste toepassingen maakt men gebruik van een fotocamera voor de registratie. Een andere mogelijkheid is directe digitale registratie met een CCD-camera. De fotocamera wordt aangestuurd door een motordrive, die automatisch een aantal opnamen per seconde maakt afhankelijk van de ingestelde waarde voor de belichtingstijd. Voor de CCD-camera kan het aantal frames per seconde tot een bepaald maximum ingesteld worden.



Figuur 3.4: Zijaanzicht van het aansnijsysteem voor (a) lage snelheid, en (b) hoge snelheid experimenten.



Figuur 3.5: Schematische weergave van de experimentele opstelling voor Particle Image Velocimetry (zijaanzicht).

3.1.3 Het visualisatiemiddel

In de PIV-experimenten voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van deeltjes (*marker particles*) voor het visualiseren van een stromingsveld. Van belang hierbij is dat een dergelijk visualisatiemiddel de stroming niet beïnvloedt. Daarnaast moet een deeltje genoeg licht reflecteren om door de foto- of CCD-camera geregistreerd te worden. Voor de afmetingen van een deeltje zal op grond van deze eisen een optimum bestaan.

De snelheden die met behulp van een PIV-methode gemeten worden, hebben betrekking op de snelheid van een *deeltje* in de vloeistofstroming. Aangezien men geïnteresseerd is in de snelheid van de vloeistof, is het belangrijk te weten met welke nauwkeurigheid een deeltje de vloeistofstroming volgt. Een deeltje met snelheid \vec{v} in een stromingsveld met snelheid \vec{u} ondervindt stromingsweerstand. [Adrian, 1991] geeft de volgende relatie voor de slipsnelheid tussen een deeltje en de vloeistof:

$$|\vec{v} - \vec{u}| = \frac{\rho_p d_p^2}{36\rho\nu} |\vec{v}| \quad (3.7)$$

Voor het benaderen van de weerstandscoëfficiënt wordt de wet van Stokes gebruikt, die geldig is voor lage waarden van het Reynoldsgetal betrokken op het deeltje. In vergelijking 3.7 wordt aangenomen dat de deeltjes onderling geen interactie vertonen. Bovendien wordt geen rekening gehouden met optredende verschijnselen als virtuele massa, drukgradiënten en non-uniforme vloeistofstroming.

Uit vergelijking 3.7 volgt dat deeltjes met een hoge dichtheid ten opzichte van de vloeistof of een grote diameter de stroming moeilijk kunnen volgen. Bij voorkeur worden deeltjes gekozen met een dichtheid gelijk aan de vloeistof (water) en een zo klein mogelijke afmeting.

De diameter van een deeltje in de vloeistofstroming is ook bepalend voor de intensiteit van het gereflecteerde licht en daardoor voor het contrast van de opname. [Adrian, 1991] heeft onderzoek gedaan naar de afhankelijkheid van deze lichtopbrengst van de diameter van het deeltje en de systeemp parameters, zoals de beeld- en voorwerpsafstand (d_i en d_o) en de golflengte van het gebruikte licht, λ . Daarnaast is het gebruikte medium, water of lucht, van invloed op de lichtopbrengst. PIV-experimenten in water vereisen door de grotere brekingsindex grotere deeltjes dan experimenten in lucht. [Adrian, 1991] onderscheidt twee gebieden:

- De lichtopbrengst van deeltjes neemt tot $100\mu m$ toe met de derde macht van de diameter. Bovendien is licht met een kleine golflengte (bij voorbeeld een groene laser) veel effectiever dan licht met een grote golflengte (rood licht), omdat de intensiteit afneemt met λ^3 .
- Deeltjes met een diameter groter dan $100\mu m$ zijn niet afhankelijk van d_p en λ . Een hogere lichtopbrengst is niet bereikbaar met grotere deeltjes. Het gebruik van grotere deeltjes zal geen verhoging van de lichtintensiteit betekenen.

Behalve de afmeting van de gebruikte deeltjes (vergelijking 3.7) kan ook de concentratie deeltjes in de vloeistof de stroming beïnvloeden. Afhankelijk van de grootte van de volumefractie

deeltjes, α , kan de aanwezigheid van de deeltjes het stromingsgedrag beïnvloeden. Barnea & Mizrahi (1973) beschrijven de invloed van de volumefractie op de schijnbare dynamische viscositeit, η_s , met de volgende vergelijking:

$$\eta_s = \eta_c \exp \frac{5\alpha}{3(1-\alpha)} \quad (3.8)$$

Hierin staat η_c voor de viscositeit van de continue fase (water). Bij de PIV-experimenten voor dit onderzoek is een volumefractie deeltjes gekozen van maximaal 3 %. Volgens vergelijking 3.8 zal de toename van de dynamische viscositeit ongeveer 5 % bedragen.

3.1.4 De lichtbron en het registratiemiddel

De functie van de lichtbron is te voorzien in lichtpulsen die gescheiden worden door een tijdsinterval, Δt , zodat de verplaatsing van een deeltje in de vloeistofstroming, Δx , kan worden gemeten. Het tijdsinterval is een belangrijke variabele in een PIV-systeem, omdat het de maximale en minimale snelheden bepaald die gemeten kunnen worden. De duur van de lichtpuls, δt , bepaalt mede hoe de deeltjes worden afgebeeld.

Een efficiënte lichtbron is een stroboscoop of een pulserende laser, waarvoor de duur van de lichtpuls in het algemeen klein is ($\delta t \approx 10 \mu s$ voor een stroboscoop). Voor de PIV-experimenten in dit onderzoek is gekozen voor een stroboscoop als lichtbron wegens de eenvoud van gebruik. Een nadeel van een stroboscoop is dat slechts een klein gedeelte van de energie wordt gebruikt voor het verlichten van de gietvorm door divergentie van de lichtbundel. Bovendien wordt de dikte van de lichtlaag bepaald door de geometrie van het object.

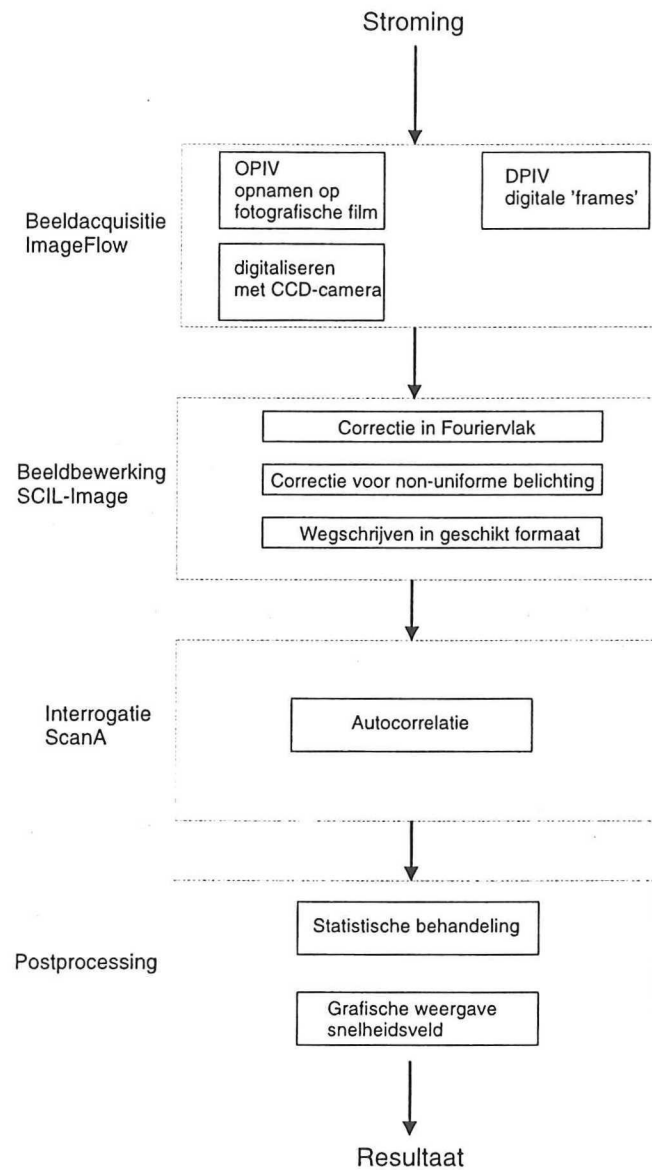
Voor de registratie maakt men gebruik van fotografische film of van een CCD-camera. Met behulp van een standaard motordrive voor de fotocamera kan een opnamesnelheid van ongeveer vier tot vijf opnamen per seconde worden verkregen. Een CCD-camera met een resolutie van 256 bij 256 pixels daarentegen maximaal 200 frames per seconde wegschrijven. In de praktijk is vooral de haalbare ruimtelijke resolutie bepalend voor de keuze van het registratiemiddel.

Op de achtergrond van deze verschillende registratiemiddelen is in hoofdstuk 2 al uitgebreid ingegaan. De praktische betekenis voor de experimenten in dit onderzoek wordt in het vervolg van dit hoofdstuk uiteengezet.

3.2 Experimentele procedure

De experimentele procedure voor het verkrijgen en verwerken van gegevens is gedeeltelijk afhankelijk van het gebruikte registratiemiddel. In experimenten waarbij de registratie plaatsvindt met een CCD-camera kan de experimentele procedure in een digitale omgeving worden geïmplementeerd. Voor het gebruik van fotografische registratie zijn een aantal bewerkingen noodzakelijk zijn om de metingen digitaal te verwerken. Het grootste deel van de experimentele procedure komt voor beide experimentele situaties gelijk.

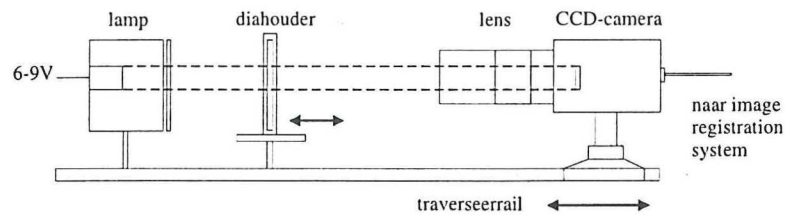
De experimentele procedure is te onderscheiden in vier onderdelen. Het 'real-time' vastleggen van het snelheidsveld in de experimentele opstelling kan beschouwd worden als de eerste



Figuur 3.6: Experimentele procedure voor Particle Image Velocimetry

stap in deze procedure: de *beeldacquisitie*. Het verbeteren van de opnamekwaliteit en het converteren naar een geschikt formaat voor verdere verwerking vindt plaats met een *beeldbewerkingsprocedure*. Het snelheidsveld kan vervolgens berekend worden door een *interrogatiemethode* te hanteren, zoals bij voorbeeld de autocorrelatiefunctie. Het laatste onderdeel in de procedure is het aanschouwelijk maken en interpreteren van het verkregen snelheidsveld door middel van *postprocessing software*.

In figuur 3.6 wordt de onderdelen van de experimentele procedure schematisch weergegeven. Het gebruik van fotografische film of de CCD-camera heeft alleen invloed op het eerste gedeelte van de experimentele procedure (de beeldacquisitie).



Figuur 3.7: Inleesopstelling voor opnamen verkregen met een fotocamera (zijaanzicht).

3.2.1 Beeldacquisitie

Afhankelijk van het registratiemiddel — fotografische film of CCD-camera — wordt de beeldacquisitie optisch of digitaal uitgevoerd. In de PIV-experimenten die voor dit onderzoek verricht zijn, worden beide wijzen van registratie toegepast. De vereiste handelingen in de beeldacquisitie worden voor optische en digitale registratie toegelicht.

Alle experimenten zijn uitgevoerd met polystyreenbolletjes met een deeltjesdiameter van $500\mu\text{m}$. De dichtheid van deze deeltjes is ongeveer gelijk aan de dichtheid van water ($\rho = 1060\text{kg}/\text{m}^3$). De volumefractie deeltjes, α , is ongeveer 3 % (zie ook paragraaf 3.1.3). Door intensief roeren van de suspensie is een goede verdeling van de deeltjes over de vloeistof mogelijk.

Als lichtbron is een stroboscoop gebruikt, die een frequentiebereik heeft van 1 tot 440 Hz. Dit frequentiebereik is onderverdeeld in drie regionen, waarbij de maximale lichtopbrengst bereikt wordt bij 70 Hz en 440 Hz. Er wordt zoveel mogelijk in de buurt van één van deze maxima gewerkt.

Optische registratie

De positie van de deeltjes wordt bij elke lichtpuls door een lens afgebeeld op fotografische film. De fotocamera registreert een aantal opnamen per seconde afhankelijk van de ingestelde belichtingstijd, Δt . Instelling van de belichtingstijd is afhankelijk van de *a priori* kennis van het snelheidsveld (de minimale en maximale snelheid). Bij een belichtingstijd kleiner dan $1/120\text{s}$ is het aantal opnamen per seconde door de gebruiker zelf in te stellen. In de verrichte experimenten worden langere belichtingstijden gebruikt ($\Delta t > 1/120\text{s}$), waarbij het aantal opnamen per seconde wordt bepaald de technische mogelijkheden van de camera (mechanische factoren, e.d.). Het maximum aantal opnamen per seconden is in dit geval zes. Bij de experimenten is gebruik gemaakt van een Nikon kleinbeeldcamera, die op een afstand van ongeveer 30 cm loodrecht boven de opstelling is geplaatst (zie ook figuur 3.5). De experimenten vinden plaats in een verduisterde ruimte.

Na ontwikkeling van de fotografische film wordt elke opname in delen ingelezen met behulp van een CCD-camera met een resolutie van 256 bij 256 pixels (DALSA Inc). In figuur 3.7 wordt de benodigde inleesopstelling afgebeeld.

De inleesopstelling bestaat uit een (X, Y)-traverseertafel waarin het negatief wordt geplaatst. Met een traverseerrail kan de afstand van de CCD-camera tot het negatief gevarieerd worden.

Het negatief wordt belicht door een lamp met variabele voeding. De lichtbundel krijgt een diffuus karakter doordat het licht achtereenvolgens door een melkglazen plaatje en kalkpapier geleid wordt. Dit voorkomt een inhomogene belichting tijdens het inlezen.

Een 55 mm lens met tussenstuk projecteert een deel van het negatief, dat overeenkomt met ongeveer $4 \times 4 \text{ cm}^2$ van de gietvorm, in de CCD-camera (ongeveer 5 pixels per cm). De CCD-camera stuurt het gedigitaliseerde beeld door naar een Sun SPARC-station waar met behulp van een Image Registration System (IRS) het beeld wordt opgedeeld in 256 bij 256 pixels. Aan deze pixels worden grijswaarden toegekend tussen zwart (grijswaarde 0) en wit (grijswaarde 255). Op het negatief zal een deeltje dus een lage grijswaarde bezitten. De opname wordt in ASCII formaat weggeschreven. In een headerfile kunnen bijzonderheden worden opgenomen. Het inlezen van een negatief in 15 bij 5 digitale gedeelten neemt ongeveer 40 minuten in beslag.

Digitale registratie

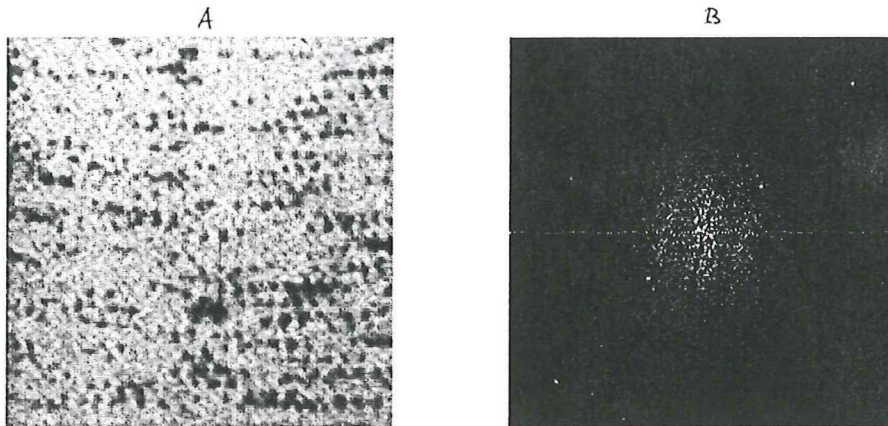
Een aantrekkelijk aspect van het *direct* digitaal registreren van de vloeistofstroming is het ontbreken van de inleesprocedure. In plaats van de fotocamera wordt de CCD-camera boven de opstelling geplaatst. Deze camera stuurt de digitale opname vervolgens door naar de computer. Met behulp van het IRS kan het aantal frames per seconde door de gebruiker worden ingesteld met een bereik van 15 tot 200 frames/s voor de 256 DALSA camera. Het totaal aantal frames is beperkt tot maximaal 1047 door de beperkte opslagcapaciteit. Ter verbetering van het contrast kan de gebruiker met het IRS twee variabelen instellen. Met *offset* is het contrast in grote stappen in te stellen, met *gain* is het contrast te optimaliseren. Een hoog aantal frames per seconde heeft een negatieve invloed op het contrast.

3.2.2 Beeldbewerking

Beeldbewerking kan compenseren voor niet-ideale aspecten in de beeldacquisitie. In de Particle Image Velocimetry wordt de kwaliteit van de opname negatief beïnvloedt door niet-uniforme belichting en slecht contrast tussen object (de deeltjes) en achtergrond. Een geschikt beeldbewerkingspakket is SCIL-Image, ontwikkeld door medewerkers van de Universiteit van Amsterdam en TPD Delft [van Balen, 1994].

SCIL-Image is een gelaagd opgebouwd programma dat op verschillende niveaus gebruikt kan worden. Een groot aantal beeldbewerkingsprocedures zijn binnen SCIL-Image direct aan te roepen en uit te voeren. Daarnaast is het mogelijk een beeldbewerkingsprocedure in een C-programma te integreren. Een dergelijk programma maakt gebruik van standaard SCIL-opdrachten en kan door SCIL-Image worden geïnterpreteerd.

Het doel van de beeldbewerking is verbetering van het uiteindelijk resultaat dat door de interrogatiemethode berekend wordt. Het snelheidsveld, niet de opname, is het doel van de experimenten. Contrastverbetering bij voorbeeld levert een hogere kwaliteit van de opname, maar heeft geen invloed op het berekende snelheidsveld, omdat het geen extra informatie toevoegt. In de beeldbewerking van de verkregen opnamen blijken twee correcties een



Figuur 3.8: (a) Gedigitaliseerde opname van een negatief, en (b) de Fourier getransformeerde van de opname.

nauwkeuriger berekening van de deeltjesverplaatsing op te leveren, te weten correctie in het Fourierdomein en correctie voor non-uniforme belichting. Deze correctiemethoden zullen aan de hand van een experimenteel verkregen opname worden verklaard.

Correctie in het Fourierdomein

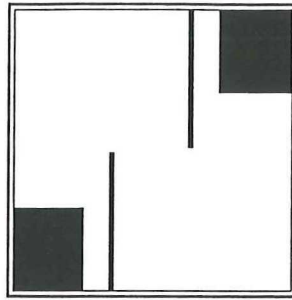
Het gebruik van de CCD-camera bij directe digitale registratie van de vloeistofstroming en bij het digitaliseren van een opname, die verkregen is met een fotocamera, blijkt in de praktijk een storende invloed uit te oefenen op de kwaliteit van de opname.

Ter illustratie is in figuur 3.8 (a) een gedigitaliseerd gedeelte van een negatief afgebeeld. De deeltjes worden afgebeeld met lage grijswaarden. De opname bestaat uit 224 bij 224 pixels. Dit komt overeen met een gedeelte van $37 \times 37 \text{ mm}$ van de gietvorm. De opname is gepositioneerd vlak achter de overgang van het aansnijsysteem naar de gietholte. Met het oog op een duidelijkere weergave van de opname is contrastverbetering toegepast.

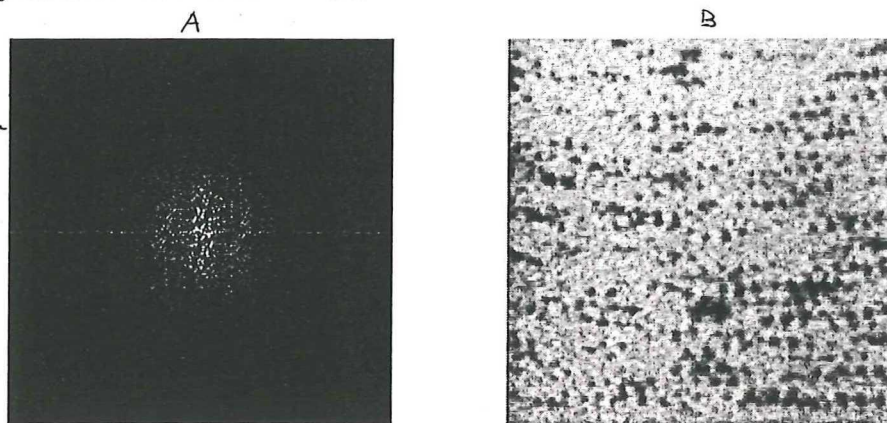
Met een grondige beschouwing van figuur 3.8 (a) valt een patroon van lijnen op die zich over de opname uitstrekt in diagonale richting. De herkomst van deze lijnen is niet bekend. De introductie ervan valt samen met het digitaliseren van de opname met behulp van de CCD-camera, want in de originele opname (negatief) is een dergelijk patroon niet aanwezig.

Het verwijderen van dit lijnenpatroon is niet mogelijk door een achtergrondopname vast te leggen en deze van een opname als in figuur 3.8 (a) af te trekken. De karakteristieke afstand tussen de lijnen blijft voor alle opnamen constant, maar de richting van het patroon blijkt per opname licht te kunnen variëren. Deze constatering biedt de mogelijkheid om de karakteristieke golflengte van het lijnenpatroon te lokaliseren in het Fourierdomein.

SCIL-Image hanteert een standaardopdracht voor het Fourier transformeren van een afbeelding. De Fourier transformatie van de opname in figuur 3.8 (a) staat afgebeeld in figuur 3.8 (b). Door de Fourier getransformeerde van de verkregen opnamen met elkaar te vergelijken is identificatie van het lijnenpatroon mogelijk. Het verwijderen van het lijnenpatroon in de opname is mogelijk door de storende golflengte in het Fourierdomein op te zoeken en weg te



Figuur 3.9: Gebruikte masker voor correctie in het Fouriervlak. Het masker is binair, waarbij de zwarte gebieden de waarde 0 hebben.



Figuur 3.10: (a) Gecorrigeerd Fourierdomein, (b) Gecorrigeerde opname

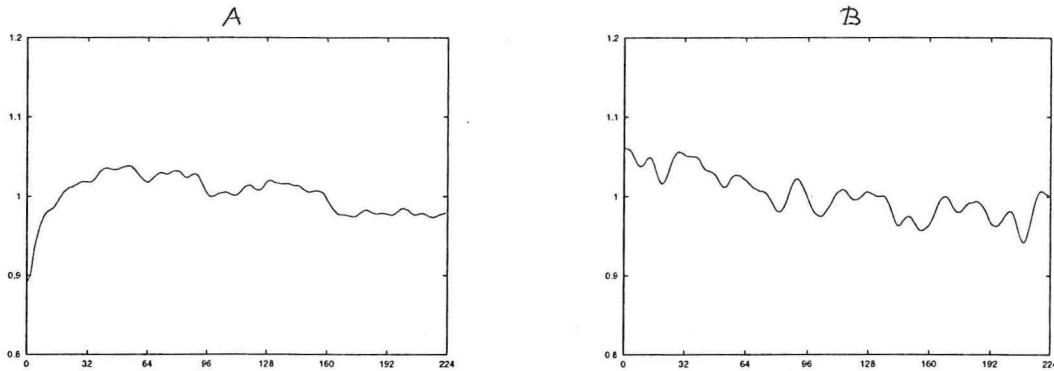
filteren. Deze handeling wordt geautomatiseerd door een zogenaamd masker te definiëren, dat vervolgens vermenigvuldigd wordt met de opname in het Fourierdomein. Er ontstaat een Fourierdomein van de opname waar de karakteristieke golflengte van het lijnenpatroon uit verdwenen is. In figuur 3.9 staan het gebruikte masker weergegeven. Het masker is puntsymmetrisch ten opzicht van het middelpunt door de aard van de Fourier transformatie. Alleen hoge frequenties worden verwijderd.

Het gecorrigeerde Fourierdomein is afgebeeld in figuur 3.10 (a). Met SCIL-Image kan deze afbeelding teruggetransformeerd worden naar het ruimtelijk domein. Het resultaat is zichtbaar in figuur 3.10 (b). Door de gecorrigeerde opname met de originele opname in figuur 3.8 vergelijken blijkt dat het diagonale lijnenpatroon nagenoeg verdwenen is.

Correctie voor non-uniforme belichting

Het gebruik van een stroboscoop veroorzaakt een non-uniforme belichting van het te registreren snelheidsveld. Dit verschijnsel is direct zichtbaar bij beschouwing van de experimentele opstelling (zie figuur 3.5). Het gedeelte van de vorm dat dichterbij de lichtbron is geplaatst — het eerste been van de gietvorm — zal beter belicht worden. Het tweede been wordt minder goed belicht.

In de richting van het snelheidsveld is een non-uniforme belichting zichtbaar als twee lichte



Figuur 3.11: De afwijking van de gemiddelde intensiteit over (a) de breedte van de opname en (b) de lengte van de opname ten opzichte van de globale gemiddelde pixelintensiteit.

banden, met daartussen een donkere band. In veel situaties hoeft een dergelijke non-uniforme belichting geen probleem te zijn, mits de lengteschaal van de intensiteitsverandering groot is ten opzichte van de afmetingen van een interrogatiegebied.

Een methode om de intensiteitsverandering over de opname te bepalen is door het pixelgemiddelde van de opname in een bepaalde richting te berekenen. In figuur 3.11 (a) wordt de afwijking van de gemiddelde pixelwaarde uitgezet als functie van de positie over de breedte van de opname. Een vergelijkbare berekening is gedaan voor de posities over de hoogte van de opname, dus loodrecht op de stromingsrichting. Het resultaat staat uitgezet in figuur 3.11 (b).

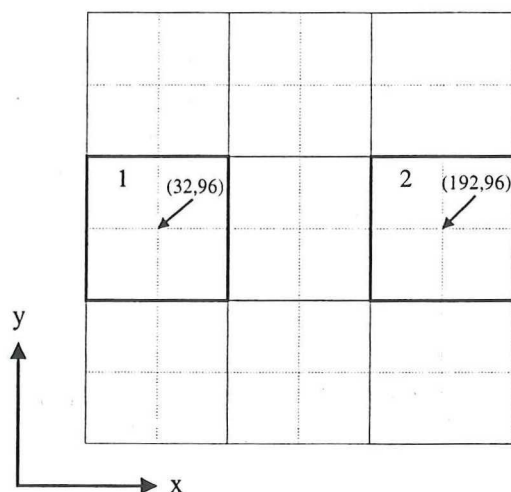
Voor het verkrijgen van de pixelwaardeverdeling in figuur 3.11 (a) en (b) is de opname bewerkt met een uniform- of moving average filter van 7 bij 7 pixels groot. Dit filter is gebaseerd op het principe dat aan elke pixel de gemiddelde waarde van het gebied rondom dit pixel wordt toegekend. Dit gebied moet groter zijn dan de afmetingen van een deeltje in de opname [Westerweel, 1993]. De lokale minima en maxima in de grijswaardeverdeling worden door het filter afgezwakt.

Uit figuur 3.11 wordt duidelijk dat de variaties in de intensiteit voor beide verdelingen klein zijn (ongeveer 5% van links naar rechts en van onderen naar boven). Door de grootte van deze gradiënten lijkt een correctie voor non-uniformiteit niet noodzakelijk.

Uit figuur 3.11 (a) volgt echter dat voor een klein gedeelte van de opname (van 0 tot 32 pixels) een sterkere afwijking van de gemiddelde intensiteit (ruim 10 %) aanwezig is. Deze gradiënt is vermoedelijk afkomstig van de overgang van het aansnijsysteem naar de gietvorm, waar zich een scheiding in het perspex bevindt. Zonder correctie voor de non-uniforme belichting worden voor dit gedeelte van de opname slechte vectoren berekend in de interrogatiemethode (zie ook paragraaf 3.2.3).

3.2.3 Interrogatie

Ter bepaling van het snelheidsveld wordt de gedigitaliseerde opname opgedeeld in zogenaamde interrogatiegebieden. Met behulp van een interrogatiemethode wordt vervolgens de meest waarschijnlijke verplaatsing van de deeltjes in een interrogatiegebied bepaald. In het algemeen



Figuur 3.12: Indeling van opname in totaal 36 interrogiatiegebieden. De interrogiatiegebieden overlappen elkaar 50% in elke richting.

wordt voor meervoudig belichte opnamen autocorrelatie gebruikt als interrogiatiemethode. [Westerweel, 1993] heeft voor het berekenen van de autocorrelatiefunctie het programma ScanA geschreven, dat tevens de verplaatsingspiek in het correlatiespectrum detecteert. De verplaatsing kan met behulp van een schatter op sub-pixel niveau bepaald worden.

Met behulp van SCIL-Image wordt de gedigitaliseerde opname weggeschreven in ASCII formaat. Dit is de invoerfile voor ScanA. Met een hulpprogramma wordt de oorsprong van de coördinaten verplaatst van linksboven (een instelling van SCIL-Image) naar linksonder. Met het initialiseren van twee invoerfiles worden de afmetingen (in pixels) van de opname en het interrogiatiegebied opgegeven. ScanA verschuift bij de berekening van de interrogiatiegebieden $N/2$ ($= 32$) pixels, zodat elke interrogiatiegebied in *beide* richtingen 50% wordt overlapt. In figuur 3.12 wordt weergegeven hoe een opname van 224 bij 224 pixels wordt opgedeeld in 36 interrogiatiegebieden van 64 bij 64 pixels. De coördinaten geven het middelpunt van een interrogiatiegebied aan. De berekening met ScanA duurt voor een dergelijke opname enkele seconden op een HP9000/715.

De uitvoerfile van ScanA bestaat uit vijf kolommen met respectievelijk de x-coördinaat, de y-coördinaat, de verplaatsing in de x-richting, de verplaatsing in de y-richting, en de signaal-ruisverhouding van de autocorrelatiefunctie. Met behulp van post-processing software kunnen deze gegevens verder verwerkt worden.

SCIL-Image kent de mogelijkheid om de Fourier transformatie van een opname uit te voeren, zodat het mogelijk is om de autocorrelatiefunctie rechtstreeks met SCIL te berekenen. Dit is een directe toepassing van de Wiener-Khinchin stelling (zie 2.11).

De invloed van de verschillende bewerkingen in SCIL-Image (zoals beschreven in paragraaf 3.2.2) wordt direct zichtbaar uit de vorm van de verplaatsingspiek in het autocorrelatiespectrum. In Appendix A wordt de invloed van de beide opnamecorrecties op de schatting van het piekmidden en de signaal-ruisverhouding nader beschouwd.

De combinatie van correctie in het Fourierdomein en verwijdering van de non-uniforme belichting heeft een nauwkeuriger schatting van het piekmidden van de verplaatsingspiek tot gevolg en een gemiddeld betere signaal-ruisverhouding voor het meetgebied. Voor de opname in figuur 3.8 (a) neemt het aantal vectorberekeningen met $\sigma_{SR} < 1.2$ door de opnamecorrectie af van $\sim 30\%$ tot $\sim 10\%$. Het toepassen van beeldbewerking zorgt zodoende voor een aanzienlijke verbetering van de PIV-resultaten.

3.2.4 Postprocessing

De uitvoer van de interrogatieprocedure bestaat uit de schatting voor de verplaatsing in de twee afzonderlijke richtingen en de signaal-ruisverhouding voor elk interrogatiebied. Met behulp van postprocessing software worden de PIV-data bewerkt en geïnterpreteerd. Voor het behandelen van de experimentele resultaten in dit onderzoek is gebruik gemaakt van software die door [Westerweel, 1993] ontwikkeld is. De postprocessing procedure is te onderscheiden in drie stappen:

- Statistische behandeling van de PIV-data voor het opsporen van afwijkende vectoren met de mediaantest.
- Samenbrengen van de gedigitaliseerde gedeelten bij het gebruik van een fotocamera en verwijderen van de data die zich buiten het stromingsgebied bevinden.
- Grafische weergave van het snelheidsveld en interpretatie van de resultaten.

In Appendix B wordt een overzicht gegeven van de postprocessing software. De statistische behandeling van PIV-data is voor de verwerking van grote hoeveelheden data zoveel mogelijk in één procedure ondergebracht. Voor de interpretatie van de snelheidsgegevens is in dit onderzoek verwerkingssoftware geschreven. De behandeling van de PIV-data, die verkregen zijn door registratie met de fotocamera, vereist enkele aanpassingen ten opzichte van de procedure voor digitale beeldacquisitie.

Op het gebruik van postprocessing software en de interpretatie van de verkregen snelheidsgegevens wordt nader ingegaan bij de behandeling van de experimentele resultaten.

Hoofdstuk 4

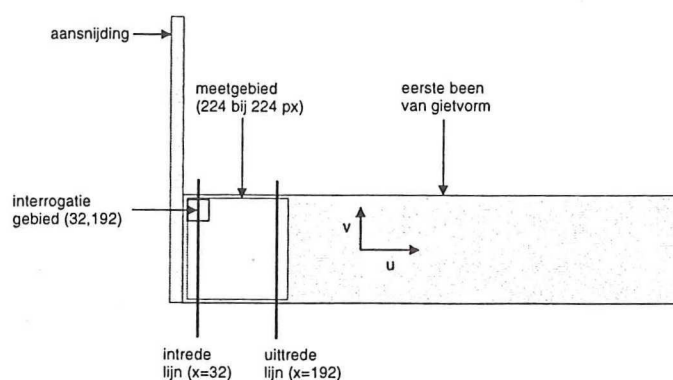
Experimentele resultaten

Er zijn PIV-experimenten uitgevoerd voor twee uitvoeringen van het aansnijsysteem. Registratie van het snelheidsveld vindt plaats op fotografische film en door middel van een CCD-camera. In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze experimenten samengevat en volgt een beschouwing van de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de metingen.

4.1 Het snelheidsveld vlak na de aansnijding

De functie van het aansnijsysteem is het gelijkmatig vullen van de gietvorm met een controleerbare vloeistofsnelheid. De vloeistofstroming in het gedeelte van de gietvorm vlak na de aansnijding geeft aan in hoeverre het aansnijsysteem aan deze eisen voldoet. Bij het gieten van metaal kan bij voorbeeld een grote snelheidsgradiënt over de breedte van de gietvorm spuit effecten veroorzaken, zodat tijdens het vullen van de gietvorm lucht wordt ingesloten door het metaal. Dit heeft tot gevolg dat het gietstuk plaatselijk niet aan de gestelde specificaties voldoet.

Er zijn PIV-metingen verricht in een klein gebied vlak achter de overgang van het aansnijsysteem naar de gietvorm. De lokatie van het meetgebied wordt schematisch weergegeven in figuur 4.1. Het grootste deel van de experimenten maakt gebruik van een meetgebied van



Figuur 4.1: Het meetgebied vlak na de aansnijding van de gietvorm.

224 bij 224 pixels, wat overeenkomt met ongeveer $40 \times 40 \text{ mm}^2$. De gebruikte terminologie in de figuur wordt bij het bespreken van de meetresultaten nader behandeld.

Het meetgebied heeft betrekkelijk kleine afmetingen, zodat het mogelijk is om naast fotografische registratie direct digitale opnamen te maken met behulp van een CCD-camera. Voor beide uitvoeringen van het aansnijsysteem — met constant pompdebiet op de choke en toevoer door middel van een gietbak — zijn experimenten gedaan met twee manieren van registratie. De resultaten worden per aansnijsysteem behandeld.

4.2 Experimenten met hoge snelheid

De experimenten met hoge snelheid werden uitgevoerd met behulp van het aansnijsysteem zoals weergegeven in figuur 3.4 (b). Op de choke van het aansnijsysteem wordt een constant debiet opgelegd. Door afstellen van de by-pass van de pomp wordt een debiet ingesteld waarbij de vultijd van de vorm ongeveer twee seconden is. Calibratie van de pomp leverde een waarde voor het debiet van $\Phi = 46.5 \text{ ml/s}$ met een relatieve fout van 10%. De pomp werd enkele seconden met de suspensie gespoeld ter verwijdering van luchtballen.

De dwarsdoorsnede van de gietvorm heeft een oppervlakte van 1.2 cm^2 , zodat het pompdebiet een gemiddelde snelheid over de dwarsdoorsnede in de gietvorm oplegt van 38 cm/s . De polystyreenbolletjes, die aan de vloeistof worden toegevoegd, hebben een gemiddelde diameter van $\sim 500 \mu\text{m}$. Voor een verplaatsing van drie maal de deeltjesgrootte (1.5 mm) is een tijdsinterval, δt , tussen de lichtpulsen vereist dat niet kleiner is dan 4.5 ms . De lichtpulsen worden afgegeven door een stroboscoop.

Zowel in de experimenten met de CCD-camera als met fotografische film is gekozen voor driedubbele belichting van de opname conform de aanbevelingen van [Keane and Adrian, 1991]. Aan de hand van de experimentele procedure, zoals beschreven in paragraaf 3.2, worden de resultaten voor elke experimentele instelling besproken.

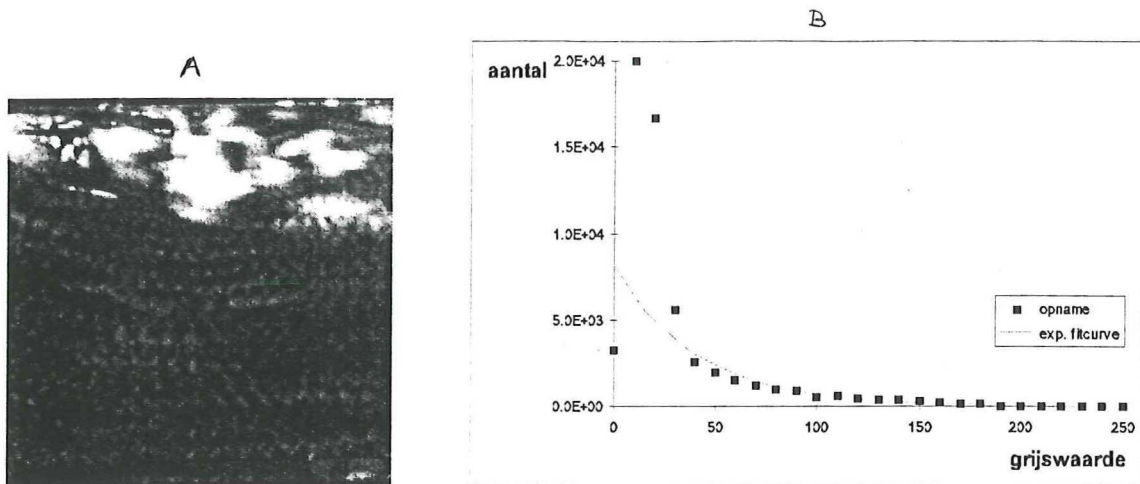
4.2.1 Metingen met behulp van de CCD-camera

In deze paragraaf wordt een systematische analyse uitgevoerd van de verkregen resultaten en de toegepaste procedure. Voor de andere experimenten volgt een meer samengevatte uiteenzetting.

Beeldacquisitie

De experimenten met directe digitale registratie werden uitgevoerd met behulp van een DALSA CCD-camera met een resolutie van 256 bij 256 pixels. Een 55 mm lens projecteert de vloeistofstroming vlak na de aansnijding in de camera met een lineaire vergroting, M , van 0.4. De stroboscoop levert lichtpulsen met een frequentie van 220 Hz. De beeld-acquisitie is 70 frames/s, zodat elke opname drie tot vier maal belicht wordt.

In figuur 4.2 (a) wordt een frame na contrastverbetering afgebeeld. In de opname is duidelijk



Figuur 4.2: (a) Hoge snelheid opname verkregen met digitale registratie, (b) grijswaardenverdeling na contrastverbetering.

de aanwezigheid van luchtbellens op te merken die zich aan de bovenkant van de gietvorm bevinden. Deze luchtbellens beslaan een aanzienlijk deel van de opname (tot maximaal 30 % van de breedte van de opname). Het is te verwachten dat dit gedeelte van de opname slechte meetresultaten zal opleveren.

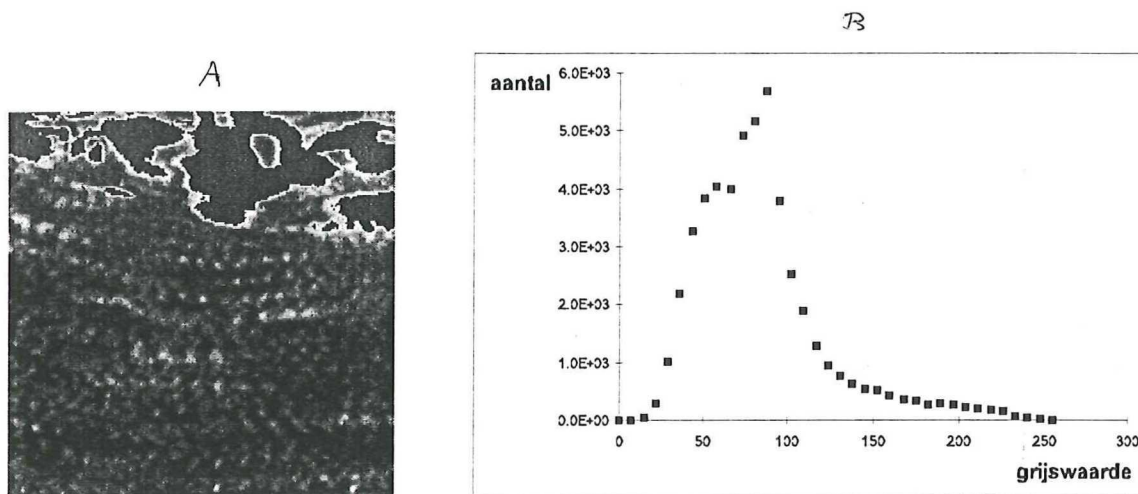
De originele opname is opgebouwd uit 254 bij 252 pixels en heeft een grijswaardebereik van 88 tot 180. Door middel van contrastverbetering worden de grijswaarden over het totaal van 256 grijswaarden gespreid. Aan de laagste grijswaarde in de opname wordt de grijswaarde nul toegekend en aan de hoogste grijswaarde één. Contrastverbetering levert dus geen nieuwe informatie; het aantal grijswaarden blijft constant. De grijswaardenverdeling na contrastverbetering van de opname staat afgebeeld in figuur 4.2 (b). De grijswaarden zijn verdeeld over klassen met een grootte van tien grijswaarden.

[Westerweel, 1993] stelt dat de intensiteits- of grijswaardeverdeling over een digitale PIV-opname een negatief exponentieel verloop heeft. Voor de grijswaardeverdeling in figuur 4.2 (b) is een exponentiële curve bepaald die voor grijswaarden kleiner dan 30 sterk afwijkt. Dit is volgens [Westerweel, 1993] vermoedelijk het gevolg van instrumentele ruis.

Beeldbewerking

Met behulp van de beeldbewerkingsprocedure zoals beschreven in paragraaf 3.2.2 wordt de kwaliteit van de opname verbeterd. De aanwezigheid van luchtbellens in de gietvorm beïnvloedt de correctie voor non-uniforme belichting negatief. De correctiemethode beschouwt de luchtbellens als een sterke non-uniformiteit van de opname. De correctiemethode maakt daarom gebruik van een drempelwaarde.

De invloed van de beeldbewerking is goed zichtbaar door de opname in figuur 4.2 (a) te vergelijken met de opname na beeldbewerking in figuur 4.3 (a). Het gebruik van een drempelwaarde zorgt voor het egaliseren van de luchtbellens bovenin het frame. Aan alle pixels met een grijswaarde boven deze drempelwaarde wordt de gemiddelde grijswaarde van de opname



Figuur 4.3: (a) Opname na beelbewerking, (b) grijswaardeverdeling na contrastverbetering.

toegekend. Vergelijking van de grijswaardeverdeling van de originele en gecorrigeerde opname laat een verschuiving zien van de grijswaarden naar hogere waarden. Het aantal grijswaarden neemt af van 128 voor de originele tot 36 voor de bewerkte opname. Beide effecten zijn het gevolg van het verwijderen van een groot deel van de luchtballen.

Interrogatie en postprocessing

De beschikbare programma's voor interrogatie met behulp van de autocorrelatiefunctie en de detectie en vervanging van afwijkende vectoren zijn geïntegreerd in één procedure. Elk frame wordt gereduceerd tot 224 bij 224 pixels, zodat de randen van de gietvorm die in de originele opname staan afgebeeld uit de opname verdwijnen. Ook een gedeelte van de luchtballen wordt verwijderd. De opname komt nu overeen met een meetgebied van $38.6 \times 38.6 \text{ mm}^2$ in de gietvorm.

De afmetingen van een interrogatiegebied zijn 64 bij 64 pixels. Een interrogatiegebied wordt ten opzichte van een vorig gebied 32 pixels verschoven, zodat elk interrogatiegebied 50 % overlapt wordt in de x- en de y-richting. Totaal worden op deze manier 36 vectoren per frame berekend.

Automatische bepaling van de Bayes kritieke waarde (zie vergelijking 2.32) voor elk frame afzonderlijk is niet in de procedure opgenomen. De waarde voor r_c^2 blijkt voor de afzonderlijke frames van een meetserie weinig te variëren. De mediaantest vervangt gemiddeld zeven afwijkende vectoren per frame ($\sim 19\%$). Dit zijn voornamelijk interrogatiegebieden bovenin het frame, waar zich een deel van de luchtballen in bevinden.

Interpretatie van de PIV-data

Een eerste indruk van de verandering van het snelheidsveld in de tijd kan worden verkregen door het vectorveld op een aantal tijdstippen te bekijken. Een overzicht van het snelheidsveld vlak na de aansnijding van de gietvorm wordt weergegeven in figuur 4.4. De coördinaten

worden weergegeven in pixels. Het moment van vullen van de gietvorm wordt beschouwd als $t = 0s$.

De snelheid bestaat uit een component in de X-richting, u , en een component in de Y-richting, v . Bij de beschouwing van de snelheidsvelden wordt een intredelijn gedefinieerd, waarvoor geldt dat $X = 32px$, en een uittredelijn met $X = 192px$. Een interrogatiegebied wordt beschreven met de coördinaten van het midden van het betreffende gebied, bij voorbeeld (32, 192). Dit interrogatiegebied bevindt zich op de intredelijn. In figuur 4.1 zijn deze termen nader verklaard.

Op grond van de berekende snelheidsvelden kunnen een aantal kwalitatieve opmerkingen gemaakt worden:

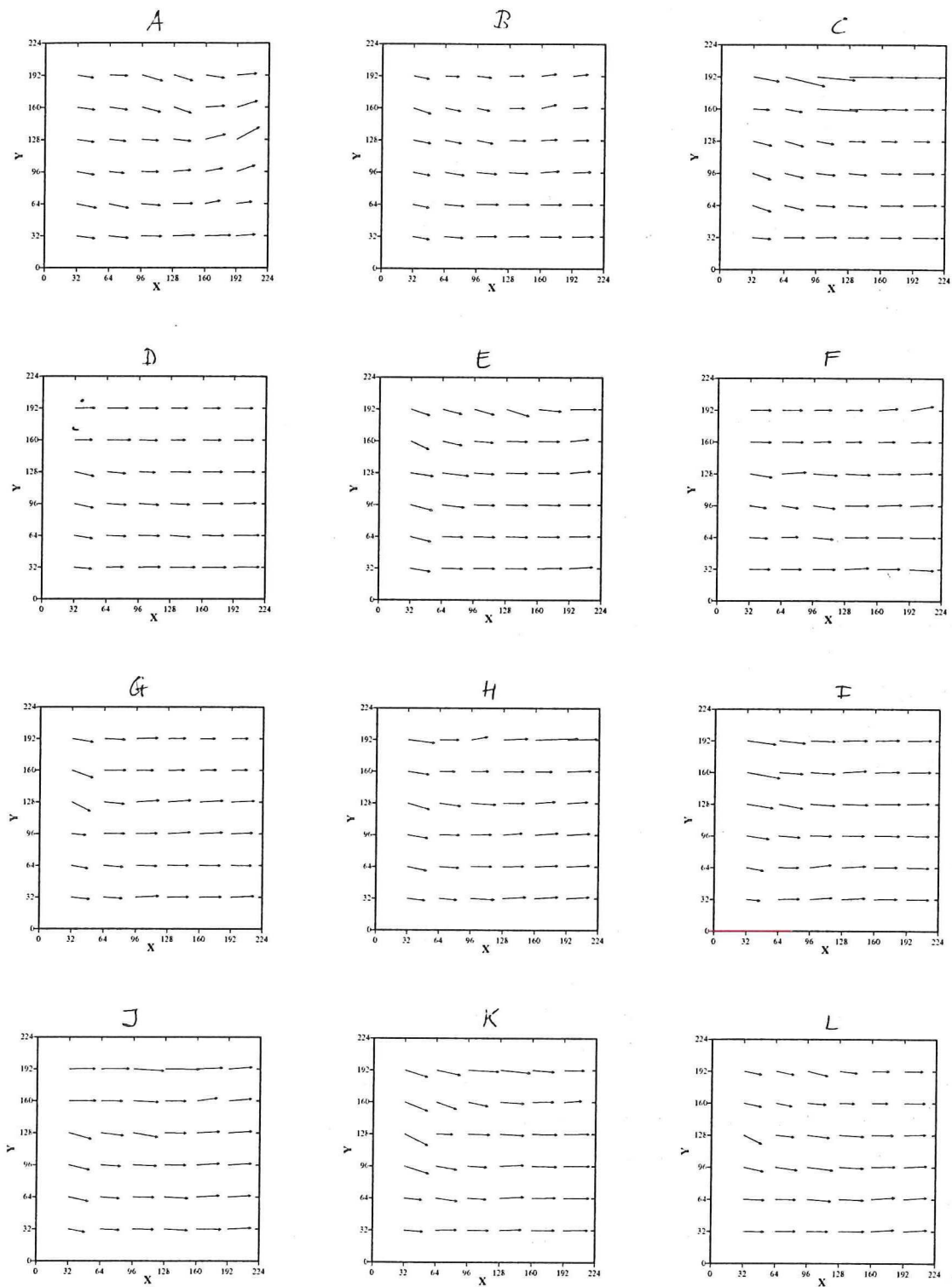
- De vloeistofstroming ondervindt bij intrede in de gietvorm een zijwaartse verplaatsing (een negatieve snelheidscomponent v). De snelheid is niet uniform over de intredelijn.
- Op de uittredelijn is de v -component vrijwel nul. De aansnijding lijkt hier de richting van de stroming niet meer te beïnvloeden. De u -component van de vector is niet uniform verdeeld over de uittredelijn.
- De aanwezigheid van luchtbellen bovenin de gietvorm, zoals zichtbaar op de opnamen, heeft voor de berekening van de snelheid op bij voorbeeld $t = 0.14s$ en $t = 0.24s$ een storende werking. Vanaf $t = 0.4s$ zijn de grootste luchtbellen uit de opname verdwenen en zorgt het gebruik van de mediaantest voor een goede correctie van afwijkende vectoren.

De gemiddelde snelheid over het meetgebied is een maat voor het debiet dat door het aansnij-systeem wordt geleverd. De absolute waarde van de snelheid, gemiddeld over alle interroga-tiegebieden in het frame, wordt samen met de standaarddeviatie als functie van de tijd uitgezet in figuur 4.5. De standaarddeviatie staat voor de snelheidsvariatie over het meetgebied.

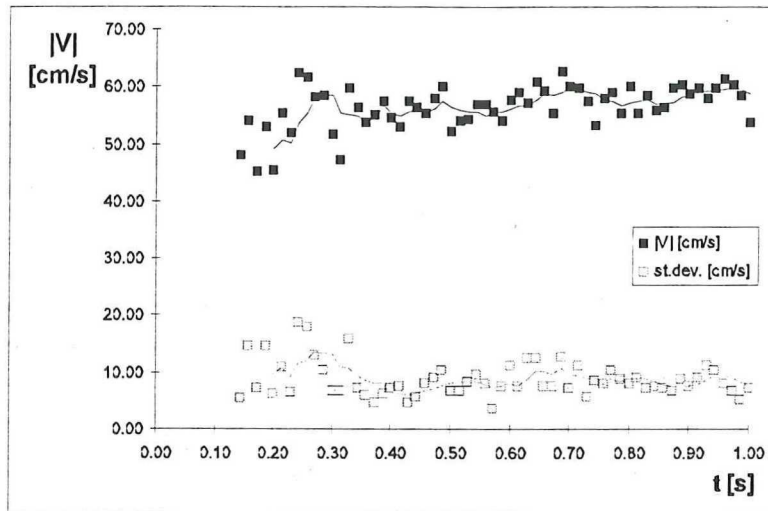
Met behulp van een *moving average* curve over vijf meetpunten wordt de verandering van de ruimtelijk gemiddelde snelheid en de snelheidsfluctuaties weergegeven. De grootste toename ($\sim 13cm/s$) in de gemiddelde snelheid treedt op in het interval $t = 0.1 - 0.3s$. Vanaf $t = 0.3s$ blijft de ruimtelijk gemiddelde snelheid vrijwel constant. Ook de snelheidsvariatie binnen het meetgebied, weergegeven door de standaarddeviatie, vertonen geen sterke verandering. De vloeistofstroming lijkt hier stationair.

De non-uniformiteit van de vloeistofstroming in het meetgebied kan goed zichtbaar gemaakt worden door de u -component van de snelheid voor de intrede- en uittredelijn met elkaar te vergelijken.

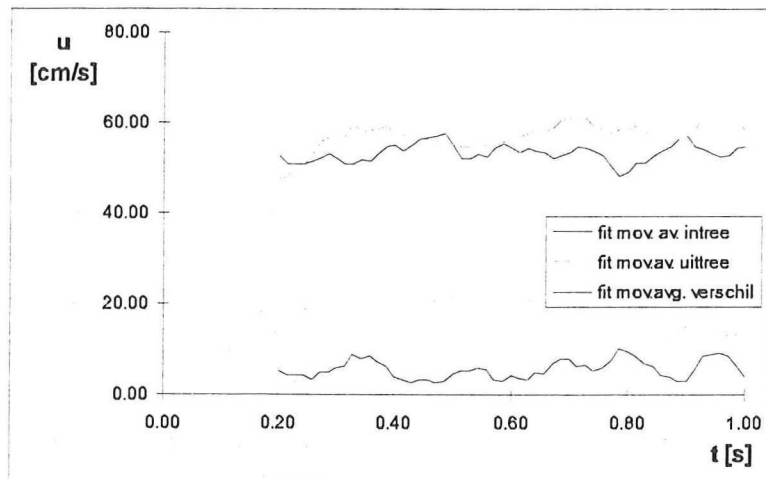
In figuur 4.6 wordt de u -snelheidscomponent als functie van de tijd weergegeven. In de figuur zijn de waarden voor de gemiddelde u -snelheidscomponent over de zes interrogatiegebieden van een lijn bepaald. Er treedt voor zowel de intrede- als de uittredelijn nauwelijks veran-dering van de snelheid op in de tijd. Het stationaire gedrag van de stroming wordt hierdoor bevestigd. In de figuur staat ook de absolute verschil tussen de u -snelheid over de twee lijnen uitgezet, waarvan de maximale waarde ongeveer 10 cm/s (20%) is.



Figuur 4.4: Het snelheidsveld op (a) $t=0.14$, (b) $t=0.20$, (c) $t=0.24$, (d) $t=0.30$, (e) $t=0.37$, (f) $t=0.40$, (g) $t=0.50$, (h) $t=0.60$, (i) $t=0.70$ s, (j) $t=0.80$, (k) $t=0.90$, (l) $t=1.0$ s.



Figuur 4.5: De absolute waarde van de snelheid en de standaarddeviatie als functie van de tijd. Voor beide variabelen geeft de doorgetrokken lijn het moving average over vijf meetpunten.



Figuur 4.6: De gemiddelde waarde van de u -snelheidscomponent over de hoogte van het meetgebied als functie van de tijd.

De invloed van het aansnijsysteem op het snelheidsveld in het meetgebied wordt verduidelijkt in figuur 4.7. In deze figuur staat voor elk interrogatiegebied op de intree- en uittredelijnen de u -snelheidscomponent uitgezet als functie van de tijd. Voor elke dataserie is de *moving average* curve over vijf meetpunten afgebeeld. In het geval van de uittredelijnen wordt een snelheid berekend vanaf $t = 0.10$ s. De vloeistofstroming heeft dan het gehele frame gevuld.

In figuur 4.7 is het effect van de zijwaartse intreding van de stroming goed zichtbaar. Onderin het frame is de u -snelheidscomponent bij de uittredelijnen maximaal 10 cm/s groter dan bij de intredelijnen. Naarmate hoger in het frame naar de snelheid gekeken wordt, zal de snelheid bij de intredelijnen toenemen en bij de uittredelijnen afnemen. De stroming heeft de neiging van linksboven in het frame naar rechtsonder te bewegen. Het effect van de luchtballen bovenin het frame is duidelijk zichtbaar in de meting voor de u -snelheid in de interrogatiegebieden op $Y = 192$ px en in mindere mate op $Y = 160$ px. De *moving average* curves vertonen een grote afwijking van het gemiddelde.

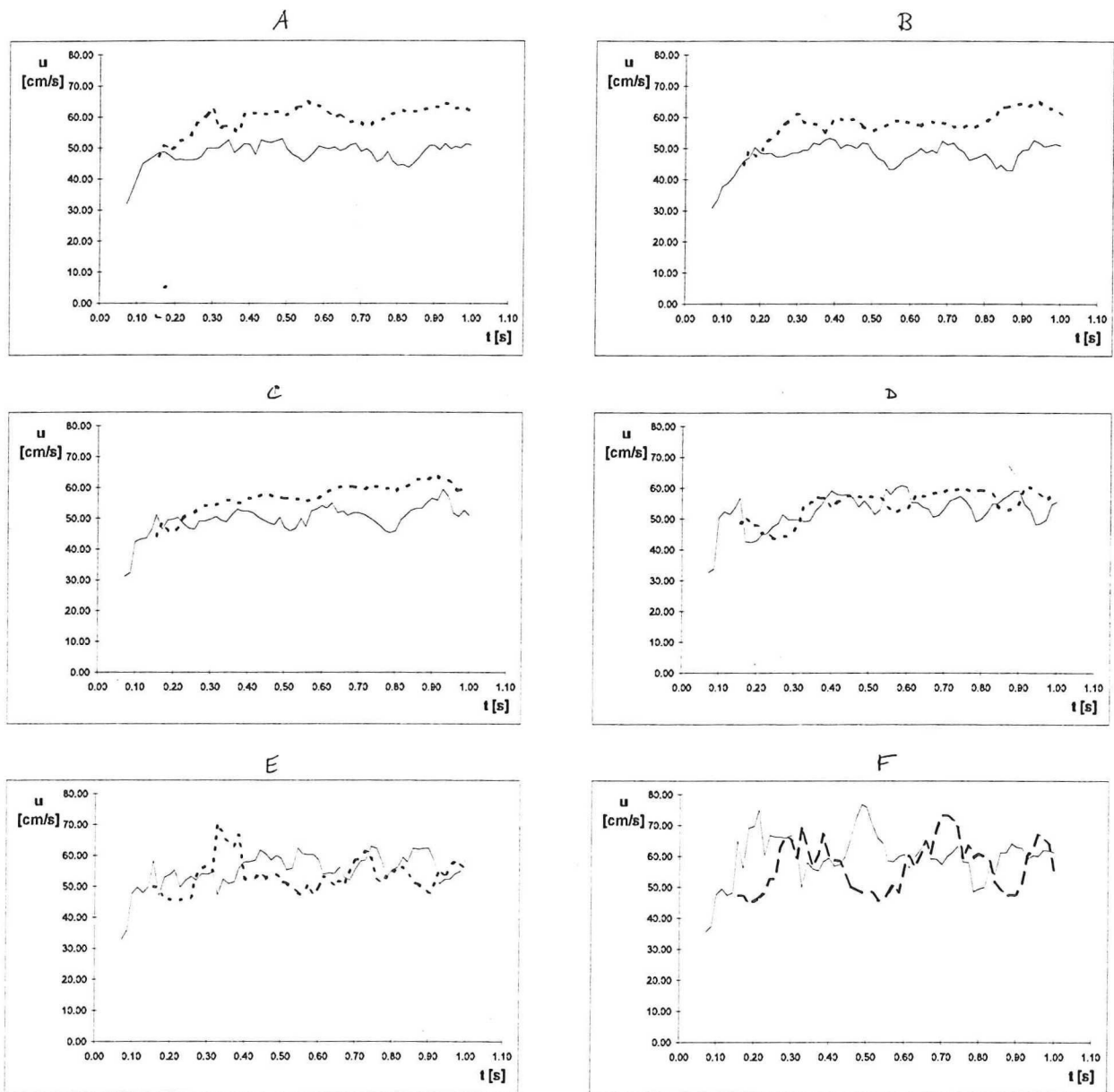
Voor de interrogatiegebieden op $Y = 32$ px en $Y = 64$ px is het effect van de toename van de snelheid bij de intredelijnen in het interval $t = 0.10 - 0.20$ vertraagd terug te zien in de snelheid op de uittredelijnen. De vertraging is ongeveer 0.12 s groot, wat overeenkomt met de vultijd van het frame. Voor de andere interrogatiegebieden is deze correlatie niet goed zichtbaar.

De invloed van het aansnijsysteem op de grootte en de richting van de snelheid in het meetgebied is duidelijk zichtbaar wanneer van elke vector in een interrogatiegebied de gemiddelde snelheid wordt afgetrokken. In figuur 4.8 wordt voor het meetgebied op $t = 0.20$ s de verschilvector gegeven voor elk interrogatiegebied. De constatering die gedaan werd op grond van figuur 4.7 wordt door deze figuur bevestigd. Er treedt een rotatie van de stroming op in positieve richting.

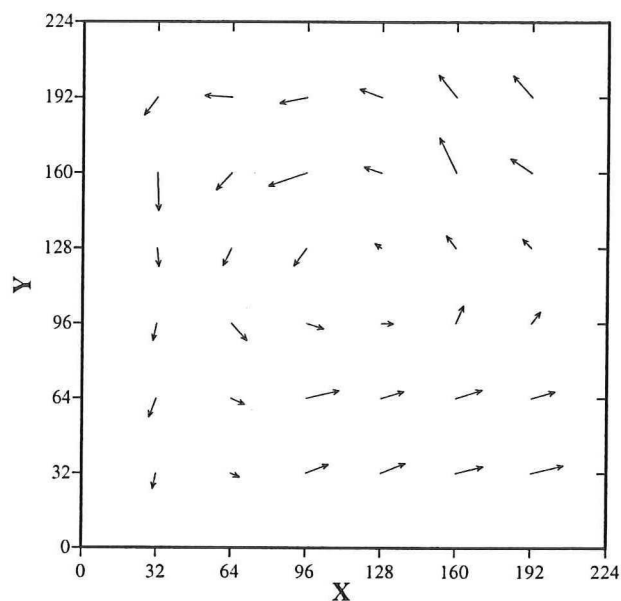
De aanwezigheid van een gradiënt over de intree- en uittredelijnen wordt ook duidelijk uit het berekenen van de tijdsgemiddelde waarde van de u -snelheid voor de twee lijnen. Voor de verschillende posities van het interrogatiegebied is deze waarde uitgezet in figuur 4.9. Het berekende gemiddelde is van toepassing op de stationaire situatie, dat wil zeggen vanaf het tijdstip dat de snelheid vrijwel constant in de tijd is.

Van belang bij de interpretatie van figuur 4.9 is de grootte van de snelheidsfluctuaties, of standaarddeviatie van de berekende gemiddelden. Voor de interrogatiegebieden op de intree- en uittredelijnen is de standaarddeviatie $\sim 10\%$ van het berekende gemiddelde. Op de posities $Y = 160$ en $Y = 192$ zijn de fluctuaties veel groter: $\sim 25\%$. De aanwezigheid van een tegen elkaar in gerichte snelheidsgradiënt over de twee lijnen, die op grond van de snelheidsvelden in figuur 4.4 werd gedaan, wordt door figuur 4.9 bevestigd.

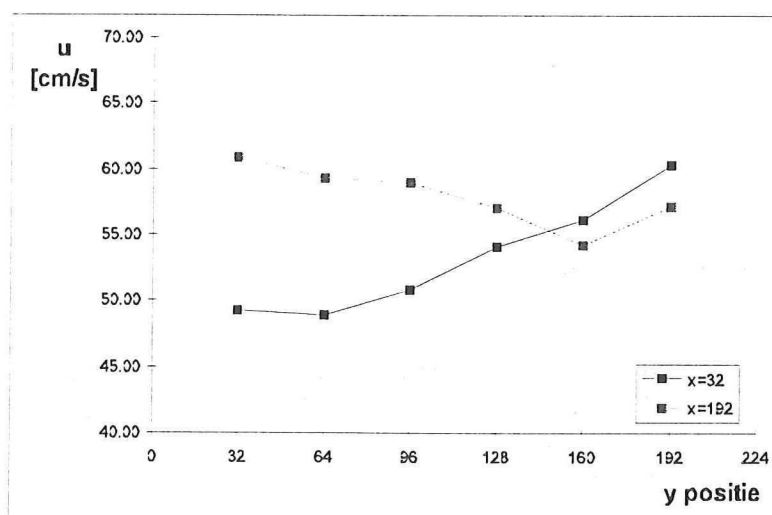
De gemiddelde waarde van de u -snelheid over de hoogte van het meetgebied zal op grond van de continuïteitsvergelijking constant zijn voor stationaire vloeistofstroming. Toegepast op de berekende waarden van de u -snelheidscomponent over de in- en uittredelijnen levert dit een gemiddelde van $u_{in} = 53.3$ cm/s en $u_{uit} = 57.9$ cm/s met $\sigma_{in} = 3.94$ en $\sigma_{uit} = 3.80$. Vergeleken met de gemiddelde snelheid over de doorsnede van de gietvorm ten gevolge van het pompdebiet ($u_{gem} = 38.8$ cm/s) bestaat er een groot verschil in de gemeten waarde en de randvoorwaarde. Op de oorzaak van dit verschil wordt nog nader ingegaan.



Figuur 4.7: De u -snelheidscomponent als functie van de tijd voor een interrogatiegebied op de intrede- en uittredelij. (—) staat voor de intredelij, (- - -) voor de uittredelij. De interrogatiegebieden hebben de volgende posities: (a) $Y = 32$, (b) $Y = 64$, (c) $Y = 96$, (d) $Y = 128$, (e) $Y = 160$, (f) $Y = 192$ px.



Figuur 4.8: Het vectorveld na aftrekken van de gemiddelde snelheid over het meetgebied op $t = 0.20$ s.



Figuur 4.9: De tijdsgemiddelde u -snelheidscomponent voor verschillende posities van het interrogeringsgebied op de intrede- en uittredelijijn.

4.2.2 Metingen met behulp van de fotocamera

Met behulp van een fotocamera wordt de verplaatsing van deeltjes door de gehele gietvorm geregistreerd. Op deze plaats zal alleen ingegaan worden op het snelheidsveld vlak achter de aansnijding. In dit experiment is een andere pompinstelling gebruikt om de aanwezigheid van luchtbellen in het meetgebied te voorkomen. Het opgelegde debiet wordt bepaald met de verplaatsing van het vrije oppervlak in de tijd (zie 4.4.1).

Beeldacquisitie en -analyse

De vloeistofstroming door de gietvorm wordt met behulp van een standaard 55 mm lens vastgelegd op een 3200 Asa fotografische film. Het diafragma is 2.8 en met de lens wordt scherpgesteld op de bodem van de gietvorm. De focusdiepte is in dit geval gelijk aan de dikte van het lichtvlak (3 mm). De gehele gietvorm wordt geregistreerd, waarbij de vergroting $\sim 1/10$ is. Er is een lagere frequentie gebruikt dan bij de opnamen met CCD-camera (te weten 180 Hz), zodat een iets grotere verplaatsing wordt geregistreerd. In tegenstelling tot de metingen bij de CCD-camera is de lichtintensiteit die de stroboscoop bij deze frequentie levert toereikend bij het gebruik van fotografische film. De belichtingstijd is $1/60s$, zodat elke opname drie maal belicht wordt. De motordrive levert bij deze belichtingstijd vijf opnamen per seconde.

Door het vastleggen van de verplaatsing van het vrije oppervlak in de tijd wordt het debiet bepaald op 23.4 ml/s, zodat over de doorsnede van de gietvorm een gemiddelde snelheid geldt van 19.5 cm/s.

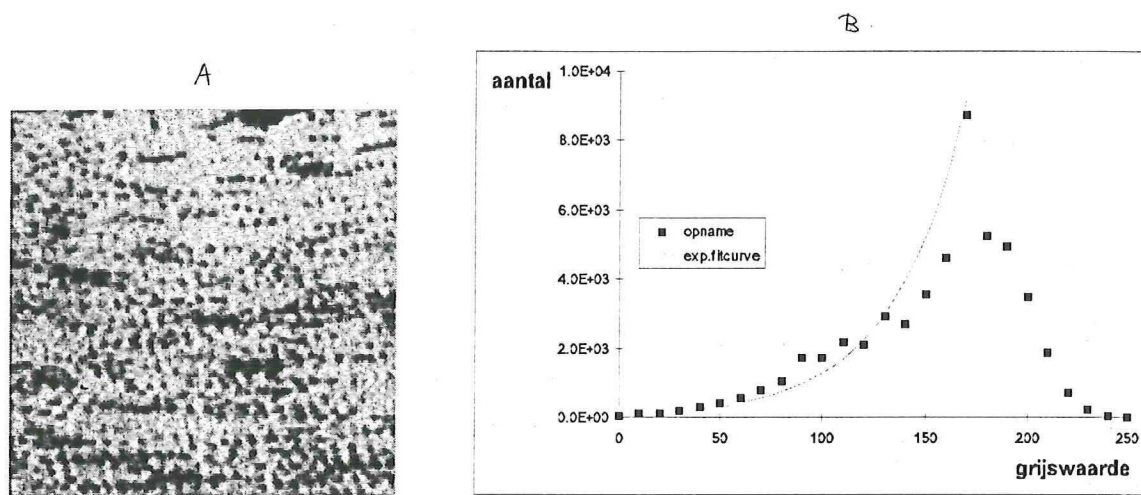
Met behulp van de inleesopstelling, zoals weergegeven in figuur 3.7 wordt het gedeelte van het negatief vlak achter de aansnijding gedigitaliseerd. De opname wordt vervolgens gereduceerd tot 224 bij 224 pixels, wat overeenkomt met een meetgebied van $37.3 \times 37.3 mm^2$. In figuur 4.10 (a) wordt een originele opname na contrastverbetering afgebeeld. Door het instellen van een lager debiet dan waarvan gebruik gemaakt is voor de metingen in paragraaf 4.2.1 wordt het meesleuren van luchtbellen voorkomen.

Het grijswaardebereik van de originele opname ligt tussen 70 en 120. Een deeltje wordt afgebeeld met een lage grijswaarde, omdat de gedigitaliseerde opname afkomstig is van een negatief.

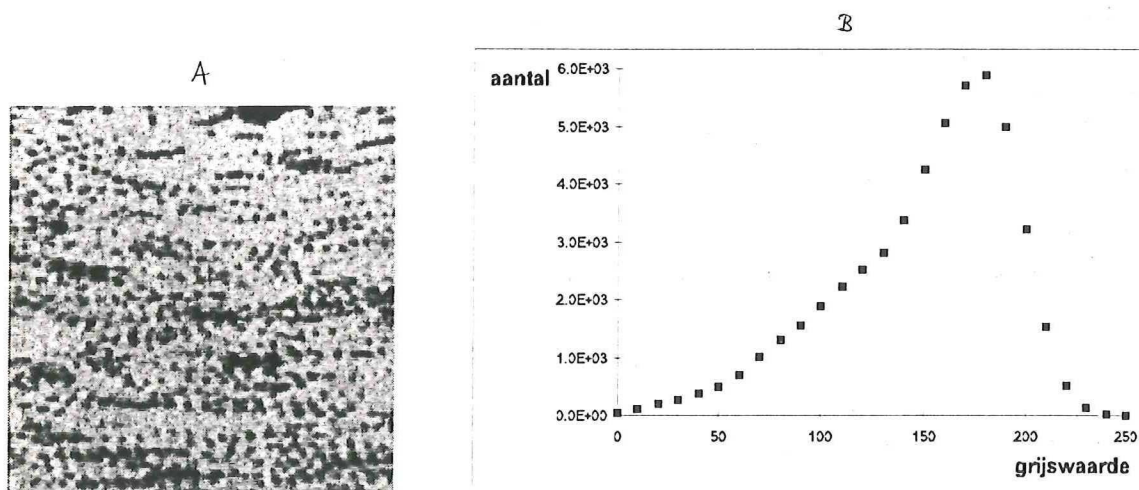
Een vergelijkbare beeldbewerkingsprocedure ter verbetering van de opname is gebruikt als in de experimenten in paragraaf 4.2.1. Door de afwezigheid van luchtbellen is het niet noodzakelijk een drempelwaarde te gebruiken.

In figuur 4.11 (a) wordt de verbeterde opname afgebeeld. Bovenin het meetgebied zijn donkere vlekken aanwezig door het samenklonteren van deeltjes. Zoals in de experimenten met digitale registratie zal op deze plaats waarschijnlijk afwijkende vectoren berekend worden.

De grijswaardverdeling over de bewerkte opname in figuur 4.11 (b) vertoont weinig verschil met dat van de originele opname. Er treedt geen reductie van het aantal grijswaarden op; beide opnamen bestaan uit ongeveer 55 grijswaarden.



Figuur 4.10: (a) Een originele opname verkregen door registratie met een fotocamera, en (b) bijbehorende grijswaardeverdeling.



Figuur 4.11: (a) De bewerkte opname, en (b) bijbehorende grijswaardeverdeling.

De opname wordt verdeeld in interrogatiegebieden van 64 bij 64 pixels met dezelfde procedure als in paragraaf 4.2.1 is gebruikt. In totaal worden 23 opnamen geïnterrogeerd, waarin voor elke opname 36 vectoren worden berekend. Door een kleinere gemiddelde verplaatsing van de deeltjes vergeleken met de experimenten in paragraaf 4.2.1 zal de *in-plane loss of pairs*-fractie iets lager zijn. Per frame worden gemiddeld zes vectoren door de mediaantest afwijkend gevonden en vervangen ($\sim 17\%$). Deze vectoren bevinden zich voornamelijk vlak achter de aansnijding en bovenin het frame.

Interpretatie van de PIV-data

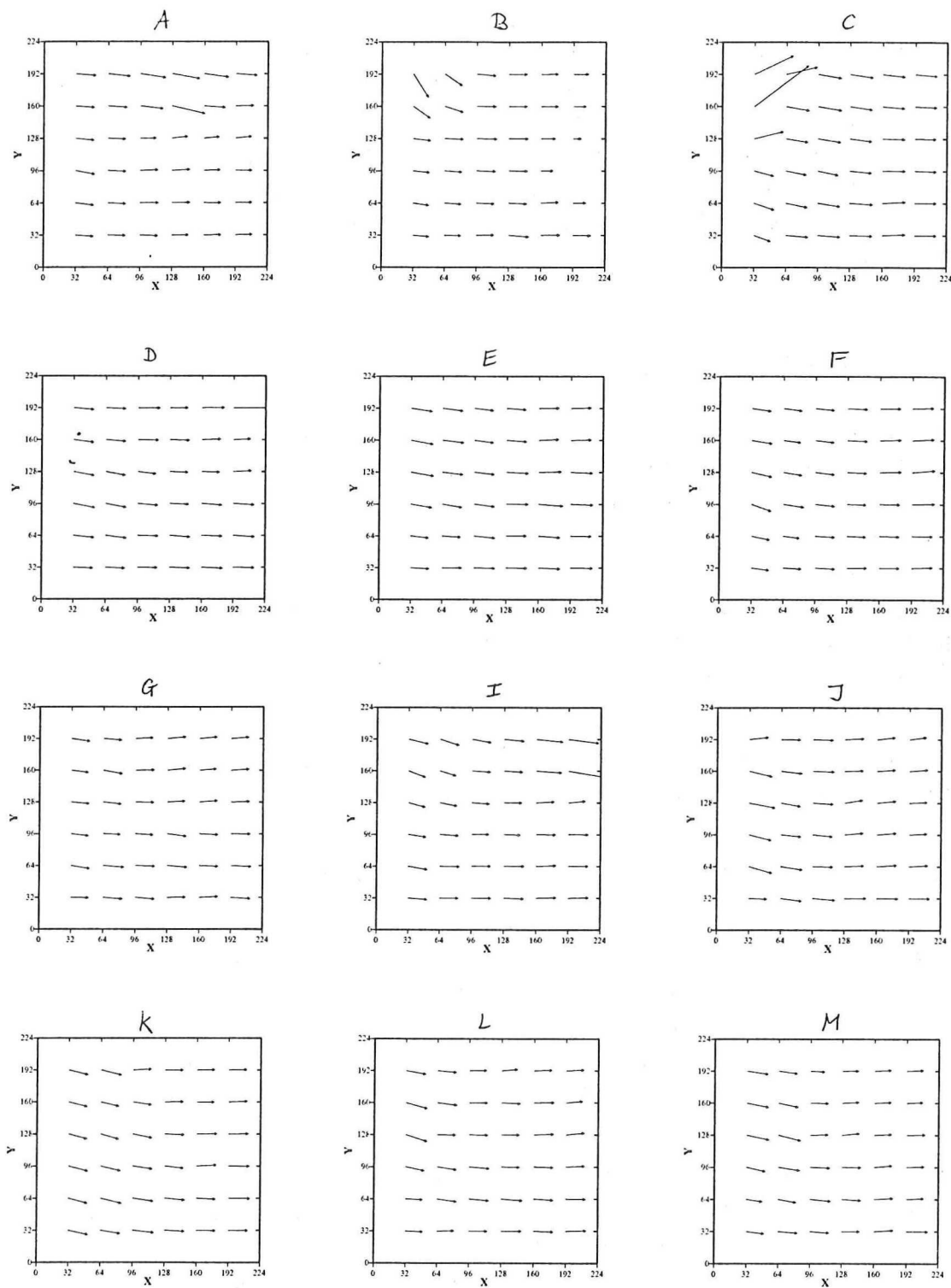
In figuur 4.12 wordt het snelheidsveld vlak achter de aansnijding voor een aantal tijdstippen gegeven. Het water wordt vanaf $t = 3.0$ s uit de gietvorm verwijderd door middel van een afvoer. Door het beperkte aantal opnamen dat met fotografische film gemaakt kan worden is op grond van de snelheidsvelden in figuur 4.12 weinig te zeggen over de eerste periode van het vullen van de gietvorm. De berekende snelheidsvelden tot $t = 1.58$ s hebben bovendien na het toepassen van de mediaantest nog een groot aantal afwijkende vectoren. De eerste twee opmerkingen die gemaakt zijn bij de interpretatie van de opnamen met de CCD-camera zijn ook op figuur 4.12 van toepassing, te weten:

- Bij intreding ondervindt de vloeistof een zijwaartse verplaatsing ($v \neq 0$). De grootte van de snelheidsvectoren is zowel over de in- als uittredelijn niet uniform.
- Op de uittredelijn is de grootte van de (v)-snelheidscomponent vrijwel nul.

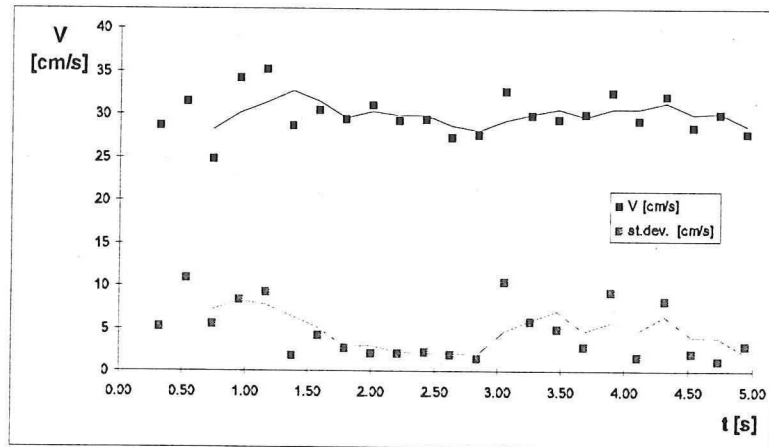
In figuur 4.13 staat de gemiddelde absolute waarde van de snelheid in het frame uitgezet als functie van de tijd vanaf $t = 0.32$ s. In deze figuur is een lichte stijging van de gemiddelde snelheid tot $t = 1.16$ s te constateren, vergelijkbaar met de toename van de snelheid bij de metingen met de CCD-camera. Tot het volledig vullen van de vorm ($t \sim 3.0$ s) blijft de gemiddelde snelheid constant met slechts kleine fluctuaties ($\sigma \sim 7\%$). Nadat het water via een afvoer de vorm verlaat nemen de snelheidsfluctuaties weer toe.

De aanwezigheid van een snelheidsgradiënt over de lijn bij zowel het intreden van de vloeistof in de gietvorm als het verlaten van het meetgebied wordt bevestigd in figuur 4.14. In deze figuur wordt de tijdsgemiddelde (u)-snelheidscomponent voor verschillende posities op een lijn uitgezet. De constatering met betrekking tot een snelheidsgradiënt over de in- en uittredelijn, die eerder gedaan werd op grond van de snelheidsvelden in figuur 4.12 wordt hier bevestigd. De figuur toont daarnaast een sterke gelijkenis met het verband dat in figuur 4.9 wordt gevonden.

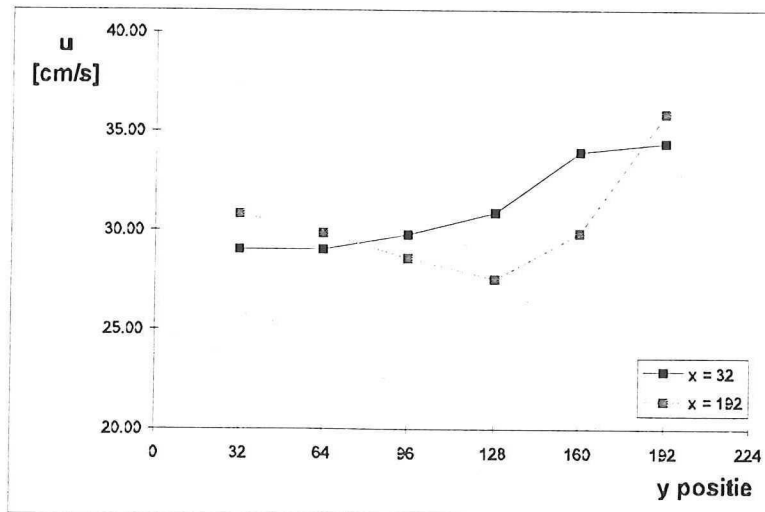
De tijdsgemiddelde waarde van de u -snelheidscomponent over de in- en uittredelijn heeft een grootte van respectievelijk $u_{in} = 31.2\text{cm/s}$ en $u_{uit} = 30.4\text{cm/s}$ met $\sigma_{in} = 3.55\text{cm/s}$ en $\sigma_{uit} = 3.40\text{cm/s}$. Ook bij deze meting blijkt de berekende snelheid hoger dan de gemiddelde snelheid die door de pomp wordt opgelegd ($u_{gem} = 19.5\text{cm/s}$).



Figuur 4.12: Het snelheidsveld vlak na de aansnijding voor PIV-metingen met fotocamera op (a) $t = 0.32$, (b) $t = 0.74$, (c) $t = 1.16$, (d) $t = 1.58$, (e) $t = 2.00$, (f) $t = 2.42$, (g) $t = 2.84$, (h) $t = 3.26$, (i) $t = 3.68$, (j) $t = 4.10$, (k) $t = 4.51$, (l) $t = 4.93$ s.



Figuur 4.13: De gemiddelde waarde van de absolute snelheid en de standaarddeviatie als functie van de tijd. Voor beide variabelen geeft de doorgetrokken lijn het moving average over drie meetpunten.



Figuur 4.14: De tijdsgemiddelde axiale snelheid op verschillende posities voor $x = 32$ en $x = 192$.

4.3 Experimenten met lage snelheid

De experimenten met lage snelheid zijn gedaan met behulp van het aansnijsysteem zoals weergegeven in figuur 3.4 (a). Het water wordt door middel van een gietbak aan het aansnijsysteem toegevoerd. In de experimenten wordt gebruik gemaakt van een uitstroomopening in de gietbak met een diameter van 4 mm en een hoogte van het vloeistofniveau van 43 mm. IJking van deze configuratie geeft een waarde voor het debiet: $\Phi = 10.8 \text{ ml/s}$ met $\sigma_\Phi = 0.3 \text{ ml/s}$. Met dit debiet is de vultijd van de vorm ongeveer acht seconden. Er is gekozen voor metingen met dit lage debiet, omdat voor een kortere vultijd een grote hoeveelheid luchtballen met de vloeistofstroming wordt meegevoerd.

Het aansnijsysteem zorgt voor een gemiddelde snelheid in de gietvorm van 9.0 cm/s . Er is gebruik gemaakt van polystyreendeeltjes met een diameter van $\sim 500 \mu\text{m}$. Voor een verplaatsing van ongeveer drie maal de deeltjesgrootte is een tijdsinterval tussen de lichpulsen vereist van niet minder dan $1/70 \text{ s}$. De stroboscoop levert bij deze frequentie een maximale lichtintensiteit. Zowel de experimenten met de CCD-camera als met fotografische film zijn verricht met een belichtingstijd van $1/15 \text{ s}$. De opname wordt zodoende vier tot vijf maal belicht. Bij het verwerken van de PIV-data is van dezelfde experimentele procedure gebruik gemaakt als bij de experimenten met hoge snelheid.

4.3.1 Metingen met behulp van de CCD-camera

Beeldacquisitie en -analyse

De experimentele opstelling voor de beeldacquisitie die in paragraaf 4.2.1 beschreven wordt, is ook van toepassing op de experimenten met lage snelheid.

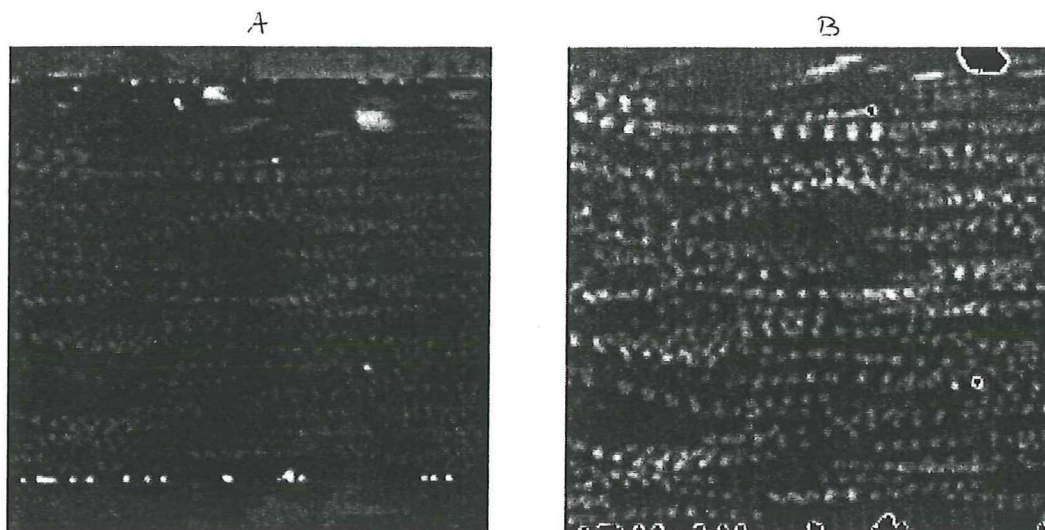
Een vijf maal belichte opname is afgebeeld in figuur 4.15 (a). De lens projecteert de gietvorm op de CCD-chip, zodat aan de onder- en bovenkant van de opname een gedeelte van de vorm wordt meegenomen. Na beeldbewerking en reductie heeft het frame een resolutie van 224 bij 192 pixels. De afmetingen van het meetgebied zijn $43.7 \times 37.5 \text{ mm}^2$. De opname, die verkregen wordt na beeldbewerking, is afgebeeld in figuur 4.15 (b).

In de originele opname bevinden zich een aantal pixels met een hoge grijswaarde. Dit zijn samengeklonte deeltjes of deeltjes die aan de wand blijven plakken. Met behulp van een drempelwaarde wordt aan deze pixels de gemiddelde grijswaarde van de opname toegekend. Dit zorgt voor een reductie van het aantal grijswaarden.

Het interrogatiegebied bestaat uit 64 bij 64 pixels. In totaal worden per frame 30 vectoren berekend. Door toepassen van de mediaantest worden vijf afwijkende vectoren vervangen ($\sim 17\%$).

Interpretatie van de PIV-data

In figuur 4.16 wordt een overzicht gegeven van berekende snelheidsvelden van $t = 0.6 \text{ s}$ tot $t = 5.47 \text{ s}$. Op grond van de berekende vectorvelden in figuur 4.16 kan het volgende opgemerkt



Figuur 4.15: (a) originele opname, (b) bewerkte opname.

worden:

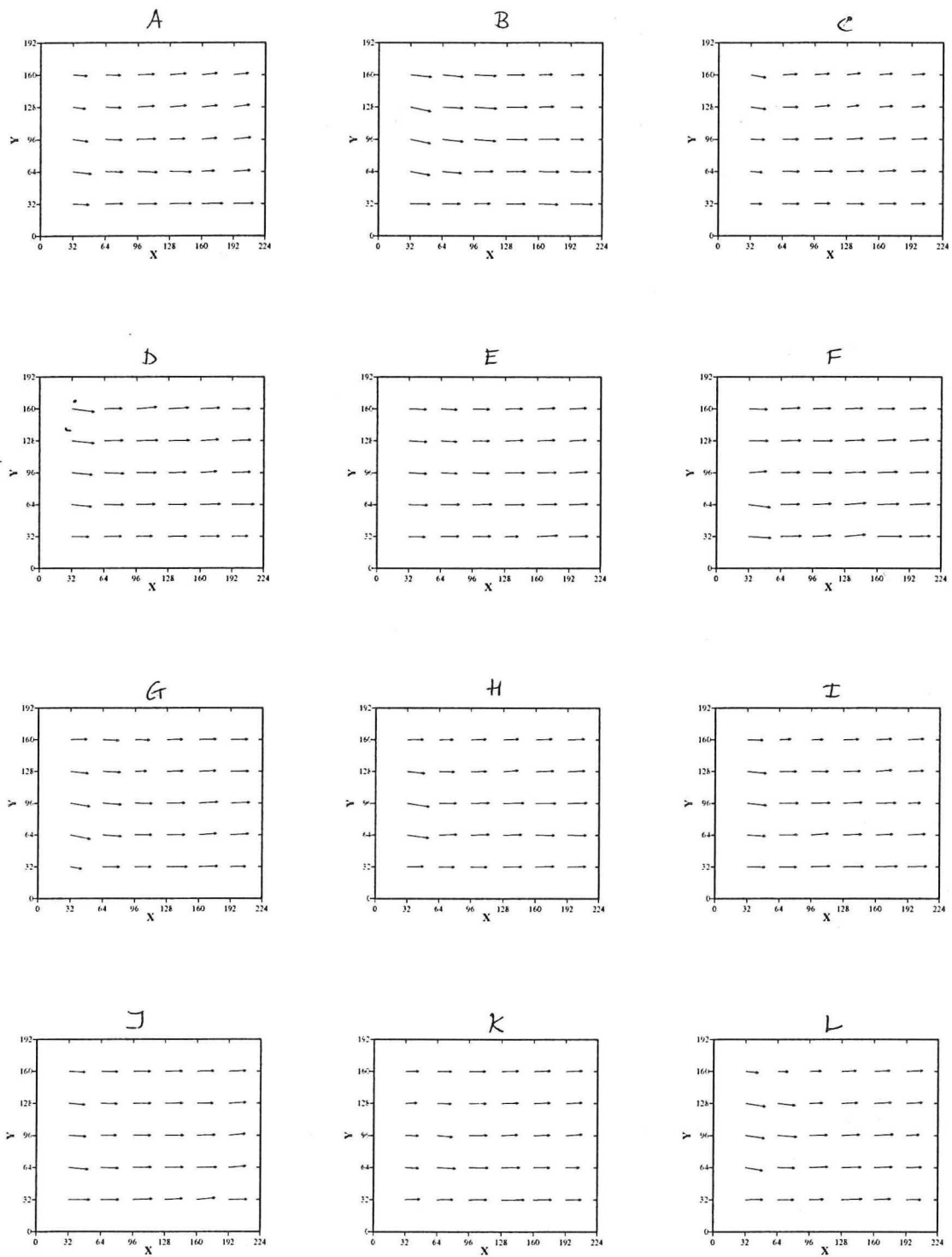
- De stroming ondervindt bij intrede in het meetgebied in de meeste vectorvelden slechts een geringe zijwaartse verplaatsing (kleine v -snelheidscomponent in vergelijking met de metingen voor hoge snelheid). De grootte van de snelheid over de intredelijn is niet uniform.
- De invloed van de aansnijding is kort na de intredelijn nauwelijks meer aanwezig. In bijna het gehele frame is alleen de u -component verantwoordelijk voor de grootte van de snelheid.
- De gemiddelde snelheid over een frame is op bepaalde tijdstippen afwijkend van het tijdstip ervoor; dit blijkt bij voorbeeld uit een vergelijking van het vectorveld op $t = 0.80s$ en $t = 1.0s$.

Met name de fluctuaties van de snelheid zijn goed zichtbaar in figuur 4.17, waar de gemiddelde snelheid over het meetgebied, V_{gem} , wordt uitgezet als functie van de tijd. De moving average curve geeft aan dat de gemiddelde snelheid rond de tijdsgemiddelde waarde van $\bar{V} = 12.4cm/s$ periodiek fluctueert met een amplitude, $\sigma_{V_{gem}} = 1.8cm/s$. Het karakter van de fluctuaties verandert niet in de tijd.

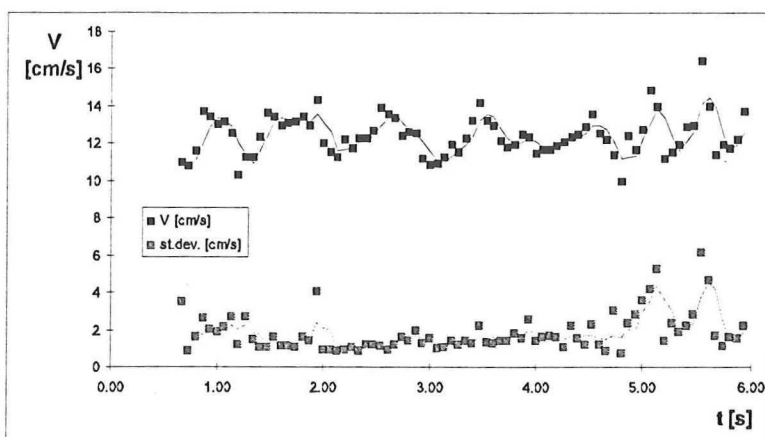
De moving average curve in figuur 4.17 wijst op een periodieke variatie van de gemiddelde snelheid — en dus het debiet — rond de tijdsgemiddelde waarde. Deze periodiciteit kan bepaald worden uit het *powerspectrum* van het tijdssignaal. Met behulp van een FFT-algoritme wordt de discrete Fourier getransformeerde bepaald van het signaal. Het powerspectrum wordt verkregen door de Fouriergetransformeerde te vermenigvuldigen met zijn complex geconjugeerde. Samengevat:

$$Y(\omega_N) = FFT[V_{gem}(t)] \quad (4.1)$$

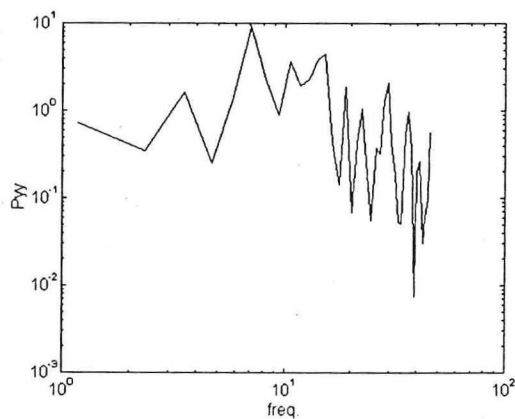
$$P_{YY}(\omega_N) = Y(\omega_N)Y^*(\omega_N) \quad (4.2)$$



Figuur 4.16: Het snelheidsveld vlak na de aansnijding voor PIV-metingen met fotocamera op (a) $t = 0.60$, (b) $t = 0.80$, (c) $t = 1.0$, (d) $t = 1.47$, (e) $t = 2.0$, (f) $t = 2.47$, (g) $t = 3.0$, (h) $t = 3.47$, (i) $t = 4.0$, (j) $t = 4.47$, (k) $t = 5.0$, (l) $t = 5.47$



Figuur 4.17: De absolute waarde van de snelheid over het hele meetgebied en de standaarddeviatie als functie van de tijd.



Figuur 4.18: Het powerspectrum van de gemiddelde snelheid over het meetgebied in de tijd. Er wordt een logaritmische schaal gebruikt.

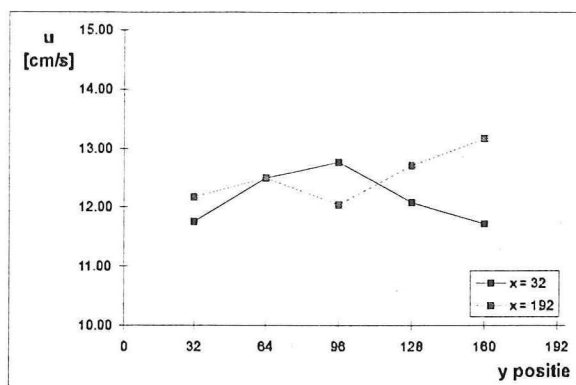
Het powerspectrum, P_{YY} , is een functie van de frequentie, ω_N , waarvoor geldt:

$$\omega_N = \frac{k\omega_S}{N} \text{ voor } k = 0, \dots, N - 1 \quad (4.3)$$

Hierin is ω_S de *sample* frequentie, waarvoor geldt: $\omega_S = 2\pi/\Delta t$. Het tijdsinterval tussen de waarnemingen heeft de waarde $1/15$ s. Het aantal waarnemingen, N , is gelijk aan 80.

In figuur 4.18 wordt het powerspectrum als functie van de frequentie ω_N uitgezet. In het powerspectrum is een piek zichtbaar voor $\omega_N = 7.0\text{s}^{-1}$. Dit komt overeen met een periode van $T = 0.90$ s. Over de herkomst van deze periodiciteit wordt in het vervolg ingegaan.

Uit de vectorvelden in figuur 4.16 werd opgemaakt dat het aansnijstelsel een kleine invloed heeft op het stromingsveld in het meetgebied, in tegenstelling tot het berekende snelheidsveld bij hoge snelheid. Dit blijkt ook uit figuur 4.19, waarin de tijdsgemiddelde snelheid wordt uitgezet voor de verschillende posities op de in- en uittredelij van het meetgebied. De snelheid op verschillende posities op de intredelij heeft een maximum rond het interrogatiegebied op het midden van de lijn ($Y = 96\text{px}$). De uittredelij vertoont een lichte fluctuatie van



Figuur 4.19: De tijdsgemiddelde snelheid op verschillende posities van het interrogatiegebied op de in- en uittredelijn van het meetgebied voor lage snelheid.

$Y = 32px$ naar $Y = 160px$ met een minimum op het midden van de lijn. Deze snelheidsverdeling vertoont een groot verschil met de profielen die voor de metingen met hoge snelheid werden gevonden.

De snelheidsvariaties blijken ook voor deze meting in met name de interrogatiegebieden hoog in het meetgebied (op $Y = 128$ en $Y = 160$) groter te zijn dan op andere posities. Uit de opnamen blijkt dat zich hier over het algemeen beduidend minder deeltjes in de vloeistof bevinden. Als gevolg hiervan worden slechte vectoren berekend. De tijdsgemiddelde u -component van de snelheid is voor de in- en uittredelijn respectievelijk 12.3cm/s en 12.5cm/s met een standaarddeviatie $\sigma_{in} = 0.53\text{cm/s}$ en $\sigma_{uit} = 0.72\text{cm/s}$.

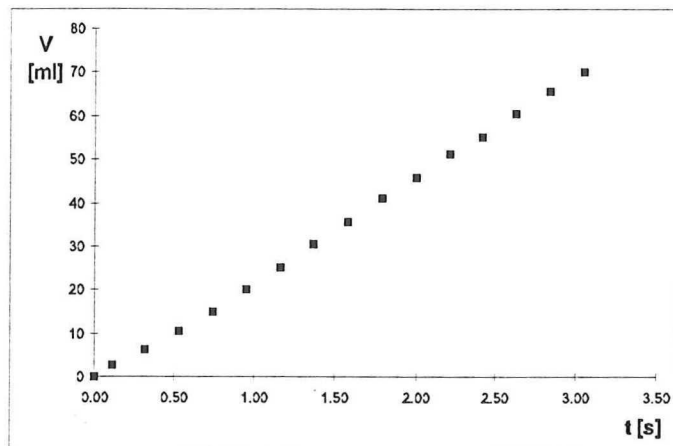
Metingen met behulp van de fotocamera

De PIV-experimenten voor het gietsysteem waarin gebruik wordt gemaakt van een fotocamera resulteerden in slechte resultaten voor de snelheidsmetingen door een groot aantal afwijkende vectoren per frame (33%).

De opnamen worden gebruikt voor de bepaling van het debiet op grond van de verplaatsing van het vrije oppervlak dat door het aansnijsysteem geleverd wordt. Uit deze berekening volgt een lagere waarde dan op grond van de calibratie van de gietbak (zie paragraaf 4.3.1) te verwachten is: $\Phi = 9.2\text{ml/s}$. De gemiddelde snelheid in de gietvorm bedraagt op grond van dit debiet 7.7cm/s .

4.4 Het snelheidsveld in de gietvorm

De invloed van de aansnijding blijft beperkt tot een relatief klein deel van de gietvorm ($40 \times 40\text{mm}^2$ in het eerste been vlak na de aansnijding). De gietvorm zal door de hoefijzerachtige vorm een sterke invloed hebben op de vloeistofstroming. Metingen met Particle Image Velocimetry geven inzicht in de invloed van de gietvorm op het snelheidsveld en de verplaatsing van het vrije oppervlak in de tijd.



Figuur 4.20: Het vullen van de gietvorm bij hoge snelheid als functie van de tijd.

De beeldacquisitie van de PIV-experimenten over de gehele gietvorm is gedaan met behulp van een fotocamera, aangezien een CCD-camera een te lage resolutie heeft om een object met dergelijke afmetingen vast te leggen. Met de inleesopstelling, zoals afgebeeld in figuur 3.7, wordt de verkregen opname in gedeelten gedigitaliseerd. Voor elk gedigitaliseerd gedeelte wordt de experimentele procedure — beeldbewerking, interrogatie en postprocessing — afzonderlijk toegepast. Na de procedure worden de gedeelten met elkaar verbonden zodat het snelheidsveld in de gehele gietvorm bepaald wordt.

Voor beide systemen zijn experimenten verricht ter bepaling van het snelheidsveld en het vrije oppervlak als functie van de tijd. Alleen de configuratie voor hoge snelheid leverde acceptabele resultaten.

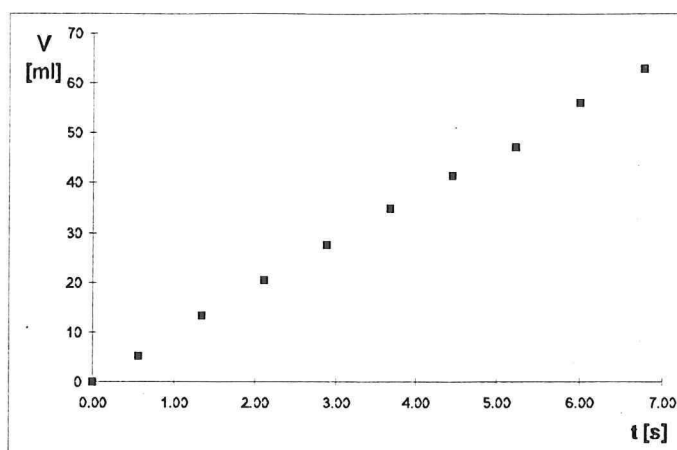
4.4.1 Het vrije oppervlak

De vorm en de verplaatsing van het vrije oppervlak in de tijd wordt bepaald door elke opname in zijn geheel in te lezen en te digitaliseren. Door de ongelijkmatige belichting van de opname bleek SCIL-Image niet in staat een eenduidige scheiding te maken tussen het met water gevulde gedeelte van de gietvorm en de achtergrond.

Bepaling van het vloeistofoppervlak in de gietvorm wordt gedaan door het vrije oppervlak op de opname in te tekenen en vervolgens in te scannen. In SCIL-Image kan het vloeistofoppervlak vervolgens voor elke opname worden berekend door het aantal pixels te bepalen dat door water bezet wordt. Met behulp van een referentieoppervlak kan het aantal pixels worden geconverteerd naar een volume-eenheid.

Door calibratie van de fotocamera wordt het tijdsinterval bepaald tussen twee opnamen. In het geval van het hoge snelheid experiment geldt voor een belichtingstijd van $1/60s$ een tijdsduur tussen twee opnamen van $0.21s$. In figuur 4.20 staat voor hoge snelheid het vloeistofvolume uitgezet als functie van de tijd. Bij het moment van intrede van de gietvorm geldt: $t = 0.0s$.

Door het bepalen van de richtingscoëfficiënt van de rechte in figuur 4.20 is het mogelijk het



Figuur 4.21: Het vullen van de gietvorm bij lage snelheid als functie van de tijd.

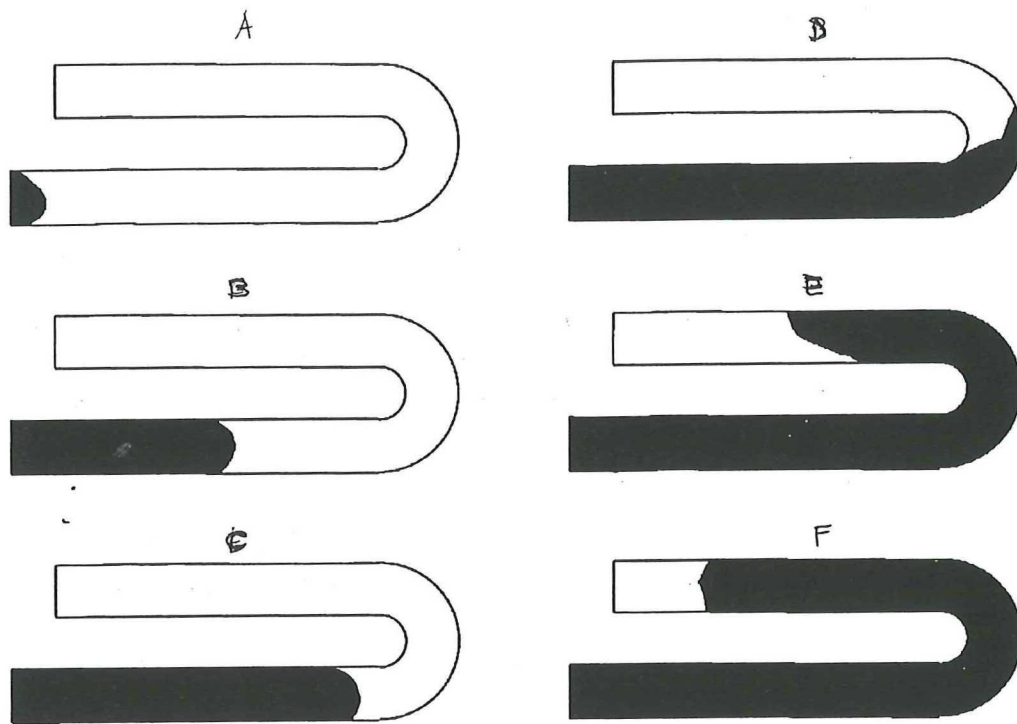
debiet te bepalen, waarmee de gietvorm gevuld wordt. Voor dit experiment geldt: $\Phi_{hoog} = 23.4 \text{ ml/s}$. Hierbij dient opgemerkt te worden dat een andere pompinstelling bij dit experiment wordt gebruikt dan van toepassing is voor het experiment met digitale registratie. Op grond van figuur 4.20 is het debiet constant in de tijd.

Het experiment voor lage snelheid maakt gebruik van een belichtingsijd van $1/15 \text{ s}$. Calibratie van de fotocamera bij deze belichtingstijd levert een tijdsduur tussen twee opnamen van 0.26 s . In figuur 4.21 staat het vloeistofvolume uitgezet als functie van de tijd. Het bepalen van de richtingscoëfficiënt van de rechte in deze figuur levert het debiet: $\Phi_{laag} = 9.22 \text{ ml/s}$.

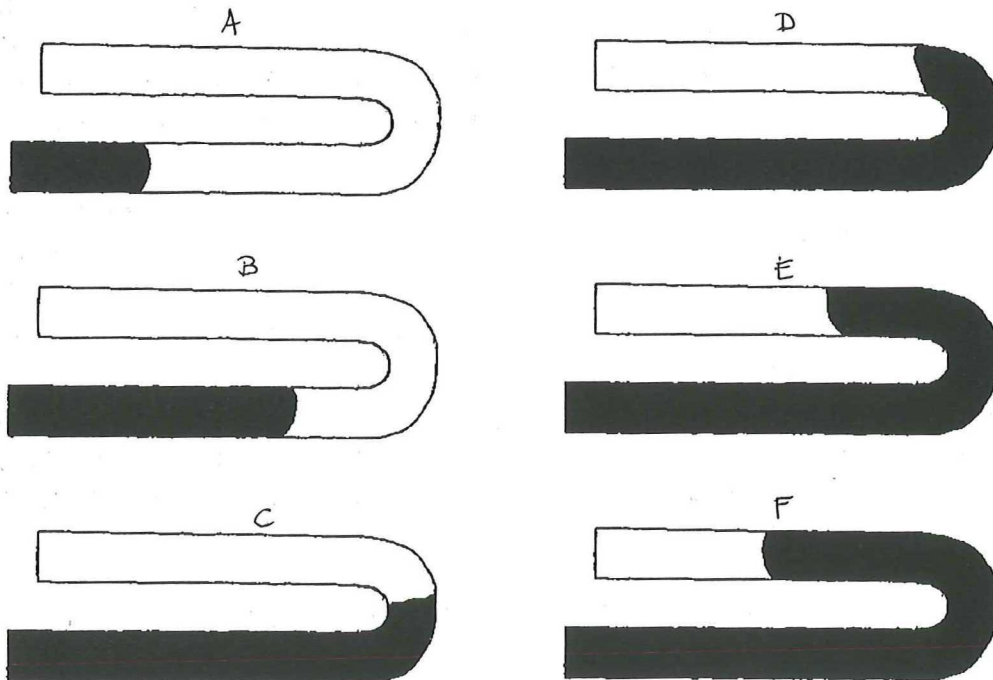
De invloed van de gietvorm op de vloeistofstroming wordt zichtbaar door het verloop van het vrije oppervlak van het water tijdens het vullen van de gietvorm. Van belang hierbij is de invloed van de aansnijding op de vloeistofstroming en de bocht in de gietvorm voor de overgang van het eerste naar het tweede been.

Voor het experiment met hoge snelheid wordt het vrije oppervlak op enkele tijdstippen weergegeven in figuur 4.22. Vanaf $t = 3.05 \text{ s}$ wordt de vloeistof uit de gietvorm verwijderd door middel van een afvoer. Voor het experiment met lage snelheid wordt het vulproces weergegeven in figuur 4.23. Naar aanleiding van de verandering van het vrije oppervlak tijdens het vulproces voor hoge snelheid (figuur 4.22) en lage snelheid (figuur 4.23) kan het volgende opgemerkt worden:

- De invloed van de aansnijding en de bocht op het vrije oppervlak is goed zichtbaar in met name het experiment voor hoge snelheid. Op $t = 0.11 \text{ s}$ volgt uit de asymmetrische vorm van het vrije oppervlak een non-uniforme verdeling van de snelheid over de breedte van de gietvorm.
- Een vergelijkbaar effect in het experiment voor hoge snelheid treedt op bij het vullen van de bocht van de gietvorm, waar een snelheidsgradiënt ontstaat met hoge snelheden aan de buitenbocht van de vorm ($t = 2.63 \text{ s}$). De invloed van de bocht is ook bij het vullen van het tweede been nog zichtbaar aan de vorm van het vrije oppervlak.
- Beide effecten zijn in mindere mate aanwezig in het experiment voor lage snelheid. De



Figuur 4.22: Het vrije oppervlak als functie van de tijd voor hoge snelheid, op (a) $t = 0.11$, (b) $t = 0.95$, (c) $t = 1.37$, (d) $t = 1.79$, (e) $t = 2.63$, (f) $t = 3.05$ s.



Figuur 4.23: Het vrije oppervlak als functie van de tijd voor lage snelheid, op (a) $t = 1.34$, (b) $t = 2.89$, (c) $t = 4.44$, (d) $t = 5.22$, (e) $t = 5.99$, (f) $t = 6.77$ s.

vloeistof vult de gietvorm gelijkmatig.

4.4.2 Het integrale snelheidsveld

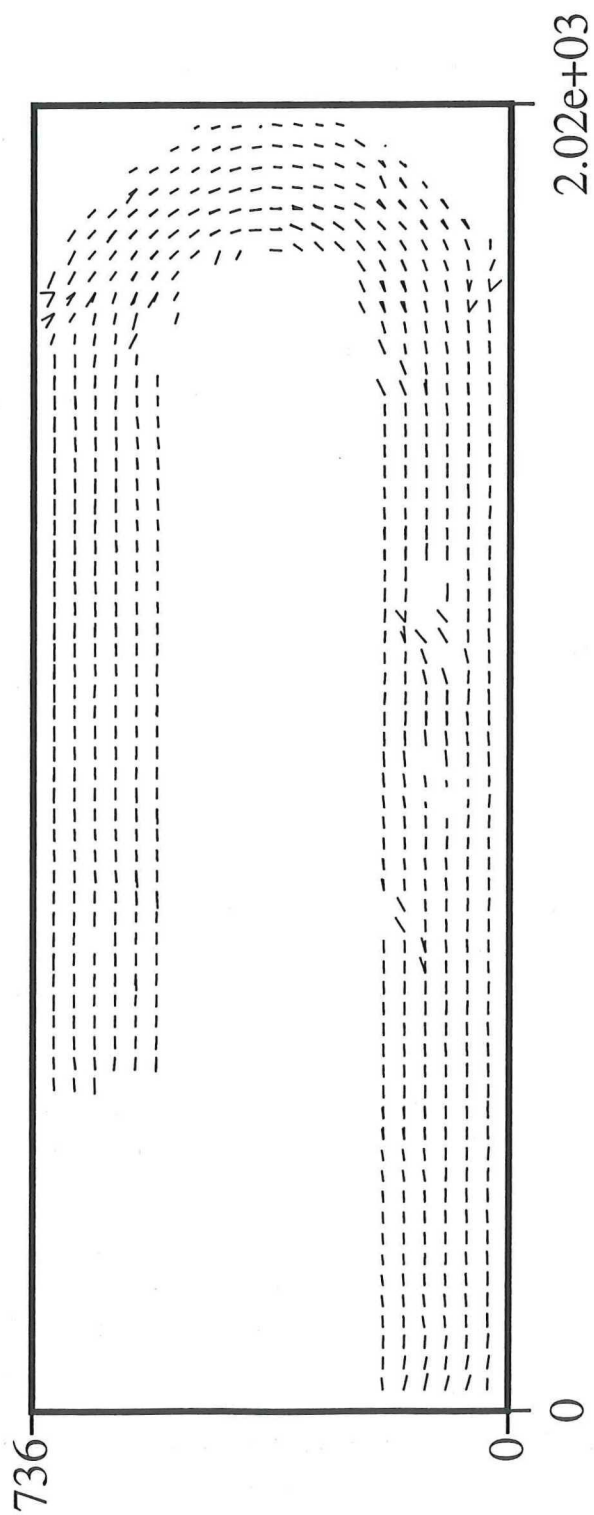
Het vullen van de gehele gietvorm met water is voor de configuratie, waarbij gebruik gemaakt wordt van een pomp vastgelegd op fotografische film. Het snelheidsveld vlak achter het aansnijsysteem is reeds behandeld in paragraaf 4.2.1. Door gebruik te maken van de inleesopstelling (zie figuur 3.7) kan de gehele opname worden gedigitaliseerd. Hiertoe wordt de opname opgedeeld in 15 delen (frames) van $40 \times 40 \text{ mm}^2$ (of 256 bij 256 pixels) in de lengterichting van de opname en in 5 delen met dezelfde afmetingen in de breedte. Bij het inlezen wordt gewerkt met een overlap van 50%. Dit betekent dat het negatief bij het digitaliseren $127px$ wordt getraverseerd in de x of y richting.

Het voordeel van deze wijze van overlap tussen de frames is het minimaliseren van het aantal slechte vectoren dat ontstaat ten gevolge van interrogatiegebieden op de grens van het frame. De oorzaak van het berekenen van slechte vectoren voor dergelijke gebieden ligt in het gebruik van de mediaantest (zie paragraaf 2.6.2). Voor dergelijke interrogatiegebieden neemt de mediaantest slechts drie of vijf burens mee, zodat een afwijkende vector niet altijd vervangen wordt door een goede vector. Het overlappen van een frame met zijn buur beperkt dit effect, doordat het interrogatiegebied in het buurframe naar het midden verplaatst. Voor dit interrogatiegebied worden nu twee vectoren berekend, waarbij de slechte vector kan worden verwijderd.

Elk gedigitaliseerd deel van het negatief wordt geïnterrogeerd met behulp van de autocorrelatiefunctie op vergelijkbare wijze als de PIV-metingen in paragraaf 4.2.2. De afmetingen van een interrogatiegebied zijn 64 bij 64 pixels, zodat voor elk frame 36 vectoren worden berekend. Met behulp van de mediaantest van [Westerweel, 1993] worden voor elk frame de afwijkende vectoren vervangen. Het aantal afwijkende vectoren dat door de mediaantest wordt gelokaliseerd blijkt sterk afhankelijk te zijn van de positie van het frame in de gietvorm. Met name voor frames in de bocht van de vorm kan het aantal afwijkende vectoren oplopen tot 30% ten gevolge van het gedeeltelijk meenemen van het circulaire grensvlak van de vorm.

De berekende vectoren worden samengevoegd tot één datafile, welke vervolgens wordt aangepast door verwijdering van vectoren die buiten de geometrie van de gietvorm vallen. In figuur 4.24 wordt het vectorveld over de gehele gietvorm weergegeven. Op dit tijdstip is de gehele gietvorm gevuld met water. Door een overloop wordt het debiet afgevoerd. Voor het converteren van de PIV-datafile naar het vectorveld, zoals afgebeeld in figuur 4.24, zijn de volgende aanpassingen verricht:

- Uit de datafile zijn de vectoren verwijderd die buiten de geometrische afmetingen van het snelheidsveld (de gietvorm) liggen. Met name in het circulaire gedeelte van de gietvorm (de bocht) wordt een relatief groot gedeelte van het originele vectorveld verwijderd. Het gebruik van rechthoekige interrogatiegebieden zorgt hier voor een relatief groot verlies aan data (tot maximaal 50% van een frame).
- Door het opleggen van een bereik voor de absolute waarde van de snelheid ($\max(\sqrt{u^2 + v^2} =$



42cm/s) worden foutieve vectoren uit het snelheidsveld verwijderd.

- Het vectorveld wordt gecorrigeerd voor de gemiddelde *richting* van het snelheidsveld. Dit is noodzakelijk door de richtingsdubbelzinnigheid van de autocorrelatiefunctie, waardoor de vectoren in het eerste en het twee been van de gietvorm in één richting worden afgebeeld.

Het snelheidsveld tijdens de continue doorstroming van de gietvorm

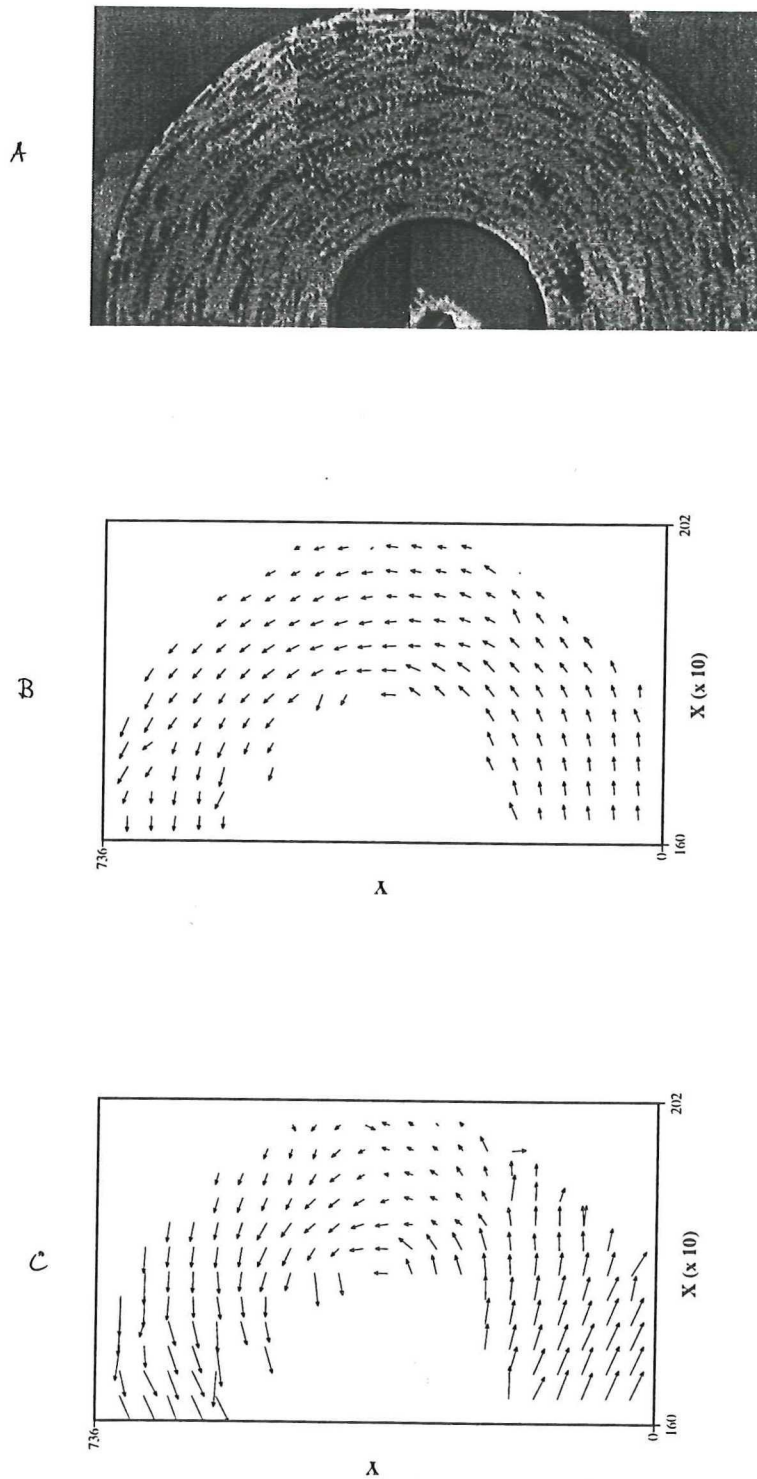
Bij beschouwing van het integrale vectorveld, zoals afgebeeld in figuur 4.24, is het moeilijk eventuele snelheidsgradiënten te lokaliseren. De invloed van het aansnijsysteem op de vloeistofstroming is behandeld in paragraaf 4.2.2. De invloed van de overgang van het eerste naar het tweede been van de gietvorm wordt zichtbaar gemaakt door dit gedeelte van het snelheidsveld uit te lichten.

In figuur 4.25 (a) wordt de bocht in de gietvorm weergegeven na contrastverbetering. Deze opname bestaat uit 10 samengestelde frames, die onderling een overlapping hebben van 50%. Het snelheidsveld is van toepassing op de stationaire toestand van het vulproces, met andere woorden de gietvorm is geheel gevuld met water. Van deze samengestelde opname wordt het corresponderende vectorveld weergegeven in figuur 4.25 (b).

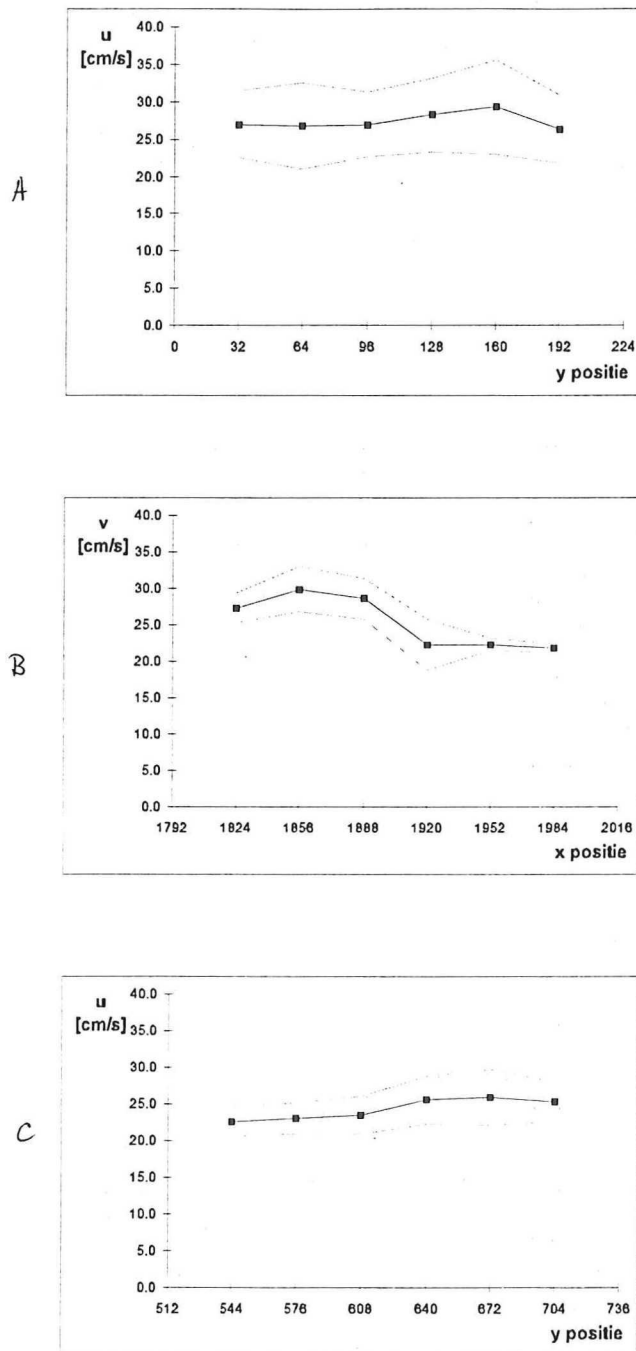
De gemiddelde waarde over het vectorveld in figuur 4.25 van V , de absolute waarde van de snelheid, en de snelheidsvariatie, σ_V , is respectievelijk 25.7cm/s en 4.6cm/s. In figuur 4.25 is deze geringe variatie ($\sim 20\%$) slecht te lokaliseren. Een manier om de snelheidsvariatie over de bocht te verduidelijken is door de gemiddelde snelheid van elke snelheidsvector af te trekken. In figuur 4.25 (c) worden deze verschilvectoren afgebeeld. De gemiddelde snelheid over de bocht heeft een waarde voor de u - en v -component van respectievelijk 0.69cm/s en 15.1cm/s.

Het snelheidsprofiel over de breedte van de gietvorm is in figuur 4.26 uitgezet als functie van de plaats van het interrogatiegebied in de vorm. De profielen die in deze figuur worden afgebeeld zijn berekend als het tijdsgemiddelde van de betreffende snelheidscomponent vanaf $t = 3.26s$. Vanaf dit tijdstip is de gehele gietvorm gevuld met water. Er is gekeken naar het snelheidsprofiel op een bepaalde x -coördinaat — het profiel van de u -snelheidscomponent over het eerste en tweede been — en in het midden van de bocht op een vaste waarde van y . Op deze drie posities zijn de berekende snelheidscomponenten ongeveer gelijk aan de absolute waarde van de snelheid, $\sqrt{u^2 + v^2}$, als gevolg van de geringe waarde van de andere component.

In figuur 4.26 (a) en (c) wordt de waarde van de u -snelheidscomponent uitgezet als functie van de positie over de breedte van respectievelijk het eerste en tweede been van de gietvorm. Er blijkt een vrij grote afwijking op te treden van de tijdsgemiddelde waarde voor de u -component met voor het eerste been zelfs fluctuaties van maximaal 20%. Voor de plaatsgemiddelde snelheid over de gehele breedte van de gietvorm in het eerste en tweede been geldt: $u_{been1} = 27.4$ cm/s met $\sigma_u = 5.12$ cm/s en $u_{been2} = 24.3$ cm/s met $\sigma_u = 2.81$ cm/s. Door de waarden van de standaarddeviatie valt het profiel dat uit figuur 4.26 (a) en (c) voor de tijdsgemiddelde waarde van u op de verschillende posities in de vorm binnen de



Figuur 4.25: (a) Samengestelde opname van de overgang van het eerste naar het tweede been, (b) corresponderende vectorveld, en (c) na aftrekken van de gemiddelde snelheid (op $t = 3.68s$).



Figuur 4.26: Het snelheidsprofiel (tijdsgemiddeld) over een lijn in de gietvorm; (a) de u -component op de lijn $X = 1056px$ (eerste been), (b) de v -component op de lijn $Y = 384px$ (midden in de bocht), (c) de u -component op de lijn $X = 1056px$ (tweede been). De onderbroken lijnen staan voor de snelheidsvariaties.

snelheidsfluctuaties.

Voor de v -snelheidscomponent in het midden van de bocht is het snelheidsprofiel afgebeeld in figuur 4.26 (b). De plaatsgemiddelde waarde voor deze snelheid heeft de volgende waarde: $v_{bocht} = 25.4\text{cm/s}$ met $\sigma_v = 2.40\text{cm/s}$. Op deze positie in de gietvorm is de verandering van de snelheid groter dan de optredende snelheidsfluctuaties van de plaatsgemiddelde waarde. Volgens figuur 4.26 neemt de snelheid af voor een toenemende waarde van de x -coördinaat, of van binnen- naar buitenbocht.

Het snelheidsveld tijdens het vulproces

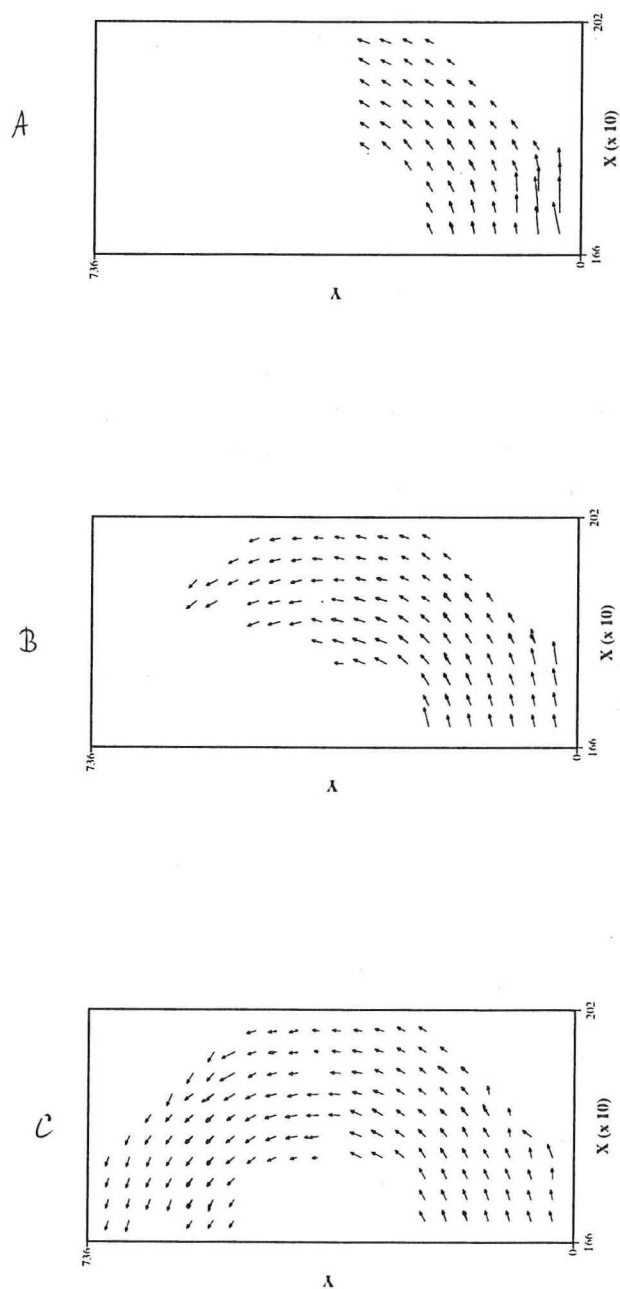
De vorm en de verplaatsing van het vrije oppervlak, zoals weergegeven in figuur 4.22, geeft inzicht in het dynamische gedeelte van het vulproces. Aanvullende informatie wordt verkregen uit het snelheidsveld op de tijdstippen dat de bocht in de gietvorm zich vult. In figuur 4.27 worden deze snelheidsvelden afgebeeld. Op $t = 1.79\text{s}$ heeft de vloeistofstroming bij het vullen van de bocht de neiging naar buiten te bewegen. Het vulgedrag van de vloeistof is goed zichtbaar uit de vorm van het vrije oppervlak (zie figuur 4.22) en de richting van het snelheidsveld (figuur 4.27). In de buitenbocht heeft de stroming een hogere snelheid. Bij het verder vullen van de vorm neemt de snelheidsverdeling het profiel aan dat ook voor de situatie met continue doorstroming geldt.

De verandering van het snelheidsprofiel als functie van het tijdstip waarop het vullen van de bocht gevorderd is, wordt bevestigd door figuur 4.28. Uit deze figuur wordt afgeleid dat bij het intreden van de bocht de hoge snelheid zich aan de buitenbocht bevindt. Dit bevestigt de vorm van het vrije oppervlak in figuur 4.22.

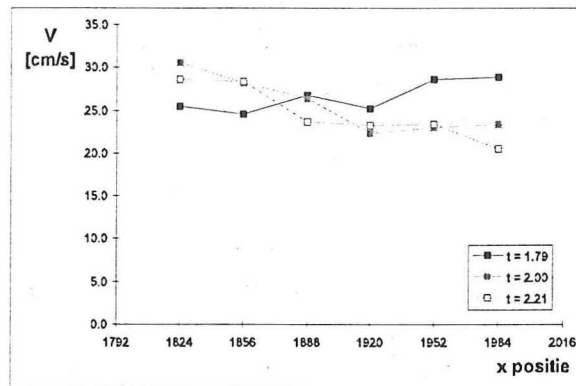
4.5 Beschouwing van de systeemp parameters

Van belang bij de interpretatie van de met Particle Image Velocimetry verkregen gegevens is de kwaliteit van het PIV-systeem. In paragraaf 2.5 zijn drie criteria gedefinieerd die gehanteerd worden ter beoordeling van het PIV-systeem dat gebruikt is in de experimenten voor dit onderzoek, te weten:

- De *ruimtelijke resolutie*. Een belangrijk aspect van het digitaliseren van PIV-opnamen is de keuze voor de pixeldichtheid, waarmee de informatieinhoud van de digitale opname wordt bepaald.
- De *betrouwbaarheid* van het PIV-systeem. Een maat voor de betrouwbaarheid van een PIV-systeem is het aantal afwijkende vectoren, dat in het berekende vectorveld aanwezig is. Begrippen als valid-data yield, Bayes kritieke waarde en signaal-ruisverhouding worden gebruikt voor het kwantificeren van de betrouwbaarheid.
- De *nauwkeurigheid* van de interrogatiemethode. De nauwkeurigheid waarmee de verplaatsing op sub-pixel niveau geschat wordt is afhankelijk van de breedte van de verplaatsingspiek in het autocorrelatiespectrum en de gebruikte schatter zelf.



Figuur 4.27: De verandering van het snelheidsveld bij het vullen van de bocht, op (a) $t = 1.79$, (b) $t = 2.00$, en (c) $t = 2.21$ s.



Figuur 4.28: Het snelheidsprofiel als functie van de tijd bij het vullen van de overgang van het eerste naar het tweede been. Uitgezet is de absolute waarde van de snelheid, V .

De experimenten die in het kader van dit onderzoek verricht zijn door middel van enerzijds directe registratie met een CCD-camera en anderzijds fotografische registratie worden aan de hand van deze criteria behandeld. De criteria worden beschouwd op grond van een aantal systeemparameters, die beschreven zijn in paragraaf 2.5 en 2.6.

4.5.1 Resolutie

Voor de experimenten waarin gebruikt wordt gemaakt van directe registratie met een CCD-camera wordt een gedeelte van de gietvorm vlak na de aansnijding met afmetingen van ongeveer $40 \times 40 \text{ mm}^2$ door het optische systeem afgebeeld op de chip van de CCD-camera. Door gebruik te maken van vergelijking 2.4 en 2.5 kan de diameter van een afgebeeld deeltje worden berekend. Met een gemiddelde diameter van een deeltje, $d_p = 500 \mu\text{m}$, een lineaire vergroting van het optische systeem, $M_0 = 0.58$, en een lensgetal $f/D_{\text{lens}} = 2$ wordt een deeltje afgebeeld in de CCD-camera met een diameter van $290 \mu\text{m}$. De minimale pixeldichtheid van de opname ligt volgens vergelijking 2.17 tussen 4.2 en 5.9 mm^{-1} . Voor de experimenten die verricht zijn met fotografische registratie wordt met een vergelijkbare lineaire vergroting van het optische systeem gewerkt. De minimale pixeldichtheid valt binnen hetzelfde interval als voor de experimenten met de CCD-camera.

In de experimenten varieert de pixeldichtheid tussen 5.5 en 6.0 mm^{-1} , zodat volgens bovenstaande afleiding de minimale pixeldichtheid wordt gehanteerd. Volgens [Westerweel, 1993] neemt de informatieinhoud van een PIV-opname niet toe bij een hogere pixeldichtheid.

4.5.2 Betrouwbaarheid

De waarschijnlijkheid dat de hoogste correlatiepiek in werkelijkheid de verplaatsingspiek is, wordt bepaald door het aantal afbeeldingen van deeltjes in een interrogatiegebied. In paragraaf 2.5.2 wordt de achtergrond van een aantal parameters besproken die een maat zijn voor de aanwezigheid van afbeeldingen in het interrogatiegebied, zoals de beeldichtheid, N_P , het *in-plane loss of pairs* effect, F_I , en het *out-of-plane loss of pairs* effect, F_O .

	N_P	$ \Delta X $ [px]	F_I	Γ
Hoge snelheid (CCD)	13	14.7	0.77	0.95
Hoge snelheid (foto)	15	10.3	0.84	0.95
Lage snelheid (CCD)	16	9.4	0.85	0.95

Tabel 4.1: Experimentele parameters ter bepaling van de valid-data yield.

	$2\sigma^2$	r_c^2	afw. vect.	σ_{SR}	$\sigma_{SR} < 1.2$
Hoge snelheid (CCD)	3.5	10.8	7	1.5	12
Hoge snelheid (foto)	0.55	2.7	6	1.9	4
Lage snelheid (CCD)	1.6	6.2	3	2.0	4

Tabel 4.2: Experimentele parameters voor het bepalen van het aantal afwijkende vectoren en de signaal-ruisverhouding.

In de experimenten is gebruik gemaakt van een stroboscoop als lichtbron, zodat voor de out-of-plane loss of pairs factor geldt: $F_O = 1$. Het aantal gepaarde afbeeldingen per interrogatiegebied, N_P , varieert per experiment van 13 – 16. De relatieve verplaatsing ten opzichte van het interrogatiegebied is in het algemeen laag ($F_I \approx 25\%$), zodat de valid-data yield ongeveer 95% is, conform de aanbevelingen van [Keane and Adrian, 1991]. Voor de drie experimenten worden deze parameters samengevat in tabel 4.1.

De waarde voor de valid-data yield is een maat voor de hoeveelheid afwijkende vectoren die zich bevinden in het meetgebied. Het detecteren van afwijkende vectoren is gedaan met behulp van de mediaantest zoals ontwikkeld door [Westerweel, 1993]. De theoretische achtergrond van deze mediaantest is behandeld in paragraaf 2.6. De mediaantest maakt gebruik van de Bayes kritieke waarde, die voor elk experiment wordt bepaald. De afwijkende vectoren worden door de mediaantest met dit criterium gelokaliseerd en vervangen door de gemiddelde waarde van de omliggende vectoren. Het aantal afwijkende vectoren varieert per experiment van gemiddeld 3 – 7.

De uitvoer van de autocorrelatieprocedure levert voor elk interrogatiegebied de signaalverhouding, σ_{SR} , volgens [Adrian, 1991]. Adrian geeft als voorwaarde voor de betrouwbaarheid van een meting: $\sigma_{SR} \leq 1.2$. In tabel 4.2 worden voor elk experiment deze parameters weergegeven.

Vergelijking van de waarden voor de parameters in tabel 4.1 en tabel 4.2 met de suggesties die door [Adrian, 1991] en citewester93 worden gedaan voor optimalisatie van een PIV-systeem (zie paragraaf 2.5) levert informatie over de betrouwbaarheid van de experimenten:

- Voor de experimenten zijn de waarde voor de beelddichtheid, N_P , en de in-plane loss of pairs factor, F_I , conform de aanbevelingen van [Adrian, 1991]. De valid-data yield, Γ , is hoog (95%).
- Het percentage afwijkende vectoren is voor de experimenten ongeveer gelijk ($\sim 16\%$), en vergeleken met de aanbevelingen van [Westerweel, 1993] vrij hoog.

De positie van de afwijkende vectoren in het meetgebied is voor elk experiment in het algemeen

	σ_V [px]	σ_V [%]	<i>gradiënt bias</i>	<i>detectie bias</i>
Hoge snelheid (CCD)	1.3	8.8	0.041	1.5
Hoge snelheid (foto)	0.51	5.0	0.016	0.59
Lage snelheid (CCD)	0.88	9.4	0.028	1.0

Tabel 4.3: De absolute en relatieve standaarddeviatie van de snelheidsvectoren, en de maximale waarde voor de gradiënt en detectie bias.

duidelijk aan te wijzen, te weten bovenin het frame en op de grens van de aansnijding met de gietvorm. De waarde voor de valid-data yield is voor de verrichte PIV-experimenten in vergelijking met het aantal afwijkende vectoren een betere maat voor de betrouwbaarheid.

4.5.3 Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de berekende verplaatsing wordt bepaald door de breedte van de verplaatsingspiek in de autocorrelatiefunctie en het bepalen van het centrum van de verplaatsingspiek. [Westerweel, 1993] stelt dat het bepalen van het piekmidden op sub-pixel niveau met behulp van een Gaussische schatter mogelijk is met een nauwkeurigheid van beter dan 1% (zie paragraaf 2.4). Piekverbreding is afkomstig van de non-uniformiteit van de verplaatsing in het interrogatiegebied door de aanwezigheid van een snelheidsgradiënt.

De standaarddeviatie van de berekende vector, σ_V , wordt berekend uit de variantie van het residu, σ^2 , die bepaald wordt met behulp van de mediaantest. Deze variantie is afkomstig van de diameter van de afbeelding van het deeltje in het beeldvlak en de aanwezigheid van een snelheidsgradiënt over het interrogatiegebied.

[Adrian, 1991] stelt als voorwaarde aan de bias: $2\sigma_V/d_I < 0.1$ en $2\sigma_V/d_e < 1$. De variantie van de meting wordt nu gelijk gesteld aan een snelheidsgradiënt om te bepalen of nog aan bovenstaande voorwaarde wordt voldaan. Met de standaarddeviatie wordt bepaald of er sprake kan zijn van een *gradiënt* en *detectie* bias. De factor $M|\Delta v|\Delta t$ in vergelijking 2.26 en 2.27 wordt gesubstitueerd door $2 \times \sigma_V$. [Adrian, 1991] stelt als voorwaarde aan beide vormen van bias: $2\sigma_V/d_I < 0.1$ en $2\sigma_V/d_e < 1$. waarden voor deze parameters worden voor de drie experimenten samengevat in tabel 4.3.

Op grond van de gegevens in tabel 4.3 kunnen de experimenten beoordeeld worden op de verkregen nauwkeurigheid. Met de meting voor de configuratie met hoge snelheid met registratie door de fotocamera wordt de hoogste nauwkeurigheid verkregen. De waarden voor de gradiënt en detectie bias voldoen in tegenstelling tot de andere experimenten aan de voorwaarde van [Adrian, 1991]. Voor het verkrijgen van een hogere relatieve nauwkeurigheid van de metingen dan 5.0% is een grotere gemiddelde verplaatsing tussen de afbeeldingen van deeltjes in een interrogatiegebied een voor de hand liggende oplossing. Dit gaat echter door een grotere loss of pairs ten koste van de betrouwbaarheid van de meting.

4.6 De systematische fout in PIV-snelheidsmetingen

Voor elk PIV-experiment wordt een discrepantie gevonden tussen de gemiddelde snelheid over de doorsnede van de gietvorm op grond van het opgelegde debiet en de PIV-metingen van het snelheidsveld. Het geconstateerde verschil treedt bij elk experiment op en is ongeveer een factor 1.5. De oorzaak van deze systematische fout wordt gezocht in het twee-dimensionale karakter van Particle Image Velocimetry.

De stroming door twee vlakke platen, die geleverd wordt door een drukgradiënt, staat bekend als Poiseuille stroming. De snelheidsverdeling over de afstand tussen de twee platen heeft een parabolisch profiel met aan de wand een snelheid gelijk aan nul en een maximale snelheid in het midden van de stroming. De maximale snelheid voor Poiseuille stroming is gelijk aan 1.5 maal de gemiddelde snelheid [Kundu, 1990].

Op grond van de conclusies in paragraaf 4.5.3 met betrekking tot de eis die gesteld wordt aan de aanwezigheid van een snelheidsgradiënt over het interrogatiegebied, kan gesteld worden dat de PIV-meting weinig invloed ondervindt van de parabolische snelheidsgradiënt over de hoogte van de gietvorm. Dit betekent dat kan worden aangenomen dat de deeltjes zich niet uniform over de hoogte van de gietvorm verdeeld hebben, maar de voorkeur hebben voor een bepaalde hoogte. De resultaten voor de PIV-experimenten suggereren dat de deeltjes zich voornamelijk in het midden van de vloeistofstroming bevinden. De snelheid die door de interrogatiemethode berekend wordt is zodoende afkomstig van de deeltjes die zich met de maximale snelheid voortbewegen.

Hoofdstuk 5

Computational Fluid Dynamics

In dit hoofdstuk worden enkele begrippen geïntroduceerd, die voor Computational Fluid Dynamics (CFD) van toepassing zijn. Er worden enkele resultaten besproken van de simulaties die voor de twee uitvoeringen van het aansnijsysteem zijn gedaan.

5.1 Inleiding

De mathematische benadering van de vloeistofdynamica is gebaseerd op het principe van behoud van massa, impuls en energie. Deze behoudswetten zijn wiskundig te beschrijven met behulp van partiële differentiaalvergelijkingen. Deze vergelijkingen worden samengesteld uit de stromingsvariabelen, zoals de snelheidscomponenten en de druk, en de afgeleiden van deze variabelen. De partiële differentiaalvergelijkingen worden met behulp van een numerieke discretisatiemethode omgezet in numerieke vergelijkingen voor ruimte en tijd [Shaw, 1992]. De afgelopen jaren zijn een groot aantal problemen op het gebied van de vloeistofdynamica tot een oplossing gebracht door gebruik te maken van zeer snelle computers, waarbij uiteenlopende oplosmethoden worden toegepast. Deze benadering van vloeistofdinamische vraagstukken staat bekend onder de term Computational Fluid Dynamics (CFD).

Door integratie van de bewegingsvergelijkingen, toegevoegde modellen voor bij voorbeeld turbulentie of warmte-uitwisseling met de wand, en numerieke oplosmethoden zijn verschillende vraagstukken in de vloeistofdynamica op te lossen. Door medewerkers van FlowScience Inc.¹ is een *general purpose computer program* ontwikkeld onder de naam FLOW-3D. Met behulp van een invoerbestand kan de gebruiker een keuze maken uit verschillende fysische modellen voor het representeren van een breed gebied van transportverschijnselen in vloeistoffen en gassen.

Bij het uitvoeren van simulaties in het kader van dit onderzoek is gebruikt gemaakt van een aantal opties en mogelijkheden die FLOW-3D biedt. In de volgende paragraaf zal een beknopte omschrijving volgen van de achtergrond van Computational Fluid Dynamics en de structuur van FLOW-3D.

¹FlowScience, Inc., P.O. Box 933, Los Alamos, New Mexico 87544, USA.

5.2 Theorie van Computational Fluid Dynamics

5.2.1 Bewegingsvergelijkingen

De vergelijkingen die aan de basis staan van Computational Fluid Dynamics hebben de vorm van partiële differentiaalvergelijkingen in de ruimte. Deze representeren de behoudswetten voor massa, impuls en energie. Aangenomen wordt dat de vloeistof incompressibel is (constante dichtheid en viscositeit).

De vorm waarin de vereenvoudigde differentiaalvergelijkingen worden geschreven is afhankelijk van de keuze voor het coördinatensysteem. FLOW-3D maakt gebruik van een Euleriaans systeem, waarbij de actuele coördinaten (x, y, z) en de tijd t als onafhankelijke variabelen worden gekozen. Voor een afhankelijke variable, f , geldt dan $f = f(x, y, z, t)$ [Hirt and Nichols, 1979].

De vergelijkingen worden in numerieke vorm berekend voor kleine gedeelten van het domein. Het opdelen van het domein gebeurt met Cartesiaanse roostercellen, die onderling verschillende afmetingen mogen hebben. Alle vergelijkingen worden beschreven met porositeitsfuncties voor oppervlak en volume. FLOW-3D maakt hiervoor gebruik van de FAVOR-methode (Fractional Area / Volume Obstacle Representations) voor het modelleren van complexe geometriën.

Continuïteitsvergelijking

De behoudswet voor massa kan voor een klein, Cartesiaans volume-element opgesteld worden als een partiële differentiaalvergelijking. Voor een vloeistof, waarbij een constante dichtheid ρ verondersteld mag worden (incompressibility condition), geldt de volgende — vereenvoudigde — continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

Hierin zijn de snelheidscomponenten (u, v, w) gericht langs de coördinaten (x, y, z) .

Navier-Stokesvergelijking

De vergelijkingen voor de vloeistofbeweging die opgelost moeten worden zijn de impulsbalansen in de drie coördinaatrichtingen (x, y, z) , die op een vergelijkbare manier worden opgesteld als de continuïteitsvergelijking.

Voor een Newtonse, incompressibele vloeistof kan voor een Cartesiaans stelsel voor elke richting een Navier-Stokesvergelijking worden opgesteld. Voor de u -richting geldt:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (5.2)$$

Voor de v - en w -richting wordt een vergelijkbare uitdrukking gebruikt. In vergelijking 5.2 zijn lichaamsversnellingen, zoals bij voorbeeld de ten gevolge van de gravitatiekracht, weergegeven

door (g_x, g_y, g_z) . Voor de dichtheid wordt het symbool ρ gebruikt en ν is de kinematische viscositeit.

5.2.2 Bepaling van het vrije oppervlak

Er zijn verschillende methoden ontwikkeld voor het benaderen van *free boundaries*. Hieronder wordt een oppervlak verstaan, waar een discontinuïteit bestaat in een of meerdere variabelen. Een van de eerste methodes werd ontwikkeld door [Harlow and Welch, 1965] en staat bekend als de *Marker and Cell (MAC)*-methode. Deze methode maakt gebruik van deeltjes die verdeeld worden over de door vloeistof bezette gebieden en met de vloeistofsnelheid op die plaats te laten bewegen. Het vrije oppervlak wordt vervolgens gedefinieerd als de grens tussen gebieden met en zonder deeltjes.

In FLOW-3D wordt gebruik gemaakt van de *Volume of Fluid (VOF)*-methode [Hirt and Nichols, 1979]. Deze methode maakt gebruik van een functie F , waarvan de waarde gelijk is aan 1 voor een cel, die volledig bezet wordt door vloeistof, en gelijk aan 0 voor lege cellen. Een cel met een F -waarde tussen 0 en 1 zal een vrij oppervlak bevatten. Het voordeel van deze methode is dat per roostercel slechts één variabele moet worden opgeslagen in tegenstelling tot de MAC-methode, die de coördinaten van de deeltjes bewaart. Dit levert een aanzienlijke geheugenefficiëntie.

De tijdsafhankelijkheid van F wordt beschreven met de volgende vergelijking:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (5.3)$$

Deze vergelijking stelt dat de fractie F met de vloeistof meebeweegt. In FLOW-3D wordt aan cellen met een F -waarde van 0 een uniforme druk toegekend. Fysisch betekent dit dat dergelijke cellen met een damp of gas gevuld zijn met een dichtheid die verwaarloosbaar is ten opzichte van de vloeistofdichtheid.

De verplaatsing en de vorm van het vrije oppervlak wordt in de VOF-methode benaderd met de *donor-acceptor flux approximation*. Voor een beschrijving van deze benadering wordt verwezen naar [Hirt and Nichols, 1979].

5.2.3 Numerieke benadering

De vergelijkingen, die in paragraaf 5.2.1 opgesteld zijn voor het dynamisch gedrag van een vloeistof, worden in FLOW-3D numeriek opgelost door gebruik te maken van benaderingen met de *eindige volumemethode*. Op de achtergrond van deze discretisatiemethode wordt verwezen naar ???. FLOW-3D doorloopt bij het genereren van een oplossing met de eindige volumemethode drie stappen voor elke discrete toename in de tijd, δt :

stap 1 Expliciete benaderingen van de Navier-Stokesvergelijking (zie vergelijking 5.2) voor de drie richtingen worden gebruikt voor het berekenen van een eerste schatting op de nieuwe tijdstap van de drie snelheidscomponenten. Het toepassen van een expliciete

methode betekent dat de initiële condities of de waarden op het vorige tijdstip als beginvoorwaarde worden gebruikt.

stap 2 De druk is semi-impliciet gekoppeld aan de snelheidscomponenten, zodat de druk voor elke cel iteratief bijgesteld moet worden om aan de continuïteitsvergelijking 5.1 te voldoen. De snelheidsveranderingen die hierdoor ontstaan worden opgeteld bij de snelheden die in stap 1 zijn uitgerekend. Voor dit iteratief proces wordt een drukalgoritme gebruikt.

stap 3 Uiteindelijk moet de waarde voor de vloeistoffractie, F , vastgelegd worden om de nieuwe vloeistofconfiguratie te bepalen.

De oplossing voor elk gewenst tijdsinterval ontstaat door het opnieuw doorlopen van de procedure. Uiteraard moet bij elke stap de opgelegde randvoorwaarde voor het rooster, de obstakels en het vrije oppervlak meegenomen worden.

5.2.4 Algorithmen voor de druk

Voor incompressibele stroming kan FLOW-3D gebruik maken van twee algorithmen voor het berekenen van de druk. De basis voor beide methoden is de continuïteitsvergelijking. Om de snelheden aan vergelijking 5.1 te laten voldoen is het noodzakelijk de druk en daarmee de snelheden in elke roostercel aan te passen. Dit vindt plaats met behulp van een iteratief proces.

De meest eenvoudige methode staat bekend onder de naam 'successive over-relaxation' of *SOR*-proces. Het celrooster wordt cel voor cel geveegd in achtereenvolgens de i , j en k -richting. Met een berekende drukverandering worden nieuwe schattingen gedaan voor de snelheden op de celwanden.

Voor een slechte *aspect ratio*, de verhouding van de maximale ten opzichte van de minimale cellengte, kan de *SOR*-methode nogal traag convergeren. FLOW-3D biedt de mogelijkheid een alternatief algoritme te hanteren, waarbij een meer impliciete oplosmethode wordt gebruikt voor de richting met kleinere roostercellen. Dit is een aangepast 'Alternating-Direction-Implicit' of *S(implified)ADI* schema. Deze optie kan worden aangeroepen door middel van de invoerfile.

Beide iteratieprocedures maken gebruik van een zogenaamde over-relaxatiefactor, Ω , die de convergentie van een iteratie kan versnellen door de uitgerekende drukverandering met een factor te vergroten. De optimale waarde voor Ω is afhankelijk van een aantal factoren, zoals het aantal roostercellen, de afmetingen ervan en de gebruikte iteratieve procedure. FLOW-3D kiest als defaultwaarde $\Omega = 1.7$.

5.2.5 Structuur van FLOW-3D

FLOW-3D bestaat uit eigenlijk uit drie onafhankelijke, in FORTRAN geschreven programma's die onderling communiceren door middel van data-files. Daarnaast is FLOW-3D voorzien van het *image display program* PLTFSI, een onafhankelijk FORTRAN programma met

grafische C-routines voor het converteren van de data-uitvoer.

De eerste stap in het aanwenden van FLOW-3D is het aanmaken van de invoerfile, `prepin.inp`. De invoer kan opgegeven worden in een aantal gespecificeerde eenheden (in de vorm van een NAMELIST) die elk een onderdeel van het probleem beschrijven. De invoerfile wordt gebruikt door de preprocessor PREP3D. De preprocessor converteert het probleem naar een geschikt formaat voor de rekeneenheid HYDR3D en de postprocessor FLSCON.

Een aantrekkelijke eigenschap van FLOW-3D is de mogelijkheid om de toestand na een bepaalde berekening weer op te pakken en te gebruiken als startpunt voor een nieuwe berekening. Tijdens de berekening schrijft HYDR3D periodiek een omschrijving van de toestand van het systeem naar de uitvoerfile `flsgrf.dat`. Een invoervariabele in `prepin.inp` bepaalt de frequentie waarmee dit gebeurt. Met een 'restart' procedure is het mogelijk de berekening vanaf een geregistreerd tijdstip te vervolgen.

5.3 Randvoorwaarden en simulatiecriteria

5.3.1 Geometrische randvoorwaarden

FLOW-3D maakt gebruik van een eindige volume rooster met variabele celafmetingen. De onderverdeling van het rooster in roostercellen wordt voor elke richting afzonderlijk ingevoerd in de invoerfile `prepin.inp`. Voor een eindig volume rooster met variabele afmetingen moet de gebruiker tenminste de positie van het einde van de geometrie en het aantal cellen invoeren voor elke richting.

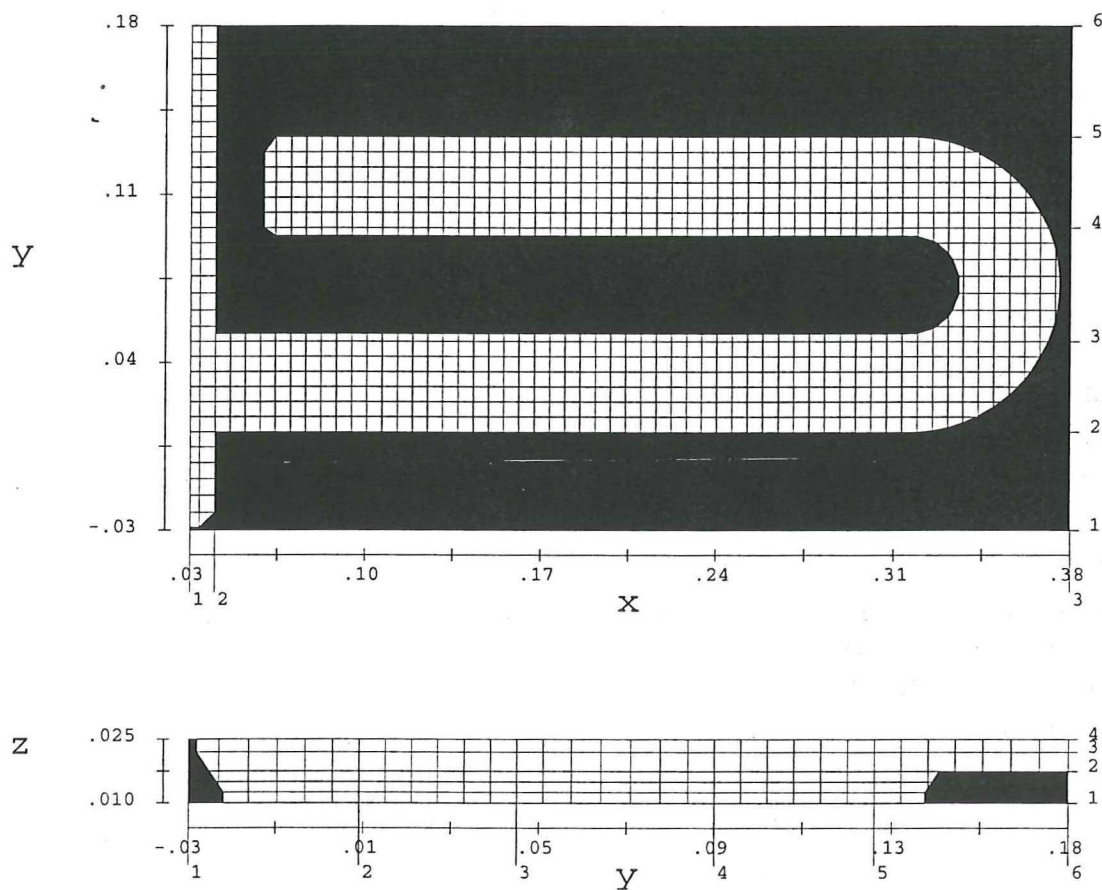
De keuze voor het aantal cellen wordt bepaald door de minimaal vereiste nauwkeurigheid die aan de stromingsparameters wordt opgelegd en heeft invloed op de rekentijd van de processor. De *aspect ratio*, de verhouding van de maximale ten opzichte van de minimale cellengte, is bepalend voor de keuze van het drukalgoritme. FLOW-3D adviseert een verhouding van maximaal 3, waarbij de SOR-methode wordt gehanteerd.

Er zijn simulaties verricht voor beide uitvoeringen van het aansnijsysteem (zie figuur 3.4).

In de simulatie met het aansnijsysteem, dat in de PIV-metingen voor de hoge snelheid gebruikt wordt, zijn de afmetingen van de roostercellen gelijk aan de helft van het interrogaatiegebied, dat in het PIV-experiment gehanteerd wordt. Over de breedte van de gietvorm (4.0mm) bevinden zich 6 gehele roostercellen en een roostercel die voor de helft wordt bezet door de wand. De posities van de celmidden zijn op deze manier gelijk aan de vectorposities in de PIV-experimenten. Gezien de afmetingen van het gietsysteem tot de hoogte van de gietholte is gekozen voor één cel over de hoogte. Meerdere cellen over de hoogte betekent een forse toename van het aantal roostercellen en rekentijd.

In figuur 5.1 wordt het rooster in de x - en y -richting afgebeeld op de hoogte van de gietvorm. De roostercellen in de gietvorm zijn $6.15 \times 6.15 \times 1.00 \text{ mm}$ groot. In totaal bestaat het rooster uit 14280 cellen; de geometrie wordt door 1059 cellen gevuld.

Aan de geometrie worden randvoorwaarden opgelegd. Ter vergelijking van de simulaties



Figuur 5.1: Het rooster voor de uitvoering met een constante snelheid over de choke in de x- en y-richting op de hoogte i van de gietvorm (a) en zijaanzicht van aansnijsysteem (b).

met de experimentele metingen met Particle Image Velocimetry wordt het debiet opgelegd dat gevonden wordt voor het experiment in paragraaf 4.2.2. Het gebruikte debiet is 23.4 ml/s , zodat voor de intreesnelheid op de choke met een oppervlakte $A_{choke} = 0.75 \text{ cm}^2$ geldt: $v = 0.312 \text{ m/s}$. Aan de cellen die de begrenzing van de geometrie bepalen wordt de no-slip randvoorwaarde opgelegd. Dit wil zeggen dat de tangentiële snelheid in deze cellen gelijk is aan nul door de wrijving aan de wand. Het vrije oppervlak wordt bepaald door de aanwezigheid van oppervlaktespanning en een contacthoek met de wand. Over de hoogte van de gietvorm wordt slechts één roostercel gedefinieerd, zodat de verwachting is, dat het vrije oppervlak alleen aan de zijwanden van de gietvorm beïnvloed wordt.

De stoffeïenschappen voor water op kamertemperatuur zijn voor de dichtheid $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, voor de viscositeit, $\mu = 1.0 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$ en voor de oppervlaktespanning, $\sigma = 0.07275 \text{ N/m}$. Voor het bepalen van de contacthoek van water met de perspex vorm wordt een randhoekmeter gebruikt (zie ook figuur 3.1.1). Dit levert een waarde $\theta \simeq 70^\circ$.

5.3.2 Convergentie en stabiliteit

Aan het drukalgoritme wordt een convergentiecriteria opgelegd, dat het beëindigen van de iteraties bepaalt. FLOW-3D berekend de toelaatbare numerieke fout als $2 \times 10^{-3} \times V/\mathcal{L}$, waar V en \mathcal{L} staan voor respectievelijk een typische snelheid en een typische lengteschaal (afmeting van de roostercel).

Aan de maximale tijdstap wordt een stabiliteitscriterium opgelegd. In dit probleem wordt de maximale tijdstap bepaald voor de aanwezigheid van oppervlaktespanning met de volgende relatie:

$$\delta t_{max} = 1/4 \sqrt{\frac{\rho}{\sigma} \frac{DSM_{i,j,k}}{DSSX_{i,j,k}}} \quad (5.4)$$

In deze vergelijking staan DSM en $DSSX$ voor:

$$\begin{aligned} DSM_{i,j,k} &= \text{MIN}(\delta x_i, \delta y_j, \delta z_k) \\ DSSX_{i,j,k} &= \text{MAX} \left[(1/\delta y_j)^2 + (1/\delta z_k)^2, (1/\delta x_i)^2 + (1/\delta z_k)^2, (1/\delta x_i)^2 + (1/\delta y_j)^2 \right] \end{aligned} \quad (5.5)$$

In vergelijking 5.4 staat (i,j,k) voor de celcoördinaten, ρ voor de dichtheid en σ voor de oppervlaktespanning. De maximale tijdstap is voor beide simulaties volgens 5.4 gelijk aan $3 \times 10^{-3} \text{ s}$. Voor de waarde van de initiële tijdstap wordt in het algemeen 10% van de maximale tijdstap genomen. Een minimale tijdstap wordt ingevoerd om convergentie te garanderen.

Een andere eis aan de tijdstap, δt , wordt gesteld door de numerieke stabiliteit. De voorwaarde die gesteld wordt, is dat de vloeistof niet verder dan één roostercel mag voortbewegen binnen een tijdstap. Deze voorwaarde wordt de Courant conditie genoemd [Harlow and Welch, 1965]. De tijdstap moet aan de volgende voorwaarde voldoen:

$$\delta t < \min \left[\frac{\delta x_i}{u}, \frac{\delta y_j}{v}, \frac{\delta z_k}{w} \right] \quad (5.6)$$

5.4 Resultaten van de simulaties

Er zijn simulaties gedaan voor de uitvoering van het aansnijsysteem met een debiet $\Phi = 23.4 \text{ ml/s}$. De invloed van verschillende parameters op het snelheidsveld vlak na de aansnijding en de bocht is onderzocht.

5.4.1 Laminair vs. turbulent

Het opgelegde debiet legt een gemiddelde snelheid over de gietvorm vast van 19.5 cm/s . Het Reynoldsgetal dat van betrekking is op de gietvorm bedraagt dan 1.1×10^3 (zie vergelijking 3.2). Het Reynoldsgetal met betrekking op de choke is zelfs hoger, te weten 2.7×10^3 . De stroming bevindt zich in het overgangsgebied van laminair naar turbulent.

Er zijn simulaties verricht voor het aansnijsysteem met constante snelheid op de choke voor laminaire stroming en een turbulente bijdrage door middel van het Mixing Length Model van Prandtl. Dit model stelt dat de viscositeit vermeerderd wordt door turbulente mengprocessen in gebieden met een hoge afschuifspanning, die aanwezig zijn bij aan de wand van de gietvorm. FLOW-3D geeft voor de lengteschaal van een turbulente eddy een waarde gelijk aan 10% van de afmetingen van de kleinste rooster cel. Het effect van de turbulente lengteschaal wordt onderzocht door een simulatie te doen met een lengteschaal van 1.0 mm .

In figuur 5.2 wordt het snelheidsveld en het vrije oppervlak op twee karakteristieke posities — vlak na de aansnijding en bij het intreden van de bocht — in de gietvorm vergeleken voor de drie simulaties.

De simulatie voor laminaire stroming vertoont een vrij oppervlak dat sterk afwijkt van de verwachting. Dit is het gevolg van het ongelijkmatig vullen van het gietsysteem, voordat de aansnijding wordt bereikt. Bij het binnenkomen van de bocht is het verschil in de vorm en de verplaatsing van het vrije oppervlak nauwelijks meer te onderscheiden.

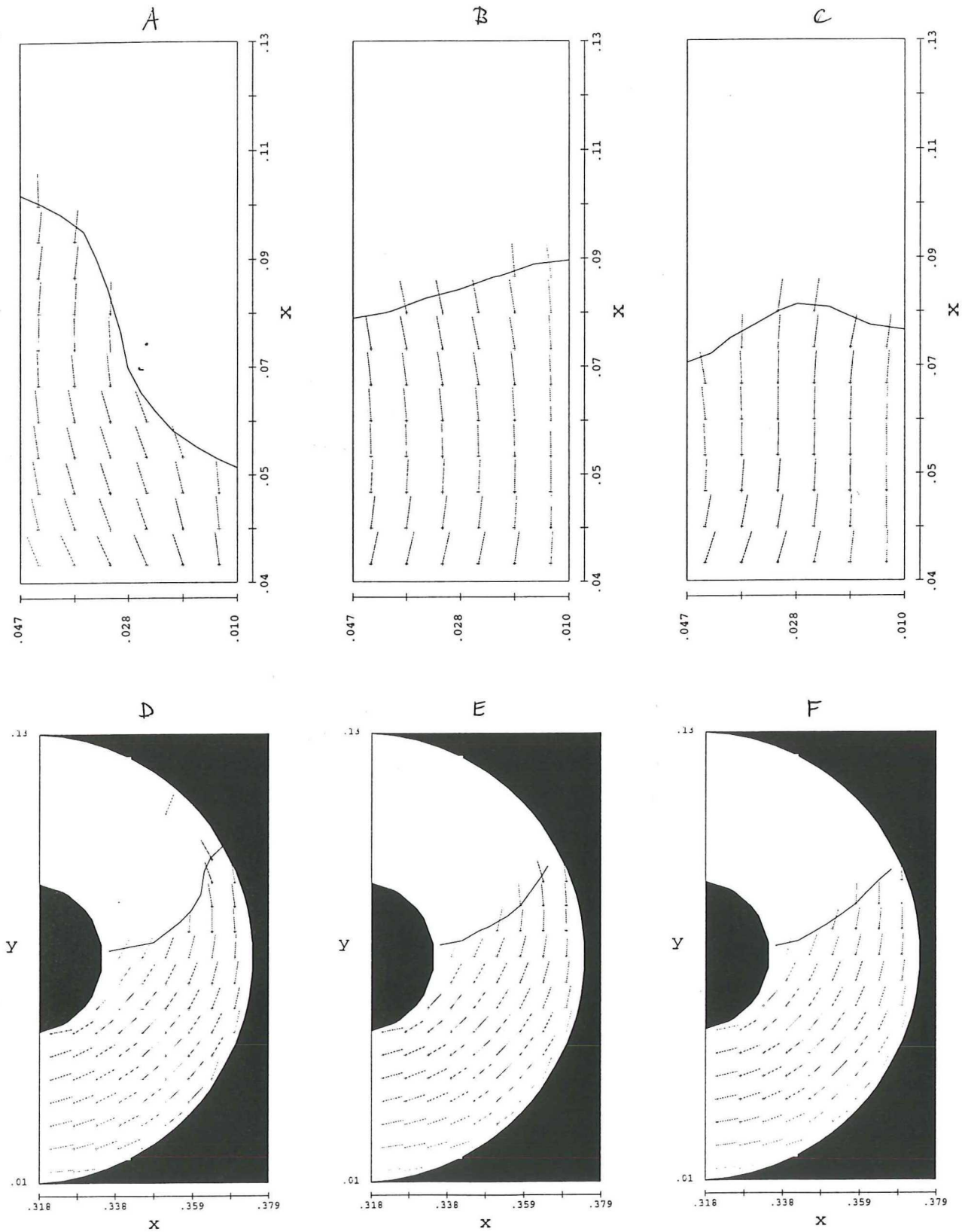
Er kan duidelijkere informatie worden verkregen uit de snelheidsprofielen op posities in het eerste en tweede been en het midden van de bocht. In figuur 5.3 worden deze profielen uitgezet voor de drie simulaties. Het effect van het turbulentiemodel is in deze figuur goed te herkennen door de lagere snelheden die berekend worden voor de rooster cellen aan de wand. Vergelijking van de twee simulaties met turbulentie laat zien, dat de maximale snelheid voor een grotere turbulente lengteschaal groter wordt en naar het midden van het snelheidsprofiel schuift.

In hoofdstuk 6 worden de snelheidsprofielen vergeleken met de experimentele waarnemingen.

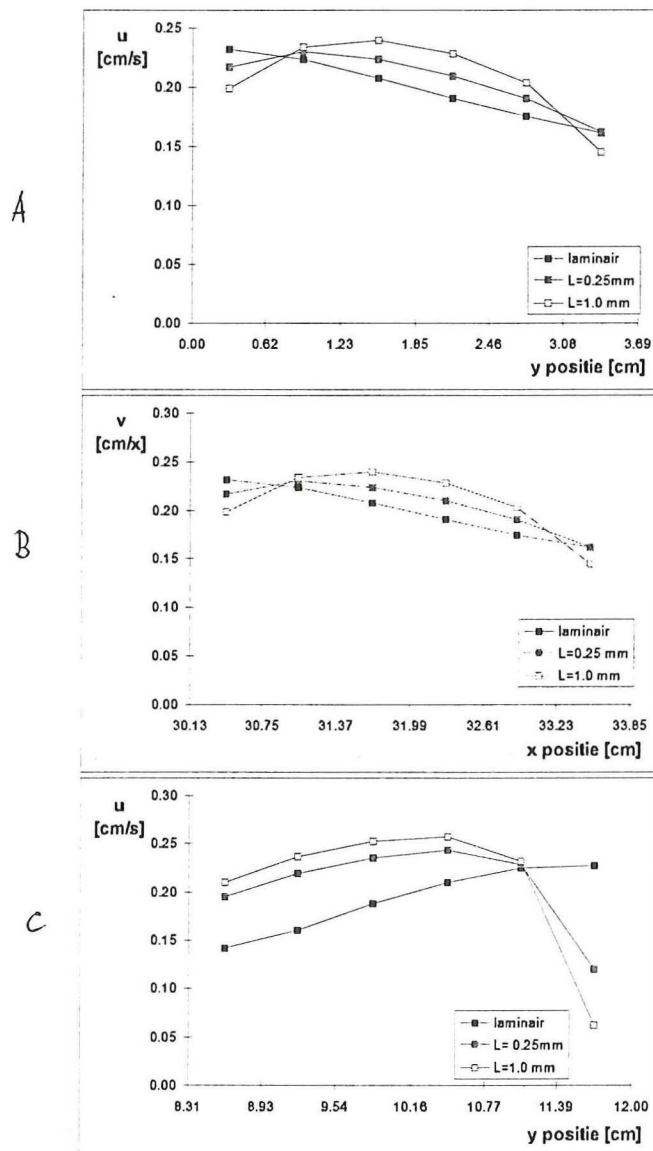
Oppervlaktespanning en contacthoek

Bij het numeriek simuleren van de stroming zullen de oppervlaktespanning en de contacthoek waarschijnlijk slechts invloed uitoefenen bij de zijwand van de gietvorm. Dit blijkt ook uit simulaties waarin deze waarden aangepast worden.

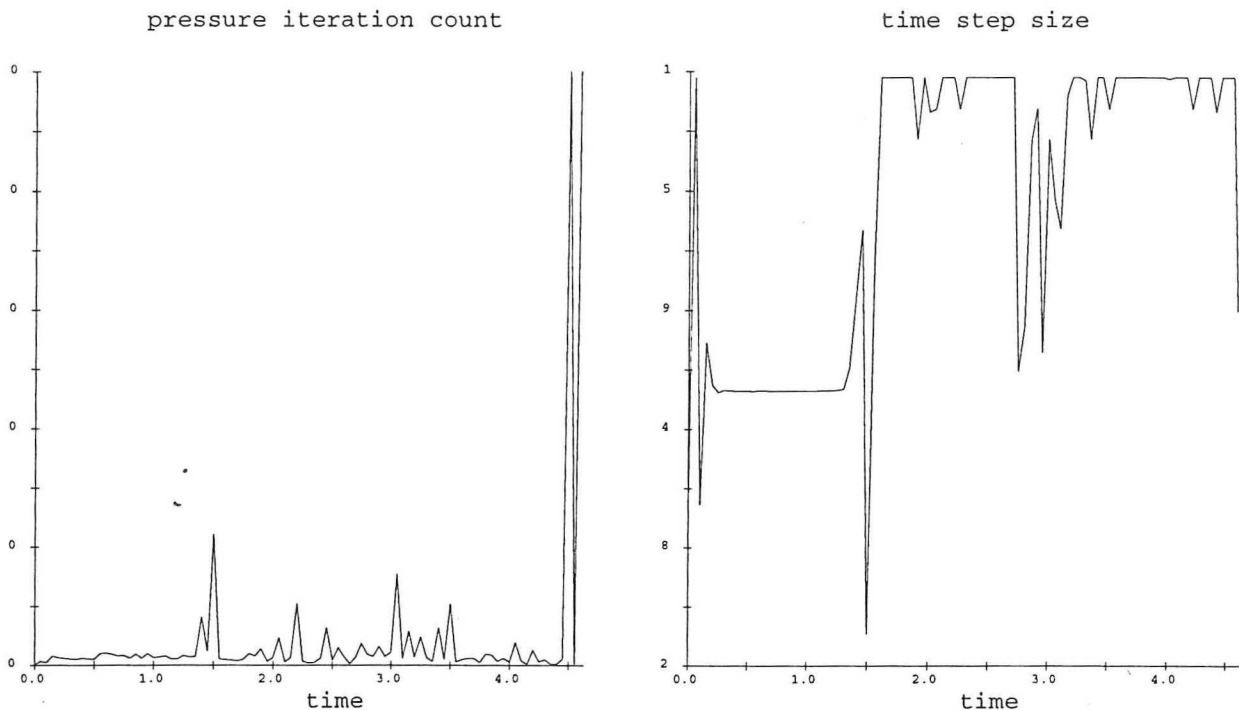
Van belang bij de vergelijking van de simulaties voor water en de stromingsexperimenten met



Figuur 5.2: Snelheidsveld en vrije oppervlak op $t = 1.4$ en $t = 3.0$ s voor simulatie (a) en (d) zonder turbulentiemodel, (b) en (e) Prandtl lengteschaal van $2.5 \cdot 10^{-4}$ m, (c) en (f) Prandtl lengteschaal van $1.0 \cdot 10^{-3}$ m.



Figuur 5.3: Snelheidsprofiel voor simulaties op $t = 4.2s$ voor (a) eerste been op $x = 21.0cm$, (b) midden van de bocht op $y = 7.0cm$, en (c) tweede been op $x = 21.0cm$.



Figuur 5.4: Het aantal drukiteraties (a) en de tijdstap (b) tijdens de simulatie.

vloeibaar metaal is de invloed van de contacthoek op het snelheidsveld. Er zijn simulaties gedaan met waarden van 60, 70, 80, en 140° voor de contacthoek.

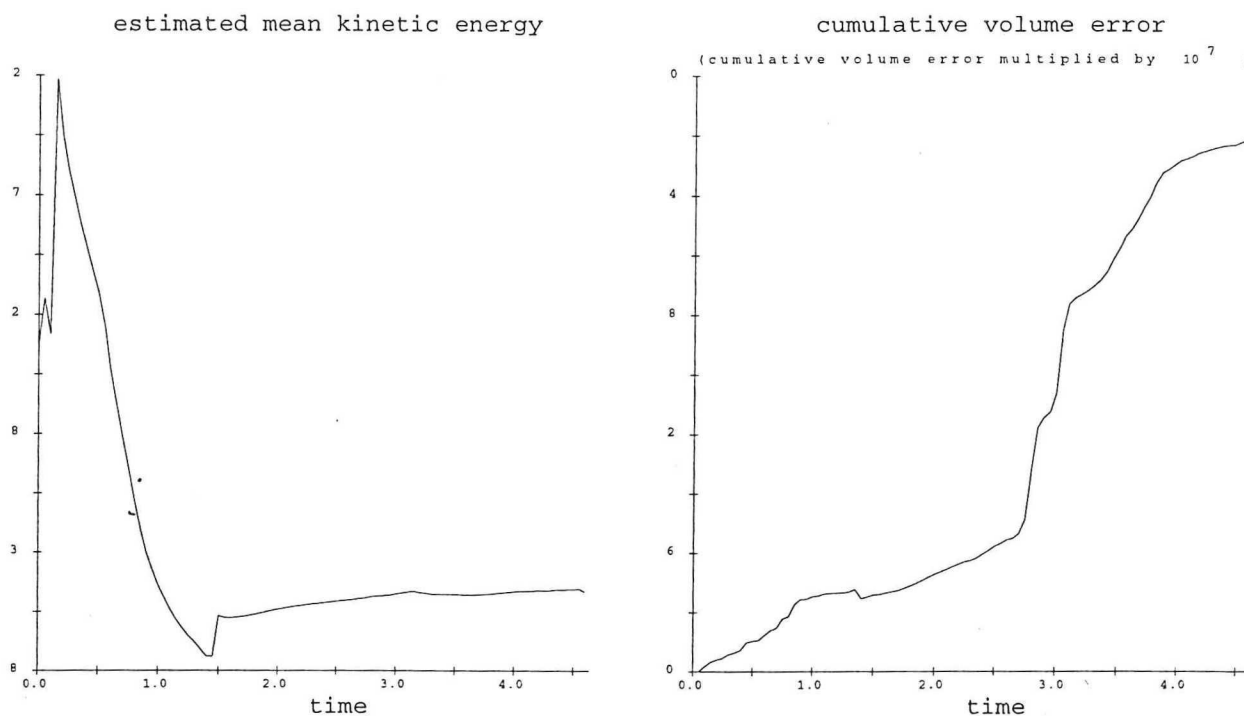
Een contacthoek met waarde 60° betekent volgens vergelijking ?? dat de hoogte van het water kleiner is dan de hoogte van de gietvorm. De waarde 140° is van toepassing op vloeibaar aluminium. Uit de simulaties volgt dat de invloed van de oppervlaktespanning en de contacthoek op het snelheidsveld beperkt is. De snelheidsprofielen over de gietvorm voor posities die zich enkele centimeters achter het vrije oppervlak bevinden zijn voor alle simulaties gelijk.

Andere aspecten

De simulatie met oppervlaktespanning en een contacthoek van 70° convergeert snel (~ 24 minuten CPU-tijd). Het aantal iteraties is gemiddeld 15. De tijdstap is tijdens de berekening gemiddeld iets lager dan de maximale tijdstap volgens vergelijking 5.4. Voor de gehele berekening worden het aantal iteraties en de tijdstap gegeven in figuur 5.4 (a) en (b).

Voor $t \sim 1.5s$ wordt een kleine tijdstap gebruikt met het gevolg dat een maximum ontstaat in het aantal iteraties. De vloeistofstroming ondervindt op dit moment een sterke verandering doordat het aansnijstelsel geheel gevuld is met vloeistof en in de gietvorm gedrukt wordt. Een tweede reductie van de tijdstap treedt op bij het vullen van de bocht van de gietvorm bij $t \sim 3.0s$.

De invloed van de overgang van aansnijding naar gietvorm en de overgang van het eerste



Figuur 5.5: De gemiddelde kinetische energie van de vloeistof als functie van de vultijd (a) en de cumulatieve volumefout door het gebruik van de VOF-methode (b).

naar het tweede been op de vloeistofstroming blijkt ook uit figuur 5.5(a), waar de gemiddelde kinetische energie van het systeem wordt uitgezet als functie van de vultijd. Er zijn een tweetal maxima te localiseren in deze figuur (op $t = 1.25s$ en $t = 1.5s$), die het gevolg zijn van de werking van de choke in het aansnijsysteem en de overgang van het aansnijsysteem naar de gietvorm. Het aansnijsysteem heeft een grotere doorsnede dan de choke, zodat de gemiddelde snelheid van de vloeistof afneemt. Bij de overgang van aansnijsysteem naar gietvorm treedt een vernauwing op door de kleinere doorsnede van de gietvorm. Dit verklaart de toename van de kinetische energie vanaf $t = 1.5s$.

De Volume of Fluid methode introduceert een fout doordat aan sommige roostercellen hogere waarden van de F -waarde worden toegekend (zie paragraaf 5.2.2) dan 1, wat gecorrigeerd wordt door veranderingen aan te brengen in het vloeistofvolume. In figuur 5.5 (b) wordt deze fout cumulatief uitgezet voor de duur van het vulproces. De fout heeft een waarde van $0.18cm^3$, zodat de relatieve fout ten opzichte van het vloeistofvolume voor een geheel gevulde vorm 0.2% bedraagt.

Hoofdstuk 6

Vergelijking experimentele en numerieke simulaties

6.1 Inleiding

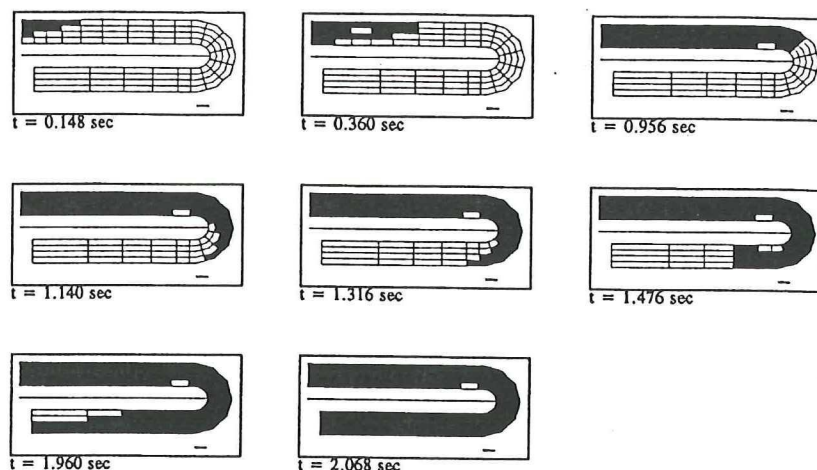
De experimentele resultaten die verkregen zijn met Particle Image Velocimetry worden gebruikt voor de validatie van de numerieke berekeningen met FLOW-3D. Aangezien de numerieke simulaties gebruik maken van theoretische modellen voor de beschrijving van de vloeistofstroming is het mogelijk het experimenteel verkregen snelheidsveld theoretisch te verklaren.

Het vergelijken van de experimentele data met de resultaten van stromingsexperimenten met vloeibaar metaal is alleen mogelijk op grond van de vorm en de verplaatsing van het vrije oppervlak. De mate van overeenkomst geeft aan of het berekende snelheidsveld voor het vullen van de gietvorm met *water* tevens van toepassing is op het snelheidsveld van vloeibaar *aluminium* in de praktische situatie.

Op de vergelijking tussen numerieke en experimentele snelheidsvelden en de overeenkomst tussen het vrije oppervlak in het experimentele gietmodel en de gietvorm voor vloeibaar aluminium wordt in de volgende paragrafen nader ingegaan.

6.2 Experimenten met PIV en simulaties met FLOW-3D

Een goede vergelijking tussen het snelheidsveld dat gemeten wordt in de experimenten met Particle Image Velocimetry en de simulaties met FLOW-3D berust op vergelijking van de snelheidsprofielen. In figuur 4.26 wordt het snelheidsprofiel voor het eerste en tweede been en de bocht uitgezet voor de metingen met PIV. Het snelheidsprofiel dat in de bocht wordt gevonden voor PIV vertoont een maximum iets van de binnenbocht afgelegen. Dit vergelijkbare profiel wordt gevonden voor de simulaties met een turbulente lengteschaal van 0.25mm (zie figuur 5.3). Dit suggereert dat er waarschijnlijk sprake is van een turbulente grenslaag aan de wand van de gietvorm.



Figuur 6.1: De vorm en verplaatsing van het vrije oppervlak van vloeibaar aluminium. Bepaling met behulp van contactpunten in de wand van de gietvorm (onderaanzicht) [Van Tol, 1994].

Uit de profielen die met PIV gevonden worden over de breedte van de gietvorm in het eerste en tweede been is geen duidelijk maximum te ontdekken, in tegenstelling tot de profielen bij de simulaties. De lage snelheidswaarden voor de roosterzellen aan de wand, die in de simulaties gevonden worden, worden niet bevestigd door de PIV-metingen, omdat deze buiten het meetgebied van de meeste PIV-experimenten vallen.

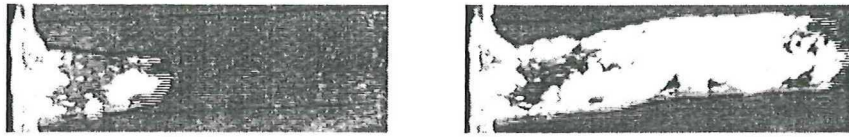
6.3 Stromingsexperimenten met water en vloeibaar metaal

De vorm en de verplaatsing van het vrije oppervlak tijdens het vulproces voor de PIV-metingen wordt in figuur 4.22 weergegeven voor twee verschillende soorten aansnijsystemen en instellingen van het debiet. In 4 werd opgemerkt dat de aanwezigheid van snelheidsfluctuaties van invloed is op de vorm van het vrije oppervlak. Het experiment met een hoog debiet komt op grond van de vultijd beter overeen met de stromingsexperimenten voor vloeibaar metaal.

Op het Laboratorium voor Materiaalkunde wordt met twee verschillende technieken het vrije oppervlak gevolgd. Met behulp van contactpunten in de gietvorm kan de aanwezigheid van metaal tijdens het vulproces op posities in de vorm worden bepaald. De resultaten van een meting met deze techniek wordt weergegeven in figuur 6.1. De giettemperatuur van het vloeibare aluminium is gelijk aan 700° . Het aansnijsysteem komt overeen met het systeem dat afgebeeld wordt in figuur 3.4.

De invloed van het aansnijsysteem en de overgang van het eerste naar het tweede been op de vorm van het vrije oppervlak is met behulp van deze techniek goed zichtbaar.

In een andere techniek wordt gebruik gemaakt van een videocamera voor het registreren van het vrije oppervlak. Daartoe wordt de bovenkant van de gietvorm doorzichtig gemaakt door



Figuur 6.2: Het vrije oppervlak voor twee tijdstippen bij het vullen van het eerste been van de gietvorm. Het eerste been wordt uitvergroot weergegeven [Van Tol, 1994].

afdekking met glas. In figuur 6.2 wordt het vrije oppervlak in het eerste been van de gietvorm op twee tijdstippen weergegeven.

De vorm van het vrije oppervlak is met deze techniek gedetailleerder te volgen dan door meting met contactpunten. Het vrije oppervlak zoals afgebeeld in figuur 6.2 (a) wordt sterk bepaald door de aansnijding. Het hoge debiet van de metaalstroming zorgt ervoor dat de vloeistof niet uniform de gietvorm binnenkomt. Tijdens het vulproces blijkt de holte die bovenin het eerste been vlak na de aansnijding ontstaat vanuit het been na verloop van tijd te worden opgevuld en *niet* direct vanuit het aansnijssysteem. Dit verschijnsel is tevens zichtbaar bij de PIV-metingen met een hoog debiet. In figuur 4.2 (a) ontstaan luchtbellen bovenin de vorm die het gevolg zijn van het non-uniforme snelheidsveld. In de PIV-experimenten heeft de aanwezigheid van luchtbellen in het meetgebied afwijkende vectoren tot gevolg.

Zowel de stromingsexperimenten met de contactpunten als met de videocamera wijzen op een maximum in het snelheidsveld over de breedte van de gietvorm. Voor hoge snelheid wordt dit bevestigd door de experimenten met Particle Image Velocimetry.

Hoofdstuk 7

Conclusies

7.1 Conclusies

Voor de kwantitatieve bepaling van het snelheidsveld in een horizontaal, dunwandig gietstuk met een hoefijzervorm tijdens het gietproces wordt in dit onderzoek gebruik gemaakt van de visualisatietechniek Particle Image Velocimetry en van computersimulaties met behulp van het CFD-pakket FLOW-3D.

De PIV-metingen voor vultijden van 2.1 – 8.8s hebben een hoge betrouwbaarheid en voldoen aan de criteria voor optimale parameterinstellingen die door Keane & Adrian (1991) worden gesuggereerd. De hoogste nauwkeurigheid wordt verkregen door registratie van het snelheidsveld met de fotocamera (relatieve fout van 5%).

De mediaantest van Westerweel (1993) is effectiever in het detecteren van afwijkende vectoren dan het criterium voor de signaal-ruisverhouding van Keane & Adrian (1991).

De berekende snelheden zijn een factor 1.5 hoger dan op grond van het debiet verwacht wordt. Dit komt overeen met de maximale snelheid van de vloeistof over de hoogte van de gietvorm.

De overgang van het aansnijsysteem naar de gietvorm heeft een relatief snelheidsverschil over de breedte van de gietvorm tot gevolg van maximaal 20%. Bij de overgang van het eerste naar het tweede been van de gietvorm zorgt de U-bocht voor snelheidsfluctuaties van maximaal 25%. De aanwezigheid van deze fluctuaties wordt bevestigd door de vorm en de verplaatsing van het vrije oppervlak tijdens het gietproces.

Het toepassen van het Mixing Length Model van Prandtl is een verbetering van de beschrijving van de vloeistofstroming in de gietvorm ten opzichte van de laminaire simulaties. De simulaties vertonen een kwantitatieve overeenkomst met de experimentele resultaten op grond van het snelheidsprofiel over de breedte van de vorm en de vorm en verplaatsing van het vrije oppervlak.

De resultaten die in dit onderzoek verkregen zijn met Particle Image Velocimetry en Computational Fluid Dynamics verschaffen inzicht in de aanwezigheid van snelheidsfluctuaties in de gietvorm en bieden aanvullende informatie met betrekking tot het gietgedrag van vloeibare

metalen.

7.2 Aanbevelingen

Op grond van de resultaten van dit onderzoek kan verder onderzoek op de volgende terreinen liggen:

- Het snelheidsveld gekoppeld met het stollingsgedrag van vloeibaar aluminium. In dit onderzoek zijn geen mogelijkheden ontwikkeld om experimenten uit te voeren met Particle Image Velocimetry, waarin op een bepaalde manier het stollen tijdens het gieten wordt meegenomen.
- Onderzoek naar de aanwezigheid van een turbulente grenslaag aan de wand van de gietvorm met zeer kleine deeltjes. Door onder andere [Westerweel, 1993] zijn metingen verricht in turbulente grenslagen met deeltjes tot $10\mu m$.
- Optimalisering van het gietsysteem. Echter, de snelheidsvariaties over de aansnijding zijn vrij gering, zodat op deze plaats vermoedelijk geen stolling zal optreden.

Bibliografie

Adrian, R., 1988, Double exposure, multiple-field particle image velocimetry for turbulent probability density: *Optics and lasers in engineering*.

Adrian, R., 1991, Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics: *Annu. Rev. Fluid Mech.*

Coupland, J., and Pickering, C., 1988, Particle Image Velocimetry: estimation of measurement confidence at low seeding densities: *Optics and lasers in engineering*.

Harlow, F., and Welch, J., 1965, Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface: *The Physics of fluids*.

Hiemenz, P., 1986, *Principles of colloid and surface chemistry*: Marcel Dekker, Inc.

Hirt, C., and Nichols, B., 1979, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries: *Journal of Computational Physics*.

Keane, R., and Adrian, R., 1990, Optimization of particle image velocimeters. Part I: double pulsed systems: *Meas. Sci. Technol.*

Keane, R., and Adrian, R., 1991, Optimization of particle image velocimeters. Part II: multiple pulsed systems: *Meas. Sci. Technol.*

Keane, R., and Adrian, R., 1993, Theory and simulation of Particle Image Velocimetry: *Laser anemometry advances and applications*.

Kundu, P., 1990, *Fluid Mechanics*: Academic Press, Inc.

Nieswaag, H., Deen, H., and van Tol, R., 1991, Stromingsexperimenten aan dunwandige gietstukken: *Gietwerk Perspectief*.

Priestley, M., 1975, *Spectral analysis and time series*: Academic, San Diego.

Shaw, C., 1992, *Using Computational Fluid Dynamics*: Prentice Hall.

Steward, E., 1983, *Fourier optics - an introduction*: John Wiley & Sons.

van Balen, R., 1994, *SCIL-Image Version 1.2 Reference manual*: Technische Physische Dienst, TNO-TU Delft.

van Tol, R., 1995, Mouldfilling in a horizontal, thin casting (unpublished): Ph.D. thesis, Delft University of Technology.

Westerweel, J., 1993, Digital Particle Image Velocimetry - Theory and Application: Ph.D. thesis, Delft University of Technology.

Symbolenlijst

Particle Image Velocimetry

Symbol	Verklaring
C	deeltjesconcentratie
d_e	diameter van deeltjes in beeldvlak
d_I	beeldafstand
d_O	voorwerpsafstand
d_s	point response function (Airy diameter)
D_{lens}	diameter van de lens
f	brandpuntsafstand van de lens
F_I	in-plane loss of pairs fractie
F_O	out-of-plane loss of pairs fractie
(i, j)	coördinaten in interrogatiegebied
\bar{I}	gemiddelde intensiteit
$I_{i,j}$	intensiteit van pixel op (i,j)
(m, n)	positie van verplaatsingspiek in gehele pixeleenheden
M	lineaire vergroting van de lens
N	diameter van interrogatiegebied
N_I	beelddichtheid
N_S	deeltjesdichtheid
(r_D, s_D)	verplaatsing in interrogatiegebied
$r_{i,j}^2$	residuvectoren in mediaantest
r_m^2	residu in klasse m
$R_C[r, s]$	gemiddelde correlatie van de achtergrond
$R_{D+}[r, s]$	correlatiepiek van de verplaatsing
$R_{D-}[r, s]$	correlatiepiek van de verplaatsing
$R_F[r, s]$	ruisterm ten gevolge van random deeltjescorrelatie
R_I	diameter van zoekraam
$R_{II}[r, s]$	autocovariantiefunctie
$R_P[r, s]$	zelfcorrelatiepiek
$\hat{R}_{II}[r, s]$	schatter voor autocovariantiefunctie
Δt	tijdsinterval tussen twee belichtingen
$\Delta \vec{x}(\vec{x}, t)$	verplaatsingsveld van deeltjes

Δv	snellheidsvariatie in interrogatiegebied
$\vec{v}(\vec{x}, t)$	snellheidsveld in vloeistofstroming
$\vec{V}'_{i,j}$	geobserveerde snellheid
$\vec{V}_{i,j}$	goede vector
$\vec{U}_{i,j}$	afwijkende vector
$med[\vec{V}']_{i,j}$	mediaanvector
W_P	digitale bandbreedte
Δz_O	verplaatsing van deeltjes het lichtvlak uit
ΔZ_0	dikte lichtlaag

Griekse symbolen

$\gamma_{i,j}$	mediaantestcoëfficiënt
Γ	valid data yield
Δ	afmetingen van een pixel in mm
$\hat{\epsilon}_G$	Gaussische fitschatter voor fractionele verplaatsing
$\vec{\epsilon}_{i,j}$	meetfout
λ	golflengte licht
μ	effectieve aantal deeltjesparen
σ^2	variantie van het residu
σ_h	Gaussische breedte van afgebeelde deeltje
σ_{SR}	signaal-ruisverhouding
σ_V^2	variantie van vector
θ_m	klasse m van histogram in mediaantest

Verklaring**Afkortingen**

FFT	Fast Fourier Transform
LSV	Laser Speckle Velocimetry
PIV	Particle Image Velocimetry
PTV	Particle Tracking Velocimetry

Verklaring**Computational Fluid Dynamics****Symbol**

F	volume of fluid fractie
g	gravitatieversnelling
p	druk
δt	tijdstap
u, v, w	snellheidscomponenten in (x, y, z) -richting

Verklaring

Griekse symbolen η ν ρ σ θ Ω **Verklaring**

dynamische viscositeit

kinematische viscositeit

dichtheid

oppervlaktespanning

contacthoek

relaxatiefactor

Afkortingen

CFD

EV

SADI

VOF

Verklaring

Computational Fluid Dynamics

Eindige Volume methode

Simplified Alternating Direction Implicit scheme

Volume of Fluid methode

Bijlage A

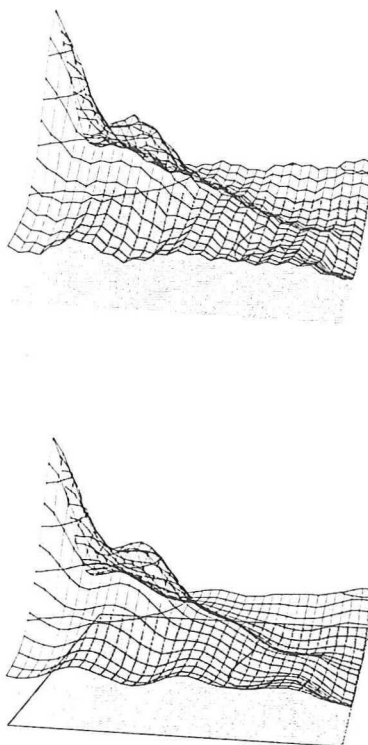
De invloed van opnamecorrectie op de autocorrelatiefunctie

De invloed van beeldbewerking, zoals correctie in het Fourierdomein en correctie voor non-uniforme belichting, op de bepaling van het piekmidden van de verplaatsingspiek en de signaal-ruisverhouding (zie ??) wordt geïllustreerd met behulp van een voorbeeld. Er wordt gebruik gemaakt van de opname in figuur 3.8, die door ScanA opgedeeld wordt in 36 interroгатiegebieden. Hier wordt gekeken naar twee interroгатiegebieden in het bijzonder; een interroгатiegebied op (32, 96), vlak achter de aansnijding van de gietvorm, en een gebied op (192, 96). De coördinaten worden gegeven in pixels en staan voor het middelpunt van een interroгатiegebied.

De invloed van de opnamecorrectie wordt onderzocht voor de twee vormen van correctie afzonderlijk en voor de combinatie van beide. Met ScanA wordt van het origineel en de bewerkingen een schatting gegeven van het piekmidden op sub-pixelniveau (zie ??) en de verhouding van de amplitude van de verplaatsingspiek ten opzichte van de hoogste ruispiek, of de signaal-ruisverhouding volgens vergelijking 2.23. De resultaten worden voor beide interroгатiegebieden samengevat in tabel 8.1. Het effect van de correctie voor non-uniformiteit over het interroгатiegebied is goed zichtbaar uit de resultaten voor het eerste interroгатiegebied.

<i>nummer</i>	<i>commentaar</i>	Δx (px)	Δy (px)	σ_{SR}
1	Originele opname	0.01556	8.29	1.054
1	Correctie in het Fourierdomein	0.09038	26.5	1.010
1	Correctie voor non-uniforme belichting	5.951	-1.098	1.030
1	Beide vormen van correctie	11.14	-2.864	1.435
2	Originele opname	8.056	0.2446	1.661
2	Correctie in het Fourierdomein	8.963	0.4809	1.583
2	Correctie voor non-uniforme belichting	8.065	0.2457	1.699
2	Beide vormen van correctie	8.975	0.4810	1.595

Tabel A.1: ScanA berekeningen voor twee interroгатiegebieden met en zonder beeldbewerking.



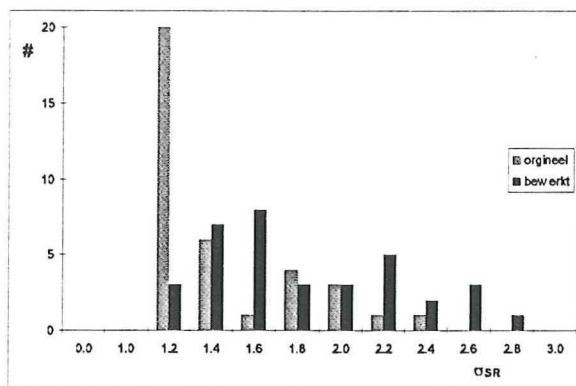
Figuur A.1: Gedeelte van de autocovariantie van (a) de originele opname, en (b) de bewerkte opname.

In de onbewerkte opname lokaliseert ScanA een ruispiek ten gevolge van de intensiteitsgradiënt. Na correctie wordt een piek gevonden met een aannemelijkere verplaatsing en een betere signaal-ruisverhouding. Uit tabel 8.1 blijkt voor het tweede interrogatiegebied dat de twee correcties voor een verschillende schatting van het piekmidden zorgen. De invloed van de correcties op de autocorrelatiefunctie is duidelijk zichtbaar in figuur 8.1. De aangebrachte correcties zorgen voor een vervlakking van de autocorrelatiefunctie. Ook de verplaatsingspiek wordt enigszins afgevlakt, zodat een iets lagere signaal-ruisverhouding ontstaat. Het voordeel van de bewerkingen wordt duidelijker door de bepaling van de verplaatsing op sub-pixel niveau.

Allereerst wordt het lokale maximum bepaald van de autocorrelatiefunctie. In figuur ?? (a) is een duidelijk piekmaximum te localiseren. Met een Gaussische schatter wordt het piekmidden vervolgens geschat op sub-pixelniveau. De schatter neemt de amplitude van de buurcoördinaten mee in beide richtingen. De verplaatsingspiek blijkt voor dit interrogatiegebied niet goed te worden gelocaliseerd door het lokale maximum. Het zwaartepunt van de piek ligt ten opzichte van dit lokale maximum verschoven met ongeveer één pixel.

Door het gebruik van de correctie in het Fourierdomein krijgt de piek een vloeiende vorm en wordt een verplaatsing geschat die beter overeenkomt met het zwaartepunt van de piek. Het verbreden van de piek door de correctie zorgt voor een lagere signaal-ruisverhouding.

Voor de gehele opname kan de invloed van de opnamecorrectie op de signaal-ruisverhouding



Figuur A.2: Histogram van signaal-ruisverhouding voor originele opname en bewerkte opname.

zichtbaar gemaakt worden door het uitzetten van de signaal-ruisverhouding van 36 vectoren over een histogram met 10 klassen. In figuur 8.2 wordt het resultaat voor de originele en bewerkte opname uitgezet. Door [?] wordt de betrouwbaarheid van een meting bepaald door een voorwaarde te stellen aan de signaal-ruisverhouding: $\sigma_{SR} \geq 1.2$. Uit figuur 8.2 wordt opgemaakt dat de originele opname met deze voorwaarde $\sim 5\%$ onbetrouwbare vectoren kent; voor de bewerkte opname is dit slechts $\sim 8\%$.

Bijlage B

Postprocessing software

Voor de interrogatie en de postprocessing van de PIV-opnamen wordt gebruik gemaakt van software, die ontwikkeld is door Westerweel (1993). De onderdelen van de procedure en de bijbehorende programma's wordt als volgt omschreven:

interrogatie De uitvoerfile van SCIL-Image bestaat uit een header en een opsomming ASCII grijswaarden van de opname. De interrogatie wordt verricht met ScanA. De procedure wordt geïnitieerd door de afmetingen van het interrogatiegebied en de mate van overlapping op te geven. De uitvoer van ScanA is een datafile van vijf kolommen. In de eerste twee kolommen worden de coördinaten gegeven van het interrogatiegebied. De overige drie kolommen staan voor de verplaatsing in de x - en y -richting en de signaal-ruisverhouding.

detectie van afwijkende vectoren Met het programma medtst wordt voor elk interrogatiegebied het residu berekend van de vector met zijn omliggende vectoren en opgeslagen in de vijfde kolom. Voor elk experiment wordt de Bayes kritieke waarde bepaald en ingesteld. Met het programma discrd worden de afwijkende vectoren vervangen door de gemiddelde waarde van de goede buurvectoren.

statistische beschouwing Met het commando vecnrm wordt de absolute waarde van de snelheid voor elk interrogatiegebied berekend en opgeslagen in de vijfde kolom van de datafile. Het programma survey geeft een statistische beschouwing van de datafile. De gemiddelde waarde, de standaarddeviatie en de minimale en maximale waarde van de verplaatsing in de x - en de y -richting en de signaal-ruisverhouding wordt berekend. Met het programma subdc wordt de gemiddelde waarde van de verplaatsing afgetrokken van de berekende verplaatsingen in de datafile.

vectorplot Met het programma plotmtv wordt een vectorpresentatie gegeven van de berekende verplaatsingen.

interpretatie Een aantal programma's kan gebruikt worden voor het soorteren van de PIV-data en uitvoeren van de gewenste variabelen (bij voorbeeld de snelheid in de x -richting als functie van de tijd).

