

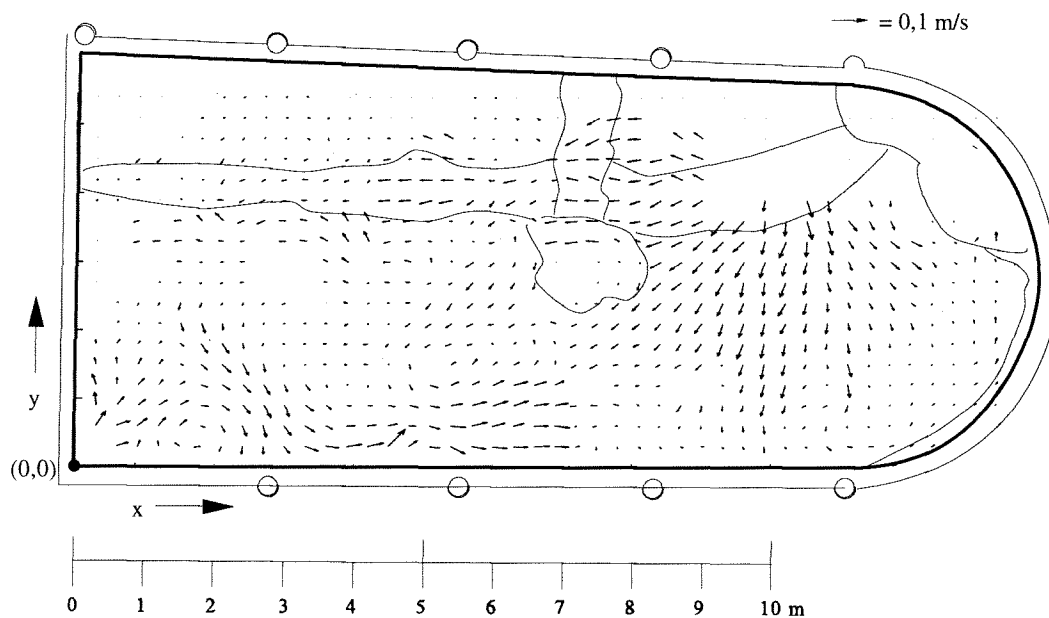
Stroming in een haaienbassin

onderzoek naar meetmethoden

November 1998

M. Klabbers

afstudeerverslag



Stroming in een haaienbassin

onderzoek naar meetmethoden

November 1998

M. Klabbers

afstudeerverslag

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Subfaculteit Civiele Techniek
Sectie Vloeistofmechanica

Afstudeercommissie:

Prof.dr.ir. G.S. Stelling
Prof.dr.ir. J.A. Battjes
Dr.ir. W.S.J Uijttewaal
Drs. M. Laterveer

TU-Delft
TU-Delft
TU-Delft
Diergaarde Blijdorp

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	De komst van het Oceanium	1
	1.1.1 beschrijving Oceanium	1
	1.1.2 Atlantische mensenhaai	1
	1.1.3 grondhaaien en vrij-zwemmende haaien	2
1.2	Invloed van waterstromingen op aquatische dieren	2
	1.2.1 invloed op Atlantische mensenhaai	2
	1.2.2 invloed op waterdieren	3
1.3	Probleem- en doelstelling	4
	1.3.1 algemene probleemstelling	4
	1.3.2 randvoorwaarden diergaarde Blijdorp	4
	1.3.3 doelstelling van dit project	5
	1.3.4 structuur van verslag	6
2	Turbulente stromingen	8
2.1	Turbulentie	8
	2.1.1 getal van Reynolds	8
	2.1.2 kenmerken van turbulentie	9
	2.1.3 beschrijving van turbulentie	10
	2.1.4 turbulente transporten	12
	2.1.5 turbulentie-intensiteit	12
2.2	Wandturbulentie	13
	2.2.1 principe van opwekking	13
	2.2.2 snelheidsprofielen	13
2.3	Vrije turbulentie	15
	2.3.1 principe van opwekking	15
	2.3.2 straal	15
	2.3.3 gelijkvormigheid	16
2.4	Metten en modelleren	16
	2.4.1 bepalen van snelheden	16
	2.4.2 belang van metingen voor model	18

3	Snelheidsmetingen	19
3.1	Te bepalen grootheden	19
	3.1.1 gemiddelde snelheden	19
	3.1.2 turbulentie-intensiteit	19
	3.1.3 globaal stroombeeld	19
3.2	Te meten situatie	20
	3.2.1 afmetingen	20
	3.2.2 watercirculatie	21
3.3	Aannames over de stroomsituatie	22
3.4	Criteria ten aanzien van geschiktheid meetmethoden	23
	3.4.1 meetnauwkeurigheid bij lage snelheden	23
	3.4.2 geschiktheid voor meting driedimensionaal stroombeeld	24
	3.4.3 verstoring van de stroming	24
	3.4.4 verstoring van het publiek	24
	3.4.5 verstoring van de dieren	25
	3.4.6 kwetsbaarheid van de apparatuur	25
	3.4.7 beschikbaarheid van de apparatuur	26
	3.4.8 uitvoerbaarheid van de meting	26
	3.4.9 dieptebereik van de meting	26
4	Inventarisatie meetmethoden	27
4.1	Classificatie methoden	27
4.2	Bespreking meetmethoden	28
	4.2.1 indompelbare Laser Doppler Anemometer (LDA)	28
	4.2.2 akoestische Doppler snelheidsmeter	31
	4.2.3 Elektromagnetische snelheidsmeter (EMS)	33
	4.2.4 Particle Tracking Velocimetry (PTV)	35
	4.2.5 Pitotbuis	37
	4.2.6 Micromolen	37
	4.2.7 Hittedraad	39
4.3	Keuze meetmethodiek	42

5	Experimenten	44
5.1	Particle Tracking Velocimetry	44
5.1.1	algemeen	44
5.1.2	camera	45
5.1.3	drijvers	45
5.1.4	proefopstelling Laboratorium voor Vloeistofmechanica	48
5.1.5	meetopstelling in Diergaarde Blijdorp	51
5.1.6	beeldbewerking	54
5.2	Elektromagnetische snelheidsmeting	57
5.2.1	algemeen	57
5.2.2	bemonsteringsfrequentie	58
5.2.3	meettijd	58
5.2.4	proefopstelling Laboratorium voor Vloeistofmechanica	58
5.2.5	meetopstelling in Diergaarde Blijdorp	61
6	Analyse van resultaten	63
6.1	Oppervlaktesnelheden	63
6.1.1	presentatie meetresultaten	63
6.1.2	foutenbronnen	70
6.2	Snelheden nabij de instroomopening	73
6.2.1	presentatie meetresultaten	73
6.3	Vergelijking resultaten beide meetmethoden	82
6.3.1	oppervlaktemeting met Elektromagnetische snelheidsmeter	82
6.3.2	oppervlaktemeting met Particle Tracking Velocimetry	82
6.3.3	conclusie	82
6.4	Analyse van de stroming	83
6.4.1	opsplitsing in twee stroomsituaties	83
6.4.2	stroomsituatie 1	83
6.4.2	stroomsituatie 2	84
6.4.3	bijzondere stroomsituaties voor dieren	84

7	Conclusies en aanbevelingen	86
7.1	Geschiktheid meettechnieken	86
7.1.1	geschiktheid ten aanzien van snelheidsmetingen	86
7.1.2	geschiktheid ten aanzien van modellering	87
7.1.3	geschiktheid ten aanzien van biologie	88
7.1.4	overzicht voor- en nadelen van gebruikte meetmethoden	89
7.1.5	voordeel van gecombineerde meting	90
7.2	Conclusies uit het gemeten stroombeeld	90
7.2.1	afwezigheid van dode zones	90
7.2.2	aanwezigheid van storende stroomsituaties voor dieren	90
7.3	Aanbevelingen	91
7.3.1	aanbevelingen ten aanzien van de stroomsituatie	91
7.3.2	aanbevelingen ten aanzien van meettechnieken	91
7.3.3	aanbevelingen ten aanzien van modellering	92
	Bijlage 1	93
	Literatuurlijst	100

1 Inleiding

1.1 De komst van het Oceanium

1.1.1 beschrijving Oceanium

In het huidige Roel Langerakpark te Rotterdam breidt Diergaarde Blijdorp uit met een gebouw waarin diersoorten die in en nabij de oceanen leven een plaats krijgen. Dit gebouw wordt het Oceanium genoemd. Op 11 november 1997 is de eerste paal geslagen en in het jaar 2000 zal het project worden opgeleverd. Het Oceanium wordt een verzameling biotopen, bewoond door dieren en planten. Beginnend aan de Europese kust voert de tocht door de Atlantische Oceaan naar de kustgebieden van Amerika. Tijdens de tocht door het Oceanium ziet de bezoeker honderden diersoorten: variërend van microscopisch kleine zeediertjes en vlinders tot haaien, een pinguïnkolonie en zee-otTERS. In het deel van de Atlantische Oceaan komt een haaienaquarium van ongeveer 30 bij 30 meter. In dit bassin wordt een 22 meter lange tunnel gebouwd, van waaruit het publiek de vissen kan observeren.

1.1.2 Atlantische mensenhaai

Een van de haaiensoorten die het toekomstige Oceanium moeten gaan bevolken, is de Atlantische mensenhaai. Dit is een haaiensoort die voortdurend zwemt. De Atlantische mensenhaai wordt zelden in een dierentuin gehouden omdat deze haaiensoort zeer hoge eisen stelt aan verzorging en beschikbare ruimte. Een grote leefruimte is nodig omdat de haaien ongeveer drie meter lang kunnen worden en altijd moeten kunnen zwemmen. In het Oceanium is genoeg leefruimte om deze haaiensoort te houden.

Omdat Diergaarde Blijdorp niet via de handel aan deze haaiensoort wilde komen, is besloten ze zelf te gaan vangen. Een viertal jonge haaien is gevangen voor de oostkust van de Verenigde Staten en overgebracht naar Diergaarde Blijdorp waar ze verblijven in de Amazonehal. Er is gekozen voor jonge dieren, omdat bij het vangen en transporteren van volwassen dieren de kans op overlijden groter is. Jonge dieren zijn minder gevoelig voor stress en zijn makkelijker te vangen en te vervoeren dan volwassen haaien, waardoor de kosten van vangst en transport lager liggen. Bovendien is er, nu de dieren nog klein zijn, voldoende leefruimte in het huidige bassin. Wanneer het Oceanium gereed is zullen de dieren hier naar toe verhuizen.

1.1.3 grondhaaien en vrij-zwemmende haaien

Haaien hebben altijd een waterstroming langs hun kieuwen nodig om de benodigde zuurstof uit het water te halen en afvalstoffen af te kunnen voeren. Er wordt onderscheid gemaakt tussen grondhaaien en vrij-zwemmende haaien. Grondhaaien kunnen stilliggen; hun ademhaling wordt op gang gehouden door in en rond de mondholte gelegen spieren, die voor waterbeweging langs de kieuwen zorgen. Vrij-zwemmende haaien moeten echter altijd in beweging blijven om de noodzakelijke waterstroom langs hun kieuwen te krijgen. Een voorbeeld van een grondhaai is de Verpleegsterhaai. De Atlantische mensenhaai is een vrij-zwemmende haai.

1.2 Invloed van waterstromingen op aquatische dieren

Diergaarde Blijdorp stelt zich ten doel om in het Oceanium zoveel mogelijk dieren uit eigen kweek te houden. Hiervoor is een goede gezondheid van de dieren noodzakelijk. Een factor die het welzijn van de waterdieren beïnvloedt is het aanwezige stroombeeld in het bassin. In de volgende subparagrafen wordt een aantal aspecten genoemd, waaruit de invloed van de waterstroming op Atlantische mensenhaaien en waterdieren in het algemeen zal blijken.

1.2.1 invloed op Atlantische mensenhaai

glijvluchten

De zwemspieren van de Atlantische mensenhaai komen niet tot rust als het dier voortdurend moet zwemmen. Eén van de aspecten, die het welzijn van de haaien sterk beïnvloedt en de levensduur kunnen verlengen, is het al dan niet kunnen maken van zogenaamde 'glijvluchten'. Een glijvlucht is een beweging waarin een haai zich zonder zwembewegingen door het water laat glijden. De duur van de glijvlucht wordt bepaald door de aanwezige ruimte en stroming. Uit observaties blijkt er in het huidige haaienbassin een stroomsituatie te zijn, waarbij de haaien regelmatig glijvluchten maken.

schaafwonden

Wanneer de haaien met de wanden van het bassin in contact komen, kunnen de dieren schaafwonden oplopen. Deze schaafwonden kunnen aanleiding geven tot huidinfecties, wat de gezondheid van de dieren nadelig beïnvloedt. Uit observaties van de haaien in de Amazonehal blijkt dat een aantal haaien verwondingen heeft, die mogelijk ontstaan zijn door botsingen met de wanden van het bassin. Het zwemgedrag van de haaien, waarbij de dieren tegen de wanden botsen, wordt beïnvloed door de aanwezige waterstroming.

1.2.2 invloed op waterdieren

verversing van water

Water waar aquatische dieren in leven wordt vervuild door niet opgegeten voedselresten en uitwerpselen van de dieren. In stilstaand water kan tevens een tekort aan zuurstof optreden. Het water zal regelmatig verversst moeten worden om deze verschijnselen te voorkomen. In de oceanen gebeurt dit op een natuurlijke wijze, terwijl in een kunstmatig bassin met pompen een stroming wordt opgewekt om het water te circuleren. Water wordt uit het bassin gepompt en gezuiverd voordat het weer in het bassin wordt teruggebracht.

Het is van belang dat er in een bassin geen zones ontstaan waar het water niet of nauwelijks verversst wordt. Deze zones worden stagnante zones of 'dode' zones genoemd. Daar is nauwelijks of geen uitwisseling is met het omringende water. Dit kan vervelende gevolgen hebben voor de dieren die er leven. Door de stroming van het water in het haaienbassin in kaart te brengen kan worden bepaald of er gebieden zijn waar zogenaamde 'dode' zones ontstaan.

favoriete stroombeelden

In de oceanen, en in de natuur in het algemeen, heeft ieder dier een favoriete leefplaats. Of een plek favoriet is hangt vanzelfsprekend af van het aanwezig zijn van voedsel en bescherming; bij mariene organismen blijkt ook het stroombeeld een rol te spelen. Bepaalde dieren komen alleen in sterk stromend water voor, terwijl anderen in stilstaand water leven. Sommigen prefereren een afwisselende waterbeweging, terwijl anderen geen speciale voorkeur hebben.

Er is nog weinig inzicht in welke dieren gevoelig zijn voor het stroombeeld en welke factoren ten grondslag liggen aan de genoemde voorkeuren. Om in een dierentuin zee-organismen te houden moet een omgeving gecreëerd worden waarin ze goed gedijen; een omgeving, waar het stroombeeld overeenkomstig is met de natuurlijke omgeving: een omgeving aangepast aan het organisme. De favoriete stroombeelden hoopt men te vinden door gedragswaarnemingen van de dieren te koppelen aan de ter plaatse gemeten stroomsnelheden.

1.3 Probleem- en doelstelling

1.3.1 algemene probleemstelling

Er is behoefte aan gegevens over het stroombeeld in de huidige bassins en in het te bouwen Oceanium. Diergaarde Blijdorp heeft zelf geen instrumenten en kennis in huis om stroomsnelheden te bepalen. Men wil beschikken over een meet-techniek die hiervoor geschikt is. Bij het meten van de stroomsnelheden moet rekening worden gehouden met onderstaande randvoorwaarden.

1.3.2 randvoorwaarden Diergaarde Blijdorp

dieren

De jonge haaien in het bassin in de Amazonehal zijn waardevol voor de vissenafdeling. Er is veel moeite voor gedaan om ze gezond en wel over te brengen naar hun huidige verblijfplaats. Om de gezondheid van de dieren te behouden moeten ze zo min mogelijk gestoord worden. Stress is een belangrijke factor. Wanneer de dieren schrikken kunnen ze tegen de wanden of de bodem aanbotsen waardoor ze gewond kunnen raken.

Naast de haaien leven er nog andere dieren in het te meten bassin. Dit zijn twee soepschildpadden en een karetschildpad. Ook deze nieuwsgierige dieren mogen geen schade ondervinden van de metingen van stroomsnelheden.

organisatie

Het bassin is langs één lange zijde begrensd met planten. Deze planten horen tot het domein van de Botanische Dienst. Zonder toestemming van deze dienst mogen ter plekke geen werkzaamheden uitgevoerd worden. Achter de planten staan bakken waarin dieren gekweekt worden. Deze kweekbakken horen tot de Reptielenafdeling, die op de hoogte moet worden gesteld bij activiteiten in de buurt van de dieren. De benodigde meetinstrumenten mogen geen belemmering zijn voor de activiteiten van de verzorgers.

publiek

Bij het bepalen van het stroombeeld moet rekening gehouden worden met het publiek. De Amazonehal is een ruimte die toegankelijk moet blijven voor bezoekers. Grote opvallende constructies moeten worden vermeden. Tijdens metingen van stroomsnelheden kan het publiek door een vrijwilliger of een medewerker worden geïnformeerd over het doel en de toedracht van de meetactiviteit. Aangezien het vanaf elf uur s'ochtends druk wordt in de dierentuin, zullen ingrijpende activiteiten bij voorkeur plaats moeten vinden vóór die tijd. Op de woensdagmiddag is het erg druk evenals tijdens schoolexcursies.

1.3.3 doelstelling van dit project

Het doel van dit project is vaststellen of het mogelijk is om het stroombeeld te bepalen van een relatief klein bassin waarin dieren leven. Hiervoor wordt een aantal meetmethoden met elkaar vergeleken. Vastgesteld moet worden welke meetmethoden het meest geschikt zijn om metingen te kunnen uitvoeren in soortgelijke bassins.

In het huidige haaienbassin worden metingen verricht die uitgangspunt kunnen zijn voor een toekomstige modellering van dit haaienbassin, het nieuwe haaienbassin in het Oceanium en eventuele andere bassins. Metingen van het stroombeeld zijn nodig om de betrouwbaarheid van een modellering te garanderen.

Door een analyse van het stroombeeld in het huidige bassin te maken kan geconcludeerd worden of er stroomsituaties heersen die het welzijn van de dieren nadelig beïnvloeden. Ook kan een koppeling gemaakt worden tussen het stroombeeld en het gedrag van de dieren; hierbij zal in eerste instantie het gedrag van de haaien beschouwd worden. Deze koppeling zal door de medewerkers van Diergaarde Blijdorp worden gemaakt.

1.3.4 structuur van verslag

In dit eerste hoofdstuk is de achtergrond van dit project behandeld. Het belang van het in kaart brengen van de waterstroming in een bassin is besproken. De probleemstelling, de randvoorwaarden en de doelstellingen van dit project zijn geformuleerd. Uit de probleemstelling komt naar voren dat Diergaarde Blijdorp over een meettechniek wil beschikken waarmee het stroombeeld in het huidige haaienbassin en het te bouwen Oceanium kan worden bepaald. De Diergaarde heeft behalve voor een meettechniek tevens belangstelling voor computer-modellering als middel om de stroomsnelheden in bassins te bepalen.

Om een stroombeeld goed te kunnen modelleren of uit metingen te kunnen bepalen is kennis nodig van waterstromingen in het algemeen en turbulente stromingen in het bijzonder. Elementen die een rol spelen in een turbulente stroming worden in hoofdstuk 2 behandeld. In het haaienbassin is een aantal factoren aanwezig die een goede modellering van het bassin bemoeilijken. Zo zijn uiteenlopende lengteschalen aanwezig van te modelleren structuren, treden er plaatselijk sterke driedimensionale effecten op en blijken de instroompunten moeilijk te modelleren. Vanwege deze specifieke problemen zijn referentiemetingen in het bassin van belang om de betrouwbaarheid van een - met een model berekend - stroombeeld te kunnen garanderen.

Om metingen te kunnen verrichten in het huidige haaienbassin worden in hoofdstuk 3, naast de te bepalen grootheden en de te meten situatie, tevens de aannames over de aanwezige stroomsituatie beschreven. De criteria waaraan een meetmethode moet voldoen, om geschikt te zijn om snelheden in het haaienbassin te meten, worden eveneens in hoofdstuk 3 opgesteld.

Een aantal methoden voor het meten van snelheden, wordt in hoofdstuk 4 beschreven. De meetmethoden worden getoetst op hun geschiktheid aan de hand van de, in hoofdstuk 3 opgestelde, criteria. Na deze toetsing wordt een keuze gemaakt voor een geschikte meetmethode.

Twee meetmethoden, die in hoofdstuk 4 gekozen zijn, worden uitvoerig behandeld in hoofdstuk 5. Vermeld wordt wat nodig is om goede meetresultaten te verkrijgen. Om ervaring op te doen met de meetmethoden is geëxperimenteerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Zowel dit experiment als de werkelijke meting in Diergaarde Blijdorp worden in hoofdstuk 5 beschreven.

De resultaten van de meetexperimenten in Diergaarde Blijdorp worden in hoofdstuk 6 gepresenteerd en geanalyseerd. De foutenbronnen die van invloed zijn op het meetresultaat van de meting worden eveneens behandeld. Ter controle worden de resultaten van de twee meetmethoden met elkaar vergeleken.

In hoofdstuk 7 worden conclusies getrokken over de geschiktheid van de meetmethoden. Na aanleiding van de bevindingen worden de voor- en nadelen van de gebruikte meetmethoden en het voordeel van een gecombineerde meting genoemd. Uit het gemeten stroombeeld worden eveneens conclusies getrokken. Tenslotte worden enkele aanbevelingen gegeven om metingen en modelleringen van het haaienbassin en soortgelijke bassins in de toekomst te optimaliseren.

2 Turbulente stromingen

Vrijwel overal komen in de natuur stromingen voor. Voorbeelden hiervan zijn stromingen in rivieren en zeeën, stromingen van lucht en grondwaterstromingen. Turbulentie speelt een belangrijke rol bij stroming. In dit hoofdstuk wordt beschreven wat turbulentie is, wat het doet en hoe de mate ervan bepaald kan worden. Met de behandelde theorie kan inzicht worden verkregen in turbulente stromingen, wat belangrijk is bij een meting van de mate van turbulentie. Tevens wordt beschreven wat de problemen zijn bij een modellering van de stroming in het haaienbassin.

Voor de beschrijving van de theorie met betrekking tot turbulentie is veelvuldig gebruik gemaakt van het dictaat Vloeistofmechanica (Battjes, 1990) en het dictaat Turbulentie (Booij, 1992).

2.1 Turbulentie

2.1.1 getal van Reynolds

Stroming kan turbulent of laminair zijn. Een maat om te bepalen of stroming turbulent dan wel laminair is, is het dimensieloze getal van Reynolds:

$$Re = \frac{U * L}{\nu}$$

waarin:

- U een voor de stroming karakteristiek snelheidsverschil is;
- L een karakteristieke lengte is waarover dit snelheidsverschil optreedt;
- ν de kinematische viscositeit is van het stromende medium.
 $\nu_{\text{water}} = 1 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ bij 20°C

Bij een klein Reynoldsgetal is de invloed van de viscositeit groot ten opzichte van de invloed van de traagheid. De stroming verloopt ordelijk en in lagen. Wanneer het getal van Reynolds kleiner is dan ongeveer 1000 wordt de stroming laminair genoemd. Een voorbeeld van laminaire stroming is grondwaterstroming. Op grond van het getal van Reynolds kan de stroming in het haaienbassin, bij een diepte van 1,5 m, laminair genoemd worden indien de stroomsnelheid van het water lager is dan $\frac{2}{3} \text{ mm/s}$.

Bij grotere getallen van Reynolds hebben laminaire stromingen de neiging om instabiel te worden. Er ontstaat dan turbulentie. Een Reynoldsgetal van groter dan 4000 duidt op turbulente stroming. Stromingen in de natuur zijn veelal turbulent. Een rivier met een diepte van 5 m, die stroomt met een snelheid van 1 m/s, heeft al een Reynoldsgetal van $5 \cdot 10^6$. Waterstroming in zeeën, rivieren en kanalen kunnen als turbulent beschouwd worden. De stroming in het haaienbassin wordt turbulent genoemd, bij een diepte van 1,5 m, wanneer de stroomsnelheid van het water groter is dan 3 mm/s. Dit zal vrijwel overal in het bassin het geval zijn.

Turbulentie is een eigenschap van de stroming, niet van een vloeistof. Een vloeistof kan afhankelijk van de omstandigheden laminair of turbulent stromen. Of een stroming laminair of turbulent is heeft invloed op een groot aantal stromingsverschijnselen zoals:

- snelheidsverdeling in allerlei stromingsconfiguraties;
- bodemweerstand in rivieren, kanalen en dergelijke;
- dissipatie van energie in stromingen;
- krachten op voorwerpen in een stroming;
- verspreiding en menging in de vloeistof.

2.1.2 kenmerken van turbulentie

Turbulentie kan alleen ontstaan in stromingen waar energie vanuit de hoofdbeweging aan de turbulente beweging wordt overgedragen. Hiervoor zijn snelheidsverschillen nodig, welke een turbulente schuifspanning veroorzaken. De schuifspanning kan samen met het snelheidsverschil de energieoverdracht tot stand brengen.

Een precieze definitie van turbulentie is niet te geven. De belangrijkste kenmerken van turbulentie zijn echter wel bekend:

onregelmatigheid

Verschijnselen in een turbulente stroming treden onregelmatig op (random). Met statistische methoden kan de stroming beschreven worden.

diffusiviteit

In een turbulente stroming treedt een groot transport op van impuls, warmte en deeltjes.

driedimensionale wervelsterkte fluctuaties

Turbulentie is een driedimensionaal verschijnsel met een hoog niveau van fluctuerende wervelsterkte.

dissipatie

De energiedissipatie is bij een turbulente stroming veel groter dan bij een laminaire stroming. Veel energie van de turbulente beweging gaat verloren door viskeuze dissipatie in de kleine wervels. Het in stand blijven van turbulentie gaat samen met een aanvulling van energie uit de hoofdbeweging van de stroming.

2.1.3 beschrijving van turbulentie

balansvergelijkingen

Een continuümbeschrijving mag gebruikt worden omdat de kleinste turbulente bewegingen die voorkomen groot zijn ten opzichte van de moleculaire lengteschalen. Bij de beschrijving van turbulentie wordt gebruik gemaakt van massabalans en een impulsbalans. Deze zijn beschreven in de vorm van een continuïteitsvergelijking en een Navier-Stokes-vergelijking. Hier wordt een constante dichtheid, ρ , verondersteld in de vloeistof. Tevens wordt de dynamische viscositeit, $\eta = \rho \cdot \nu$, onafhankelijk van de plaats verondersteld.

De continuïteitsvergelijking luidt:

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0$$

waarin: u_1 de snelheid in de 1^e richting is (x-richting);
 u_2 de snelheid in de 2^e richting is (y-richting);
 u_3 de snelheid in de 3^e richting is (z-richting).

De Navier-Stokes-vergelijking bestaat uit 3 vergelijkingen ($j=1,2$ of 3) en luidt:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \nabla_i(\rho u_i u_j) + \nabla_j p - \eta \nabla_i^2 u_j = k_j$$

waarin: i de waarde 1, 2 en 3 aanneemt;
 p de druk is;
 k_j de j -de component van de uitwendige kracht is.

Met de continuïteitsvergelijking en de Navier-Stokes-vergelijking zijn vier vergelijkingen beschikbaar die in principe opgelost kunnen worden. De Navier-Stokes-vergelijking is niet lineair vanwege de kwadratische convectieterm, $\nabla_i(\rho u_i u_j)$. Bij getallen van Reynolds kleiner dan ca.1000 is de Navier-Stokes-vergelijking bij benadering lineair. Het systeem is dan stabiel. Bij grotere getallen van Reynolds overheerst de kwadratische convectieterm waardoor het systeem onstabiel wordt. Kleine verschillen in begin- en randvoorwaarden kunnen belangrijke verschillen in de oplossing geven.

Reynoldsvergelijking

Zoals in § 2.1.3 is vermeld kan de turbulente beweging alleen statistisch beschreven worden. Een statistische methode om turbulentie te kunnen beschrijven is het opsplitsen van een stroomsnelheden in een gemiddelde snelheid en een incidentele afwijking hiervan:

$$u = \bar{u} + u'$$

Deze methode kan ook op de continuïteitsvergelijking en de Navier-Stokes-vergelijking toegepast worden. De ensemblagemiddelde Navier-Stokes-vergelijking staat bekend als de Reynoldsvergelijking:

$$\text{RE: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_j) + \nabla_i(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \nabla_i q_{ij} + \nabla_j \bar{p} - \eta \nabla_i^2 \bar{u}_j = \bar{k}_j$$

Hierin zijn q_{ij} de Reynoldsspanningen:

$$q_{ij} = \rho \overline{v_i' v_j'}$$

sluitingsprobleem

De Reynoldsvergelijking lijkt op de Navier-Stokes-vergelijking. Een verschil is het voorkomen van de Reynoldsspanningen. Het systeem van de gemiddelde continuïteitsvergelijking en de Reynoldsvergelijking is hierdoor niet op te lossen zonder extra vergelijkingen. Er zullen extra relaties voor de Reynoldsspanningen opgesteld moeten worden om het systeem op te kunnen lossen. Dit wordt het sluitingsprobleem van de turbulentie genoemd. Het sluitingsprobleem kan met numerieke modellen worden benaderd.

Mengweghypothese, mengweglengte

De oplossingsmethoden berusten veelal op de aanname van gradiënt-type transporten. Aangenomen wordt dat de turbulente transporten evenredig zijn met de gradiënten van de betreffende grootheden in de hoofdstromen. Een veel gebruikte aanname voor een gradiënt-type transport is de Mengweghypothese van Prandtl. Deze veronderstelt dat vloeistofpakketten, die zich in een turbulente vloeistofstroming verplaatsen, tijdens hun beweging de eigenschappen van hun ontstaansplek bewaren en zich na een verplaatsing over een zekere afstand weer volledig met de omgeving mengen. Een maat voor deze afstand is de mengweglengte l_m .

2.1.4 turbulente transporten

Een schuifspanning veroorzaakt in vloeistoffen en gassen een voortgaande vervorming met een eindige vervormingssnelheid. De evenredigheidsfactor tussen schuifspanning en vervormingssnelheid van een vloeistof wordt de dynamische viscositeit η genoemd. In formulevorm geldt voor de schuifspanning τ :

$$\tau_{ij} = \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

De kinematische viscositeit ν , die gebruikt wordt om het getal van Reynolds te bepalen, is gedefinieerd als $\nu = \eta/\rho$. Hierbij is ρ de massadichtheid van de vloeistof.

Zoals in § 2.1.3 bij de kenmerken van turbulentie is vermeld, treedt in een turbulente stroming een groter transport van impuls, warmte en deeltjes op dan bij een laminaire stroming. De turbulente transporten zijn vele malen groter dan de moleculaire transporten. Een maat voor de transportmogelijkheid van impuls is de viscositeit. De kinematische (moleculaire) viscositeit van water bedraagt ongeveer $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Bij een turbulente stroming moet met turbulente viscositeit worden gerekend om het transport goed te kunnen beschrijven. Een voorbeeld is de rivier de Waal, waar de turbulente viscositeit tienduizend keer zo groot is als de kinematische viscositeit.

Het impuls- en stoftransport kan in laminaire stroming beschreven worden met begrippen als viscositeit en diffusiecoëfficiënten. Bij turbulente stroming is dit lastig omdat de turbulente varianten van deze begrippen afhankelijk zijn van stromingsconfiguratie, tijd, plaats en snelheid.

2.1.5 turbulentie-intensiteit

Om de mate van turbulentie in een stroming te bepalen is kennis over snelheidsfluctuaties noodzakelijk. Wanneer de snelheid in een punt sterk fluctueert duidt dat op de aanwezigheid van turbulente wervels. Een deterministische beschrijving van het probleem is echter niet eenvoudig, omdat de verschijnselen in een turbulente stroming onregelmatig optreden. Met statistische methoden kan de stroming gekarakteriseerd worden. De standaarddeviatie is een statistische maat voor de mate van spreiding van een dataset:

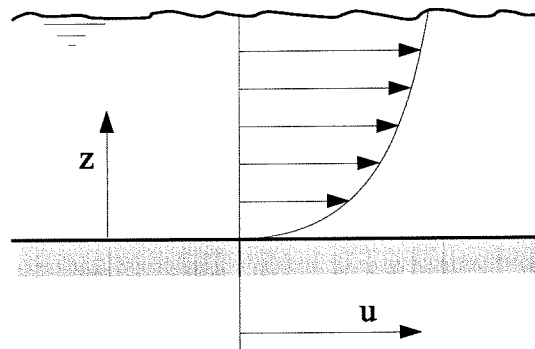
$$\text{sd} = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}}$$

2.2 Wandturbulentie

2.2.1 principe van opwekking

Er kan onderscheid worden gemaakt tussen twee typen van turbulentie die op verschillende manieren ontstaan: wandturbulentie en vrije turbulentie. Door schuifspanning bij de wand ontstaat bij wandturbulentie het benodigde snelheidsverschil, dat nodig is voor het ontstaan van turbulente wervels. De schuifspanning treedt op als gevolg van de aan de wand heersende plakconditie. Door de schuifspanning wordt de stroming afgeremd. Een voorbeeld van wandturbulentie is de stroming in een rivier of goot, zoals te zien is in figuur 2-1. In het snelheidsprofiel van uniforme stroming, waarbij de snelheid alleen met de diepte varieert is de snelheidsgradiënt du/dz .

Figuur 2-1:
wandturbulentie
in rivier



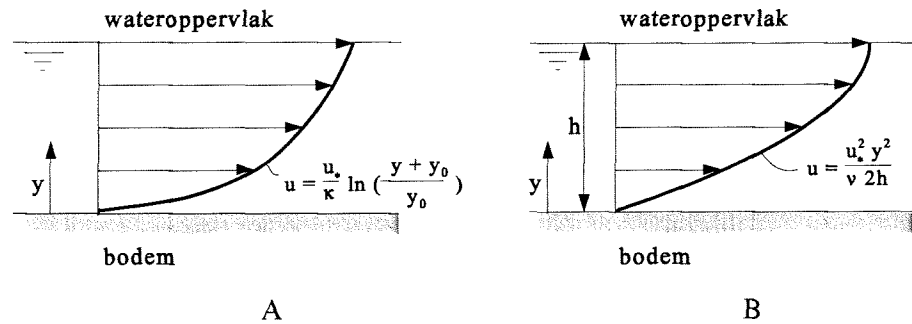
2.2.2 snelheidsprofielen

Een stroming in een open waterloop zoals een rivier heeft een snelheidsverdeling die bij benadering logaritmisch is. Er is hier sprake van turbulente stroming waarbij de menglaag volledig is ontwikkeld. De bodem veroorzaakt een schuifspanning. Door evenwicht van krachten en spanningen ontstaat een lineaire schuifspanningsverdeling.

Bij een turbulente stroming in het algemeen heeft het snelheidsverdeling een logaritmisch verloop, terwijl bij een laminaire stroming het snelheidsprofiel parabolisch verloopt. Beide profielen zijn afgebeeld in figuur 2-2.

Figuur 2-2:

logaritmisch (A) en
parabolisch (B)
snelheidsprofiel



waarin:

u_* de schuifspanningssnelheid is;

κ de constante van Von Karman is: $\kappa \approx 0.4$;

y_0 een constante is zodanig dat: $u=0$, waar $y=0$;

ν de kinematische viscositeit is

De profielen in figuur 2-2 zijn geïdealiseerde profielen. In de praktijk kan een ander profiel optreden. Wind, bijvoorbeeld, kan een schuifspanning op het vrije oppervlak uitoefenen, waardoor het schuifspanningsverloop verandert. Bij smalle rivieren of goten wordt de invloed van de zijwand merkbaar, waardoor de schuifspanningsverdeling verandert. In principe kan, wanneer bekend is welk profiel er in een stroming heerst, uit de oppervlaktesnelheid de snelheid op andere diepten worden berekend. In de praktijk komt een volledig ontwikkeld snelheidsprofiel nauwelijks voor te komen door invloeden van wanden en bodem.

Een snelheidsprofiel heeft een bepaalde tijd en afstand nodig om zich volledig te kunnen ontwikkelen. Pas wanneer de grenslaag zich volledig heeft ontwikkeld kan er sprake zijn van een profiel zoals afgebeeld in figuur 2-2. Bij een goot heeft een grenslaag, die zich vanaf de bodem opbouwt, zich na een afstand van 30 à 45 maal de diepte uitgebreid tot het wateroppervlak. Pas na een afstand van 50 à 100 maal de diepte kan worden gesproken van een min of meer uniforme stroming.

Het haaienbassin in de Amazonehal is met een diepte van 1,5 m en een lengte van 15 m niet groot genoeg om te komen tot een min of meer uniforme stroming. Wanneer er geen meetwaarden bekend zijn, is een logaritmisch profiel een redelijke benadering van het snelheidsprofiel. Dit is echter alleen mogelijk in gebieden waar de stroming hoofdzakelijk tweedimensionaal is gericht. In bijzondere stromingssituaties, zoals bijvoorbeeld in de buurt van een straal of bij een obstakel in de bodem, gelden deze snelheidsverlopen vanzelfsprekend niet.

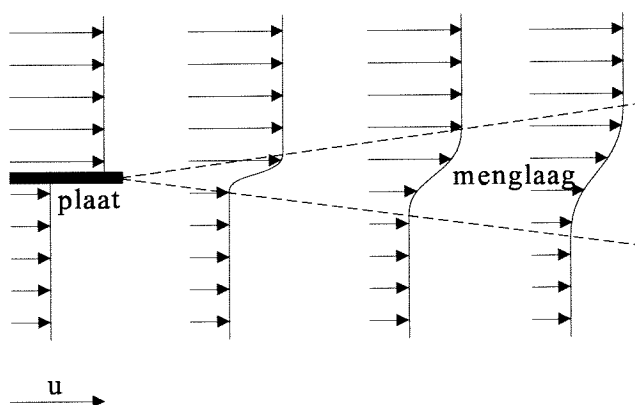
2.3 Vrije turbulentie

2.3.1 principe van opwekking

Turbulentie wordt vrije turbulentie genoemd als het ontstaat in een vrije afschuifstroom. Vrije turbulentie ontstaat waar twee aanliggende stromingen verschillende snelheden hebben. De optredende schuifspanning zorgt voor een impulsoverdracht, waardoor tussen de twee lagen een aangroeiende laag ontstaat. In deze laag, die de menglaag genoemd wordt, treedt een overgang op tussen de snelheid van de twee stromende lagen. Voorbeelden van vrije turbulentie zijn: stroming in een straal en stroming achter een vlakke plaat. De vorming van een menglaag achter een vlakke plaat is te zien in figuur 2-3.

Figuur 2-3:

vorming van een menglaag achter een plaat door snelheidsverschillen



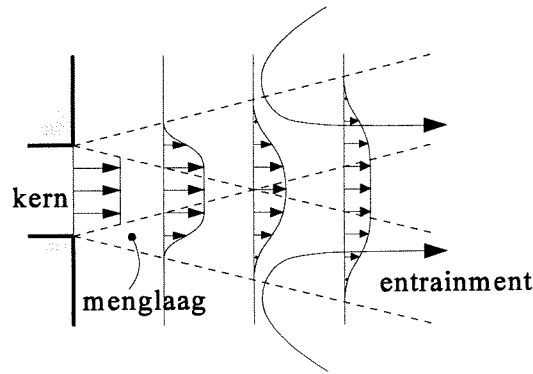
2.3.2 straal

Een straal of jet ontstaat wanneer vloeistof uit een opening stroomt in een vloeistof met relatief lage snelheid. Achter de rand van de instroomopening ontstaat een menglaag zoals in figuur 2-3 is weergegeven. De mate van turbulentie ten opzichte van de gemiddelde snelheid is in deze menglaag relatief groot. Deze hoge mate van turbulentie is aanwezig omdat door meevoering, entrainment, van vloeistof buiten de menglaag een inwaarts gerichte radiale snelheid ontstaat (Bradshaw, 1971). De straal zuigt vloeistof van buiten de menglaag aan. Het proces van entrainment wordt gehandhaafd door de grootste wervels in de menglaag die zich door de omringende vloeistof bewegen (Tennekes and Lumley, 1972).

Specifiek aan een straal is dat de impuls, die de straal in de instroomopening heeft, behouden blijft. Door iedere doorsnede van de zich verwijdende straal gaat dezelfde impulsstroom. Door impulsoverdracht naar het omringende water wordt de impuls over een groter gebied uitgespreid. De snelheid in de as van de straal neemt hierdoor af. Dit is te zien in figuur 2-4.

Figuur 2-4:

vorming van een menglaag achter een instroomopening



2.3.3 gelijkvormigheid

Om snelheden en turbulentie-intensiteiten te bepalen kan gebruik worden gemaakt van de gelijkvormigheid van de snelheidsprofielen. Bij gelijkvormige profielen heeft de snelheidsverdeling in een straal bij benadering een Gaussisch verloop. Er is geen sprake van gelijkvormigheid dicht bij de uitstroomopening. Pas na een afstand van 10 maal de diameteropening zijn de profielen van de gemiddelde snelheid gelijkvormig; de profielen van turbulentie-intensiteit zijn na 50 diameters gelijkvormig.

De belangrijkste instroomopeningen van het haaienbassin in de Amazonehal hebben een diameter van 15 cm. Het profiel van de gemiddelde snelheid is in dit geval na 1,5 m gelijkvormig en het profiel van de turbulentie-intensiteit na 7,5 m. Gelijkvormigheid blijft bestaan totdat deze beïnvloedt wordt door ruimtelijke begrenzingen óf totdat de turbulentie-intensiteit van deze grenslaagstroming is gezakt tot ongeveer de omgevingsturbulentie.

2.4 Meten en modelleren

2.4.1 bepalen van snelheden

Het stroombeeld kan op verschillende wijzen worden bepaald. Allereerst kan in een bestaande situatie gemeten worden hoe groot de snelheid is. Door op vele punten te meten kan een globaal stroombeeld verkregen worden.

Een methode om snelheden te kunnen voorspellen in een niet bestaande situatie is het nabootsen van de stroomsituatie in een schaalmodel. Een model met dezelfde vorm als het bassin wordt gebouwd. Dit wordt een fysisch model genoemd. Uit metingen in het model kunnen, na een schaling van de meetwaarden, de snelheden in de oorspronkelijke stroomsituatie worden bepaald. Bij schaling van de meetwaarden moeten de dimensieloze getallen, zoals het getal van Reynolds of het Froudegetal, zoveel mogelijk constant blijven. Om de betrouwbaarheid van een fysisch model te kunnen garanderen zal er gezocht moeten worden naar ijkmetingen in analoge situaties.

Tegenwoordig wordt steeds meer gebruik gemaakt van computermodellen die stroomsnelheden numeriek berekenen. De geometrie van het bassin wordt, evenals de plaats en hoeveelheid van in- en uitstroom, in een computermodel ingevoerd. Hierbij wordt de ruimte gediscrètiseerd in een rooster. Rekentechnische condities moeten worden ingevoerd zoals plaats- en tijdstappen. Verder moeten hydraulische randvoorwaarden, zoals ruwheid van de bodem en (turbulente) viscositeit, worden ingevoerd. Met deze invoergegevens berekent het programma, aan de hand van balansvergelijkingen, de snelheden in het bassin. De betrouwbaarheid van de resultaten hangt sterk af van invoer; er blijven altijd metingen nodig om het model te ijken.

Een directe numerieke simulatie van een turbulente stroming, waarbij de Navier-Stokes-vergelijking tot op de kleinste tijd- en ruimteschaal wordt opgelost, is uitsluitend mogelijk bij het gebruik van de snelste computers en lage getallen van Reynolds. Dit komt omdat belangrijke processen van de turbulente beweging plaatsvinden bij kleine schalen. Een voorbeeld hiervan is de dissipatie van de turbulente beweging die optreedt bij een lengteschaal in de orde van 1 mm. Voor een directe numerieke simulatie is een fijnmazig rooster nodig, wat een grote hoeveelheid aan rekenpunten geeft.

Om gemiddelden van snelheden te bepalen kan gebruik worden gemaakt van balansvergelijkingen zoals de Reynoldsvergelijking. Hierin spelen gemiddelde eigenschappen van de turbulente beweging een rol. Deze gemiddelde eigenschappen veranderen geleidelijk over de ruimte, waardoor met een grover rooster kan worden volstaan. Extra vergelijkingen zijn nodig om het sluitingsprobleem, dat bij het oplossen van de gemiddelde balansvergelijkingen ontstaat, op te lossen. De extra vergelijkingen, waarmee het sluitingsprobleem kan worden opgelost, vormen een 'turbulentiemodel'.

Een probleem bij het modelleren van een bassin, zoals het haaienbassin in Blijdorp, is de aanwezigheid van diverse lengteschalen. In het haaienbassin zijn structuren aanwezig zoals grote neren die om een verticale as draaien. Bij de instroomopeningen en dicht bij de wanden en bodem spelen echter relatief kleine structuren een belangrijke rol. De verscheidenheid van lengteschalen bemoeilijkt de keuze voor de roostergrootte. Een ander probleem is het vóórkomen van driedimensionale effecten. Vooral in gebieden waar een grote mate van turbulentie voorkomt komen driedimensionale wervels voor. Dit vraagt om een model dat de driedimensionale stroming goed weet te benaderen.

2.4.2 belang van metingen voor model

Door een numeriek model te ijken met behulp van meetgegevens wordt de betrouwbaarheid van het model vergroot. Door resultaten uit de berekening te vergelijken met het gemeten globale stroombeeld kan aan moeilijk te bepalen grootheden, zoals de turbulente viscositeit, een redelijke waarde worden toegekend.

In het geval van het haaienbassin in de Amazonehal wordt de stroming aangedreven door de stralen uit de instroomopeningen. Een goede modellering van deze instroomopeningen is van groot belang voor een betrouwbare weergave van de stroming in het bassin. Om deze instroomopeningen goed te kunnen modelleren zijn gegevens nodig over de werkelijke stroming in het bassin. Deze gegevens kunnen uit snelheidsmetingen worden verkregen.

3 Snelheidsmetingen

3.1 Te bepalen grootheden

Eén van de doelstellingen beschreven in § 1.3.3 van dit project is het bepalen van het stroombeeld in het huidige haaienbassin. Met stroombeeld wordt bedoeld ‘hoe het water stroomt’; hoe hard het gemiddeld stroomt en in welke richtingen het stroomt. De mate van turbulentie is tevens een belangrijk aspect van de stroming.

3.1.1 gemiddelde snelheden

Wanneer de stroming stationair is wil dat zeggen dat de gemiddelde stroming constant is in de tijd. Dit wil niet zeggen dat de instantane snelheid in een punt constant is; een turbulente stroming veroorzaakt snelheidsfluctuaties. Bij het bepalen van de gemiddelde snelheid worden deze fluctuaties weggemiddeld.

3.1.2 turbulentie-intensiteit

Voor het bepalen van de turbulentie-intensiteit moet aan strengere eisen, wat betreft meetnauwkeurigheid en stationariteit, worden voldaan dan voor het bepalen van gemiddelde snelheden. Een te groot meetvolume ten opzichte van de meest energetische wervels leidt tot een te lage waarde van de turbulentie-intensiteit. Bij een lage bemonsteringsfrequentie is een langere meettijd nodig om de turbulentie-intensiteit nauwkeurig te bepalen. Bij het meten van turbulentie-intensiteiten in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica wordt doorgaans een bemonsteringsfrequentie van 20 tot 200 Hz gebruikt.

3.1.3 globaal stroombeeld

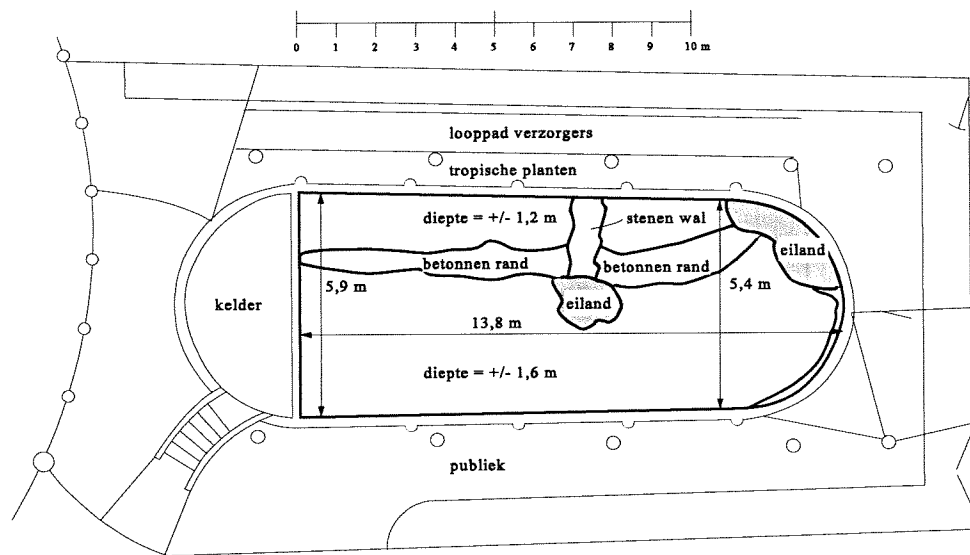
Een overzicht van het stroombeeld in het bassin kan worden gemaakt door het meten van gemiddelde snelheden in een groot aantal punten. Uit dit overzicht kan een indruk worden verkregen van grootschalige structuren in de stroming. Vastgesteld kan worden waar gebieden met recirculatie zijn en of er ‘dode zones’ kunnen ontstaan. Ook kan er beoordeeld worden of er situaties aanwezig zijn die een oorzaak kunnen zijn voor het botsen van de haaien met de wanden van het bassin.

3.2 Te meten situatie

3.2.1 afmetingen

De vormgeving van het bassin in de Amazonehal is te zien in figuur 3-1. De publieke ruimte bevindt zich aan de lange zijde van het bassin. Aan de overkant is een strook met tropische planten. Eén korte zijde bestaat uit een vlakke wand, waarachter zich een kelder bevindt. De andere korte zijde is afgerond. Het bassin loopt taps toe. Op de breedste plaats is het bassin 5,9 m breed, terwijl de breedte nabij de afronding 5,4 m is. De grootste langsafmeting bedraagt 13,8 m.

*Figuur 3-1:
afmetingen
haaienbassin
Amazonehal*

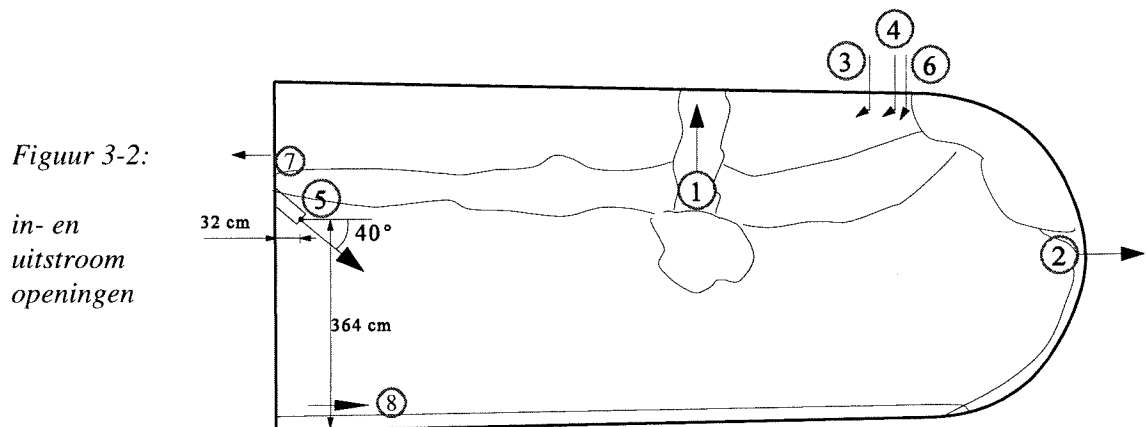


In het bassin bevindt zich een eiland dat met de bovenkant net boven het gemiddelde waterniveau uitsteekt. Achter het eiland, vanuit het publiek gezien, is een ondiep gedeelte. De waterdiepte bedraagt daar ca. 1,2 m. De bodem is in het ondiepe gedeelte niet vlak omdat er een dikke grindlaag ligt. In de rest van het bassin bedraagt de diepte ca. 1,6 m. Het ondiepe gedeelte is van het diepe gedeelte gescheiden door een afgeronde betonnen wand. De waterstand wordt zoveel mogelijk constant gehouden, maar kan door verstoppingen van de overstort ongeveer 5 cm variëren. De bodem van het diepe gedeelte bestaat uit een laag grind van enkele centimeters op een betonnen vloer.

3.2.2 watercirculatie

Het huidige haaienbassin van Blijdorp heeft in een eerder stadium dienst gedaan als krokodillenverblijf en later als zoetwateraquarium. In 1997 is het bassin omgebouwd voor het bevatten van zeewater om de nieuwe filtratiesystemen voor het Oceanium te kunnen testen en een onderkomen te hebben voor de jonge haaien. Geen exacte gegevens zijn bekend van debieten door de diverse in- en uitstroomopeningen.

Het doel van circulatie is ervoor te zorgen dat het water in het bassin ververscht wordt. In onderstaand figuur zijn de plaatsen aangegeven waar water in en uit het bassin stroomt.



Het water wordt op drie plaatsen uit het bassin gepompt. De posities van de twee hoofduitstroomopeningen zijn aangegeven met ① en ②. Een kleinere uitstroomopening is aangegeven met ⑦. De uitstroomopening bij ① bestaat uit een rooster op de bodem achter het eiland. Ter plaatse van ② stroomt het water door een in de verticale wand geplaatst rooster, dat zich ter hoogte van het gemiddeld waterniveau bevindt, in een reservoir. De buis van uitlaat ① komt uit in hetzelfde reservoir, dat zich net buiten het bassin bij ② bevindt.

Een pompinstallatie - met drie pompen die 25 m^3 per uur kunnen leveren - brengt het water vanuit het reservoir bij ② naar een eiwitafschuimer. In deze afschuimer moet meer water worden toegevoegd dan er wordt weggepompt om leegstaan van de schuimer te voorkomen. Het teveel aan water stort over en wordt teruggevoerd naar het bassin ter plaatse van ③. Hierbij wordt veel lucht in het water meegenomen, wat bij uitstroming in het bassin luchtbellen geeft. Opening ③ bevindt zich net als ④ ongeveer 50 cm onder het wateroppervlak.

Het overige water wordt, na de schuimer, door een tweede pompinstallatie via een zandfilter naar een biologisch filter gepompt. Vanuit dit biologische filter stroomt het water onder vrij verval terug naar het bassin. Een deel van dit water wordt door een pomp naar een denitrificatiefilter gebracht met een debiet van 5 m³ per uur. Het uitstromende water van dit filter komt uit in het reservoir, waar de uitstroombuizen van ① en ② op uitkomen.

Het gezuiverde water, uit het biologisch filter, stroomt terug in het bassin via twee ronde buizen met een binnendiameter van 15 cm. In bovenstaande figuur zijn de posities aangegeven als ④ en ⑤. Het midden van de instroomopening bij ⑤ bevindt zich 41 cm onder het gemiddelde wateroppervlak, 32 cm uit de korte wand en 364 cm uit de lange wand. Indien het biologisch filter buiten gebruik is, komt het water in het bassin via een aparte instroomopening ⑥.

In het bassin is een tweede watercirculatie-systeem aanwezig. Het doel van dit systeem is het water te koelen. Water uit het bassin stort over in een reservoir in de kelder ⑦. Het water wordt gekoeld en door een buis ⑧ langs de publiekszijde teruggepompt. Het water in dit systeem wordt rondgepompt met eenzelfde soort pomp als in de diverse kleinere aquaria wordt gebruikt. De pomp levert ongeveer een debiet van 10 m³ per uur.

3.3 Aannames over de stroming

Bij het meten van snelheden in het bassin wordt ervan uitgegaan dat de stroomsituatie vrijwel stationair is. Dit wil zeggen dat de gemiddelde stroomsnelheden niet variëren in de tijd waarin gemeten wordt. Als er in een punt een gemiddelde grootte wordt gemeten, zal het meetresultaat gelijk moeten zijn aan het meetresultaat van hetzelfde punt op een ander tijdstip. Deze aanname geeft de mogelijkheid de meting op verschillende tijden en op verschillende plaatsen te verrichten. Een serie metingen kan dan over een langere periode plaatsvinden en is niet afhankelijk van het tijdstip waarop is gemeten. Bij een onregelmatig fluctuerende stroming moet het gehele bassin in één keer gemeten worden en is het resultaat slechts geldig voor dat tijdstip.

Voor de hand liggende oorzaken van fluctuaties in het stroombeeld zijn:

- een fluctuerend instroomdebiet;
- een overstort die al dan niet verstopt zit;
- een onregelmatig in werking tredende inlaat;
- instabiliteiten met grote tijdschalen in de stroming zelf;
- aanwezigheid van zwemmende dieren.

Verder kan het stroombeeld variëren door grote wervels die worden opgewekt door een straal, zoals die in de meetsituatie aanwezig is. Dit heeft gevolgen voor de meettijd, die nodig is om een betrouwbaar resultaat te krijgen. In hoofdstuk 5, dat de snelheidsmetingen in het haaienbassin beschrijft, wordt in § 5.2 dieper op de meettijd ingegaan.

3.4 Criteria ten aanzien van geschiktheid van de meetmethoden

Bij de afweging van het gebruik van bepaalde meetmethoden en meetapparatuur spelen de volgende aspecten een rol:

- meetnauwkeurigheid bij lage snelheden;
- geschiktheid voor meting van een driedimensionaal stroombeeld;
- verstoring van de stroming;
- verstoring van het publiek;
- verstoring van de dieren;
- kwetsbaarheid van de apparatuur;
- beschikbaarheid van de apparatuur;
- uitvoerbaarheid van de meting;
- dieptebereik van de meting.

3.4.1 meetnauwkeurigheid bij lage snelheden

In experimentele omstandigheden wordt onder zo gunstig mogelijke omstandigheden gewerkt, om de experimenten zo betrouwbaar mogelijk te maken. Wanneer het gaat om het meten van snelheden wordt gezorgd dat het gemeten stroombeeld ook zo veel mogelijk het aanwezige stroombeeld is. Hiervoor is een stabiele meetmethode nodig met een zo klein mogelijke meetfout.

De stroomsnelheid in het bassin is laag; deze varieert van enkele decimeters per seconde bij de instroomopening tot enkele centimeters per seconde elders. De methoden die normaliter gebruikt worden om stroomsnelheden te meten hebben een onder- en bovengrens van de stroomsnelheid, waarbinnen nauwkeurig gemeten kan worden. Wanneer de ondergrens van een meetmethode hoger ligt dan de optredende snelheid, kan deze methode als onnauwkeurig worden beschouwd. Een aantal methoden zal vanwege de lage snelheden die gemeten moeten worden niet geschikt worden bevonden.

Om kleine fluctuaties van de snelheid in de tijd te meten moeten het meetvolume en de tijdstappen tussen de meetpunten klein zijn. Hoe groter het meetvolume is, hoe meer de meetwaarde een ruimtelijk gemiddelde snelheid in een gebied weergeeft. En evenzo: een te grote tijdsstap geeft een onvolledig beeld van de snelheidsfluctuaties. In de praktijk blijkt een meetfrequentie van twintig meetpunten per seconde, 20 Hz, voldoende te zijn voor het bepalen van snelheden en turbulentie-intensiteiten.

3.4.2 geschiktheid voor meting van een driedimensionaal stroombeeld

Op plaatsen met een hoge mate aan turbulentie zijn sterke driedimensionale effecten in de stroming aanwezig. Om een driedimensionaal stroombeeld te kunnen bepalen zal de snelheid in 3 richtingen gemeten moeten worden. Sommige meetmethoden meten snelheden in een vlak terwijl anderen de snelheid simultaan in drie onafhankelijke richtingen kunnen meten. Een aantal van de methoden die in een vlak snelheden meten kan door een andere positionering van het meetinstrument ook snelheden in een ander vlak meten.

3.4.3 verstoring van de stroming

Elementen die de betrouwbaarheid van de meting beïnvloeden moeten worden vermeden. De meetmethode zelf moet een zo klein mogelijke verstoring geven van het stroombeeld. Vooral bij het meten van turbulentie-intensiteit moet ervoor gewaakt worden dat turbulente bewegingen - opgewekt door de meetapparatuur die in het water steekt - niet worden gemeten. Bij het ontwerp van de meetapparatuur is hier zoveel mogelijk rekening mee gehouden. Toch levert een aantal methoden door het meetprincipe meer of minder verstoring op, die van invloed kan zijn op de meting.

3.4.4 verstoring van het publiek

Het bassin, waarin gemeten wordt, is onderdeel van een publieke ruimte. Het is niet de bedoeling dat mensen voor een dichte deur komen te staan omdat er metingen worden verricht. Ook is het niet wenselijk dat het zicht op het bassin wordt belemmerd door meetapparatuur of een meetconstructie. Het uitvoeren van een meting mag dus niet storend werken op de bezoekers van Diergaarde Blijdorp.

3.4.5 verstoring van de dieren

Eén van de facetten die dit meetproject uitzonderlijk maken vergeleken met een meting in een laboratorium, is dat in het bassin haaien en zeeschildpadden rondzwemmen. Om de dieren in een goede gezondheid te laten verkeren is het van belang dat hun bioritme zo min mogelijk verstoord wordt. De dieren kunnen reageren op licht, deeltjes in het water, elektrische velden, geluid, etc.. De methoden die aantrekkelijk lijken om in Blijdorp te gebruiken dienen onderzocht te worden op hun effect op het gedrag van de dieren. Wanneer de dieren ongewenst gedrag gaan vertonen door een meetmethode is deze ongeschikt. Van haaien is bijvoorbeeld bekend dat ze erg gevoelig zijn voor elektromagnetische velden.

3.4.6 kwetsbaarheid van de apparatuur

Meetapparatuur is soms duur en kwetsbaar. Wanneer de meetapparatuur in het bassin wordt geplaatst, kunnen de dieren interesse of agressie voor de apparatuur tonen. De aanwezige zeeschildpadden staan bekend als nieuwsgierige dieren met sterke kaken, die schade kunnen aanbrengen aan apparatuur. Volgens medewerkers van de diergaarde zijn ze in staat een dikke tak kapot te bijten. Een meetmethode waarbij de apparatuur zo min mogelijk kans heeft op schade verdient de voorkeur. Tevens moet ervoor worden gezorgd dat de instrumenten afgeschermd zijn van het publiek, opdat geen onderdelen verdwijnen of beschadigen.

De luchttemperatuur in de Amazonehal is ongeveer 25 °C omdat er ook reptielen verblijven in de hal aanwezig zijn. In de zomer kan de temperatuur oplopen tot ver boven de 30 °C, vooral dicht bij het dak, waar de zon naar binnen kan schijnen. Door de aanwezigheid van het bassin heerst er een hoog luchtvochtigheidsgehalte. Rekening moet gehouden worden met het feit dat niet alle apparatuur vochtbestendig is én dat de instrumenten niet getest zijn bij een dergelijk luchtvochtigheidsgehalte.

3.4.7 beschikbaarheid van de apparatuur

Er zijn diverse methoden en meetinstrumenten om stromingen te meten. Met sommige meetmethoden is jarenlange ervaring opgedaan, terwijl andere meetmethoden in een experimenteel stadium verkeren. Meetmethoden, waarbij apparatuur wordt gebruikt die speciaal voor dit onderzoek aangeschaft moet worden, hebben niet de voorkeur. Het verdient de voorkeur dat er gemeten wordt met apparatuur, die beschikbaar is via het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Kennis van deze specifieke apparatuur is daar voorhanden. De beschikbare meetinstrumenten moeten echter wel getoetst worden op hun geschiktheid vanwege de bijzondere meetomstandigheden. Indien bestaande technieken niet voldoen zal een oplossing gevonden moeten worden.

3.4.8 uitvoerbaarheid van de meting

De meetapparatuur zal in de Amazonehal geïnstalleerd moeten worden. De apparatuur moet getransporteerd kunnen worden naar en van de diergaarde. Grote zware installaties moeten worden vermeden. Een eventuele hulpconstructie, waar het meetinstrument aan bevestigd wordt, kan lichter worden uitgevoerd wanneer de meetinstrumenten licht zijn.

3.4.9 dieptebereik van de meting

Een aantal meetinstrumenten heeft een beperkte dieptebereik waarin gemeten kan worden. De reden hiervoor is dat de meetinstrumenten die in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica worden gebruikt doorgaans ontwikkeld zijn voor snelheidsmetingen in ondiepe stroomgoten. Sommige meetinstrumenten kunnen echter eenvoudig geschikt worden gemaakt voor metingen op grotere diepte.

4 Inventarisatie meetmethoden

Een groot aantal methoden en meetinstrumenten wordt gebruikt om snelheden te meten. In dit hoofdstuk wordt een aantal hiervan besproken en getoetst op geschiktheid als instrument voor meting van snelheden in het haaienbassin. De geschiktheid wordt bepaald door de meetmethoden te toetsen aan de hand van de in § 3.4 opgestelde criteria. Door waarden toe te kennen aan geschiktheid van de meetmethoden kan een keuze worden gemaakt voor een meetmethode of een combinatie van meetmethoden. In § 4.3 wordt deze keuze besproken.

4.1 Classificatie methoden

De in dit hoofdstuk te bespreken meetmethoden maken gebruik van eigenschappen van stromende vloeistoffen. Deze methoden zijn in te delen in de volgende groepen:

- optische methoden;
- thermische methoden;
- akoestische methoden;
- elektromagnetische methoden;
- mechanische methoden.

Optische meetmethoden maken gebruik van verstrooiing en weerkaatsing van licht door deeltjes in het water. Hieronder valt de Laser Doppler techniek en de Particle Tracking methode, waar - bij de tweede methode - deeltjes in het water aangebracht moeten worden.

Bij de thermische methoden wordt gebruik gemaakt van het afkoelend effect van langstromend water. Hieronder valt de Hittedraadmethode.

Een akoestische methode maakt gebruik van de weerkaatsing van geluid door zwevende deeltjes in het water. De akoestische Doppler snelheidsmeter behoort tot deze groep.

Bewegend water kan in een magnetisch veld een inductiespanning opwekken. Deze inductiespanning is een functie van de stroomsnelheid. De Elektromagnetische snelheidsmeter maakt hiervan gebruik.

De druk die door water wordt opgebouwd, als het loodrecht tegen een object aanstroomt, is een maat voor de snelheid. Een Pitotbuis geeft op deze manier de snelheid aan door de druk als een stijghoogte van water weer te geven. De Pitotbuis is een voorbeeld van een mechanische methode. Een Micromolen, die door de druk van het water gaat draaien, behoort tevens tot deze groep.

Behalve door meten van snelheden met bovenstaande meetmethoden kan door het aanbrengen van een kleurstof in het water het stroombeeld kwalitatief worden bepaald. Wanneer als doel wordt gesteld om een globale indruk te krijgen van de stromingsrichtingen kan kleurstof worden toegepast. Omdat met kleurstof niet de grootte van de snelheden kan worden bepaald wordt deze methode verder niet behandeld in dit hoofdstuk.

4.2 Bespreking meetmethoden

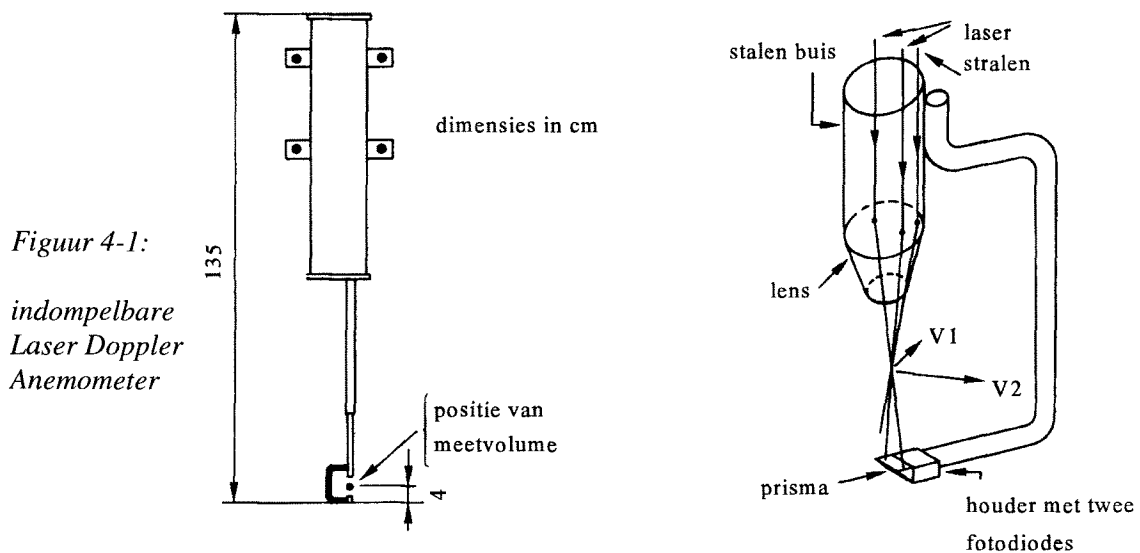
4.2.1 indompelbare Laser Doppler Anemometer (LDA)

werking

De Laser Doppler Anemometer is een optisch meetinstrument dat gebruik maakt van het Doppler-effect. Zwevend materiaal of luchtbellens in het water, verstrooien licht in alle richtingen. Wanneer de deeltjes van of naar een lichtbron bewegen, krijgt het gereflecteerde licht een frequentieverschuiving ten opzichte van de oorspronkelijke frequentie van de lichtbron. De frequentie kan dan bepaald worden wanneer het gereflecteerde licht wordt opgevangen door een detector. De grootte van de frequentieverschuiving is een maat voor de snelheid van de deeltjes. De Laser Doppler-methode kan de stroomsnelheid in het water bepalen op basis van de veronderstelling dat zwevende deeltjes dezelfde snelheid hebben als het omringende water.

Een lichtbron met een stabiele frequentie en een grote coherentielengte is nodig om de relatief kleine veranderingen in frequentie te kunnen meten. Laserlicht wordt hiervoor gebruikt. Meerdere bundels komen in een punt bij elkaar. Het volume dat de bundels gezamenlijk hebben vormt het meetvolume, dat kleiner is dan 1 mm^3 . Het gebruikte licht heeft een golflengte van 632 nm. De gemeten snelheid volgt uit de gemeten Doppler-verschuiving.

De indompelbare Laser Doppler Anemometer is een apparaat met een lengte van 1,35 m met een gewicht van ongeveer 18 kg. Vanwege het grote gewicht is een stevige overbrugging over het water nodig. Licht met een hoge intensiteit wordt gebruikt. Per meetpunt is, afhankelijk van de stroomsituatie, ongeveer twee tot vijf minuten nodig om de gemiddelde snelheid en de turbulentie-intensiteit nauwkeurig te kunnen bepalen. In figuur 4-1 is een afbeelding te zien van een indompelbare Laser Doppler Anemometer, waarmee in een horizontaal vlak snelheden kunnen worden gemeten. Deze figuur is overgenomen uit 'Modern laboratory techniques' (Delft hydraulics, 1989). Dit is een ander model dan de snelheidsmeter die beschikbaar is in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica.



geschiktheid

- nauwkeurigheid bij lage snelheden

Met de Laser Doppler Anemometer zijn stroomsnelheden te meten vanaf 1 mm/s per seconde. Dit apparaat is in hoge mate geschikt voor het meten van turbulente fluctuaties, omdat het meetvolume klein is en met een hoge meetfrequentie gewerkt wordt.

- geschiktheid voor meting van een driedimensionaal stroombeeld

De Laser Doppler Anemometer meet snelheden in een verticaal vlak, dus tweedimensionaal. Door het apparaat een kwartslag te draaien kunnen in 3 richtingen de snelheidscomponenten bepaald worden.

- verstoring van de stroming

Deze meetmethode geeft vrijwel geen verstoring van het stroombeeld omdat er geen fysiek contact is met het water bij het meetvolume.

- verstoring van het publiek

Een hulpconstructie vlak boven het water is nodig om het instrument tijdens een meting op de gewenste positie boven het bassin te krijgen. Door deze constructie zal het zicht van het publiek op het bassin gehinderd kunnen worden.

- verstoring van de dieren

Het gebruikte laserlicht wordt, afgezien van verstrooiing, geheel opgevangen. Omdat het laserlicht zich niet verspreidt buiten het apparaat, zullen de dieren in het bassin geen hinder ondervinden van het licht.

- kwetsbaarheid van de apparatuur

Het indompelbare gedeelte van de indompelbare Laser Doppler Anemometer is kwetsbaar en schijnt gevoelig te zijn voor lekkages. Dit gedeelte dient voorzichtig behandeld te worden om ontregeling te voorkomen.

- beschikbaarheid van de apparatuur

De indompelbare Laser Doppler Anemometer van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica is normaliter beschikbaar, maar was gedurende een groot deel van mijn afstudeerperiode in reparatie.

- uitvoerbaarheid van de meting

Het gewicht van het apparaat is ongeveer 18 kg, waardoor het niet makkelijk te hanteren is.

- dieptebereik van de meting

De indompelbare Laser Doppler Anemometer heeft een lengte van 1,35 m. Hiervan mag ongeveer 1 m ondergedompeld worden. Het is vrijwel onmogelijk het apparaat geschikt te maken voor metingen op dieptes groter dan 1 m.

4.2.2 akoestische Doppler snelheidsmeter (ultrageluidmeting)

werking

Deze methode maakt gebruik van het Doppler-effect van geluidsgolven. Deeltjes in het water verstrooien het inkomende geluid. Wanneer de deeltjes een snelheid hebben van of naar de stilstaande geluidsbron met microfoon, krijgt het geluid een frequentieverschuiving. Bij deze meetmethode wordt, net als bij de indompelbare Laser Doppler Anemometer, gebruik gemaakt van het Doppler-effect; bij de akoestische methode worden echter geluidsgolven in plaats van lichtgolven gebruikt.

Een van de gevolgen van het gebruik van geluidsgolven is dat het meetvolume tussen meerdere mm^3 en enkele cm^3 ligt. De gebruikte geluidsfrequentie ligt in de orde van 10^6 Hz en de responstijd is in de praktijk niet veel kleiner te maken dan 0,1 s (Delft hydraulics, 1989).

geschiktheid

Er zijn diverse meetinstrumenten te verkrijgen die gebruik maken van het Doppler effect bij geluidsgolven, variërend van fijne instrumenten voor laboratoriumomstandigheden tot apparaten die achter schepen worden voortgetrokken. De door de fabrikanten opgegeven specificaties verschillen van model tot model. Bij het bepalen van de geschiktheid van deze meetmethode moet worden opgemerkt dat er in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica geen praktijkervaring is met deze methode.

- nauwkeurigheid bij lage snelheden

De meetinstrumenten met het ultrageluidsprincipe hebben een meetvolume dat tussen dat van een Laser Doppler Anemometer en de Elektromagnetische snelheidsmeter ligt. Bij een opgegeven meetfrequentie van 25 Hz kan met een akoestische Doppler snelheidsmeter de turbulentie-intensiteit worden gemeten. De ondergrens van deze meetmethode bedraagt enkele mm/s bij de instrumenten die voor laboratoriumomstandigheden zijn ontworpen.

- geschiktheid voor meting van een driedimensionaal stroombeeld

Een aantal uitvoeringen van de meetinstrumenten met het ultrageluidsprincipe zijn geschikt voor gelijktijdige meting van snelheidscomponenten in 3 richtingen

- verstoring van de stroming

Het zend- en ontvangstgedeelte bestaat uit een platte schijf die gemaakt is van piëzo-elektrisch materiaal. Deze wordt boven en in contact met het wateroppervlak bevestigd. Geen verstoring van de stroming zal hierdoor optreden.

- verstoring van het publiek

Het gebruikte geluid is niet waarneembaar voor het menselijk gehoor. Het publiek zal geen geluidshinder van de meting ondervinden. Een hulpconstructie over het water nodig is nodig om te meetprobe te bevestigen. Het zicht op het bassin kan door de hulpconstructie worden belemmerd.

- verstoring van de dieren

Er is niet bekend of de dieren in het bassin hinder zullen ondervinden van de metingen waarbij geluid met een frequentie in de orde van 10^6 Hz wordt gebruikt.

- kwetsbaarheid van de apparatuur

De meetprobes die gebruik maken van ultrageluid zijn vrij stevig en weinig kwetsbaar. De meetapparatuur kan als robuust worden beschouwd.

- beschikbaarheid van de apparatuur

Een Akoestische Doppler snelheidsmeter is niet beschikbaar in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica.

- uitvoerbaarheid van de meting

De uitvoering wordt vergemakkelijkt omdat de probes van dit type in het algemeen licht zijn en makkelijk te hanteren.

- dieptebereik van de meting

Met de instrumenten die van het akoestische Doppler principe gebruik maken kan tot grote diepten worden gemeten. De diepte van de bassins in de Diergaarde zijn geen beperking.

4.2.3 Elektromagnetische snelheidsmeter (EMS)

werking

Dit meetinstrument maakt gebruik van Faraday's inductiewet. Deze wet houdt in dat een geleidend medium dat door een stilstaand magnetisch veld stroomt een spanningsverschil opwekt. Het opgewekte voltageverschil is een maat voor de snelheid van het geleidende medium.

Het magnetische veld wordt gegenereerd door een pulserende elektrische stroom in een kleine kern binnen in de sensor. Twee paar diametrisch tegenover elkaar liggende platina elektroden detecteren de spanning, die geproduceerd wordt door het langstromende medium. Dit laagspanningssignaal wordt omgezet tot een signaal dat als invoer dient voor een computer. Door schaling van dit signaal kunnen de stroomsnelheden worden berekend.

geschiktheid

- nauwkeurigheid bij lage snelheden

De ondergrens voor het meten van stroomsnelheden is bij dit instrument enkele cm/s. Een meetruis is altijd aanwezig die bij lage snelheden van invloed kan zijn op de meetresultaten.

Het meetvolume bedraagt 1 à 2 cm³. Door het kleine meetvolume kan met een EMS-meting de turbulentie-intensiteit bepaald worden. Omdat de omgevingstemperatuur niet constant is, kan er een nulpuntsafwijking ontstaan. De apparatuur moet om deze reden iedere meetdag geijkt worden.

- geschiktheid voor meting van een driedimensionaal stroombeeld

Dit meetinstrument meet snelheden in het vlak loodrecht op de steel van de probe. In het Laboratorium voor Vloeistofmechanica is tevens een probe-type aanwezig, waarbij de kop van de probe 90° gebogen is. Hiermee kunnen snelheidscomponenten in een verticaal vlak worden gemeten. Door gebruik van beide typen probekoppen kan een driedimensionaal stroombeeld bepaald worden.

- verstoring van de stroming

De kop van de probe heeft een ronde vorm met een diameter van ongeveer 3 cm. De steel van de probe heeft een diameter van 1 cm. De stroming wordt slechts in geringe mate door dit meetinstrument verstoord.

- verstoring van het publiek

Een hulpconstructie vlak boven het water zal nodig zijn om het instrument tijdens een meting op de gewenste positie boven het bassin te krijgen. Het zicht op het bassin zal hierdoor belemmerd worden.

- verstoring van de dieren

Haaien staan erom bekend dat ze gevoelig zijn voor elektromagnetische velden. Ze gebruiken het aardmagnetisch veld voor oriëntatie. De haaien reageren echter niet op het door dit meetinstrument veroorzaakte magnetische veld. Dit is proefondervindelijk getest door de meetprobe in het bassin te dompelen.

- kwetsbaarheid van de apparatuur

Bij deze meetmethode hangt de probe in het bassin. De probe is vrij stevig maar niet bestand tegen aanvallen van de in het bassin levende dieren.

- beschikbaarheid van de apparatuur

Het Laboratorium voor Vloeistofmechanica maakt gebruik van deze methode om snelheden te meten in de diverse meetopstellingen. De meetinstrumenten zijn daar beschikbaar.

- uitvoerbaarheid van de meting

De probe is makkelijk te hanteren en heeft een gewicht van 0,2 kg. Dit komt de uitvoerbaarheid ten goede. Wanneer de randapparatuur aangezet wordt, heeft deze tijd nodig om op te warmen.

- dieptebereik van de meting

De probe heeft een lengte van ongeveer 1 m, maar kan worden aangepast door een langere probebuis te gebruiken.

4.2.4 Particle Tracking Velocimetry (PTV)

werking

Digitale beelden van oppervlaktestroming worden met behulp van een computerprogramma omgezet naar snelheidsvectoren. In het bassin worden drijvende deeltjes aangebracht. De deeltjes drijven mee met de oppervlaktestroming. Een digitale camera registreert de beweging van de drijvers. Een computerprogramma onderscheidt de deeltjes die op de beelden te zien zijn. De grootte van de verschuiving van de deeltjes in de opeenvolgende beelden is een maat voor de snelheid van de drijvers. Deze methode meet niet in een punt maar per meetoppervlakte. Van elke binnen het meetgebied goed zichtbare drijver kan de gemiddelde snelheid worden bepaald. In een korte meettijd kan een meetgebied worden gemeten. De grootte van het meetgebied hangt af van zowel de camerahoogte als de gebruikte lens.

geschiktheid

- nauwkeurigheid bij lage snelheden

Met deze methode wordt de snelheid aan de oppervlakte gemeten in twee dimensies. Turbulentie-intensiteiten kunnen met deze methode niet worden bepaald door de responstijd van de drijvers. Hoe kleiner de drijvers zijn des te beter volgen deze de kleine fluctuaties in het stromingspatroon. De Particle Tracking Velocimetry methode is geschikt voor meten van zeer lage snelheden, een ondergrens is niet aan te geven.

- geschiktheid voor meting van een driedimensionaal stroombeeld

Deze methode meet snelheidscomponenten in een horizontaal vlak. Er zijn geen mogelijkheden om snelheden in een derde richting te meten.

- verstoring van de stroming

De drijvers dobberen mee met de oppervlaktestroming en geven geen verstoring van het stroombeeld. Bij het aanbrenge en weghalen van de drijvers wordt de oppervlaktestroming in geringe mate verstoord.

- verstoring van het publiek

De camera moet op een zo hoog mogelijke positie boven het water gehangen worden om een zo groot mogelijk gebied te kunnen bestrijken. Een overspanning hoog over het water is hiervoor nodig. Deze overspanning kan op een bestaand buizenstelsel aan het plafond in de Amazonehal worden opgelegd. De overspanning is dan niet storend aanwezig. Het publiek ziet slechts een aantal drijvers in het water en zal vrijwel geen hinder ondervinden van de metingen.

- verstoring van de dieren

Bij deze methode moet voorkomen worden dat de dieren giftige stoffen binnenkrijgen. Tijdens de meting moet gebruik worden gemaakt van drijvers die onschadelijk zijn voor de dieren.

- kwetsbaarheid van de apparatuur

De meetapparatuur hangt in dit geval hoog boven het bassin en is veilig voor aanvallen van dieren. Gewaakt moet worden dat de camera niet in het bassin valt. De digitale camera is mogelijk gevoelig voor de hoge temperatuur en vochtgehalte boven het bassin.

- beschikbaarheid van de apparatuur

Een digitale camera is in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica beschikbaar om de metingen uit te voeren.

- uitvoerbaarheid van de meting

De camera is licht en makkelijk te hanteren. De drijvers moeten telkens in het te meten gebied aangebracht worden. Een hulpconstructie hoog boven het water is nodig om de camera aan op te hangen.

- dieptebereik van de meting

Alleen aan het wateroppervlak kunnen snelheden worden gemeten.

4.2.5 Pitotbuis

werking

Een pitotbuis is een combinatie van twee buizen waarvan de ene het piëzometrisch niveau en de andere de energiehoogte weergeeft. Het verschil in niveau tussen de buizen is een maat voor de snelheid.

De Pitotbuis wordt, met de aan de voorkant aanwezige opening, tegen de stroming in geplaatst. Aan de zijkant van de buis bevindt zich een kleine opening, het water stroomt er dus langs. De stijghoogte in de buis, die de statische buis wordt genoemd, kan door een met water gevulde slang elders worden afgelezen. De afgelezen hoogte ten opzichte van een referentievlak wordt het piëzometrisch niveau genoemd. In de meetsituatie wordt het piëzometrisch niveau gelijk gesteld aan de waterstand. Aan de voorkant van de Pitotbuis bevindt zich een tweede opening. Bij een oriëntatie tegen de stroomrichting in ontstaat hier een stuwpunt. Wanneer een stroomsnelheid aanwezig is, wordt een hoger niveau bereikt dan in de statische buis. Als er geen stroming aanwezig is, zijn beide niveaus aan elkaar gelijk.

geschiktheid

Stroomsnelheid moet bepaald worden loodrecht op het meetinstrument, anders wordt een te lage snelheid gemeten. Het juiste positioneren van het meetinstrument, parallel aan de stroming, bemoeilijkt een nauwkeurige en efficiënte meting. Met dit instrument kan een gemiddelde snelheid worden bepaald maar geen mate van turbulentie. Bij lage snelheden, zoals in het bassin het geval is, is het verschil in stijghoogte tussen de twee buisjes vrijwel nul. Met het blote oog is het verschil niet nauwkeurig af te lezen. Verder moet een Pitotbuis naast het bassin afgelezen worden. Dit is bij het meten in het huidige bassin vrijwel onmogelijk.

4.2.6 Micromolen

werking

Een molentje gaat draaien, aangedreven door het langsstromende water. De rotatiesnelheid van het molentje is vrijwel rechtevenredig met de stroomsnelheid van het water.

De rand van het molentje is geribbeld en komt al draaiende tegen een sensor aan. Het aantal geregistreerde tikken in een bepaalde tijdseenheid is een maat voor de snelheid. Het molentje zit vast aan een probe die het trilsignaal omzet naar elektrische pulsen. Deze pulsen kunnen omgezet worden naar een waarde van snelheid.

geschiktheid

- nauwkeurigheid bij lage snelheden

Het meetbereik heeft een ondergrens bij snelheden van 3 à 4 cm/s. Dit komt omdat, voor de mechanische aandrijving van het molentje door het water, een bepaalde kracht nodig is voor het overwinnen van de draaiweerstand. Bij de lage snelheden in het bassin is het de vraag of het molentje überhaupt gaat draaien. Door de aanwezige verontreiniging in het water zal de nauwkeurigheid sterk afhangen van de schoonmaakfrequentie van het molentje. Een Micromolen heeft een meetvolume van enkele cm³, de bemonsteringsfrequentie is lager dan 1 Hz. De lage frequentie maakt een Micromolen ongeschikt voor het meten van turbulente fluctuaties. Omdat de draaiweerstand van elk molentje afhankelijk is van vervuiling, moet het molentje periodiek geijkt worden.

- geschiktheid voor meting van een driedimensionaal stroombeeld

De micromolen kan slechts in 1 richting snelheden meten .

- verstoring van de stroming

De Micromolen heeft een geringe afmeting en zal de stroming slechts in zeer geringe mate verstoren.

- verstoring van het publiek

Voor de juiste positionering boven het bassin is een overspanning vlak boven het water nodig, waardoor verstoring van het zicht op het bassin ontstaat.

- verstoring van de dieren

Het molentje zal door het draaien een lichte trilling voortbrengen. Er is niet bekend wat de reactie van de dieren op deze trilling is.

- kwetsbaarheid van de apparatuur

De Micromolen is een mechanisch instrument dat kwetsbaar is en snel ontregeld raakt. De rolweerstand van het molentje is zeer gevoelig voor verontreiniging. Zwevende deeltjes in het water kunnen de molen laten vastlopen, vooral wanneer de aandrijvende kracht, door een lage snelheid, erg klein is. Het kunststof molentje is voorts niet stootvast. Een stoot kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door een nieuwsgierig dier.

- beschikbaarheid van de apparatuur

Het Laboratorium voor Vloeistofmechanica maakte in het verleden veelvuldig gebruik van dit meetinstrument. Door bovengenoemde nadelen wordt dit meetinstrument niet meer in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica gebruikt.

- uitvoerbaarheid van de meting

De probe met de Micromolen is licht en makkelijk te hanteren. Dit komt de uitvoerbaarheid ten goede. Voor een goede positionering is een overspanning vlak boven het wateroppervlak nodig. Door zwevende deeltjes in het bassin en het mogelijk vastlopen van dit instrument zal het meetinstrument veelvuldig schoongemaakt moeten worden. Een snelle en nauwkeurige meting wordt hierdoor bemoeilijkt.

- dieptebereik van de meting

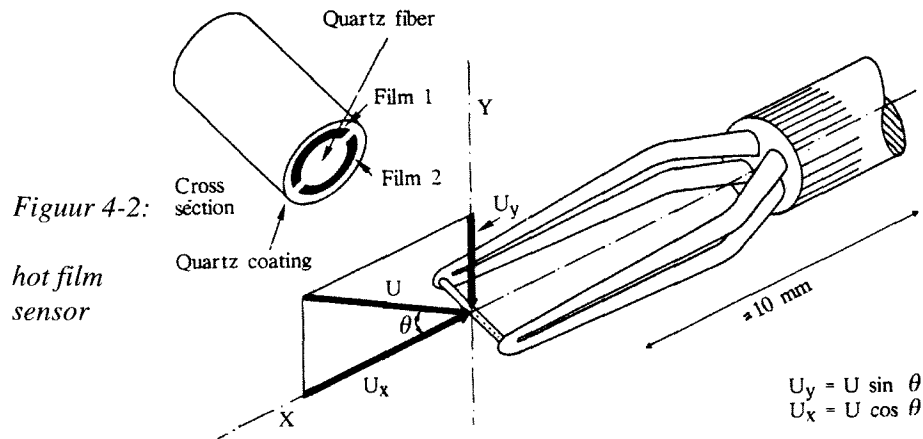
De micromolen is bevestigd op een probe met een lengte van ongeveer 1 m. De probe is geschikt te maken voor metingen op grotere dieptes.

4.2.7 Hittedraad

werking

Een draad wordt verhit door er een elektrische stroom doorheen te laten lopen. De passerende vloeistof koelt de geleider. Het verkoelende effect van de langsstromende vloeistof is afhankelijk van de stroomsnelheid. De elektrische stroom, die nodig is voor een constante temperatuur in de geleider, is een maat voor de stroomsnelheid van de passerende vloeistof.

Vanwege kwetsbaarheid en elektrische geleiding van water kunnen hittedraden niet direct in water worden toegepast. Een uitvoering, die op hetzelfde principe berust maar sterker is, kan wel in water worden toegepast. Deze 'Hot film sensoren' hebben een beschermende laag die de geleidende film isoleert. Deze sensoren moeten echter in water veelvuldig schoongemaakt worden vanwege kalkafzettingen. In figuur 4-2 is een afbeelding te zien van een 'Hot film sensor'. Figuur 4-2 is overgenomen uit 'Modern laboratory techniques' (Delft hydraulics, 1989).



geschiktheid

- nauwkeurigheid bij lage snelheden

Het meetvolume van een hittedraad bedraagt 2 mm met een diameter van $5\mu\text{m}$. Een meetfrequentie van 1 MHz kan bereikt worden (Delft Hydraulics, 1989). Vanwege het kleine meetvolume en de grootte meetfrequentie kan met dit instrument de turbulentie-intensiteit worden bepaald. Aangezien wel de grootte van de snelheden maar niet de richting van de snelheden bepaald kan worden is de mate van turbulentie-intensiteit maatgevend voor de nauwkeurigheid.

- geschiktheid voor meting van een driedimensionaal stroombeeld

Er bestaan hot film sensors waarmee in 3 richtingen tegelijk de snelheidscomponenten kunnen worden gemeten.

- verstoring van de stroming

De verstoring van de stroming is vergelijkbaar met de verstoring door een EMS; de probe bevindt zich eveneens in het water.
- verstoring van het publiek

Om de probe te bevestigen is een overspanning over het water nodig. Het zicht van het publiek op het bassin kan hierdoor verstoord worden.
- verstoring van de dieren

De in het bassin aanwezige dieren zullen nauwelijks hinder ondervinden van de meting. Mogelijk kunnen de dieren schade ondervinden bij aanraking van de meetprobe.
- kwetsbaarheid van de apparatuur

De meetprobe is gevoelig voor vervuiling, kalk kan zich erop afzetten. Deze meetmethode kan geschikt zijn voor een gesloten systeem, waar het water geconditioneerd is. In het haaienbassin in Blijdorp is dit echter niet mogelijk.
- beschikbaarheid van de apparatuur

Het Laboratorium voor Vloeistofmechanica maakte in het verleden gebruik van de Hittedraad methode. Tegenwoordig wordt geen gebruik meer gemaakt van deze meetmethode.
- uitvoerbaarheid van de meting

De Hot film sensor is makkelijk te hanteren. Dit komt de uitvoerbaarheid ten goede. Voor een goede positionering is een overspanning vlak boven het wateroppervlak nodig. Door vervuiling van dit instrument zal het meetinstrument veelvuldig schoongemaakt moeten worden. Een snelle en nauwkeurige meting wordt hierdoor bemoeilijkt.
- dieptebereik van de meting

De probe die in het verleden gebruikt is in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica heeft een lengte van ongeveer 1 m. De probe kan, net zoals de probe van de EMS, geschikt worden gemaakt voor metingen op grotere diepte.

4.3 Keuze meetmethodiek

Wanneer per meetmethode een score wordt toegekend aan de toetsing aan de criteria kan het volgende overzicht worden gemaakt:

		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
nauwkeurigheid bij lage snelheden	ondergrens meetsnelheid	mm/s	cm/s	cm/s	n.a.*	cm/s	cm/s	cm/s
	geschiktheid voor meting turbulentie-intensiteit	++	+	+	--	--	--	+
geschiktheid voor meting 3D stroombeeld		+	++	+	--	--	--	++
minimale verstoring stroming		+	+	+	+	+	+	+
minimale verstoring publiek		-	-	-	+	-	-	-
minimale verstoring dieren		+/-	?	+/-	+	+	+	-
robuustheid apparatuur		--	++	-	+	+/-	--	-
beschikbaarheid apparatuur		-	--	++	++	++	-	-
uitvoerbaarheid		+/-	+	+	++	--	-	-
dieptebereik van de meting	standaardbereik meetmethode	1 m	30m	1 m	0 m	0,5m	1 m	1m
	aanpasbaarheid bereik	-	++	+	--	+	-	+

* n.a. = niet aanwezig

waarin:

- ① Indompelbare Laser Doppler Anemometer (LDA)
- ② Akoestische Doppler snelheidsmeter (ultageluidmeting)
- ③ Elektro Magnetische Snelheidsmeter (EMS)
- ④ Particle Tracking Velocimetry (PTV)
- ⑤ Pitotbuis
- ⑥ Micromolen
- ⑦ Hittedraad

Aan de hand van de bespreking van de meetinstrumenten in § 4.2 en bovenstaand overzicht, kan een gemotiveerde keuze worden gemaakt voor een methode voor het meten van de stroomsnelheden in het bassin in de Amazonehal. Dubbele minpunten (--) in het overzicht kunnen een reden zijn om een methode als ongeschikt te verklaren.

De Laser Doppler Anemometer heeft als belangrijk nadeel dat het kwetsbaar is. Het apparaat is gevoelig voor lekkages waardoor de kans is op beschadiging tijdens de meetperiode in het haaienbassin aanwezig is. De meetmethoden worden normaliter in laboratoriumomstandigheden gebruikt. Daar ondervindt de apparatuur geen hinder van bijvoorbeeld nieuwsgierige dieren; dit is echter wel het geval in het haaienbassin in Blijdorp. Verder was de Laser Doppler Anemometer in reparatie tijdens de geplande meetperiode waardoor er geen gebruik van kon worden gemaakt.

Met de Pitotbuis zijn snelheden dermate onnauwkeurig te bepalen, dat het meetinstrument ongeschikt is als meetinstrument bij lage snelheden. Het instrument moet op een gelijk niveau als de waterspiegel worden afgelezen. Dit is niet mogelijk is bij het haaienbassin.

Gevoeligheid voor vervuiling is een reden om de Micromolen niet te gebruiken als meetinstrument. Dit apparaat is slechts geschikt om ééndimensionale snelheden te meten onder laboratoriumomstandigheden.

Omdat de Akoestische Doppler snelheidsmeter niet beschikbaar is in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica zal deze methode niet worden toegepast als meetinstrument om snelheden in het haaienbassin te meten. Vanwege de verscheidenheid aan modellen is verder onderzoek naar de mogelijkheden van de ultrageluidmeters gewenst

Zowel een digitale camera als Elektromagnetische Stromingsmeters zijn beschikbaar in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Met de Particle Tracking Velocimetry methode kunnen geen turbulente fluctuaties maar slechts gemiddelde snelheden bepaald worden. Deze methode heeft toch de voorkeur ten opzichte van de andere methoden omdat, met een relatief korte meettijd, op veel punten de oppervlakte-snelheden in het bassin kunnen worden bepaald. Een indruk van het globale stroombeeld kan op die manier, in een kort tijdsbestek, worden verkregen.

Om de turbulentie-intensiteit te meten is een tweede meetinstrument nodig; de Elektromagnetische snelheidsmeter zal hiervoor gebruikt worden. De EMS verdient de voorkeur boven de Hittedraad. Ten eerste is de Hittedraad niet beschikbaar in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Ten tweede dient de Hittedraad veelvuldig schoongemaakt te worden. Tenslotte kunnen zwemmende dieren mogelijk gewond raken door de Hittedraad, wanneer ze ermee in aanraking komen. De EMS zal alleen in 'interessante' gebieden worden gebruikt omdat per punt een meettijd nodig is van 4 à 6 minuten; met interessante gebieden worden gebieden bedoeld waar driedimensionale effecten te verwachten zijn met een hoge mate aan turbulentie.

5 Experimenten

In het haaienbassin in de Amazonehal van Diergaarde Blijdorp zijn snelheidsmetingen verricht. De te meten grootheden en de situatiebeschrijving alsmede aannames over de stroomsituatie zijn beschreven in hoofdstuk 3. In § 4.3 is gekozen voor een combinatie van twee meetmethoden: Particle Tracking Velocimetry (PTV) en de Elektromagnetische snelheidsmeter (EMS). De meetmethoden worden in dit hoofdstuk uitvoerig besproken. Tevens wordt de snelheidsmeting in het haaienbassin besproken evenals de experimenten die hieraan vooraf gingen.

5.1 Particle Tracking Velocimetry

5.1.1 algemeen

methode

Met de Particle Tracking Velocimetry-methode wordt de gemiddelde snelheid aan het wateroppervlak gemeten. Het principe van de meetmethode en de geschiktheid als instrument, voor het meten van de snelheden in het haaienbassin, zijn reeds behandeld in § 4.2.4. Een digitale camera registreert de beweging van drijvende deeltjes, waarna met diverse computerprogrammatuur een snelheidsvectorenveld kan worden bepaald. Dit alles moet een beeld geven van de grootte en richting van de snelheden aan het oppervlak.

Wanneer de camerabeelden na elkaar bekeken worden, is te zien dat in elk beeld de drijvers iets van plaats zijn veranderd ten opzichte van het voorgaande beeld. Met behulp van een computerprogramma worden de afzonderlijke drijvers, die in een afbeelding te zien zijn, onderscheiden. Er wordt bepaald welke drijvers op de verschillende afbeeldingen bij elkaar horen, waarna het programma de verschuiving van de drijvers berekent. De snelheid van een drijvend deeltje is de verandering in plaats, gedeeld door de tijd tussen de afbeeldingen. Wanneer de verplaatsing van de drijvers te groot is kan het programma de afzonderlijke deeltjes niet meer van elkaar onderscheiden. De bovengrens van de snelheid die met deze methode gemeten kan worden hangt af van de beeldfrequentie van de camera. Bij de gebruikte digitale camera is de beeldfrequentie 25 Hz.

inzetbaarheid van de methode

Zoals reeds vermeld is in § 2.2.2, zal er in het haaienbassin in de Amazonehal geen uniforme stroming aanwezig zijn. In gebieden waar een tweedimensionale stroming overheerst - waar de verticale snelheden te verwaarlozen zijn ten opzichte van de horizontale snelheden - zal een logaritmisch snelheidsprofiel een redelijke benadering zijn van het werkelijke snelheidsprofiel. Vanuit de oppervlaktessnelheden kunnen de snelheden dan op een andere diepte worden berekend.

Een driedimensionaal stroombeeld treedt op in de buurt van in- en uitstroomopeningen en bij obstakels op de bodem. Om de snelheden te bepalen, op een andere diepte dan het oppervlak, is extra informatie vereist. De experimenten in een driedimensionaal snelheidsveld worden in § 5.2 behandeld.

5.1.2 camera

Een digitale kleurencamera van Sony, type Digital Handycam (DCR-VX700E) is gebruikt. Met de camera worden 25 interlaced beelden per seconde geregistreerd. De opnamen zijn geregistreerd op videobanden van het type mini-dv. Met een dergelijke videoband kan 1 uur digitaal beeld worden opgenomen. Om dit mogelijk te maken wordt de data gecomprimeerd tot MPEG- bestanden. De camera heeft een resolutie van 768 * 576 pixels.

5.1.3 drijvers

drijfvermogen

De in het water gebrachte deeltjes moeten bij voorkeur een massadichtheid hebben die iets kleiner is dan die van het omringende water; de deeltjes moeten net niet zinken. Hoe groter het deel van de drijver onder de waterspiegel, hoe beter de drijver de stroming volgt. Te lichte drijvers hebben de neiging tegen elkaar aan te gaan liggen als gevolg van oppervlaktetensionseffecten. Bovendien is van belang dat de drijvers geen water opnemen, waardoor ze zwaarder worden en tenslotte zinken.

afmetingen

De afmetingen van de drijvers moeten aan bepaalde voorwaarden voldoen. Op de drijver werkt een kracht, F_w , die de resultante is van alle op de drijver werkende krachten. Deze kracht is bij laminaire stroming rechtevenredig met het snelheidsverschil, v , tussen de drijver en het water:

$$F_w = 6 \pi R \eta \Delta v = m \frac{dv}{dt}$$

waarin: F_w de resultante kracht is;

η de dynamische viscositeit is, $\eta = \rho * \nu$, $\eta_{\text{water}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ bij 20°C ;

R de straal is van de drijver;

Δv het snelheidsverschil is tussen de drijver en het water;

m de massa van de drijver is;

$\frac{dv}{dt}$ de versnelling is van de drijver.

De bovenstaande differentiaalvergelijking kan worden opgelost. Een oplossing luidt als volgt:

$$\Delta v = \Delta v_0 e^{-t/t_0}$$

waarin: Δv het snelheidsverschil is tussen het water en de drijver;

Δv_0 het snelheidsverschil is tussen het water en de drijver op tijdstip $t = 0$;

t de verstreken tijd is vanaf $t = 0$;

t_0 de relaxatietijd is van het systeem, gedefinieerd als $(m / 6\pi R \eta)$.

Omdat bij onderhavige toepassing het snelheidsverschil tussen het water en de drijver klein wordt verondersteld, wordt de weerstandsformule voor laminaire stroming gebruikt. Bij een klein snelheidsverschil van de drijver met het water genereert de drijver immers geen turbulent zog. In het haaienbassin is de stroming echter vrijwel overal turbulent. Turbulente stroming heeft een grotere uitwisseling van impuls met de omgeving tot gevolg waardoor bovenstaande oplossing van de vergelijking de relaxatietijd overschat. Om de invloed van turbulentie te verdisconteren kan in plaats van de kinematische viscositeit, ν , de turbulente viscositeit, ν_t , worden gebruikt. Dit laatste is eigenlijk alleen gerechtvaardigd wanneer ν_t wordt bepaald voor wervels die kleiner zijn dan de diameter van de drijver omdat grote wervels niet bijdragen aan impulsuitwisseling op deeltjesniveau.

Uitgaande van een turbulente viscositeit $\nu_t \sim 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ heeft een drijver met een diameter van 6 cm een relaxatietijd van 2 seconden. Een drijver uit hetzelfde materiaal met een diameter van 1 cm heeft bij dezelfde turbulente viscositeit een relaxatietijd van 0,05 seconde.

De massa van een drijver is evenredig met de straal tot de derde macht: $m = \rho \cdot (4/3) \pi R^3$. Een twee maal zo grote drijver heeft een acht maal zo grote massa. De relaxatietijd van een drijver in water is hierdoor evenredig met de straal tot de tweede macht. Een grote drijver heeft hierdoor een langere relaxatietijd dan een kleine drijver uit hetzelfde materiaal. Dit verklaart waarom kleine drijvers de snelheidsfluctuaties van het water beter kunnen volgen dan grotere drijvers.

De drijvende deeltjes moeten met een digitale camera geregistreerd kunnen worden. Het computerprogramma dat de losse camerabeelden omzet in snelheden moet de afzonderlijke deeltjes kunnen onderscheiden. Hiervoor zijn minstens vier bij vier, dus 16 pixels nodig. De camera heeft een resolutie van 768 bij 576 pixels. Uit experimenten met de camera is gebleken dat de lengte van een zijde van een pixel, bij volledig uitzoomen van de camera, $1/1000$ bedraagt van de camerahoogte. Bij een camerahoogte van 3,5 m, waarbij de camera volledig uitzoomt, beslaat een pixel een oppervlak van 3,5 bij 3,5 mm. De drijver moet dan minstens $14 \cdot 14$ mm groot zijn.

kleur

Voor het computerprogramma dat uit afbeeldingen de snelheid van de deeltjes berekent moeten de drijvers duidelijk te onderscheiden zijn van de achtergrond. Dit kan door bewerking van de camerabeelden bewerkstelligd worden; in § 5.1.5 van dit hoofdstuk zal dit uitgebreid worden behandeld.

Om een goede bewerking van de camerabeelden mogelijk te maken is het echter van belang om reeds bij de opnamen te zorgen, dat de drijvende deeltjes duidelijk te onderscheiden zijn. Dit kan door drijvers te gebruiken met een kleur, die duidelijk verschilt van de kleur van de achtergrond. Aangezien de achtergrond in de Diergaarde vooral groenig is, door algengroei, zullen met een rode tint goede resultaten kunnen worden verkregen.

materiaal

Om te drijven moet de dichtheid van een drijver kleiner zijn dan de dichtheid van water: $\rho_{\text{drijver}} / \rho_{\text{water}} < 1$. Als er deeltjes in het bassin drijven bestaat de kans dat de aanwezige dieren het als voedsel zien en de deeltjes gaan opeten. De drijvers mogen geen schadelijk materiaal bevatten, zoals giftige verf. Ook kan een schildpad mogelijk stikken bij het doorslikken van een harde drijver. Het is daarom van belang dat er in plaats van geverfde houten kralen, zoals die veelal gebruikt worden in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica, drijvers worden gebruikt die onschadelijk voor de dieren zijn.

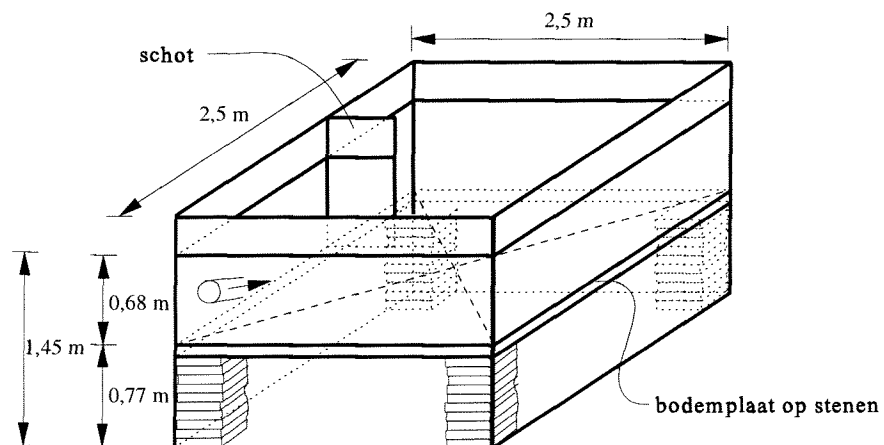
5.1.4 proefopstelling in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica

In het Laboratorium voor Vloeistofmechanica is de gelegenheid gecreëerd om ervaring op te doen met de meetmethode, zodat er in de Diergaarde doelgericht gemeten kan worden zonder de dagelijkse gang in de Diergaarde te verstoren.

te meten situatie

Geëxperimenteerd is in een vierkante stalen bak met een zijde van 2,5 m. In de bak is met een pomp een rondgaande stroming gegenereerd. De instroom is horizontaal gericht onder een hoek van $\pm 45^\circ$ met de zijwand, net zoals dat in het haaienbassin het geval is. Het debiet kan met een afsluiter worden aangepast. In de bak is een schot geplaatst met een breedte van 60 cm, dat het effect van een structuur in het bassin - zoals een eiland- op de stroming simuleert. In figuur 5-1 is een afbeelding te zien die de proefopstelling in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica weergeeft.

*Figuur 5-1:
proefopstelling in
het Laboratorium
voor
Vloeistofmechanica*



De bak heeft totaal andere verhoudingen dan het bassin te Blijdorp. Het is echter niet de bedoeling geweest om een model van het bassin te maken. Wel kan, met eenvoudige ingrepen, een poging worden gedaan het stroombeeld van het haaienbassin te simuleren. In de bak is een waterdiepte gerealiseerd met dezelfde diepte / breedteverhouding als het haaienbassin. Deze bedraagt 1,6 m diep / 5,9 m breed = 0,27. De diepte in de bak is om deze reden op 68 cm vastgelegd.

meetopstelling

De camera is opgesteld op één van de verrijdbare loopbruggen van de hal. De hoogte van de camera tot het wateroppervlak bedraagt 4,6 m. De camera is zo recht mogelijk boven de bak gehangen om vervorming van het beeld te voorkomen. Er worden telkens series van een paar minuten beeldmateriaal verkregen.

belichting

Uit de eerste meetserie blijkt dat de aanwezige belichting niet afdoende is om een goede opname te verkrijgen. In eerste instantie is er slechts met het licht op de halvloer gewerkt. De tl-verlichting gaf echter ongewenste reflecties op het oppervlak. Verder is de ondergrond in de buurt van de glasplaten veel lichter dan aan de andere zijde van de bak. Hierdoor zijn de drijvers soms lichter en op andere plekken donkerder dan de ondergrond. Een drijver die van een licht gedeelte naar een donker gedeelte gaat kan, bij automatische bewerking, niet als één drijver gezien worden. Het belichtingsprobleem is opgelost door een aantal schijnwerpers naar binnen te laten schijnen door de glazen wand.

keuze van de drijver

Onderzoek is gedaan naar het drijfvermogen van drijvers die:

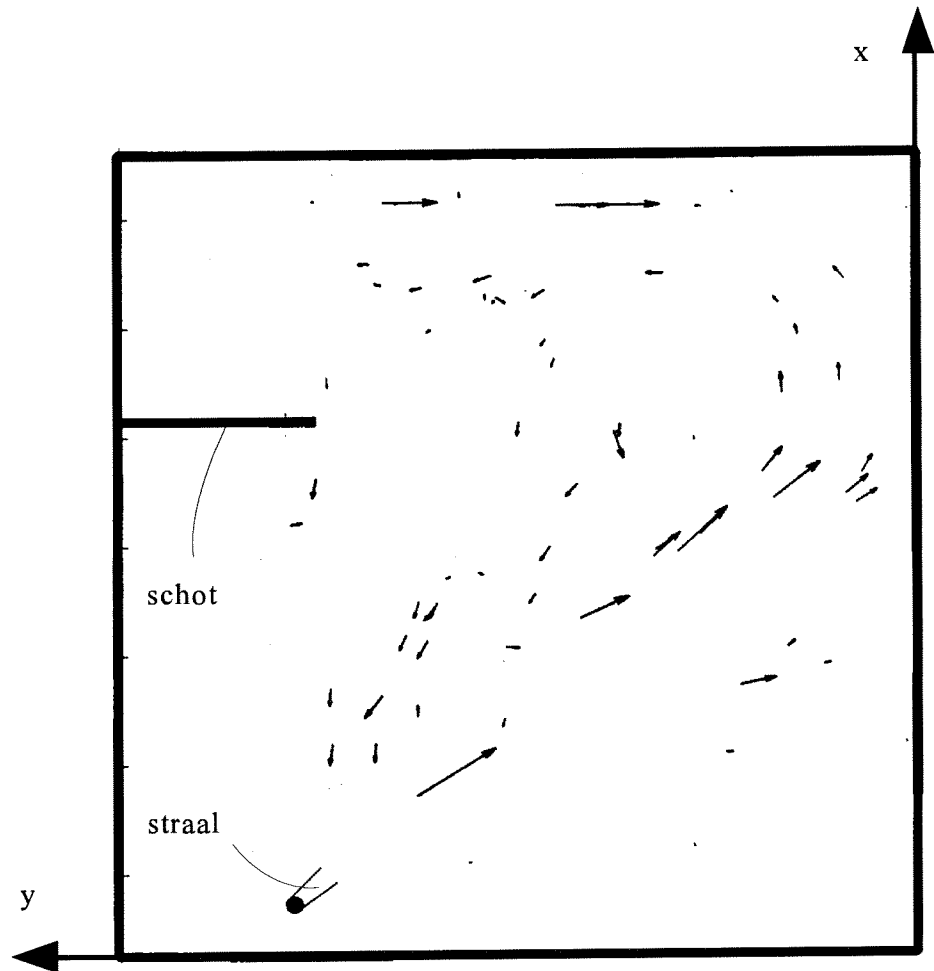
- uit een eetbaar materiaal bestaan;
- een diameter van minstens 1,5 cm hebben;
- makkelijk verkrijgbaar zijn;
- een roodachtige kleur hebben.

Er is gekozen om met veenbessen te gaan meten. Deze bessen hebben een diameter van 1,5 cm, zijn fel rood en blijven een aantal weken goed. De bessen drijven echter niet erg diep, waardoor ze de neiging hebben aan elkaar te klitten.

resultaten

De tot stand koming van meetresultaten door bewerking van beeldmateriaal zal uitgebreid worden toegelicht in paragraaf 5.1.5. De camerabeelden, verkregen in de proefopstelling, zijn automatisch tot snelheden verwerkt zonder bewerking van de beelden. Het resultaat uit het computerprogramma, waarmee de camerabeelden worden omgezet naar snelheden, is te zien in figuur 5-2. Hierin is de lengte van een pijl een maat voor de snelheid aan de wateroppervlakte.

*Figuur 5-2:
meetresultaten
van de
proefopstelling*



Een aantal dingen valt op wanneer figuur 5-2 wordt bekeken. Allereerst is een aantal vectoren te zien die strijdig zijn met het stroombeeld. Een drijver kan tijdens de opname net onder de rand van de houten constructie, die op de rand van de bak ligt, verdwijnen terwijl elders een drijver verschijnt. In het gebruikte programma kunnen deze drijvers niet onderscheiden worden, waardoor een foutieve snelheid wordt berekend.

Tevens zijn niet van alle, in de bak aanwezige, veenbessen de snelheden berekend. De diameter van de veenbessen is alleen bij goede belichting groot genoeg om duidelijk onderscheiden te worden van de achtergrond. In Diergaarde Blijdorp zullen grotere drijvers gebruikt moeten worden om geschikte camerabeelden te verkrijgen.

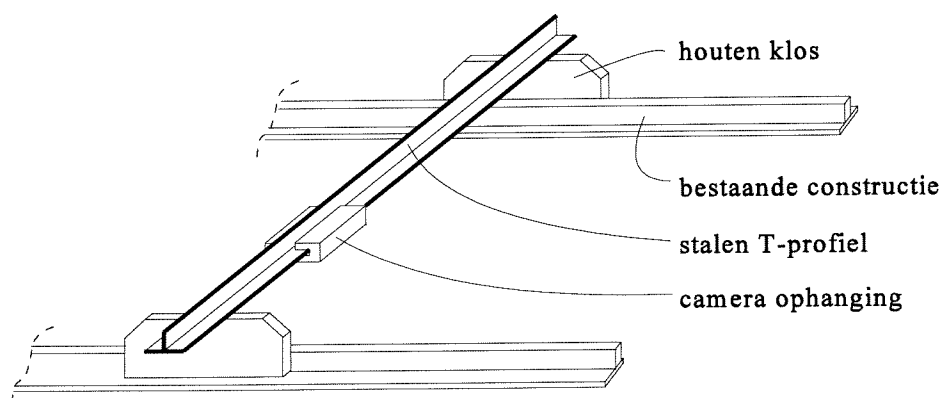
5.1.5 meetopstelling in Diergaarde Blijdorp

cameraopstelling

Het is van belang dat de camera zo hoog mogelijk hangt om een zo groot mogelijk oppervlak van het bassin tegelijkertijd te meten. In verband met de hoogte van de hal, waar het bassin zich bevindt, kan niet met één camerameetpunt worden volstaan. Voor het bepalen van de snelheden in het bassin is een aantal metingen nodig vanuit verschillende cameraopposities. Een totaalbeeld van de oppervlaktestroming wordt verkregen door het samenvoegen van meetresultaten in de verschillende meetpunten. Bij het samenvoegen is er vanuit gegaan dat de stroming nagenoeg stationair is. Een vertekend stroombeeld kan ontstaan wanneer de stroming niet stationair is.

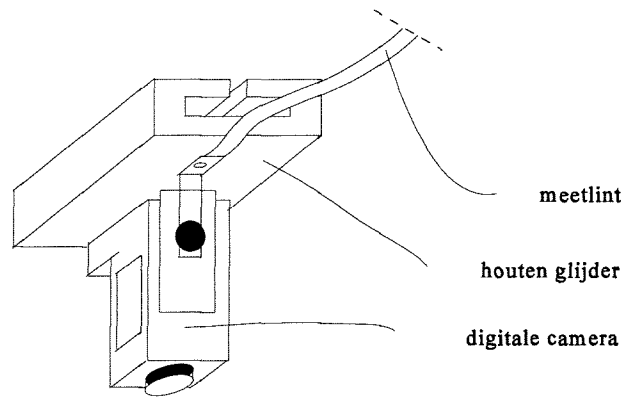
De camera moet op diverse plaatsen boven het bassin kunnen komen om daar opnamen te maken. Om praktische redenen is gekozen voor een camera-ophanging die over een stalen T-profiel glijdt. Dit profiel is opgelegd op een bestaande houtconstructie, die boven het bassin aan het plafond bevestigd is. De oriëntatie van de houtconstructie is parallel aan de langsrichting van het bassin, zodat de camera in de breedte boven het bassin over het T-profiel kan glijden. Het stalen profiel is op klossen gelegd om de camera zo dicht mogelijk bij het plafond te krijgen. De cameraophanging wordt over het stalen profiel getrokken met een touw. Een schematische weergave van de oplegconstructie en de cameraophanging zijn te zien in de figuur 5-3 en figuur 5-4.

*Figuur 5-3:
schematische
weergave van de
oplegconstructie*



figuur 5-4:

detail van de cameraophanging

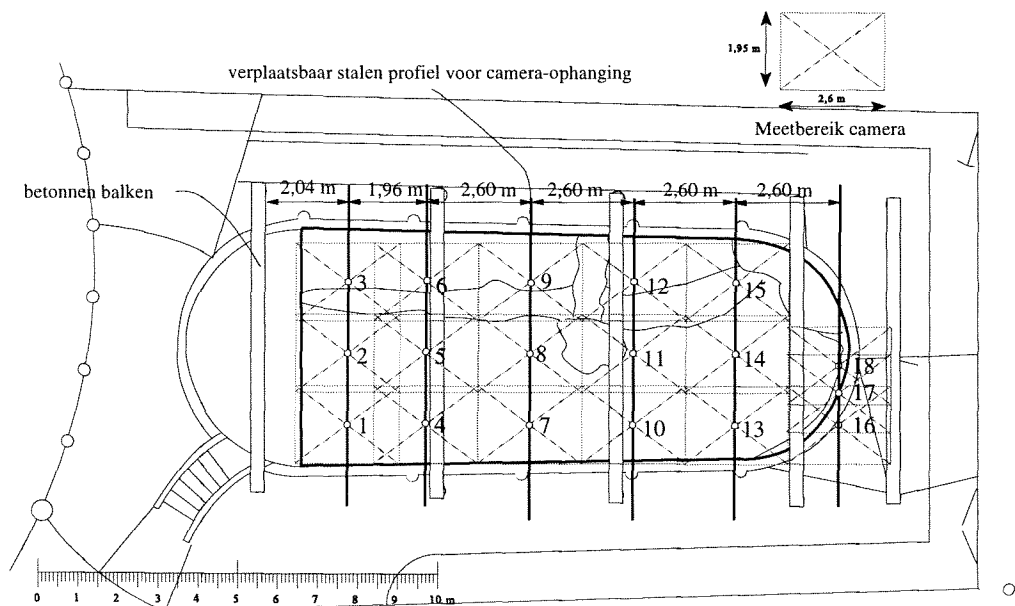


Met een meetlint, dat aan de cameraophanging bevestigd is, is de positiebepaling in dwarsrichting vastgelegd door de afstand van de camera tot de houten klos te meten. De positiebepaling in de langsrichting van het bassin geschiedt door de afstand van het stalen profiel tot aan een referentiepunt op een betonnen balk te meten. Deze afstand is aan beide zijden van de stalen balk gemeten om er zeker van te zijn dat het T-profiel loodrecht op de lengte-as van het bassin geïnstalleerd is.

De hoogte van het midden van de camera tot het wateroppervlak bedraagt 3,4 m. Bij maximaal uitzoomen geeft 1 pixel een gebied van 3,4 mm bij 3,4 mm weer. Een gebruikelijk beeldformaat van 768 * 576 pixels geeft een gebied van 2,6 m bij 1,95 m weer. Met deze gegevens is een keuze voor het meetplan gemaakt. Een weergave van het te volgen meetrooster is te zien in figuur 5-5. Met achttien cameraposities kan het gehele bassin worden gemeten.

Figuur 5-5:

meetposities digitale camera



licht

Uit proefopnamen in de diergaarde is gebleken dat er in de opnamen een te groot verschil is tussen lichte en donkere plaatsen in het bassin. Vooral de schijnwerpers en het buitenlicht, dat door de dakramen naar binnen schijnt, geven spiegelingen op het wateroppervlak. Fel gekleurde drijvers die goed te onderscheiden zijn van de achtergrond krijgen bij de cameraregistratie een zwarte kleur, wanneer ze door de lichtspiegeling drijven. Hierdoor ontstaat het probleem dat - bij het bewerken van de beelden - drijvers, in gebieden met spiegelingen op het water, moeilijk te onderscheiden zijn van de achtergrond.

Om de beeldkwaliteit te vergroten is besloten om tijdens de opnamen de aanwezige zonnewering te benutten en de dakramen te bedekken met zeilen. Ook zijn schijnwerpers, die in het bassin schijnen, tijdelijk uitgezet. Zo is een meer diffuus licht verkregen, waardoor opnamen gemaakt kunnen worden die een goede basis zijn voor verdere bewerking tot snelheidsvectoren.

keuze drijvers

In de proefopstelling in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica is met veenbessen als drijvers gewerkt. In de Diergaarde hangt de camera op 3,4 m in plaats van 4,6 m boven het wateroppervlak, waardoor de afmeting groot genoeg zou moeten zijn om een goede verwerking van de beelden mogelijk te maken. Uit proefopnamen in de Diergaarde bleek echter dat, met veenbessen als drijvers, geen goede verwerking met de computer mogelijk was. Boven het bassin in de Amazonehal is het namelijk warm en vochtig wat een enigszins onscherp camerabeeld tot gevolg had. Na verloop van tijd moet de scherpte van de camera bijgesteld worden. Omdat de opnamen niet altijd 100% scherp te krijgen zijn, in combinatie met de overgebleven lichtspiegelingen op het water, voldoen de afmetingen van de veenbessen niet meer. Uit proeven met sinaasappels is gebleken dat deze genoeg kleurcontrast, grootte en drijfvermogen hebben om als drijvers dienst te doen. Ook drijven sinaasappels dieper dan veenbessen, waardoor ze niet aan elkaar klitten.

meetvolgorde

Er zijn mini-videobanden gebruikt waar 1 uur digitaal beeld mee opgenomen kan worden. Wanneer de stalen balk op de eerste positie ligt kunnen de punten 1, 2 en 3 worden gemeten. Per videoband worden de drie meetpunten, dus één raai geregistreerd. In figuur 5-5 geeft het puntnummer ook de meetvolgorde aan.

Tijdens de meting wordt telkens een aantal drijvers in het water aangebracht. Indien mogelijk worden de drijvers buiten het gezichtsveld van de camera aangebracht. Op deze wijze drijven ze met de snelheid van het water het bereik van de camera binnen. Na het aanbrengen van voldoende drijvers wordt er ongeveer een minuut gewacht om een min of meer ongestoord stroombeeld te kunnen registreren. Hierna worden op andere plaatsen drijvers aangebracht om een zo compleet mogelijk beeld van de stroming te verkrijgen. Wanneer dit enige malen is herhaald, is de meting van één meetpunt voltooid en wordt de camera naar het volgende meetpunt doorgeschoven, waarna de handelingen worden herhaald.

De camera kan tussentijds niet stil worden gezet waardoor in totaal één uur beschikbaar is voor het ophangen van de camera, het positioneren en het meten van de drie meetpunten. In de praktijk blijkt dit met enige ervaring voldoende om een aantal goed bruikbare meetseries te maken.

5.1.6 beeldbewerking

verkrijgen van series

De videobanden met opnamen van de meetpunten kunnen worden beoordeeld met behulp van een digitale videorecorder. Uit de beelden van een meetpunt worden series geselecteerd waar geen verstoringen te zien zijn. Met verstoringen worden zaken bedoeld als het aanbrengen en weghalen van de drijvers en het verstellen van de camera. Het oorspronkelijke digitale beeldmateriaal bevat 25 beelden per seconde. De geselecteerde series bestaan uit beelden, waartussen een tijdstap van 1 seconde zit. De tijdstap van 1 seconde is gekozen opdat er geen problemen ontstaan met het onderscheiden van de deeltjes. De afbeeldingen in een serie worden tenslotte omgezet naar bitmaps om ze voor verdere bewerking geschikt te maken. Per meetpunt wordt op deze wijze een aantal ongestoorde series verkregen. Indien mogelijk zijn er van elk meetpunt drie ongestoorde series geselecteerd, behalve bij meetpunt 1. Van meetpunt 1 zijn in totaal acht series geselecteerd om de stroming aldaar meer in detail te kunnen bekijken. Een voorbeeld van een camera-opname is te zien in figuur 5-6. Dit is een van de eerste beelden van de eerste serie op meetpunt 1.

wegfilteren van achtergrond

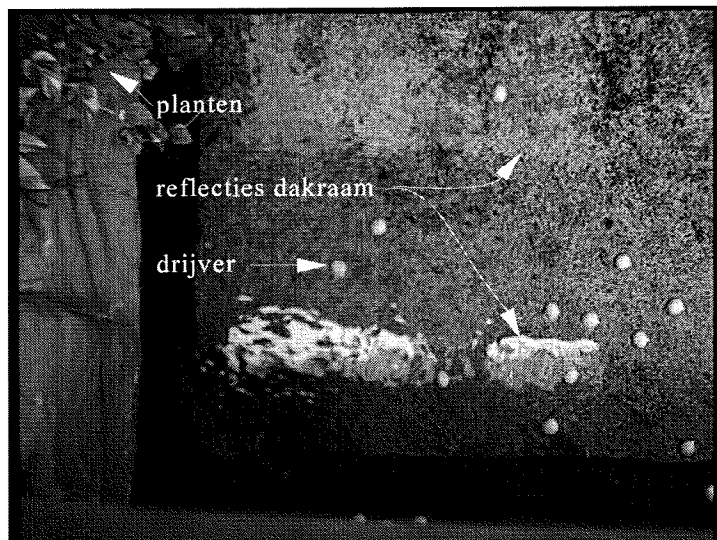
Op de bitmap-afbeeldingen, zoals bijvoorbeeld in figuur 5-6, is het beeld te zien in kleur zoals de camera dat heeft geregistreerd. Naast de zichtbare drijvers zijn ook de achtergrond en resterende lichtspiegelingen zichtbaar, alsmede de dieren die in het bassin zwemmen. Om de beelden geschikt te maken voor verwerking tot snelheidsfiguren zijn beelden vereist in grijstinten waarin de drijvers goed te onderscheiden zijn van de rest. In de proefopstelling in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica was hierna zonder verdere bewerking van de beelden een resultaat te verkrijgen met de automatische bewerking van beelden tot snelheden. Dit resultaat is te zien in figuur 5-2. In Diergaard Blijdorp zijn teveel verstoringen in het meetbeeld zichtbaar, waardoor een verdere bewerking van de camerabeelden noodzakelijk is. Achtergrond, lichtspiegelingen in het water en voorbij zwemmende dieren moeten worden weggefilterd.

Zoals te zien is in figuur 5-6 onderscheiden de drijvers zich vooral in kleur van de achtergrond. In de achtergrond overheersen vooral groentinten terwijl de drijvers oranje gekleurd zijn. Een bitmap afbeelding kent aan elke pixel een waarde toe voor de hoeveelheid rood, groen en blauw. De toegekende waarde liggen tussen de 0 en 255. De combinatie van de hoeveelheden rood, groen en blauw bepalen de kleur van de pixel. In de drijvers overheersen vooral roodtinten die vrijwel niet voorkomen in de achtergrond.

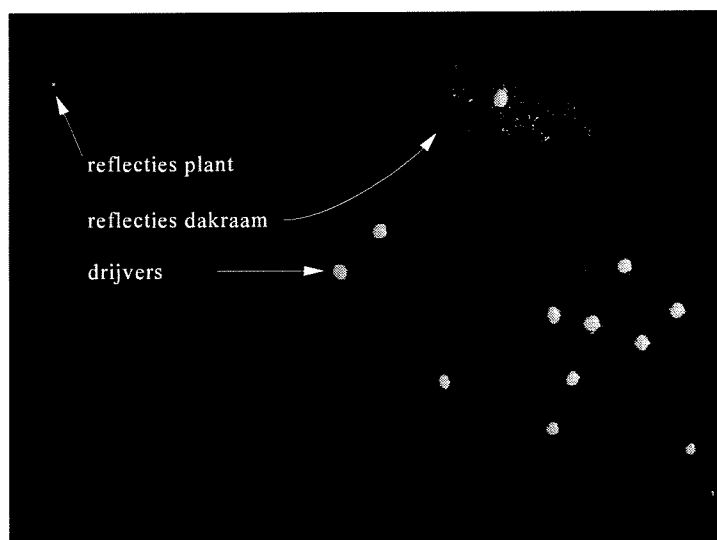
Een computerprogramma is in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica ontwikkeld, waarmee ongewenste informatie op het beeld weggefilterd kan worden. Met dit programma, dat ORANGE is genoemd, wordt de hoeveelheid rood in een pixel vergeleken met de hoeveelheid groen en blauw. Als de rode kleurwaarde overheerst dan wordt de pixel wit gemaakt, zoniet dan wordt de pixel zwart gekleurd. Zo wordt de groenige achtergrond en de witte lichtspiegeling, waar zowel een hoge waarde aan rood als groen en blauwtinten aanwezig is, onderscheiden van de sinaasappels. ORANGE biedt tevens de mogelijkheid de grens van de hoeveelheid roodtint, waaronder een pixel weggefilterd wordt, in te stellen. Handmatige controle op de uitvoer van het programma is op deze manier mogelijk.

De invoer van het programma bestaat uit series bitmaps. De uitvoer bestaat uit afbeeldingen die 256 grijstinten bevatten. Een voorbeeld van een uitvoer uit het programma ORANGE is te zien in figuur 5-7. Deze afbeelding is een bewerking van het camerabeeld dat in figuur 5-6 te zien is. De verkregen beelden dienen als invoer voor het computerprogramma dat snelheden berekent.

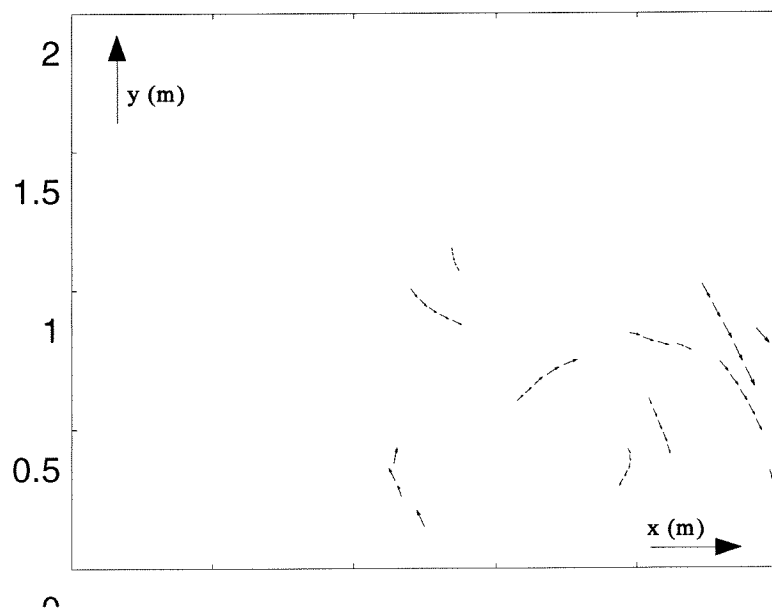
*Figuur 5-6:
camerabeeld
camera-
positie 1*



*Figuur 5-7:
gefilterd
camerabeeld
camera-
positie 1*



*Figuur 5-8:
snelheids-
vectoren
camera-
positie 1*



van beelden naar snelheden

Het Laboratorium voor Vloeistofmechanica maakt gebruik van een computer-programma om snelheden van de aanwezige deeltjes op de afbeeldingen te berekenen. Dit programma is ontwikkeld op de Technische Universiteit van Eindhoven.

De uitvoer van het programma bestaat uit coördinaten in pixels en snelheden in pixels per seconde. De uitvoer moet worden omgerekend naar eenheden in meter en meter per seconde. De uitvoer van het programma kan grafisch in een vectorafbeelding worden weergegeven. Een voorbeeld van een vectorafbeelding is te zien in figuur 5-8. De snelheidsvectoren van de drijvers zijn om de vijf seconden weergegeven. Het gevolg is dat er een spoor ontstaat van vectoren die de baan van een drijver beschrijven.

5.2 Elektromagnetische snelheidsmeting

5.2.1 algemeen

In de buurt van in- en uitstroomopeningen worden sterk driedimensionale effecten verwacht. Het is op deze plaatsen niet mogelijk om, door het meten van de snelheden aan de oppervlakte, de snelheden op een gewenste diepte te bepalen. In- en uitstroomopeningen vormen tevens belangrijke randvoorwaarden voor het modelleren van de stroming. Met de Elektromagnetische snelheidsmeter (EMS) kan op verschillende dieptes gemeten worden. Snelheid wordt gemeten met een hoge meetfrequentie waardoor kleine fluctuaties in de stroomsnelheid worden geregistreerd. Uit een meetserie kan naast de gemiddelde snelheid ook de turbulentie-intensiteit worden bepaald.

De complete EMS-meetinstallatie bestaat uit een drietal onderdelen:

- meetprobe;
- EMS signaalverwerker;
- pc met analoog digitaal conversie-kaart en Sample & Hold-kaart.

Een meetprobe zet stroomsnelheden in een meetpunt om in een elektrisch signaal. De probe is met een kabel bevestigd aan een EMS-signaalverwerker. Deze signaalverwerker zet de meetspanningen van de probe, die maximaal 100 mV bedragen, om naar spanningen tot 10 V. Signalen gaan als analoge input naar een Sample & Hold-kaart die het analoge signaal doorgeeft naar de analoog digitaal-kaart. De analoog digitaal-kaart zet het signaal om in een digitaal signaal. De meetwaarden worden tijdens de meting met het programma 'Dasylab' bewerkt en opgeslagen.

5.2.2 bemonsteringsfrequentie

De resultaten van een meting bestaan uit de snelheid in x en y richting welke om de 0,05 seconde zijn gemeten (20 Hz). Deze frequentie is hoog genoeg om de turbulente fluctuaties in de watersnelheid te kunnen registreren.

5.2.3 meettijd

Om een betrouwbare waarde te krijgen voor de gemiddelde snelheid en de turbulentie-intensiteit is uitgezocht hoelang er per meetserie gemeten moet worden. De meetserie moet lang genoeg zijn om de turbulente beweging uit te middelen. Daarom zal de meetduur de grootste turbulentie tijdschaal ruim moeten overtreffen.

Voor het schatten van de duur van een meting bestaat een vuistregel. Deze stelt dat een meting tenminste 100 keer de grootst verwachte wervel moet kunnen bevatten. De grootste wervels in het bassin in de Diergaard hebben in de buurt van de straal een afmeting in de orde van 0,5 m. Bij een snelheid van ongeveer 0,3 m/s de volgt hieruit een wervelperiode van ongeveer 2 s. Een meetperiode van 200 s oftewel $3\frac{1}{3}$ minuut zou voldoende moeten zijn. Aangezien de snelheid bij de straal en de grootte van de grootste wervel niet van tevoren bekend zijn, wordt deze meetperiode van $3\frac{1}{3}$ minuut als minimum aangehouden.

5.2.4 proefopstelling in Laboratorium voor Vloeistofmechanica

De te meten proefopstelling in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica is eerder in dit hoofdstuk beschreven in § 5.1.3; met de Particle Tracking Velocimetry-methode zijn in deze proefopstelling de oppervlaktesnelheden gemeten. Met de EMS is de snelheid dicht in de buurt van de instroomopening gemeten. Bij deze instroomopening is een straal aanwezig waar met de Particle Tracking Velocimetry-methode geen beeld kan worden verkregen van snelheden en turbulentie-intensiteiten anders dan bij het wateroppervlak.

doel

De proefopstelling is bedoeld om ervaring op te doen met de meetmethode, opdat later in Diergaarde Blijdorp meer gericht gemeten kan worden. Bekeken is er hoe betrouwbare meetresultaten verkregen kunnen worden en waar de grootste knelpunten liggen. Tevens is de grootte van de meetruis bepaald door in stilstaand water te meten. Dit is vooral van belang voor het bepalen van de turbulentie-intensiteit.

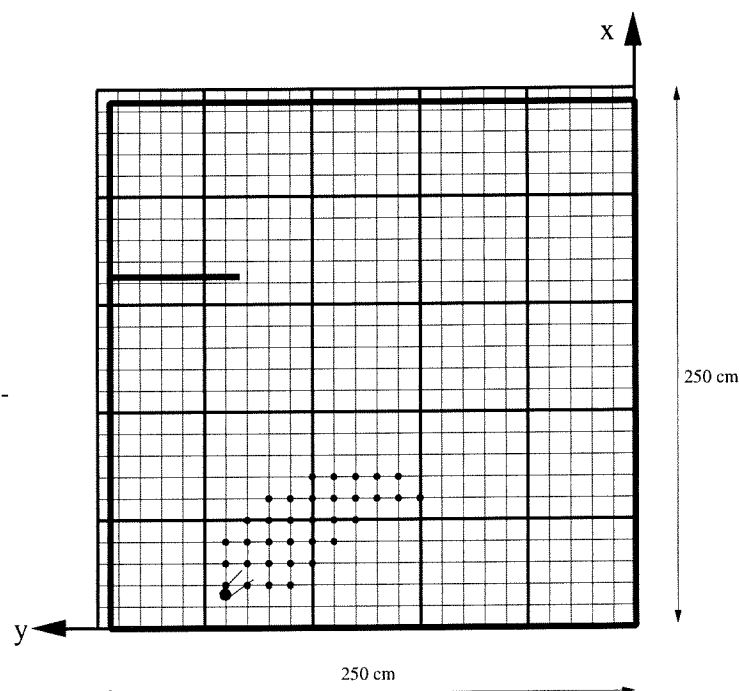
meetopstelling

De probe is aan een peilbuis bevestigd, die op een houten schuif is gemonteerd. Deze schuif kan over een plank schuiven die het water overspant. De probe is met een kabel verbonden met de resterende meetapparatuur die naast de bak is opgesteld.

Op de peilbuis bevindt zich een centimeterverdeling waarmee de verticale positie van de probe te bepalen is. De horizontale positionering van de probe is af te lezen op meetlinten, die zowel op de zijkanten van de bak als op de plank boven het water zijn bevestigd.

In figuur 5-9 zijn de punten aangegeven waar met de EMS de snelheden zijn bepaald. Aangezien het niet de bedoeling geweest is om de straal volledig te meten, maar om in korte tijd ervaring op te doen met de meetmethode en het fenomeen straal, is er gekozen om slechts op één diepte te meten. Er is gemeten in het horizontale vlak ter hoogte van het midden van de instroomopening.

*Figuur 5-9:
meetpunten
van de EMS-
meting
in de proef-
opstelling*

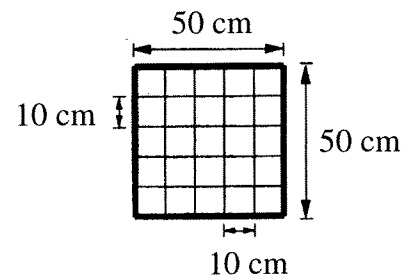
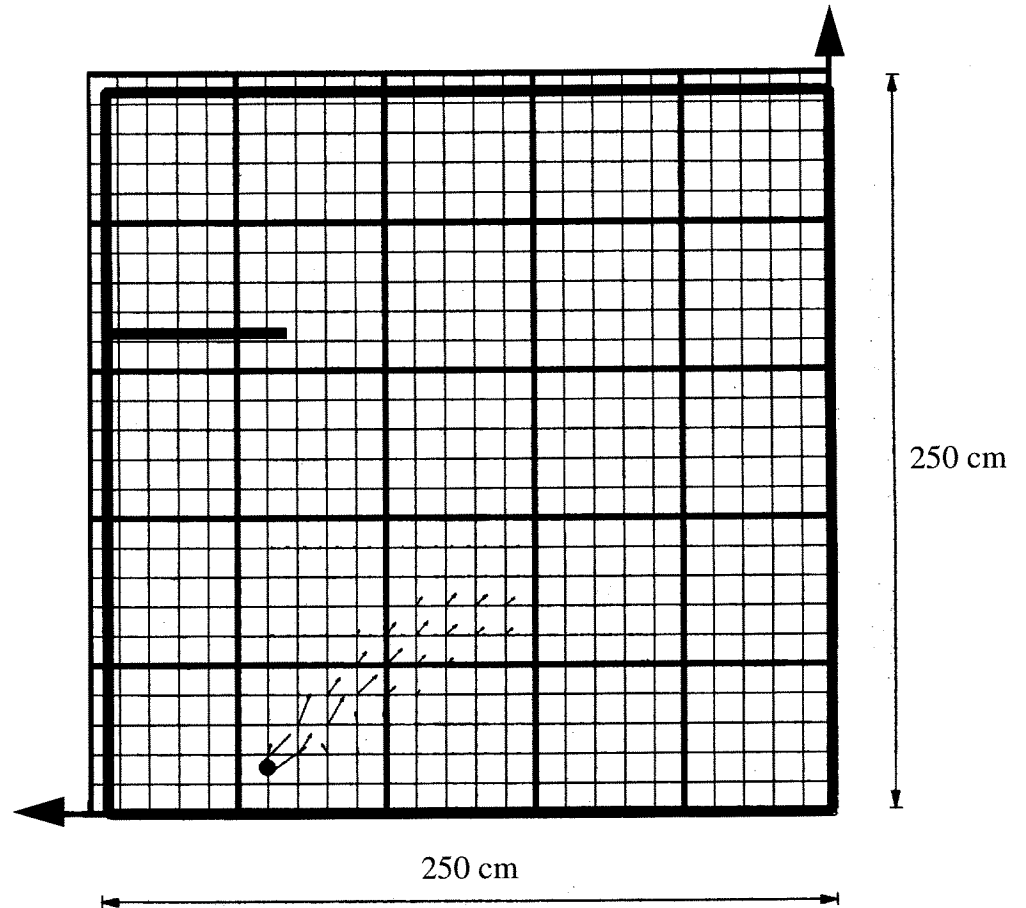


• = meetpunt EMS-meting

resultaten

Uit een meetserie kan voor ieder punt de gemiddelde snelheid en de turbulentie intensiteit worden bepaald. De gemiddelde snelheid en de turbulentie-intensiteit kunnen worden afgebeeld als vectoren. In figuur 5-10 zijn de richting en relatieve grootte van de gemiddelde snelheden in de meetpunten weergegeven. De lengte van een pijltje geeft de grootte van de snelheid aan.

*Figuur 5-10:
gemiddelde
snelheden van
de EMS-meting
in de proefop-
stelling*



Om het ruisniveau vast te stellen is een meting verricht in stilstaand water. De standaarddeviatie van de meetserie, waarbij 10 minuten is gemeten, bedraagt zowel in x- als y-richting 3 mm/s. Deze standaarddeviatie bestaat volledig uit meetruis, aangezien er in stilstaand water geen stroming en dus ook geen turbulentie aanwezig is. Bij de meetserie waar 13 minuten direct voor de instroomopening is gemeten was de turbulentie-intensiteit maximaal en bedroeg 30 mm/s in beide asrichtingen. Ter plaatse van de instroomopening bestaat de turbulentie-intensiteit voor 10% uit meetruis.

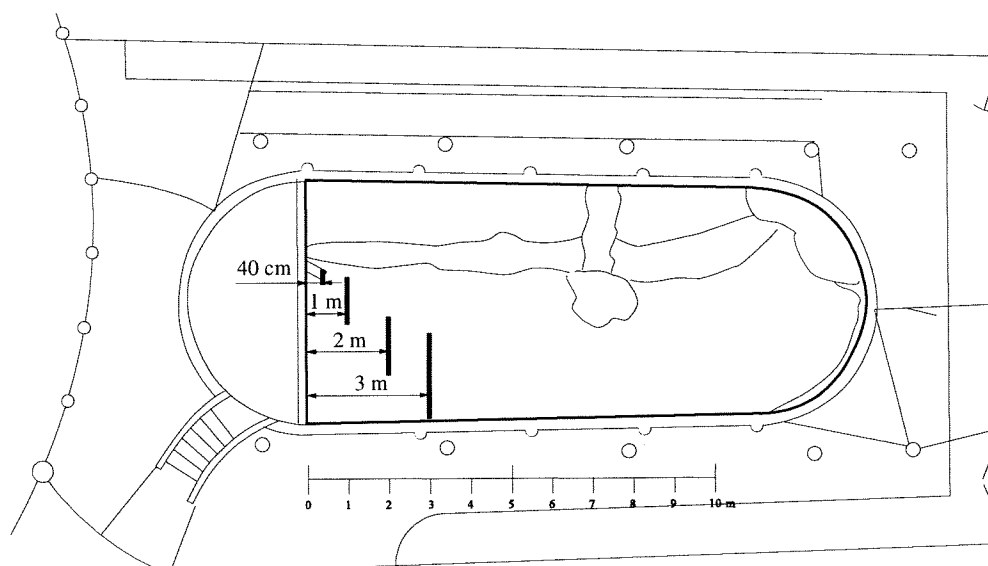
5.2.5 meetopstelling in Diergaarde Blijdorp

Om de elektromagnetische stromingsmeter vast te zetten is een stabiele overspanning over het water noodzakelijk. De overspanning bestaat uit een houten koker van ongeveer 30 bij 30 cm. Hierover kan de EMS-bevestiging geschoven worden. De overspanning is aan de zijde van de balustrade opgelegd op de betonnen rand. Aan de andere zijde rust de overspanning op een roestvrijstalen driepoot, die in het water is gezet. Deze driepoot is in de werkplaats van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica vervaardigd.

De positie in de dwarsrichting van het bassin (y-as) is met een meetlint aan de schuif bepaald. De positie langs de x-as is bepaald door de afstand tussen de houten koker en de rand van het bassin aan beide zijden van de koker te meten. De verticale afstand van de probe tot aan het wateroppervlak is te bepalen met de schaalverdeling op de bevestiging van de EMS-probe.

Er is gemeten voor één van de instroomopeningen, op verschillende dieptes in een viertal raaien, zoals te zien is in figuur 5-11. In totaal zijn in 171 punten snelheden gemeten. Op deze manier zijn de snelheden in de straalstroming bepaald. Als meetduur is, in het haaienbassin, 4 minuten aangehouden. Voorts is de bemonsteringsfrequentie in het programma 'Dasylab' op 20 Hz ingesteld.

*Figuur 5-11:
meetposities
EMS-meting
in haaienbassin*



Aangezien de grootste raai uit 71 meetpunten bestaat, bedraagt de meetduur van een dergelijke raai bijna 5 uur. De probe moet na iedere meting worden verschoven, over de overspanning, en een aantal malen in de diepte worden versteld. Dit levert een totale meettijd op van een volledige werkdag zonder onderbrekingen. Veranderingen in het systeem, zoals het schoonmaken van filters of het veranderen van de waterstand, kunnen aanleiding zijn voor instationariteiten in de stroming op een tijdschaal die kleiner is dan de totale duur van de metingen.

In totaal is vier dagen met de EMS gemeten, waarbij op elke meetdag is begonnen met één of meerdere metingen direct voor de straal. Het midden van de instroomopening bevindt zich 32 cm uit de zijwand en 41 cm onder de waterspiegel. De testmetingen zijn bedoeld om te controleren of het debiet, dat de bak instroomt, per dag constant is. Gemeten is op een afstand van 50 cm uit de wand op een diepte van 43 cm.

De resultaten van de metingen in het haaienbassin worden in hoofdstuk 6 gepresenteerd en besproken.

6 Analyse van resultaten

De resultaten van de experimenten die in Diergaarde Blijdorp zijn verricht, zoals beschreven in hoofdstuk 5, worden in dit hoofdstuk gepresenteerd en besproken. In § 6.1 zal het resultaat van de metingen van de oppervlaktesnelheid, verkregen uit de Particle Tracking Velocimetry methode, worden behandeld. Met het verkregen resultaat kan een overzicht worden verkregen van het globale stroombeeld. De resultaten van de snelheidsmeting nabij een van de instroomopeningen worden behandeld in § 6.2. In § 6.3 zullen de resultaten van beide metingen met elkaar vergeleken worden. Tenslotte zal in § 6.4 het stroombeeld geanalyseerd worden.

6.1 Oppervlaktesnelheden

6.1.1 presentatie meetresultaten

samenvoegen van meetgegevens

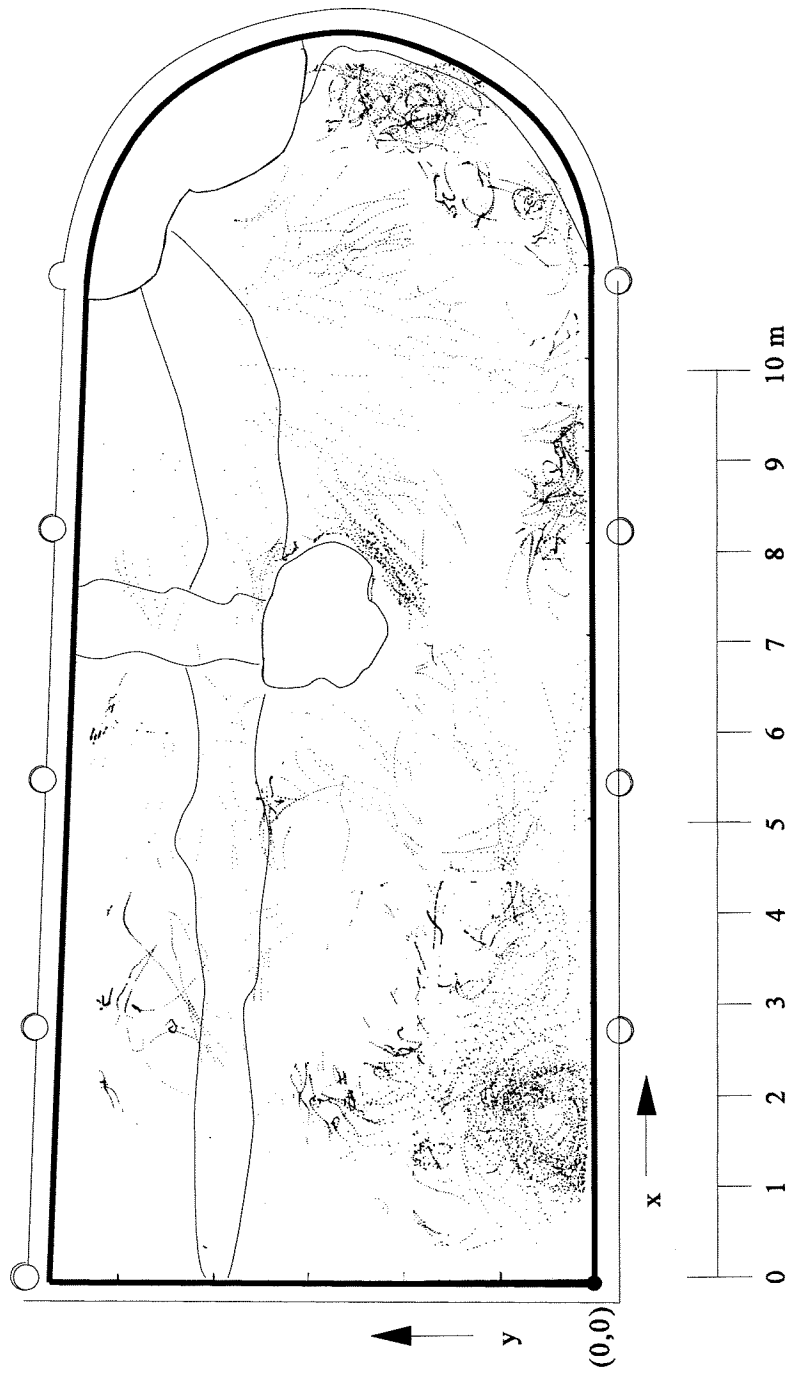
Met de Particle Tracking Velocimetry-methode zijn in alle 18 cameraposities, zoals is aangegeven in figuur 5-5, de oppervlaktesnelheden bepaald. Hoe van digitale camerabeelden oppervlaktesnelheden kunnen worden berekend, is reeds in § 5.1.6 behandeld. Door de resultaten van minimaal 3 series aan meetbeelden samen te voegen wordt een dataset verkregen met een hogere dichtheid aan informatie.

Door het samenvoegen van de datasets in de 18 cameraposities wordt een overzicht verkregen van de snelheden in het gehele bassin. Het is hierbij van belang dat de positie van elk camerapositie vastligt ten opzichte van een vast coördinatenstelsel. De x-as loopt in de lengterichting van het bassin, de y-as in de breedterichting. Het x-y stelsel is aangegeven in figuur 6-1.

In figuur 6-1 is te zien hoe de informatie van de gemiddelde snelheden is verdeeld. In de geometrie van het haaienbassin zijn de punten aangegeven waar de oppervlaktesnelheid is bepaald. De geometrie van het bassin is reeds beschreven in § 3.2. In sommige gebieden van het bassin is veel informatie over de oppervlaktesnelheden aanwezig, terwijl elders vrijwel geen informatie beschikbaar is. Duidelijk is te zien dat dicht bij de oorsprong, bij camerapositie 1, veel snelheids-informatie is. De hoeveelheid informatie in dat gebied is ontstaan omdat daar 8 series in plaats van 3 series zijn samengevoegd. Later in dit hoofdstuk, in § 6.1.2, zal dieper op de oorzaken en gevolgen van de spreiding in informatiedichtheid worden ingegaan.

Figuur 6-1:

*posities waar
oppervlaktesselheden
bekend zijn*

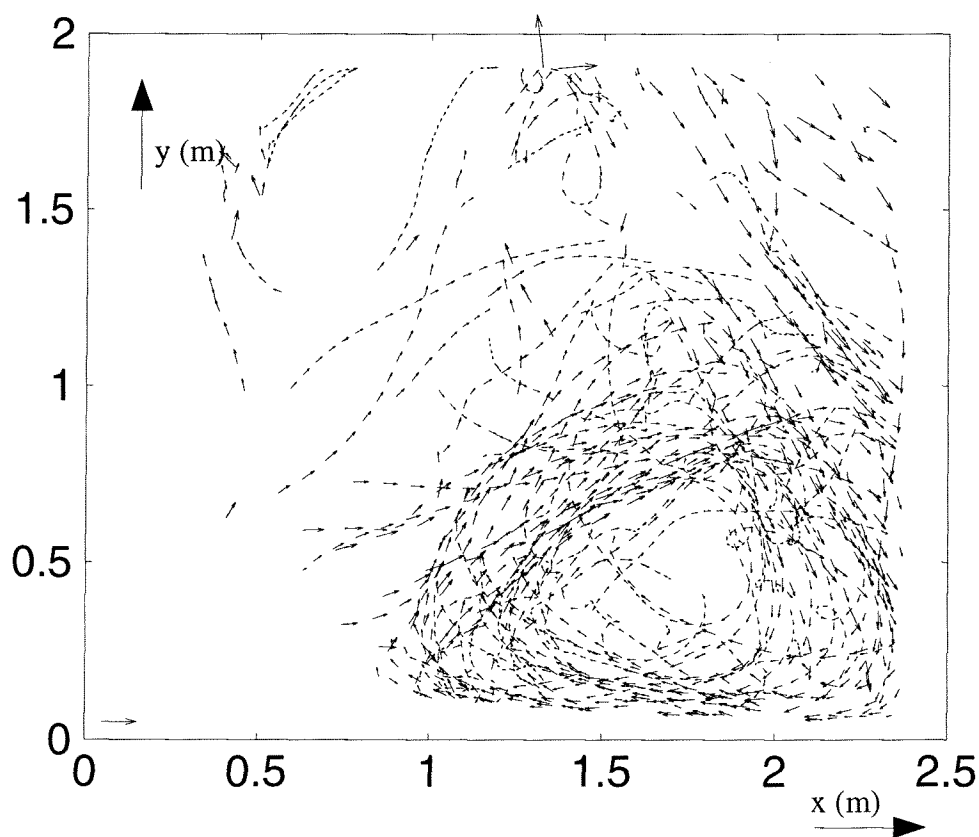


ongestructureerd stroombeeld met vectoren

Op elk van de punten in figuur 6-1 kunnen snelheidsvectoren afgebeeld worden. Elk punt krijgt een pijl die de grootte en richting van de oppervlaktesnelheid weergeeft. In een afbeelding met snelheidsvectoren kan de baan van een drijver gevolgd worden. Zoals in figuur 6-1 te zien is, zijn de punten waar informatie over de snelheden is ongelijkmatig over het bassin verspreid. Met het afbeelden van snelheidsvectoren wordt door de ongelijke spreiding een ongestructureerd beeld verkregen van het globale stroombeeld in het bassin. In dit ongestructureerde beeld is het niet gemakkelijk de hoofdrichtingen van de stroming te onderscheiden.

In camerapositie 1, waar meer snelheidsinformatie is dan in de andere cameraposities, geeft het ongestructureerde snelheidsveld een redelijk beeld van de aanwezige stroming. In figuur 6-2 is het ongestructureerde veld bij camerapositie 1 afgebeeld. De ongestructureerde veldenvan alle 18 cameraposities zijn te zien in Bijlage 1. De eenheden in de assen zijn gegeven in meters ten opzichte van de dichtstbijzijnde hoek van het bassin. Zowel in de figuren in bijlage 1 als in figuur 6-2 is linksonder een referentievector te zien die een snelheid weergeeft van 10 cm/s.

*Figuur 6-2:
ongestructureerd
snelheidsveld bij
camerapositie 1*



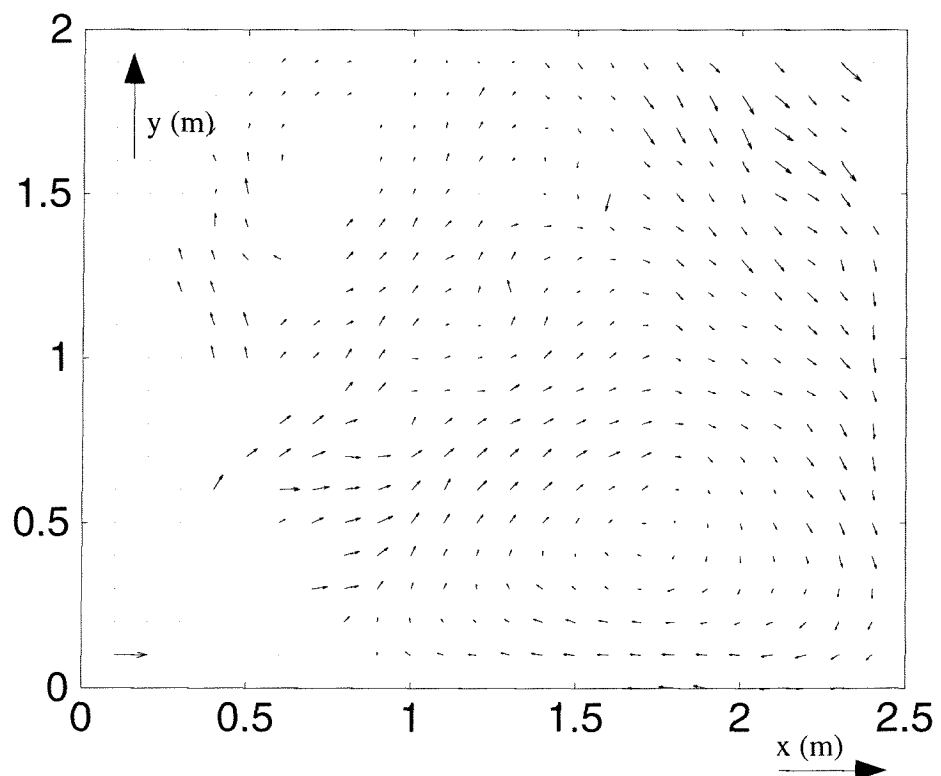
In figuur 6-2 is een gebied te zien met een recirculatie die aangedreven wordt door een straal. Rechtsboven in figuur 6-2 is de straal te zien; daar zijn de snelheden groter dan in de andere punten van deze figuur. Tevens is te zien dat verschillende drijvers elkaars paden kruisen. Ook zijn een tweetal afwijkende vectoren zichtbaar aan de bovenrand van het figuur. In § 6.1.2 zal onder andere het kruisen van de paden verklaard worden.

gestructureerd stroombeeld met vectoren


Een gestructureerd overzicht van het globale stroombeeld wordt verkregen door de ongestructureerde meetresultaten om te zetten naar snelheidsvectoren in een regelmatig rooster. Door middel van lineaire interpolatie wordt in elk roosterpunt een gemiddelde waarde van de snelheid berekend. Bij het in een rooster zetten van meetwaarden gaat, door plaatsmiddeling, informatie verloren. Het kruisen van de banen van de drijvers is niet meer zichtbaar in een gestructureerd overzicht.

Figuur 6-3 geeft het gestructureerde snelheidsbeeld weer ter plaatse van camerapositie 1, waarbij een roostergrootte van 10 cm is toegepast. Deze figuur is een directe bewerking van de snelheidsvectoren die te zien zijn in figuur 6-2.

*Figuur 6-3:
gestructureerd
vectorveld bij
camerapositie 1*



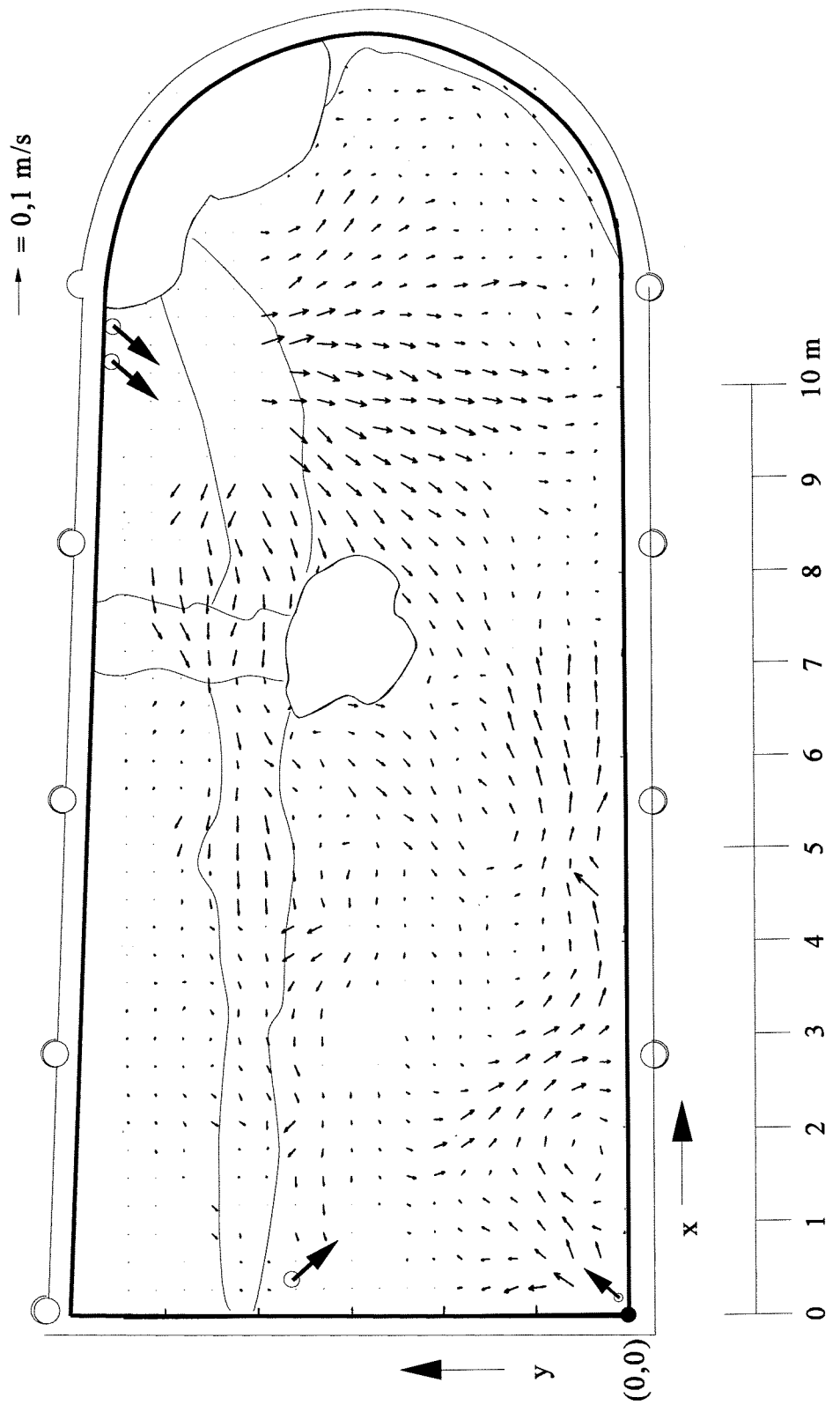
In figuur 6-3 is wederom een straal, rechtsboven, en een recirculatiegebied, rechtsonder, te zien. De snelheden linksonder in de figuur worden veroorzaakt door de instroomopening die in figuur 3-2 met ⑧ is aangeduid. Tevens zijn gebieden te zien waar, door gebrek aan meetinformatie, geen snelheden zijn weergegeven. Ook is een aantal afwijkende vectoren te zien.

Een grofmazig rooster geeft, door plaatsmiddeling van de snelheden in een groot gebied, weinig informatie weer. In een te fijnmazig rooster kan de waarde van de berekende snelheid echter gebaseerd zijn op een enkel punt met snelheidsinformatie. Op plaatsen waar een grote dichtheid aan meetinformatie is, zijn de vectoren in een rooster betrouwbaarder dan op plaatsen waar de vector in een rooster slechts op weinig informatie is gebaseerd. Een afbeelding waarin een rooster met een tussenafstand van 0,3 m is toegepast is te zien in figuur 6-4. De instroomopeningen zijn met  aangegeven.

In figuur 6-4 is een recirculatie-gebied in de buurt van de oorsprong is te zien. Dit gebied is in detail in figuur 6-3 te zien. In figuur 6-4 is, net als in figuur 6-3, te zien dat op een aantal plaatsen vectoren voorkomen die afwijken van de omringende vectoren. Een aantal gebieden lijkt een lage stroomsnelheid te hebben, omdat daar vrijwel geen snelheidsinformatie is, wat te zien is in figuur 6-1. Tevens lijken stromingen plotseling te veranderen wanneer ze een denkbeeldige lijn kruisen; dit is bijvoorbeeld te zien bij de lijn met $x = 7$ m. In § 6.1.2, foutenbronnen, worden bovengenoemde zichtbare afwijkingen in de meetresultaten verklaard.

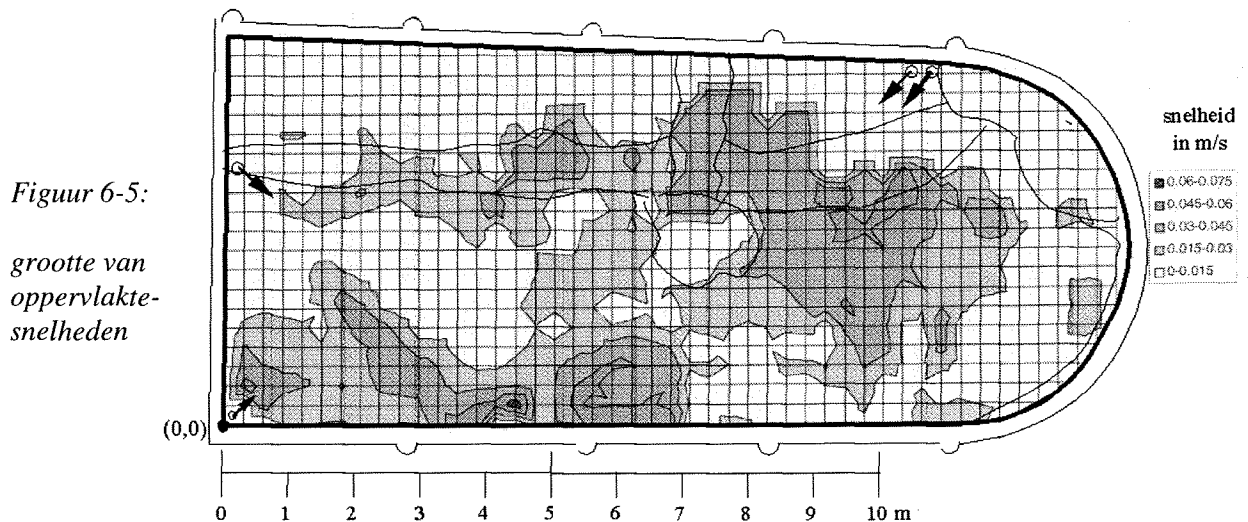
Figuur 6-4:

gestructureerd
overzicht van
de oppervlakte-
snelheden



gestructureerd stroombeeld met isolijnen

Snelheden kunnen door vectoren worden weergegeven zoals te zien is in de figuren 6-2, 6-3 en 6-4. Richting en grootte van de stroomsnelheid tezamen zijn met vectoren weer te geven. Wanneer alleen de absolute waarden van de snelheden van belang zijn kan een afbeelding worden gemaakt met isolijnen van gelijke snelheid. In figuur 6-5 is een afbeelding met isolijnen van de snelheid in het haaienbassin weergegeven. Figuur 6-5 geeft de informatie van het gestructureerde snelheidsveld weer, waarbij de snelheden op de rasterpunten bekend zijn.



In figuur 6-5 zijn hoge snelheden donkerder weergegeven dan lage snelheden. De snelheden die door de drie instroomopeningen worden veroorzaakt zijn duidelijk te onderscheiden van de snelheden op andere plaatsen in het bassin. Tevens is te zien dat de straal van de instroomopening, die in figuur 3-2 met ⑤ is aangeduid, bij $x = 3,5$ m de wand van het bassin raakt.

Aangezien figuur 6-5 een directe bewerking is van het gestructureerde snelheidsveld zijn de onvolkomenheden in de meetinformatie ook in deze figuur terug te vinden. Met onvolkomenheden worden in dit geval gebieden met afwijkende snelheden bedoeld. In de volgende paragraaf worden de mogelijke oorzaken van de afwijkingen in de meetresultaten genoemd.

6.1.2 foutenbronnen

In § 6.1.1 is, bij de bespreking van de figuren 6-1 tot en met 6-4, een aantal verstoringen in het gemeten stroombeeld genoemd. Deze verstoringen zijn:

- ongelijke spreiding van snelheidsgegevens;
- het kruisen van paden die de drijvers afleggen;
- het vóórkomen van vectoren met een afwijkende grootte en / of richting;
- tegenstrijdige stroombeelden in aanliggende meetgebieden.

Mogelijke oorzaken voor de zichtbare verstoringen in het meetbeeld kunnen zijn:

- instationariteit van de stroming ;
- verstoring van het camerazicht;
- beperkingen van het programma dat snelheden berekent.

instationariteit van de stroming

Instationariteit in de stroming veroorzaakt verstoringen in het meetbeeld. Bij het samenvoegen van informatie is uitgegaan van een vrijwel stationair stroombeeld, terwijl er wel degelijk sprake blijkt te zijn van fluctuaties in de werkelijke stroomsnelheden.

In de meetresultaten zijn de gevolgen terug te vinden van instationariteiten met verschillende tijdschalen. Fluctuaties in het stroombeeld met een tijdschaal van minder dan vijftien minuten zijn te herkennen aan het kruisen van de banen van de drijvers binnen een meetgebied, wat te zien is in figuur 6-2. Ook binnen een serie van ongeveer anderhalve minuut aan camerabeelden in een camerapositie komt het voor dat banen van drijvers elkaar kruisen. Instationariteit met een tijdschaal van vijftien minuten wordt veroorzaakt door instabiliteiten in de stroming. Een onregelmatige instroming kan tevens een belangrijke oorzaak zijn van fluctuaties in het stroombeeld.

Stromingfluctuaties met een grote tijdschaal zijn te herkennen in figuur 6-4 aan groepen vectoren die veranderen bij het passeren van een denkbeeldige lijn. Bij $x = 4,5$ m en bij $x = 7$ m zijn deze lijnen voor te stellen, die randen zijn van het camerabereik. Tussen de metingen in de raaien aan weerszijden van de lijn waar $x = 4,5$ m zit een tijdsverschil van een paar uur, terwijl tussen de metingen in de raaien aan weerszijden van de lijn waar $x = 7$ m een tijdsverschil van drie dagen aanwezig is. Debietsfluctuaties van de instroomopeningen zijn de oorzaak van instationariteit met een tijdschaal van een paar uur tot en met een paar dagen.

Gedurende de tweede meetdag, waarin camerapositie 10 tot en met 18 zijn gemeten, is een grote instroom aanwezig bij de instroomopening die in figuur 3-2 met ③ is aangegeven. Deze instroom veroorzaakt veel luchtbellens in het water, die een sterke stroming aan de oppervlakte tot gevolg hebben. De invloed van deze instroomopening is, zowel in figuur 6-4 als figuur 6-5, te zien in het gehele gebied waar op de tweede meetdag is gemeten.

verstoring van het camerazicht

Door de aanwezigheid van elementen tussen de camera en het wateroppervlak, zoals planten en een boomstam, is het niet mogelijk om op iedere plaats meetresultaten te verkrijgen. Op deze wijze ontstaan gebieden met geen of weinig informatie. Verstoringen in het blikveld van de camera kunnen tevens voor foutieve informatie zorgen. Wanneer een drijver onder een plantenblad verdwijnt, terwijl iets verderop juist een drijver verschijnt, kan dit door de programmatuur als één drijver worden herkend. Hierdoor kunnen vectoren worden berekend met een afwijkende grootte en/of richting.

Figuur 6-6 geeft een samengesteld beeld weer van camerabeelden in de 18 cameraposities. De cameraposities zijn met nummers weergegeven. Verstoringen in het camerazicht kunnen worden opgemerkt door in figuur 6-6 de afzonderlijke camerabeelden te beschouwen. Gelet moet worden op verstoringen tussen het wateroppervlak en de camera, niet op verstoringen tussen het wateroppervlak en de bodem. Het camerabeeld in camerapositie 2, 3 en 15 wordt gedomineerd door de aanwezige bladeren. Begroeiing aan de randen is aanwezig in camerapositie 6, 9 en 12. Een boomstam met begroeiing is te zien in camerapositie 5.

De bovengenoemde plaatsen, waar het wateroppervlak niet zichtbaar is, zijn in figuur 6-1 terug te vinden omdat er daar geen punten met snelheidsinformatie te zien zijn. Ook in de figuren 6-4 en 6-5 is de invloed van de verstoring van het camerazicht te zien; er zijn daar lagere snelheden weergegeven dan in werkelijkheid het geval hoeft te zijn.

beperkingen van het programma dat snelheden berekent

Foutieve snelheden kunnen berekend worden aan de randen van een meetgebied en bij plantenbladeren. In een camerabeeld kan een drijver uit het gebied of onder een plantenblad drijven, terwijl in een volgend camerabeeld elders een drijver verschijnt. De verschillende drijvers kunnen door de programmatuur als één drijver herkend worden, waarna een foutieve snelheid berekend wordt. Aan de bovenrand van figuur 6-2 zijn twee duidelijk afwijkende vectoren te zien, die veroorzaakt worden door de rand.

*Figuur 6-6:
samengestelde
beelden van
de 18 camera-
posities*

6.2 Snelheden nabij de instroomopening

In § 5.2 is de meetmethode beschreven waarmee de metingen nabij de instroomopening, die in figuur 3-2 met ⑤ is aangeduid, zijn uitgevoerd. De metingen zijn verricht op een aantal raaien. Een overzicht van de posities van de gemeten raaien is te zien in figuur 5-11. In deze paragraaf worden de resultaten van de meting met de Elektromagnetische snelheidsmeter gepresenteerd en besproken.

6.2.1 presentatie meetresultaten

algemeen

Het assenstelsel dat gebruikt is tijdens de metingen is gelijk aan het stelsel dat bij de oppervlaktesnelheidsmetingen is gebruikt. In figuur 6-1 zijn de assen en de oorsprong reeds weergegeven. De x-waarde is de afstand vanuit de oorsprong in de lengterichting van het bassin. De y-waarde is de afstand vanuit de oorsprong in de dwarsrichting van het bassin. De instroomopening waar de straal uitkomt heeft een x-waarde van 32 cm.

In figuur 5-11 is te zien dat de gemeten raaien niet haaks op de as van de straal staan. Meetpunten met een grotere y-waarde bevinden zich dichterbij de instroomopening dan in meetpunten met een lagere y-waarde. Dit verschil in afstand van meetpunten op een raai tot de instroomopening geeft een asymmetrisch snelheidsprofiel.

debiet instroomopening

Op elk van de vier meetdagen is de snelheid vlak voor de instroomopening gemeten. De afstand van de probe tot de zijwand bedraagt in de gemeten situatie 40 cm. De resultaten van de testmetingen zijn:

$u = 0,490$ m/s op de eerste meetdag (3-6-'98);
 $u = 0,595$ m/s op de tweede meetdag (8-6-'98);
 $u = 0,571$ m/s op de derde meetdag (9-6-'98);
 $u = 0,584$ m/s „ „ ;
 $u = 0,578$ m/s „ „ ;
 $u = 0,580$ m/s „ „ ;
 $u = 0,587$ m/s op de vierde meetdag (10-6-'98).

De bovengenoemde snelheden zijn samengesteld uit de waarden van de gemeten snelheden in x- en y-richting. Er is een verschil zichtbaar in gemeten snelheid vlak voor de instroomopening op de verschillende meetdagen. Omdat in het weekend van 6 en 7 juni een pomp was uitgevallen, is een pomp met een groter vermogen in werking gesteld. Het gevolg hiervan is dat er een groter debiet in de instroompijp aanwezig is. Het merendeel van de metingen met de Elektromagnetische snelheidsmeter is met dit grotere debiet verricht (148 van de 171 meetpunten).

Het gemiddelde van de gemeten snelheden direct voor de instroomopening is 0,58 m/s. Hierbij is de lage snelheid van de eerste meetdag niet meegerekend. De inwendige doorsnede van de instroomopening is 15 cm, waarmee het doorstroomoppervlak 177 cm² bedraagt. Het gemiddeld debiet door de opening is dan 10,3 liter water per seconde wat gelijk is aan 37 m³ per uur.

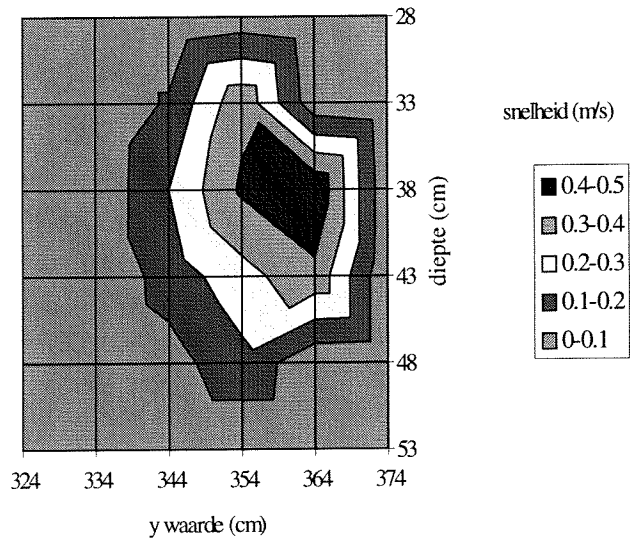
meetruis

Op twee meetdagen zijn, in een hoek van het bassin waar het water nagenoeg niet stroomt, nulpuntsmetingen uitgevoerd. Uit deze metingen kan de turbulentie-intensiteit bepaald worden die de mate van meetruis aangeeft. De turbulentie-intensiteit van deze meetseries bedroeg op de eerste meetdag 35 mm/s in de x-richting en 43 mm/s in de y-richting. De tweede meetdag was de turbulentie-intensiteit 33 mm/s in de x-richting en 32 mm/s in de y-richting. De turbulentie-intensiteit, die in de proefopstelling is gemeten, bedroeg 30 mm/s zowel in de x- als de y-richting.

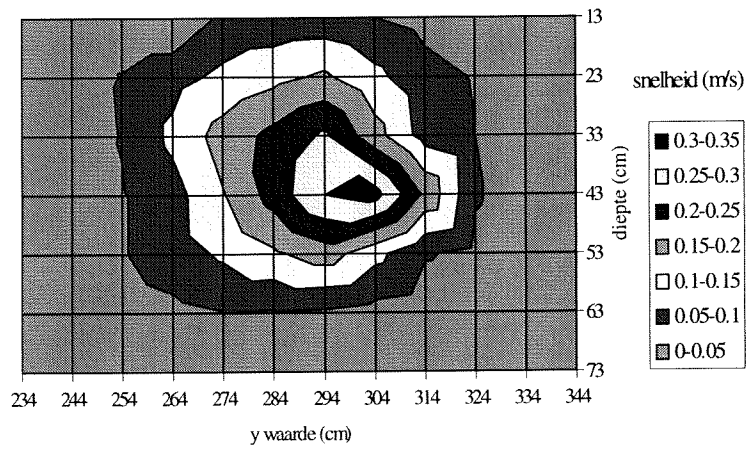
isolijnen van gemiddelde snelheid

De gemiddelde snelheid en de turbulentie-intensiteit van elk punt in de raaien, aangegeven in figuur 5-11, zijn met behulp van een computerprogramma uit de meetseries bepaald. Er zijn afbeeldingen gegenereerd die de isolijnen van de gemiddelde snelheden in de raai weergeven. In de figuren 6-7 t/m 6-10 zijn de isolijnen van de gemiddelde snelheid voor elk van de vier gemeten raaien weergegeven. De meetdiepte is gegeven ten opzichte van het wateroppervlak.

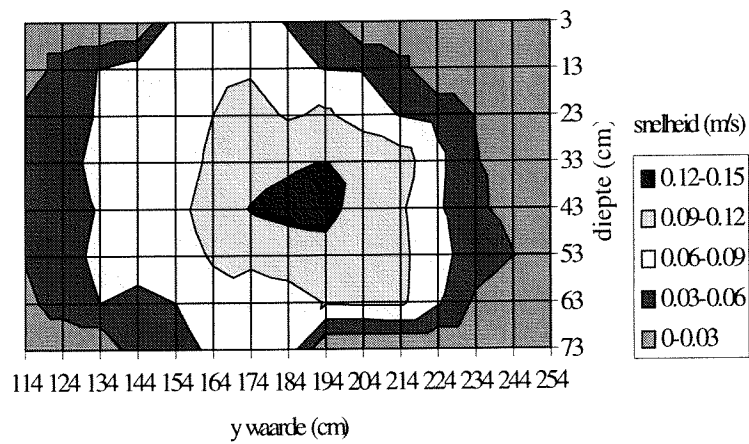
Figuur 6-7:
*gemiddelde-
 snelheid
 x = 40 cm*



Figuur 6-8:
*gemiddelde
 snelheid
 x = 1 m*

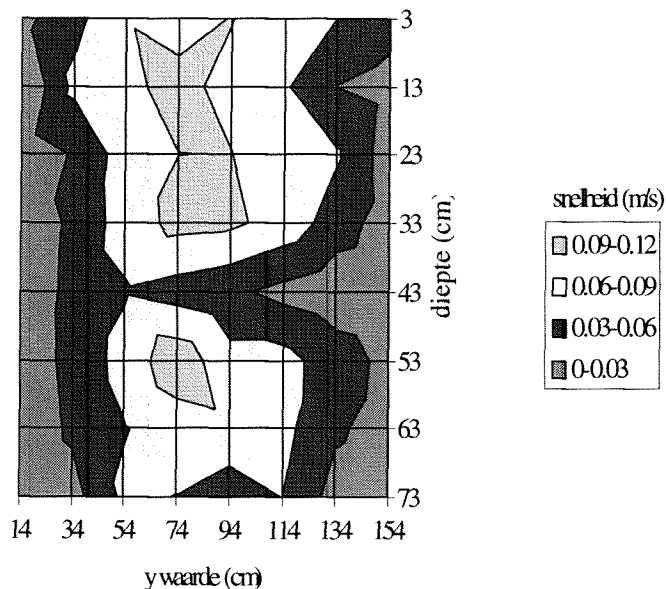


Figuur 6-9:
*gemiddelde
 snelheid
 x = 2 m*



Figuur 6-10:

*gemiddelde
snelheid
 $x = 3 \text{ m}$*



In figuren 6-7 t/m 6-9 is te zien dat in het midden van de straal de snelheid maximaal is. Figuur 6-10 geeft echter een geheel ander beeld. Tijdens de meting van deze raai is het waterpeil in het bassin een aantal centimeter omlaaggebracht. Dit heeft blijkbaar grote invloed gehad op het snelheidsprofiel. Figuur 6-10, bij $x = 3 \text{ m}$ kan dan ook niet als betrouwbaar worden beschouwd.

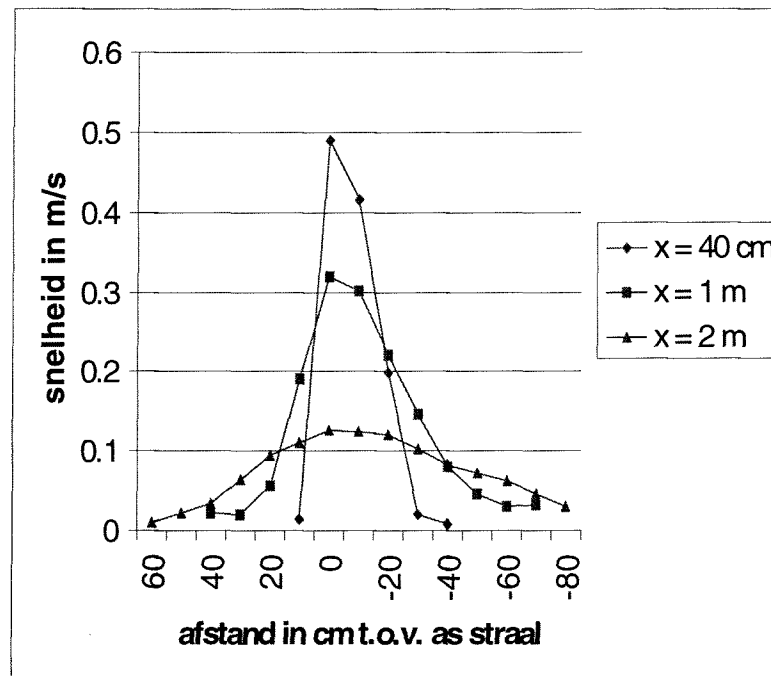
In de figuren 6-7 t/m 6-9 is te zien hoe de vorm van de straal zich ontwikkelt naarmate de afstand tot de instroomopening toeneemt. Dicht bij de instroomopening is het dwarsprofiel cirkelvormig, terwijl verder van de instroomopening een ellipsvormig profiel ontstaat. De asymmetrie in het snelheidsprofiel, omdat de raaien niet haaks op de as van de straal staan, is in de figuren 6-7 t/m 6-9 duidelijk te zien.

verloop van snelheid in de straal

Een specifieke eigenschap van een straal is dat de impuls die de straal in de instroomopening heeft behouden blijft. In § 2.3.2 is dit reeds besproken. Door impulsoverdracht naar het omliggende water neemt de snelheid in de as af. De afname van de snelheid in de as en de vorming van een menglaag zijn weergegeven in figuur 2-4.

De afname van de snelheid in de as van de straal kan uit de meetresultaten worden verkregen. Figuur 6-11 geeft het snelheidsverloop in de as van de straal weer. De weergegeven snelheid is de resultante van de gemiddelde snelheden in de x- en y-richting. De meetgegevens in de figuur zijn weergegeven op de diepte waar de snelheden maximaal zijn. De y-waarden zijn aangegeven ten opzichte van de as van de straal. Een positieve y-waarde duidt op een oorspronkelijke y-waarde die groter is dan de waarde in de as.

Figuur 6-11:
snelheids-
verloop in
de straal



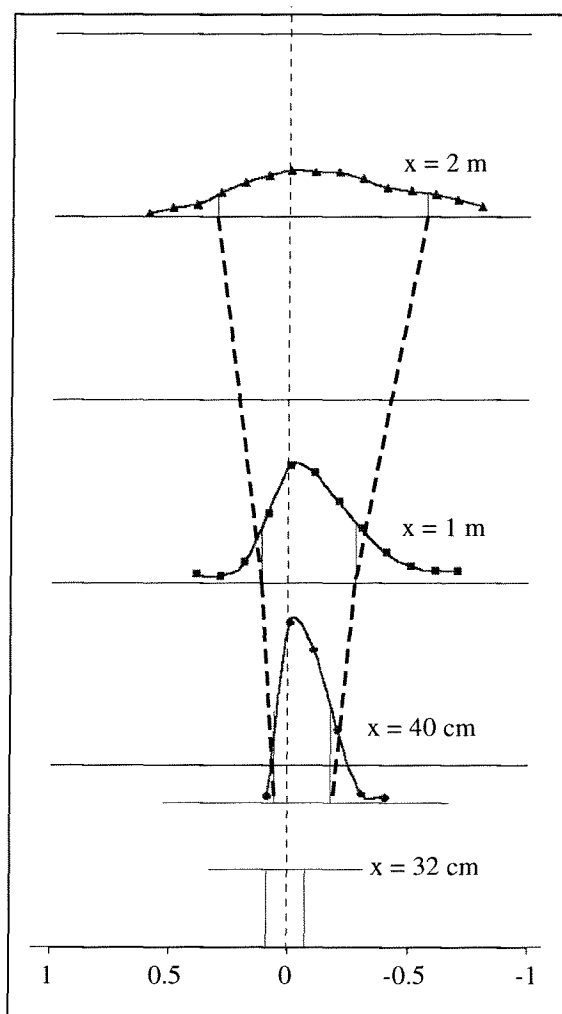
De maximale snelheid in de straal, bij een afstand van 40 cm uit de wand, bedraagt 49 cm/s. Op een afstand van 2 m van de instroomopening is de maximale stroomsnelheid in de straal afgenomen tot 13 cm/s. In het profiel met $x = 2$ m is de maximale stroomsnelheid 27 % van de maximale stroomsnelheid bij $x = 40$ cm.

De in figuur 6-11 afgebeelde snelheden zijn niet met een gelijk instroomdebiet gemeten. Zoals reeds in het begin van deze paragraaf is besproken, was de maximale snelheid vlak voor de instroomopening op de eerste meetdag 85 % van de maximale snelheden op de andere meetdagen. Als het instroomdebiet op de eerste dag gelijk zou zijn aan het instroomdebiet op de andere dagen, zou de maximale snelheid in de straal 0,58 m/s hebben bedragen. Deze snelheid is gelijk aan de op de andere meetdagen gemeten snelheid vlak voor de instroomopening.

Vanwege de niet-haakse ligging van de raaien ten opzichte van de straalas is het snelheidsverloop in de raaien niet symmetrisch.

In figuur 6-11 is te zien dat de straal, bij een toename van de afstand tot de instroomopening, breder wordt. In figuur 6-12 zijn de isolijnen van maximale snelheid nogmaals weergegeven. De as van de straal is met een dunne stippellijn weergegeven. De twee dikke stippellijnen geven aan waar de snelheid de helft van de snelheid in de as is.

Figuur 6-12:
verbreiding van
de straal

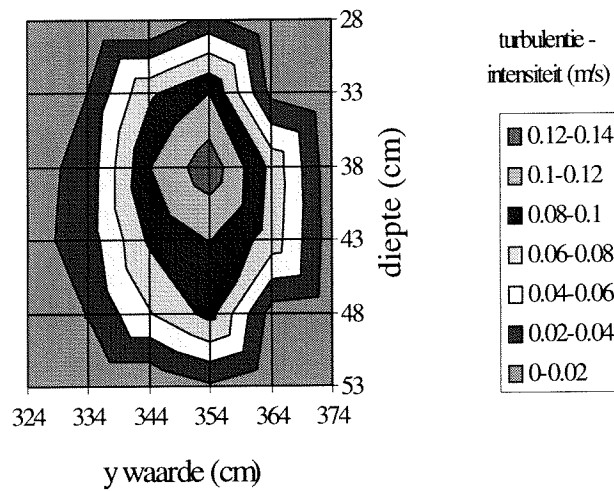


Het snelheidsprofiel vlak voor de instroomopening heeft een geringe breedte. De breedte van de straal waarin de snelheid meer dan de helft van de maximale snelheid bedraagt 22 cm. De breedte waarin de straalsnelheid gehalveerd is, op een afstand van 2 m van de instroomopening, bedraagt 90 cm. Uit beide genoemde breedtes, waarin de straalsnelheid met de helft afneemt, kan de verspreidingshoek van de straal worden berekend. Deze verspreidingshoek van de straal, tussen het profiel met $x = 40$ cm en het profiel met $x = 2$ m, bedraagt 24° .

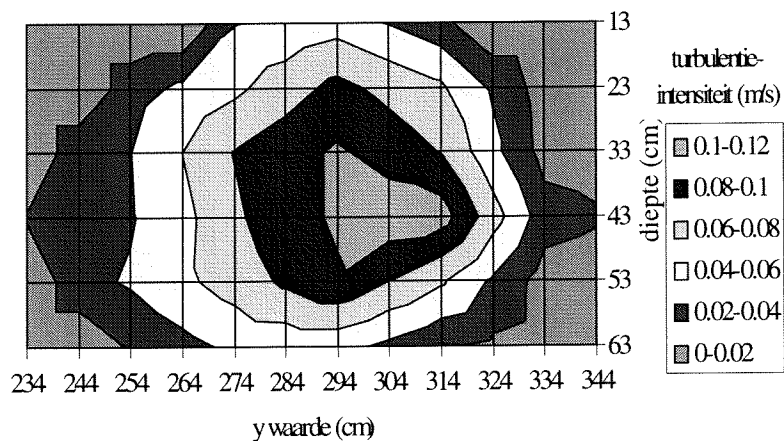
isolijnen turbulentie-intensiteit

Naast de isolijnen van gemiddelde snelheid kunnen, uit de metingen met de Elektromagnetische snelheidsmeter, ook isolijnen worden gemaakt waarin de berekende turbulentie-intensiteiten afgebeeld kunnen worden. Deze turbulentie-intensiteiten worden direct uit de meetserie in een meetpunt berekend. In de figuren 6-13 t/m 6-16 is het verloop van de turbulentie-intensiteit op de diverse meetpunten in een raai te zien. De diepte is gegeven ten opzichte van het wateroppervlak

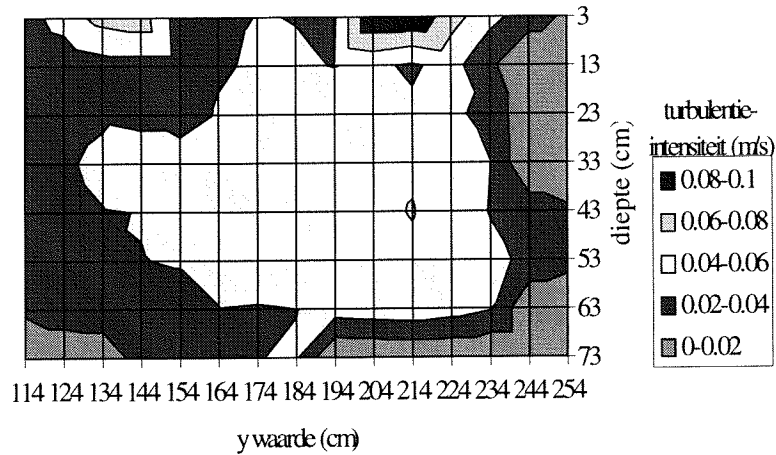
Figuur 6-13:
turbulentie-
intensiteit
x = 40 cm



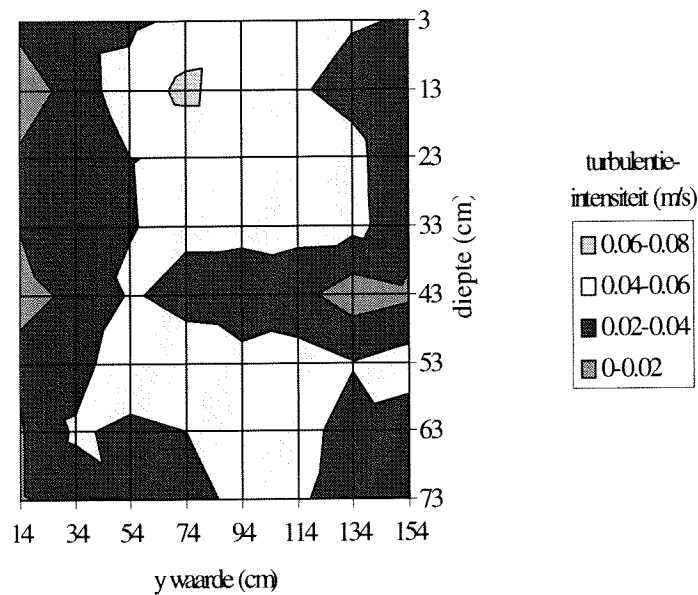
Figuur 6-14:
turbulentie-
intensiteit
x = 1 m



Figuur 6-15:
turbulentie-
intensiteit
x = 2 m



figuur 6-16:
turbulentie-
intensiteit
x = 3 m

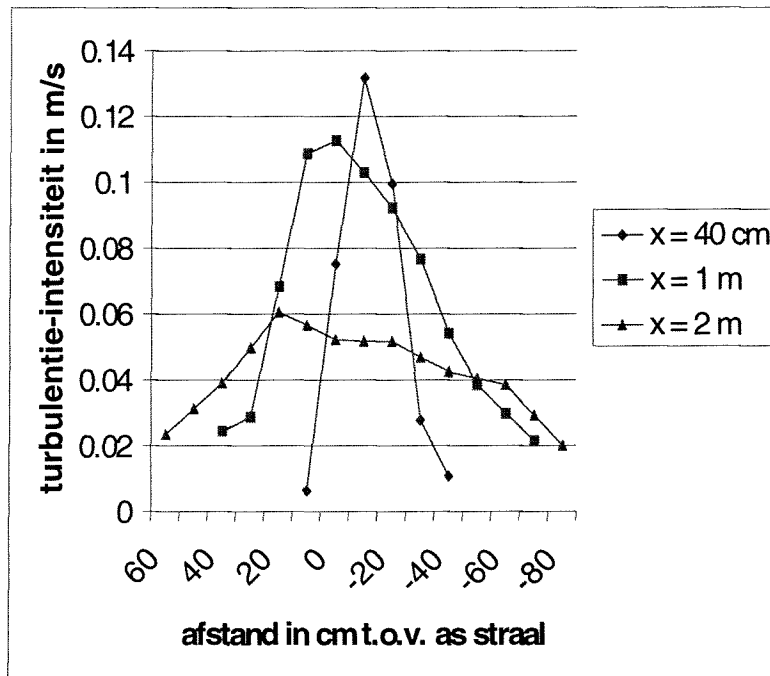


De figuren 6-13 t/m 6-16 lijken op het eerste gezicht op de isolijnen in figuren 6-7 t/m 6-10. De afgebeelde turbulentie-intensiteiten komen voort uit dezelfde meetseries als de isolijnen van gemiddelde snelheid. In meetpunten waar de gemiddelde snelheid hoog is, is tevens de turbulentie-intensiteit hoog. De asymmetrie in de isolijnen van de turbulentie-intensiteit is minder dan de asymmetrie in de isolijnen van de gemiddelde snelheid.

De afname van de turbulentie-intensiteit in de drie eerste raaien kan uit de meetresultaten worden verkregen. Op een soortgelijke wijze als in figuur 6-11 kan het verloop van de turbulentie-intensiteit worden weergegeven. In figuur 6-17 is het resultaat van deze bewerking weergegeven.

Figuur 6-17:

verloop van
turbulentie-
intensiteit in
de straal



In figuur 6-17 is de afname te zien van de turbulentie-intensiteit naarmate de gemeten raai verder verwijderd is van de instroomopening. De maximale turbulentie-intensiteit in de straal, bij een afstand van 40 cm uit de wand, bedraagt 13 cm/s. Op een afstand van 2 m van de instroomopening is de maximale turbulentie-intensiteit in de straal afgenomen tot 6 cm/s.

Het verloop van de turbulentie-intensiteit kan worden vergeleken met het verloop van de gemiddelde snelheden, afgebeeld in figuur 6-11. De snelheid, als functie van de afstand tot de instroomopening, neemt sneller af dan de turbulentie-intensiteit. In het profiel met $x = 2$ m is de maximale turbulentie-intensiteit 46% van de maximale turbulentie-intensiteit bij $x = 40$ cm, terwijl dit percentage 27% bedraagt in het geval van gemiddelde snelheden.

Bij het bestuderen van figuur 6-17 moet ermee rekening gehouden worden dat de instroomdebieten op de verschillende meetdagen niet precies gelijk waren. Zoals al eerder in deze paragraaf is vermeld was het debiet op de eerste meetdag 85 % van het debiet op de andere meetdagen. Tevens moet ermee rekening gehouden worden dat, vanwege de niet-haakse ligging van de raaien ten opzichte van de straalas, het snelheidsverloop in de raaien niet symmetrisch is.

6.3 Vergelijking resultaten beide meetmethoden

In § 6.1 zijn de resultaten van de oppervlaktestromingsmeting behandeld. In § 6.2 zijn de resultaten meting nabij een van de instroomopeningen behandeld. In deze paragraaf worden de resultaten van de beide meetmethoden met elkaar vergeleken.

6.3.1 oppervlaktemeting met Elektromagnetische snelheidsmeter

Om de twee meetmethoden met elkaar te vergelijken zijn metingen verricht in hetzelfde punt, in een gelijke toestand. Met de Elektromagnetische snelheidsmeter is tot een afstand van 3 m uit de zijwand gemeten. De laatste raai, die zich 3 m uit de zijwand bevindt, kan zoals is vermeld in § 6.2 niet als realistisch beschouwd worden.

In de raai waar $x = 2$ m zijn op een diepte van 3 cm twee metingen uitgevoerd. De meetpunten, bij $y = 154$ cm en $y = 194$ cm, zijn te zien in de afbeelding in figuur 6-9. De gemiddelde snelheid in figuur 6-9 bedraagt 7 cm/s bij $y = 154$ cm en 4,5 cm/s bij $y = 194$ cm.

6.3.2 oppervlaktemeting met Particle Tracking Velocimetry

Uit de Particle Tracking Velocimetry-meting kan geen informatie worden verkregen van de stroomsnelheden direct bij de instroomopening, waar met de Elektromagnetische snelheidsmeter metingen zijn verricht. De reden van het gebrek aan informatie aldaar komt omdat het camerazicht op het bassin wordt belemmerd door plantenbladeren.

In de buurt van de meetpunten waar met de Elektromagnetische snelheidsmeter oppervlaktesnelheden zijn gemeten, ($x = 2$ m, $y = 154$ en 194 cm) zijn enkele snelheidsvectoren bekend. Dit is te zien in het ongestructureerde veld in figuur 6-2. Deze waarden kunnen uit data-analyse worden verkregen of met het oog uit figuren 6-2 en 6-3 worden geschat. De vectoren in de buurt van de meetpunten van de Elektromagnetische snelheidsmeter hebben waarden tussen de 4 cm/s en 8 cm/s.

6.3.3 conclusie

De gemeten snelheid met de Elektromagnetische snelheidsmeter, op twee punten dicht bij de oppervlakte, heeft dezelfde orde grootte als de oppervlaktemetingen met Particle Tracking Velocimetry-methode.

6.4 Analyse van de stroming

In de voorgaande paragrafen van hoofdstuk 6 zijn vooral de meetresultaten gepresenteerd en geanalyseerd. Deze paragraaf behandelt de stroming zoals deze in het bassin optreedt. Bij de analyse van de stroming zal echter wel rekening gehouden moeten worden met de meetfouten in de meetresultaten.

6.4.1 opsplitsing in twee stroomsituaties

Om de grote structuren in het bassin te analyseren kan gebruik worden gemaakt van het gestructureerde overzicht van de oppervlaktesnelheden in figuur 6-4. Deze oppervlaktesnelheden zijn alle met de Particle Tracking Velocimetry-methode verkregen.

Bij het bestuderen van figuur 6-4 moet rekening gehouden worden met het fluctuerende debiet bij de instroomopening, die in figuur 3-2 met ③ is aangeduid. De eerste meetdag, waarin de eerste helft van de meetwaarden is verkregen, werden er af en toe veel luchtbellens meegevoerd met het water uit instroomopening ③. Deze luchtbellens veroorzaken een oppervlaktestroming die een grote invloed heeft op het globale stroombeeld. De tweede meetdag, waarop het gebied met $x > 7$ m is gemeten, was de oppervlaktestroming veroorzaakt door de luchtbellens de gehele dag merkbaar.

Door de fluctuerende oppervlakte-stroming nabij instroomopening ③ zijn meerdere stromingsconfiguraties mogelijk. Het gemeten stroombeeld kan in 2 situaties worden gesplitst: een situatie waarin er geen, door luchtbellens veroorzaakte, oppervlaktestroming bij ③ optreedt, en een situatie waarin er continu luchtbelangedreven oppervlaktestroming bij ③ optreedt.

6.4.2 stroomsituatie 1

In de eerste situatie, zonder luchtbelangedreven oppervlaktestroming, wordt het globale stroombeeld vooral bepaald door één instroomopening. De instroomopening is in figuur 3-2 met ⑤ aangeduid. In figuur 6-4 is te zien dat de straal een kleine recirculatie aandrijft, dicht bij de oorsprong. De straal raakt de wand bij $x = 3,5$ m en geeft snelheden langs de wand in positieve x-richting.

Vanaf $x = 7$ m is er geen meetinformatie van deze stroomsituatie bekend: de tweede meetdag was de oppervlaktestroming veroorzaakt door de luchtbellen de gehele dag aanwezig. Waarschijnlijk zet de stroming langs de zijwand door; er is geen reden om aan te nemen dat de snelheden plotseling sterk veranderen. De invloed van de instroomopening, in figuur 3-2 aangeduid met ④, is niet zichtbaar in het gebied met $0 \text{ m} < x < 7 \text{ m}$. De relatief grote snelheden in de buurt van coördinaat (5 m, 4 m) worden veroorzaakt door een tijdelijke aanwezigheid van luchtbel-aangedreven oppervlaktestroming door instroomopening ③.

6.4.3 stroomsituatie 2

In de tweede situatie, met luchtbel-aangedreven oppervlaktestroming, wordt het stroombeeld bepaald door instroom uit de, in figuur 3-2 aangeduide, openingen ③, ④ en ⑤. Het is niet mogelijk onderscheid te maken tussen de oppervlaktesnelheden veroorzaakt door instroomopeningen ③ en ④, omdat zij vlak bij elkaar geïmponeerd zijn. Instroomopeningen ③ en ④ veroorzaken een uitwaaiende oppervlaktestroming. Deze uitwaaiende stroming wordt veroorzaakt door de meegevoerde luchtbellen uit instroomopening ③. De luchtbellen gaan na instroom naar het wateroppervlak waardoor een opwaartse waterstroming ontstaat die uitwaaiert over het oppervlak.

Door de instroom bij ③ en ④ ontstaan oppervlaktesnelheden achter het eiland langs in negatieve x-richting. De aanwezige snelheden in stroomsituatie 1 langs de zijwand, veroorzaakt door de instroom bij ⑤, worden in stroomsituatie 2 deels opgeheven door de oppervlaktestroming van ③ en ④.

6.4.4 bijzondere stroomsituaties voor dieren

invloed van eiland

In de 'schaduw' van het eiland is vooral de invloed van instroomopening ⑤ merkbaar. Een meter verder in x-richting is een duidelijke invloed van ③ en ④ op de oppervlaktestroming aanwezig. Deze abrupte verandering in stroomsnelheden kan een oorzaak zijn van het botsen van de haaien met de wand. Ook waar de straal, veroorzaakt door instroomopening ⑤, de wand raakt krijgen de dieren een verplaatsing naar de zijwand. Uit observaties zal onderzocht moeten worden of de situaties werkelijk storend zijn voor de dieren.

dode zones

Uit het globale stroombeeld valt niet op te merken dat er 'dode zones' aanwezig zijn. Het globale stroombeeld is echter alleen aan de oppervlakte bepaald.

Het volume water in het haaienbassin bedraagt ongeveer 120 m^3 . Het gemeten debiet voor de instroomopening, die in figuur 3-2 met een ⑤ is aangeduid, bedraagt 37 m^3 per uur. Wanneer er vanuit wordt gegaan dat slechts instroom plaatsvindt bij ④ en ⑤ én dat de instroom uit beide openingen gelijk is, bedraagt het inkomend debiet 74 m^3 per uur. Op deze wijze wordt de complete bassinhoud iedere 100 minuten volledig ververs.

Een kortsluitstroming is een stroming waarbij het water vanuit een instroompunt direct in een uitstroompunt stroomt. Hierbij is de impulsoverdracht met het omringende water beperkt waardoor een straal in mindere mate bijdraagt aan een grootschalige watercirculatie. Door kortsluitstromingen kunnen 'dode' zones ontstaan wanneer water slechts plaatselijk ververs wordt.

Wanneer er vanuit wordt gegaan dat elk waterdeeltje één keer de volledige omtrek van het bassin aflegt voordat het door een uitstroomopening gaat, bedraagt de afgelegde weg van dat deeltje ongeveer 40 m. Bij een verversingsduur van 100 minuten is de gemiddelde snelheid van het deeltje 7 mm/s. Wanneer uit metingen of waarnemingen blijkt dat de gemiddelde snelheid veel lager is dan deze 7 mm/s is de kans op een kortsluitstroming groot. Dit is niet het geval in het bassin in de Amazonehal.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Geschiktheid meettechnieken

Bij de meting van snelheden in het huidige haaienbassin in Diergaarde Blijdorp zijn de gemiddelde oppervlaktesnelheden gemeten met de Particle Tracking Velocimetry methode. Uit de oppervlaktesnelheden kan het globale stroombeeld in het bassin worden verkregen. Met een Elektromagnetische snelheidsmeter zijn in een aantal - in figuur 5-12 aangegeven - raaien meetseries verkregen. Uit deze meetseries kunnen zowel gemiddelde snelheden als turbulentie-intensiteiten worden verkregen. In deze paragraaf wordt de geschiktheid van beide meettechnieken behandeld.

7.1.1 geschiktheid ten aanzien van snelheidsmetingen

Eén van de doelen, die in § 1.3.3 zijn geformuleerd, is het bepalen van stroombeeld in het huidige haaienbassin. De te bepalen grootheden, zoals in § 3.1 vermeld, zijn: gemiddelde snelheden, turbulentie-intensiteit en het globale stroombeeld.

gemiddelde snelheid

Met beide gebruikte meetmethoden kan de gemiddelde snelheid van het water in het bassin bepaald worden. Met de Particle Tracking Velocimetry-methode kunnen in één uur de oppervlaktesnelheden worden bepaald in een gebied van 2,5 bij 6 m. De Particle Tracking Velocimetry-methode kan niet worden gebruikt voor het meten van gemiddelde snelheden anders dan aan het oppervlak. Om de meetresultaten betrouwbaarder te maken wordt ensemble-middeling toegepast.

Voor snelheidsmetingen tot een diepte van 1 m kan de Elektromagnetische snelheidsmeter worden gebruikt. Deze snelheidsmeter heeft per meetpunt enkele minuten nodig om de gemiddelde snelheden nauwkeurig te bepalen. Voor grotere diepte dient de EMS verlengd te worden.

Uit vergelijkingen van de gemiddelde oppervlakte-snelheden, gemaakt in § 6.3, kan geconcludeerd worden dat beide meetmethoden vergelijkbare meetresultaten geven. Met de Elektromagnetische snelheidsmeter zijn echter meer nauwkeurige meetresultaten te verkrijgen dan met de Particle Tracking Velocimetry-methode.

turbulentie-intensiteiten

Turbulentie-intensiteiten zijn het eenvoudigst te bepalen met de Elektromagnetische snelheidsmeter. Bij de meting is een vaste positie en een meettijd van minstens vier minuten nodig om de turbulentie-intensiteit nauwkeurig te bepalen.

De meetruis van de snelheidsmeter, gemeten in stilstaand water, bedraagt ongeveer 3 mm/s. Deze waarde van de meetruis is zowel uit proefmetingen in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica als uit metingen in Diergaarde Blijdorp verkregen. Bij metingen in meetpunten waar een lage mate aan turbulentie aanwezig is kan de meetruis een rol gaan spelen. In de gemeten punten in het haaienbassin is een dermate hoge mate van turbulentie aanwezig dat de meetruis te verwaarlozen is.

globaal stroombeeld

Met beide gebruikte meetmethoden kan het globale stroombeeld worden bepaald, omdat met beide methoden gemiddelde snelheden kunnen worden verkregen. Om echter met een Elektromagnetische snelheidsmeter in het gehele bassin meetinformatie te verkrijgen van de gemiddelde snelheid, zijn veel meetpunten nodig. Wanneer zoals in figuur 6-4 aan het oppervlak om de 30 cm snelheidsvectoren bekend moeten zijn, zijn in totaal ongeveer 800 meetpunten nodig. Bij een meetduur per meetpunt van 4 minuten is meer dan 53 uur nodig om de gemiddelde oppervlaktesnelheden te meten. Dit is bijna 9 maal zo lang als de tijd waarin met de Particle Tracking Velocimetry-methode de oppervlaktesnelheden zijn gemeten.

7.1.2 geschiktheid ten aanzien van modellering

Een doelstelling op lange termijn, zoals genoemd in § 1.3.3, is: het kunnen voorspellen van het stroombeeld voor nieuw te bouwen bassins aan de hand van modellering. Hiervoor zijn metingen in het huidige haaienbassin verricht die uitgangspunt kunnen zijn voor een modellering van het Oceanium en eventueel andere bassins. In § 2.4.3 wordt het belang van metingen voor de betrouwbaarheid van een model benadrukt.

Het globale stroombeeld, dat ontstaat als resultaat van een modellering, kan worden vergeleken met het in figuur 6-4 en figuur 6-5 afgebeelde globale stroombeeld. Wanneer het gemodelleerde stroombeeld, figuur 2-6, vergeleken wordt met het gemeten stroombeeld, figuur 6-4, is te zien dat de stroombeelden in de buurt van instroomopening ⑤ overeenkomen. Het model is te eenvoudig van opzet om een verdere vergelijking van de stroombeelden te kunnen maken.

Aan moeilijk te bepalen grootheden zoals de turbulente viscositeit kan, door het vergelijken van een gemodelleerd met een gemeten stroombeeld, een redelijke waarde worden toegekend.

Het globale stroombeeld in de figuren 6-4 en 6-5 is geheel verkregen uit metingen met de Particle Tracking Velocimetry methode. Bij het vergelijken van een modelleringsresultaat met afbeeldingen uit dit rapport moet rekening gehouden worden met de aanwezige foutenbronnen. In § 6.1.2 zijn de foutenbronnen en hun uitwerkingen behandeld.

In § 2.4.3 wordt geconcludeerd dat 'een goede modellering van de instroomopeningen van groot belang is voor de betrouwbare weergave van de stroming in het bassin. Om deze instromingen goed te kunnen modelleren is informatie nodig over de werkelijke stroming in het bassin. Deze kan uit snelheidsmetingen worden verkregen'. Met de Elektromagnetische snelheidsmeter zijn in de straal achter de instroomopening, die in figuur 3-2 met ⑤ is aangeduid, snelheden gemeten. Op verschillende diepten zijn gemiddelde snelheden en turbulentie-intensiteiten bepaald. De, in § 6.2 afgebeelde, profielen van gemiddelde snelheden en turbulentie-intensiteit kunnen worden vergeleken met de resultaten van een modellering. De modellering van instroompunt ⑤ moet zó zijn dat achter het instroompunt een stroomsituatie ontstaat zoals is gemeten in het bassin.

7.1.3 geschiktheid ten aanzien van biologie

In § 1.3.2 wordt als randvoorwaarde van vermeld dat de dieren in het huidige haaienbassin geen schade mogen ondervinden van de snelheidsmetingen. Wanneer in de toekomst besloten wordt om metingen te verrichten in andere bassins geldt vanzelfsprekend dat ook de aldaar aanwezige dieren geen schade mogen ondervinden van metingen.

Bij de meting van de oppervlaktesnelheden met de Particle Tracking Velocimetry-methode zijn sinaasappels als drijvers gebruikt. De haaien die vooral dicht bij de bodem zwemmen reageren niet op de drijvers, zelfs niet wanneer deze met een schepnet worden aangebracht. Pas wanneer drijvers worden ingeworpen geven de haaien een schrikreactie. Met een schepnet is het gehele wateroppervlak bereikbaar zodat de haaien niet gestoord hoeven te worden. De aanwezige zeeschildpadden tonen slechts sporadisch interesse in de drijvers.

Tijdens de metingen met de Elektromagnetische snelheidsmeter wordt de meetprobe op verschillende dieptes onder water geplaatst. De haaien tonen geen reactie op de meetprobe; de dieren zwemmen ongestoord langs de probe. De haaien reageren niet op het door de snelheidsmeter veroorzaakte magnetisch veld. De zeeschildpadden tonen echter wel nieuwgierigheid voor het object in het water door in de probe te willen happen. Na een aantal corrigerende tikken bleven de zeeschildpadden uit de buurt van de meetprobe.

7.1.4 overzicht voor- en nadelen van gebuikte meetmethoden

Particle Tracking Velocimetry-methode

voordelen:

- in korte meettijd kan veel meetinformatie worden verzameld;
- robuuste meetmethode;
- afwijkingen in meetresultaten terug te vinden in videobeelden;

nadelen:

- door korte meettijd minder betrouwbare resultaten;
- alleen oppervlaktesnelheden meetbaar;
- turbulentie-intensiteit is niet meetbaar;
- vrij camerazicht is op het wateroppervlak noodzakelijk;

Elektromagnetische snelheidsmeter

voordelen:

- geschikt voor bepalen van turbulentie-intensiteiten;
- metingen op diepten tot 1 m mogelijk, door aanpassing van het instrument geschikt te maken voor grotere diepten;
- nauwkeurige methode;

nadelen:

- per meetpunt enkele minuten meettijd nodig;
- gevaar voor beschadiging probe door aanwezige dieren.

7.1.5 voordeel van gecombineerde meting

Het grote voordeel van een combinatie van twee meetmethoden is dat de methoden elkaar aanvullen. In een te meten situatie kunnen eerst met de Particle Tracking Velocimetry-methode oppervlaktesnelheden gemeten worden. Zo wordt in korte tijd een overzicht verkregen van het globale stroombeeld. Vervolgens kan op plaatsen waar aanvullende informatie is gewenst met de Elektromagnetische snelheidsmeter gemeten worden. Nauwkeurige waarden van snelheden en turbulentie-intensiteit kunnen uit deze meting worden bepaald.

7.2 Conclusies uit het gemeten stroombeeld

7.2.1 afwezigheid van dode zones

In § 6.4 wordt vermeld dat door instationariteit in het globale stroombeeld geen eenduidig stroombeeld wordt verkregen. De instationariteit wordt veroorzaakt door een onregelmatige instroom uit de opening die in figuur 3-2 met ③ is aangeduid. Mede door de afwezigheid van een eenduidig stationair stroombeeld zijn geen ‘dode zones’ zichtbaar. Hierbij moet worden opgemerkt dat het globale stroombeeld slechts uit oppervlaktemetingen bestaat.

7.2.2 aanwezigheid van storende stroomsituaties voor dieren

Een oorzaak voor het botsen van de haaien met de wand kan liggen in het stroombeeld nabij het eiland. In figuur 6-4 is het globale stroombeeld weergegeven. Dieren, zwemmende in de positieve x-richting van het bassin, ondervinden voorbij het eiland plots invloed van instroomopeningen ③ en ④. Deze instroomopeningen veroorzaken een zijwaartse stroming naar de langswand. Mogelijk zullen de haaien daar met de zijwand in aanraking komen en verwondingen oplopen.

Een andere plaats waar de snelheden relatief groot en naar de wand zijn gericht bevindt zich nabij de instroomopening, die in figuur 3-4 met ⑤ is aangeduid. De straal achter deze opening raakt de zijwand bij $x = 3.5$ m. De naar de wand gerichte stroming kan een mogelijkerwijs botsen van de haaien met de zijwand tot gevolg hebben. Uit gedragswaarnemingen van de haaien zal nader onderzocht moeten worden of de genoemde storende situaties ook daadwerkelijk botsingen van de dieren met de zijwand tot gevolg hebben..

7.3 Aanbevelingen

7.3.1 aanbevelingen ten aanzien van stroomsituatie

Bij zowel metingen als een modellering van het haaienbassin is ervan uitgegaan dat de stroomsituatie stationair is. De onregelmatige inlaat, in figuur 3-2 met een ③ aangegeven, heeft een verstoring van het globale stroombeeld tot gevolg gehad.

Wanneer in de toekomst in het huidige haaienbassin of in een ander bassin gemeten moet worden, waarbij op verschillende tijdstippen wordt gemeten, is een stationair stroombeeld noodzakelijk om realistische meetwaarden te verkrijgen.

7.3.2 aanbevelingen ten aanzien van meettechnieken

gecombineerde methode

Het verdient, vanwege de totale meettijd, de voorkeur het globale stroombeeld te bepalen met de Particle Tracking Velocimetry-methode. Op plaatsen waar met deze methode geen of geen goede resultaten te verkrijgen zijn, door verstoring van het camerazicht op het wateroppervlak, kan met de Elektromagnetische snelheidsmeter aanvullende informatie verkregen worden.

Particle Tracking Velocimetry-methode

1. vergroting informatiedichtheid:

- door de te meten gebieden te laten overlappen kan een meetbeeld worden verkregen, waarbij randen van de meetgebieden met weinig meetinformatie niet aanwezig zijn;
- veel sinaasappels of kleinere drijvers tegelijkertijd aanbrenge in de meetgebieden;
- meerdere geselecteerde series camerabeelden samenvoegen per meetpunt;
- waar mogelijk plantenbladeren en boomtakken verwijderen of weghouden.

2. verhoging beeldkwaliteit:

- zorgen voor een zo homogeen mogelijke achtergrond met een groot kleurcontrast tussen de achtergrond en de drijvers: schijnwerpers op het bassin uitzetten, dakramen afdekken;
- bij voorkeur geen oranje dekzeilen bij oranjekleurige drijvers gebruiken om de dakramen af te dekken, de reflecties op het water geven problemen bij de filtering van de achtergrond.

Elektromagnetische snelheidsmeter

- kortere meettijd toepassen om totale meettijd zo kort mogelijk te houden, dit is een afweging meetduur ↔ nauwkeurigheid;
- op elke diepte gelijke meetafstanden aanhouden, dit vergemakkelijkt de verwerking van de meetgegevens;
- iedere dag op enkele plaatsen oppervlaktesnelheden meten om resultaten beide meetmethoden te controleren.

andere mogelijkheden

In korte tijd kan een globaal beeld van de stroming worden gevormd door kleurstof in het water aan te brengen. Hierbij moet worden gezorgd dat een kleurstof wordt gebruikt die niet schadelijk is voor de aanwezige dieren en planten.

Door onderzoek moet worden vastgesteld of met ultrageluidmetingen goede meetresultaten te verkrijgen zijn.

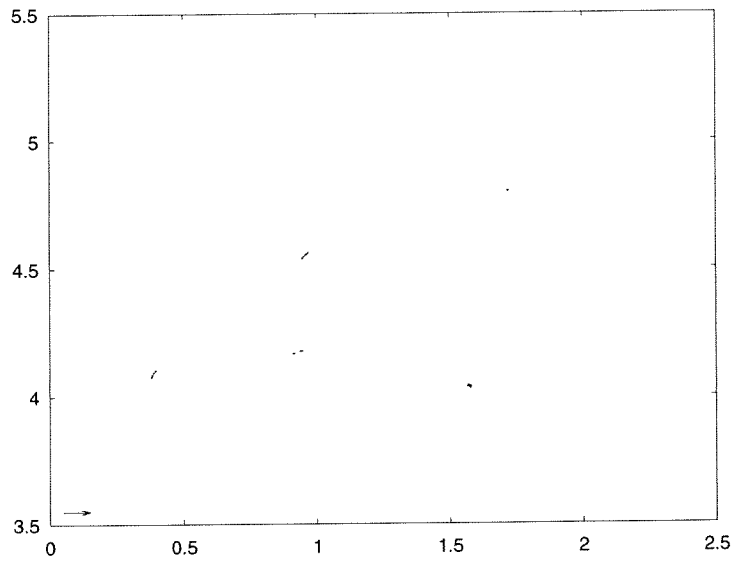
7.3.3 aanbevelingen ten aanzien van modellering

- vanwege de afwezigheid van een eenduidig stroombeeld 2 stromingssituaties modelleren: één zonder instroom bij ③ en één met instroom bij ③;
- alle in- en uitstroomopeningen invoeren in het model waarbij instroomopeningen ③, ④ en ⑤ nauwkeurig gemodelleerd moeten worden. Deze hebben grote invloed op het stroombeeld. Bij alle in- en uitstroomopeningen zijn nauwkeurige ijkwaarden nodig die uit metingen moeten worden verkregen.
- Omdat de turbulente viscositeit in het bassin niet constant is over de ruimte heeft een model waarin de turbulente viscositeit kan variëren de voorkeur.
- De instroompunten dienen gemodelleerd te worden als bron van vloeistof en impuls.

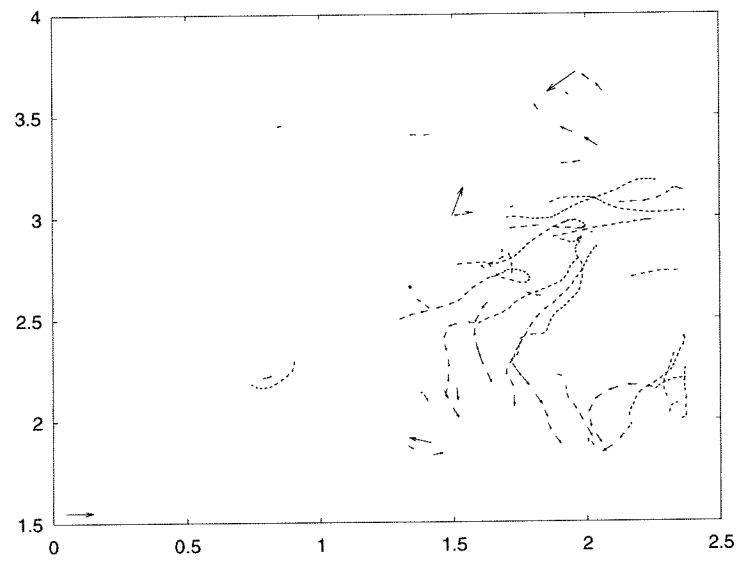
Bijlage 1: Ongestructueerde snelheidsvelden van het bassin

In deze bijlage zijn de ongestructueerde snelheidsvelden te zien als resultaat van de PTV-meting. De aangegeven cameraposities corresponderen met de nummers in figuur 5-5. De informatie die uit deze snelheidsvelden verkregen kan worden en de foutenbronnen die het resultaat beïnvloeden zijn in § 6-1 behandeld.

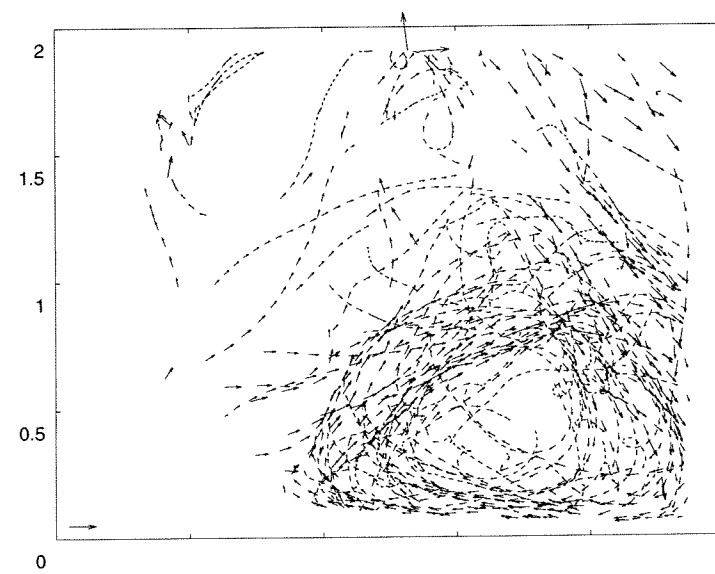
Figuur 1:
camerapositie 3



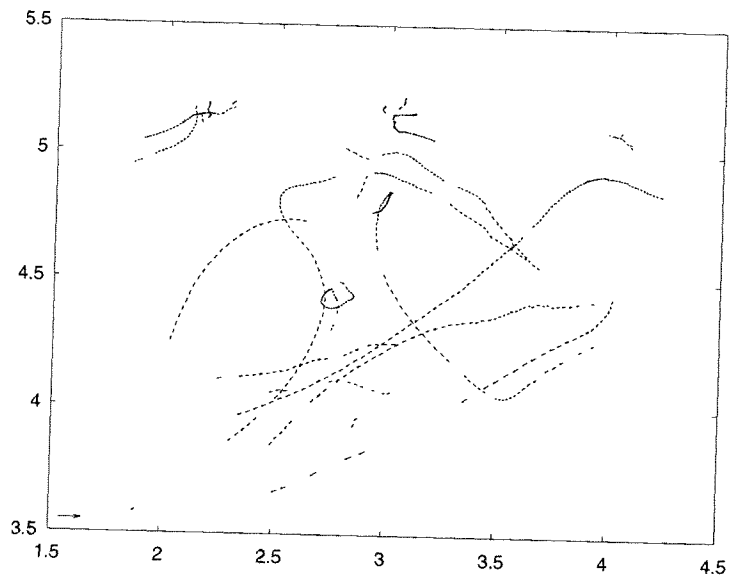
Figuur 2:
camerapositie 2



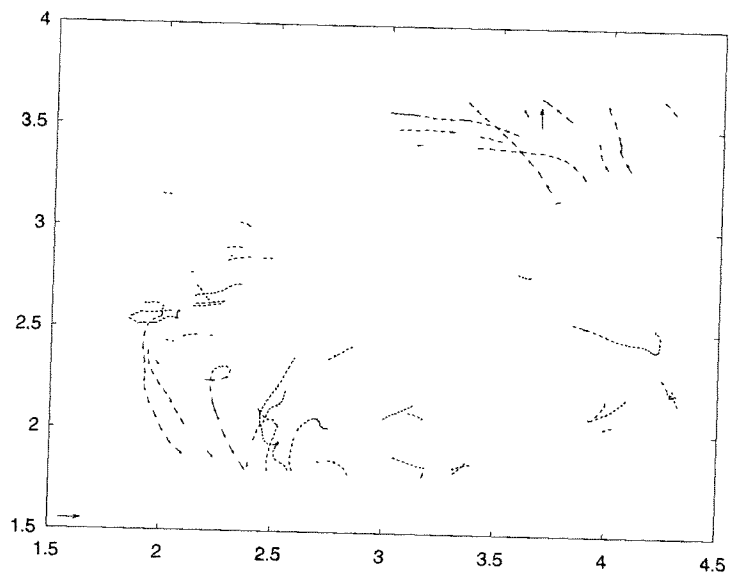
Figuur 3:
camerapositie 1



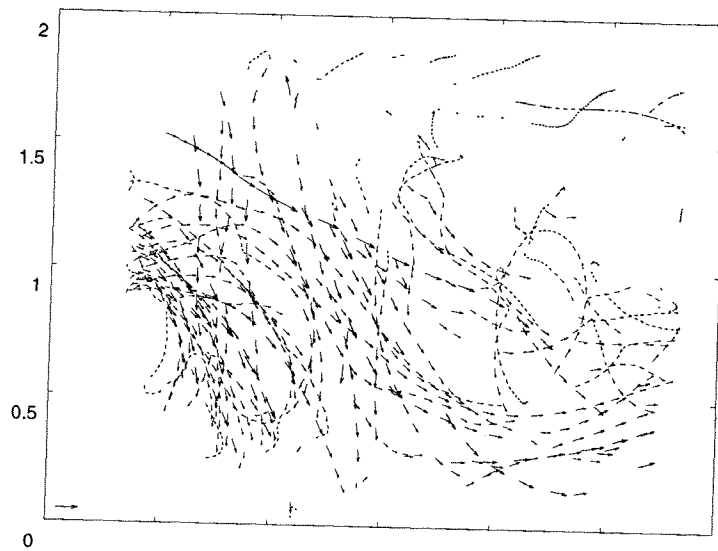
Figuur 4:
camerapositie 6



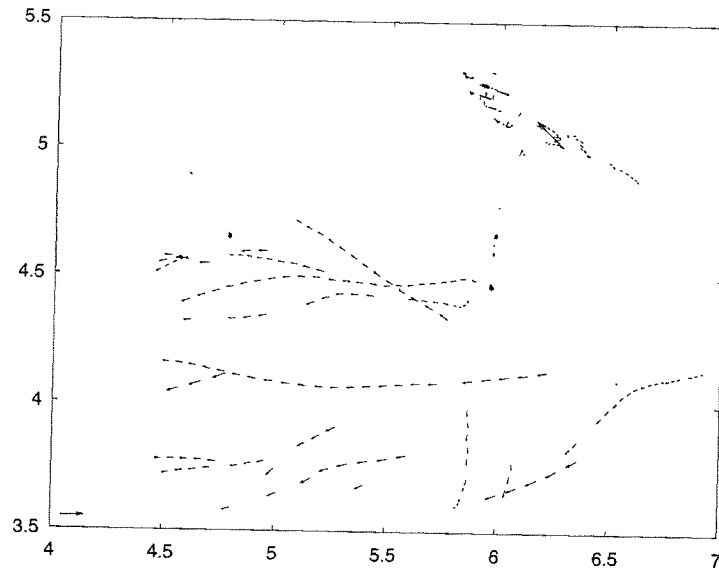
Figuur 5:
camerapositie 5



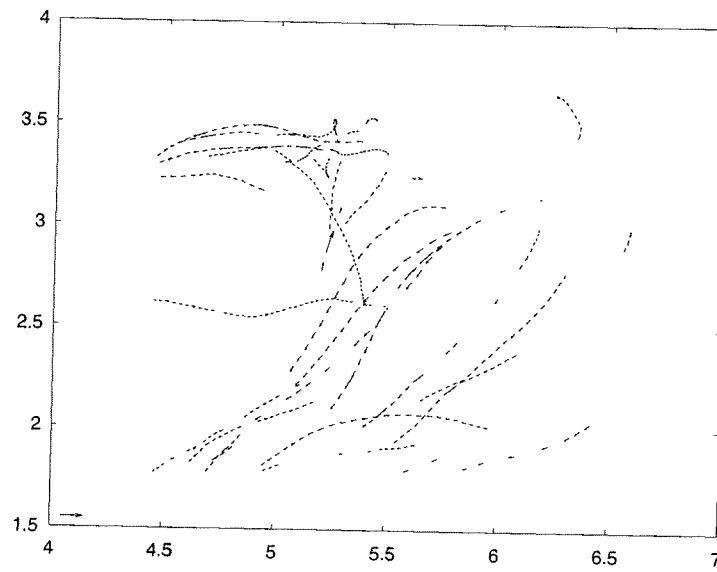
Figuur 6:
camerapositie 4



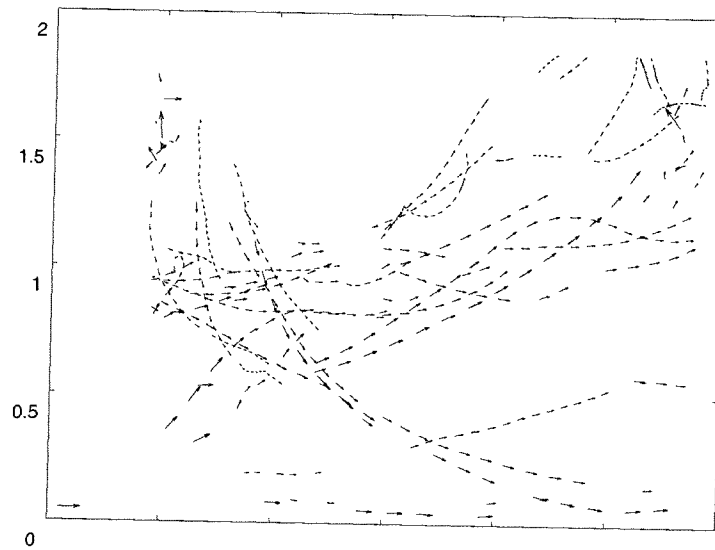
Figuur 7:
camerapositie 9



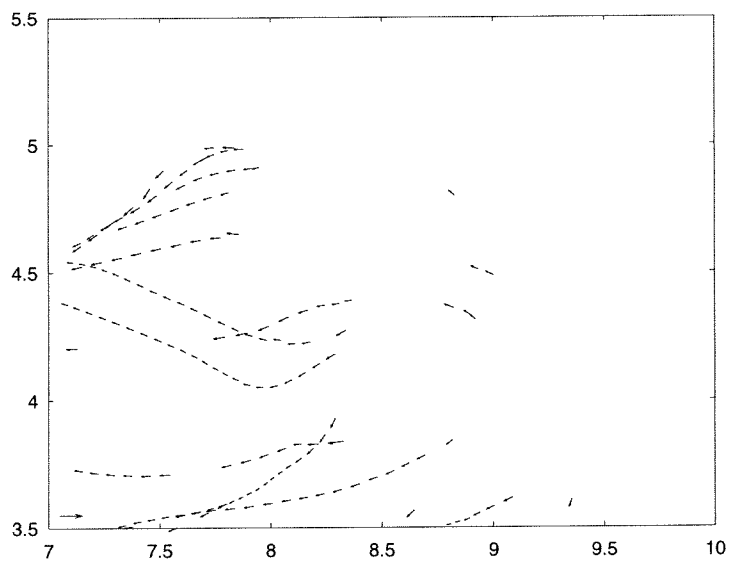
Figuur 8:
camerapositie 8



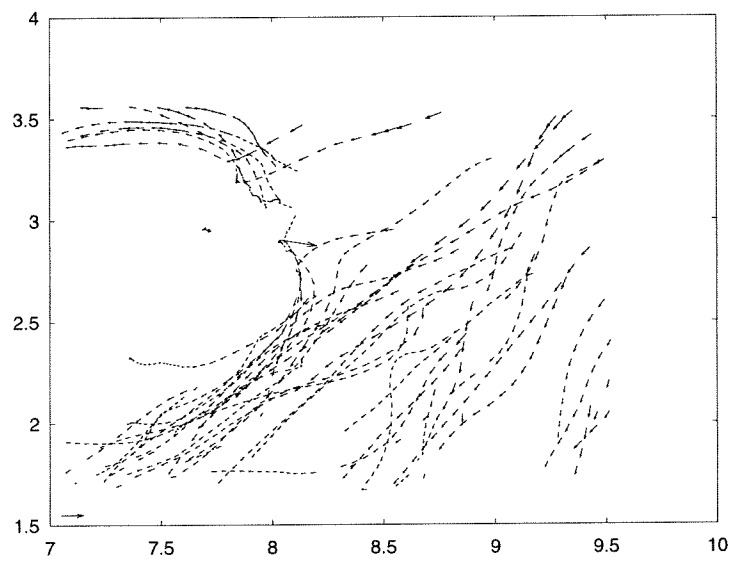
Figuur 9:
camerapositie 7



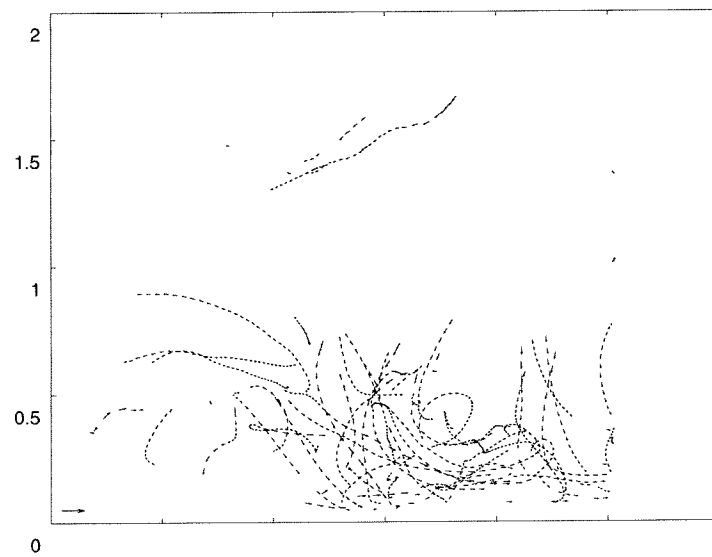
Figuur 10:
camerapositie 12



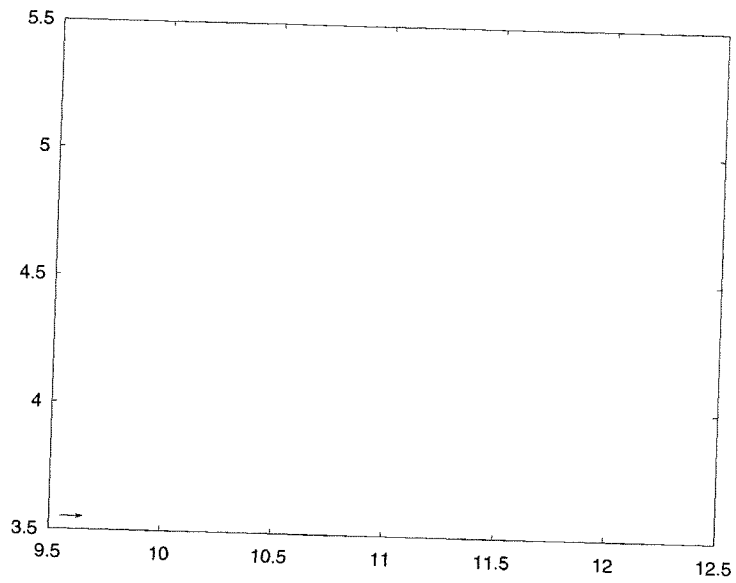
Figuur 11:
camerapositie 11



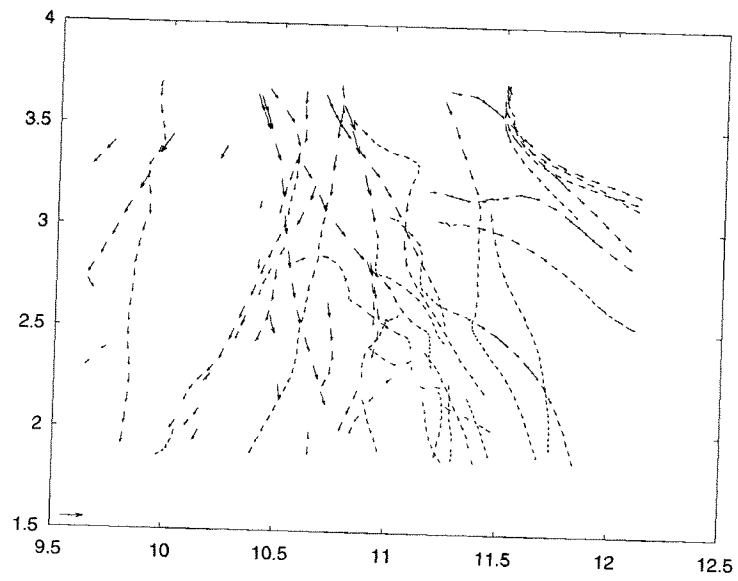
Figuur 12:
camerapositie 10



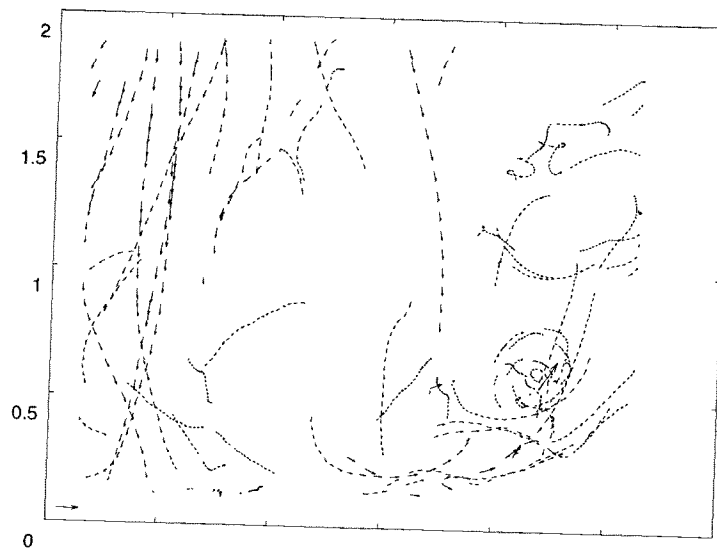
Figuur 13:
camerapositie 15



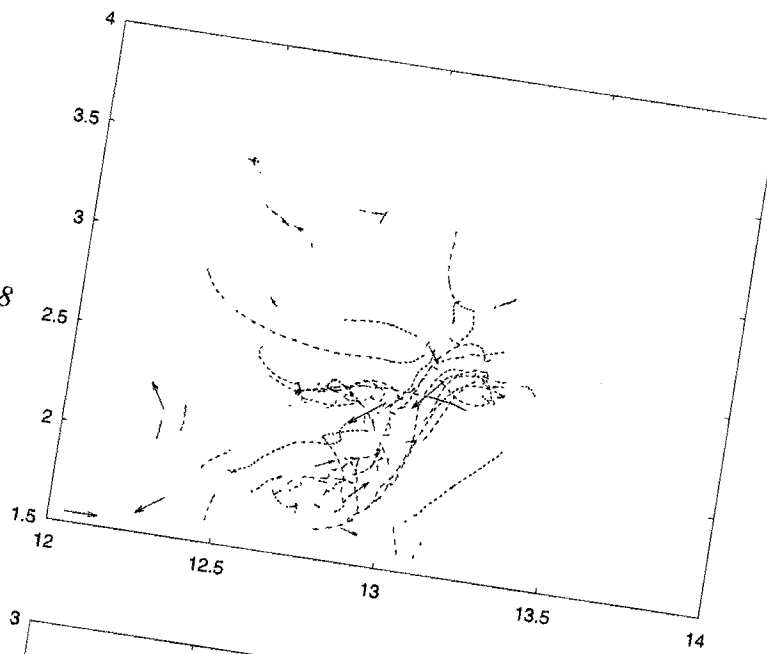
Figuur 14:
camerapositie 14



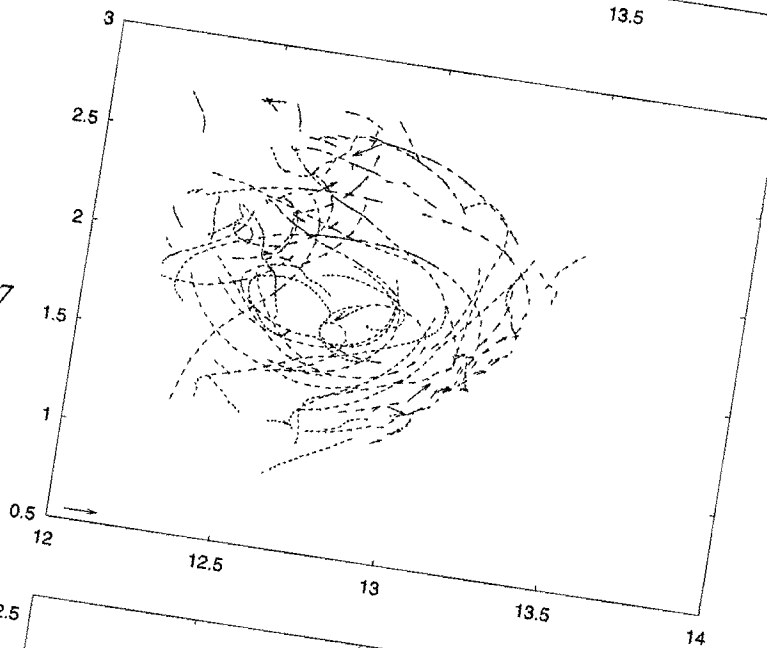
Figuur 15:
camerapositie 13



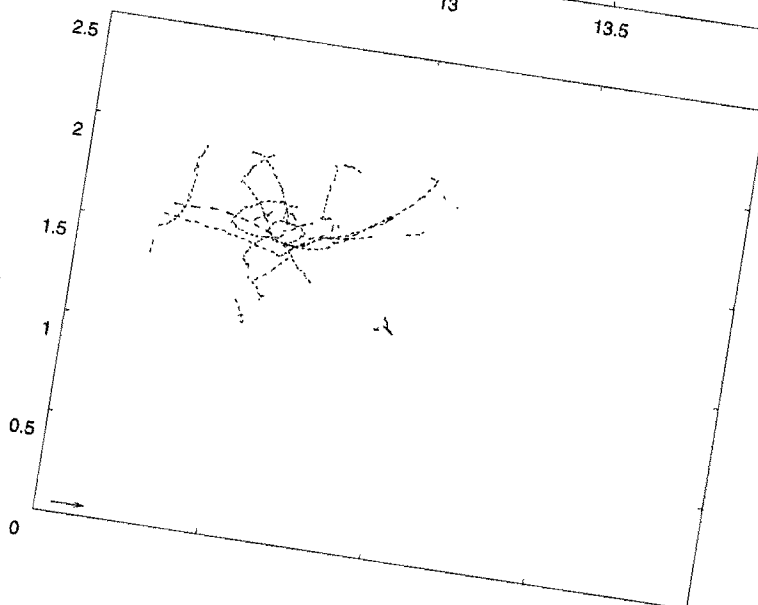
Figuur 16:
camerapositie 18



Figuur 17:
camerapositie 17



Figuur 18:
camerapositie 16



Literatuurlijst

ALONSO, M. en Finn, E. J.

1971, Fundamentele natuurkunde, deel 1: mechanica

BATTJES, J.A.

1990, Diktaat Vloeistofmechanica (B70)

BOOIJ, R.

1992, Diktaat Turbulentie in de waterloopkunde (B82)

BRADSHAW, P.

1971, An introduction to Turbulence and its Measurement

DELFT HYDRAULICS

1989, Modern laboratory techniques

GROENEBOOM, P.

1995, Diktaat Statistiek voor CT (B106)

HOLLANDERS en HOFLAND

1998, Modellerings in TRISULA van het Haaienbassin Blijdorp,
onderdeel van het practicum B85

TENNEKES, H. en LUMLEY, J. L.

1972, A first course in turbulence

VRIES, M. de

1977, Diktaat Waterloopkundig onderzoek (B80)