

**Het optimaliseren van
gietsystemen voor het
gieten van dunwandige,
vlakke platen met behulp
van Particle Image
Velocimetry**

R.W. van den Berg

Maart 1992

Kramers Laboratorium
voor Fysische Technologie
Prins Bernardlaan 6
Delft

Begeleiders:
Prof.dr.ir H.E.A. van der Akker
Ir. G. van der Graaf

Samenvatting

Het doel van dit onderzoek is het optimaliseren van gietsystemen, die gebruikt worden voor het gieten van vlakke, dunwandige gietijzeren platen. Het gietproces is gesimuleerd door gebruik te maken van verschillende perspex gietvormen, waarbij het gietijzer vervangen is door water. Er zijn tijdens dit onderzoek drie systemen bestudeerd, die onderling verschillen qua dimensies van het aansnijsysteem (de overgang van aanvoerbuis en gietholte). Geen van de systemen bleek te voldoen aan de vooraf gestelde eisen: bij een optimale gieting is

- a) de beweging van het vrije oppervlak verwaarloosbaar.
- b) de stroming in de gietholte uniform.

Er is een gietsysteem voorgesteld, dat toegepast kan worden voor een vervolgonderzoek.

Het stromingsveld, dat tijdens de vulling in de gietsystemen ontstaat, is bepaald met de meetmethode Digitale Particle Image Velocimetry (PIV). Gebleken is dat de meetmethode de stroming redelijk kan beschrijven, maar dat de resultaten sterk afhankelijk zijn van externe omstandigheden. De vloeistofstroming in de gietholte kan met de methode duidelijk beschreven worden, mits de stroming geen circulatielussen vertoont. Van de aansnijsystemen kan geen goed beeld gegeven worden.

Om te bestuderen onder welke omstandigheden de methode optimale resultaten kan geven, is een parameteranalyse uitgevoerd. Hiertoe is een programma geschreven, dat PIV-opnamen kan simuleren. Bestudeerd zijn de effecten van deeltjesdichtheid, aantal belichtingen, belichtingsfrequentie en snelheidsgradiënten. Aan de hand van dit onderzoek en literatuurwaarden is bepaald bij welke parameterinstelling de PIV-analyse met het beste resultaat uitgevoerd kan worden.

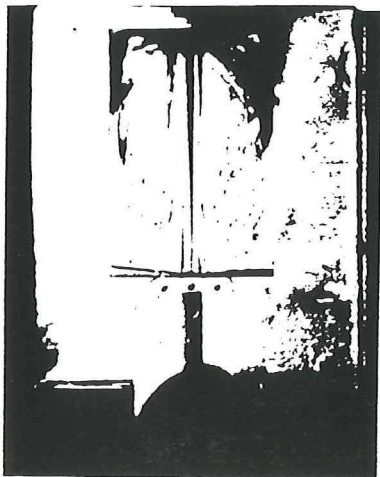
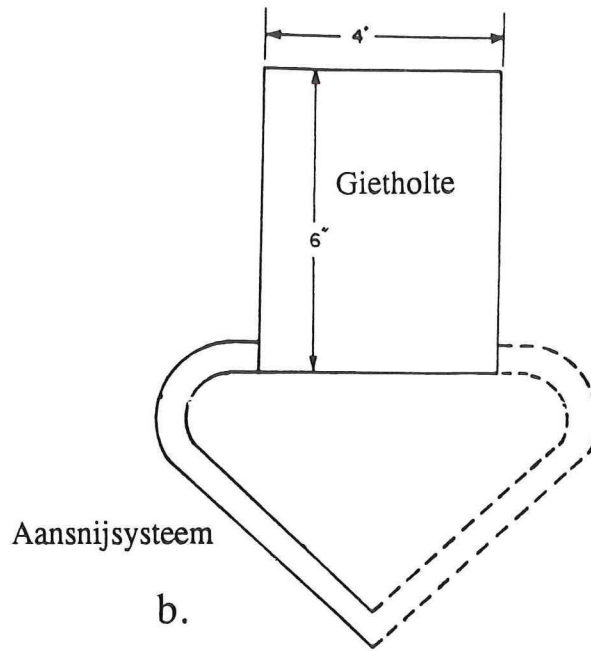
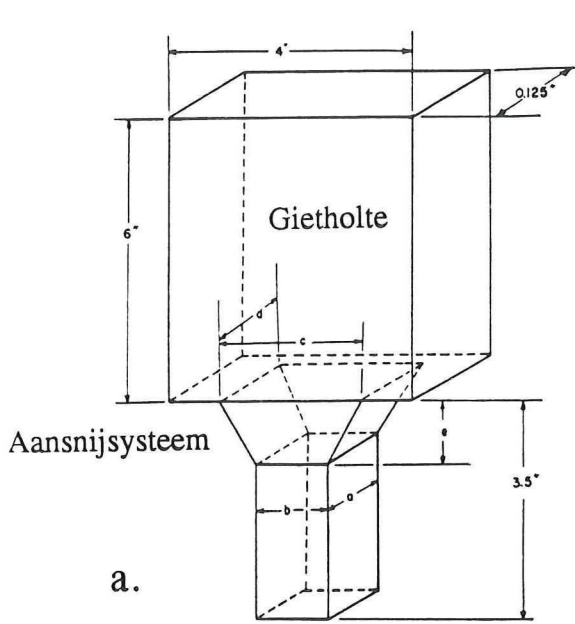
Inhoudsopgave

1.	Inleiding	1
1.1	Het gieten van metalen	1
1.2	Simulatie van het gietproces	3
1.3	Opzet van het onderzoek	5
2.	Probleemstelling	6
3.	Keuze meetmethode en beschrijving meetopstelling	9
3.1	Keuze van de meetmethode	9
3.2	Criteria voor het visualisatiemiddel	10
3.3	Keuze fotografisch materiaal	13
3.4	De meetopstelling	15
4.	Particle Image Velocimetry	18
4.1	Interrogatiemethoden	19
4.1.1	De Young fringes	19
4.1.2	Autocorrelatie	20
5.	Parameteranalyse voor de PIV	27
5.1	De invloed van de deeltjesdichtheid op de analyse	29
5.2	De invloed van het aantal belichtingen	31
5.3	De invloed van de flitstijd	32
5.3.1	Voorwaarden voor de flitstijd	33
5.4	De invloed van een snelheidsgradiënt	34
5.5	De invloed van de intensiteitsfunctie $P(x,y)$	35
5.6	Conclusies	36
6.	Bewerking fotografisch materiaal	38
6.1	Het digitaliseren van de PIV-opname	38
6.2	Bewerking van de opnamen met een beeldbewerkingspakket	40
7.	Resultaten en discussie	42
7.1	Kwalitatieve analyse van het stationaire gedrag	42
7.1.1	Eerste aansnijsysteem	42
7.1.2	Tweede aansnijsysteem	43

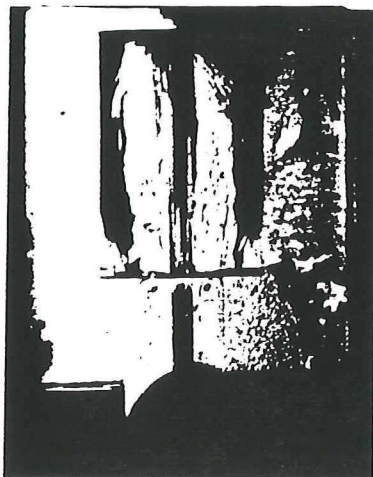
7.1.3	Derde aansnijsysteem	43
7.1.4	Conclusies en aanbevelingen betreffende het aansnijsysteem	44
7.2	De PIV-analyse van de stromingsvelden	46
7.2.1	Invloed van de beeldbewerking op de analyse	46
7.2.2	PIV-analyse van het eerste systeem	48
7.2.3	PIV-analyse van het tweede systeem	50
7.2.4	PIV-analyse van het derde systeem	51
7.3	Analyse van het vulproces	53
7.3.1	Eerste systeem	53
7.3.2	Tweede systeem	55
7.3.3	Derde systeem	56
8.	Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek	57
8.1	De onderzochte aansnijsystemen	57
8.2	De PIV-analyse	58
8.3	Beeldbewerking	59
8.4	Suggesties voor vervolgonderzoek	60
Literatuur	61
 Bijlagen		
1.	Digitaliseren met IRIS-TUTOR	62
2.	Beeldbewerking met TCL-Image	63
3.	PIV-analyse met ScanA	66
4.	Software voor de dataverwerking	67
5.	Simulatie PIV-opname en weergave autocorrelatiefunctie	69
6.	Het bepalen van de oppervlaktegolven	73

Symbolenlijst

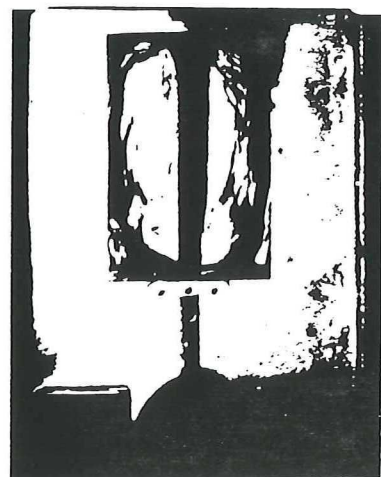
<i>Symbol</i>	<i>Betekenis</i>	<i>Dimensie</i>
α	Volume fractie deeltjes	-
δ	Deltafunctie	-
ϵ	Fout	-
λ	Golflengte	m
μ_D	Schatter van de verplaatsing	pixels
ρ	Dichtheid	kg/m ³
σ	Oppervlaktespanning	N/m
σ_{SR}	Signaal/ruis-verhouding	-
τ	Doorlaatbaarheid	-
ω	Hoeksnelheid	rad/s
A	Oppervlak	m ²
B	Breedte	m
B	Aantal belichtingen	-
C_W	Weerstandscoefficiënt	-
D	Diepte	m
$d_{deeltje}$	Diameter van deeltje	m
D_{hydr}	Hydraulisch diameter	m
Fr	Froude-getal	-
g	Gravatieversnelling	m/s ²
H	Hoogte aansnijsysteem	m
I	Intensiteit	W/m ²
L	Dimensie interrogatiegebied	pixels
N	Aantal deeltjes per eenheid	1/m ² , 1/m ³
p	Grijswaarde	-
$P(x,y)$	Intensiteitsfunctie van deeltje	-
r	Breedte signaalpiek	pixels
R	Component autocorrelatiefunctie	-
Re	Reynoldsgetal	-
R_{krom}	Kromtestraal	m
\underline{s}	Verplaatsing	pixel
t	Tijd	s
\underline{v}	Snelheid	pixel/s, m/s
$W(\Delta t)$	In Δt verplaatste deeltjesfractie	-
We	Weber-getal	-
x	Coördinaat in horizontale richting	pixel, m
y	Coördinaat in verticale richting	pixel, m
z	Coördinaat in vlak van tekening	pixel, m



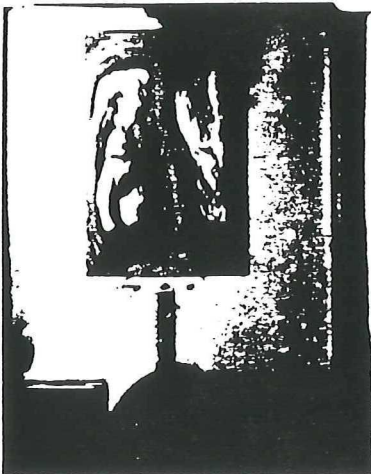
(a) 0.031



(b) 0.094



(c) 0.12



(d) 0.22

Figuur 1.1

- a. Gietsysteem voor verticale vulling.
- b. Gietsysteem voor horizontale vulling.
- c. Gieting met het in 1.1^a afgebeelde systeem. De verstreken tijd sinds het binnenkomen van de gietholte staat in seconden. Stijgsnelheid 35 m/s (naar *Smith & Wallace [lit.11]*).

Hoofdstuk 1.

Inleiding

1.1 Het gieten van metalen

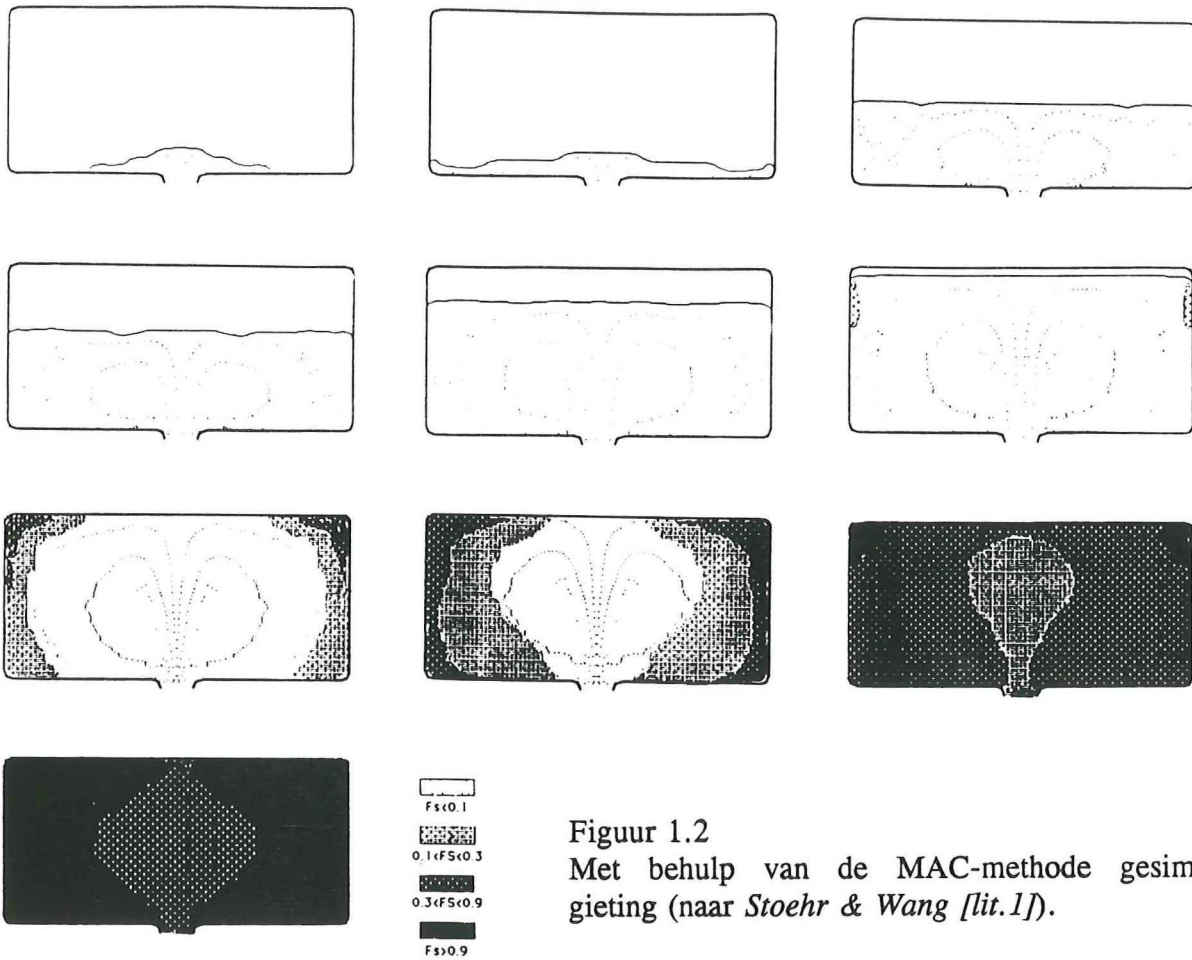
Het gieten van metalen is tot in de laatste decennia van deze eeuw een over het algemeen empirische wetenschap geweest. Sinds de jaren vijftig is men zich, mede door de zich sterk ontwikkelende industrie, meer en meer gaan interesseren in de heersende omstandigheden tijdens een gietproces. Onderzoek uit die tijd van ondermeer *Smith & Wallace [lit.11]* leidde tot een ruimer inzicht.

Belangrijke parameters bij het gieten van metalen zijn de stijgsnelheid van de vloeistof in de gietvorm en de configuratie van het gietsysteem zelf. In figuur 1.1^a en 1.1^b staan gietsystemen afgebeeld, die ontworpen zijn voor het gieten van vlakke platen. Het systeem is opgebouwd uit drie onderdelen. Via de aanvoerbuis wordt het vloeibare metaal naar het aansnijsysteem getransporteerd. Dit aansnijsysteem is de overgang van de aanvoerbuis naar de eigenlijke gietholte. In deze gietholte vormt zich uiteindelijk het gietstuk. In figuur 1.1^c staat een gieting getoond.

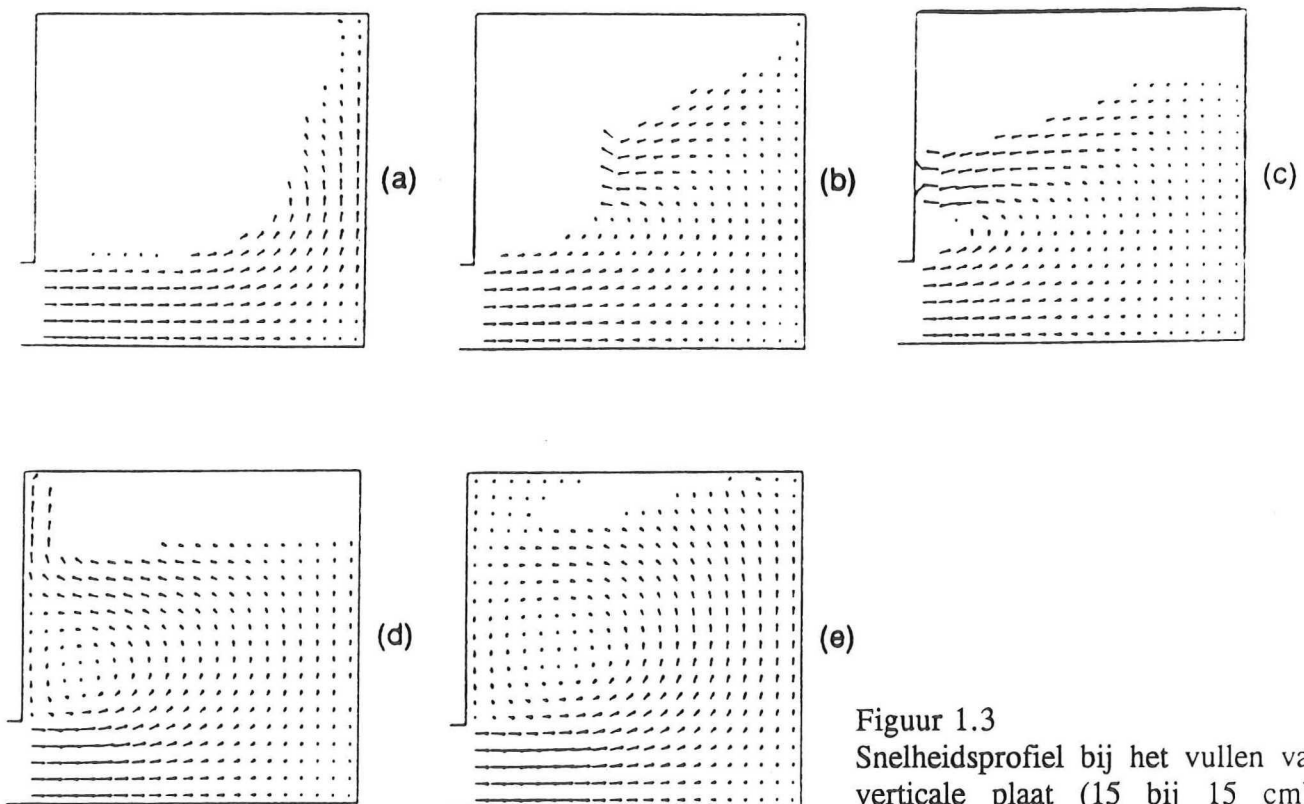
Wat betreft het ontwerp van een gietsysteem zijn er verscheidene keuzen te maken. De opstelling kan voor verticaal, dan wel horizontaal gebruik ontworpen worden. In het eerste geval spelen tijdens de gieting gravitatieverschijnselen een rol. Ook de wijze waarop het vloeibare metaal het gietsysteem binnenkomt, kan gevarieerd worden. Het is mogelijk de vorm van boven vol te gieten. Een andere mogelijkheid is het zogeheten lage druk vullen. Het metaal wordt dan van onderaf in de vorm gespoten. Laatst genoemde vulproces kan zowel verticaal als horizontaal plaats vinden, zoals respectievelijk in figuur 1.1^a en 1.1^b staat afgebeeld. Verder zijn het aantal gietopeningen en de dimensies van de aansnijsystemen te variëren. Bij het ontwerp moet echter wel rekening gehouden worden met enkele eisen, waaraan het aansnijsysteem moet voldoen, wil een gieting optimaal verlopen. Deze eisen staan weergegeven in tabel 1.1.

Tabel 1.1. Eisen voor een optimaal functionerend gietsysteem [lit.13].	
-	Het gietsysteem moet snel gevuld worden. Bij lage vulsnelheden kunnen stollingsverschijnselen op gaan treden (koud loop, zie figuur 2.1). Om dit te vermijden moet de gietvorm van buiten verhit worden om het vloeibare metaal op temperatuur te houden. Een dergelijk proces brengt vanzelfsprekend hoge kosten met zich mee.
-	Het gietsysteem moet gevuld worden met zo weinig mogelijk turbulentie. Een turbulente gieting kan tot gevolg hebben dat er in het gesmolten metaal luchtballen worden opgenomen. Ook kunnen er oxidatieverschijnselen optreden. Enige turbulentie zal tijdens een gieting echter niet vermeden kunnen worden. Daarom wordt over het algemeen gewerkt met systemen, die een Reynolds-getal kleiner dan 20000 tot gevolg hebben.
-	Het gietsysteem mag het gietstuk tijdens het stolproces niet verstoren. Vooral bij het gieten van dunwandige vlakke platen kunnen de spanningen, die in het metaal heersen tijdens een stolling (krimp), barsten veroorzaken.
-	Het gietsysteem moet een maximale opbrengst leveren. Dit houdt in dat de dimensies van het aansnijsysteem en de aanvoerbuis klein moeten worden gekozen.
-	Het gietsysteem moet eenvoudig aan te brengen en te verwijderen zijn.

Het eerste en tweede punt lijken met elkaar in tegenspraak: een snelle vulling zal immers tot gevolg hebben dat de stroming turbulent wordt. In de praktijk zal er een optimale stijgsnelheid bestaan (de *kritische* vulsnelheid), die een minimale hoeveelheid toegevoegde energie vereist en minimale hoeveelheid turbulentie vertoont. Een optimaal ontworpen aansnijsysteem heeft vanzelfsprekend een hoge kritische vulsnelheid tot gevolg.



Figuur 1.2
 Met behulp van de MAC-methode gesimuleerde
 gieting (naar *Stoehr & Wang [lit.1]*).



Figuur 1.3
 Snelheidsprofiel bij het vullen van een
 verticale plaat (15 bij 15 cm) met
 vulsnelheid 1 m/s, berekend met de
 MAC-methode (naar *Stoehr & Wang
 [lit.1]*).

Time: (a) 0.28 sec
 (b) 0.40 sec
 (c) 0.46 sec
 (d) 0.54 sec
 (e) 0.64 sec

1.2 Simulatie van het gietproces

Simulatie van het vulproces met behulp van computerapparatuur vindt plaats sinds de tweede helft van de jaren zestig. Het grote voordeel van deze computertechnieken is dat betrekkelijk goedkoop een optimaal functionerend systeem ontworpen kan worden.

Simuleren van het (dynamische) gedrag betekent het bepalen van de numerieke oplossing van de continuïteitsvergelijking en de Navier-Stokesvergelijking. Als randvoorwaarden kan worden gesteld dat de snelheid aan de wand van het gietsysteem gelijk aan nul is en dat de snelheid bij de instroomopening constant blijft. Bij een gieting is sprake van een vrij oppervlak en om dit verschijnsel afdoende te beschrijven, dienen behalve de genoemde randvoorwaarden extra voorwaarden toegevoegd worden. De problemen, die bij het ontwerpen van een simulatietechniek optreden zijn:

- a) hoe wordt de positie van vrije het oppervlak bepaald.
- b) hoe moet het gedrag van dit vrije oppervlak mathematisch weergegeven worden.

Het beschrijven van de randvoorwaarden komt neer op het oplossen van twee krachtbalansen (zie o.a. *Van den Berg [lit.2]*). Ten eerste moet de som van alle krachten tangentieel aan het oppervlak gelijk aan nul zijn. Ten tweede moet de kracht normaal aan het oppervlak in evenwicht zijn met de normale krachten, die extern op de vloeistof worden uitgeoefend.

In de loop der jaren is een hele familie van berekeningstechnieken, zoals de Marker-And-Cell-methode (MAC) (zie *Welch e.a. [lit.9]*), de daar van afgeleide Simplified-MAC-methode (SMAC) (*Stoehr & Wang [lit.10]*) en de Solution Algoritme-Volume of Fluid techniek (SOLA-VOF) ontworpen. Bij deze methoden wordt de te bestuderen gietvorm in een aantal volume-elementen opgedeeld, waarna via een relaxatiemethode voor elk van deze elementen de genoemde vergelijkingen opgelost worden. Door warmtebalansen in het systeem te betrekken kunnen ook stollingsverschijnselen, die de stroming in belangrijke mate kunnen beïnvloeden, bij de berekeningen worden meegenomen [*lit.1*]. Als voorbeeld staat in figuur 1.2 een gieting weergegeven, die berekend is met de MAC-methode. In figuur 1.3 wordt de horizontale vulling van een verticaal opgestelde plaatvorm getoond.

MAC werd in de loop van de jaren zestig ontwikkeld en is in vergelijking met andere methoden nog tamelijk primitief. Een volume-element heeft bij deze techniek slechts twee toestanden: leeg of vol. SOLA-VOF, dat stamt uit het begin van de jaren tachtig, is daarentegen veel geavanceerder. De volumefractie vloeistof in een element kan uitgedrukt

worden in een waarde tussen nul en één, wat tot gevolg heeft dat het vloeistofgedrag nauwkeuriger wordt berekend. Met SOLA-VOF kan het oppervlaktegedrag, beschreven door een tijd- en plaatsafhankelijke functie, tijdens een vulling goed gesimuleerd worden. Bij de MAC-methode wordt voor elke cel het stromingsveld berekend. Een hoeveelheid puntmassa's worden door het veld bewogen en bepalen op deze wijze de positie van het vrije oppervlak. Het doel van deze markers is het creëren van stroomlijnen en het visualiseren van de exacte vorm van het oppervlak.

Uit de literatuur blijkt dat de simulaties niet altijd kunnen convergeren. Vooral bij drie-dimensionale simulaties is het voor de convergentie van groot belang of er goede beginschattingen gekozen worden. Experimentele schattingen kunnen in dit geval uitkomst bieden [*lit. 1*].

1.3 Opzet van het onderzoek

In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk is beschreven dat het gieten van metalen op verschillende manieren plaats kan vinden. Tijdens dit onderzoek zullen gietsystemen, gelijkend op die in figuur 1.1^a getoond is, bestudeerd worden. De dimensies van de gietholte en het aanvoersysteem zijn bij dit onderzoek vastgelegd.

Het uiteindelijke doel van het onderzoek is het bestuderen van de stromingsprofielen, die ontstaan bij verschillende aansnijsystemen. Tevens zal gekeken worden of verandering van het volumedebiet gevolgen heeft voor het waargenomen profiel. Uit de analyse van de stromingsvelden en het gedrag van het vrije oppervlak kan afgeleid worden of gebruik van het toegepaste aansnijsysteem in een goede gieting zal resulteren. Het uiteindelijk te ontwerpen aansnijsysteem dient een stroming met een zo hoog mogelijk kritisch Reynoldsgetal tot gevolg te hebben.

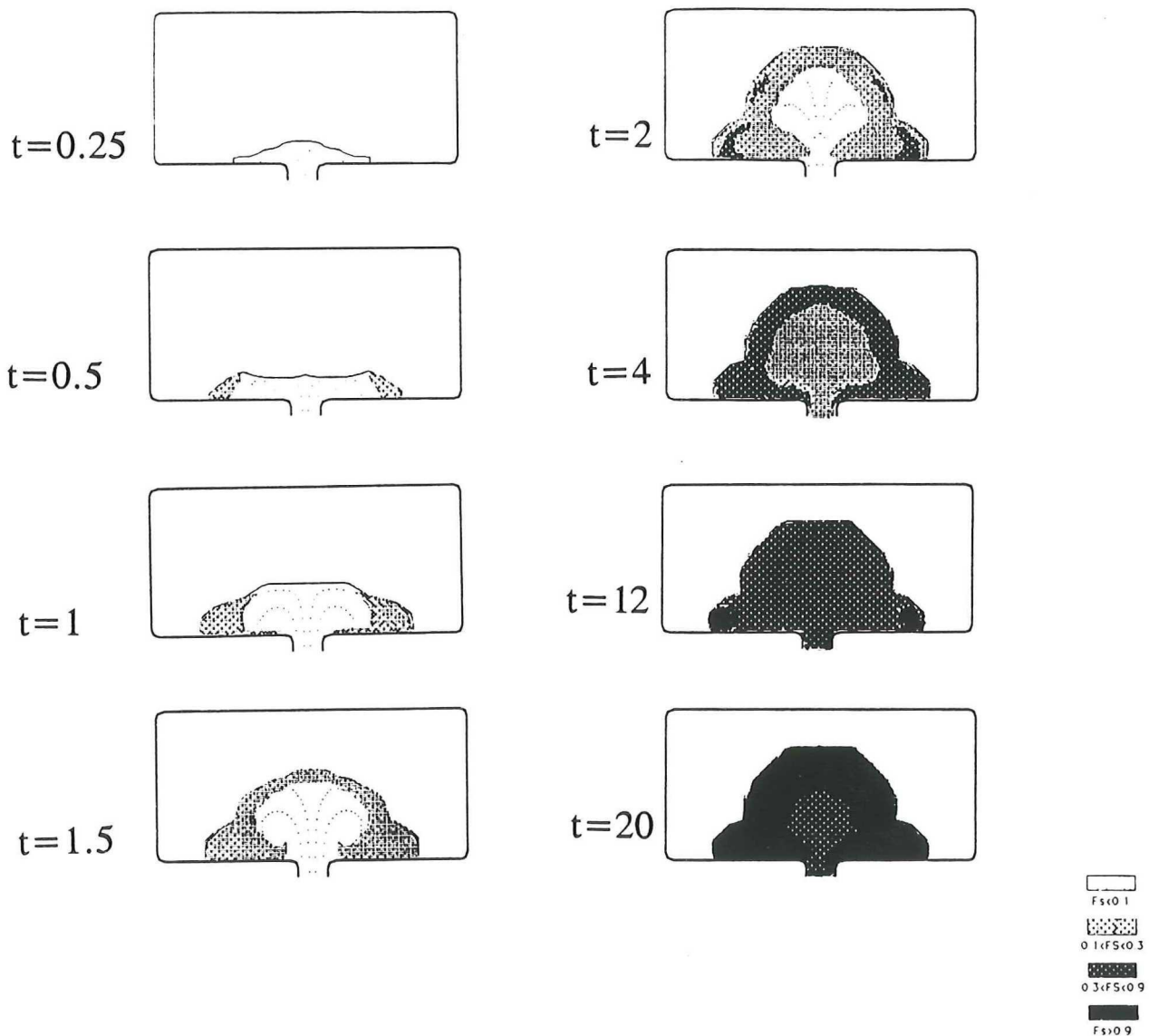
De stromingsvelden zullen bepaald worden met behulp van digitale Particle Image Velocimetry. De achtergrond van deze recentelijk ontwikkelde methode zal uitgebreid in hoofdstuk 4 en 5 besproken worden. Tijdens het onderzoek is bestudeerd onder welke experimentele omstandigheden de analysemethode het nauwkeurigst het stromingsveld kan beschrijven. Er zal een conclusie getrokken worden over de bruikbaarheid van de methode voor verder onderzoek.

De experimenteel bepaalde stromingsvelden kunnen vergeleken worden met resultaten van de eerder beschreven simulatiemethoden. Hieruit kunnen dan weer conclusies getrokken worden betreffende de effectiviteit van dergelijke pakketten. Tevens kunnen de experimentele resultaten dienen als goede beginschattingen bij de numerieke simulaties.

Samengevat is het onderzoek toegespitst op de volgende drie punten:

- Bestudering van de in het gietsysteem optredende stromingsprofielen bij verschillend gedimensioneerde aansnijsystemen en inzicht te verkrijgen in het gietproces.
- Het ontwerpen van een aansnijsysteem, dat voldoet aan de in tabel 1.1 weergegeven eisen.
- Onderzoek naar de toepasbaarheid van Particle Image Velocimetry als meettechniek voor het vastleggen van de stromingsveld in het gietsysteem.

Het onderzoek is uitgevoerd in de periode februari 1991 t/m februari 1992 aan het Kramerslaboratorium voor Fysische Technologie te Delft. Begeleiders waren Ir. G. van der Graaf en Prof. dr. ir. H.E.A. van den Akker.



Figuur 2.1

Het optreden van koudloop. Door stolling wordt de ingang van de vorm afgesloten *voordat* de gehele vorm gevuld is. F_s staat voor de fractie vast metaal, in dit geval aluminium (simulatie volgens Stoehr & Wang [lit.1]).

Hoofdstuk 2.

Probleemstelling

Het doel van dit onderzoek is het bestuderen van de instromingsverschijnselen bij het gieten van gietijzeren, vlakke platen. De wijze, waarop het vloeibare metaal de gietvorm binnenkomt, is bepalend voor de kwaliteit van de gegoten plaat. Tijdens dit onderzoek zijn verticale, van onder gevulde gietvormen onderzocht.

Een belangrijke parameter bij het gieten van metalen is de stijgsnelheid van het vloeibare metaal in de vorm. De vorm moet enerzijds zo snel mogelijk gevuld worden, omdat anders het gietijzer al begint te stollen *voordat* de gehele vorm gevuld is. In extreme gevallen kan de vorm tijdens het vullen afgesloten worden door het optreden van 'koudloop' (zie figuur 2.1). Anderzijds mag het vloeibare metaal niet te snel stijgen, omdat er anders spuitgiet- of sproeieffecten ontstaan. Een dergelijk zeer turbulent gedrag heeft tot gevolg dat luchtbellens in het metaal worden opgenomen en dat oxidehuiden kunnen ontstaan. Tevens treden er in het stollende metaal temperatuurgradiënten op. Genoemde verschijnselen dragen niet bij tot de vorming van een homogeen gegoten plaat en beïnvloeden de mechanische eigenschappen in nadelige zin.

Het vloeistofgedrag wordt onder andere bepaald door de configuratie van de stroming. De configuratie van de gietholte ligt vast; deze bepaalt de vorm van het gietstuk. Het toevoerkanalensysteem en het aansnijsysteem kunnen worden aangepast aan de gewenste stroming in het gietsysteem. De overgang van aanvoerbuis naar gietvorm (het *aansnijsysteem*) moet doeltreffend ontworpen worden, zodat verstoringen, die ontstaan door het vervormen van de vloeistofstroom bij de overgang van aanvoerbuis naar gietvorm, tot een minimum beperkt worden. Tijdens dit onderzoek zal gekeken worden welke effecten de geometrie van verschillende aansnijsystemen op het vulproces kunnen hebben. Deze effecten kunnen beoordeeld worden aan de hand van het oppervlaktegedrag van de stijgende vloeistof (golfvorming) en bepaling van het in de vorm optredende stromingsveld. Een optimaal ontworpen aansnijsysteem heeft een gieting tot gevolg met een verwaarloosbaar golfgedrag en een uniform stromingsveld in de gietholte.

Gietijzeren platen worden doorgaans gegoten in zandvormen. Door de optredende hoge temperatuur -gietijzer wordt gegoten bij een temperatuur rond de 1400 °C- is de materiaalkeuze immers beperkt. Bestudering van de optredende instromingsverschijnselen is wegens het niet doorzichtig zijn van deze gietvormen vrijwel onmogelijk. Een ruwe

indicatie van het vulproces kan verkregen worden door in de vorm in keramisch materiaal gevatte thermokoppels aan te brengen. Een dergelijke analyse geeft echter alleen aan wanneer het gietijzer op een bepaald punt is aangekomen en vertelt verder niets over de aard van de stroming.

Om een beeld van de stroming te krijgen, wordt het proces gesimuleerd door gebruik te maken van een perspex gietvorm. Perspex heeft als voordeel dat het een doorzichtig materiaal is, zodat de stroming in de vorm goed gevolgd kan worden. Een nadeel van het materiaal is dat het wat betreft de ruwheid en gasdoorlaatbaarheid niet overeenkomt met de gebruikelijke gietvormen.

De gietvorm wordt doorstroomd met water. Zowel vloeibaar gietijzer als water zijn Newtonse vloeistoffen en hebben een ongeveer gelijke viscositeit, die een ordegrrootte heeft van ongeveer 0.001 Pa.s. Ze verschillen echter sterk in soortelijke dichtheid ρ en oppervlaktespanning σ . De dichtheid van vloeibaar gietijzer is ruim 6 maal zo groot als die van water ($\rho_{\text{gietijzer}}$ is ongeveer 6250 kg/m³). De oppervlaktespanning verschilt bij beide vloeistoffen ook aanzienlijk. Water heeft een oppervlaktespanning van ongeveer 0.070 N/m, vloeibaar gietijzer daarentegen 1 N/m [lit.13]. Door het vulproces van water in een perspex vorm te beschrijven in dimensieloze kentallen, kan deze vertaald worden naar het werkelijke gietproces. De kentallen waarmee een verticale vulling beschreven kan worden zijn het Reynolds-getal, dat de traagheidskrachten relateert aan de viskeuze krachten

$$Re = \frac{\rho v D_{hydr}}{\eta}$$

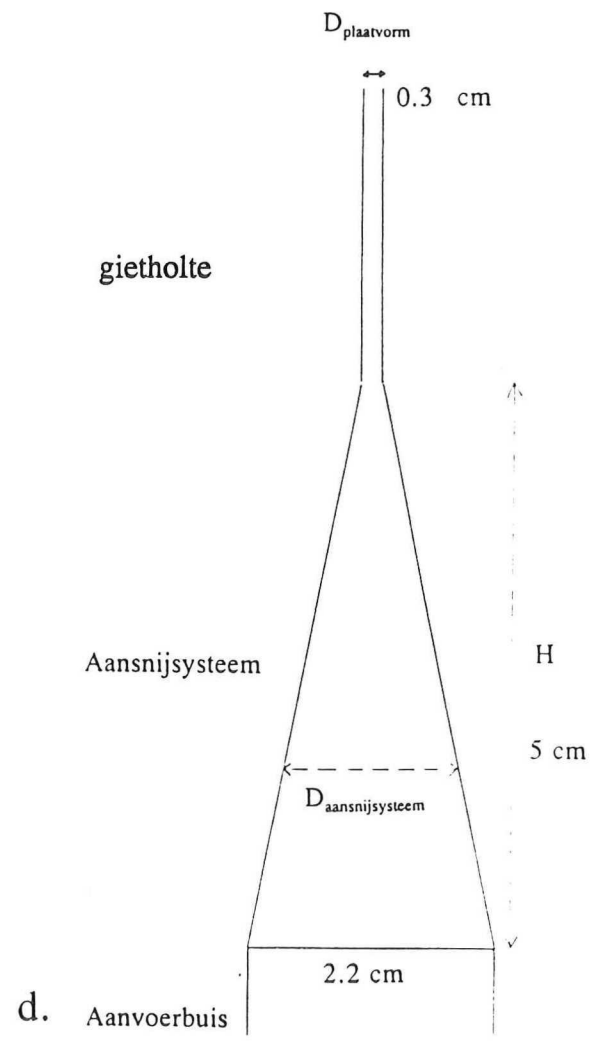
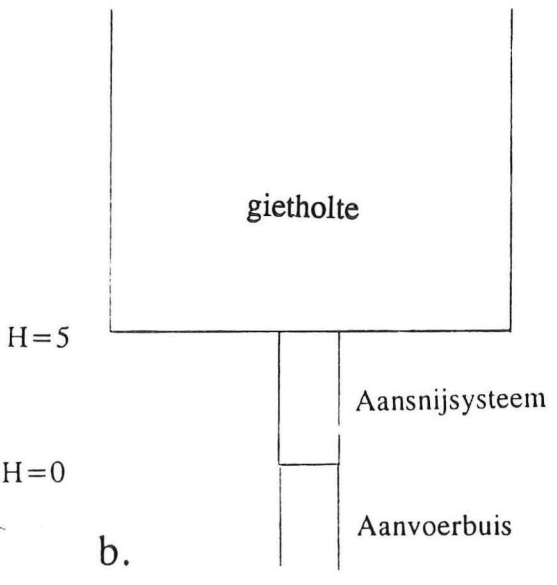
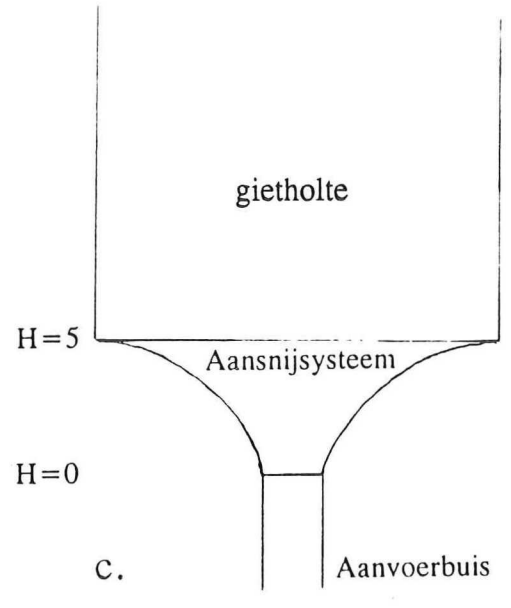
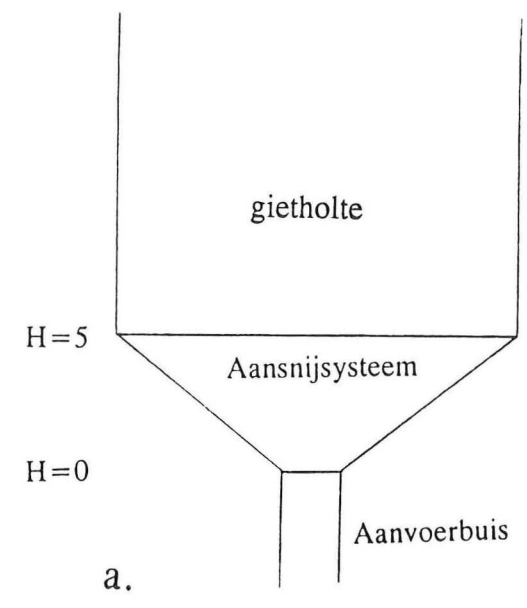
het Weber-getal, dat de kracht uitgeoefend door de oppervlaktespanning relateert aan de traagheidskrachten

$$We = \frac{\rho v^2 R_{krom}}{\sigma}$$

en het Froude-getal, dat de zwaartekrachtseffecten eveneens aan de traagheidskrachten relateert

$$Fr = \frac{v^2}{g R_{krom}}$$

In deze vergelijkingen staat D_{hydr} voor het hydraulische diameter van de gietvorm en



Figuur 2.2

De onderzochte aansnijsystemen.

- a. Aansnijsysteem 1 (vooraanzicht).
- b. Aansnijsysteem 2 (vooraanzicht).
- c. Aansnijsysteem 3 (vooraanzicht).
- d. Zijaanzicht van alle systemen.

R_{krom} voor de kromtestraal van het oppervlak.

Het nadeel dat aan het gebruik van water is verbonden, is dat effecten, die door stollingsverschijnselen op de stroming worden uitgeoefend, niet bestudeerd kunnen worden.

In totaal zullen tijdens dit onderzoek drie verschillende aansnijsystemen onderzocht worden. De aansnijsystemen verschillen onderling in de keuze van het doorstroomd oppervlak. In figuur 2.2 worden de verschillende configuraties getoond.

Het eerste aansnijstelsel, afgebeeld in figuur 2.2^a, vertoont een lineaire afname van de diepte en toename van de breedte als functie van de hoogte. Het doorstroomd oppervlak vertoont diensgevolge een maximum, zoals in figuur 3.5 getoond wordt. Onderzocht zal worden in welke mate dit maximum invloed uitoefent op het instromingsgedrag.

Het tweede te onderzoeken aansnijstelsel vertoont eveneens een lineair afnemende diepte. De breedte blijft echter gelijk aan die van de aanvoerbuis, resulterend in een lineair afnemend doorstroomd oppervlak. Aansnijstelsel 2 kan in de praktijk ontstaan als tijdens een gieting het vloeibare metaal *in* het aansnijstelsel stolt *voordat* de hele gietvorm gevuld is. Met behulp van dit stelsel zal onderzocht worden welke effecten deze stollingsverschijnselen op het gedrag van de stroming zal hebben.

Het derde stelsel, afgebeeld in figuur 2.2^c, behoudt een constant doorstroomd oppervlak. De diepte neemt lineair af als functie van de hoogte; de breedte van het aansnijstelsel neemt hyperbolisch toe met de hoogte. Onderzocht zal worden of het constant houden van het doorstroomd oppervlak een wezenlijke verbetering van het gietproces oplevert.

Hoofdstuk 3.

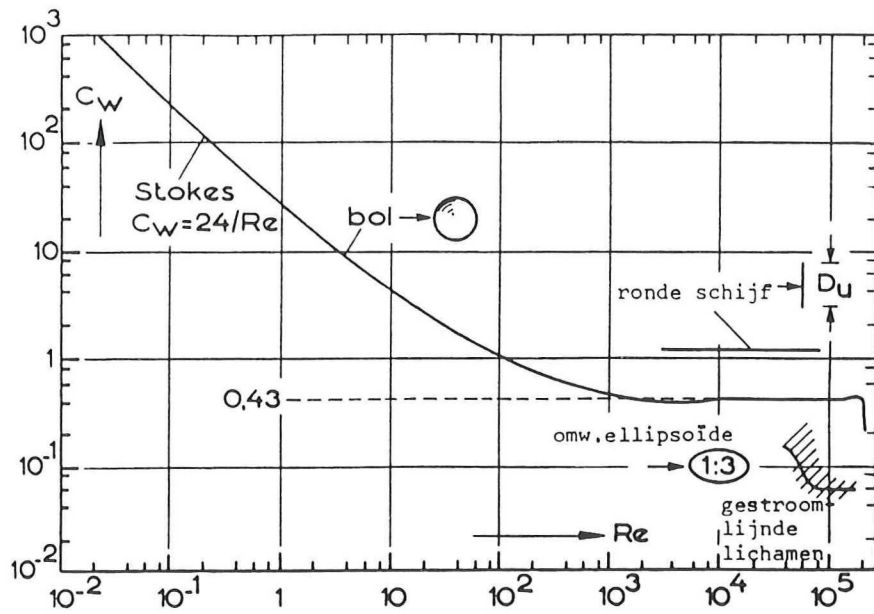
Keuze meetmethode en beschrijving meetopstelling

3.1 Keuze van de meetmethode

Voor het bestuderen van de stromingsverschijnselen in de gietvorm is een analysemethode nodig, die het stromingsveld in de gehele configuratie kan bepalen. Omdat zowel de grootte van de snelheid als de richting van de stroming verandert in de drie dimensies, vallen methoden die uitgaan van een één-punts meting (zoals Laser-Doppler Anemometrie en de 'hete draad' methode) af. Een verdere eis is dat de analyse snel moet verlopen: een vulling duurt ongeveer 0.5 tot 5 seconde en in die korte tijd moet het stromingsveld in de configuratie voor een goede analyse meerdere malen vastgelegd worden.

Een techniek, die toepasbaar blijkt, is de Particle Image Velocimetry (PIV). Bij de PIV-analyse wordt aan de gehele stromende vloeistof een hoeveelheid willekeurig uniform verdeelde kleine deeltjes toegevoegd. Het te bestuderen stromingsveld wordt vervolgens twee of meerdere malen op één fotografische plaat vastgelegd. Met behulp van de PIV kan door analyse van deze opname de gemiddelde verplaatsing van de deeltjes (markers) per tijdseenheid op een lokatie binnen het stromingsveld bepaald worden en daarmee de snelheid op de betreffende positie.

PIV kan, zoals in hoofdstuk 4 nog zal worden behandeld, in twee groepen onderverdeeld worden. De eerste groep omvat de 'klassieke' Optische-PIV (O-PIV), de tweede de Digitale-PIV (D-PIV). Laatst genoemde heeft als groot voordeel dat de analysetijd 1000 tot 10000 maal korter is dan bij O-PIV. Hier tegenover staat een iets lagere nauwkeurigheid (in de orde van 1 à 2 %) [lit.4]. De tijdwinst is de reden geweest dat voor de digitale variant gekozen is.



Figuur 3.1 De weerstandscoefficiënt C_w voor een omstroomde bol als functie van het Reynolds-getal.

3.2 Criteria voor het visualisatiemiddel

PIV maakt gebruik van kleine, licht reflecterende deeltjes, die met de vloeistof meestromen en op deze wijze het stromingsveld visualiseren. Er zijn verschillende soorten deeltjes te gebruiken. Het is mogelijk via electrolytische weg gasbelletjes te ontwikkelen en die met de stroming te laten meevoeren [lit.6]. Een andere mogelijkheid om de stroming te visualiseren is door bolletjes van een bepaald materiaal aan de vloeistof toe te voegen. De ‘ideale’ bolletjes beschrijven de optredende stroming door deze exact te volgen, beïnvloeden deze niet en hebben een bezink- of stijgsnelheid gelijk aan nul.

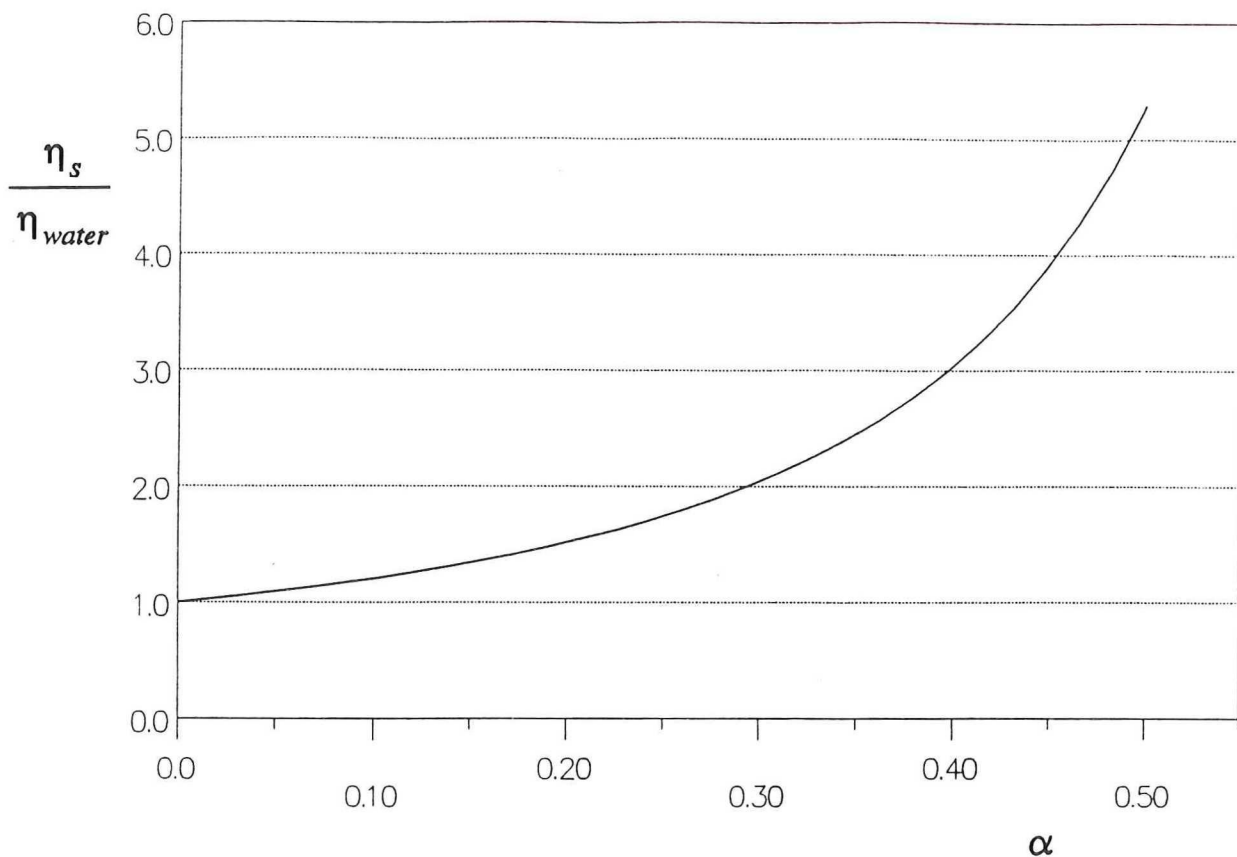
Een deeltje zal door zijn traagheid de vloeistofstroming niet altijd kunnen volgen en dus niet onder elke omstandigheid kunnen beschrijven. Hoog frequente fluctuaties in de vloeistofstroming zullen dan ook niet gevonden worden bij de PIV-analyse. Het deeltje fungeert als het ware als een soort ‘frequentie-filter’. *Adrian [lit.6]* geeft voor het absolute snelheidsverschil, dat tussen de vloeistof en een deeltje als gevolg van de versnelling van de vloeistof ontstaat, de volgende relatie

$$|\vec{v}_{deeltje} - \vec{v}_{water}| = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_{deeltje}}{\rho} \frac{d_{deeltje}}{C_w} \frac{d\vec{v}_{deeltje}}{dt}} \quad (3.1)$$

Deze vergelijking houdt geen rekening met optredende verschijnselen als virtuele massa, drukgradiënten en niet-uniforme vloeistofstroming; de relatie moet dan ook als een benadering gezien worden. De in (3.1) geïntroduceerde weerstandscoefficiënt C_w is een functie van het Reynolds-getal (zie figuur 3.1). Uit de vergelijking blijkt inderdaad dat een zwaar deeltje de stroming minder goed kan volgen dan een licht deeltje. Hieruit kan afgeleid worden dat het ‘ideale’ deeltje een zo klein mogelijk diameter heeft.

Het blijkt echter dat de lichtopbrengst, d.w.z. de intensiteit van het door het deeltje uitgestraalde licht, van deeltjes kleiner dan ongeveer $100 \mu\text{m}$ afneemt met de derde macht van de diameter. Deeltjes groter dan ongeveer $100 \mu\text{m}$ leveren echter geen hogere lichtopbrengst [lit.6]. Omdat de lichtopbrengst voor een PIV-opname zo hoog mogelijk moet zijn en anderzijds een deeltje bij voorkeur een diameter gelijk aan nul moet hebben, wordt de keuze van de deeltjesdiameter bepaald door het afwegen van de twee factoren.

De toegevoegde deeltjes mogen de vloeistofstroming niet verstoren. De mate van verstoring is o.a. afhankelijk van de volumefractie deeltjes α . Bij een te grote volumefractie gaat de stroming duidelijk over in tweefasenstroming en dat moet bij de



Figuur 3.2

De verhouding tussen de schijnbare viscositeit η_s en de viscositeit η_c van het water als functie van de volumefractie toegevoegde deeltjes. Relatie volgens *Barnea & Mizrahi*, vergelijking (3.2).

analyse vermeden worden. Het blijkt dat de *schijnbare viscositeit* (η_s) toeneemt met de volumefractie deeltjes. Toevoeging van deeltjes beïnvloedt het Reynolds-getal en de *aard* van de stroming. Een relatie voor de schijnbare viscositeit wordt gegeven door *Barnea & Mizrahi [lit.8]*

$$\eta_s = \eta_{\text{water}} \exp\left[\frac{5\alpha}{3(1-\alpha)}\right] \quad (3.2)$$

In figuur 3.2 staat de verhouding $\eta_s/\eta_{\text{water}}$ uitgezet. Bij een toenemende fractie deeltjes neemt de viscositeit van de combinatie vloeistof/deeltjes sterk toe. Het is daarom raadzaam te werken met een lage α . De keuze van de deeltjesfractie is net als bij de keuze van de deeltjesdiameter een afwegen van twee factoren: enerzijds moet er een zeker aantal deeltjes in de vloeistof aanwezig zijn, wil de PIV-analyse naar wens plaats vinden (zie hoofdstuk 5). Anderzijds verstoort een grotere hoeveelheid de stromingsverschijnselen en stemmen de meetresultaten niet overeen met de oorspronkelijke situatie met $\alpha=0$.

De massastroom, die de vorm doorstroomt, wordt gegeven door

$$\Phi_m = A [\alpha (\rho_d v_d - \rho_c v_c) + \rho_c v_c] \quad (3.3)$$

Hierin staat α voor de volumefractie deeltjes (index d), die aan het water (index c) is toegevoegd. De variabelen ρ , v en A staan respectievelijk voor de dichtheid, de gemiddelde snelheid en het doorstroomde oppervlak. De snelheid, die bij de PIV-analyse wordt bepaald, is de snelheid van de disperse fase (v_d). Deze snelheid moet bij voorkeur gelijk zijn aan de snelheid van de continue fase, omdat juist in deze snelheid de interesse ligt. Het optredende snelheidsverschil tussen de beide fasen, de slipsnelheid, volgt voor een quasi-stationaire situatie en voldoende kleine waarde van α uit de relatie

$$v_\infty = \sqrt{\frac{4(\rho_d - \rho_c) g d_p}{3 C_w \rho_c}} \quad (3.4)$$

In bovenstaande vergelijking staat v_∞ voor de slipsnelheid van een alleenstaand deeltje. Deze is direct afhankelijk van het verschil in dichtheid van beide fasen en de deeltjesdiameter. De weerstandscoefficiënt C_w is een functie van het Reynolds-getal en staat weergegeven in figuur 3.1. Een minimale bezink- of stijgsnelheid kan verkregen worden door deeltjes te nemen van een materiaal dat dezelfde dichtheid heeft als het vloeibare medium.

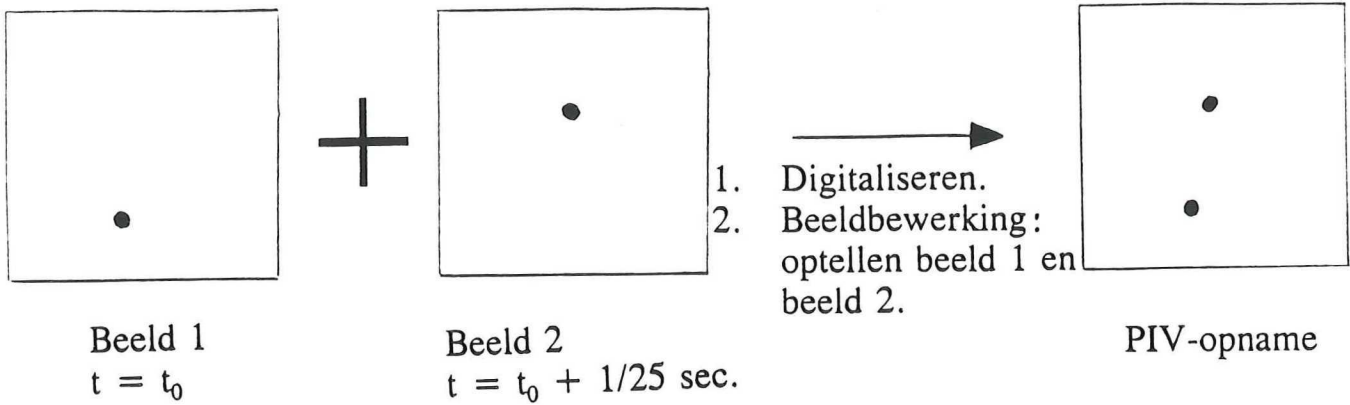
De slipsnelheid kan voor een zwerm deeltjes bepaald worden met bijvoorbeeld de relatie volgens *Richardson & Zaki* [lit. 7]

$$\frac{v_c - v_d}{v_\infty} = \frac{v_s}{v_\infty} = (1 - \alpha)^{3.35} \quad (3.5)$$

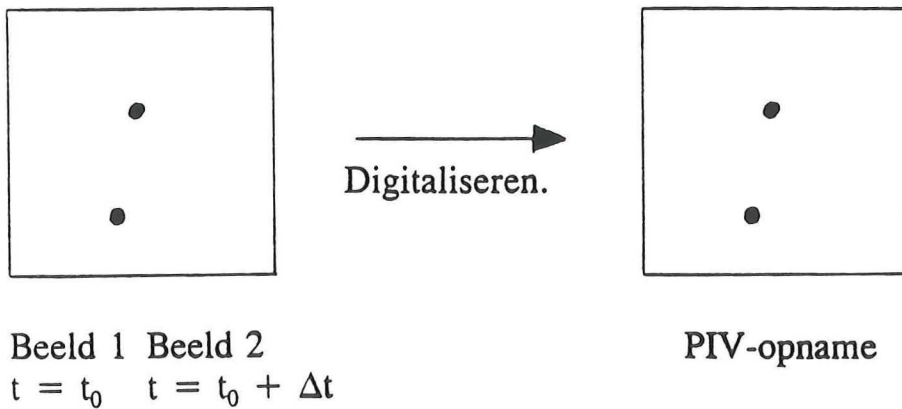
Gekozen is om gebruik te maken van poly-styreenbolletjes met een gemiddeld diameter van 100 μm . Dit materiaal heeft een dichtheid van 1060 kg/m^3 [lit.13]. Met behulp van vergelijking (3.4) wordt gevonden dat de slipsnelheid v_∞ van het deeltje gelijk is aan ongeveer een millimeter per seconde (C_w heeft orde grootte 200). Uit de relatie volgens *Richardson & Zaki* kan geconcludeerd worden dat de slipsnelheid afneemt bij een toenemende fractie deeltjes. De fout, die als gevolg van de slipsnelheid in de analyse ontstaat, is dus relatief erg klein. De bij een gieting heersende vloeistofsnelheid is bij een langzame vulling in de orde van ongeveer 0.1 m/s, resulterend in een relatieve fout van ongeveer 1%.

Tijdens dit onderzoek zal gewerkt worden met een volumefractie deeltjes van ongeveer 3%. De toename van de viscositeit is volgens *Barnea & Mizrahi* bij een dergelijke fractie kleiner dan 10%. Doordat de dichtheid van de bolletjes ongeveer gelijk is aan die van het water is de optredende bezinksnelheid klein ten opzichte van de snelheid van de continue en de disperse fase. Ook verstoringen, die optreden als gevolg van de inertie van de deeltjes (zie vergelijking (3.1)), zijn verwaarloosbaar. Bij een C_w van 200 mogen er versnellingen optreden van 2000 g. De optredende afwijkingen zijn dan nog kleiner dan 1%.

a.



b.



Figuur 3.3

De twee mogelijkheden om een gedigitaliseerde PIV-opname te verkrijgen.

- a. Met behulp van een videocamera. Twee afzonderlijke beelden, waartussen een tijdsinterval van $n/25$ seconde zit, worden gedigitaliseerd en daarna met behulp van een beeldbewerkingspakket bij elkaar opgeteld.
- b. Met behulp van een fotocamera. Een fotografische plaat wordt enige malen belicht met tijdsverschil Δt tussen twee belichtingen ($\Delta t \ll 1/25 \text{ sec.}$). Na digitaliseren ontstaat de opname, die met D-PIV geanalyseerd kan worden.

3.3 Keuze fotografisch materiaal

Het stromingsveld kan op twee verschillende manieren worden vastgelegd. Dit kan gedaan worden door gebruik te maken van een fototoestel of door de toepassing van een videocamera. Beide methoden hebben voor- en nadelen.

Het grote voordeel van de videorecorder ten opzichte van het fototoestel is dat het vastgelegde beeld veel makkelijker te bewerken is. Een foto moet allereerst ontwikkeld worden. Hierna vindt het digitaliseren plaats door het negatief te belichten en het beeld op te vangen in een videocamera. Het analoge videosignaal wordt vervolgens doorgestuurd naar een computer en gedigitaliseerd (zie hoofdstuk 6). Als in plaats van een fotocamera een videocamera gebruikt wordt, kan het signaal rechtstreeks naar de computer gestuurd worden.

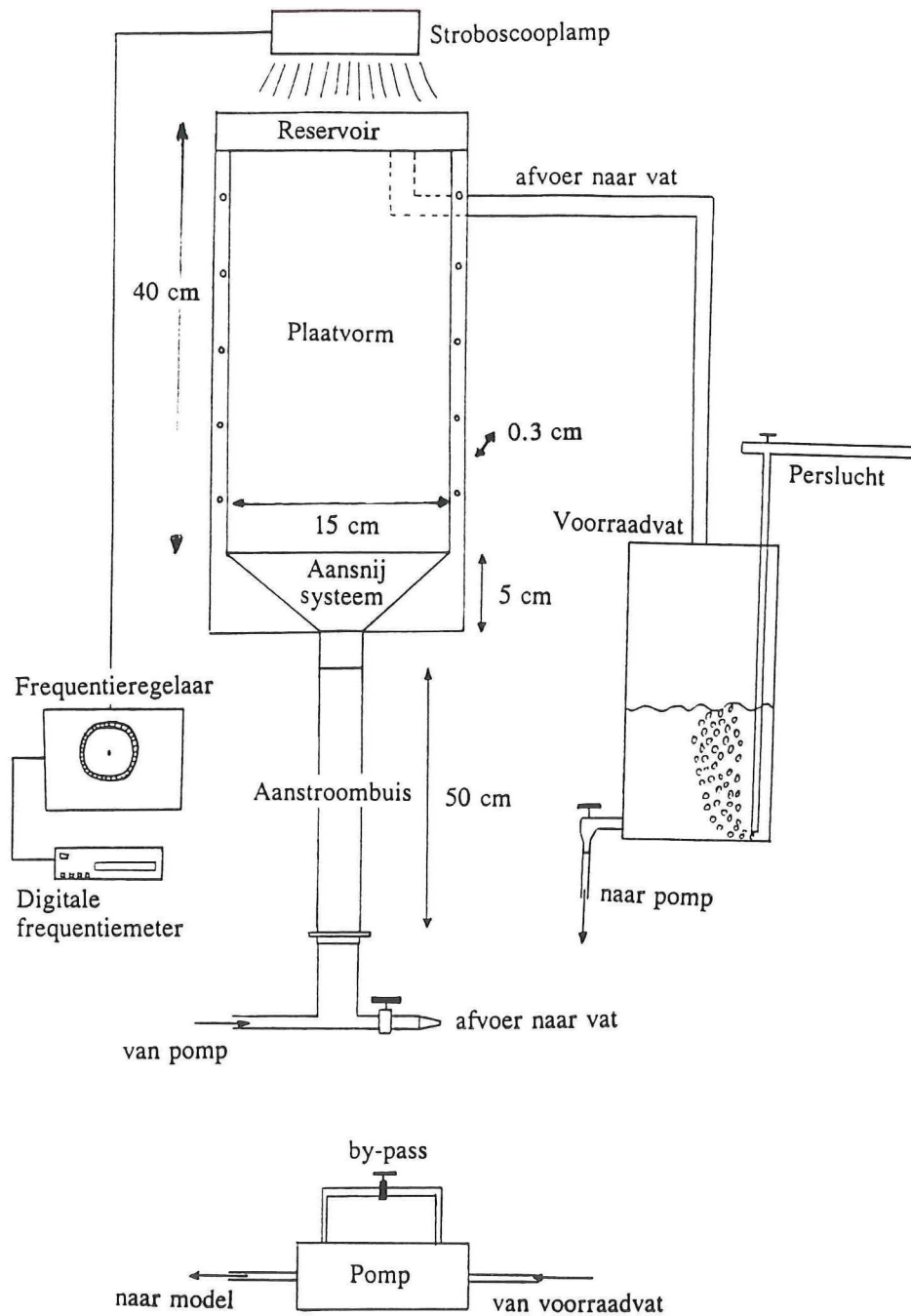
Een belangrijk probleem dat bij het gebruik van een videocamera optreedt, is het aantal beelden dat de camera per tijdseenheid wegschrijft. Een standaard videocamera schrijft (analoog) 25 beelden per seconde weg. Het grootste deel van deze $1/25$ seconde wordt gebruikt om de data naar de videotape weg te schrijven. Het inlezen van het beeld in de videocamera vindt zeer snel plaats. Het aantal beelden, dat een standaard videocamera per tijdseenheid wegschrijft, is, zeker voor een vulling met een hoog volumedebiet, veel te laag. Door de relatief grote verplaatsing van de deeltjes zal de PIV-analyse in die gevallen niet tot het gewenste resultaat leiden (zie hoofdstuk 4).

Als er gebruik gemaakt wordt van een fotocamera, kan de lens voor een bepaalde tijd opengezet worden en wordt met behulp van een stroboscoop bepaald hoeveel beelden er per tijdseenheid op de fotografische plaat worden vastgelegd. Het tijdsverschil tussen het vastleggen van twee afzonderlijke momentopnamen kan in dit geval veel kleiner zijn dan de $1/25$ seconde van de videocamera. Het *aantal* foto's dat per seconde genomen kan worden, varieert tussen ongeveer 4 (camera uitgerust met eenvoudige motordrive) tot enkele miljoenen (modernste high-speed camera) [lit.6]. In figuur 3.3 staan de twee methoden voor het maken van een PIV-opname verduidelijkt.

Een ander doorslaggevend voordeel van de foto ten opzichte van de video is de hoeveelheid informatie die op een fotografische plaat wordt vastgelegd. De resolutie van een foto is ongeveer 150 lijnen per millimeter. Dit houdt in dat een foto van 24 bij 36 mm bestaat uit ruim 20 miljoen pixels. Een videobeeld, met een typische afmeting van 500 bij 500 pixels voor een standaard videocamera, heeft daarentegen maar een kwart

miljoen pixels. Een fotografische opname bevat dus ruim 80 maal meer informatie dan een videobeeld. Verder is aangetoond dat bij de PIV-analyse een foto een *tienmaal* hogere nauwkeurigheid geeft dan een beeld van een standaard videocamera [lit.6]. Een bijkomend voordeel is dat een foto ingezoomd kan worden en er bij het digitaliseren veel meer bewegingsruimte is. Een videobeeld is daarentegen een vaststaand beeld en kan bij een eventuele vergroting geen wezenlijk nieuwe informatie leveren.

Uit het bovenstaande blijkt dat het gebruik van fotografisch materiaal te prefereren is ten opzichte van de video. De belangrijkste reden, die aan deze keuze ten grondslag ligt, is het feit dat bij hoge debieten de 25 beelden per seconde van de videocamera voor de analyse niet toereikend zijn.



Figuur 3.4 De tijdens het onderzoek gebruikte opstelling.

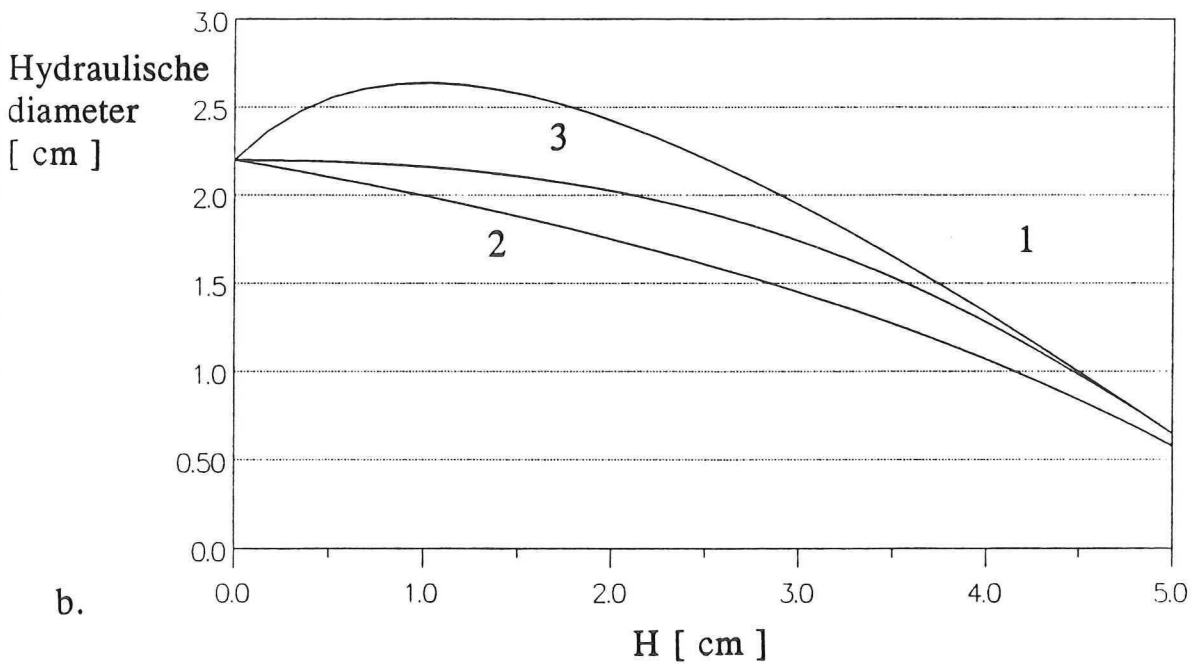
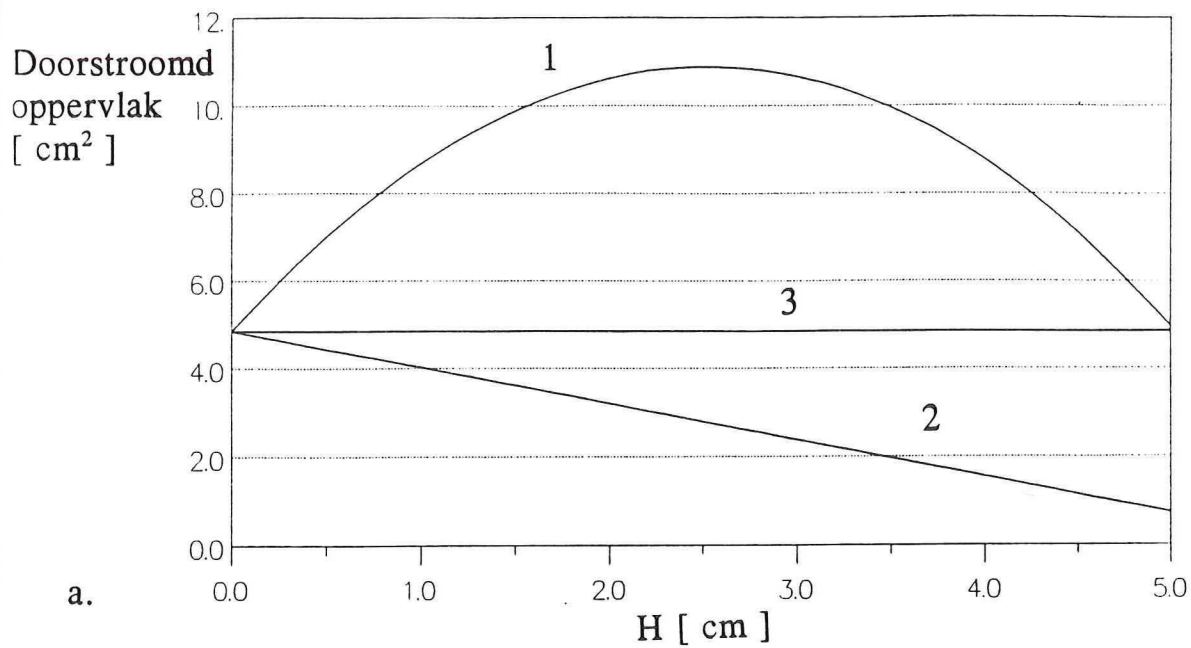
3.4 De meetopstelling.

Om het stromingsgedrag van de verschillende aansnijsystemen te bestuderen is de in figuur 3.4 weergegeven opstelling ontwikkeld. De gietvorm bestaat uit drie belangrijke onderdelen. Als eerste is er de *gietholte*, het gedeelte van de gietvorm waarin de vlakke plaat gegoten wordt. Dit deel van de vorm heeft de afmetingen 3 x 150 x 300 mm. Het water komt de gietholte binnen via een naar keuze aan te brengen *aansnijstelsel*. Dit aansnijstelsel is de overgang van het *aanvoerkanaal* naar de gietholte. Het aanvoerkanaal is enkele centimeters hoog en heeft een lengte en een diepte van 2.2 cm. Het kanaal gaat over in een stijgbuis met een diameter van 2.5 cm. Als eis is gesteld dat het doorstroomd oppervlak van de gietholte gelijk is aan dat van de buis; in het aansnijstelsel mag deze als functie van de hoogte H variëren.

Het drukverschil, waardoor de vloeistofstroming wordt veroorzaakt, wordt opgebouwd door een pomp, die in verbinding staat met een voorraadvat. Dit voorraadvat wordt gevoed met het water dat de gietholte van boven via een reservoir uitstroomt. Op deze wijze ontstaat er een kringloop. Deze kringloop is nodig om de deeltjes, die aan de vloeistof zijn toegevoegd om deze te visualiseren, te bewaren. Door het voorraadvat met perslucht te beluchten, worden deze deeltjes uniform over de vloeistof verdeeld.

De pomp is in staat een debiet te leveren van maximaal 13 liter per minuut. Het volumedebiet wordt ingesteld door middel van een by-pass. Het debiet wordt tijdens elk experiment bepaald door de via de gietvorm afgevoerde waterstroom op te vangen in een emmer en daarna de hoeveelheid water te wegen met een digitale weegschaal. De verlopen tijd wordt bijgehouden met een stop-watch. Aanbrenging van een volume debietmeter levert een te groot drukverlies op; het maximaal gewenste volumedebiet kan dan niet meer bereikt worden.

Een stroboscoop zorgt ervoor dat de aan de vloeistof toegevoegde deeltjes scherp aftekenen tegen de achtergrond. De lamp is aangebracht schuin boven de gietvorm, zodat de voorkant van het systeem belicht wordt. Experimenteel is gebleken dat op die positie de lichtopbrengst maximaal is. De stroboscoop heeft een frequentiebereik tussen 1 en 440 Hz, verdeeld over drie regionen. Onderaan een regio is de intensiteit van het licht erg laag, bij de maximale stand wordt het gebruik acceptabel voor het maken van een PIV-opname. Dit heeft tot gevolg dat alle experimenten uitgevoerd zullen worden bij 71 en 440 Hz, omdat bij die frequenties de lichtopbrengst optimaal is. De stroboscoop wordt handmatig geregeld met een nauwkeurigheid van 0.5 Hz door koppeling aan een digitale



Figuur 3.5

- a. Het doorstroomd oppervlak van de drie aansnijsystemen als functie van de hoogte.
- b. De hydraulische diameter van de aansnijsystemen als functie van de hoogte.

H=0 Einde aanvoerbuis
H=5 Begin gietholte

frequentiemeter. Om de opstelling tegen strooilicht te beschermen, worden de experimenten in een verduisterde ruimte uitgevoerd.

De foto's zijn gemaakt met een Olympus kleinbeeldcamera, die niet in figuur 3.4 staat afgebeeld. De afstand van het fotoestel tot het model was tijdens de experimenten ongeveer 30 cm. Er werd gebruik gemaakt van een 400 ASA zwart/wit AgfaPan-film. De opnamen zijn ontwikkeld met Rodinal (verdunding 1/25, bij 20°C, ontwikkeltijd 6 minuten).

In totaal zijn er tijdens dit onderzoek drie aansnijssystemen bestudeerd. Zoals eerder is vermeld, bepaalt de vorm van het aansnijstelsel grotendeels de aard van de stroming in de gietholte. De configuraties van de drie systemen zijn in figuur 2.2 weergegeven. De diepte D van elk aansnijstelsel wordt, als functie van de hoogte H (in cm), gedefinieerd door

$$D_{\text{aansnijstelsel}} [cm] = 2.2 - 0.374 H \quad (3.6)$$

De diepte neemt lineair af van 2.2 cm ($H=0$) tot 0.3 cm ($H=5$). Verwezen wordt naar figuur 2.2. De breedte B , overeenkomend met wat eveneens is afgebeeld in de figuur, is voor de drie aansnijssystemen variabel. Het eerste aansnijstelsel vertoont een lineair toenemende breedte. Deze wordt gegeven door

$$B_{\text{aansnijstelsel } 1} [cm] = 2.56 H + 2.2 \quad (3.7)$$

Het tweede aansnijstelsel behoudt een constante breedte, namelijk die van de aanvoerbuis

$$B_{\text{aansnijstelsel } 2} [cm] = 2.2 \quad (3.8)$$

Bij het derde aansnijstelsel is de breedte omgekeerd evenredig met de hoogte en wordt gegeven door

$$B_{\text{aansnijstelsel } 3} [cm] = \frac{4.84}{2.2 - 0.374 H} \quad (3.9)$$

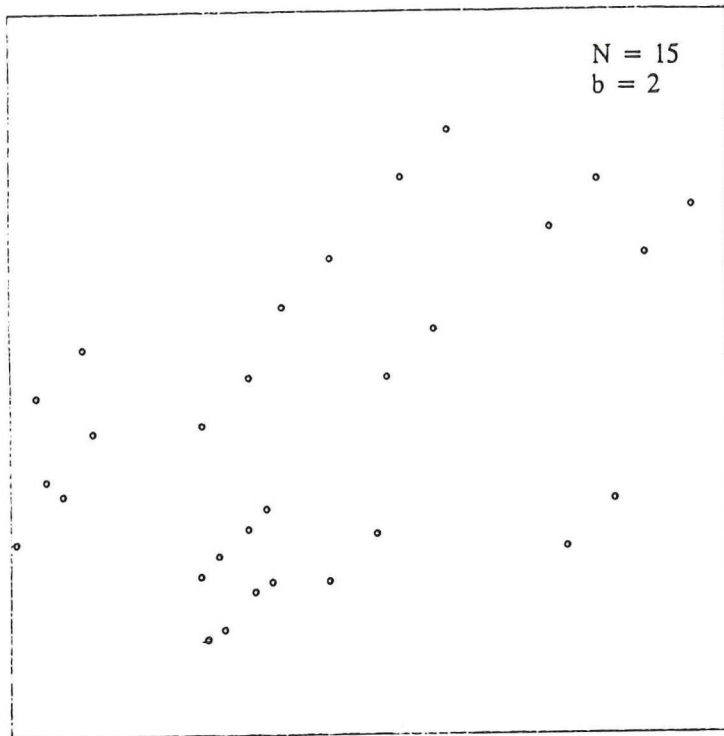
Het doorstroomd oppervlak wordt berekend door de diepte D met de breedte B te vermenigvuldigen. Het resultaat van deze berekening is te vinden in figuur 3.5^a, waarin het doorstroomd oppervlak uitgezet staat tegen de hoogte H .

Uit de figuur blijkt dat het doorstroomd oppervlak van het eerste systeem zich parabolisch gedraagt als functie van de hoogte H en een maximum vertoont op hoogte $H=2.5$ cm. Op dit punt is het doorstroomde oppervlak 2.3 maal de initiële waarde. Het doorstroomd oppervlak van het tweede systeem neemt lineair af tot ongeveer $1/7$ van het oorspronkelijke oppervlak. In het laatste systeem is het oppervlak constant, hoewel het wel van vorm verandert. Dit blijkt uit figuur 3.5^b, waarin de hydraulische diameter, gedefinieerd als

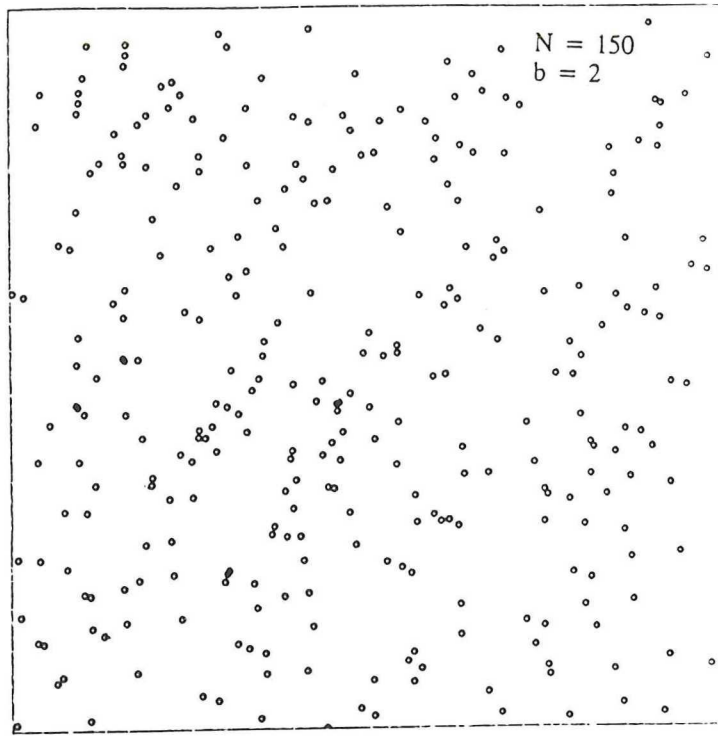
$$D_{hydr} = 2 \frac{B D}{B + D} \quad (3.10)$$

staat uitgezet. De hydraulische diameter neemt voor alle systemen af tot ongeveer een halve centimeter.

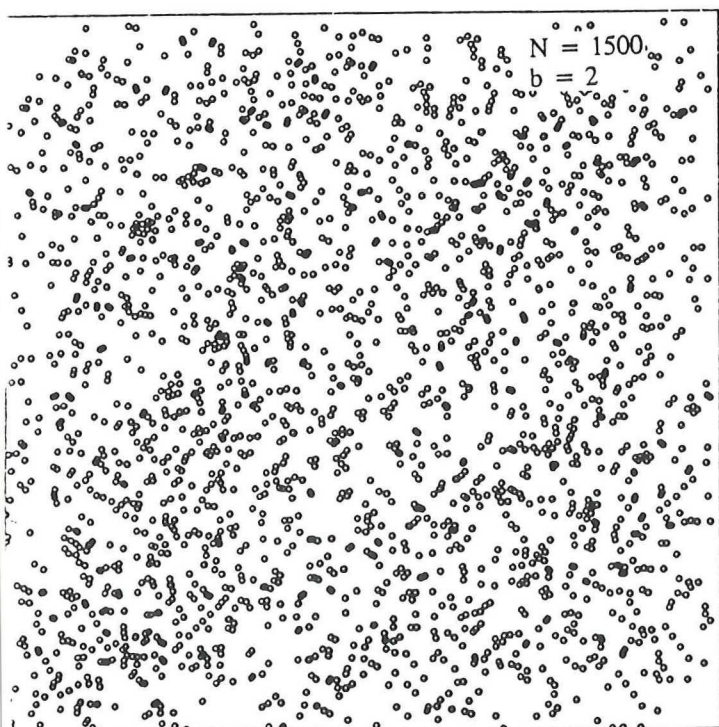
Met behulp van de Particle Image Velocimetry is bestudeerd in welke mate een bepaalde configuratie de stroming in de gietholte beïnvloedt. De theorie van deze analysemethode zal in de volgende hoofdstukken behandeld worden.



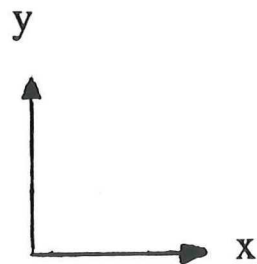
a



b



c



Figuur 4.1

Simulaties van een twee maal belichte foto. Afgebeeld staan deeltjes die zich tussen twee belichtingen ongeveer een centimeter in noord-oostelijke richting verplaatsen. Het aantal gepaarde groepen N is respectievelijk 15, 150, 1500.

Hoofdstuk 4.

Particle Image Velocimetry

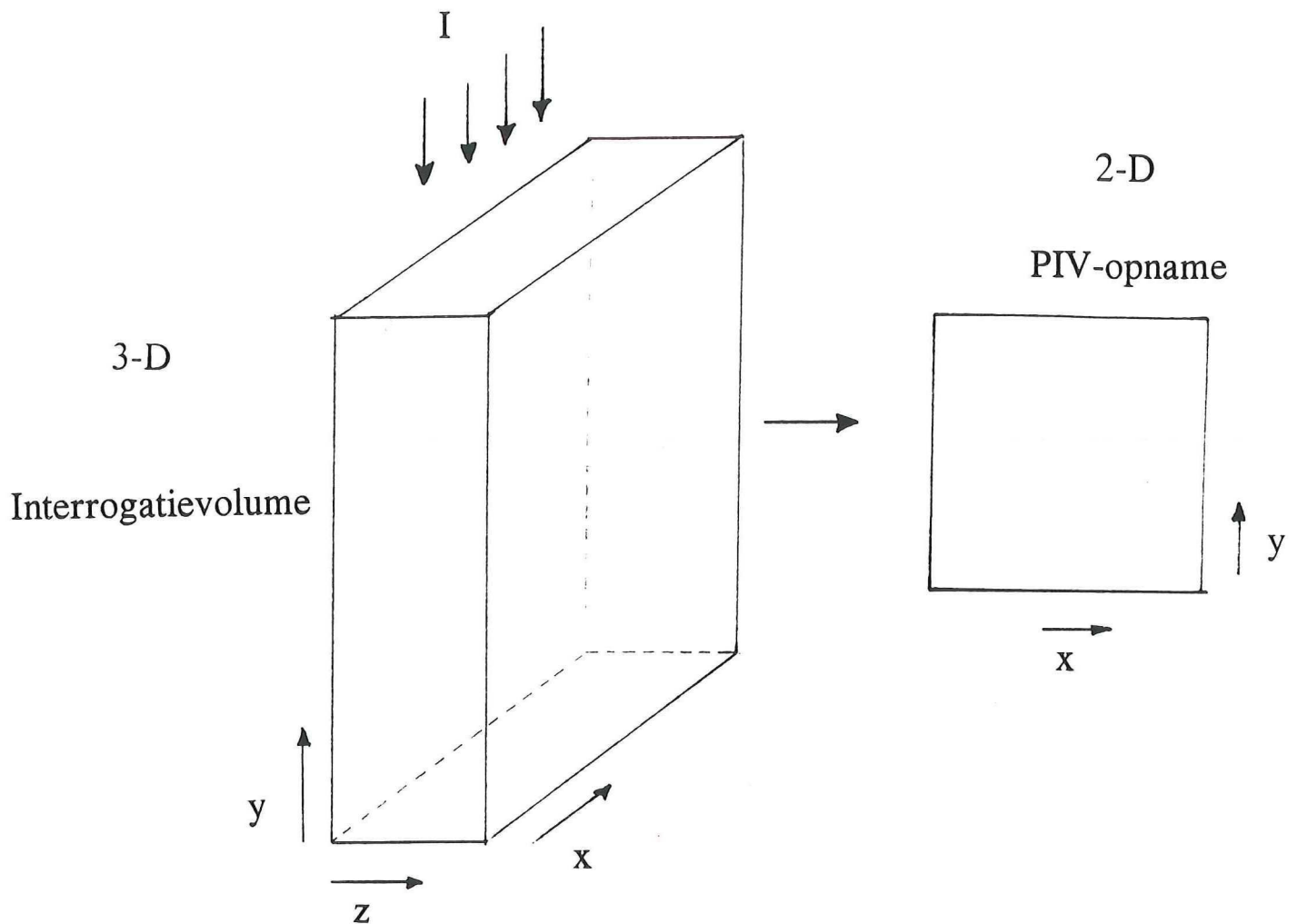
Particle Image Velocimetry (PIV) is een methode waarmee een stromingsveld kwantitatief bepaald kan worden. De analyse levert een twee-dimensionaal totaalbeeld van een vloeistofstroming. Het principe van de methode is als volgt te beschrijven.

Aan een te bestuderen stromingsveld worden deeltjes toegevoegd die met de stroming meegevoerd worden. Door het veld nu twee of meerdere malen te fotograferen met een tijdsverschil Δt wordt elk deeltje net zo vaak afgebeeld als de fotografische plaat is belicht. In figuur 4.1 is een simulatie van een dergelijke opname weergegeven, waarbij elk deeltje in het stromingsveld twee maal is belicht. Een deeltje wordt op deze manier twee maal afgebeeld. Uit figuur 4.1^a is te concluderen dat er een stroming optreedt in noord-oostelijke of zuid-westelijke richting, waarbij de x-component van de snelheid gelijk is aan de y-component. Als Δt bekend is kan door vaststelling van de afgelegde weg een schatting van de snelheid bepaald worden. Deze snelheid volgt uit de vergelijking

$$\vec{v}(\vec{x}, t) \doteq \frac{\Delta \vec{x}(\vec{x}, t)}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Het aantal deeltjes per oppervlakte-eenheid is in figuur 4.1^a niet hoog. Een duidelijk beeld van de stroming kan dan ook niet verkregen worden. Een betere beschrijving van het karakter van de stroming wordt verkregen door tien maal zoveel deeltjes in het stromingsveld te brengen (zie figuur 4.1^b). Het is nog steeds mogelijk de afzonderlijke afbeeldingen van de deeltjes bij elkaar te zoeken. Door nu de hoeveelheid deeltjes nogmaals met een factor 10 te vergroten ontstaat er een beeld, waarin voor het oog de gepaarde afbeeldingen niet meer vallen te herkennen. Het beeld heeft nu een chaotisch karakter gekregen.

Een dergelijke opname kan echter goed geanalyseerd worden met behulp van de PIV-analyse. Er zijn verschillende technieken waarmee deze analyse uitgevoerd kan worden.



Figuur 4.2

Verklaring van de begrippen *PIV-opname* en *interrogatievolume*. Het interrogatievolume is drie-dimensionaal. De diepte z wordt bepaald door de breedte van de lichtbundel, die van boven met een intensiteit I wordt binnengestraald. De PIV-opname is een meervoudig belichte foto van het interrogatievolume, die gemaakt is evenwijdig aan de z -richting en het xy -vlak weergeeft.

4.1. Interrogatie methoden.

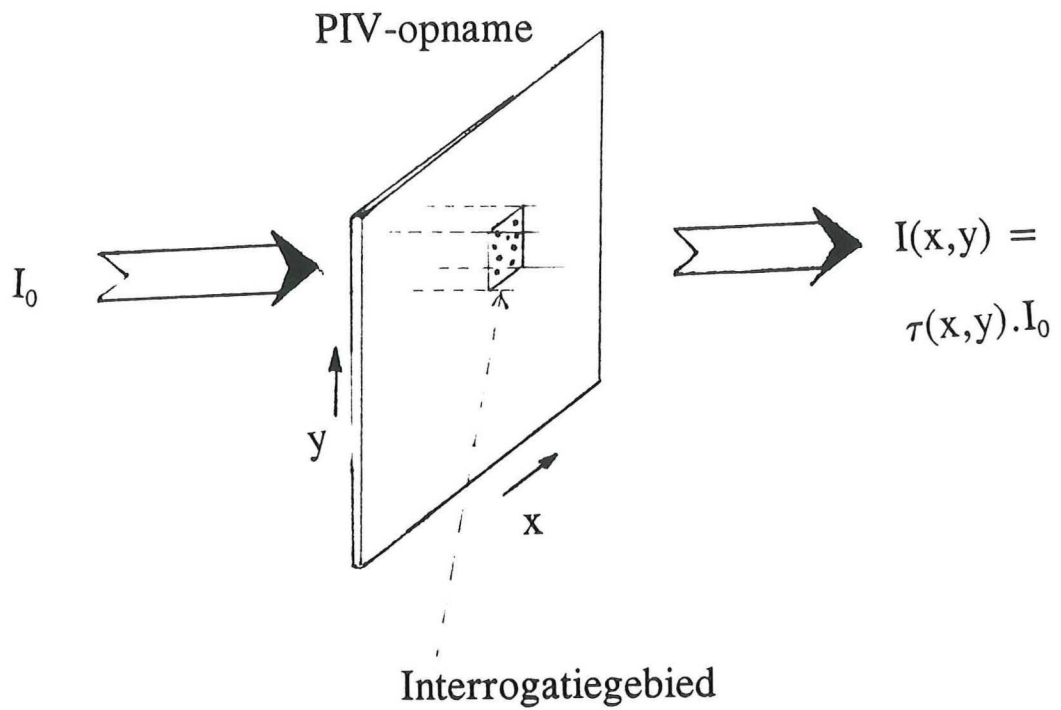
Voordat de analyse plaats vindt, wordt de opname opgedeeld in een aantal subgebiedjes, vanaf nu interrogatiegebieden genoemd. Een interrogatiegebied is de twee-dimensionale projectie van een interrogatievolume. Een interrogatievolume is een deel van het beschouwde stromingsveld en heeft de afmetingen $\Delta x * \Delta y * \Delta z$. Deze afmetingen staan respectievelijk voor de breedte, de hoogte en de diepte. De lengte en breedte zijn naar keuze in te stellen. De diepte Δz is echter gelijk aan de breedte van de lichtstraal, waarmee de stroming wordt belicht (zie figuur 4.2). De afmetingen van een interrogatiegebied moeten zo gekozen worden, dat de in het gebied heersende snelheid in alle richtingen constant is.

Met behulp van de PIV-analyse wordt een snelheidsvector \underline{v} berekend, een waarde die staat voor de gemiddelde snelheid in een interrogatiegebied. De vector \underline{v} is twee-dimensionaal en geeft de verplaatsing in horizontale en verticale richting. De snelheidscomponent in de diepte kan, wegens het twee-dimensionale karakter van de opname, niet bepaald worden.

Bij de PIV-analyse wordt over het algemeen gebruik gemaakt van twee interrogatiemethoden. Dit wordt gedaan door de afbeeldingen aan elkaar te correleren via de autocorrelatiemethode of door gebruik te maken van zogeheten 'Young fringes'.

4.1.1. De Young fringes

Bij de toepassing van deze interrogatiemethode wordt een negatief doorstraald met een laserstraal. Het licht, dat het negatief doorlaat, is afhankelijk van de doorlaatbaarheid op de positie (x,y). Als gevolg van de monochrome coherente laserbron treedt in het doorgelaten licht interferentie op. De afstand tussen de interferentielijnen is evenredig met de afstand tussen de interfererende lichtbundels en wordt vastgelegd door de afgelegde verplaatsing van de deeltjes. Deze verplaatsing wordt vervolgens geanalyseerd door het spectrum te digitaliseren en te onderwerpen aan een digitale Fourier-analyse (Digitale-PIV) of door toepassing van een optische Fourier-analyse (Optische-PIV). Voor verdere gegevens betreffende deze interrogatiemethode wordt verwezen [lit.5,6].



Figuur 4.3

De belichting van een interrogatiegebied met intensiteit I_0 . Het doorgestraalde licht is in intensiteit verlaagd door de doorlaatbaarheid $\tau(x,y)$.

4.1.2. Autocorrelatie

Een andere manier om het snelheidsveld te bepalen is door gebruik te maken van de autocorrelatiemethode. Deze methode zal in deze paragraaf behandeld worden.

Een negatief van een PIV-opname, dat met een uniforme lichtbron met intensiteit I_0 doorgelicht wordt, geeft een intensiteitsverandering afhankelijk van de positie (x,y) die gegeven wordt door

$$I(x,y) = \tau(x,y) \cdot I_0 \quad (4.2)$$

In figuur 4.3 wordt dit geïllustreerd. De in vergelijking (4.2) geïntroduceerde doorlaatbaarheid $\tau(x,y)$ wordt bepaald door de wijze waarop de deeltjes zijn afgebeeld en heeft een waarde tussen 0 (maximale absorptie) en 1 (geen absorptie).

De doorgelaten intensiteit $I(x,y)$ wordt voor een tweevoudig belichte opname met N gepaarde afbeeldingen als volgt beschreven [lit.3]

$$I(x,y) = kP(x,y) * \sum_{i=1}^N \delta(x-x_i, y-y_i) * [\delta(x,y) + \delta(x-x_0, y-y_0)] \quad (4.3)$$

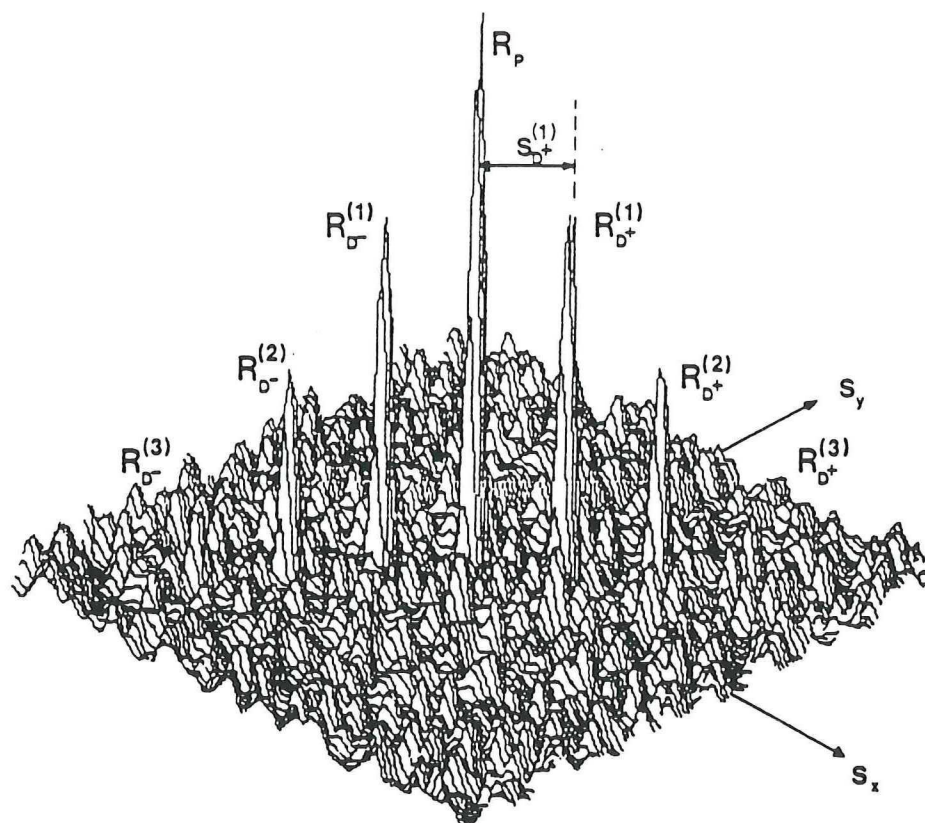
Hierin staat k voor een constante, $*$ en δ respectievelijk voor een convolutie en de deltafunctie en $P(x,y)$ voor een dimensieloze functie die de intensiteitsverdeling over een afbeelding beschrijft. Normaal gesproken is dit een Gauss-kromme met het maximum in het centrum van het cirkelvormig afgebeelde deeltje (zie eventueel figuur 5.10). De coördinaten (x_i, y_i) zijn de initiële coördinaten van het i -de deeltje. Elk deeltje heeft in de tijdsduur Δt een gemiddelde afstand s afgelegd, gegeven door

$$s = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (4.4)$$

De autocorrelatiefunctie $R_{II}(u,v)$ wordt gedefinieerd door

$$R_{II}(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y) I(x-u, y-v) dx dy \quad (4.5)$$

Deze twee-dimensionale, van de doorlaatbaarheid $\tau(x,y)$ afhankelijke functie geeft als resultaat de frequentie waarin een bepaalde verplaatsing $(\Delta x, \Delta y)$ voorkomt. De



Figuur 4.4

Voorbeeld van een autocorrelatiefunctie. Het beschouwde systeem is vier maal belicht, resulterend in twee maal drie verplaatsingspieken [lit.5].

autocorrelatiefunctie kan als functie van x en y worden weergegeven. In figuur 4.4 staat de functie uitgezet voor een vier maal belicht systeem.

De hoogte van elke piek in de autocorrelatiefunctie is recht evenredig met het aantal malen dat een betreffende verplaatsing $(\Delta x, \Delta y)$ voorkomt. De hoogste pieken in de autocorrelatiefunctie corresponderen dus met de meest voorkomende verplaatsingen.

Een twee maal belichte afbeelding vertoont drie overheersende pieken: de centrale piek, gelegen in de oorsprong $(0,0)$ en twee verplaatsingspieken op een afstand s van de oorsprong.

In figuur 4.7 wordt een één-dimensionaal voorbeeld van de bewerking gegeven. Hierin is te zien hoe de autocorrelatiefunctie wordt opgebouwd door de correlatie van drie afbeeldingen.

Combinatie van (4.3) en (4.5) leidt tot vergelijking (4.6). In deze vergelijking staat de autocorrelatiefunctie gegeven als som van verschillende bijdragen:

$$R_{II}(u,v) = R_C + R_{D^+} + R_{D^-} + R_N \quad (4.6)$$

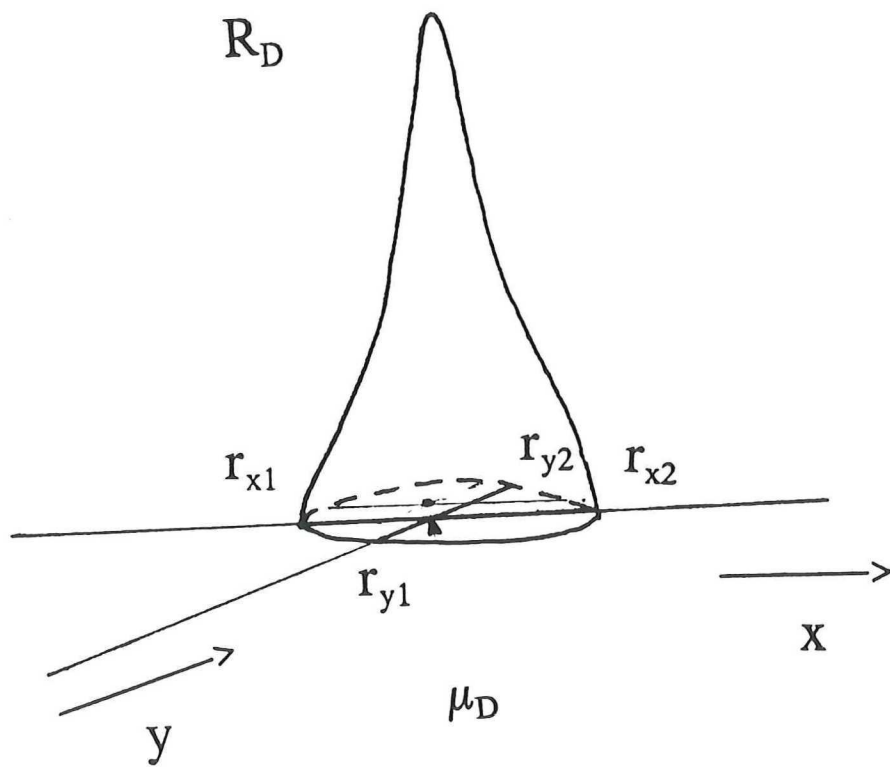
Hierin staat R_C voor de centrale piek, de correlatie van afbeelding i met zichzelf. De tweede en derde term zijn de twee verplaatsingspieken, gesitueerd op een afstand s van de centrale piek. De laatste bijdrage, R_N , representeert de verzameling ruispieken. De termen in (4.6) worden gegeven door

$$R_C = 2Nk^2 R_{pp}(u,v) \quad (4.7)$$

$$R_D = 2Nk^2 R_{pp}(u,v) * [\delta(u-x_0, v-y_0) + \delta(u+x_0, v+y_0)] \quad (4.8)$$

$$R_N = 2Nk^2 R_{pp}(u,v) * \sum_{i,j=1}^N \sum_{i \neq j} \delta(u-[x_i-x_j], v-[y_i-y_j]) * [\delta(u-x_0, v-y_0) + 2\delta(u,v) + \delta(u+x_0, v+y_0)] \quad (4.9)$$

In deze vergelijkingen staat R_{pp} voor de autogecorreleerde van de intensiteitsfunctie $P(x,y)$.



Figuur 4.5

Bepaling van het centrum van de verplaatsingspiek R_D . Met behulp van dit centrum, μ_D , wordt de verplaatsing s berekend.

Door detectie van de hoogste piek (de centrale piek R_C) en de één na hoogste piek (de verplaatsingspiek R_D) kan de afgelegde weg \underline{s} bepaald worden. Door fluctuaties (van statistische aard of door het optreden van snelheidsgradiënten) zal het centrum van de verplaatsingspiek niet exact gedefinieerd zijn. Een schatting van de positie van het centrum van R_{D+} wordt bepaald uit (zie figuur 4.5)

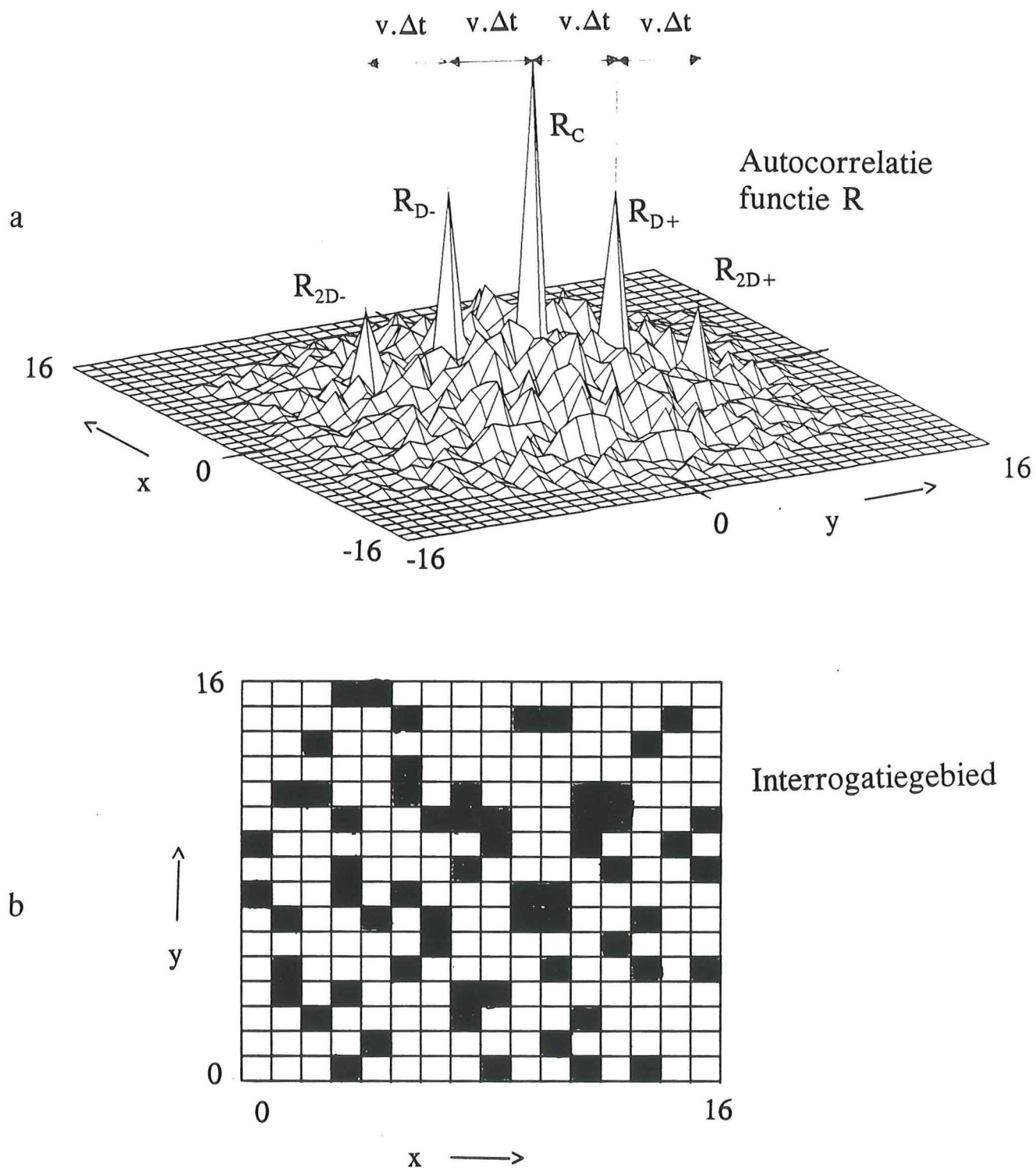
$$\bar{\mu}_{D+} = \frac{\int_{r1}^{r2} r R_{D+}(r) dr}{\int_{r1}^{r2} R_{D+}(r) dr} \quad (4.10)$$

Bij de digitale PIV-analyse wordt de verplaatsing per pixel uitgedrukt. Met behulp van vergelijking (4.10) kan de verplaatsing uitgedrukt worden in het subpixelgebied. Indien μ_{D+} bekend is, kan uit vergelijking (4.1) de in het beschouwde interrogatiegebied heersende snelheid \underline{v} bepaald worden.

Zoals uit het bovenstaande blijkt, draait de gehele PIV-analyse om de bepaling van de doorlaatbaarheid $\tau(x,y)$. Deze wordt bij de digitale PIV-analyse bepaald door de opname te digitaliseren. Het negatief wordt doorschonen en het afgebeelde beeld wordt opgedeeld in n bij n pixels (gangbare waarden voor n zijn 256, 512 en 1024). Elk pixel krijgt een grijswaarde, die correspondeert met de gemiddelde doorgelaten lichtintensiteit op het pixeloppervlak. Elke grijswaarde staat voor een bepaalde waarde van $\tau(x,y)$. Volledige absorptie, dus $\tau(x,y)=0$, komt overeen met de laagste grijswaarde (zwart), het andere extreme geval, geen absorptie ($\tau(x,y)=1$), komt overeen met de hoogste grijswaarde (wit). De verdeling van de doorlaatbaarheid $\tau(x,y)$ in een interrogatiegebied is bij digitale PIV dus niet langer een continue functie van x en y , maar bestaat uit een matrix van m bij m pixels met een bijbehorende grijswaarde. In hoofdstuk 6 zal hier nader op ingegaan worden. De autocorrelatie vindt vervolgens plaats door de grijswaarden van deze pixels te vergelijken.

De tot dusverre behandelde theorie betreffende de autocorrelatiemethode zal aan de hand van een vereenvoudigd voorbeeld verduidelijkt worden.

Een groep van N willekeurig uniform verdeelde deeltjes beweegt zich in een plat vlak, bestaande uit 16 bij 16 roosterpunten, met een uniforme snelheid \underline{v} . De deeltjes worden B maal belicht. Als voorwaarde wordt gesteld dat de verplaatsing kleiner is dan de lengtematen van het beschouwde platte vlak en dat de verplaatsing een discrete waarde



Figuur 4.6

Simulatie van een drie maal belicht systeem met 20 deeltjes (b). Per tijdseenheid Δt verplaatsen de deeltjes zich over een afstand $s=(2,4)$.

In de autocorrelatiefunctie R zijn duidelijk de centrale piek en de verplaatsingspieken te vinden.

heeft. De afbeelding van een deeltje verplaatst zich op deze manier van roosterpunt tot roosterpunt. In figuur 4.6 is een systeem met $B=3$, $N=20$ en $\underline{v}=(2,4)$ weergegeven. De intensiteitsfunctie $P(x,y)$ is verdeeld over één pixel en gelijk aan 1, de doorlaatbaarheid $\tau(x,y)$ is of gelijk aan 0 (geen deeltje in roosterpunt) of gelijk aan 1 (deeltje in roosterpunt). De eveneens in de figuur afgebeelde autocorrelatiefunctie wordt als volgt bepaald.

Met behulp van de op deze wijze opgebouwde matrix kan de verplaatsing \underline{s} bepaald worden. Alle matrixelementen worden met elkaar vergeleken. Gekeken wordt naar de verplaatsing ten opzichte van elkaar. De resultaten van de correlatie worden opgeslagen in de verplaatsingsmatrix R $[-16..16,-16..16]$. Omdat het in figuur 4.6 weergegeven systeem gedigitaliseerd is, wordt de in (4.5) gedefinieerde autocorrelatiefunctie vereenvoudigd tot

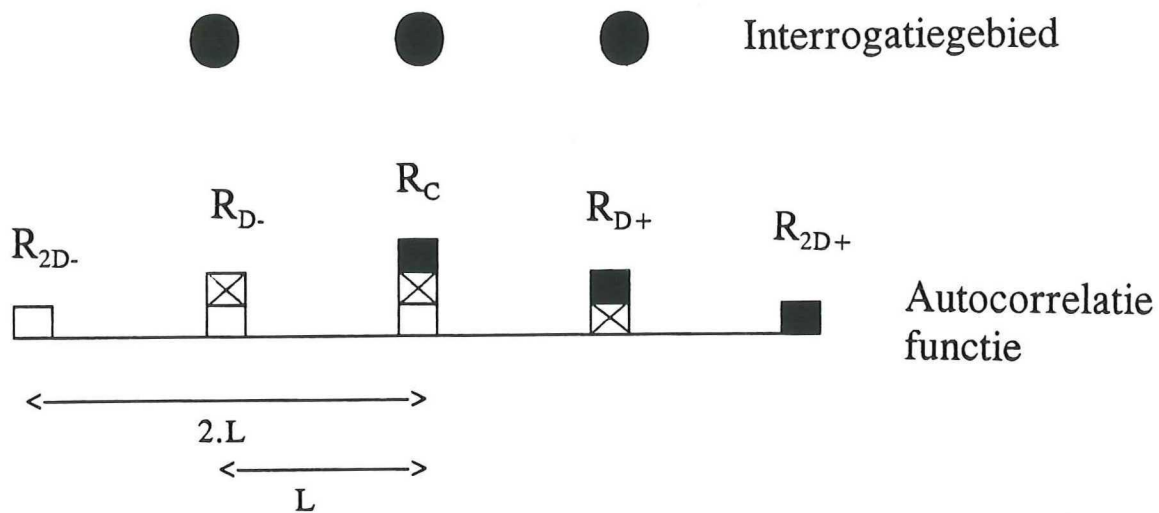
$$R_{s_x} = \sum_{i=1}^n I(x_i) I(x_i - s_x) \quad (4.11)$$

en

$$R_{s_y} = \sum_{i=1}^n I(y_i) I(y_i - s_y) \quad (4.12)$$

In deze vergelijkingen staat n voor het aantal pixels, in dit geval 16 maal 16. Op deze wijze ontstaat de in figuur 4.6 weergegeven autocorrelatiefunctie. De vorm is enigszins hoekig, omdat er bij digitale PIV slechts met discrete afstanden wordt gerekend. Optische PIV maakt gebruik van de in (4.5) gedefinieerde vergelijking en levert een autocorrelatiefunctie die veel glooier is. Het grote voordeel van de digitale PIV-analyse blijkt uit dit voorbeeld: het aantal uit te voeren berekeningen is in de orde van 16^4 , wat aanzienlijk minder rekentijd vergt dan het oplossen van relatie (4.5).

Zowel uit figuur 4.6 als uit figuur 4.7 kan geconcludeerd worden dat de autocorrelatiefunctie spiegelsymmetrisch is ten opzichte van respectievelijk het vlak $x=y$ en de lijn $x=0$. Deze symmetrie kan eenvoudig verklaard worden. Afbeelding i wordt gecorreleerd met afbeelding j , resulterend in een verplaatsing in x en y richting. Wordt afbeelding j daarna gecorreleerd met afbeelding i dan wordt dezelfde verplaatsing gevonden, maar met tegengesteld teken. Hieruit blijkt dat met behulp van de PIV-analyse alleen de *grootte* van de snelheidsvector bepaald kan worden. Voor de *richting* zijn twee mogelijkheden, die onderling 180° verschillen. Software-matig kan dan een



Figuur 4.7

Eén-dimensionaal voorbeeld van het principe van de autocorrelatie. Een zich in een rechte lijn bewegend deeltje is 3 maal afgebeeld. Aan de intensiteit van de pieken wordt bijgedragen door de 3 deeltjes. De witte hokjes zijn de bijdrage van de linker afbeelding, de gekruiste van het centrale deeltje en de zwarte van het rechter deeltje.

stromingsrichting gedefinieerd worden. Bij stromingen, waarin de richting varieert (zoals bij circulatielussen), levert de PIV-analyse in dat geval verkeerde resultaten. Extra bewerkingen, zoals vergelijking met de richting van de vectoren van de omringende interrogatiegebieden, kan dan uitkomst leveren.

In figuur 4.6 is duidelijk de centrale piek R_C te vinden, evenals de twee verplaatsingspieken R_{D+} en R_{D-} . Ook zijn er op de afstand $2s$ van de oorsprong nog twee kleinere pieken te vinden zijn. Deze pieken R_{2D+} en R_{2D-} zijn afkomstig van de correlatie van de eerste afbeelding van deeltje i met zijn derde corresponderende afbeelding. De overige kleine piekjes zijn door ruis veroorzaakte signalen. Deze ruis ontstaat doordat een afbeelding van een deeltje met de afbeelding van een niet corresponderend deeltje wordt gecorreleerd.

De intensiteit (= het volume) van de centrale piek R_C is in vergelijking met de andere optredende pieken altijd het hoogst. In dit specifieke voorbeeld is de intensiteit van de centrale piek gelijk aan het totaal aantal afbeeldingen, dus

$$R_C = N.B \quad (4.13)$$

De intensiteit van de verplaatsingspieken R_D wordt, zoals na te gaan is uit het voorbeeld in figuur 4.7, gegeven door

$$R_D = N.B. \frac{B-1}{B} \quad (4.14)$$

Bij optimale omstandigheden zal deze piek de één na hoogste piek van de autocorrelatiefunctie zijn. Onder minder optimale omstandigheden is het mogelijk dat de corresponderende afbeeldingen van een bepaald deeltje **buiten** het beschouwde interrogatiegebied vallen. Dit heeft weer tot gevolg dat de hoogte van de verplaatsingspiek afneemt en dat de ruis toeneemt. Ook is het mogelijk dat door de eerder beschreven fluctuaties in de snelheid de totale breedte van de centrale piek R_C vergroot wordt. Omdat het volume van de piek constant is, neemt de hoogte af. Uit de twee genoemde punten is te concluderen dat de signaalpiek in de ruis kan verdwijnen en op deze manier de betrouwbaarheid van de analyse verlaagt.

Het is daarom raadzaam een signaal/ruis-verhouding te geven bij elke analyse. Deze signaal/ruis-verhouding is volgens *Adrian [lit.6]* gedefinieerd als

$$\sigma_{SR} = \frac{R_D}{\max \{R_N\}} \quad (4.15)$$

Vergelijking (4.15) relateert de hoogte van de signaalpiek aan de hoogste ruispiek. De waarde σ_{SR} geeft de betrouwbaarheid van de meting. Afhankelijk van de omstandigheden waaronder het stromingsveld bepaald wordt, kan besloten worden waarden te verwerpen, die onder een bepaalde σ_{SR} komen. *Adrian [lit.5]* houdt een minimale waarde van 1.2 aan voor de omstandigheden, die deze auteur bestudeerd heeft. Zonder a priori kennis van de verplaatsing \underline{s} zal de signaal/ruis-verhouding volgens (4.15) altijd groter dan 1 zijn, de hoogste piek wordt altijd gezien als de dominante verplaatsingspiek. Is de verplaatsing \underline{s} bij benadering bekend, dan hoeft de signaalpiek niet in het volledige domein $R(u,v)$ gezocht te worden, maar slechts in het domein $\underline{s} \pm \Delta\underline{s}$. De kans op het treffen van de R_D is dan groter [lit.5].

Pickering [lit.3] definieert de signaal/ruis-verhouding als

$$\sigma_{SR} = 20 \cdot \log \left[\frac{R_C}{\max \{R_N\}} \right] \quad (4.16)$$

In (4.16) wordt σ_{SR} gerelateerd aan de hoogte van de centrale piek R_C . De intensiteit van de sterkste ruispiek zal per definitie altijd groter zijn dan $2k^2R_{PP}(0,0)$. Hieruit volgt voor de maximale signaal/ruis-verhouding

$$\sigma_{SR} \leq 20 \cdot \log \left[\frac{N}{2} \right] \quad (4.17)$$

Nadere beschouwing van (4.16) en (4.17) toont dat als $N=1$ er geen ruis is en de signaal/ruis-verhouding oneindig is. Als $N=2$ is σ_{SR} gelijk aan 0, wat een indicatie is dat de meting niet betrouwbaar is.

De intensiteit van de totale ruis, die optreedt in het eerder beschreven voorbeeld, is te bepalen uit de totale intensiteit van de autocorrelatiefunctie minus de intensiteit van de niet als ruis bestempelde pieken. Het totaal aantal mogelijke correlaties is $B^2 \cdot N^2$. Er worden immers $B \cdot N$ afbeeldingen vergeleken met $B \cdot N$ afbeeldingen. De centrale piek heeft, zoals vermeld, een intensiteit van $N \cdot B$. Hieruit volgt dat de intensiteit van de ruis gegeven wordt door de totale intensiteit, minus de intensiteit van de centrale piek, minus de intensiteit van de twee verplaatsingspieken R_{D+} en R_{D-} :

$$R_n = N^2 \cdot B^2 - N \cdot B - 2 \cdot N \cdot (B - 1) \quad (4.18)$$

De *fractie* ruis in een PIV-analyse volgt door de intensiteit R_N te delen door de totale intensiteit R . Dit levert

$$\frac{R_n}{R} = 1 - \frac{3}{N \cdot B} + \frac{2}{N \cdot B^2} \quad (4.19)$$

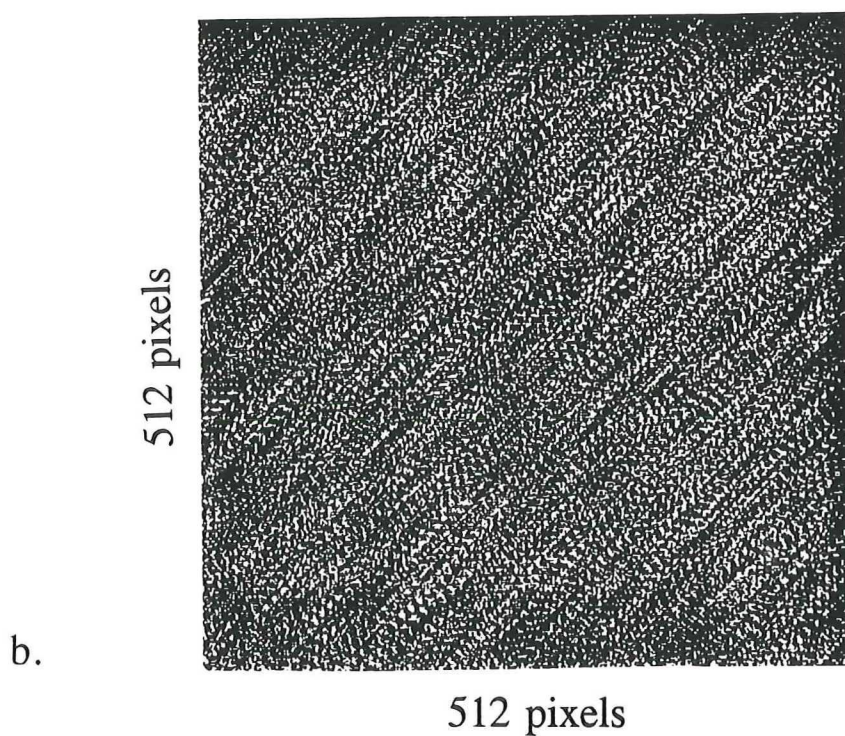
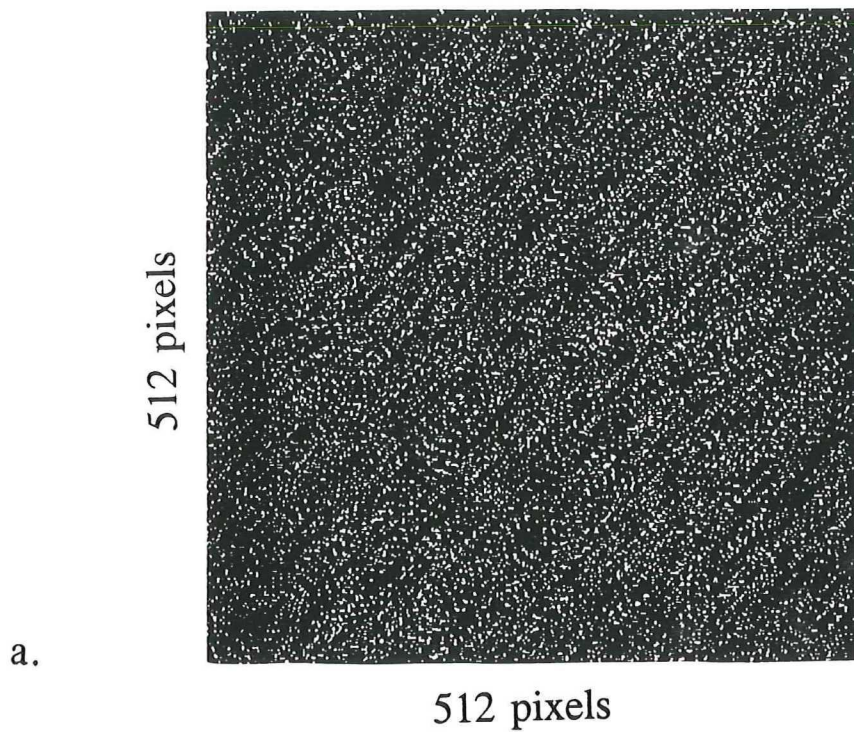
De in (4.19) gedefinieerde ruisfractie is bij gegeven N en B de laagst mogelijke waarde. In experimentele omstandigheden zal het namelijk voorkomen dat de eerste en de tweede afbeelding van een bepaald deeltje niet in het zelfde interrogatiegebied liggen. Dit heeft verhoging van de ruisfractie tot gevolg. Wat uit vergelijking (4.19) ook opvalt, is toename van de ruisfractie bij een toenemend aantal afbeeldingen.

PIV-opnames die meer dan twee maal belicht zijn, vertonen in de analyse, zoals vermeld, een tweede verplaatsingspiek op de afstand $2s$. Deze piek zal over het algemeen hoger zijn dan de gemiddelde ruispiek. De signaal/ruis-verhouding kan dan voor een dergelijke opname gegeven worden door de verhouding van R_D en R_{2D} :

$$\sigma_{sr} = \frac{N \cdot (B - 1)}{N \cdot (B - 2)} \quad (4.20)$$

Ook hier moet gezegd worden, dat dit geldt voor ideale omstandigheden. De kans dat een afstand $2s$ of hoger wordt gedetecteerd in een interrogatiegebied is vanzelfsprekend kleiner dan dat de afstand s gedetecteerd wordt. Vandaar zal de signaal/ruis-verhouding in de praktijk hoger zijn dan de door relatie (4.20) gegeven waarde.

Uit dit hoofdstuk blijkt dat er bepaalde parameters zijn, die de uitkomsten van een PIV-analyse gunstig dan wel ongunstig kunnen beïnvloeden. In het volgende hoofdstuk zal op deze parameters nader ingegaan worden.



Figuur 5.1

Gesimuleerde PIV-opnamen.

a) $N = 10000$, $B = 2$.

b) $N = 20000$, $B = 4$.

De ingestelde snelheid \underline{v} is voor beide afbeeldingen gelijk aan $(6,6)$ pixels per tijdseenheid.

Hoofdstuk 5.

Parameteranalyse voor de PIV

In het vorige hoofdstuk is de theorie van de PIV-analyse beschreven. Ter sprake is gekomen dat de resultaten van de analyse sterk afhangen van de experimentele omstandigheden. Geconcludeerd werd dat de volgende vijf parameters invloed kunnen uitoefenen op de uitkomst van de analyse:

1. Het aantal deeltjes dat zich in een interrogatiegebied bevindt.
2. Het aantal maal dat een deeltje op de fotografische plaat afgebeeld wordt.
3. De tijd tussen twee afzonderlijke belichtingen.
4. Het optreden van snelheidsgradiënten in het beschouwde interrogatiegebied.
5. De intensiteitsfunctie $P(x,y)$.

Voor al deze parameters zal een optimale instelling bestaan. In dit hoofdstuk zal elk van de vijf genoemde punten aan een nadere beschouwing onderworpen worden.

Door het grote aantal uit te voeren analyses is een dergelijk onderzoek via experimentele weg ondoenlijk. Er is daarom een programma geschreven, dat PIV-opnames van 512 bij 512 pixels kan simuleren. De vijf hierboven genoemde parameters kunnen in het programma gevarieerd worden. In figuur 5.1 zijn twee PIV-opnames getoond, die met dit programma gesimuleerd zijn. Voor nadere informatie betreffende deze software en de programmatuur, waarmee de afgebeelde autocorrelatiefuncties zijn bepaald, wordt verwezen naar bijlage 5. De afstand, die een deeltje tussen twee belichtingen aflegt, heeft een discrete waarde (uitgedrukt in pixels) en wordt niet beïnvloed door ruis.

De gevolgen die een bepaalde parameterinstelling heeft op de resultaten kan op twee verschillende manieren bestudeerd worden. Allereerst is er de in hoofdstuk 4 gedefinieerde signaal/ruis-verhouding σ_{SR} (vergelijkingen (4.15) en (4.16)). Indien de waarde voor een bepaalde parameterinstelling te laag wordt, kan deze instelling worden verworpen.

Indien er bij de simulatie een constante snelheid \underline{w} ingesteld wordt (constant in het *hele* stromingsveld), kan als tweede toetsing de gemiddelde afwijking van deze ingestelde snelheid \underline{w} genomen worden. Dit komt neer op de volgende vergelijkingen

$$\epsilon_x = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ix} - w_x)^2}}{n} \quad (5.1a)$$

en

$$\epsilon_y = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{iy} - w_y)^2}}{n} \quad (5.1b)$$

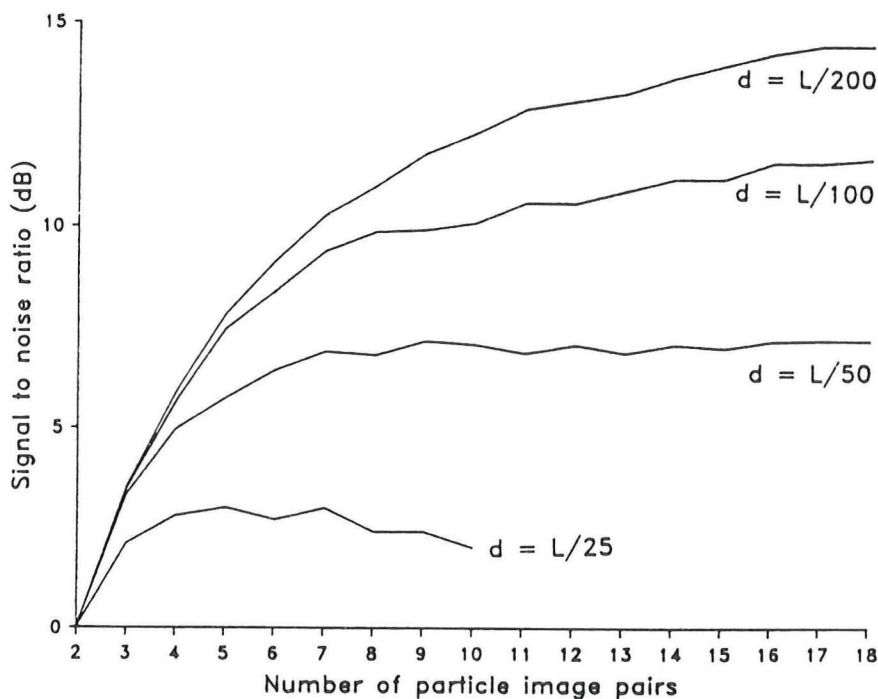
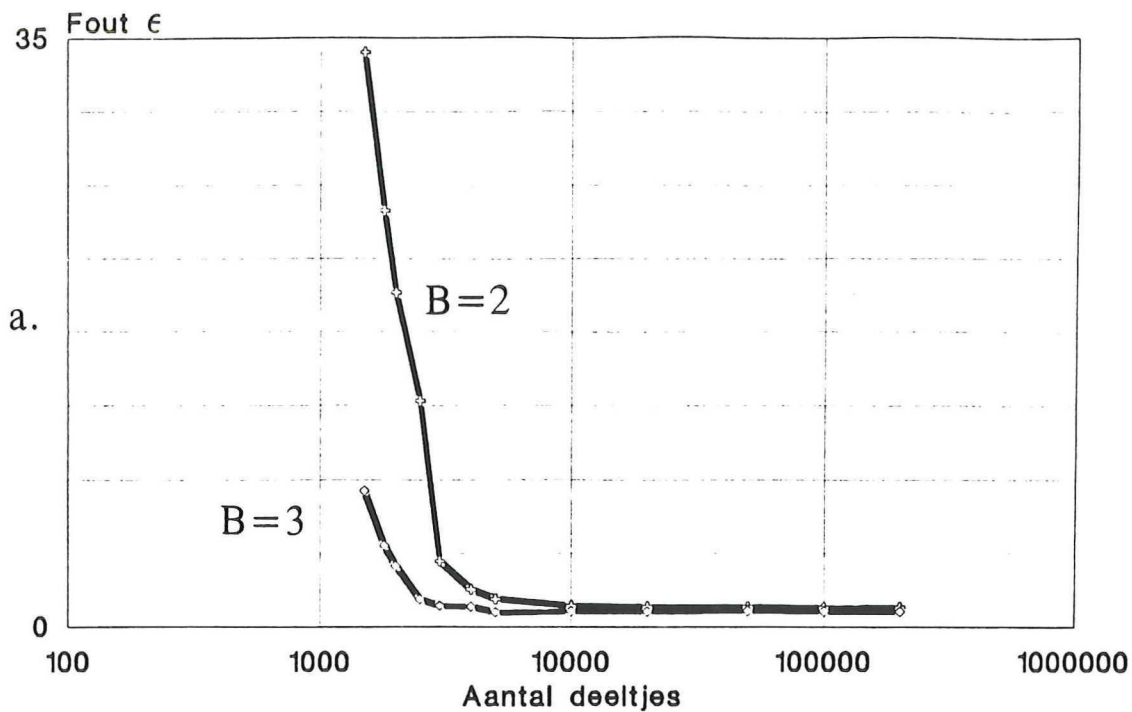
Het absolute verschil tussen het resultaat van de PIV-analyse en de instelling wordt gesommeerd over het totaal aantal beschouwde interrogatiegebieden n en daarna gemiddeld. De totale fout ϵ volgt daarna uit

$$\left(\frac{\epsilon}{w}\right)^2 = \left(\frac{\epsilon_x}{w_x}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_y}{w_y}\right)^2 \quad (5.2)$$

Op deze wijze wordt een beeld gegeven welke gevolgen een bepaalde parameterinstelling voor de analyse kan hebben.

In de nu volgende paragrafen zal nader ingegaan worden op de verschillende parameters. De digitale PIV-analyses zullen verricht worden met het programma *ScanA*. Over het gebruik van dit programma en de gebruikte instellingen kan informatie gevonden worden in bijlage 3.

Tijdens de parameteranalyse is gewerkt met interrogatiegebieden met een grootte van 32 bij 32 pixels. Het volgende interrogatiegebied is gelegen op een afstand van 16 pixels van de voorgaande en overlapt de helft van het voorgaande gebied. Op deze manier wordt zoveel mogelijk informatie van de afbeelding gebruikt [lit. 4].



Figuur 5.2

- a. De fout ϵ als functie van het aantal deeltjes in de afbeelding voor een twee en drie maal belicht systeem.
- b. De signaal/ruis-verhouding berekend volgens *Pickering*. De waarde d geeft de spreiding van de intensiteitsfunctie P ten opzichte van de afmeting L van het interrogatiegebied.

5.1. De invloed van de deeltjesdichtheid op de analyse

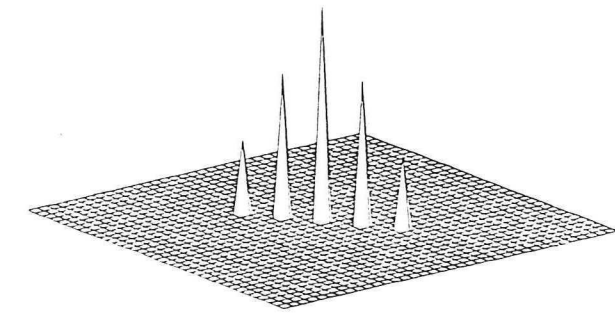
Zoals bekend wordt bij de PIV-analyse de binnen een interrogatiegebied heersende snelheid bepaald door de afstand tussen twee corresponderende afbeeldingen te bepalen. De grootte van deze afstand wordt beïnvloed door statistische fluctuaties in de stroming en het optreden van snelheidsgradiënten.

Elk paar corresponderende belichtingen draagt bij aan de opbouw van de verplaatsingspiek R_D , zoals in hoofdstuk 4 is afgeleid. De schatting van de gemiddelde verplaatsing μ_D wordt vervolgens bepaald met behulp van vergelijking (4.10). De vorm van de verplaatsingspiek R_D en de schatting μ_D zijn afhankelijk van de in de stroming optredende fluctuaties. De piek R_D zal scherper zijn bij een groot aantal deeltjes, omdat de fluctuaties dan uitmiddelen. De fout in de verplaatsing μ_D is dus omgekeerd evenredig met het aantal corresponderende afbeeldingen. Hieruit kan geconcludeerd worden, dat de analyse *nauwkeuriger* wordt bij een toenemende deeltjesdichtheid.

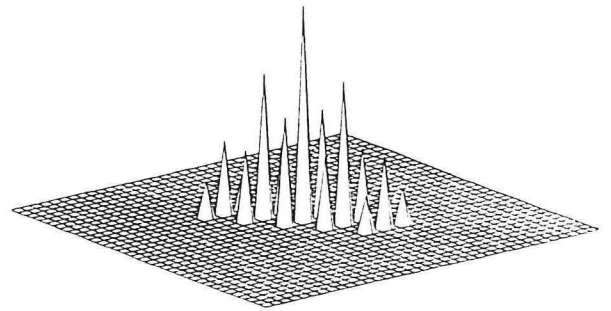
Deze conclusie wordt bevestigd door de simulaties. In figuur 5.2^a staat de fout, berekend volgens vergelijking (5.1), uitgezet als functie van de deeltjesdichtheid. In de figuur is te zien dat voor een twee maal belicht systeem de fout niet meer noemenswaardig verandert bij $N \approx 5400$ per afbeelding van 512 bij 512 pixels. Dit komt neer op gemiddeld 21 deeltjes per interrogatiegebied. Deze waarden zijn in overeenstemming met de literatuur. *Adrian [lit.5]* geeft als minimale hoeveelheid voor een goede analyse 10 à 20 deeltjes per interrogatiegebied. Volgens deze auteur is de nauwkeurigheid van de analyse bij deze deeltjesdichtheid groter dan 95%.

Zoals uit figuur 5.2^a blijkt, vertoont de drie maal belichte opname een lagere fout bij een gegeven deeltjesdichtheid. Een drie maal belichte opname heeft voor een gegeven N immers twee maal zoveel gepaarde afbeeldingen dan een twee maal belichte opname. Vanaf $N \approx 2500$ verandert de fout niet meer noemenswaardig.

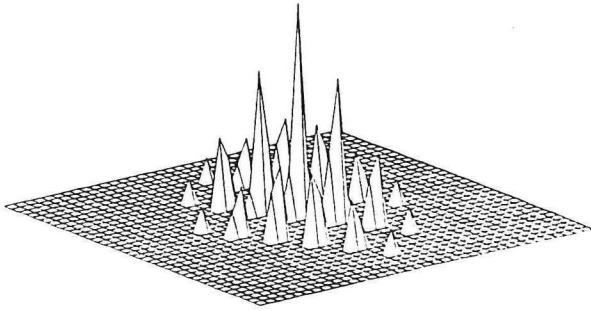
De signaal/ruis-verhouding blijkt toe te nemen met het aantal deeltjes. Dit is onder andere te zien in figuur 5.2^b, waar de simulaties van *Pickering [lit.3]* staan weergegeven. In deze figuur staat de signaal/ruis-verhouding, berekend volgens vergelijking (4.16) uitgezet als functie van de deeltjesdichtheid N voor verschillende waarden van de intensiteitsfunctie $P(x,y)$. De waarde d staat voor de breedte van deze Gauss-kromme op afstand $1/e$ van het maximum van $P(x,y)$; L staat voor de afmeting van het interrogatiegebied.



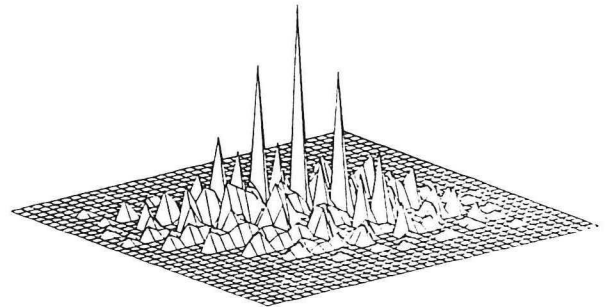
$N = 1$



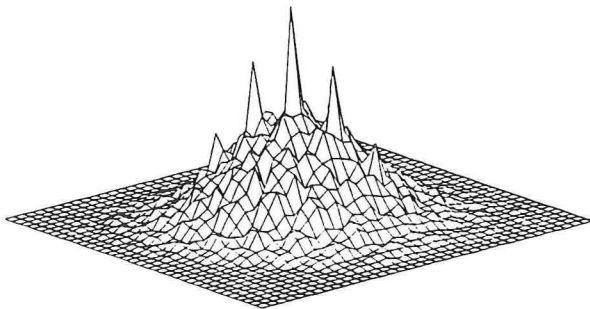
$N = 2$



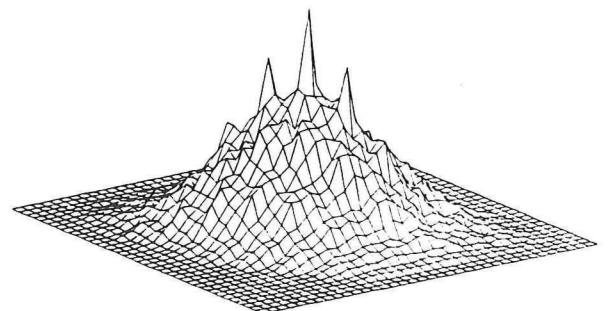
$N = 3$



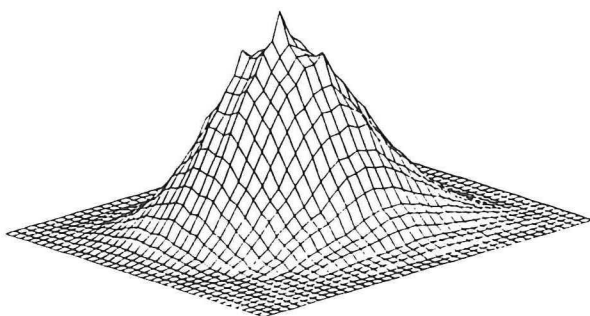
$N = 10$



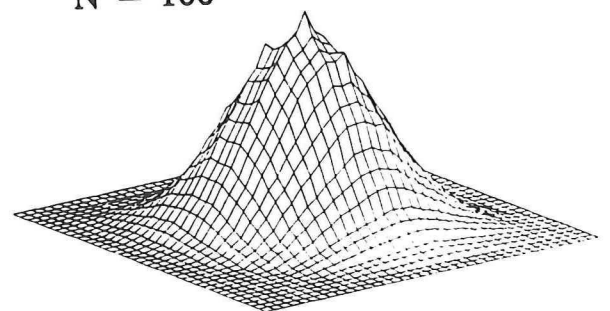
$N = 50$



$N = 100$



$N = 500$



$N = 1000$

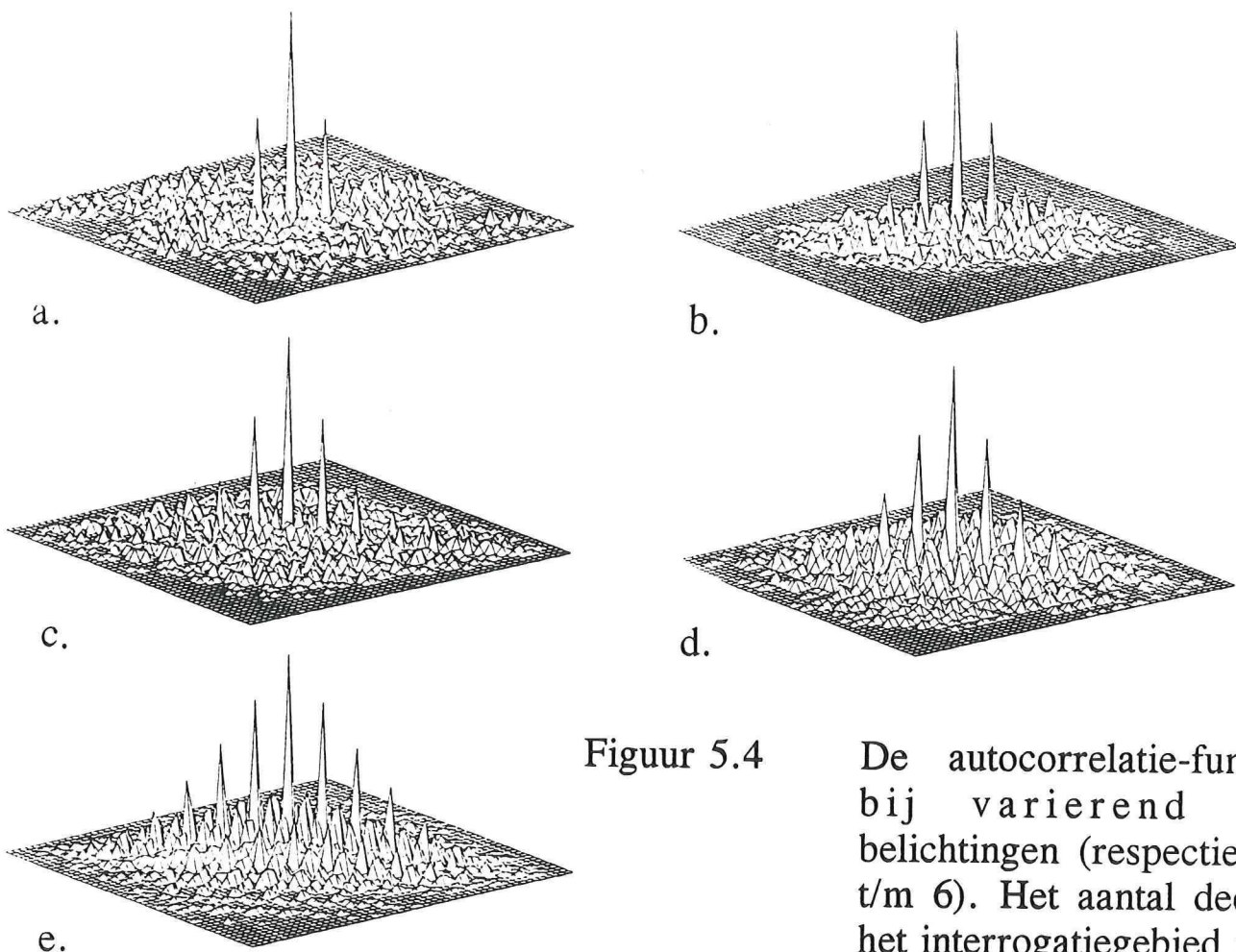
Figuur 5.3

De autocorrelatiefunctie R van een drievoudig belicht systeem. Het aantal deeltjes in het beschouwde interrogatiegebied is variabel.

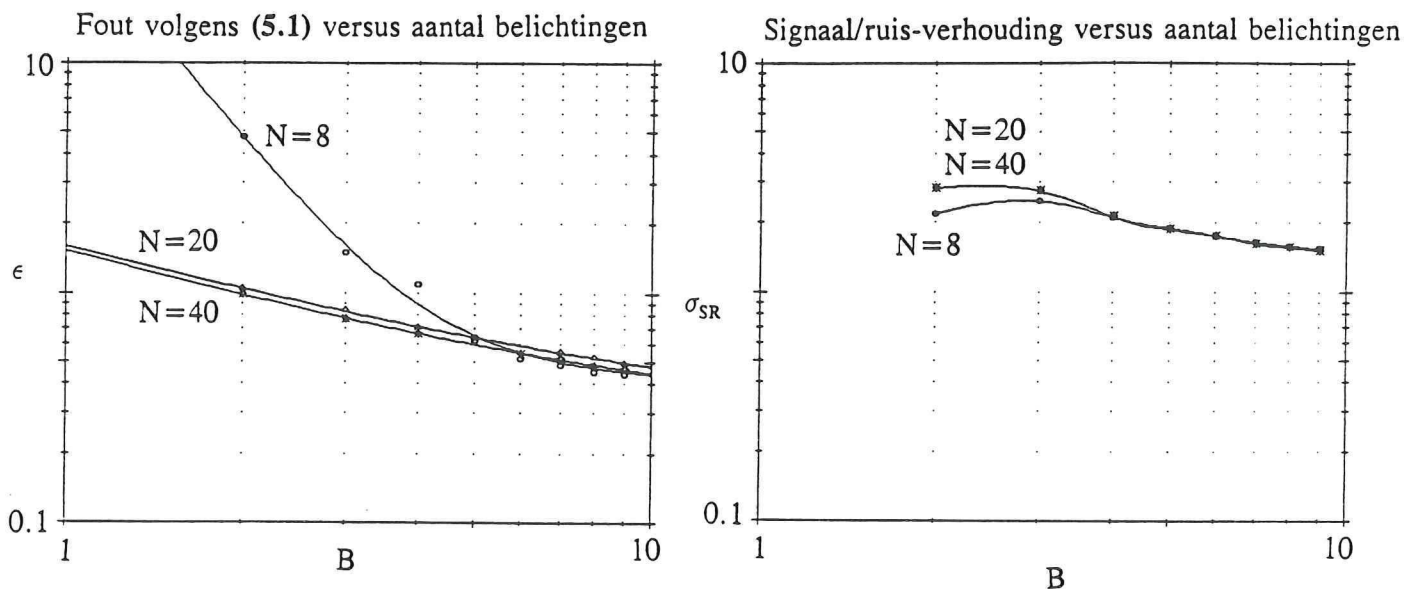
Het stijgen van de signaal/ruis-verhouding kan als volgt worden ingezien. De intensiteit van de signaalpieken stijgt evenredig met het aantal afgebeelde paren (vergelijking (4.14)), de intensiteit van de ruis neemt volgens (4.18) kwadratisch toe. De ruispieken R_N zijn echter verdeeld over het hele verplaatsingsdomein en zullen in eerste instantie minder sterk toenemen dan de verplaatsingspiek. Omdat de foto gedigitaliseerd is en de verplaatsing hierdoor is gediscretiseerd, zal, indien het aantal afbeeldingen groot wordt, de intensiteit van de ruispieken R_N sterk toenemen ten opzichte van de verplaatsingspiek R_D en de toename van de signaal/ruis-verhouding remmen. Dit wordt verduidelijkt in figuur 5.3, waarin de autocorrelatiefunctie als functie van het aantal deeltjes uitgezet staat voor een drievoudig belicht systeem met snelheid $\underline{v}=(3,2)$.

Indien het aantal deeltjes per interrogatiegebied gelijk is aan 1 treedt er geen ruis op. De afbeeldingen worden immers alleen met corresponderende afbeeldingen gecorreleerd. Hoewel er geen ruis aanwezig is, is de schatting μ_D niet nauwkeurig omdat de waarde direct afhankelijk is van een toevallige fluctuatie in de stroming. Bij $N=2$ treden ruispieken op, omdat het interrogatiegebied nu ook onafhankelijke afbeeldingen bevat. Bij waarden tot ruwweg $N=10$ neemt de intensiteit van signaalpieken R_D en R_{2D} toe ten opzichte van de intensiteit van de hoogste ruispiek.

Omdat de schatter μ_D nauwkeuriger wordt bij een groot aantal deeltjes, zou men kunnen concluderen dat een groot aantal deeltjes tot een optimaal resultaat kan leiden. Een nadeel van een grote deeltjesdichtheid is dat er op een gegeven moment sprake is van een duidelijke tweefasenstroming. De deeltjes kunnen de oorspronkelijke stroming dan verstoren (zie hoofdstuk 3).



Figuur 5.4 De autocorrelatie-functie R bij varierend aantal belichtingen (respectievelijk 2 t/m 6). Het aantal deeltjes in het interrogatiegebied is 20.



Figuur 5.5 De fout ϵ en de signaal/ruis-verhouding σ_{SR} voor meervoudig belichte systemen. Het aantal deeltjes per interrogatiegebied is respectievelijk 8, 20 en 40. De analyses zijn uitgevoerd over 841 interrogatiegebieden van 32 bij 32 pixels.

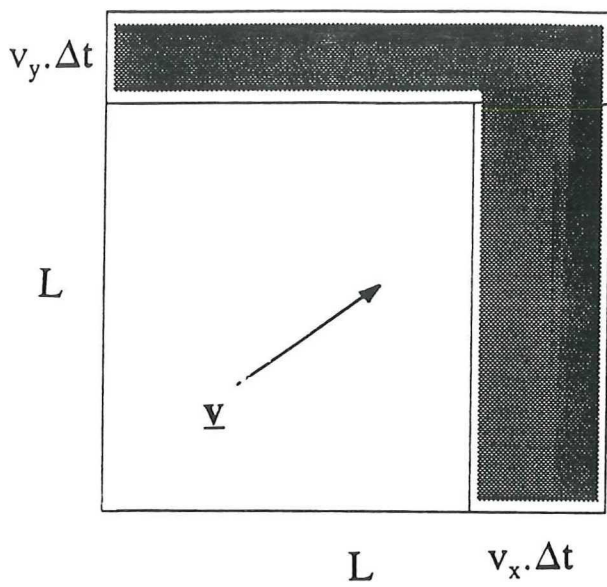
5.2. De invloed van het aantal belichtingen

Elke belichting levert een extra set gegevens voor de schatting van de snelheid \underline{v} , omdat na elke belichting het aantal gecorrleerde afbeeldingen met het aantal deeltjes N toeneemt. In analogie met wat in paragraaf 5.1 is behandeld, neemt de nauwkeurigheid waarmee $\underline{\mu}_D$ geschat wordt toe met het aantal afbeeldingen. Het aantal belichtingen B heeft voor de autocorrelatiefunctie als direct gevolg het ontstaan van $2B-1$ signaalpieken. Eén van deze pieken is de in de oorsprong $(0,0)$ gelegen centrale piek R_C , de overige pieken corresponderen met de afstanden \underline{s} tot en met $B*\underline{s}$ (de pieken R_D tot en met R_{BD}). Dit staat geïllustreerd in figuur 5.4. In deze figuur staat de autocorrelatiefunctie R uitgezet bij een variërend aantal belichtingen B . Het aantal deeltjes N per interrogatiegebied is 20. Het interrogatiegebied zelf is opgebouwd uit een rooster van 20 bij 20 pixels. De intensiteit van de verplaatsingspiek R_D neemt bij toenemend aantal belichtingen toe ten opzichte van de centrale piek R_C , zoals te concluderen valt uit vergelijkingen (4.13) en (4.14). Ook in figuren 5.4^a t/m 5.4^e is dit te zien.

Met behulp van simulaties is bepaald hoe de fout ϵ van het aantal belichting afhangt. Uit figuur 5.5^a blijkt dat bij ongeveer 20 afgebeelde deeltjes de fout niet meer noemenswaardig afneemt.

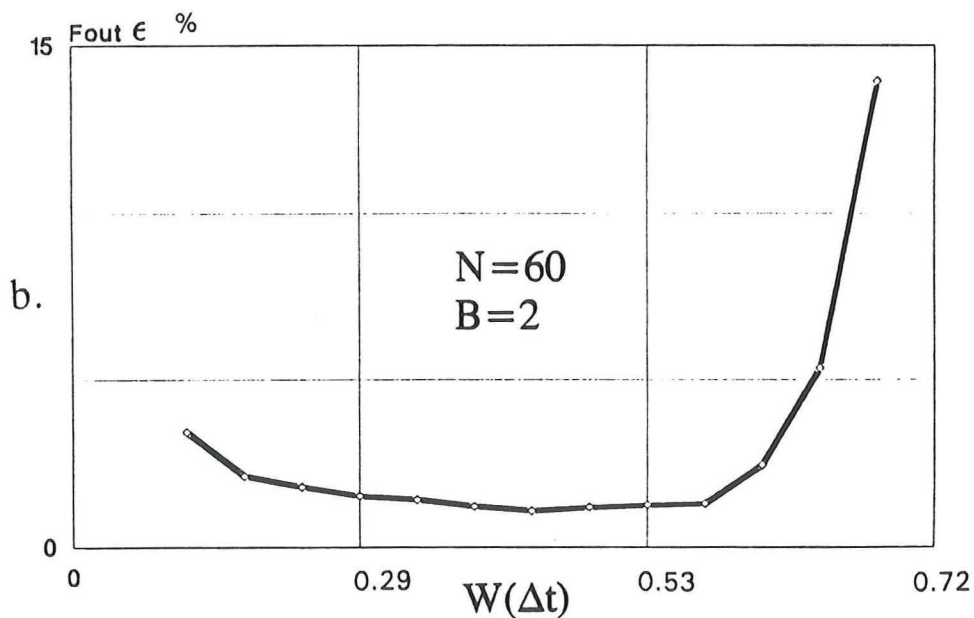
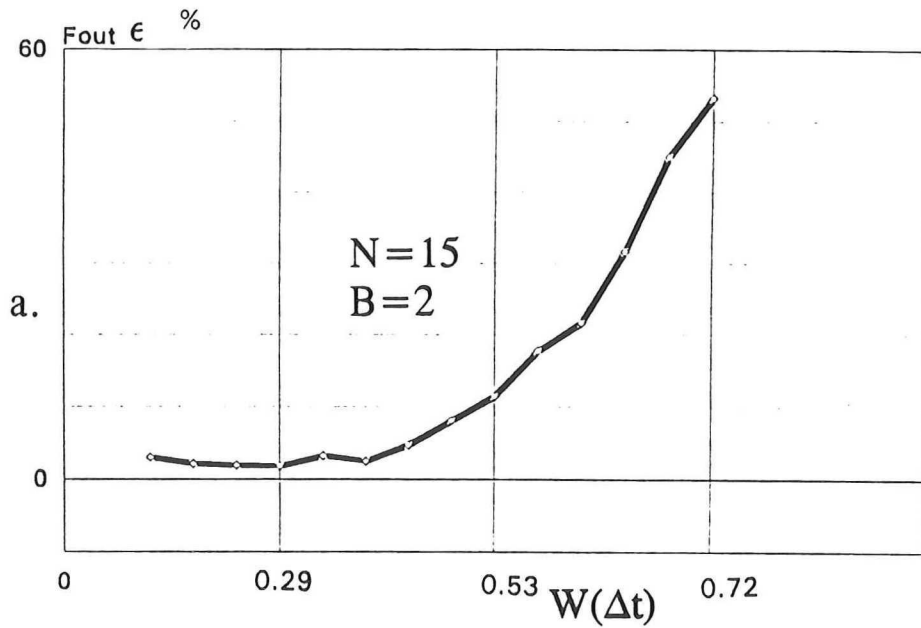
De signaal/ruis-verhouding neemt bij een toenemend aantal belichtingen af, hetgeen blijkt uit figuur 5.5^b. Dit is in overeenstemming met wat in hoofdstuk 4 is afgeleid. De piek, die correspondeert met twee maal de afgelegde verplaatsing \underline{s} , is de twee na hoogste piek van de autocorrelatiefunctie R . Deze piek wordt dan ook gedetecteerd als de hoogste ruispiek, resulterend in een signaal/ruis-verhouding gegeven door vergelijking (4.18).

Over het algemeen kan gesteld worden dat een hoog aantal belichting een betere schatting van $\underline{\mu}_D$ geeft. Ten eerste bevat het interrogatiegebied meer gepaarde afbeeldingen (evenredig met B), ten tweede neemt de intensiteit van de verplaatsingspiek R_D toe ten opzichte van het gemiddelde ruissignaal, waardoor R_D beter te detecteren is. Een nadeel van het opvoeren van de belichtingen is (indien de tijd Δt tussen twee afzonderlijke belichtingen constant gehouden wordt), dat het beschouwde interrogatiegebied een tijdopname is van $(B-1)*\Delta t$ seconde. Vooral als er sprake is van een instationaire stroming, kan de stroming in het genoemde tijdsinterval wat betreft grootte en richting sterk veranderen. Dit kan weer tegemoet gekomen worden door de tijd Δt te verkleinen. Hierop zal in de volgende paragraaf worden ingegaan.



Figuur 5.6

De fractie deeltjes die in het tijdverschil Δt het interrogeringsgebied verlaat.



Figuur 5.7

De fout ϵ in de schatter μ_D volgens (5.1) als functie van de parameter $W(\Delta t)$. De afmeting van het beschouwde interrogeringsgebied is 32 bij 32 pixels.

5.3. De invloed van de flitstijd

De tijd tussen twee belichtingen, de flitstijd, is een zeer belangrijke parameter, omdat deze waarde direct gecorreleerd is aan de snelheid van het beschouwde systeem en de grootte van het interrogatiegebied.

Een interrogatiegebied met afmetingen L bij L bevat N deeltjes bewegend met de snelheid \underline{v} . Gedurende de periode Δt verwijderen de deeltjes die zich op een afstand kleiner dan $\underline{v} \cdot \Delta t$ van de rand bevinden zich *uit* het interrogatiegebied. In figuur 5.6 staat dit geïllustreerd. De fractie deeltjes $W(\Delta t)$, die uit het interrogatiegebied treden (geërceerd in de figuur), volgt uit

$$W(\Delta t) = 1 - \frac{[L - |v_x| \Delta t] [L - |v_y| \Delta t]}{L^2} \quad (5.3)$$

In het zelfde tijdsinterval komen vanuit de aangrenzende interrogatiegebieden evenveel deeltjes binnen als er het gebied verlaten. Het totaal aantal afgebeelde deeltjes is voor een tweevoudig belicht systeem dus gelijk aan $2N$.

Het aantal afbeeldingen dat een corresponderende afbeelding *in* het interrogatiegebied heeft, is hierdoor gelijk aan

$$N_{\text{signaal}} = 2N(1 - W(\Delta t)) \quad (5.4)$$

Het aantal 'alleen staande', ruis veroorzakende afbeeldingen volgt door het aantal uit (5.3) van het totaal aantal deeltjes af te trekken:

$$N_{\text{ruis}} = 2N - 2N(1 - W(\Delta t)) = 2NW(\Delta t) \quad (5.4)$$

Uit relatie (5.3) en (5.4) blijkt dat bij een toenemende $W(\Delta t)$ het aantal gepaarde afbeeldingen afneemt en de ruis toeneemt.

Geconcludeerd kan worden dat de tijd tussen twee belichtingen zo klein mogelijk moet zijn. Zoals uit de volgende paragraaf zal blijken, moet wat betreft de keuze van Δt enkele punten in ogenschouw genomen worden.

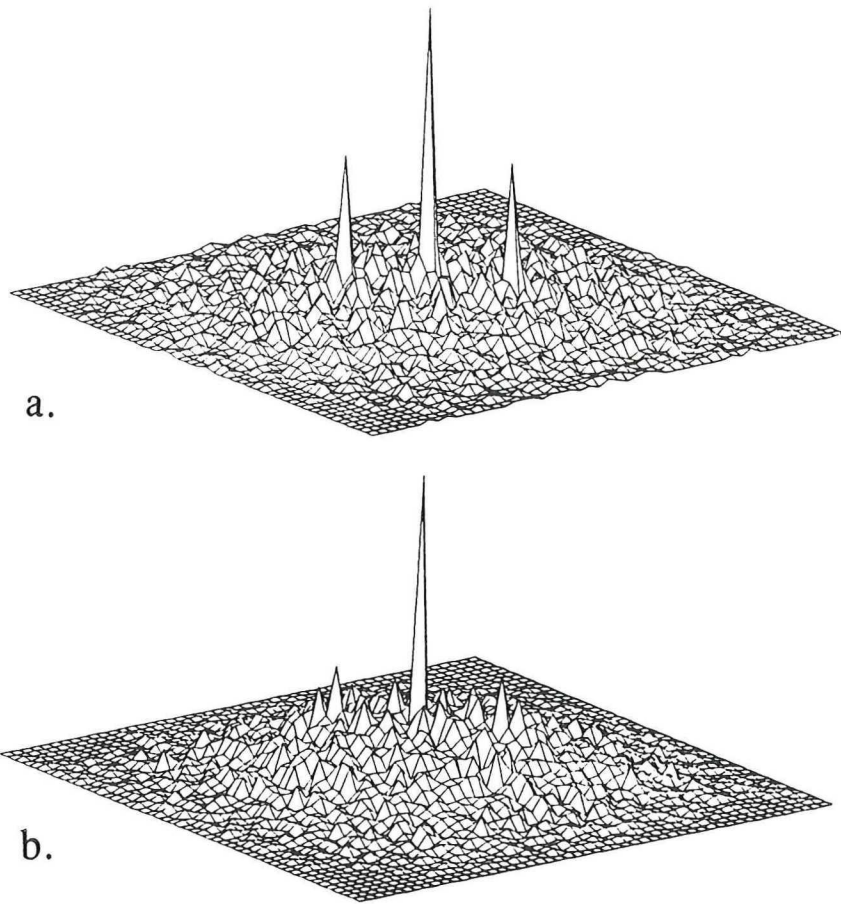
5.3.1. Voorwaarden voor de flitsfrequentie

De keuze van de flitstijd is direct afhankelijk van de diameter van de afbeeldingen. Het zal duidelijk zijn dat de vastgelegde verplaatsing groter moet zijn dan de deeltjesdiameter. Als dit niet het geval is, zullen de twee corresponderende afbeeldingen elkaar overlappen en kan er geen verplaatsing vastgesteld worden. Nu kan er niet eenvoudig gesteld worden dat de minimale flitstijd gelijk is aan het deeltjesdiameter gedeeld door de snelheid. In de praktijk blijken deeltjes, doordat ze naar alle kanten het opgestraalde licht verstrooien, groter afgebeeld te worden dan ze in werkelijkheid zijn (vergelijk de intensiteitsfunctie $P(x,y)$ in hoofdstuk 4). *Adrian [lit.6]* gaat gedetailleerd op dit onderwerp in. Als vuistregel kan gesteld worden, dat een deeltje twee maal groter dan de werkelijkheid wordt afgebeeld.

Verder is er nog een tweede punt dat aandacht verdient: indien de verplaatsingspiek te dicht bij de centrale piek ligt is detectie van deze piek zo goed als onmogelijk. Daarom wordt als stelregel genomen dat de basis van de verplaatsingspiek minimaal twee pixels verwijderd is van de basis van de centrale piek (zie *lit[4]*).

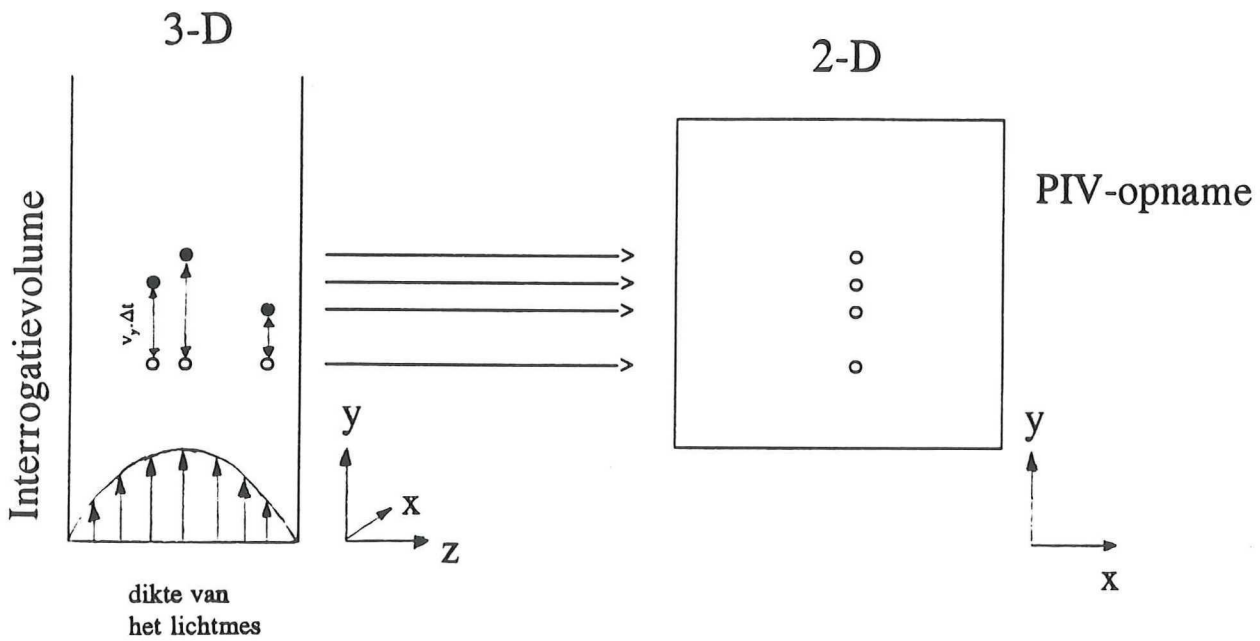
Met behulp van simulaties is vervolgens nagegaan welke invloed de flitstijd op de resultaten heeft. Als variabele werd de in vergelijking (5.4) gedefinieerde fractie $W(\Delta t)$ gekozen. De optredende fout, de afwijking van de ingestelde snelheid \underline{w} , werd berekend met relatie (5.1). De analyse werd uitgevoerd met twee deeltjesdichtheden, $N=15$ en $N=60$ deeltjes per interrogatiegebied. De resultaten staan uitgezet in figuur 5.7. Bij een verplaatsing van 1 pixel, treedt er een grote fout op. De verplaatsingspiek R_D verdwijnt dan in de centrale piek R_C en kan niet gezien worden als een onafhankelijk signaal.

Uit de simulaties blijkt dat er een instelling bestaat, die een minimum in de fout tot gevolg heeft. Deze waarde ligt bij $W(\Delta t) \approx 0.35$ en blijkt sterk gevoelig van het aantal deeltjes in het interrogatiegebied. Dit is begrijpelijk, omdat de fout groter wordt naarmate er meer deeltjes het interrogatiegebied verlaten. *Adrian [lit.5]* geeft aan dat om een goede PIV-analyse te verkrijgen (bij de instelling $N=20$ en $B=2$) $W(\Delta t)$ kleiner moet zijn dan 0.32. Dit komt redelijk overeen met de experimenteel gevonden waarden.



Figuur 5.8

Een systeem zonder (a) en met (b) een snelheidsgradiënt. Duidelijk blijkt dat als er een snelheidsgradiënt optreedt de hoogte van de verplaatsingspiek R_D afneemt.



Figuur 5.9

De gevolgen van een snelheidsgradiënt in de diepte. Door de gradiënt wordt de verplaatsingspiek R_D verbreed.

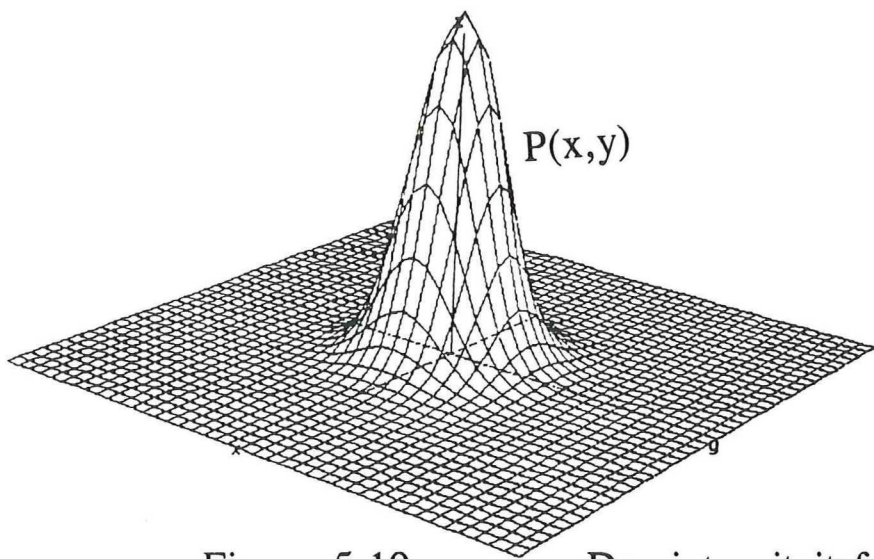
5.4 De invloed van een snelheidsgradiënt

Voor het bepalen van de afgelegde afstand bij de PIV analyse wordt de positie van de centrale piek vergeleken met de één na hoogste piek. Het verschil van beiden levert de schatter μ_D en daarmee de verplaatsingsvector \underline{s} . Indien de snelheid in het interrogeringsgebied *niet* uniform is en er sprake is van een gradiënt in x, y of z-richting, wordt de schatting van μ_D bemoeilijkt. De verplaatsingspiek R_D zal door de gradiënten immers verbreden en als gevolg daarvan lager worden. Dit staat in figuur 5.8 geïllustreerd. Door het optreden van de gradiënt dreigt R_D in de ruis te verdwijnen.

Als een parabolisch snelheidsprofiel in de y-richting wordt verondersteld, dan wordt de snelheidsverdeling beschreven als:

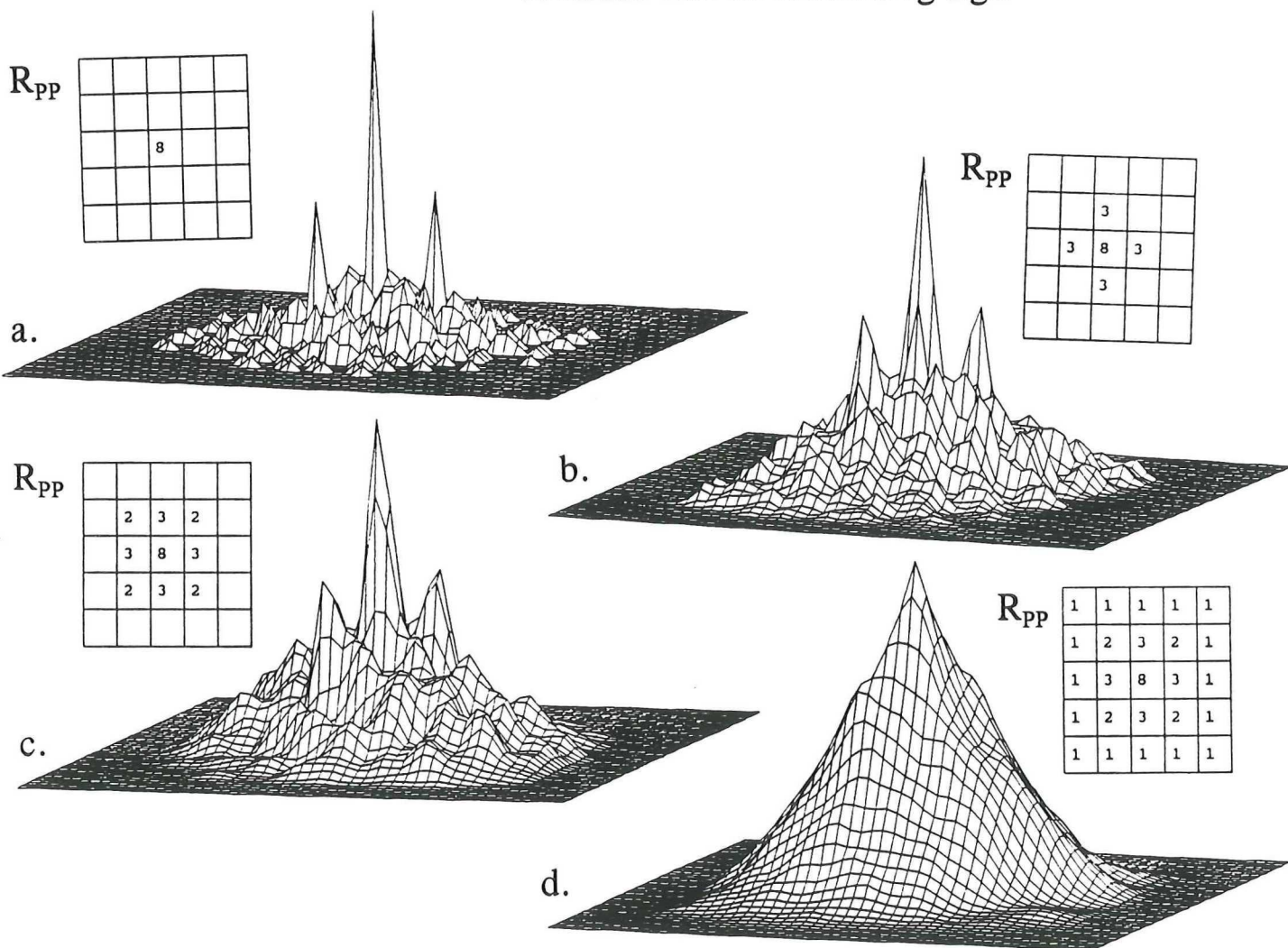
$$v(z) = \frac{3}{2} \langle v \rangle - \frac{6 \langle v \rangle z^2}{d^2} \quad (5.6)$$

Hierin is d de diepte van het interrogerings gebied en $\langle v \rangle$ gemiddelde snelheid. De coördinaat y heeft een waarde tussen $[-\frac{1}{2}d, \frac{1}{2}d]$. Uit vergelijking (5.6) blijkt dat er in de diepte sprake is van een gradiënt. Wat dit voor gevolgen kan hebben voor de PIV-analyse blijkt uit figuur 5.9. Vanzelfsprekend kan ook, afhankelijk van de aard van het stromingsveld, in de lengte- en breedterichting een gradiënt optreden. De effecten van deze gradiënten kunnen verholpen worden door de interrogeringsgebieden niet te groot te kiezen, het effect van de gradiënt in de diepte wordt verminderd door een smalle lichtbundel te gebruiken.



Figuur 5.10

De intensiteitsfunctie $P(x,y)$. Deze functie beschrijft hoe de doorlaatbaarheid $\tau(x,y)$ is verdeeld over een afgebeeld deeltje. Normaal gesproken vertoont de functie een Gaussvormig gedrag waarbij het maximum in het centrum van de afbeelding ligt.



Figuur 5.11

Autocorrelatiefuncties van een systeem met variabele $P(x,y)$. De digitaliseerde vorm van $P(x,y)$, R_{PP} , is bij elke functie getoond. ($N=30$, $B=2$).

5.5 De invloed van de intensiteitsfunctie $P(x,y)$

De intensiteitsfunctie $P(x,y)$ beschrijft hoe de doorlaatbaarheid $\tau(x,y)$ verdeeld is over een op een PIV-opname afgebeeld deeltje. Normaal gesproken is dit een Gauss-kromme met als maximum het centrum van het deeltje (zie figuur 5.10). In de voorgaande simulaties is $P(x,y)$ steeds gelijk gesteld aan 1 en lag de intensiteitspreiding over één pixel. In de praktijk is $P(x,y)$ Gauss-vormig en zal de functie, afhankelijk van de deeltjesdiameter en de vergroting, per afbeelding over meerdere pixels verdeeld zijn. Dit heeft als direct gevolg dat in de autocorrelatiefunctie R zowel de centrale piek als de verplaatsingspiek een grotere intensiteit krijgen en breder worden.

Dit verschijnsel blijkt uit figuur 5.11. In deze figuur staan de resultaten van simulaties met variërende $P(x,y)$ uitgezet. In figuur 5.11^a is de intensiteit gelijk aan 8 en beperkt tot 1 pixel. Door de functie $P(x,y)$ steeds breder te maken, ontstaan er steeds bredere signaalpieken. In figuur 5.11^d overlappen twee afbeeldingen elkaar; de verplaatsingspiek R_D smelt als het ware samen met de centrale piek R_C . Deze overlappingsverschijnselen zullen het detecteren van de afzonderlijke pieken bemoeilijken.

5.6 Conclusies

In dit hoofdstuk is de invloed van verscheidene parameters op de resultaten van de PIV-analyse aan een nadere beschouwing onderworpen. Met behulp van een programma, waarmee PIV-opnamen gesimuleerd kunnen worden, is getracht een optimale parameterinstelling te vinden. De resultaten van deze analyse zullen in deze paragraaf kort besproken worden.

Aantal deeltjes per interrogatiegebied.

De nauwkeurigheid van een analyse neemt toe met het aantal deeltjes. De in de stroming aanwezige statistische fluctuaties worden dan uitgemiddeld. Een nadeel van een groot aantal deeltjes is echter dat de aard van de stroming verandert. In hoofdstuk 3 is aangetoond dat de schijnbare viscositeit toeneemt (relatie *Barnea & Mizrahi [lit.8]*). De resultaten van de PIV-analyse beschrijven dan niet langer de werkelijke situatie. Aangetoond is dat voor een twee maal belicht systeem een deeltjesdichtheid van 10 à 20 deeltjes per interrogatiegebied tot goede resultaten leidt. Dit is in overeenstemming met literatuurwaarden [*lit.5,6*].

Het aantal maal dat een deeltje afgebeeld wordt.

Het minimum aantal belichtingen is vanzelfsprekend gelijk aan 2. Meerdere malen belichte PIV-opnamen hebben als voordeel dat de schatter μ_D met een grotere precisie bepaald wordt. De fout in de schatter is immers omgekeerd evenredig met het aantal corresponderende afbeeldingen. Een nadeel van meerdere belichtingen is dat de gemiddelde snelheid in het interrogatiegebied bepaald wordt over een groter tijdsinterval. Vooral bij een niet-stationaire stroming kan dat een verkeerd beeld geven, omdat gedurende de tijd dat de PIV-opname wordt vastgelegd de stroming in grootte en richting sterk kan variëren. Het is daarom raadzaam in deze gevallen te werken met twee of drie belichtingen.

De flitstijd.

De keuze van de flitstijd Δt , de tijd tussen twee afzonderlijke belichtingen, is direct afhankelijk van de snelheid v . De minimale flitstijd wordt bepaald door de grootte van het afgebeelde deeltje. De verplaatsingspiek R_D en de centrale piek R_C moeten op een bepaalde afstand van elkaar liggen. Als dit niet het geval is, wordt R_D een onderdeel van R_C en

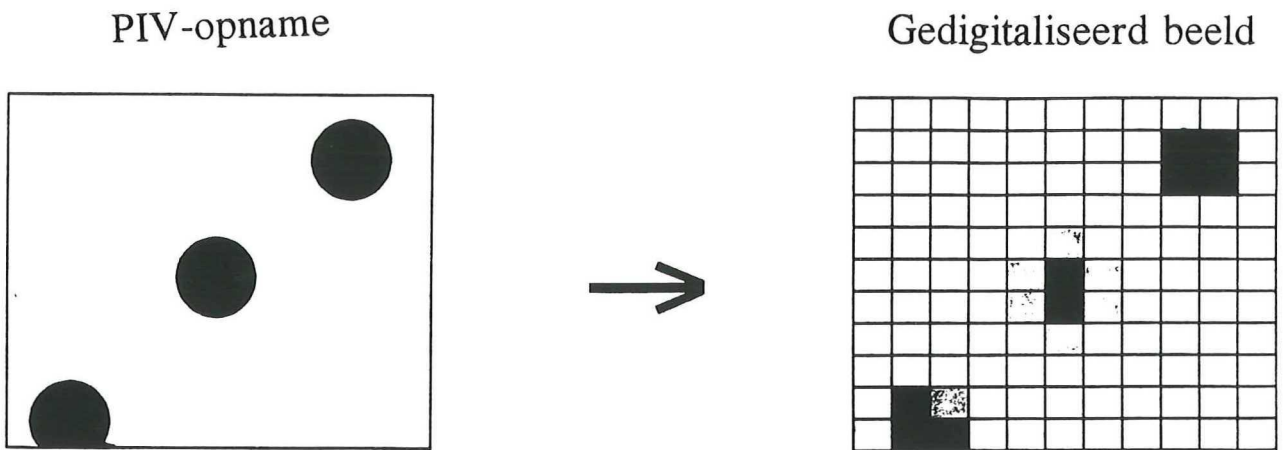
Tabel 5.1 Resultaten van de in dit hoofdstuk uitgevoerde parameteranalyse.

	Minimum	Maximum	Opmerkingen.	Literatuur
Aantal deeltjes per interrogatie gebied (N)	Ongeveer 5	Maximum kan bepaald worden met relatie volgens <i>Barnea & Mizrahi</i> (hfdst. 3)	Voor een tweemaal belicht systeem is de fout kleiner dan 5% bij 10 à 20 deeltjes.	<i>Adrian [lit.5,6]</i> <i>Barnea & Mizrahi [lit.8]</i>
Aantal belichtingen (B)	2	Geen	Hoge B levert 1. meer gegevens voor μ_D 2. gemiddelde over een langere tijd.	<i>Adrian [lit.6]</i>
Flitstijd (Δt)	Δt resulteert in een dergelijke verplaatsing dat 2 afbeeldingen elkaar niet overlappen.	Δt resulteert in een verplaatsing kleiner dan de afmetingen van het inter. gebied.	Optimum ligt rond een verplaatsing van een kwart van het interrogatiegebied	<i>Westerweel [lit.4]</i> <i>Adrian [lit.5]</i>
Snelheids gradiënten	Bij voorkeur afwezig	$\Delta v/v < 0.2$	Grootte interrogatiegebied aanpassen.	<i>Adrian [lit.5]</i>

valt de verplaatsingspiek niet meer te detecteren. Een afstand van twee pixels tussen de bases van beide pieken blijkt in de praktijk tot goede resultaten te leiden.

Een nadeel van een grotere flitstijd is dat gedurende twee flitsen meer deeltjes het interrogatiegebied verlaten dan bij een lagere flitstijd. Dit heeft tot gevolg dat er zich in het interrogatiegebied deeltjes zijn afgebeeld, die geen corresponderende afbeelding hebben. De ruis blijkt bij een hogere Δt dan ook sterk toe te nemen ten opzichte van de verplaatsingspiek R_D . Met de simulatie is aangetoond dat er voor een bepaalde instelling een minimale fout is te vinden. De optimale verplaatsing is ongeveer een kwart van de grootte van het interrogatiegebied. Dit houdt in dat grofweg een derde deel van het aantal deeltjes het interrogatiegebied mogen verlaten.

In tabel 5.1 staan de resultaten van het parameteronderzoek samengevat.



Figuur 6.1

Schematische voorstelling van het digitaliseren. Een opname wordt opgedeeld in n bij n pixels. Elke pixel krijgt een grijswaarde die correspondeert met de gemiddelde doorgelaten intensiteit $I(x,y)$.

Hoofdstuk 6.

Het bewerken van het fotografisch materiaal

In de voorgaande hoofdstukken is beschreven dat bij de digitale PIV-analyse de opname van een stromingsveld met de hulp van een computer wordt geanalyseerd. Tussen het nemen van deze opname en het uiteindelijke PIV-resultaat bevinden zich nog enkele te verrichten bewerkingsstappen.

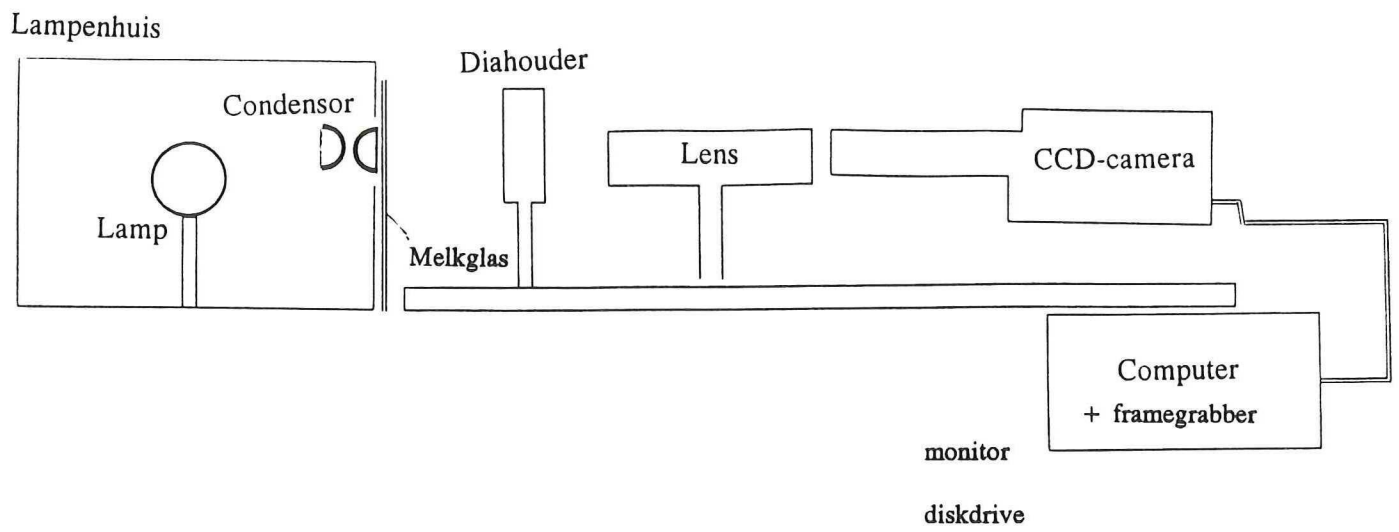
Allereerst moet de foto in de computer gevoerd worden. Om dit te bereiken wordt de foto 'vertaald' naar een verzameling grijswaarden. Dit proces wordt het digitaliseren van de opname genoemd. Hoe dit in zijn werk gaat, zal in dit hoofdstuk behandeld worden.

Een eenmaal gedigitaliseerde foto kan op allerlei manieren worden gemanipuleerd. Met behulp van beeldbewerkingspakketten is het bijvoorbeeld mogelijk optredende achtergrondruis weg te filteren. In dit hoofdstuk zal ook op de toepassing van deze bewerkingspakketten nader ingegaan worden.

6.1 Het digitaliseren van de PIV-opname

Alvorens de PIV-analyse kan plaats vinden, moet de foto gedigitaliseerd worden. Het digitaliseren van een foto kan als volgt worden gezien. Een zwart-wit foto wordt opgedeeld in een rooster van n bij n roostercellen, pixels geheten. Elke pixel correspondeert met een gedeelte van het oppervlak van de PIV-opname. Gedurende dit onderzoek is gebruik gemaakt van roosters met een afmeting van 512 bij 512 pixels. Aan elke pixel wordt een grijswaarde toegekend. Deze grijswaarde correspondeert met de gemiddelde intensiteit van het licht, dat door het beschouwde gebied uit de dia treedt. Er zijn in totaal 256 grijswaarden beschikbaar, variërend tussen zwart (grijswaarde 0) en wit (grijswaarde 255). In figuur 6.1 wordt schematisch getoond hoe een foto wordt gedigitaliseerd tot een matrix met grijswaarden. Uit de figuur blijkt dat het digitaliseren een aanzienlijke data-reductie tot gevolg heeft, wat ook het uiteindelijke doel is van de digitale PIV-analyse. De doorlaatbaarheid τ is nu niet langer een continue functie van x en y , maar is teruggebracht tot een n bij n matrix van met de doorlaatbaarheid corresponderende grijswaarden.

Het digitaliseren wordt verricht met behulp van computerapparatuur. De opnamen worden gedigitaliseerd door gebruik te maken van een computer met frame-grabber. Een frame-grabber is een in een computer aangebrachte kaart, die een door een videocamera ingelezen beeld kan omzetten in de corresponderende grijswaarden. Tijdens dit onderzoek



Figuur 6.2

De opstelling waarmee de PIV-opnamen gedigitaliseerd worden.

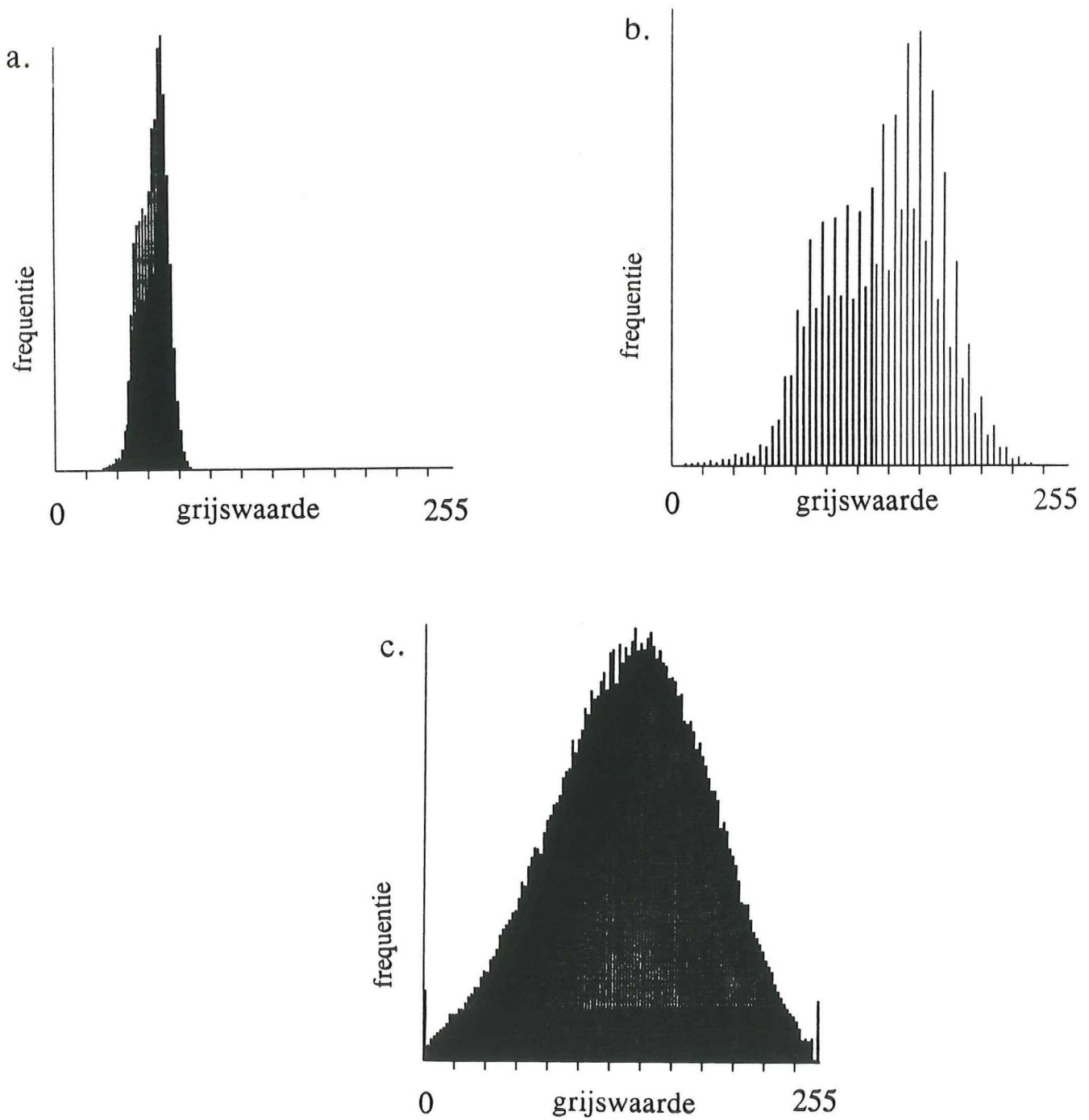
is gebruik gemaakt van apparatuur en software van het Waterloopkundig Laboratorium in Delft. In figuur 6.2 is de opstelling schematisch getoond.

Deze opstelling bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Een lamp met variabele voeding. Het licht wordt door een condensor geleid, zodat er een evenwijdige lichtbundel ontstaat. Hierna wordt de bundel geleid door een melkglazen plaatje, wat tot gevolg heeft dat het licht een diffuus karakter krijgt. Hierdoor worden schaduweffecten gemaskeerd en vallen krassen op een dia minder sterk op.
2. Een in drie richtingen verstelbare diahouder. Door de houder te verschuiven kunnen bepaalde delen van de foto ingelezen worden. De maximaal te verkrijgen vergroting is ongeveer een factor vier.
3. Een lens om het beeld scherp te krijgen. Hiervoor wordt een macro-objectief van een fotocamera gebruikt (Nikon 135 mm).
4. Een CCD-videocamera, waarin het beeld geprojecteerd wordt. Deze camera stuurt de afbeelding door naar een computer.
5. De computer. De computer bevat de frame-grabber, die het beeld van de camera opdeelt in een aantal pixels en deze pixels een corresponderende grijswaarde toekent. De data kan naar een diskette-station weggeschreven worden.
6. Een monitor. Met behulp van de monitor kunnen de uitgevoerde verrichtingen gevolgd worden.

In het Waterloopkundig Laboratorium wordt gebruik gemaakt van het programma IRIS-TUTOR. Dit programma verwerkt het door de videocamera ingelezen signaal en bepaalt per pixel de grijswaarde. Deze grijswaarde wordt vervolgens in een file weggeschreven als de corresponderende ASCII-code. Op deze wijze worden er 512 maal 512 karakters opgeslagen, resulterend in een file met de grootte van ongeveer een kwart Mb. Voor verdere gegevens betreffende het gebruik van IRIS-TUTOR wordt verwezen naar bijlage 1.

Als een beeld eenmaal gedigitaliseerd is, kan de PIV-analyse er op toegepast worden. De oorspronkelijke opname blijkt echter in veel gevallen verstoord te worden door achtergrondruis en andere storende verschijnselen. Met behulp van een beeldbewerkingspakket kunnen deze verstoringen weggefilterd worden. De toepassing van deze bewerkingstechnieken zullen worden behandeld in de volgende paragraaf.



Figuur 6.3

Verdeling van de grijswaarden over een PIV-opname.

- a. Onbewerkte foto.
- b. Met *cst* bewerkte foto.
- c. Met *cst* en *bal2* bewerkte foto.

6.2 Bewerking van de opnamen met behulp van een beeldbewerkingspakket

Voordat met de digitale PIV-analyse het snelheidsveld berekend wordt, kan de kwaliteit van de foto verbeterd worden door toepassing van een beeldbewerkingspakket. Tijdens dit onderzoek is gebruik gemaakt van het pakket TCL-Image.

Zoals vermeld bestaat een gedigitaliseerde opname uit 256 grijswaarden. Met behulp van een bewerkingspakket als TCL-Image kan een foto, die slechts bestaat uit een gedeelte van dit spectrum, opgewaardeerd worden. Als de PIV-analyse van een bewerkte opname vergeleken wordt met de analyse van een onbewerkte opname, blijkt dat de bewerkte opname het beschouwde stromingsveld beter beschrijft. In het volgende hoofdstuk zal hier nader op ingegaan worden.

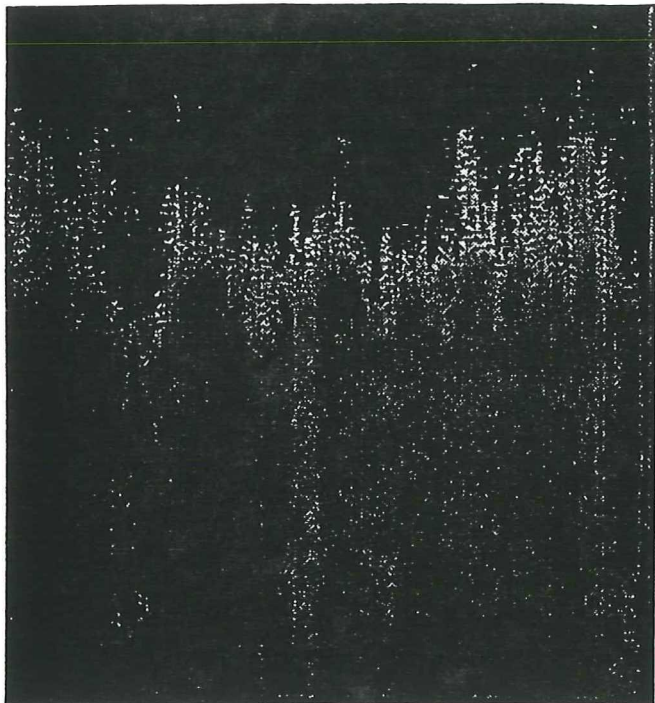
Als voorbeeld van de toegepaste bewerkingstechnieken wordt in figuur 6.4^a een tijdens dit project genomen foto getoond. Het is de weergave van een meerdere malen belicht stromingsveld. Het blijkt dat de foto nogal donker overkomt. Duidelijke contrasten zijn er niet op aan te treffen. In figuur 6.3^a is te zien dat slechts de grijswaarden 40 tot 80 zijn gebruikt, ongeveer 15% van de in totaal beschikbare hoeveelheid. Qua belichting is de foto niet optimaal, bewerking lijkt dus raadzaam.

Voor dit opwaarderen zijn twee verschillende routines beschikbaar. Allereerst vindt er een bewerking plaats met de TCL-Image routine *cst*. Deze procedure verhoogt het contrast van de foto op een dusdanige wijze dat de minimale grijswaarde gelijk aan 0 en de maximale gelijk aan 255 is. Op deze manier wordt het volledige spectrum gebruikt. Het verschuiven van de grijswaarden vindt (lineair) plaats volgens de formule:

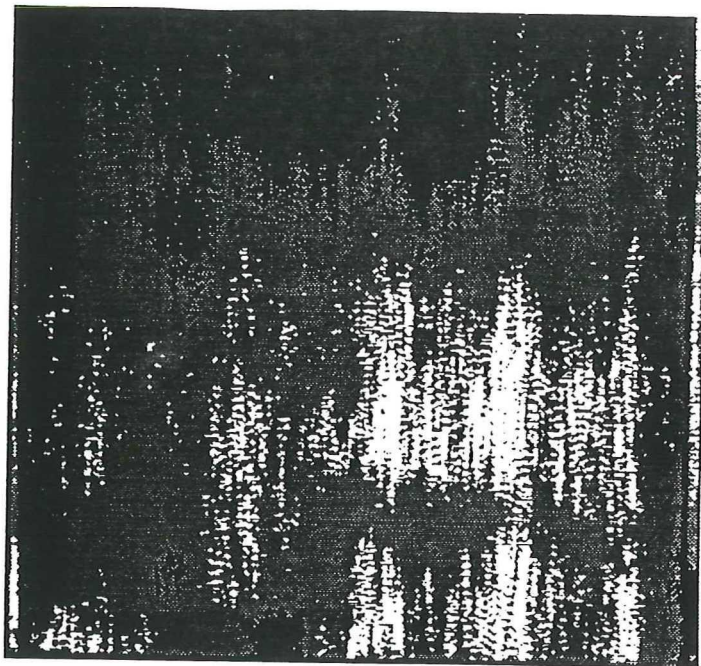
$$\text{integer} \left[\frac{255}{P_{\max} - P_{\min}} [P_{\text{oud}} - P_{\min}] \right] = P_{\text{nieuw}} \quad (6.1)$$

Hierin staan de indices min en max voor respectievelijk de laagste en hoogste aanwezige grijswaarde in de onbewerkte opname en de indices nieuw en oud voor de nieuwe grijswaarde en de oorspronkelijke. In figuur 6.4^b is het ontstane beeld getoond. Duidelijk is de contrastverbetering te zien. Dit blijkt ook uit het histogram in figuur 6.3^b waarin de verdeling van de grijswaarde van de pixels staat uitgezet. Omdat de grijswaarden alleen maar verschoven worden, ontstaan er geen extra grijswaarden. Het aantal grijswaarden van de bewerkte opname is dan ook gelijk aan dat van de onbewerkte PIV-opname.

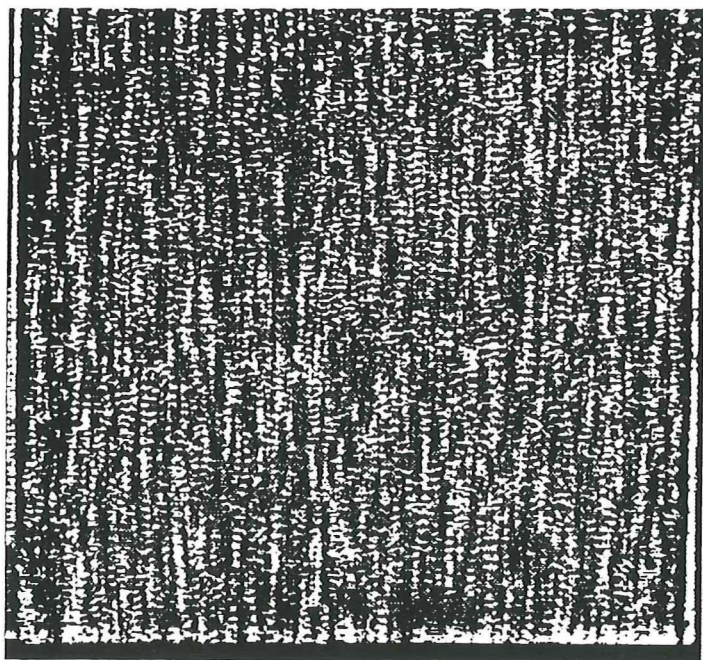
a.



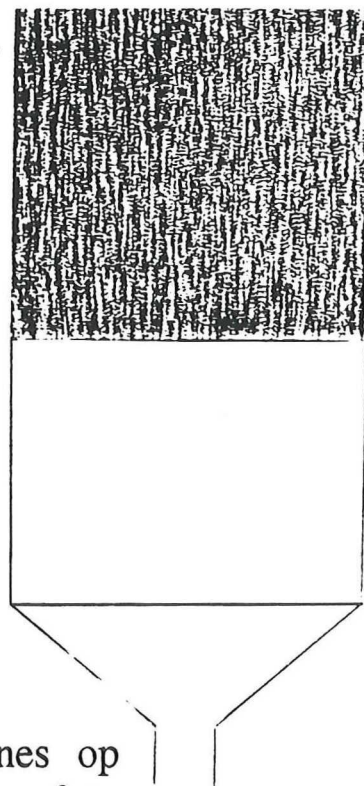
b.



c.



d.



Figuur 6.4

Effecten van de beeldbewerkingsroutines op een PIV-opname. Getoond wordt hoe een foto na de verschillende manipulaties verandert.

- a. De oorspronkelijke, onbewerkte opname.
- b. Opname na contrastverbetering met de routine *cst*.
- c. Opname na bewerking met *cst* en *bal2*, een routine, die de niet-uniforme achtergrondruis wegfiltert.
- d. Positie waar de foto genomen is.

Als tweede bewerkingstechniek wordt gebruik gemaakt van de routine *bal2*, een aan de TUD, laboratorium voor Aero- en Hydrodynamica ontwikkelde bewerkingsmethode. Met behulp van deze routine wordt de niet-uniforme achtergrondruis weggefilterd. De batchfile *bal2.tip* staat in bijlage 2 weergegeven. De routine *bal2* levert een aanzienlijke verbetering van het fotografisch materiaal. De methode kan ruwweg als volgt beschreven worden. Het hele gedigitaliseerde beeld van 512 bij 512 pixels wordt opgedeeld in velden van 3 x 3 pixels. Van elk veld wordt uit de negen beschikbare pixels de laagste grijswaarde bepaald. Dit wordt gedaan door de TCL-Image routine *lmin* aan te roepen. Het minimum van deze negen pixels wordt opgeslagen in een matrix van 512 bij 512. Als dit gedaan is, verschuift het veld een positie, zodat uiteindelijk alle pixels, behalve de randpixels, een keer centraal in het veld zijn geweest. Op dezelfde wijze wordt het lokale maximum bepaald met de routine *lmax*. Ook deze waarden worden opgeslagen in een 512 bij 512 matrix. Hierna worden de twee matrices van elkaar afgetrokken. Na normaliseren ontstaat een afbeelding, die vrij is van achtergrondruis.

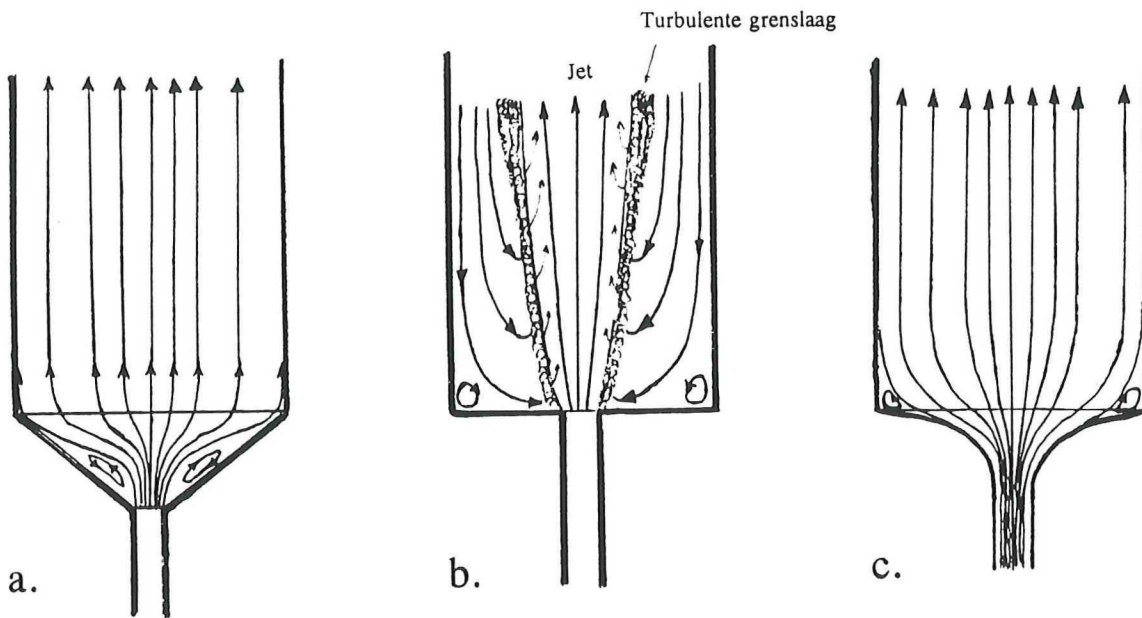
In figuur 6.4^c staat het bewerkte beeld getoond. Zoals duidelijk te zien is verwijdert de routine *bal2* het achtergrondsignaal en levert het een gelijkmatig belicht beeld. In figuur 6.3^c is te zien dat de bewerking duidelijke gevolgen heeft voor de grijswaardeverdeling: de oorspronkelijke grillige pieken zijn omgevormd tot een bijna perfecte Gauss-kromme.

De vraag is nu in welke mate de manipulaties de resultaten beïnvloeden. In het volgende hoofdstuk zal hier nader op ingegaan worden.

Aansnijstelsysteem 1

Aansnijstelsysteem 2

Aansnijstelsysteem 3



Figuur 7.1

Overzicht van de in gietvormen heersende stromingsvelden.

- a. Systeem 1 ($Re < 2000$)
- b. Systeem 2 ($Re_{jet} < 20000$)
- c. Systeem 3 ($Re < 2000$)

Hoofdstuk 7.

Resultaten en discussie

In dit hoofdstuk zullen de resultaten van het onderzoek besproken worden. De volgende drie punten zullen hierbij aan de orde komen.

Als eerste zal kwalitatief gekeken worden naar de stationaire stroming in de gietholte en de aansnijsystemen. Er zal een beeld gegeven worden van het stromingsveld in de gietvorm. Tevens zullen de voor- en nadelen van de verschillende aansnijsystemen nader behandeld worden en zal er een aansnijsysteem ontworpen worden dat de nadelen van de andere systemen niet heeft.

Het tweede punt dat besproken zal worden is de PIV-analyse. Gekeken zal worden welke invloed de beeldwerking heeft op de analyse en hoe de autocorrelatiefunctie R er in de praktijk uitziet. Als aansluiting hierop zal met behulp van de PIV het stromingsveld van elk systeem kwantitatief geanalyseerd worden.

Het laatste punt dat behandeld zal worden is het vulproces. Aan de hand van opnamen, die tijdens de vulling gemaakt zijn, worden de veranderingen in het vrije oppervlak gevolgd.

7.1 Kwalitatieve analyse van het stationaire gedrag

Met het blote oog kan de stroming in de gietvorm door de aanwezigheid van de deeltjes goed gevolgd worden. Vooral als eenmaal de stationaire toestand ontstaan is, scheppen de oplichtende deeltjes een duidelijk beeld. Deze stationaire toestand, voor de verschillende aansnijsystemen weergegeven in figuur 7.1, zal als eerste besproken worden.

7.1.1 Eerste aansnijsysteem

Wat bij het eerste aansnijsysteem (zie figuur 7.1^a) duidelijk opvalt is de vorming van een circulatielus in het aansnijsysteem zelf. De gevolgen van deze lus werken door tot in de gietholte. De circulatie wordt veroorzaakt door het variabele doorstroomde oppervlak. Zoals in hoofdstuk 3 is beschreven, is dit oppervlak een parabolische functie van de hoogte en vertoont het een maximum in het midden van het aansnijsysteem. De hoofdstroom maakt slechts gebruik van een gedeelte van het aansnijsysteem. Aangetoond is dat de vorming van de lus niet ontstaat door toevoeging van de markers aan de vloeistof. Als er een kleurstof aan de zuivere vloeistof wordt toegevoegd, ontstaat er eveneens een circulatielus. Het optreden van circulatielussen kan bij het gieten van

metalen funest zijn. In deze gebieden kan het binnenstromende gietijzer immers stollen en op deze wijze het aansnijsysteem gedeeltelijk of totaal afsluiten. Dit zou in het minst ongunstigste geval tot gevolg hebben dat het vloeibare gietijzer niet meer gelijkmatig de gietholte binnenkomt.

7.1.2 Tweede aansnijsysteem

Het tweede aansnijsysteem is ontworpen om de gevolgen van een door stolling veroorzaakte gedeeltelijke afsluiting te bestuderen. Het doorstroomd oppervlak van het aansnijsysteem neemt lineair af tot ongeveer 1/7 van de oorspronkelijke waarde. In de stationaire toestand vertoont de stroming in de gietholte een jet, aan beide kanten omgeven door een grote circulatielus. Bij het maximale debiet, voor de hoofdstroom neerkomend op een vloeistofsnelheid van ruim 3.5 m/s ($Re \approx 18000$), is de jet zeer turbulent en zijn de grenzen met de eveneens turbulente circulatielussen niet meer eenduidig vast te stellen. De situatie wordt getoond in figuur 7.1^b. Het zal duidelijk zijn dat een dergelijk systeem geen homogeen gegoten platen zal leveren. Hieruit kan geconcludeerd worden dat stollingsverschijnselen in het aansnijsysteem (en daarmee circulatielussen) voorkomen dienen te worden.

7.1.3 Derde aansnijsysteem

Omdat bij het eerste aansnijsysteem, met een maximum in het doorstroomd oppervlak, een circulatielus optrad, is het derde systeem ontworpen. Dit aansnijsysteem is zo ontwikkeld, dat het doorstroomde oppervlak constant blijft. De diepte van het aansnijsysteem neemt lineair af; de breedte vertoont een trompetachtige vorm. Uit de experimenten is gebleken dat bij dit aansnijsysteem onder aan de rand van de gietholte circulatielussen optreden. Deze worden veroorzaakt door een te scherpe overgang van aansnijsysteem naar gietholte. De vloeistof, die het aansnijsysteem verlaat en de gietholte binnenkomt, kan de verandering in het doorstroomd oppervlak als het ware niet 'volgen', resulterend in een circulatielus op het punt waar het aansnijsysteem overgaat in de gietholte. De optredende lus heeft een grootte van enkele centimeters. In figuur 7.1^c staat het gevonden stromingsveld schematisch weergegeven.

7.1.4 Voorlopige conclusies en suggesties betreffende het aansnijsysteem

Met behulp van de gegevens, afkomstig van de drie bestudeerde systemen, kunnen de volgende eisen aan het ontwerp van een aansnijsysteem gesteld worden:

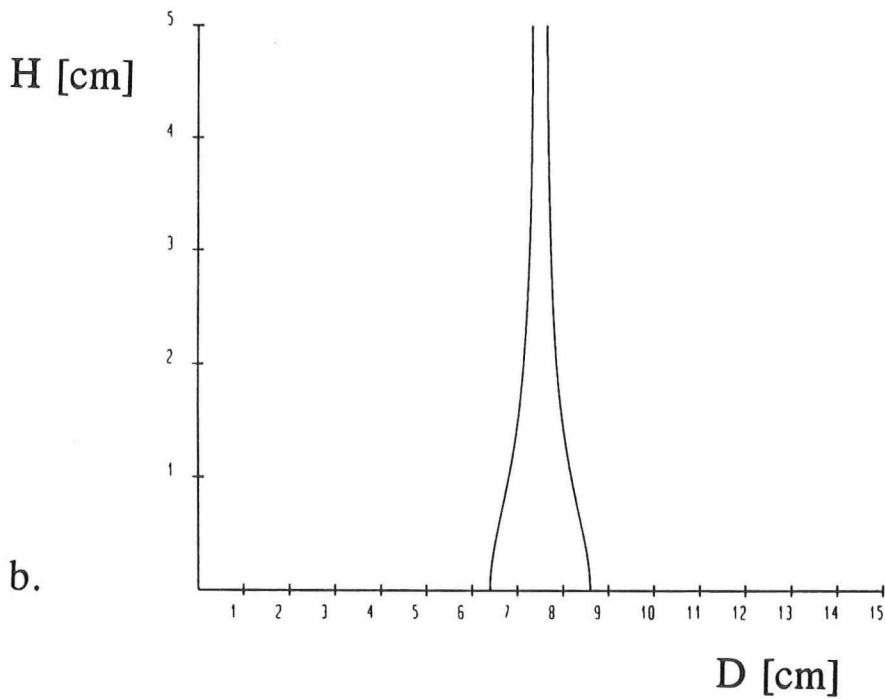
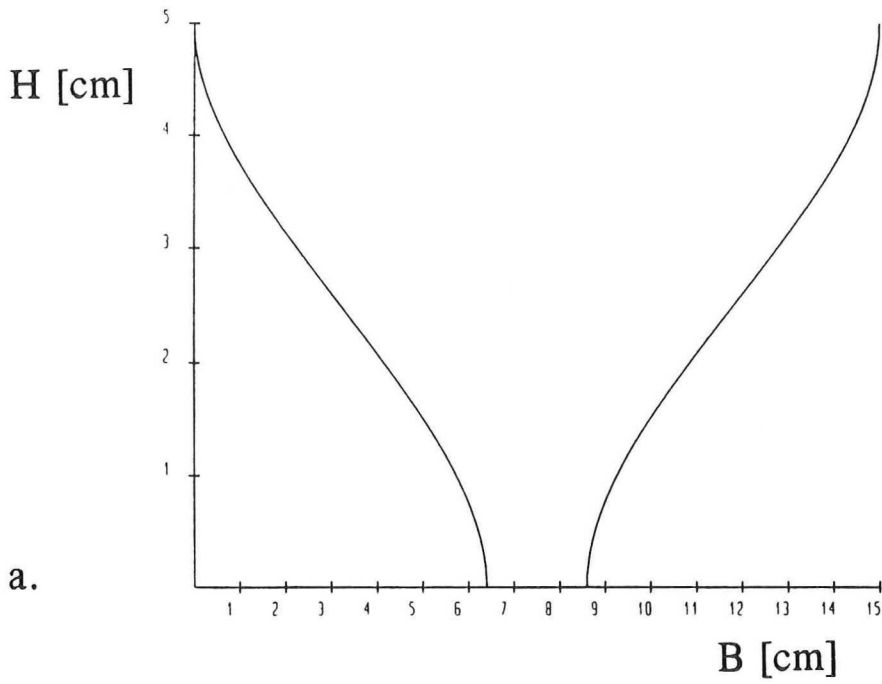
1.	Het doorstroomde oppervlak mag in het aansnijsysteem geen maximum vertonen en moet bij voorkeur een constante waarde hebben.
2.	Het aansnijsysteem moet een dusdanige vorm hebben dat de vloeistof de gietholte gelijkmatig binnenkomt; vorming van een jet dient voorkomen te worden.
3.	De overgang van het aansnijsysteem naar de gietholte mag niet te scherp zijn. Met andere woorden: de functie, die het doorstroomd oppervlak in het aansnijsysteem beschrijft, moet op het punt $H=5$ continu differentieerbaar zijn.

De bovenstaande punten worden samengevat door

1. $\text{breedte}(H) = \frac{\text{Constante}}{\text{diepte}(H)}$
2. $\frac{d\text{breedte}(H)}{dH} \Big|_{H=0, H=5} = 0$
3. $\frac{d\text{diepte}(H)}{dH} \Big|_{H=0, H=5} = 0$

Hierin staat $H=0$ voor de plaats waar de buis overgaat in het aansnijsysteem en $H=5$ voor de positie waar het aansnijsysteem eindigt en de gietholte begint. Punt 1 stelt dat het doorstroomde oppervlak niet verandert, de overige 2 punten stellen dat de overgang van pijp naar aansnijsysteem en van aansnijsysteem naar gietholte glooiend verloopt.

Als suggestie voor verder onderzoek wordt een aansnijsysteem voorgesteld dat voldoet aan de bovenstaande eisen. De breedte wordt berekend uit een van de hoogte H afhankelijke polynoom. Omdat de afgeleide twee nulpunten moet hebben (op $H=0$ en $H=5$), wordt gekozen voor een derde machtsvergelijking:



Figuur 7.2 Het ontwikkelde aansnijsysteem. Dit systeem heeft vermoedelijk niet de tekortkomingen van de drie onderzochte systemen.

- a. Vooraanzicht
- b. Zijaanzicht

$$\text{breedte}(H) = A_1 H^3 + A_2 H^2 + A_3 H + A_4$$

Wegens eis 1 resulteert dit voor de diepte D in

$$\text{Diepte}(H) = \frac{\text{Constante}}{A_1 H^3 + A_2 H^2 + A_3 H + A_4}$$

Met de door de geometrie opgelegde randvoorwaarden

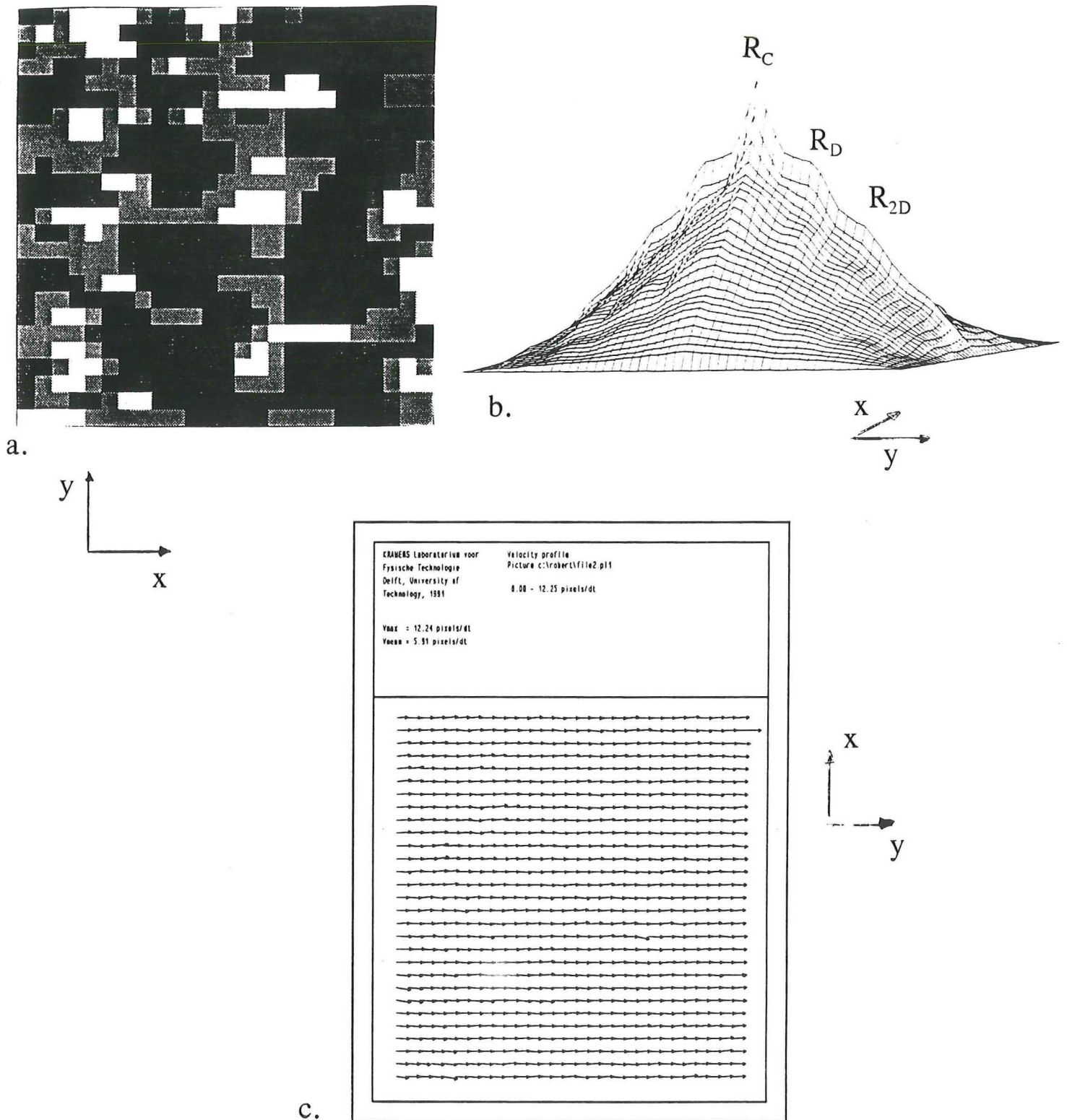
H = 0	→ breedte	= 2.2 cm
H = 0	→ $d(D_{\text{hydr}})/dH$	= 0
H = 5	→ breedte	= 15 cm
H = 5	→ $d(D_{\text{hydr}})/dH$	= 0
Constante		= 4.84 cm ²

wordt gevonden

$$\begin{aligned} A_1 &= -0.2048 \text{ cm}^{-2} \\ A_2 &= 1.536 \text{ cm}^{-1} \\ A_3 &= 0 \\ A_4 &= 2.2 \text{ cm} \end{aligned}$$

In figuur 7.2 wordt de configuratie getoond.

Een dergelijk aansnijsysteem kan mogelijkwerwijs een stromingsveld geven dat vrij is van enige vorm van circulatie. De vraag is echter of de zandvorm, waarmee het gieten van de vlakke plaat uiteindelijk plaats vindt, met een dergelijke nauwkeurigheid gebouwd kan worden.



Figuur 7.3

- a. Fragment van de in figuur 6.4^c afgebeelde PIV-opname. De linker bovenhoek komt overeen met de coördinaat (200,200). Het interrogatiegebied heeft een afmeting van 25 bij 25 pixels.
- b. Autocorrelatiefunctie van het in figuur 7.3^a afgebeelde interrogatiegebied.
- c. Volledige analyse van PIV-opname 6.4^c.

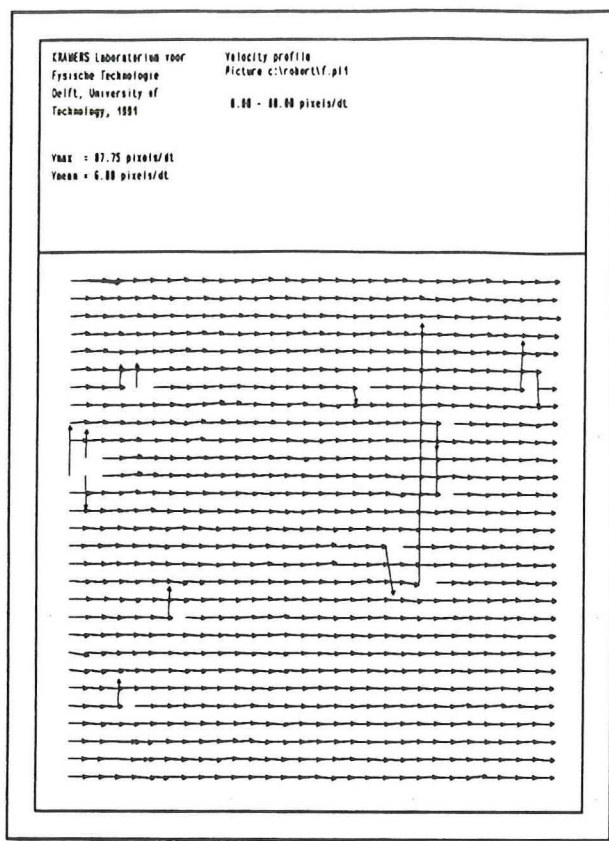
7.2 De PIV-analyse van de stromingsvelden

De snelheidsvectoren van de gefotografeerde stromingsvelden zijn met behulp van het programma ScanA bepaald. De dimensies van de interrogatiegebieden en andere instellingen zijn te vinden in bijlage 5. In deze paragraaf zullen de resultaten van de analyse besproken worden.

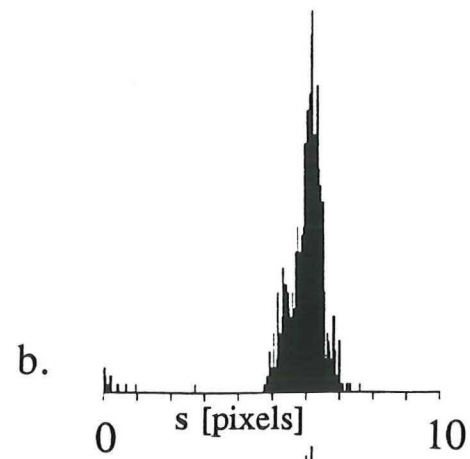
7.2.1 Invloed van de beeldbewerking op de analyse

De effectiviteit van de analysemethode en het nut van de beeldbewerkingen zullen aan de hand van een voorbeeld verduidelijkt worden. Als demonstratiemateriaal wordt de in figuur 6.4 afgebeelde opname gebruikt, een foto van de gietholte. Het afgebeelde stromingsveld begint ongeveer 15 cm van het einde van het aansnijsysteem. Het (stationaire) debiet is 12.5 l/min, wat met een doorstroomd oppervlak van $4.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ resulteert in een gemiddelde stijgsnelheid van 0.43 m/s. De ingestelde stroboscoopfrequentie is 440 Hz. Dit houdt in dat er tussen twee belichtingen een afstand van 1 mm wordt afgelegd. Deze afstand is gelijk aan 10 maal de deeltjesdiameter, wat een acceptabele waarde is (zie hoofdstuk 5). De belichtingstijd van de fotocamera is ingesteld op 1/60 seconde. Dit resulteerde in 7 belichtingen per PIV-opname. Dit is, zoals reeds in hoofdstuk 5 werd aangeduid, een erg groot aantal. De keuze werd echter opgedrongen door de aanwezige apparatuur. Dit zal verder in dit hoofdstuk nog tersprake komen.

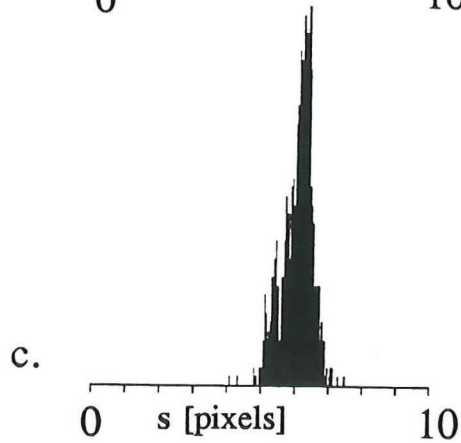
De autocorrelatiefunctie R is vervolgens berekend voor een interrogatiegebied van 25 bij 25 pixels. Dit interrogatiegebied is afgebeeld in figuur 7.3^a en is afkomstig van de bewerkte opname, weergegeven in figuur 6.4^c. De linkerboven pixel van figuur 7.3^a komt overeen met de coördinaat (200,200) van de opname in figuur 6.4^c. In het interrogatiegebied is een verplaatsing in de y -richting te zien. Dit blijkt als het gebied wordt geanalyseerd, resulterend in de autocorrelatiefunctie R , die in figuur 7.3^b is afgebeeld. De pieken van R lijken elkaar enigszins te overlappen. Toch is op een afstand van 6 pixels van de centrale piek R_C de verplaatsingspiek R_D te vinden. Verder steekt nog vaag de piek R_{2D} boven de ruis uit; het signaal overeenkomend met drie maal de afgelegde weg, R_{3D} , is niet meer duidelijk te vinden. Signalen van een hogere orde kunnen, gezien de afmetingen van het beschouwde interrogatiegebied, niet meer verwacht te worden. De autocorrelatiefunctie is ook op andere punten in de gietholte bepaald, resulterend in identieke afbeeldingen als figuur 7.3^b.



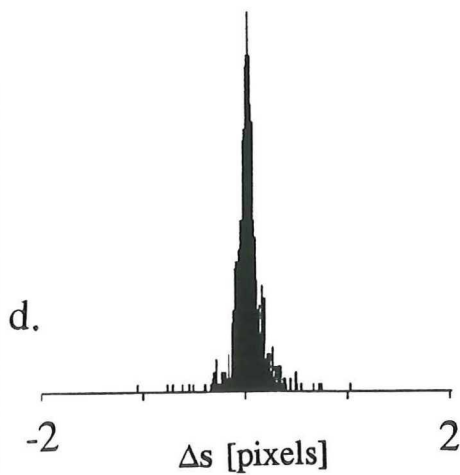
a.



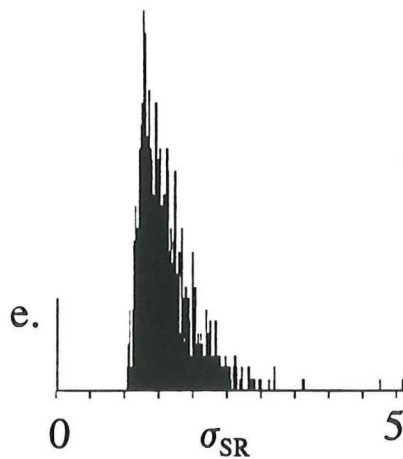
b.



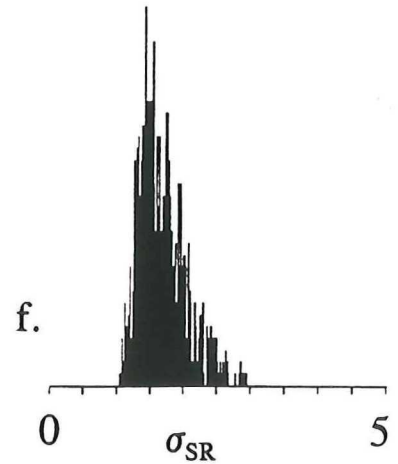
c.



d.



e.



f.

Figuur 7.4

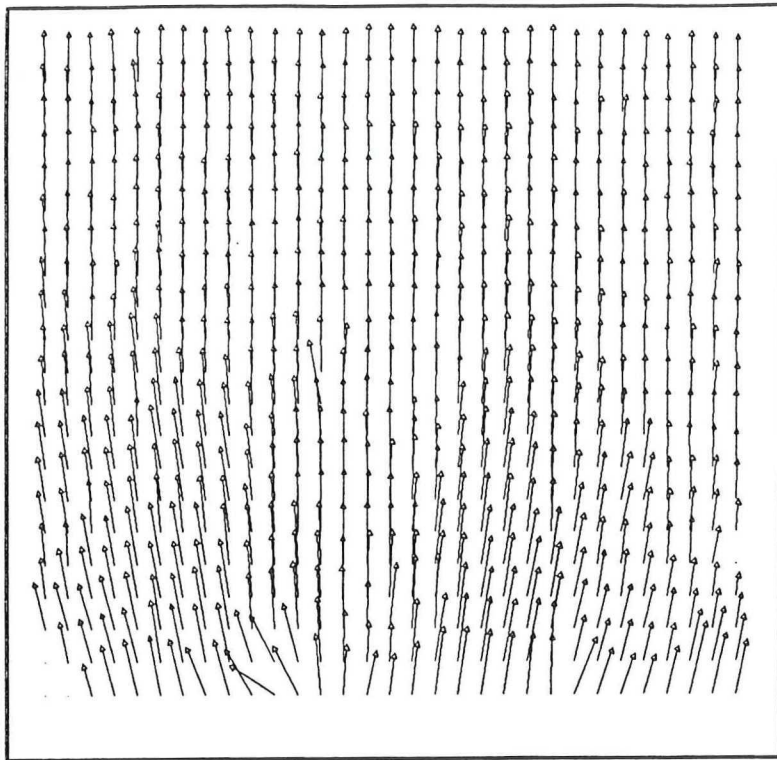
- a. PIV-analyse van de onbewerkte opname, getoond in figuur 6.4^a.
- b. Snelheidsverdeling in het in 7.4^a getoonde stromingsveld.
- c. Snelheidsverdeling in het in 7.3^c getoonde stromingsveld.
- d. Verschil in verplaatsing tussen de overeenkomende interrogatiegebieden van de onbewerkte en de onbewerkte opname.
- e. Signaal/ruis-verhouding volgens (4.15) van de onbewerkte opname.
- f. Signaal/ruis-verhouding volgens (4.15) van de bewerkte opname.

In figuur 7.3^c is de analyse van het hele stromingsveld getoond. In de figuur is te zien dat de analyse een duidelijk beeld van de situatie geeft. Op een enkele uitschieter na, is er sprake van een homogeen stromingsveld. Figuur 7.4^c toont de snelheidsverdeling in het stromingsveld in de vorm van een histogram.

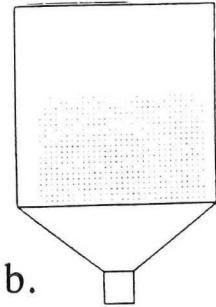
Om de effecten van de beeldbewerking te bestuderen is de PIV-analyse ook uitgevoerd met de ruwe, onbewerkte data-file. Dit resulteerde in de in figuur 7.4^a afgebeelde analyse. Uit de figuur blijkt dat er bij deze analyse een aantal snelheidsvectoren niet goed berekend worden (ongeveer 1 à 2 %). De vectoren zijn in vergelijking tot hun burens of te groot of verkeerd gericht. Te concluderen valt dat deze door achtergrondruis veroorzaakte uitschieters gecorrigeerd worden door de bewerkingsprocedure. In figuur 7.4^b staat de snelheidsverdeling van het veld weergegeven. Vergelijking van de beide histogrammen 7.4^b en 7.4^c toont aan dat de bewerkte opname een kleinere spreiding in de snelheid toont. Door de snelheidsvectoren van de bewerkte en onbewerkte opname per interrogatiegebied te vergelijken, wordt gevonden dat de beeldbewerking een verandering in de vectoren geeft met een grootte minder dan 0.3 pixel per tijdseenheid. Dit geeft bij een verplaatsing van 6 pixels een variatie van hoogstens 6%. In figuur 7.4^d staat dit aangetoond.

Uit de in figuur 7.4^e en 7.4^f getoonde histogrammen blijkt tevens dat de beeldbewerking een hogere signaal/ruis-verhouding tot gevolg heeft. De onbewerkte opname heeft σ -waarde van ongeveer 1.2, de bewerkte opname heeft een waarde van ongeveer 1.5.

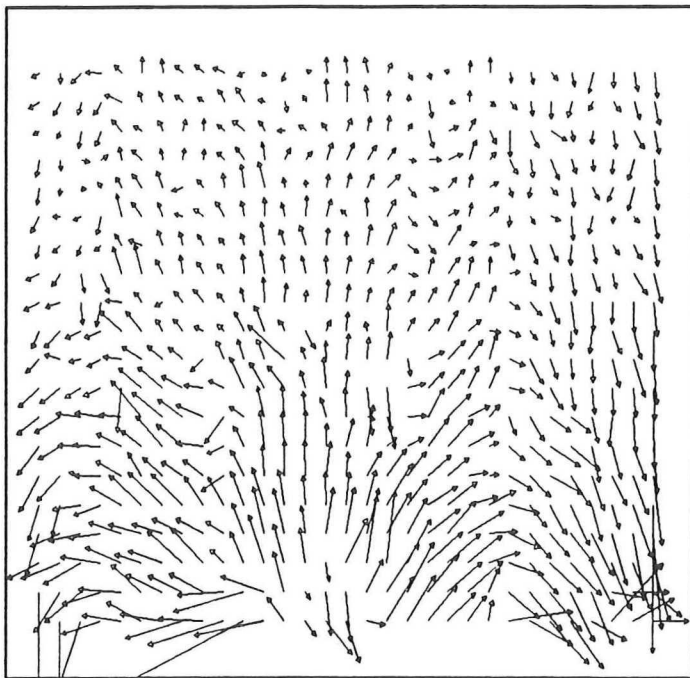
Uit het bovenstaande kan geconcludeerd worden dat de beeldbewerking duidelijke verbeteringen levert voor de PIV-opname. De vectoren, die berekend worden uit de originele opnamen, worden wat betreft grootte hooguit 0.3 pixels veranderd. Omdat de achtergrondruis weggefilterd is, worden deze door achtergrondruis veroorzaakte uitschieters vermeden. Gebruik van de beeldbewerkingsmethode is dan ook zeker aan te raden.



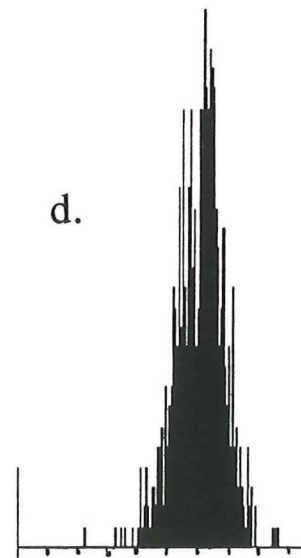
a.



b.



c.



d.

figuur 7.5

Stationaire stroming door het eerste systeem.

- a. Met behulp van de PIV-analyse bepaald stromingsveld. De onderkant van het veld komt overeen met het eind van het aansnijsysteem.
- b. Positie van het geanalyseerde veld.
- c. Stromingsveld, waarvan de gemiddelde snelheid in stromingsrichting vanaf is getrokken.
- d. Snelheidsverdeling van het in figuur 7.5^a afgebeelde veld.

7.2.2 PIV-analyse van het eerste systeem

De in figuur 6.4 afgebeelde opname is genomen in een hoger gedeelte van de gietholte. De stroming is daar, zoals te zien is in figuur 7.3^c, zo goed als uniform. Op het punt waar het aansnijsysteem overgaat in de gietholte is dit echter nog niet het geval. In figuur 7.5^a staat een gedeelte van het stromingsveld weergegeven. Het vloeistofdebiet was 12.5 l/min, de stroboscoop werd ingesteld op 440 Hz. In figuur 7.5^b is getoond welk gedeelte van de gietvorm geanalyseerd is.

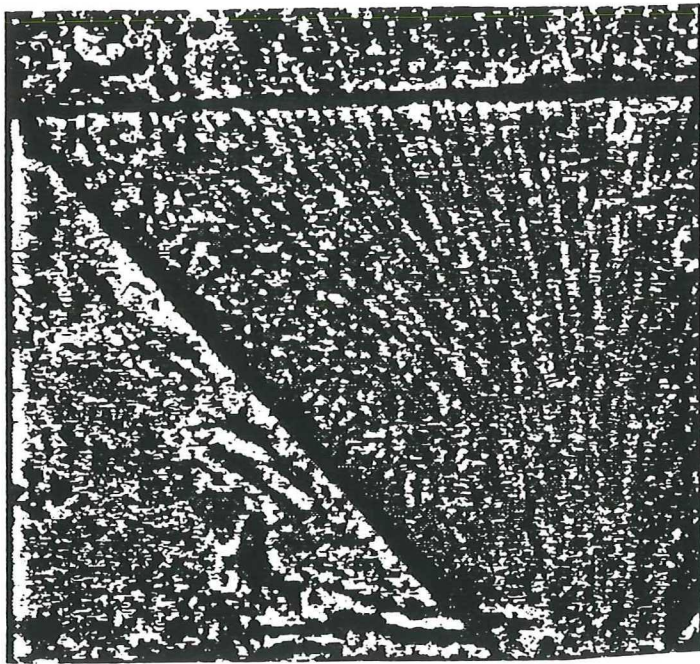
Het blijkt dat de stroming als gevolg van het maximum in het doorstroomd oppervlak en de knik in de functie die de hydraulische diameter beschrijft enigszins naar links en rechts uitwaaiert. Dit wordt verduidelijkt in figuur 7.5^c, waarin hetzelfde stromingsveld staat uitgezet. In dit geval is echter van de vectoren de gemiddelde snelheid in stromingsrichting afgetrokken. Duidelijk is te zien dat hoe verder de stroming vordert hoe meer de uniformiteit toeneemt. De x-component van de vectoren neemt met toenemende y geleidelijk af tot nul.

De in figuren 6.4 en 7.5 getoonde afbeeldingen werden genomen onder voor PIV-analyse gunstige omstandigheden. In het beschouwde gebied treden nauwelijks snelheidsgradiënten op, circulatielussen zijn nergens te bekennen en de lichtopbrengst is hoger dan onder in de plaat, bij het aansnijsysteem.

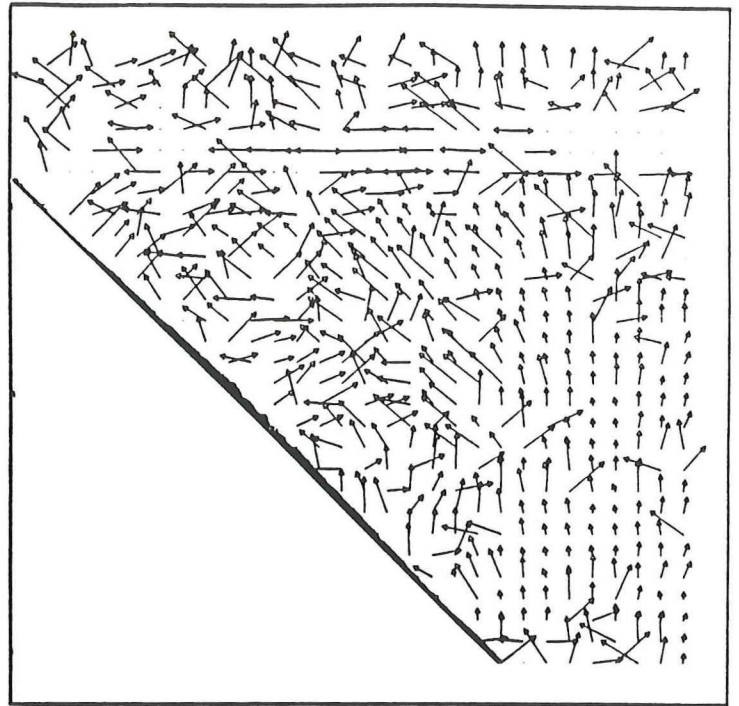
Zoals reeds vermeld vertoont het eerste aansnijsysteem wegens de geometrie circulatielussen. Omdat ScanA een vastgestelde stromingsrichting heeft, zal het gevonden resultaat niet overeenkomen met de werkelijkheid. In een circulatielus wordt de stroming immers 180 graden gedraaid.

Een ander punt dat zeker in beschouwing genomen moet worden is het optreden van een snelheidsgradiënt loodrecht op het vlak (z-richting). Zoals uit de geometrie geconcludeerd kan worden, ondergaat de stroming bij het binnentreden nogal wat veranderingen en is een variatie in de snelheid zeker te verwachten. Ook in het vlak (xy-richting) treden als gevolg van de gradiënten verstoringen op.

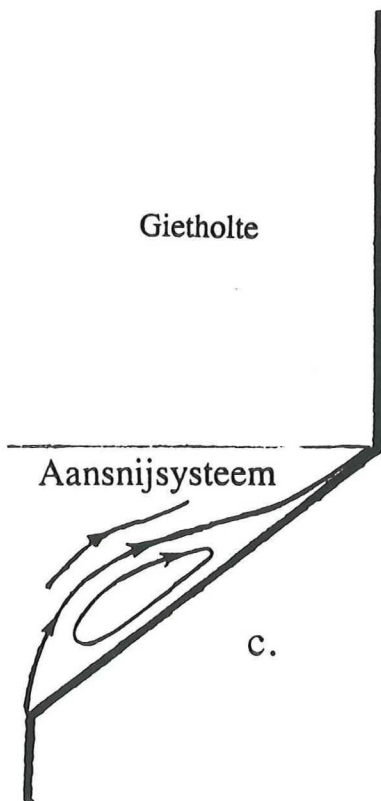
Een volgend punt is de afmeting van de diepte. Afbeelding 6.4 is een weergave van de gietholte, die een diepte heeft van rond de 3 mm. De diepte van het aansnijsysteem (en daarmee de diepte van het beschouwde interrogatievolume!) varieert daarentegen tussen 22 en 3 mm. De in hoofdstuk 5 behandelde ruisverhogende effecten, zoals



a.



b.



c.

Figuur 7.6

Een deel van het eerste aansnijsysteem.

a. De gedigitaliseerde PIV-opname.

b. De PIV-analyse.

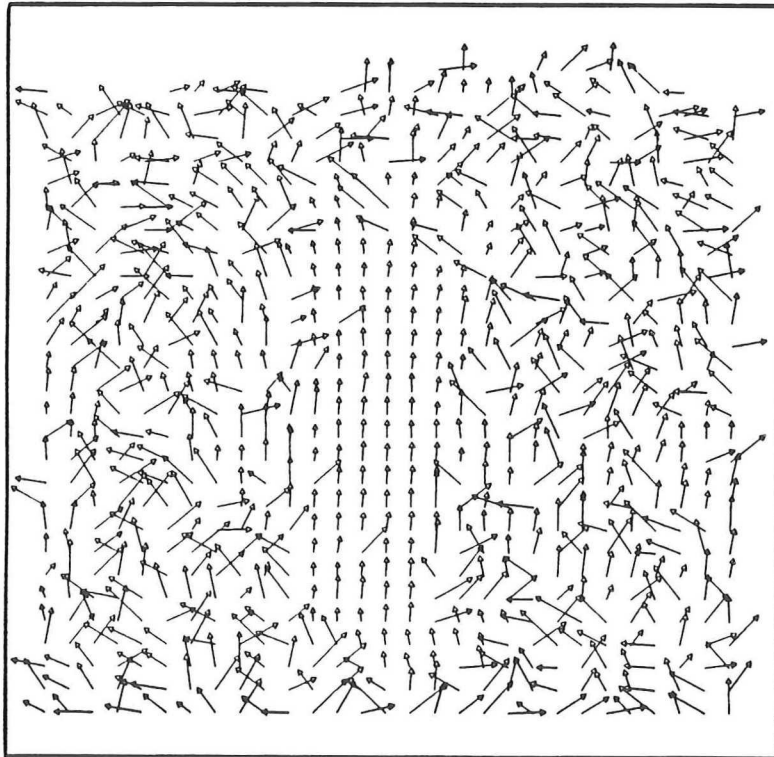
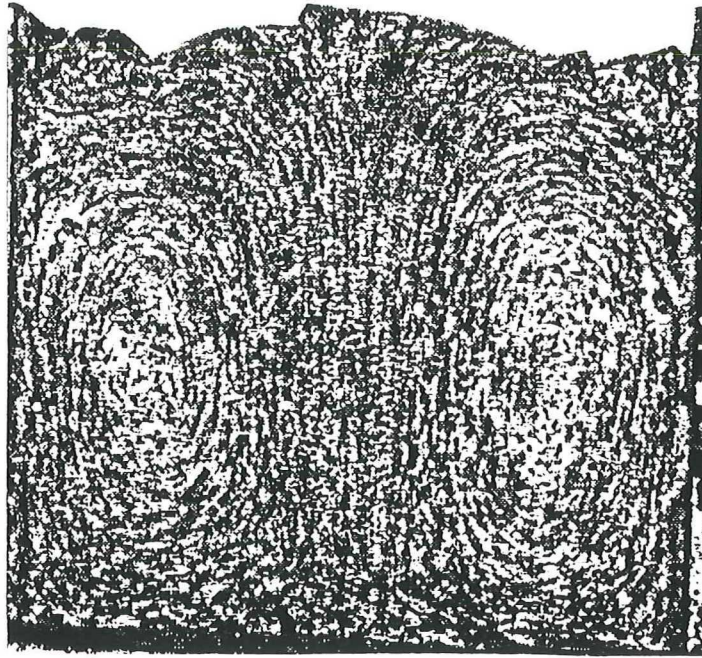
c. Nadere analyse van de in het aansnijsysteem optredende circulatielus.

snelheidsgradiënten, zullen dus sterker optreden en op deze wijze de analyse negatief beïnvloeden.

In figuur 7.6 is de analyse van het aansnijsysteem getoond. Duidelijk is te zien dat de kwaliteit van de analyse wel wat te wensen over laat. Kwantitatief zal de analyse dan ook geen resultaten van betekenis leveren. De circulatielus wordt zeer slecht beschreven.

Opvallend is ook dat het gedeelte van de gietholte slecht beschreven wordt door de PIV. Nadere analyse van de foto toonde aan dat er problemen optreden met het scherpstellen van de foto: als de camera scherp gesteld wordt op het aansnijsysteem, wordt de gietholte wazig vastgelegd.

Uit de analyse kan echter wel een conclusie getrokken worden betreffende de stroming door het aansnijsysteem. Het gedrag van de stroming kan al enigszins bepaald worden door nadere bestudering van figuur 7.6. Het blijkt dat vloeistof enigszins versnelt boven de circulatielus.



Figuur 7.7

PIV-analyse van de stroming in de gietvorm bij het tweede aansnijstelsel. De circulatielussen in de in figuur a getoonde opname worden niet optimaal weergegeven in de PIV-analyse.

Debiet 1.6 l/min, $Re_{jet} \approx 2000$.

Stroboscoopfrequentie 427 Hz.

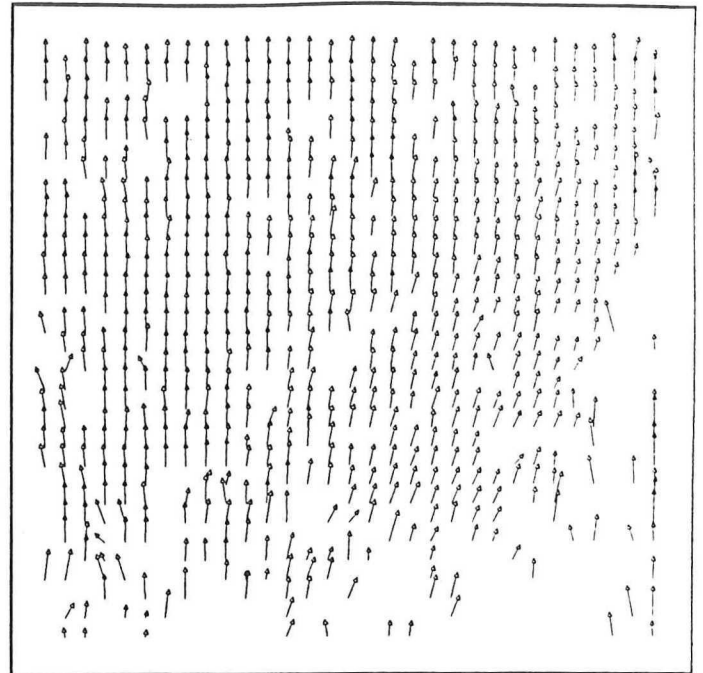
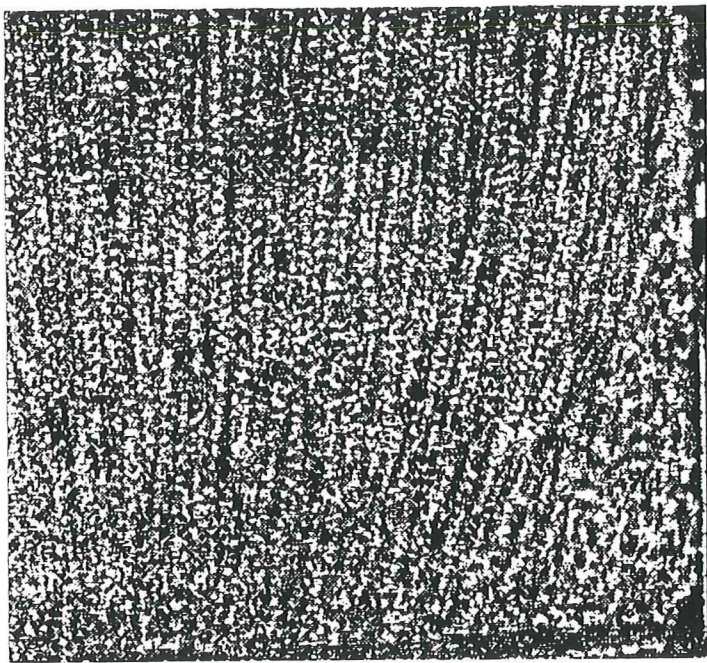
Belichtingstijd 1/60 sec.

7.2.3 PIV-analyse van het tweede systeem

Het tweede systeem vertoont, zoals beschreven, twee grote circulatielussen aan weerszijden van de jet. De in figuur 7.7^a weergegeven PIV-opname is geanalyseerd, resulterend in het in figuur 7.7^b weergegeven stromingsveld. De ingestelde stroboscoop-frequentie was 427 Hz, het debiet 1.6 l/min, de belichtingstijd 1/60 seconde.

Uit de analyse blijkt dat bij deze instelling de stroming van jet goed beschreven kan worden. Te zien is dat de jet enigszins verbreedt op het punt waar het vrije oppervlak bereikt wordt. De circulatielus wordt daarentegen erg slecht beschreven. Zoals vermeld levert de PIV-analyse wegens de spiegelsymmetrie van de autocorrelatiefunctie twee mogelijkheden voor de richting van de berekende snelheidsvector \underline{v} , die onderling 180° verschillen. Het circuleren van de stroming kan met behulp van de PIV-analyse dan ook niet afdoende beschreven worden. Ook is opvallend dat de snelheidsvectoren in de circulatielussen wat betreft de *grootte* slecht beschreven worden. Nadere bestudering van de PIV-opname toont aan dat:

- de deeltjesdichtheid in het centrum van een lus veel lager is dan daarom heen. Blijkbaar zijn de optredende versnellingen in de vloeistof te groot voor de deeltjes en kunnen deze de vloeistofstroming niet volgen.
 - Naar het centrum toe neemt de snelheid van de deeltjes af en gaan de corresponderende afbeeldingen elkaar overlappen. Zoals in hoofdstuk 5 beschreven is, levert dit problemen bij de detectie van de verplaatsingspiek R_D en wordt de hoogste ruispiek als het met de verplaatsing overeenkomende signaal gezien.
 - Er treden duidelijke snelheidsgradiënten op in de interrogatiegebieden. Verkleining van een interrogatiegebied heeft tot wel tot gevolg dat de snelheidsgradiënt eventueel een acceptabele waarde aanneemt, maar leidt er toe dat de afmetingen van het gebied kleiner zijn dan de optredende verplaatsing.
-

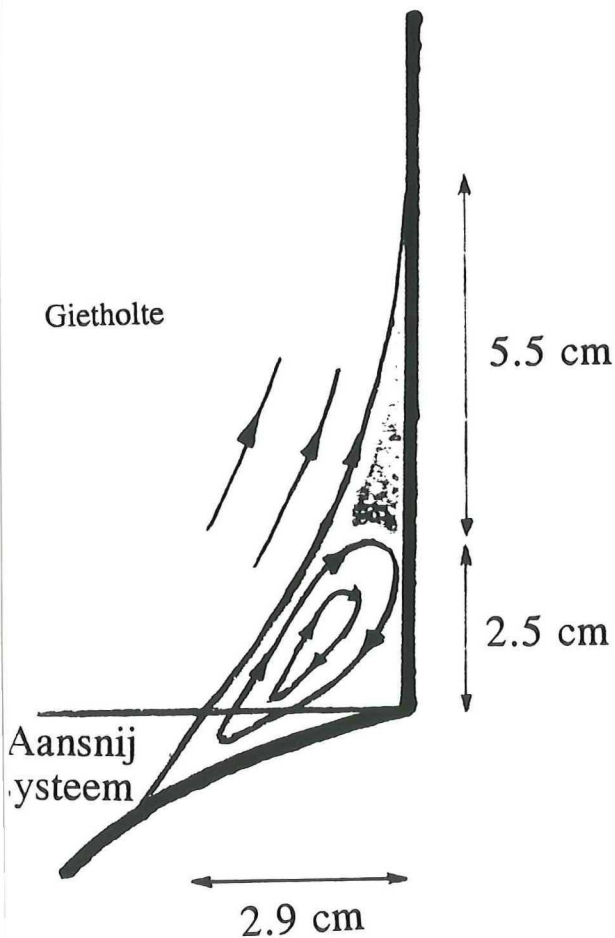


8 cm

Figuur 7.8

Analyse van het derde systeem.

- a. Bewerkte PIV-opname van de rechteronderkant van de plaatvorm. Rechtsonder is de ontstane circulatielus te zien.
- b. PIV-analyse van de in 7.7^a afgebeelde opname.
- c. Nadere analyse van circulatielus. Tot ongeveer 2.5 cm in de plaat vertoont de stroming een lus; hoger in de plaat een wervel.



Debiet = 12.5 liter/min.
 Frequentie = 440 Hz.

7.2.4 PIV-analyse van het derde systeem

Bij een gieting met het derde systeem vertoont de stroming, zoals eerder in dit hoofdstuk vermeld werd, bij elk bestudeerd Reynoldsgetal twee circulatielussen onderin de gietholte. In figuur 7.8^c is de vorm van deze lus getoond. De circulatielussen bevinden zich in het aansnijsysteem en werken door in de gietholte. Ze worden door de geometrie van het aansnijsysteem veroorzaakt. Bij een laag vloeistofdebiet treedt er een rustig draaiende circulatie op, bij een hoger debiet ontstaat boven de circulatielus een wervel. Wat bij de bestudering van de PIV-opnamen opvalt, is dat in de lus de deeltjesdichtheid lager is dan in de hoofdstroom. Dit zal voor de PIV-analyse vermoedelijk problemen leveren.

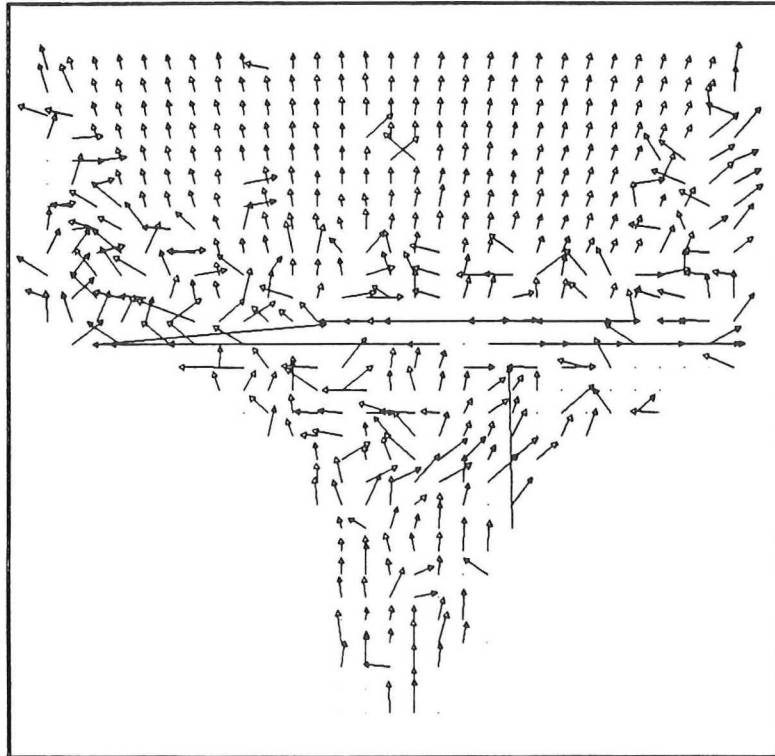
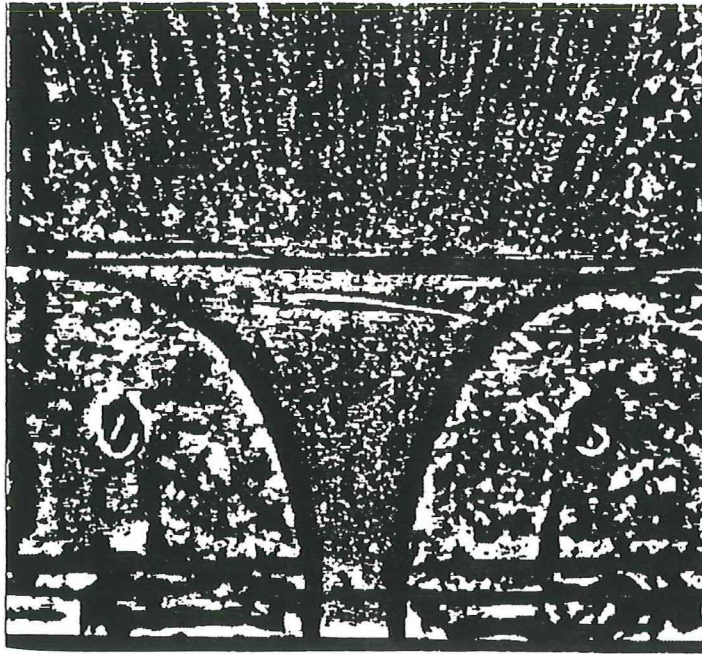
De in figuur 7.8^a weergegeven opname toont een deel van de gietvorm. In de rechteronderkant van de opname is de optredende circulatielus waar te nemen. De PIV-analyse van deze opname staat in figuur 7.8^b. Uit de figuur blijkt dat de circulatielussen inderdaad slecht beschreven worden door de analysemethode. Behalve de lage deeltjesdichtheid kunnen dezelfde argumenten aangedragen worden als beschreven in de vorige paragraaf bij het tweede aansnijsysteem.

Zoals uit de oriëntatie van de snelheidsvectoren blijkt, beïnvloedt het aansnijsysteem de stroming in de gietholte. Net als bij het eerste aansnijsysteem ‘waaiert’ de vloeistof enigszins uit in de richting van de circulatielus. Pas boven de lussen blijkt er een uniform stromingsveld op te treden.

In figuur 7.9 staat een analyse van het gehele systeem getoond. De opname is genomen onder dezelfde omstandigheden als de opname weergegeven in figuur 7.8. Net als bij het eerste aansnijsysteem blijkt het onderste deel van het gietsysteem slecht weergegeven te worden. Ook in dit geval kunnen dezelfde redenen gegeven worden voor de slechte kwaliteit van de analyse.

De stroming in de gietholte wordt, behalve in de twee circulatielussen en op het punt waar het aansnijsysteem overgaat in de gietholte, goed weergegeven. Duidelijk is te zien dat de stroming in de gietholte uitwaaiert. Het optreden van circulatielussen heeft tot gevolg dat de hoofdstroom geen gebruik maakt van het totale beschikbare doorstroomde oppervlak. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er versnelling optreedt op het punt waar het aansnijsysteem overgaat in de gietholte.

Uit de bovenstaande punten blijkt dat het derde aansnijsysteem, mede door het ontstaan



Figuur 7.9

PIV-opname en -analyse van stationaire stroming in het derde aansnijstelsel.

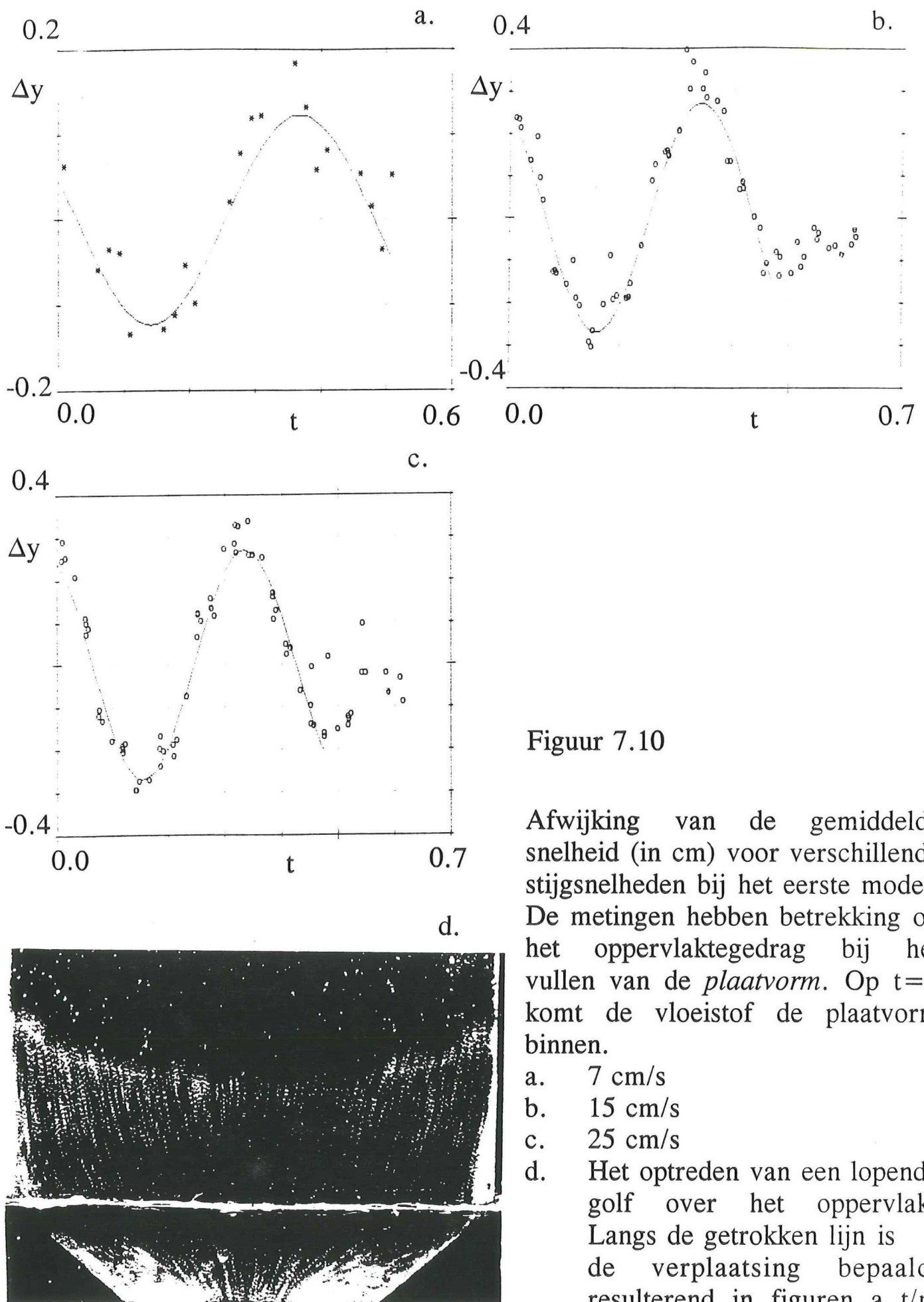
Stroboscoopfrequentie: 440 Hz.

Belichtingstijd: 1/60 sec.

Debiet: 12.5 l/min.

van de circulatielussen geen homogeen gegoten platen tot gevolg zal hebben. Omdat de lussen *in* de gietholte zelf optreden, zal het derde aansnijstelsel zo mogelijk slechtere resultaten leveren dan het eerste systeem. Zoals vermeld treden de lussen bij het eerste gietsysteem slechts op in het aansnijstelsel.

Uit de PIV-analyses van de drie verschillende systemen kan geconcludeerd worden dat PIV een analysemethode is, die alleen optimale resultaten levert als aan veel (externe) eisen voldaan wordt.



Figuur 7.10

Afwijking van de gemiddelde snelheid (in cm) voor verschillende stijgsnelheden bij het eerste model. De metingen hebben betrekking op het oppervlaktegedrag bij het vullen van de *plaatvorm*. Op $t=0$ komt de vloeistof de plaatvorm binnen.

- a. 7 cm/s
- b. 15 cm/s
- c. 25 cm/s
- d. Het optreden van een lopende golf over het oppervlak. Langs de getrokken lijn is de verplaatsing bepaald, resulterend in figuren a t/m c.

7.3 Analyse van het vulproces

Behalve door gebruik te maken van de PIV-analyse is het vulproces ook bestudeerd door het gedrag van het vrije oppervlak te volgen. Dit onderzoek is verricht door het vrije oppervlak tijdens een vulling meerdere malen vast te leggen op een fotografische plaat.

7.3.1 Vulproces bij het eerste aansnijsysteem

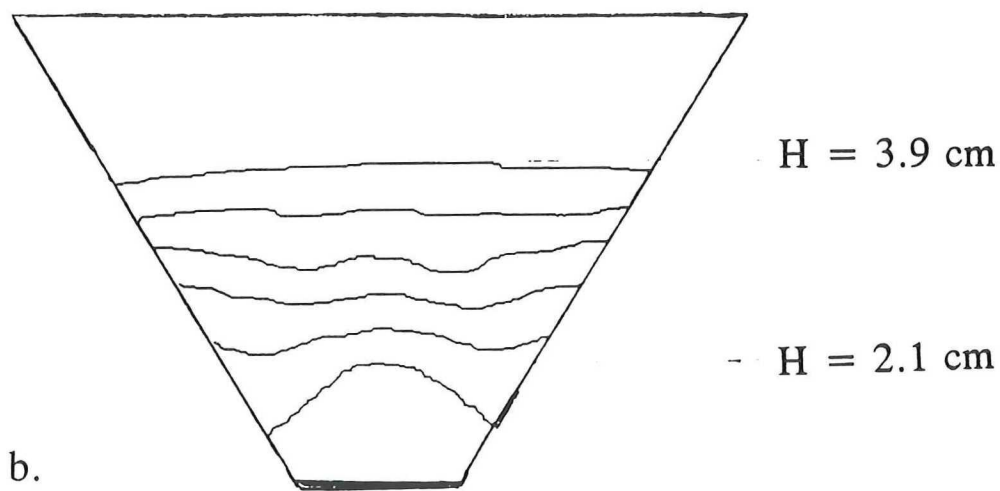
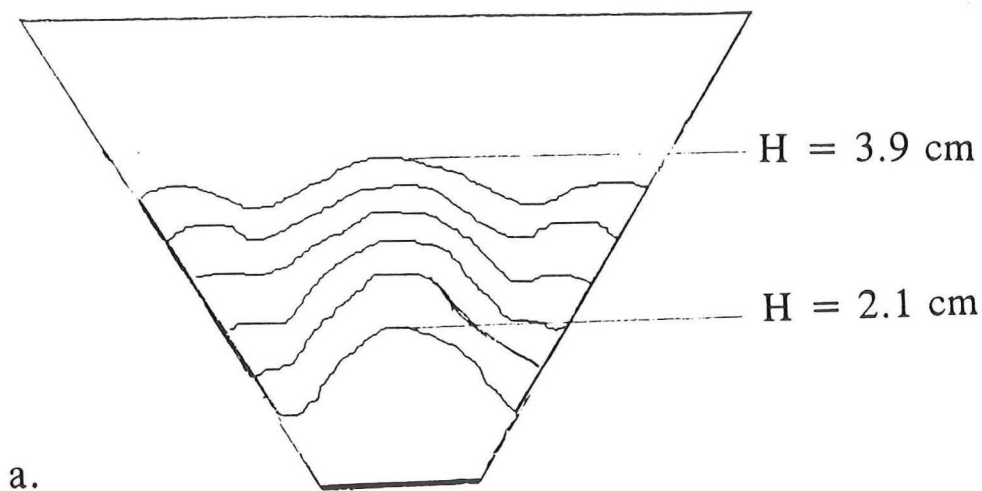
Het vloeistofoppervlak vertoont bij een vulling met het eerste aansnijsysteem een duidelijk golfgedrag. Om een beeld te krijgen van het karakter van deze golven is met behulp van de in bijlage 6 beschreven methode het oppervlakgedrag bepaald. Met deze methode wordt bepaald in welke mate de hoogte van het oppervlak, gemeten op de in figuur 7.10^d aangegeven positie, verschilt met de waarde die deze zou hebben als het oppervlak geen golfgedrag vertoont. Zoals uit figuur 7.10^d blijkt, treedt aan het oppervlak duidelijk golfvorming op. In de afgebeelde figuur vertoont het oppervlak een dal.

De analyse is verricht voor de gietholte van het eerste aansnijsysteem. De resultaten van de metingen staan uitgezet in figuur 7.10. Tijdens het onderzoek bleek dat de verschillende experimenten, mits uitgevoerd onder dezelfde omstandigheden, goed reproduceerbaar zijn.

Uit het onderzoek kwam naar voren dat de in de periode $t=0$ (het moment dat de vloeistof de gietholte binnenkomt) en $t=0.5$ seconde het oppervlak een sinus-gedrag vertoont. Uit de meetpunten is te zien dat gedurende dit tijdsinterval het oppervlak een volledige periode doorloopt. Hierna dempt de oppervlaktegolf sterk uit. Om een beeld te krijgen van de aard van de golf is een regressiefunctie door de punten gefit. Hierbij zijn de punten gebruikt die binnen de periode van de sinus vallen (voor $t < 0.5$ seconde). Bij de regressie is de volgende functie gebruikt:

$$\Delta y = \alpha \sin(\omega t + \beta)$$

De analyse resulteerde in de in tabel 7.1 weergegeven waarden.



Figuur 7.11 Gedrag van het vrije oppervlak in het eerste aansnijstelsel tijdens een vulling. Het oppervlak is bij een analyse meerdere malen vastgelegd.

a. debiet 12.5 l/min, 60 Hz.

b. debiet 6.84 l/min, 30 Hz.

Tabel 7.1 Resultaten van de regressie voor verschillende stijgsnelheden, corresponderend met figuur 7.10^a t/m 7.10^c.

Stijgsnelheid	α	ω	β
cm/s	cm	rad/s	rad
7	0.12	13.8	1.73
15	0.27	17.0	2.03
25	0.27	17.4	2.03

Bij hogere snelheden was het niet mogelijk het golfgedrag vast te leggen, omdat de vloeistof in de eerste halve seconde een te grote afstand heeft afgelegd. Een volledig periode kon in deze gevallen niet worden vastgelegd.

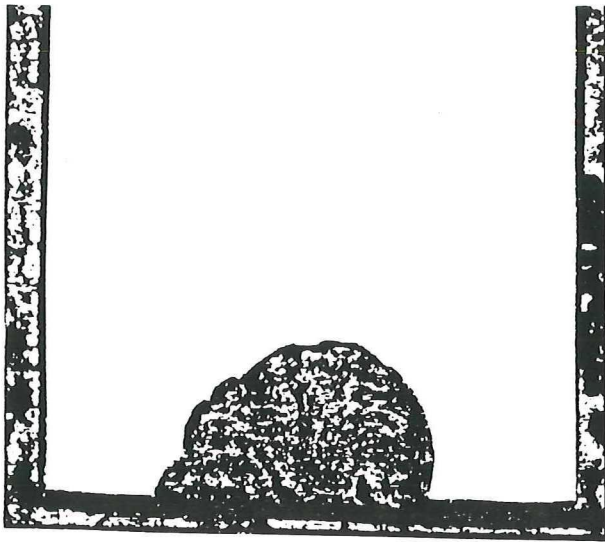
Uit de tabel blijkt dat er over de vloeistof een oppervlaktegolf loopt met een frequentie van ongeveer 2.5 Hz. Het golfgetal χ en daarmee de golflengte λ van de oppervlaktegolf volgen uit de Kelvin-vergelijking [lit.2]:

$$\omega^2 = g\chi + \frac{\sigma \chi^3}{\rho}$$

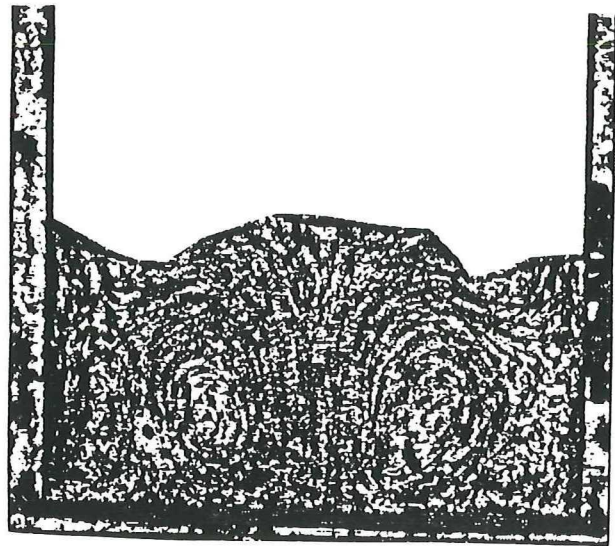
Dit levert een oppervlaktegolf met een golflengte van ongeveer 20 à 30 cm, hetgeen in overeenstemming is met de waarnemingen. Tijdens een vulling is duidelijk een sinusvormig gedrag waar te nemen.

Ook het vrije oppervlak in het aansnijsysteem is gevolgd. In figuur 7.11 is het oppervlaktegedrag bij verschillende debieten getoond. Op het punt waar het doorstroomd oppervlak een maximum bereikt, blijkt dat er golfvorming optreedt in het vrije oppervlak. Golven met een golflengte van rond de 25 cm worden, wat betreft de frequentie, niet beïnvloed door de oppervlaktespanning. Indien aangenomen wordt dat de golflengte opgedrongen wordt door de dimensies van het gietsysteem, kan geconcludeerd worden dat ook het vloeibare metaaloppervlak een golf met een frequentie van 2.5 Hz vertoont. De amplitude zal door de hogere dichtheid echter lager zijn.

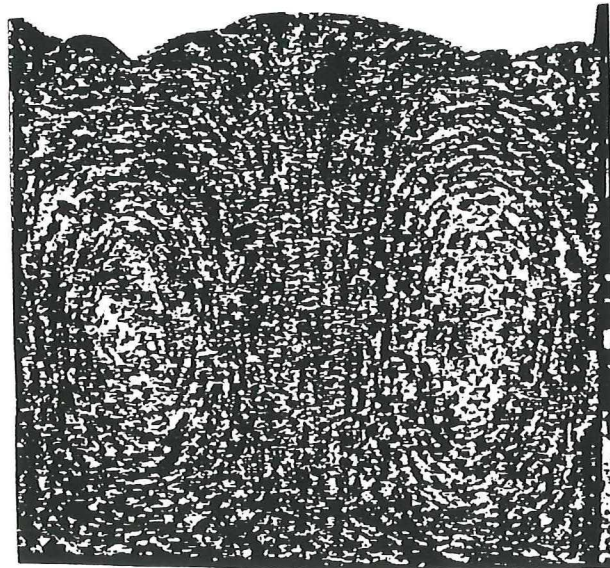
In het onderzochte gebied (tot $Re \approx 2000$) zijn geen spuitgietaffecten waargenomen. De kritische vulsnelheid is dus nog niet bereikt. Omdat er geen pompen met een hoger vermogen beschikbaar waren, was het niet mogelijk het kritische Reynoldsgetal te bepalen.



a.



b.



c.

Figuur 7.12 Gietingen met het tweede aansnijstelsel. Het debiet is 1.6 l/min ($Re_{jet} \approx 2000$). Op het tijdstip $t=0$ is de vloeistof de gietholte binnengekomen.

a. $t = 0.3$ sec.

b. $t = 1.6$ sec.

c. $t = 3.0$ sec.

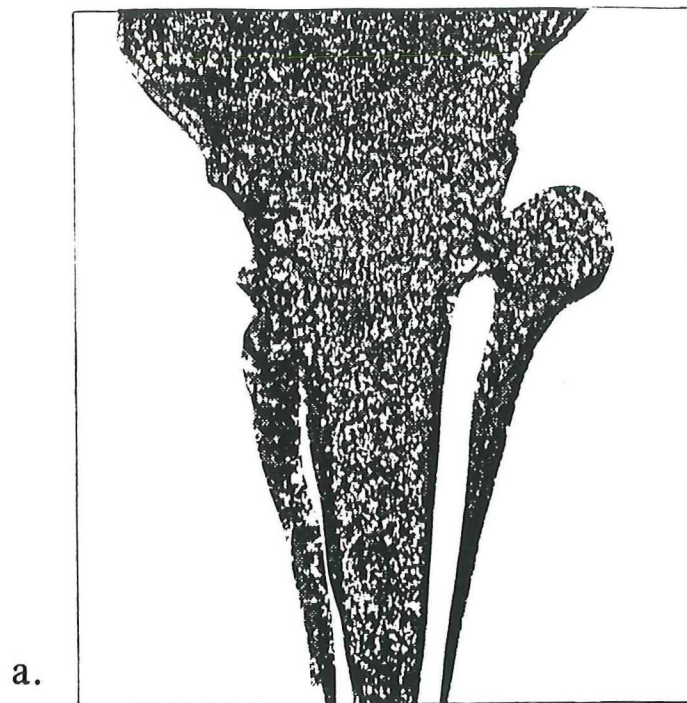
7.3.2 Vulproces bij het tweede aansnijsysteem

Het tweede aansnijsysteem vertoont een lineair afnemend doorstroomd oppervlak. Door de vorm van het systeem komt de vloeistof niet uniform de gietholte binnen, maar via een smalle opening, die ongeveer 1/7 deel van de totale breedte bestrijkt. Omdat het doorstroomde oppervlak afneemt, neemt de stijgsnelheid van de vloeistof sterk toe. Het proces vertoont dan ook hogere Reynoldsgetallen dan bij de andere aansnijsystemen.

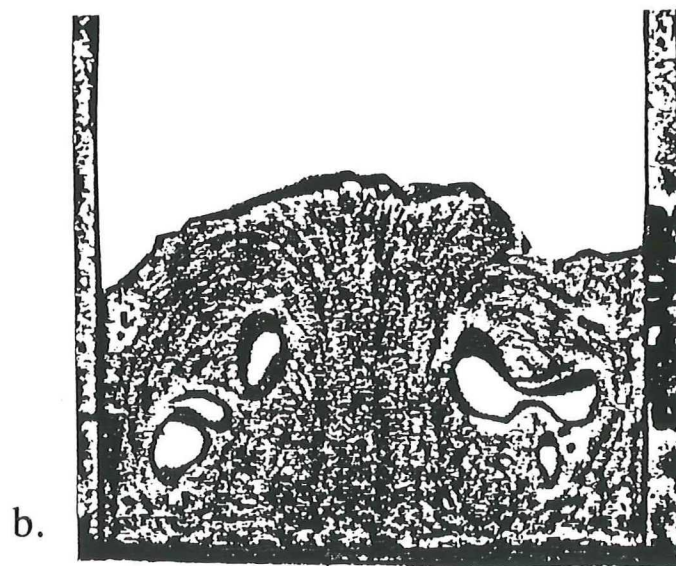
Een gieting, die plaats vindt met het behulp van het tweede aansnijsysteem, vertoont, bij gelijk debiet, een veel sterker golvend vrij oppervlak. Dit wordt veroorzaakt de hogere vloeistof snelheid. In figuur 7.12 staat een tijdens dit onderzoek gefotografeerde vulling getoond. Een vulling kan als volgt beschreven worden. Via het aansnijsysteem dringt de vloeistof de gietholte binnen. Afhankelijk van het ingesteld debiet bereikt deze jet een bepaalde hoogte ($h \sim Re^2$). Omdat de gravitatiekracht de opwaarts gerichte stroming afremt, stroomt vloeistof weer naar beneden, op deze wijze een soort 'paddestoel' vormend. Om de jet heen vormen zich circulatielussen, die, zoals uit figuur 7.12 blijkt, de rest van de gietholte vullen. De mogelijkheid bestaat dat bij het omslaan van de jet luchtbellens worden ingevangen. Dergelijke luchtbellens kunnen -vooral als het kleinere zijn (zie relatie (3.4))- met de circulerende stroming mee draaien. Het is reëel te veronderstellen dat deze bellens door de snel optredende stolling het gietijzer niet meer kunnen verlaten, hetgeen een poreuze plaat tot gevolg heeft.

Het systeem is onderzocht voor stromingen tot $Re \approx 18000$. Het gedrag van de stroming kan afhankelijk van Re ruwweg in drie groepen ingedeeld worden.

1. Tot $Re=1500$. De stroming komt de vorm rustig binnen. Er is geen sprake van een duidelijke jet, de vloeistof verdeelt zich gelijkmatig over de vorm. In de praktijk zal bij deze stijgsnelheid koudloop tot de mogelijkheden behoren.
2. Rond $Re=5000$ blijken luchtbellens in de vloeistof opgenomen te worden (zie figuur 7.13^b)
3. Bij hogere Re spuit de jet naar binnen, zoals is afgebeeld in figuur 7.13^a. Er ontstaat een zeer turbulente stroming, wat geen goede gieting tot gevolg zal hebben.



a.



b.

Figuur 7.13

Gietingen met het tweede aansnijstelsel.

- a. Het optreden van spuitgieteffecten bij een debiet van 12.5 l/min ($Re_{jet} \approx 18000$). Een dergelijke gieting levert, zoals in de figuur te zien is, geen uniforme snelheid in de gietholte.
- b. Bij gietingen met een Reynoldsgetal groter dan ongeveer 5000 worden luchtballen in de vloeistof opgenomen. Deze stromen rond in de circulatielus.

Nadelen van het tweede systeem	
-	In de gietholte treden sterke snelheidsgradiënten op. Vooral bij de lagere debieten (<3 l/min), vindt buiten de jet nauwelijks stroming van betekenis plaats. Eventuele stollingsverschijnselen kunnen tijdens het gietproces al optreden.
-	De mogelijkheid van koud loop is aanwezig. Dit probleem treedt sterker dan bij de andere twee onderzochte aansnijsystemen.
-	Bij hogere debieten worden luchtbellens in het materiaal opgenomen. Deze luchtbellens kunnen ingevangen worden in de circulatielussen. De mogelijkheid bestaat dat ze door deze optredende stroming het vloeibare metaal voor het stolproces begint niet meer kunnen verlaten en op deze wijze de gietijzeren plaat poreus maken.

Uit het bovenstaande blijkt dat het bovenstaande aansnijsysteem ongeschikt is voor het gieten van vlakke platen. Omdat een dergelijk systeem kan ontstaan door stolling in het aansnijsysteem, dient ook dit verschijnsel voorkomen te worden.

7.3.3 Vulproces bij het derde aansnijsysteem

Het derde aansnijsysteem is onderzocht voor Reynoldswaarden tot 2000. In deze regio konden geen spuitgieteffecten waargenomen worden. Het kritische Reynoldsgetal kon bij dit aansnijsysteem dan ook niet bepaald worden.

Hoofdstuk 8.

Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek

8.1 De onderzochte aansnijsystemen

Tijdens dit onderzoek zijn drie verschillende aansnijsystemen voor het gieten van vlakke platen bestudeerd. Geconcludeerd is dat geen van de aansnijsystemen voldeed aan de gestelde eisen. In deze paragraaf zullen de conclusies van het onderzoek gegeven worden.

Het eerste aansnijsysteem (zie figuur 2.1) vertoonde voor $Re < 2000$ een sterke circulatielus (zie figuur 7.1). Omdat in een dergelijke lus het vloeibare metaal sneller stolt, bestaat de kans dat de gietvorm tijdens de vulling gedeeltelijk of geheel afgesloten wordt. In het eerste geval kunnen er spuitgieteffecten ontstaan, in het tweede geval wordt de gieting geblokkeerd. Experimenteel is gebleken dat de aanwezigheid van de circulatielussen effect heeft op de stroming in de gietholte. Onder $Re = 2000$ konden geen spuitgieteffecten waargenomen worden. Het kritische Reynoldsgetal is bij het eerste systeem dan ook groter dan 2000. Ook het gedrag van het vrije oppervlak is bestudeerd. Gevonden werd dat er golven over het oppervlak lopen met een frequentie van 2.5 Hz. Met behulp van de Kelvin-vergelijking resulteerde dit in een golflengte van 20 à 30 cm, hetgeen in overeenstemming is met de waargenomen situatie.

Het tweede aansnijsysteem is onderzocht voor Reynoldswaarden kleiner dan 20000. Met dit gietsysteem werd een (door stolling) gedeeltelijk geblokkeerd aansnijsysteem gesimuleerd. Uit de uitgevoerde gietingen bleek dat het aansnijsysteem geen uniforme snelheidsverdeling in de gietholte tot gevolg had, wat gezien de geometrie van het systeem ook niet verwacht kon worden. De stroming vertoonde in de gietholte een al dan niet turbulente jetstroming, omgeven door sterke circulatielussen. Bij een kritisch Reynoldsgetal van ongeveer 5000 treden spuitgieteffecten op, wat tot gevolg heeft dat luchtbelletjes door het vloeibare metaal worden ingevangen. Door de sterke circulatielussen bestaat de mogelijkheid dat deze bellen de vloeistof, terwijl het stolproces begint, niet meer kunnen verlaten. Het zal duidelijk zijn dat porositeit geen gunstige effecten heeft op de mechanische eigenschappen van het gegoten metaal. Uit het onderzoek werd geconcludeerd dat stolling in een aansnijsysteem vermeden moest worden.

Het derde aansnijsysteem, met een constant doorstroomd oppervlak, bleek tegen de

verwachtingen in circulatielussen te vertonen. Vermoed wordt dat dit te wijten is aan het niet continu differentieerbaar zijn van de functie, die de hydraulische diameter beschrijft, op het punt waar het aansnijsysteem overgaat in de gietholte. Ook dit systeem is onderzocht voor Reynoldswaarden kleiner dan 2000. Spuitgieteffecten konden in dit gebied niet worden waargenomen. Het kritische Reynoldsgetal ligt dan ook boven de waarde 2000.

Door de stromingsverschijnselen van de verschillende aansnijsystemen te bestuderen, zijn enkele conclusies getrokken betreffende het ontwerp van een optimaal functionerend aansnijsysteem. Onder optimaal wordt in dit geval verstaan een uniforme stroming en een zo hoog mogelijk kritisch Reynoldsgetal.

Geconcludeerd werd dat een optimaal functionerend aansnijsysteem

- | | |
|---|--|
| - | een constant doorstroomd oppervlak heeft. |
| - | een hydraulisch diameter heeft, die op het punt waar het aansnijsysteem overgaat in de gietholte continu differentieerbaar is. |
| - | een uitstroomopening heeft met dezelfde dimensies als de instroomopening van de gietholte. |

Bovenstaande conclusies zijn nog niet experimenteel of numeriek bevestigd. Er is daarom een aansnijsysteem ontwikkeld dat voldoet aan bovenstaande eisen. Een suggestie voor verder onderzoek is het bestuderen van het stromingsveld, dat ontstaat als dit systeem gebruikt wordt.

8.2 De PIV-analyse

Tijdens dit onderzoek is een parameteranalyse uitgevoerd voor de PIV-analyse. Met behulp van een simulatieprogramma zijn opnamen gemaakt, die varieerden in deeltjesdichtheid, aantal belichtingen en belichtingstijd. Tevens werden de effecten van in de stroming heersende snelheidsgradiënten onderzocht. De PIV-analyses werden verricht met zelf ontwikkelde programmatuur en met het aan het Laboratorium voor Aero- & Hydrodynamica ontwikkelde programma *ScanA*. De resultaten en conclusies van de parameteranalyse zijn terug te vinden in paragraaf 5.6 en tabel 5.1.

Eén van de onderwerpen van dit onderzoek was het bestuderen van de toepasbaarheid van de Particle Image Velocimetry voor het bepalen van het stromingsveld in de gietsystemen.

Tabel 8.1. Eisen voor een optimale PIV-analyse.

1. De PIV-opnamen moeten van een goede kwaliteit zijn.
Ten eerste moet de opname goed ontwikkeld worden. De belichte deeltjes moeten duidelijk afgebeeld zijn ten opzichte van de achtergrond. Ook mogen er geen krassen of andere verstoringen op het fotografisch materiaal aanwezig zijn.
Ten tweede moeten de omstandigheden, waaronder de PIV-opnamen genomen worden, aan bepaalde eisen voldoen.
 - de lichtopbrengst moet zo optimaal mogelijk zijn. Dit is te regelen met de lichtbron, maar ook met het visualisatiemiddel. Gebleken is dat deeltjes met een diameter van $100\ \mu\text{m}$ een goede lichtopbrengst leveren [lit].
 - de perspexvorm mag geen lichtverstrooiende verstoringen bevatten. Krassen en verbindingsnaden tussen twee perspexplaten blijken voor een goede analyse funest te zijn.
 - er mogen zich in de vloeistof geen verontreinigingen bevinden.
 - de deeltjes, die de stroming visualiseren, mogen zich niet als een cluster door het systeem bewegen.
2. Er zijn bij de PIV-analyse verscheidene parameters, die het resultaat van een analyse bepalen. Deze moeten dan ook optimaal gekozen worden. Deze parameters zijn:
 - het aantal deeltjes per interrogatiegebied.
 - de tijd tussen twee flitsen van de stroboscooplamp.
 - de afmetingen van een interrogatiegebied.
 - de belichtingstijd van de fotocamera.
 - de vergrotingsfactor van de lens.

In hoofdstuk 5 zijn deze punten uitgebreid aan de orde gekomen.

Gebleken is dat de stroming in de *gietholte* redelijk bepaald kan worden, mits het stroming geen sterke snelheidsgradiënten vertoont. Zodra er echter circulatielussen in de stroming optreden (zoals bij het tweede en derde aansnijsysteem), is de methode niet langer toepasbaar. Dit wordt veroorzaakt door de snelheidsgradiënten, die in een te analyseren interrogatiegebied optreden. Deze snelheidsgradiënten zorgen ervoor dat het signaal, dat overeen komt met de gemiddelde verplaatsing in het interrogatiegebied, niet langer gedetecteerd kan worden (zie eventueel paragraaf 5.8).

In het aansnijsysteem zijn de resultaten van de analyse van duidelijk mindere kwaliteit. Dit is te wijten aan de gevoeligheid van de PIV-analyse voor externe factoren. Het aansnijsysteem leent zich wat betreft geometrie niet voor de PIV-analyse. Ten eerste is het interrogatievolume in een aansnijsysteem groot in vergelijking tot die in de *gietholte*. De diepte van het aansnijsysteem varieert immers tussen 3 en 22 mm, terwijl de diepte van de *gietholte* slechts 3 mm bedraagt. Ten tweede treden er sterke snelheidsgradiënten in de drie richtingen op. Een derde probleem is dat door de afnemende diepte van de opstelling de camera niet goed op het stromingsveld scherp gesteld kan worden. Dit blijkt uit de opnamen die van het systeem gemaakt zijn. Om toch goede opnamen te krijgen van de aansnijsystemen wordt voorgesteld om verdere opnamen te nemen met behulp van een lasersheet in plaats van een stroboscoop. Dit heeft als voordeel dat de diepte van het interrogatiegebied beperkt wordt tot de dikte van de lasersheet. Een bijkomend voordeel is dat de lichtintensiteit dan uniform is.

Particle Image Velocimetry is een geschikte methode voor het bepalen van stromingsvelden gebleken, indien de stromingsvelden niet te gecompliceerd zijn. Optredende circulatielussen worden erg slecht beschreven. Een nadeel van de methode is ook de sterke gevoeligheid voor externe omstandigheden. In tabel 8.1 staan alle factoren, die enige invloed op de resultaten van de PIV-analyse kunnen hebben, opgesomd. Uit deze punten blijkt dat PIV een methode is, die niet makkelijk in elke situatie gebruikt kan worden.

8.3 Beeldbewerking

De PIV-opnamen zijn bewerkt met het beeldbewerkingspakket TCL-Image. Tijdens dit onderzoek is geen studie verricht naar de verschillende mogelijkheden die dit pakket biedt voor beeldbewerking. Er is gebruik gemaakt van een bij het Laboratorium voor Aero- en Hydrodynamica ontwikkelde routine.

Aangetoond is dat gebruik van de routine leidt tot betere PIV-resultaten. De gemiddelde signaal/ruis-verhouding blijkt toe te nemen, terwijl het aantal foutief berekende snelheidsvectoren afneemt. Gebruik van de routine is dan ook sterk aan te raden, alvorens de opname met de PIV geanalyseerd wordt.

8.4 Suggesties voor vervolgonderzoek

1. Onderzoek aan het voorgestelde aansnijstelsysteem.
 2. Het eerste en derde aansnijstelsysteem nogmaals bestuderen, maar met een zwaardere pomp. Het kritische Reynoldsgetal kan dan gevonden worden.
 3. PIV-opnamen belichten met een gepulseerde lasersheet in plaats van met een stroboscoop.
 4. Experimentele resultaten vergelijken met numerieke resultaten van simulatiepakketten (vooral oppervlaktegedrag).
-

Literatuur

1. W.S. Wang, R.A. Stoehr, *AFS Transactions*, **95** (1987), 425-430.
 2. R.W. van den Berg, Het gedrag van oppervlaktegolven, afstudeerscriptie (Delft), juni 1991.
 3. C.J.D. Pickering, J.M. Coupland, *Optics and Lasers in Engineering*, **9** (1988), 201-210
 4. J.Westerweel, F.T.M. Nieuwstadt, J.B. Flor, *Applications of Laser Techniques in Fluid Mechanics*, Springer (Berlin) 1991.
 5. R.D. Keane, R.J. Adrian, *Meas. Sci. Technol.*, **1** (1990), 1202-1215.
 6. R.J. Adrian, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **23** (1991), 261-304.
 7. J.F. Richardson, W.N.Zaki, *Trans. Instn. Chem. Engrs*, **32** (1954), 38 e.v.
 8. Barnea, Mizrahi, *Chem. Eng. J.*, (1973)-5, 171 e.v.
 9. J.E. Welch, F.H. Harlow, J.P. Shannon, B.J. Dally, The MAC-methode, a computing technique for solving viscous, incompressible, transient fluid flow, *Tech. Report LA-3425*, Los Alamos Scientific Laboratory (1966).
 10. W.S. Wang, R.A. Stoehr, *Materials Science and Technology*, **4** (1988), 240-250.
 11. W.E. Smith, J.F. Wallace, *AFS Transactions*, (1965).
 12. Weast e.a., *Handbook of Chemistry and Physics*, 67th edition (1986), CRC Press, Inc. Florida.
 13. C. Jordan, J.L. Hill, T.S. Piwonka, *AFS Transactions*, **96** (1988), 603 e.v.
-

Bijlage 1.

Digitaliseren met IRIS-TUTOR

In hoofdstuk 6 is beschreven dat de PIV-opnamen gedigitaliseerd worden met het programma IRIS-TUTOR. Er werd gebruik gemaakt van apparatuur dat ter beschikking werd gesteld door het Waterloopkundig Laboratorium te Delft. De gebruikte opstelling staat weergegeven in figuur 6.2. Het onder DOS draaiende programma IRIS-TUTOR bleek erg gebruikersvriendelijk te zijn. In deze bijlage zal kort beschreven worden hoe het digitaliseren met dit programma in zijn werk gaat.

Met behulp van de in hoofdstuk 6 beschreven apparatuur wordt de projectie van een negatief van een PIV-opname scherp gesteld. Met het commando

acq fra 1 to buf 1

wordt deze projectie verdeeld in 512x512 pixels en opgeslagen in buffer 1 van de computer.

Door nu het commando

save buf 1 to h:\filename.img

in te voeren wordt de data van buffer 1 overgeschreven naar een file met verplichte extensie .IMG. Met de commando's *dis buf 1* en *dis cam* kunnen respectievelijk de inhoud van buffer 1 en het camerasignaal op het monitorscherm gebracht worden. De uit te voeren procedure is eenvoudig en neemt per te digitaliseren opname ongeveer 1 minuut in beslag. Het grootste deel van de tijd wordt ingenomen door het opslaan van de data. Per 1.2 Mb diskette kunnen 4 foto's opgeslagen worden.

Bijlage 2.

Beeldbewerking met TCL-Image

Voordat met het programma ScanA de verplaatsing per interrogatiegebied bepaald wordt, wordt de kwaliteit van de gedigitaliseerde PIV-opname verbeterd met het beeldbewerkingspakket TCL-Image. In hoofdstuk 6 is beschreven dat hiervoor de TCL-routines *cst* en *bal2* zijn gebruikt. Om het uitvoeren van deze bewerkingen enigszins te vereenvoudigen is de onderstaande batchfile geschreven voor het gebruik binnen TCL-Image.

File /robert.tip

```
1      ! Hulpprogramma voor het bewerken van dia's.
2      ! Bevat 'cst' en 'bal2' als bewerkingprocedures.
3      * Declaring images and size of viewports.
4      decl image1 short 512 512
5      decl image2 short 512 512
6      decl image3 short 512 512
7      dison /x=512/y=512
8      * Enter inputfile (.img).
9      getimg image1
10     * Rotating 90 degrees.
11     rota image1 image2
12     * Showing picture (unchanged data).
13     disp image2
14     * Improving contrast.
15     cst image2
16     * Showing picture (2) with renewed contrast ('cst' passed).
17     disp image2
18     * Background corrections.
19     bal2 image2 image3
20     * Saving picture 2
21     writf image2 ?
22     * Showing picture (3) with background corrections ('bal2' passed).
23     disp image3
```

24 * Saving picture 3
25 writf image3 ?
26 * Completed !

Kort zal de werking van deze file besproken worden. In regel 4 t/m 6 worden foto's gedeclareerd als een matrix van 512 bij 512 pixels. In regel 7 wordt de viewport, het 'schermpje' waarop de uitgevoerde verrichtingen gevolgd worden, op de juiste grootte gezet. Vervolgens wordt de te bewerken foto ingelezen in TCL-Image met het commando *getimg*, dat speciaal geschreven voor IRIS-TUTOR files. Omdat bij het programma ScanA een stromingsrichting is ingesteld, moet de foto geroteerd worden totdat de richting van de hoofdstroom gelijk is aan die van de instelling van ScanA. Dit wordt gedaan met het TCL-Image commando *rota*. De foto is nu ingelezen en wordt naar de viewport gestuurd. Vervolgens vindt er een bewerking plaats met de routine *cst*. Dit commando verhoogt het contrast van de foto op een dusdanige wijze zodat alle 256 grijswaarden gebruikt worden. Na deze bewerking wordt het beeld getoond in viewport 2. Als tweede bewerkingstechniek wordt gebruik gemaakt van de routine *bal2*, een bij Aero- en Hydrodynamica ontwikkelde bewerkingsmethode. Nadat het nieuwe beeld in viewport 3 getoond is, kunnen de bewerkte beelden opgeslagen worden.

De batchfile *bal2* staat hieronder weergegeven.

File /bal2.tip

```
1 ! remove non-uniform background with min/max filter and normalize image
2 ! following the leo dorst method
3 decl/arg = 1 r1
4 decl/arg = 2 r2
5 decl/init = 15 fsize int
6 decl r3 short 512 512
7 decl bb short 512 512
8 ! displ/h = "Original"/v = 1 r1
9 * Detecting lower envelope
```

```
10  lmin r1,r2,fsize
11  unif r2,r2,fsize
12  ! displ/h = "Lower envelope"/v = 1 r2
13  * Detecting upper envelope
14  lmax r1,r3,fsize
15  unif r3,r3,fsize
16  ! displ/h = "Upper envelope"/v = 1 r3
17  * Calculating local contrast
18  sub r2,r3
19  clip r3,r3,1,
20  ! displ/h = "Local contrast"/v = 1 r3
21  * Pixels with a divider below a threshold (10) are masked
22  put r3,bb,10,0,0,1 ! detect "contrast too low"
23  mul bb,r1 ! and blank those pixels
24  sub r2,r1,r2
25  clip r2
26  * Normalise the image
27  mul 127,r2
28  div r3,r2
29  shif r2,r2,1
30  clip r2
31  ! displ/h = "Normalized"/v = 1 r2
```

Bijlage 3.

PIV-analyse met ScanA

Tijdens dit onderzoek is gewerkt met het programma *ScanA*, een programma dat middels de autocorrelatiemethode de verplaatsing in een interrogatiegebied kan bepalen. Met behulp van een FFT-routine wordt de verplaatsingspiek R_D gedetecteerd, waarna de schatter μ_D bepaald wordt door een Gauss-kromme te fitten door de basis en de top van verplaatsingspiek (vergelijk relatie (4.10)). De top van deze Gauss-kromme levert een schatter in het sub-pixel domein.

Het programma *ScanA* is ontwikkeld aan het Laboratorium voor Aero- & Hydrodynamica, TU Delft en is voor dit onderzoek in bruikleen gegeven. In deze bijlage zal de werking van het programma besproken worden. Voordat het programma opgestart wordt, moeten er een initialisatie plaatsvinden. Dit wordt gedaan door het commando

Setup scan

Er verschijnt dan een menu in beeld, waarmee respectievelijk de grootte van de PIV-opname, de grootte van een interrogatiegebied en de positie van de interrogatiegebieden ten opzichte van elkaar kunnen worden ingevoerd. Tijdens dit onderzoek werden PIV-opnamen met een afmeting van 512 bij 512 pixels gebruikt. De grootte van een interrogatiegebied werd standaard ingesteld op 32 bij 32 pixels. De interrogatiegebieden liggen op een afstand van 16 pixels van elkaars burens, zodat er een overlapping van 50% optreedt.

Het commando

scanA < file1 | flipy > file2

start de eigenlijke PIV-analyse op. *file1* is de inputfile, afkomstig van TCL-Image of IRIS-TUTOR. *file2* is de uitvoerfile, die voor elk beschouwd interrogatiegebied een x en y coördinaat, de verplaatsing s en de signaal/ruis-verhouding bevat. Het commando *flipy* is een eventueel te gebruiken bewerkingscommando, dat de y-coördinaat spiegelt.

Bijlage 4.

Software voor de dataverwerking

De door TCL-Image bewerkte PIV-opname dient als invoer voor het op UNIX draaiende programma ScanA, dat ontwikkeld is door Ir.J.Westerweel van het Laboratorium voor Aero- & Hydrodynamica, TU Delft. Het programma geeft per interrogatiegebied de x- en y-component van de snelheidsvector en een waarde voor de signaal/ruis-verhouding. Het programma was ten tijde van dit onderzoek nog niet volledig. Ten eerste kan een gedigitaliseerde foto niet geschaald worden, wat nodig is indien de pixels omgerekend moeten worden naar meters. Ten tweede is het niet mogelijk de vectoren te visualiseren. Om deze problemen te verhelpen zijn enige programma's geschreven.

Het programma FOTO.EXE.

Het programma ScanA bevat geen routine voor het tonen van de gedigitaliseerde foto, wat nodig is als men absolute waarden voor de snelheidsvectoren vinden wilt.

Om dit probleem op te lossen is het programma FOTO.EXE geschreven. Met behulp van dit programma kan een gedigitaliseerde foto niet alleen worden bekeken, maar ook worden geschaald. Het principe van het programma is vrij eenvoudig. TCL-Image bewerkt de ingelezen foto en is in staat om de (zwart-wit) foto op te waarderen tot 256 grijswaarden, genummerd van 0 (=zwart) tot 255 (=wit). Elke pixel van de 512 x 512 aanwezige pixels heeft een eigen grijswaarde. Deze waarden zijn opgeslagen in de *.DAT uitvoerfiles van TCL-Image. Om diskruimte te besparen worden de grijswaarden 'vertaald' naar hun overeenkomstige ASCII-codes. Zo wordt grijswaarde 19 opgeslagen als !! en grijswaarde 215 als †. Duidelijk is te zien dat bij deze manier van opslaan slechts 1 karakter per pixel nodig is. Een *.DAT file heeft een grootte van ongeveer 265 kb en bevat afgezien van de genoemde ASCII-codes een header van 512 bytes waarin informatie van TCL-Image is opgeslagen. Opgemerkt moet worden dat het verplaatsen van de file van UNIX naar DOS niet uitgevoerd kan worden met het in het Kramers Laboratorium gebruikte programma TERMP. Dit wordt veroorzaakt door de ASCII-code 3 (♥). Deze code is gelijk aan de code die gebruikt wordt voor het onderbreken van een programma (CTRL-C). TERMP reageert dan ook onmiddellijk als de *.DAT file gekopieerd wordt en beëindigt de procedure. De file wordt probleemloos (maar langzaam) overgezonden door het programma PC-KERMIT.

Het programma FOTO.EXE vertaalt de ASCII-codes naar de overeenstemmende waarde en geeft de pixels hun grijswaarde. Het programma is geschreven voor een VGA-scherm dat 640x480 pixels bevat. Dit heeft tot gevolg dat een klein deel van de foto niet

afgebeeld wordt. Gebleken is dat dit voor het onderzoek geen storende werking heeft.

Als de foto in beeld is gebracht krijgt de gebruiker de mogelijkheid te kiezen uit twee opties, te weten de optie (E)xit, waarmee het programma wordt verlaten en de optie (S)cale, waarmee de foto geschaald kan worden.

Met deze schaalprocedure kan bepaald worden uit hoeveel pixels een centimeter op de foto bestaat. De uitvoering is eenvoudig: met behulp van de muis wordt een lijnstuk van bekende grootte aangeklikt (bijvoorbeeld een meegefotografeerde lineaal) waarna het programma de schaalfactor bepaalt. Deze schaalfactor wordt opgeslagen in de file *.INP, evenals de door de gebruiker in te voeren stroboscoopfrequentie. Deze frequentie is vanzelfsprekend van essentieel belang als de vectoren een absolute waarde moeten hebben.

Het programma VECTOR.EXE.

De snelheidsvectoren worden gevisualiseerd door het programma VECTOR.EXE. Dit programma geeft de vectoren uit de reportfiles van ScanA grafisch weer. Elke groep van snelheden heeft een eigen kleur zodat eenvoudig grootte en richting van de snelheid bestudeerd kan worden. VECTOR.EXE biedt tevens de mogelijkheid om het vectorveld te plotten. De coördinaten worden dan vertaald en verwerkt tot een HPGL-file, die geschreven is in een voor een plotter begrijpelijke taal. De file, met een maximale grootte van ongeveer 100 kb, wordt weggeschreven als een *.PL1 file. Om de eerder genoemde reden moet de *.PL1 file met PC-KERMIT naar UNIX gekopieerd worden waarna met het commando *plot *.pli -k* de plotter geactiveerd wordt.

Hierna geeft VECTOR.EXE het veld nogmaals weer. De gemiddelde x en y snelheid van het hele veld zijn nu echter van elke vector afgetrokken. Met behulp van deze presentatie is vast te stellen wanneer de vloeistof uniform, dus met over de gehele breedte constante snelheid, stroomt. Ook dit vectorveld kan naar de plotter gestuurd worden. De HPGL-file krijgt de extensie PL2.

Bijlage 5.

Simulatie PIV-opname en weergave autocorrelatiefunctie

In hoofdstuk wordt een parameteranalyse voor de PIV gegeven. De PIV-opnamen, die bij dit onderzoek gesimuleerd zijn, werden gemaakt met het onderstaande UNIX/PASCAL-programma

Simulatieprogramma SIMUL.P

```
program veld (input,output);
var   xy                : array [1..550,1..550] of integer;
      vari,b,t1,t2,p,
      x,y,vx,vy,bel,RF,ru  : integer;
      t_in,t_uit,r        : text;
      name                : string[20];
BEGIN
  Write('* Aantal deeltjes   : ');Readln(p);
  Write('* Aantal belichtingen : ');Readln(b);
  Write('* Vx                : ');Readln(vx);
  Write('* Vy                : ');Readln(vy);
  Rewrite(t,'vx_vy');
  Writeln(t,Vx);Writeln(t,Vy);
  Close(t);
  FOR x:= 1 TO 512 DO FOR y:= 1 TO 512 DO xy[x,y] := 40;
  vari := 1;
  Reset(t_in,'random');
  FOR t1:= 1 TO p DO
  BEGIN
    Readln(t_in,x,y);
    FOR t2:= 1 TO b DO
    BEGIN
      IF (xy[x,y] < 225) AND (x>0) AND (y>0) AND (x<513) AND
(y < 513) THEN xy[x,y] := xy[x,y] + 30;
      x   := x + vx;
      y   := y + vy;
    END;
  END;
END;
```

```

END;
Rewrite(t_uit,'plaat.dat');
FOR x:= 1 TO 511 DO Write(t_uit,' ');
FOR x:= 1 TO 512 DO
BEGIN
  FOR y:= 1 TO 512 DO
  BEGIN
    Write(t_uit,chr(xy[x,y]));
  END;
END;
Close(t_in);
Close(t_uit);
Append(t_uit,'RESULTS.PIV');
Writeln(t_uit,'***** PIV-simulatie *****');
Writeln(t_uit,'*****');
Writeln(t_uit,'Vx      = ',vx);
Writeln(t_uit,'Vy      = ',vy);
Writeln(t_uit,'deeltjes = ',p);
Writeln(t_uit,'belichtingen = ',b);
Writeln(t_uit,'ruis      = ',RF);
Close(t_uit);
END.

```

De in hoofdstuk 4 en 5 getoonde autocorrelatiefuncties werden berekend met programma AUTOCOR. De functie werd driedimensionaal geplot met het programma MATLAB.

Het programma AUTOCOR staat hieronder weergegeven

```

Program Correlatie;
uses crt;
var t      : text;
    t1,t2,i : integer;
    x,y    : array [1..3000] of integer;
    v      : array [0..50,0..50] of longint;
    points : integer;
    tel    : integer;
    j,B,vv : integer;

```

```
BEGIN
Write('Points');Readln(points);
Write('B  ');Readln(B);

Randomize;
tel := 0;
vv:= 4;
FOR i:= 1 TO points DO
BEGIN
IF vv=4 THEN vv:= 5 ELSE IF vv=5 THEN vv:= 6 ELSE IF vv=6 THEN vv:= 4;
tel := tel + 1;
x[tel] := trunc(random(24)) + 1;
y[tel] := trunc(random(24)) + 1;
FOR j:= 1 TO B-1 DO
BEGIN
IF (x[tel]<20) AND (y[tel]<20) THEN
BEGIN
tel := tel + 1;
x[tel] := x[tel-1] + vv;
y[tel] := y[tel-1] + vv;
END;
END;
END;

points:= tel;

FOR t1:=0 TO 50 DO
BEGIN
FOR t2:=0 TO 50 DO
BEGIN
v[t1,t2] := 0;
END;
END;
END;

FOR t1:= 1 TO tel DO
BEGIN
```

```
FOR t2: = 1 TO tel DO
BEGIN
  v[25 + (x[t1]-x[t2]),25 + (y[t1]-y[t2])] := v[25 + (x[t1]-x[t2]),25 + (y[t1]-y[t2])] + 1;
END;
END;

Assign(t,'C:\matlab\uitvoer.m');
Rewrite(t);

FOR t1: = 0 TO 50 DO
BEGIN
  FOR t2: = 0 TO 50 DO
  BEGIN
    writeln(t,t1,' ',t2,' ',v[t1,t2]);
  END;
END;

Close(t);
END.
```

Bijlage 6

Het bepalen van de oppervlaktegolven

In hoofdstuk 7 is het karakter bepaald van de golven, die tijdens het vulproces over het vrije oppervlak bewegen. Dit is als volgt gedaan:

1. Met behulp van een stroboscoop worden ongeveer 10 momentopnamen van één vulling vastgelegd op één foto. Op deze foto is het golfgedrag waar te nemen.
 2. De positie van het vrije oppervlak in het midden van de gietholte wordt voor elke belichting vastgelegd (zie figuur 7.10^d).
 3. De gemiddelde verplaatsing per tijdseenheid wordt bepaald door een rechte lijn door deze punten te fitten.
 4. Berekend wordt op welk tijdstip elke opname gemaakt is.
 5. Van elk meetpunt wordt berekend wat de positie zou zijn als er geen oppervlaktegolven zouden optreden. Deze waarden worden van de meetpunten afgetrokken.
 6. Het uiteindelijke resultaat is de oppervlaktegolf, die weergegeven staat in figuur 7.10. In deze figuur staan per afbeelding de resultaten van verschillende metingen weergegeven. Het blijkt dat de experimenten goed reproduceerbaar zijn.
-