
Aanslibbing van een rivierhaven

Vermindering door aanpassing van de vormgeving
van jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure

S.A.H. van Schijndel
C. Kranenburg

Rapport nr. 2-97

Aanslibbing van een rivierhaven

Vermindering door aanpassing van de vormgeving
van jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure

S.A.H. van Schijndel
C. Kranenburg

Rapport nr. 2-97

1997

Sectie Vloeistofmechanica
Vakgroep Waterbouwkunde
Faculteit der Civiele Techniek
Technische Universiteit Delft

VOORWOORD

Het hier gerapporteerde speurwerk is verricht in opdracht van het WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM|WL . Het vormt onderdeel van een landelijk onderzoek, geïnitieerd door de Stichting Anti-Slib i.o., naar mogelijkheden om de aanslibbing van jachthavens en vaarwegen te verminderen.

Het speurwerk is uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek. De auteurs danken de medewerkers van dit laboratorium voor hun inzet tijdens de voorbereiding en de uitvoering van het onderzoek.

Delft, april 1997

S.A.H. van Schijndel
C. Kranenburg

SAMENVATTING

Jachthavens aan rivieren slibben steeds verder dicht. Als gevolg hiervan lopen de kosten voor het beheer van een dergelijke haven zo hoog op dat enkele havens misschien zelfs moeten sluiten. Daarom is er landelijk een onderzoek gestart om te bezien of de aanslibbing verminderd kan worden door aanpassing van de vormgeving van de haven.

Aanslibbing van een haven is afhankelijk van het uitwisselingsdebiet tussen haven en rivier. In principe komen daar drie mechanismen voor in aanmerking, te weten:

- *Het getijmechanisme*
- *Het dichtheidsmechanisme*
- *Het stromingsmechanisme*

In dit onderzoek komt alleen het stromingsmechanisme aan de orde, omdat het getij afwezig is en er verwaarloosbare dichtheidsverschillen zijn tussen water in de rivier en water in de haven. Aan de bovenstroomse zijde van de havenmond ontstaat als gevolg van wervelvorming een menglaag, die een primaire neer aandrijft in de havenmond. Deze primaire neer drijft op zijn beurt weer een secundaire neer aan in het havenbekken. Via dit systeem wordt het sedimentrijke water van de rivier de haven ingebracht, waar het bezinkt.

Om te onderzoeken of er maatregelen genomen kunnen worden om de aanslibbing in jachthavens te verminderen is een schaalmodel gebruikt van twee jachthavens aan de Maas te Roermond, 't Steel en La Bonne Aventure. Hierin zijn diverse in dit onderzoek ontwikkelde ingrepen toegepast, zoals een geleidescherm, een paalscherm en een gekromde drempel in de havenmond, en vervolgens is hun effectiviteit gemeten. Het uitgangspunt was de bestaande situatie met een gemiddelde waterstand, maar omdat de Maas nogal eens te kampen heeft met hoogwater is ook de situatie gedurende hoogwater beschouwd.

Na het vergelijken van de metingen is gebleken dat het mogelijk is om een aanzienlijke reductie in aanslibbing te bewerkstelligen. Het geleidescherm geeft een reductie van ca. 25%, het paalscherm een reductie van ca. 50%, de gekromde drempel een reductie van ca. 70% en een combinatie van het paalscherm met de gekromde drempel geeft zelfs een reductie van ca. 90%. Deze reducties gelden alleen in de niet-overstroomde situatie. Gesteld kan worden dat het zeker mogelijk is om een vermindering van aanslibbing te realiseren. Hoewel natuurlijk nog afgewacht moet worden wat de reducties in werkelijkheid zullen worden.

INHOUD

Voorwoord	<i>i</i>
Samenvatting	<i>ii</i>
Inhoudsopgave	<i>iii</i>
1 Inleiding	
1.1 Kader van het onderzoek	1
1.2 Probleemstelling	2
1.3 Doelstelling	2
2 Waterbeweging in en bij een haven	
2.1 Inleiding	3
2.2 Uitwisselingsmechanismen	3
2.3 Theorie van het stromingsmechanisme	
2.3.1 <i>Stroming in de havenmond</i>	4
2.3.2 <i>Stroming in het havenbekken</i>	5
3 Slib in een havenbekken	
3.1 Inleiding	7
3.2 Slib	7
3.3 Aanslibbing in het havenbekken	10
3.4 Vermindering van aanslibbing	12

4	<i>Jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure</i>	
4.1	Inleiding	15
4.2	Situatieschets	15
4.3	Specifieke omstandigheden 't Steel en La Bonne Aventure	16
4.4	Specifieke omstandigheden rivier de Maas	18
5	<i>Opzet experiment en apparatuur</i>	
5.1	Inleiding	21
5.2	Het schaalmodel	21
5.3	Dimensieloze parameters	24
5.4	Simulatie van de aanslibbing	24
5.5	Meetinstrumenten en meetprocedure	27
5.6	Dataverwerking	
	5.6.1 <i>Bepaling van het warmtetransport</i>	30
	5.6.2 <i>Uitwerking van de gemeten data</i>	33
5.7	Meetprogramma	35
5.8	Randvoorwaarden en aannamen schaalmodel	36
6	<i>Resultaten van de metingen</i>	
6.1	Inleiding	38
6.2	Bestaande situatie, niet overstroomd	38
6.3	Bestaande situatie, overstroomd	40
6.4	Geleidescherm in de rivier	
	6.4.1 <i>Omschrijving</i>	42
	6.4.2 <i>Resultaten</i>	44

6.5	Paalscherm in de rivier	
	6.5.1 <i>Omschrijving</i>	44
	6.5.2 <i>Resultaten</i>	45
6.6	Rechte drempel voor de havenmond	
	6.6.1 <i>Omschrijving</i>	46
	6.6.2 <i>Resultaten</i>	47
6.7	Gekromde drempel in de havenmond	
	6.7.1 <i>Omschrijving</i>	48
	6.7.2 <i>Resultaten</i>	49
6.8	Gekromde drempel met dam in havenmond	
	6.8.1 <i>Omschrijving</i>	50
	6.8.2 <i>Resultaten</i>	51
6.9	Gekromde drempel in combinatie met paalscherm op kop van ligweide	
	6.9.1 <i>Omschrijving</i>	52
	6.9.2 <i>Resultaten</i>	53
6.10	Dam op ligweide in overstroomde situatie	53
6.11	Samenvatting resultaten	55
7	Conclusies en aanbevelingen	57

Lijst van symbolen	60
Lijst van figuren	62
Lijst van tabellen	64
Literatuurlijst	65
Bijlagen	
Bijlage I	Bodemligging jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure
Bijlage II	Vervalmeter
Bijlage III	Meetprotocol
Bijlage IV	Bepalen van verloop van opwarmen in de niet-overstroomde situatie
Bijlage V	Bepalen van verloop van opwarmen in de overstroomde situatie
Bijlage VI	Transport door doorsnede A3 in niet-overstroomde situatie
Bijlage VII	Transport door doorsnede A3 in overstroomde situatie
Bijlage VIII	Dataverwerking

1 INLEIDING

1.1 KADER VAN HET ONDERZOEK

In Nederland zijn ongeveer 1200 jachthavens aangesloten bij de HISWA of het Koninklijk Nederlands Watersport Verbond (KNWV). Buiten deze havens is er nog een groot aantal havens in beheer bij particulieren en bedrijven. Om al deze havens op diepte te houden moeten ze periodiek uitgebaggerd worden, waarna het baggerslib wordt hergebruikt of gedumpt. Omdat de wetgeving aangaande het dumpen van slib steeds strenger wordt moeten speciale voorzieningen worden getroffen voor het bergen van slib. Een voorbeeld hiervan is De Slufter bij Rotterdam, waar gecontroleerd slib wordt opgeslagen. Het spreekt voor zich dat dit een dure oplossing is.

De kosten die gepaard gaan met het baggeren en het opslaan van slib worden doorgaans direct doorberekend aan de gebruikers van de jachthaven, te weten eigenaren van schepen en in een aantal gevallen bedrijven die voorzien in het onderhoud en de bouw van deze schepen. Het gevolg hiervan kan zijn dat eigenaren en ondernemers uitwijken naar andere jachthavens. In sommige gevallen dreigt zelfs sluiting van de jachthaven. Vandaar dat het van belang is, voornamelijk vanuit het oogpunt van de jachthavenbeheerder, om een meer preventieve oplossing te vinden voor het aanslibbingsprobleem in jachthavens.

Gezien het al eerder onderkende belang van vermindering van aanslibbing in grote zeehavens, is er in de afgelopen jaren veel onderzoek gedaan naar het mechanisme van uitwisseling tussen een getijrivier en een haven (Langendoen, 1992). Eerder is ook al de uitwisseling tussen rivier en haven onderzocht aan de hand van vierkante of cirkelvormige havens (Booij, 1986). Uit deze onderzoeken blijkt dat het voornaamste uitwisselingsmechanisme bij een rivier, zonder getij, bestaat uit de uitwisseling van water in een menglaag tussen rivier en haven.

In 1995 is, in opdracht van het KNWV, een verkennende studie uitgevoerd naar de ideale configuratie van jachthavens (Waterloopkundig Laboratorium, 1996a). Later, in het begin van 1996, is een landelijk onderzoek gestart in opdracht van deze organisatie in combinatie met de HISWA, met als doel het verminderen van aanslibbing in jachthavens. Er zijn al twee gevallen bekend waar gebleken is, dat verandering van vormgeving en toepassing van nieuwe oplossingen een aanzienlijke reductie in aanslibbing te weeg kunnen brengen, te weten de voorhaven van Lith en de Köhlfleethaven in Hamburg.

In het kader van dit landelijke onderzoek is reeds een studie gedaan naar het toepassen van het numerieke model TRISULA bij het bestuderen van de waterbeweging in jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure te Roermond (Gerritsen, 1996). Het programma kan in grote lijnen kwalitatief de waterbeweging in de haven simuleren. Om echter uitspraken te kunnen doen over de daadwerkelijke hoeveelheden aanslibbing moet het numerieke model nog verder ontwikkeld worden.

In het hier gerapporteerde onderzoek wordt het gedrag van het uitwisselingsmechanisme tussen rivier en haven met een fysisch model bestudeerd. Hiervoor is een schaalmodel gebruikt van twee jachthavens te Roermond, te weten 't Steel en La Bonne Aventure. In dit model is gezocht naar maatregelen ter reductie van de aanslibbing.

De resultaten van dit onderzoek worden opgenomen in een rapport van het Waterloopkundig Laboratorium in samenwerking met de Technische Universiteit Delft voor de stichting Anti-Slib. Dit rapport zal gebruikt worden om na te gaan of geometrische aanpassingen aan de havenmond economisch rendabel zijn. Een oplossing is economisch rendabel als de kosten van het ontwerp en bouw van de variant opwegen tegen de kosten die gemaakt moeten worden voor het baggerwerk als de variant niet wordt uitgevoerd. In het kader van dit project is ook een voorlichtingsfilm vervaardigd om havenmeesters duidelijk te maken wat de mogelijkheden zijn en tot wie ze zich kunnen wenden als ze vragen hebben.

1.2 PROBLEEMSTELLING

Het voortdurend dichtslibben van Nederlandse jachthavens aan rivieren maakt de havens duur in onderhoud en daardoor minder aantrekkelijk voor de pleziervaart en ondernemers. In bepaalde gevallen dreigt zelfs sluiting van de haven. Daarom wordt gezocht naar preventieve maatregelen.

1.3 DOELSTELLING

Het doel van dit onderzoek is om met behulp van een schaalmodel van de jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure te Roermond de effectiviteit van in dit onderzoek ontwikkelde ingrepen voor het verminderen van het aanslibbingsprobleem vast te stellen en om zo mogelijk hun werking te verklaren. Daarnaast moeten de generieke aspecten voor rivierhavens van deze ingrepen worden onderzocht.

2 WATERBEWEGING IN EN BIJ EEN HAVEN

2.1 INLEIDING

Om te kunnen begrijpen wat er gebeurt in het systeem van haven en rivier is enige kennis van de theorie achter de waterbeweging noodzakelijk. In dit hoofdstuk zullen drie mechanismen aan de orde komen die in het algemeen verantwoordelijk zijn voor uitwisseling tussen haven en rivier. Omdat het hier een haven aan een bovenrivier betreft wordt alleen ingegaan op de uitwisseling via de menglaag, ook wel het stromingsmechanisme genoemd. Aan de hand van dit mechanisme wordt de waterbeweging in en rond een haven besproken.

2.2 UITWISSELINGSMECHANISMEN

Het binnendringen van sediment in een haven is het gevolg van de uitwisseling tussen het water van de haven en het sedimentrijke water van de rivier. Voor deze uitwisseling komt een aantal mechanismen in aanmerking, waarvan de belangrijkste drie hieronder besproken worden. In figuur 2.1 staat een tekening om deze mechanismen te verduidelijken.

- *Het getijmechanisme:* als gevolg van de variërende waterstand is er continu, afhankelijk van het getij, een stroming in of uit de haven gericht.
- *Het dichtheidsmechanisme:* als gevolg van dichtheidsverschillen ontstaan er aan de bodem en aan het oppervlak tegengesteldgerichte stromingen.
- *Het stromingsmechanisme:* in het contactvlak tussen rivierwater en havenwater ontstaat een menglaag, die er voor zorgt dat water uit de rivier de haven instroomt en andersom.



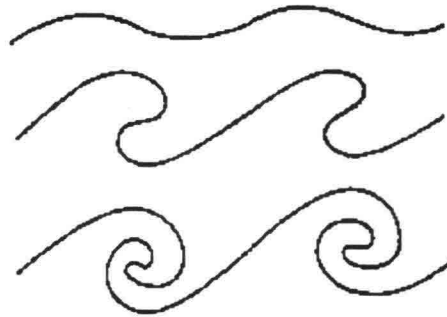
Figuur 2.1 Uitwisselingsmechanismen tussen haven en rivier

Omdat er in dit onderzoek sprake is van een bovenrivier zal het water van de rivier voornamelijk de haven inkomen via het stromingsmechanisme. Hoewel het samenkomen van sedimentrijk water van een rivier met water van een haven kan resulteren in dichtheidsstromen zal dit effect hier niet overheersen. Er wordt ook geen aandacht besteed aan de uitwisseling als gevolg van scheepsbewegingen en wind, omdat de invloed daarvan erg klein is ten opzichte van die van bovenstaande mechanismen.

2.3 THEORIE VAN HET STROMINGSMECHANISME

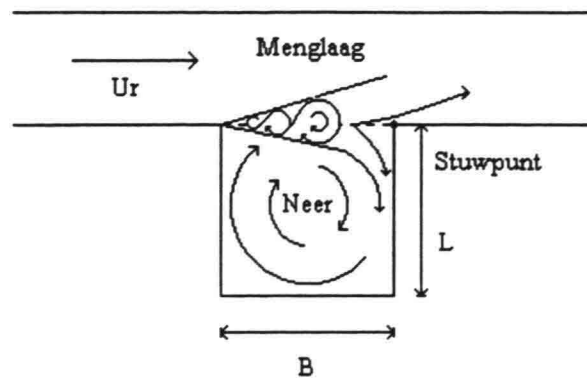
2.3.1 STROMING IN DE HAVENMOND

Op het moment dat een stroming in een rivier een plotselinge verwijding passeert, hier in de vorm van een havenmond, zal de stroming niet in staat zijn deze verwijding te volgen en zal als gevolg daarvan gaan loslaten. Er ontstaat een systeem van twee stromingen met een verschillende snelheid en daartussen een scheidingsvlak. Door de sprong in de snelheid is een dergelijk scheidingsvlak instabiel en zal de zogenaamde Kelvin-Helmholtz-instabiliteit ontstaan. In de eerste fase vormen zich als gevolg van die instabiliteit golven die uiteindelijk over gaan in wervels, zoals te zien is in figuur 2.2. Een wervel is een roterend waterpakket, dat grotere stroomsnelheden en lagere drukken in de kern combineert met lagere stroomsnelheden en hogere drukken aan de buitenkant.



Figuur 2.2 Het ontstaan van wervels in een scheidingsvlak tussen twee stromingen

De wervels ontstaan bij het loslaatpunt en groeien in de stroomrichting, waarbij ze zowel van de rivier als van de haven water opnemen. Ze vormen een menglaag, die begint bij het loslaatpunt en zich van daaruit verbreedt in een V-vorm, totdat de benedenstroomse begrenzing van de havenmond bereikt is. Het punt waar de scheidende stroomlijn deze begrenzing raakt wordt het stuwpunt genoemd. Het kenmerk van een stuwpunt is dat de gemiddelde snelheid in dat punt nul is. Zie voor een schematische weergave van de vorming van een menglaag figuur 2.3.



Figuur 2.3 Vorming van een menglaag
(naar Brinkmann, 1989)

Zoals al eerder genoemd neemt de breedte van de menglaag toe als gevolg van de groei van wervels. Het blijkt dat de menglaag lineair groeit en het volgende verband kan worden aangegeven:

$$b \cong Ax \quad (2.1)$$

waarin b de breedte van de menglaag is, x de afstand in de menglaag tot het loslaatpunt en A een constante die afhangt van de definitie van de breedte van de menglaag en van de mate van verbreding. De waarde van A ligt tussen de 0,1 en de 0,3. De breedte van de menglaag kan bijvoorbeeld gedefinieerd worden als de afstand tussen de plaatsen waar de waarde van de snelheid u , $\frac{(u_r - u_h)}{2e}$, $e = 2.718$ afwijkt van u_r en u_h (Booij, 1986).

Hierin zijn u , u_r en u_h respectievelijk de snelheden in de x-richting van de menglaag, op de rivier en in het havenbekken.

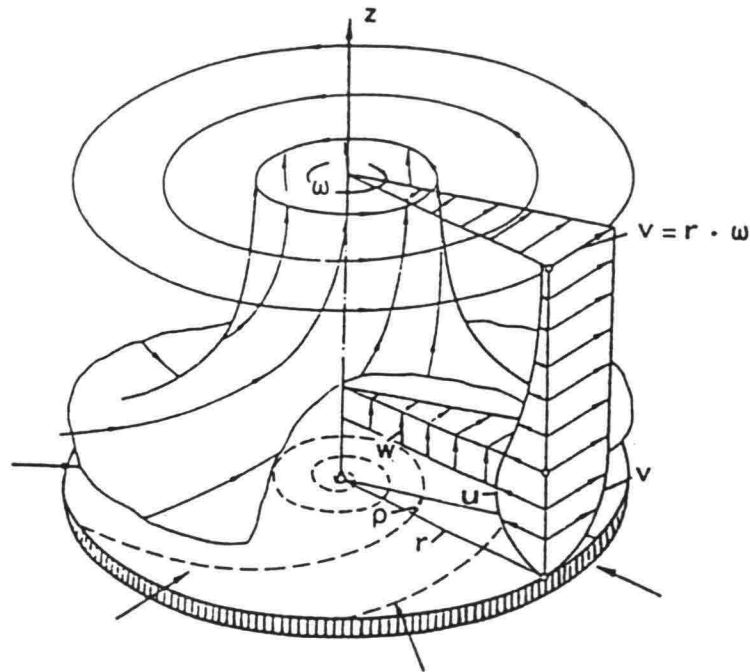
2.3.2 STROMING IN HET HAVENBEKKEN

De stromingen in het havenbekken staan vanzelfsprekend in verband met wat er in de havenmond gebeurt. Zoals al eerder genoemd bevindt zich aan de benedenstroomse zijde van de haven een stuwpunt. Er vanuit gaande dat de snelheid in de rivier groter is dan de snelheid in de haven, zal als gevolg van behoud van massa het stuwpunt zich in de haven bevinden. Naarmate er meer water vanuit de haven wordt meegesleept in de menglaag, ook wel entrainment genoemd, zal de menglaag breder worden en het stuwpunt verder de haven in schuiven. Het kenmerkende van een stuwpunt is dat de stroming zich daar splitst. Een deel van het water en sediment wordt verder stroomafwaarts gevoerd en een ander deel wordt de haven ingevoerd.

Er ontstaat een stuwpuntstroming doordat in de menglaag door de wervels niet alleen water uit de rivier wordt meegesleept, maar ook een gedeelte van het havenwater. Dit moet gecompenseerd worden aan de benedenstroomse kant, zodat ter plekke van het stuwpunt water uit de menglaag weer de haven instroomt. Dit veroorzaakt een neer, een ronddraaiende stroming, in het havenbekken, te zien in figuur 2.3. De neer is ook

verantwoordelijk voor het transport van sediment in de haven, omdat zij het sedimentrijke water van de rivier verder het bekken inbrengt waar het dan uiteindelijk bezinkt.

Het kenmerkende van een neer is dat de snelheid in het centrum klein is en dat de snelheden toenemen in de richting van de buitenrand. Doordat de snelheden bij het oppervlak groter zijn dan bij de bodem bewegen deeltjes aan de oppervlakte van de neer zich naar buiten en aan de bodem naar de kern toe. Als gevolg daarvan ontstaat een opwaartse stroming in het centrum van de neer en een neerwaartse stroming aan de buitenzijde. In figuur 2.4 is een illustratie te zien van deze zogenaamde neerstroming, ook wel torroïdale stroming genoemd (Schlichting, 1965).



Figuur 2.4 Neerstroming
(Schlichting, 1965)

Een ander effect dat zich kan voordoen in de haven is dat de zogenaamde primaire neer via impulsoverdracht een secundaire neer aandrijft. De ontwikkeling van dergelijke neren hangt sterk af van de geometrie van een haven. Er is tot nu toe redelijk wat onderzoek verricht naar het ontstaan van secundaire neren in geometrisch eenvoudige havens en het blijkt dat de secundaire neer in het algemeen ontstaat zodra de lengte/breedte-verhouding, L/B , van de haven groter is dan 1,5. Ook kan het aanbrengen van obstakels langs de wand het aantal neren beïnvloeden. De snelheid van de secundaire neer is ongeveer 0,2-0,3 maal de snelheid van de primaire neer, die op zijn beurt weer een snelheid heeft die 0,2-0,3 maal de snelheid is van de rivier (Booij, 1986). Door turbulente uitwisseling met de primaire neer kan ook de secundaire neer fijn sediment, ofwel slib meevoeren, waardoor er ook aanslibbing optreedt in de rest van het havenbekken.

3 SLIB IN EEN HAVENBEKKEN

3.1 INLEIDING

In vele rivieren, meren en havens in de hele wereld bestaat de bodem uit slib, al dan niet vervuild. De laatste jaren is de belangstelling voor het complexe gedrag van slib sterk toegenomen als gevolg van de steeds groter wordende overlast en de toegebrachte economische schade. Havens en toegangsgeulen slibben dicht door sedimenttransporten. Bovendien is slib tegenwoordig dusdanig vervuild dat het niet zonder consequenties gedumpt kan worden. Daarom is men op zoek naar mogelijkheden om aanslibbing te verminderen.

Slib is in tegenstelling tot zand een cohesief materiaal. Het bestaat uit een mengsel van kleimineralen, fijn zand, kalk, organisch materiaal, gas en water met daarin opgeloste stoffen zoals zouten. Afhankelijk van de verhouding waarin al deze stoffen voorkomen kunnen de eigenschappen van slib verschillen. En zelfs wanneer men de exacte samenstelling kent is het moeilijk om slib te beschrijven, onder andere omdat als gevolg van het organisch materiaal deze eigenschappen veranderen in de tijd. Een ander aspect dat een rol speelt bij de bepaling van de eigenschappen van slib is de deeltjesgrootte. Hoe meer kleine deeltjes, hoe groter het specifieke oppervlak, waardoor deeltjes makkelijker aan elkaar kunnen hechten en vlokken vormen. Dit bepaalt voor een groot deel de valsnelheid van het slib.

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op enkele specifieke eigenschappen van slib en welke rol zij spelen in de aanslibbing van een rivierhaven. Bovendien zal een kort overzicht gegeven worden van enkele bestaande oplossingen voor vermindering van aanslibbing.

3.2 SLIB

Slib, gedefinieerd als al het materiaal dat een deeltjesgrootte heeft die kleiner is dan $63\mu\text{m}$, is een materiaal dat gekenmerkt wordt door cohesief gedrag, veroorzaakt door de aanwezigheid van kleimineralen met een elektrostatische lading. Het samenspel tussen deze lading, de Van Der Waalskrachten en bepaalde chemicaliën zorgt ervoor dat deeltjes slib gaan 'samenklonteren'. De aanwezigheid van organisch materiaal kan ook van invloed zijn, omdat sommige organische substanties als lijm kunnen fungeren, waardoor er sterkere bindingen tussen de deeltjes ontstaan. Voor kalk en zand geldt dat hun invloed beperkt is wanneer hun hoeveelheden klein blijven.

Onder invloed van onder andere cohesie en het grote specifieke oppervlak kunnen vier mechanismen onderscheiden worden, die betrekking hebben op slib (Allersma et al., 1984):

- *Flocculatie*
- *Afzetting*
- *Erosie*
- *Consolidatie door eigen gewicht*

Flocculatie is het ontstaan van vlokken, veroorzaakt door het botsen van deeltjes die aan elkaar blijven plakken door de onderlinge krachten. De mate waarin flocculatie optreedt hangt af van de intensiteit van de turbulentie en van de concentratie en de cohesie van het sediment. Een vlok is groter in afmeting en heeft een lagere dichtheid dan de afzonderlijke deeltjes. Dit is het gevolg van water dat gevangen wordt in de vlokken. Door de lage dichtheid zal de valsnelheid afnemen, maar het contactoppervlak met de omgeving is ook gereduceerd, waardoor de valsnelheid weer toeneemt. Het laatste effect overheerst en de valsnelheid van een vlok is vele malen groter dan de valsnelheid van de afzonderlijke deeltjes. De uiteindelijke afzetting van de deeltjes op de bodem kan op twee manieren bekeken worden. Op microscopisch en op macroscopisch niveau. Op microscopisch niveau is een eenvoudige vergelijking op te stellen voor de fractie, die op de bodem blijft liggen:

$$D_{micro} = w_s c \frac{\tau_d - \tau_o}{\tau_d} \quad [kg/m^2 s] \quad (3.1)$$

Hierin is D_{micro} de massa afgezet sediment per eenheid van tijd en oppervlak, w_s de valsnelheid van de deeltjes, c de massaconcentratie, τ_d de kritische schuifspanning voor depositie van slib en τ_o de optredende schuifspanning. Op macroscopisch niveau geldt de volgende vergelijking voor depositie:

$$D_{macro} = c Q_{uitw} p \quad [kg/s] \quad (3.2)$$

Hierin is D_{macro} de massa afgezet sediment per eenheid van tijd, Q_{uitw} het uitgewisselde debiet en p de kans dat slib zich afzet. De kans p is evenredig met de zogenaamde trap-efficiency e_t , die gedefinieerd wordt als de verhouding tussen de tijd die nodig is voor depositie van een deeltje en de tijd die een deeltje nodig heeft om één circulatie te maken in de neer:

$$e_t = \frac{h/w_s}{T_{neer}} \quad (3.3)$$

Als deze parameter veel groter is dan één dan zullen zich weinig deeltjes afzetten. Als hij veel kleiner is dan één zullen veel deeltjes zich afzetten.

De laatste twee mechanismen, consolidatie en erosie, hebben beide betrekking op het eroderen van slib. Voor erosie geldt:

$$E = M \frac{\tau_o - \tau_e}{\tau_e} \quad [\text{kg}/\text{m}^2 \text{s}] \quad (3.4)$$

Hierin is E de hoeveelheid geerodeerd slib per eenheid van tijd en oppervlak, M een erosieconstante, die de snelheid van erosie aangeeft en τ_e de kritische schuifspanning voor erosie. De mate van consolidatie bepaalt tot op zekere hoogte de erosie. Als een slibbed sterk geconsolideerd is, zal het moeilijker eroderen (Allersma et al., 1984).

Om een idee te geven van de grootte van de valsnelheid van slib uit de Maas, worden de resultaten gegeven van een onderzoek door het Waterloopkundig Laboratorium (Kuiper et al., 1990). Het betreft hier een gedeflocculeerd monster dat in november 1989 uit de Maas is gehaald. De verdeling van de grootte van de deeltjes is bepaald met een sedigraaf deeltjesmeter. Hierbij wordt de valsnelheid gemeten en met de wet van Stokes de equivalente diameter van de deeltjes bepaald. De resultaten worden gepresenteerd in tabel 3.1.

Deeltjes diameter μm	Valsnelheid mm/s	%<	Deeltjes diameter μm	Valsnelheid mm/s	%<
2	0.003	16	16	0.22	42
4	0.01	25	30	0.78	54
6	0.03	30	38	1.26	56
8	0.06	33	53 ¹	2.45	60
10	0.09	36	63 ¹	3.46	64

Tabel 3.1 Sedigraaf metingen, ¹) verkregen door zeven

Op grond van deze gegevens kan de kritische bodemschuifspanning voor depositie van slib uit de rivier de Maas geschat worden op $0,06 \pm 0,01$ Pa (Kuiper et al., 1990).

3.3 AANSLIBBING IN HET HAVENBEKKEN

De mate van aanslibben in een haven is van een groot aantal factoren afhankelijk. De belangrijkste vier worden hieronder genoemd (Booij, 1986):

- *Uitwisselingsdebiet tussen rivier en haven*
- *Sedimentgehalte van het water*
- *Valsnelheid van het sediment*
- *Verblijftijd uitgewisseld water*

Een mogelijkheid om de hoeveelheid uitgewisseld water te bepalen is de relatie (Langendoen, 1992):

$$Q_u = k u_r B_h h \quad [m^3/s] \quad (3.5)$$

Hierin is Q_u het uitwisselingsdebiet tussen haven en rivier, k een uitwisselingscoëfficiënt, die zowel afhangt van de geometrie als de oriëntatie van de havenmond, u_r de snelheid op de rivier, B_h de breedte van de havenmond en h een karakteristieke waterdiepte voor de havenmond. Dit uitwisselingsdebiet heeft een slibbezwaar tot gevolg dat kan worden uitgedrukt in de volgende relatie:

$$S = Q_u c_r \quad [kg/s] \quad (3.6)$$

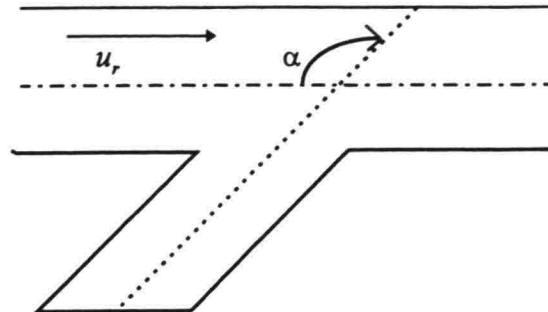
Hierin is S het slibbezwaar per eenheid van tijd en c_r de slibconcentratie in de rivier.

Om tot oplossingen te kunnen komen voor het aanslibbingsprobleem moet nader worden ingegaan op de factoren die verantwoordelijk zijn voor de hoeveelheid stof die een haven binnenkomt. Een uitdrukking voor de volumegemiddelde concentratie van zwevend materiaal, \bar{c} , in een haven in relatie tot enkele parameters is:

$$\frac{\bar{c}}{\bar{c}_0} = f\left(\frac{h}{B}, \frac{B}{L}, \frac{u_r t}{B}, \frac{u_*}{u_r}, \text{geometrie van de havenmond}\right) \quad (3.7)$$

Hierin stelt \bar{c}_0 de initiële concentratie in de haven voor op het tijdstip $t = 0$, h de waterdiepte voor de havenmond, B de breedte van de haven, L de lengte van de haven en u_* de bodemschuifsnelheid in de rivier. De eerste twee dimensieloze parameters zijn een maat voor de geometrie van de haven. De derde is een dimensieloze tijd, die een maat is voor de aanpassingstijd van het systeem voor veranderde omgevingscondities. De vierde is een maat voor het turbulentiëniveau in de rivier. De geometrie van de havenmond kan worden uitgedrukt in de parameter B_h/B en de hoek α , die de oriëntatie aangeeft. Andere factoren die van belang zijn in relatie tot de geometrie zijn: de helling van de taluds op de rivier en in de havenmond en de positie van de eventueel vernauwde havenmond ten opzichte van het bekken (Langendoen, 1992).

De hoek α is gedefinieerd in figuur 3.1.



Figuur 3.1 Definitieschets havenoriëntatie

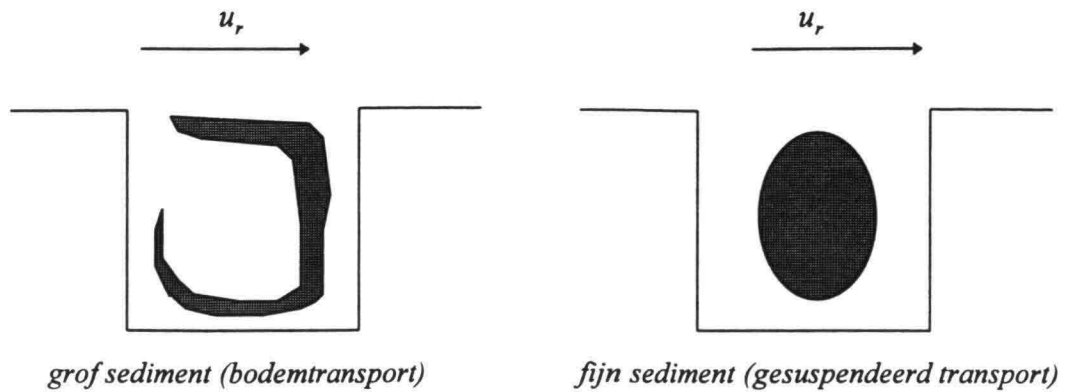
Booij vond voor een havenmond met $\alpha = 90^\circ$ en verticale oevers dat $k = 0,032$. Dursthoff vond hier $k = 0,05$. Als $\alpha = 45^\circ$ geldt volgens Booij dat $k = 0,05$ en als $\alpha = 135^\circ$ geldt $k = 0,02$ (Booij, 1986; Dursthoff, 1970). Booij vond in zijn experimenten dat de grotere k bij een kleinere hoek α verklaard kan worden doordat de menglaag breder is bij deze oriëntatie van de havenmond. Dit betekent dat er meer haven- en rivierwater in de menglaag wordt meegesleept, wat meer uitwisseling tot gevolg heeft.

Uitdrukking 3.7 is toegespitst op zwevend transport. Om de daadwerkelijke hoeveelheden sediment en slib die het havenbekken binnenkomen te kunnen bepalen, zullen er nog enkele andere parameters moeten worden toegevoegd, zoals bijvoorbeeld het sedimentgehalte en de valsnelheid van de deeltjes. De uitdrukking kan echter wel gebruikt worden om de kwalitatieve aspecten te bestuderen van de invloeden van veranderingen in de geometrie van de havenmond. Zo zal bijvoorbeeld het kleiner maken van de parameter h/B tot resultaat hebben dat de uitwisseling kleiner wordt en als gevolg daarvan de aanslibbing in de haven.

In het bepalen van de hoeveelheid uitgewisseld water komt al ter sprake dat het sedimentgehalte en de valsnelheid van belang zijn bij het vaststellen van de aanslibbing. Eerder is ook al genoemd dat de verblijftijd van het uitgewisselde water een rol speelt, omdat de kans dat een deeltje zich afzet daardoor bepaald wordt. De verblijftijd is afhankelijk van de snelheden in de aanwezige neren en de afmeting van de haven. De afmeting van de haven bepaalt namelijk de afmeting van de neer en dus de tijd die een deeltje nodig heeft om eenmaal de neer rond te gaan.

Een ander aspect dat van belang is bij het bestuderen van aanslibbing is kennis over de depositie van het slib. Eerder is al genoemd dat slib zich afzet, zodra de gemiddelde tijd, die een afzonderlijk deeltje nodig heeft om de bodem te bereiken, korter is dan de verblijftijd van dat deeltje in de haven. De vraag is nu, waar dat deeltje zich uiteindelijk zal afzetten. In dat kader is er onderzoek gedaan naar stroombeelden en afzettingsspatronen en het blijkt dat de afzettingsspatronen verschillen voor grof sediment en fijn sediment. Als gevolg van de eerder genoemde neerstroming bewegen deeltjes aan de bodem zich van buiten naar binnen. Het grove sediment zal aan de buitenrand bezinken, omdat het een

grotere valsnelheid heeft, en het fijne sediment zal zich nog wel mee laten voeren naar het midden van de neer en daar bezinken. Zie voor een tekening figuur 3.2 (Langendoen, 1992).



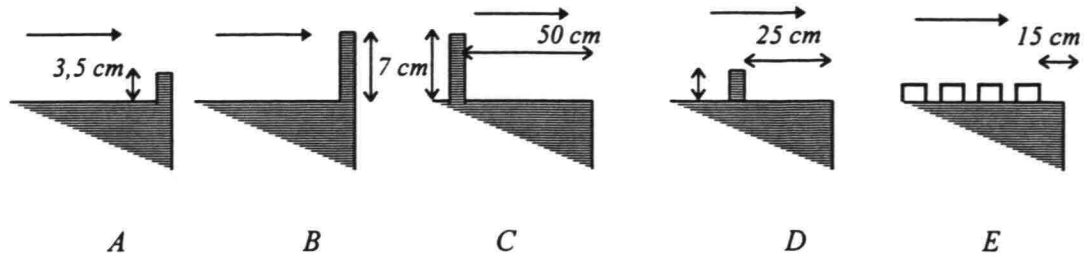
Figuur 3.2 Afzettingspatronen grof en fijn sediment
(naar Langendoen, 1992)

3.4 VERMINDERING VAN AANSLIBBING

Uit bovenstaande paragraaf komt naar voren dat het veranderen van de geometrie van de haven en havenmond invloed heeft op de mate van aanslibbing in de haven. Dursthoff (1970) heeft hier uitgebreid onderzoek naar gedaan. Om een beeld te geven van wat al bekend is op dit gebied zal hier een korte samenvatting worden gegeven van zijn onderzoek.

In een vierkante haven van 2 m x 2 m met rechte zijden en een havenmond van 2m breed zijn snelheidsmetingen gedaan met verschillende snelheden op de rivier, met als uitgangspunt dat de snelheid in het bekken bepaald wordt door de mate van uitwisseling tussen rivier en haven. Vervolgens zijn er aanpassingen gedaan aan de benedenstroomse zijde van de haven en zijn de gevolgen hiervan vastgesteld voor de snelheden in het havenbekken. Het bleek dat deze nauwelijks veranderden en zijn conclusie was dat veranderingen aan de benedenstroomse zijde van de havenmond weinig zinvol zijn.

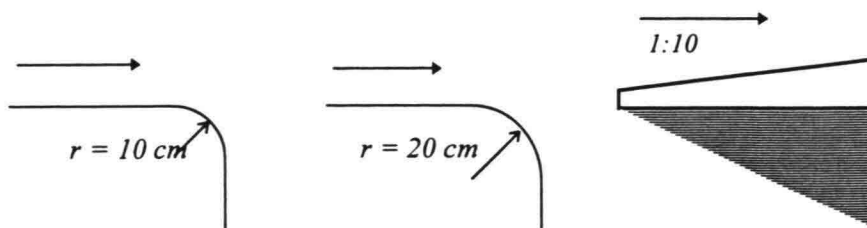
Daarna zijn er veranderingen aangebracht aan de bovenstroomse zijde van de havenmond. In eerste instantie zijn diverse obstakels loodrecht op de stroomrichting aangebracht op verschillende afstanden van de havenmond. Zie voor een schematische tekening figuur 3.3, A, B, C, D en E.



Figuur 3.3 Proefopstelling havengeometrie met obstakels
(naar Dursthoff, 1970)

Hierbij bleek dat de snelheden in het havenbekken toenamen, waarschijnlijk als gevolg van de toenemende turbulentie bij het loslaten en een verbreding van de menglaag. Het is moeilijk om een verband te leggen tussen de grootte van het obstakel en de toename van de uitwisseling, maar zelfs als er obstakels van slechts geringe afmetingen worden aangebracht, zie figuur 3.3, E, nemen de snelheden in het bekken iets toe. In het algemeen nemen de snelheden 10-30% toe. Er kan dus zeker gesteld worden dat, in het onderzoek van Dursthoff, obstakels geen positief effect hebben op het verminderen van de uitwisseling.

Verder is er nog onderzoek verricht naar het effect van het afronden van de bovenstroomse zijde van de havenmond. Het blijkt dat een geringe afronding (met een straal van $r = 10$ cm in het model) een klein positief effect heeft (0-5%). Wordt de afronding echter groter gemaakt ($r = 20$ cm) dan kan het effect negatief worden (5-10%). Dursthoff tracht dit te verklaren door het feit dat er minder turbulentie optreedt bij het loslaten, waardoor er een stroming in een ongunstige richting de haven in ontstaat. Dit is niet consistent met zijn eerder verklaring in bovenstaande paragraaf waarin hij beweert dat het negatieve effect het gevolg is van toenemende turbulentie. Het wordt in zijn onderzoek echter niet duidelijk wat de correcte verklaring is. Bovendien geeft hij geen grenswaarde waar het positieve effect negatief wordt. Een andere aanpassing, die een klein positief effect te weeg brengt is het geleidelijk (helling 1:10) naar buiten uitbouwen van de bovenstroomse oever, waardoor de menglaag verder naar buiten wordt gebracht (0-5%). Voor een tekening van de afronding en de aanpassing aan de oever wordt verwezen naar figuur 3.4.



Figuur 3.4 Proefopstelling havengeometrie met afronding en uitbouw
(naar Dursthoff, 1970)

Dursthoff concludeert uit zijn onderzoek dat een kleine aanpassing bovenstrooms een relatief grote invloed heeft op de snelheden in het havenbekken. Daarentegen hebben aanpassingen aan de benedenstroomse zijde weinig tot geen invloed op de snelheden in het havenbekken¹ (Dursthoff, 1970).

Een andere maatregel waar ervaring mee is opgedaan is de zogenoemde "Current Deflecting Wall". Dit is een scherm dat in de stroming voor de havenmond wordt gezet en de stroming op een dusdanige manier beïnvloedt dat de neer in de mond wordt onderdrukt. Een dergelijk scherm is met succes toegepast in de Köhlfleethaven in Hamburg (Winterwerp et al., 1994).

¹ De conclusies, die Dursthoff uit zijn onderzoek heeft getrokken, komen niet overeen met de bevindingen in dit rapport. Hier blijken zowel maatregelen bovenstrooms als benedenstrooms veel effect te hebben op de hoeveelheid aanslibbing.

4 JACHTHAVENS 'T STEEL EN LA BONNE AVENTURE

4.1 INLEIDING

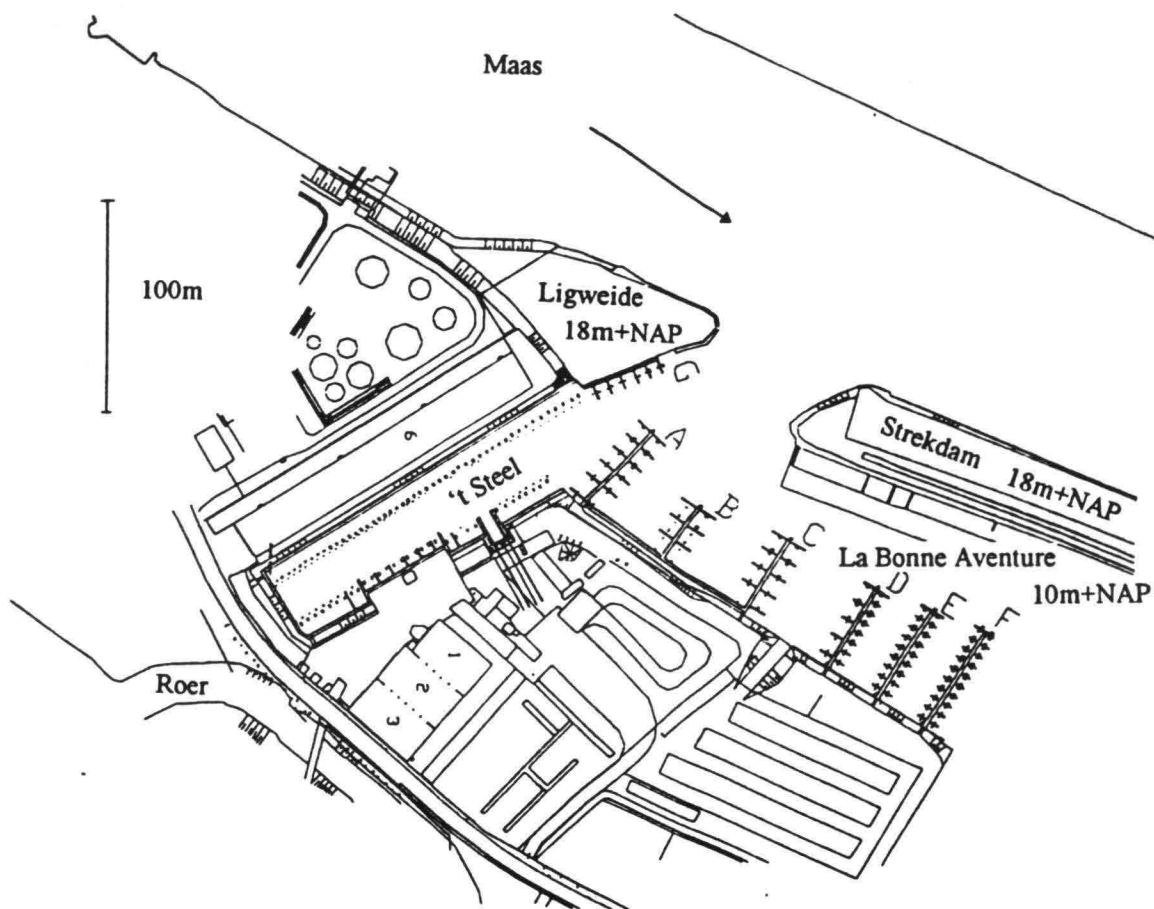
Er zijn talloze jachthavens in Nederland en elk daarvan heeft een eigen vormgeving en daardoor zijn eigen aanslibbingsproblemen. Om een duidelijk beeld te geven van de havens in dit onderzoek, wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de locatie, geometrie en de specifieke omstandigheden van jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure. Verder komt de Maas aan de orde wat betreft bodemgesteldheid en sedimenttransporten.

In de omgeving van Roermond vormt de Maas als gevolg van verregaande zand -en grindwinning een uitgestrekt plassengebied; de zogenaamde Maasplassen. Al deze plassen staan op een of andere manier in verbinding met de Maas en vormen daardoor een aantrekkelijk recreatiegebied voor watersporters. Dat heeft er voor gezorgd dat er alleen al in Roermond zo'n twaalf jachthavens zijn, waaronder de twee bovengenoemde. De watersport is tegenwoordig dan ook een belangrijke bron van inkomsten voor de provincie Limburg en het is van belang dat de havens in stand worden gehouden. De kosten voor het onderhoud van de jachthavens moeten naar beneden, omdat anders binnen afzienbare tijd de jachthavens zullen moeten sluiten.

4.2 SITUATIESCHETS

De jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure zijn van oorsprong werkhavens. 't Steel is in de dertiger jaren gegraven in een moerassig gebied bij Roermond en oorspronkelijk gebruikt voor de overslag van Scandinavisch hout. La Bonne Aventure is een kleine vijftien jaar later ontstaan en bood ruimte aan een scheepswerf. De zes grote hallen die op het terrein van de haven staan dienden vroeger voor de opslag van hout. Tegenwoordig worden ze gebruikt als winterberging, waarmee 't Steel de grootste winterbergingscapaciteit van Nederland heeft.

Op dit moment heeft 't Steel een capaciteit van 250 ligplaatsen. Een deel van de haven is uitgerust met drijvende steigers, waaraan de grote jachten liggen, zodat zij bij stijgend water aangemeerd kunnen blijven. La Bonne Aventure is een stuk groter en dieper doordat deze in de loop van de jaren is uitgegraven voor grindwinning. Beide havens maken gebruik van dezelfde aansluiting met de Maas, zoals te zien is in figuur 4.1. De bovenstroomse zijde van de havenmond wordt ook wel ligweide genoemd en de benedenstroomse zijde strekdam.



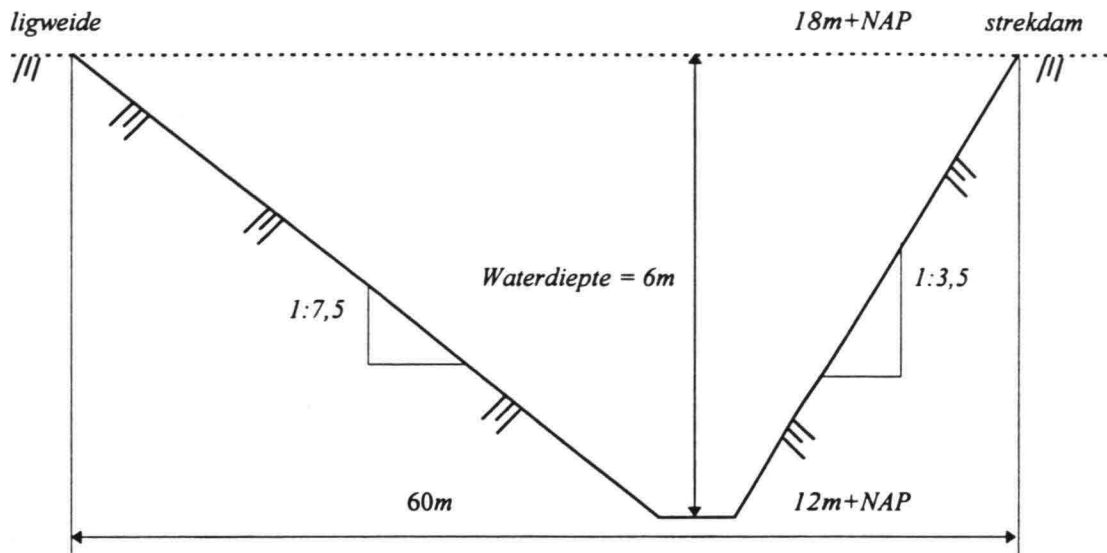
Figuur 4.1 Plattegrond jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure

4.3 SPECIFIEKE OMSTANDIGHEDEN 't STEEL EN LA BONNE AVENTURE

Voor onderzoek naar aanslibbing zijn de oriëntatie en geometrie van een havenmond belangrijke gegevens. In dit geval maakt de haven een hoek van 135° met de rivier.

Ter bestudering van de geometrie van de havenmond, is een schematische weergave van de doorsnede gemaakt. De doorsnede is gekozen ter plekke van de verbindingslijn tussen de oevers van ligweide en strekdam. Een tekening van de doorsnede staat in figuur 4.2.

Alle maten zijn prototypematen. De gestippelde lijn is de verbinding tussen ligweide en strekdam.



Figuur 4.2 Schematische weergave havenmond

Wat opvallend is aan de geometrie is dat de taluds zeer flauw zijn. Dit kan een positief effect hebben op de vermindering van de aanslibbing, omdat door dergelijke taluds het loslaten van de stroming relatief rustig plaatsvindt, zodat de turbulentie voor de havenmond gedeeltelijk onderdrukt wordt. Bovendien zijn zowel de bovenstroomse zijde als de benedenstroomse zijde van de havenmond enigszins afgerond. Dursthoff vond al in eerder onderzoek dat dat een positief effect kan hebben.

Wat verder opvalt is dat de ligweide en de strekdam beide erg laag zijn. Zij liggen op 18m+NAP, terwijl de waterstand in de rivier gemiddeld op 16,84m+NAP staat. Hierdoor zullen beide bij hoogwater onder water komen te staan. Bij de meeste jachthavens aan rivieren zullen de zijden van de havenmond nooit op een dergelijke manier onder water komen te staan. Dat het hier wel gebeurt, heeft een ander stroombeeld in de overstromde situatie tot gevolg, waardoor deze apart bestudeerd moet worden. Worden de gemiddelde stroomcondities vergeleken met een hoogwater dat eens in de drie jaar voorkomt, dan blijkt dat over de tijd gemiddeld ongeveer 80% van het slib binnenkomt tijdens de gemiddelde afvoer en 20% tijdens de afvoer die eens in de drie jaar voorkomt (Geschat Gerritsen, 1996).

Een aspect, dat alleen bij deze twee havens aan de orde komt, is de invloed van het keren van olietankers. Naast de jachthaven bevindt zich een olieopslagplaats waar regelmatig grote olietankers lossen. Deze moeten vervolgens keren en gebruiken daarvoor de havenmond van de jachthaven. Het is onbekend in hoeverre deze scheepsbewegingen de aanslibbing bevorderen of verminderen, maar waarschijnlijk zullen ze een orde van grootte kleiner zijn dan de uitwisseling tussen haven en rivier, omdat zich op de bodem van de Maas praktisch geen slib bevindt. Om deze reden zal hier verder geen aandacht aan worden besteed.

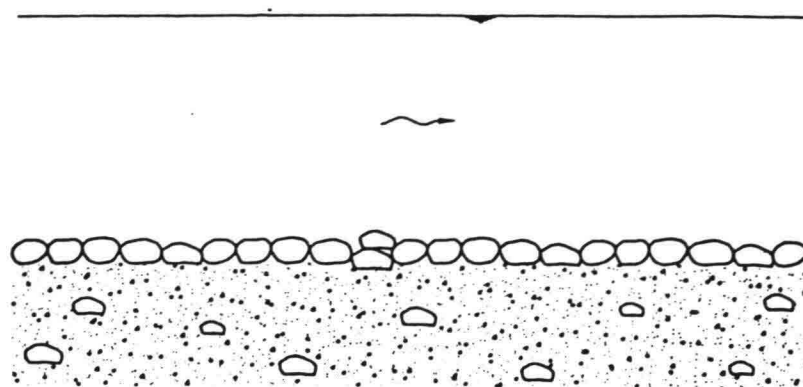
In een voorafgaand numeriek onderzoek naar deze haven, is de bodemligging nauwkeurig bepaald met behulp van metingen met baak en echolood in de haven. Dit was nodig om een goede bodemligging te kunnen bepalen voor het numerieke model. Tegelijkertijd zijn met drijvermetingen, voor zover mogelijk, stromingspatronen in de haven bepaald (Gerritsen, 1996). In dit onderzoek is dankbaar gebruik gemaakt van deze gegevens. De dieptekaart, de resultaten van de drijvermetingen en de kennis van de havenmeester zijn uiteindelijk gebruikt om het schaalmodel in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica zo goed mogelijk na te bouwen.

4.4 SPECIFIEKE OMSTANDIGHEDEN RIVIER DE MAAS

Met een totale lengte van 850km, waarvan 250km in Nederland, is de Maas de tweede grote rivier van Nederland. Hij ontspringt in Frankrijk en stroomt vervolgens via België bij Eijsden ons land binnen om tot Stevensweert de grens tussen Nederland en België te vormen, de zogenoemde Grensmaas. Rond het midden van de 18e eeuw was de Maas een meanderende rivier met zand -en grindbanken, een goede waterkwaliteit en sterk wisselende waterstanden. Tegenwoordig is dat niet meer zo als gevolg van de verregaande normalisatiewerken, waardoor de Maas een rechte rivier met een bijna vast waterpeil is geworden. Dit heeft nadelige gevolgen gehad voor de flora en fauna in de rivier, maar het betekent wel dat de scheepvaart het hele jaar door kan plaatsvinden.

Het verhang van een rivier is van belang voor de morfologische processen in de rivier. Op de Maas kunnen drie trajecten worden onderscheiden. De grens tussen deze twee ligt enkele kilometers onder Roermond. Het bovenstroomse stuk heeft een steil verhang, ongeveer 45cm/km, en verder in benedenstroomse richting wordt de bodemhelling steeds flauwer, 10cm/km, totdat de overgang van Maas naar Amer bereikt is, waar de bodem bijna horizontaal is. Dit onderscheid kan ook gemaakt worden in samenstelling van het bodemmateriaal. De bedding van het bovenstroomse deel bestaat voornamelijk uit grof grind en keien en is over grote stukken afgepleisterd. De bedding van het benedenstroomse deel bestaat in het begin uit fijn zand en verder stroomafwaarts, op de grens van de Maas en de Amer, uit slib. Ter plaatse van Roermond heeft het bodemmateriaal een mediane korrel diameter D_{50} van 15mm en een laag slibgehalte.

De pleisterlaag ontstaat als gevolg van het feit dat de fijne deeltjes uit het zand -en grindmengsel uitspoelen. Hierdoor vormt de bovenlaag uiteindelijk een, alleen uit grof grind bestaande, beschermlaag tegen erosie. Zie voor een tekening figuur 4.3.



Figuur 4.3 Afpleisterlaag op de bodem van de Maas

De grove bovenlaag zorgt voor een gering transport van bodemmateriaal in de Maas tijdens lage afvoeren. De afpleisterlaag komt pas in beweging als de schuifspanningen een bepaalde grenswaarde overschrijden en dat is in de huidige situatie pas bij afvoeren hoger dan $1500\text{m}^3/\text{s}$.

De afvoer van de Maas kan enorm variëren, van $10\text{m}^3/\text{s}$ tot $3100\text{m}^3/\text{s}$ (1993). De langdurig gemiddelde afvoer (1911-1991) bij Borgharen bedraagt ongeveer $245\text{m}^3/\text{s}$ (Breukel et al., 1992). De afvoer waarbij de pleisterlaag in beweging kan komen, $1500\text{m}^3/\text{s}$, komt gemiddeld één dag per jaar voor. Bij deze afvoer treedt de rivier op veel plaatsen buiten haar oevers en loopt het Maasplassengebied onder water. Als de afvoeren nog hoger worden komt een aantal laaggelegen dorpen in de problemen. De hoogwaters op de Maas zijn een rechtstreeks gevolg van hoge afvoeren op de Franse Maas en de rivieren in België. Deze hoge afvoeren ontstaan door neerslag in het gehele stroomgebied, soms aangevuld met smeltwater. De waterstanden te Roermond voor de verschillende afvoeren zijn te zien in tabel 4.1.

Overschrijdingskans	Debiet Q [m^3/s]	Waterstand h [m]
Langjarig gemiddelde	250	16,84m+NAP
1/jaar	1000	17,43m+NAP
1/3jaar	1500	18,60m+NAP
1/10jaar	2100	19,67m+NAP

Tabel 4.1 Afvoeren en waterstanden te Roermond

Over de sedimenttransporten tijdens hoge afvoeren in de Maas is weinig bekend, doordat er enkel metingen zijn gedaan bij afvoeren tot $1500\text{m}^3/\text{s}$. Het blijkt dat het sedimenttransport erg afhankelijk is van de afvoer van de rivier. Het sedimenttransport is op te delen in zandtransport en slibtransport. Bij kleine afvoeren is het zandtransport relatief laag, waarschijnlijk als gevolg van de afpleisterlaag. In tabel 4.2 zijn enkele gemiddelde zandtransporten genoemd, zoals deze voorkomen op de Maas gedurende de langjarig gemiddelde afvoer.

Grensmaas	35.000m ³ /jaar
Linne	26.000m ³ /jaar
Kessel	19.000m ³ /jaar
Ravenstein	70.000m ³ /jaar

Tabel 4.2 Gemiddelde zandtransporten op de Maas

Uit het verschil in zandtransport op de verschillende locaties blijkt dat op deze trajecten sediment geborgen en weggenomen wordt, veroorzaakt door onder andere aanzandingen, baggerwerkzaamheden en afzettingen in grindwinplassen.

De slibvracht in de Maas is redelijk constant, ongeveer 500 kton/jaar (Breukel et al., 1992; Mosselman & Wang, 1994).

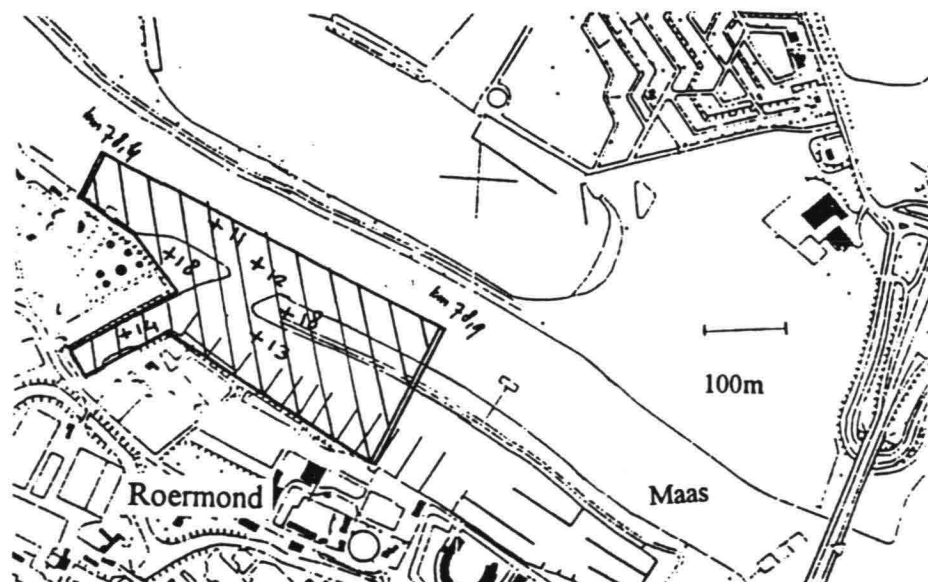
5 OPZET EXPERIMENT EN APPARATUUR

5.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt een omschrijving gegeven van het schaalmodel en alle apparatuur die gebruikt is om het experiment uit voeren. De schaalregels die van toepassing zijn op modelbouw worden omschreven en gekwantificeerd. Bovendien wordt ook de theorie uiteengezet waarmee in hoofdstuk 6 de diverse varianten met elkaar vergeleken worden. Als laatste worden alle randvoorwaarden en aannamen samengevat.

5.2 HET SCHAALMODEL

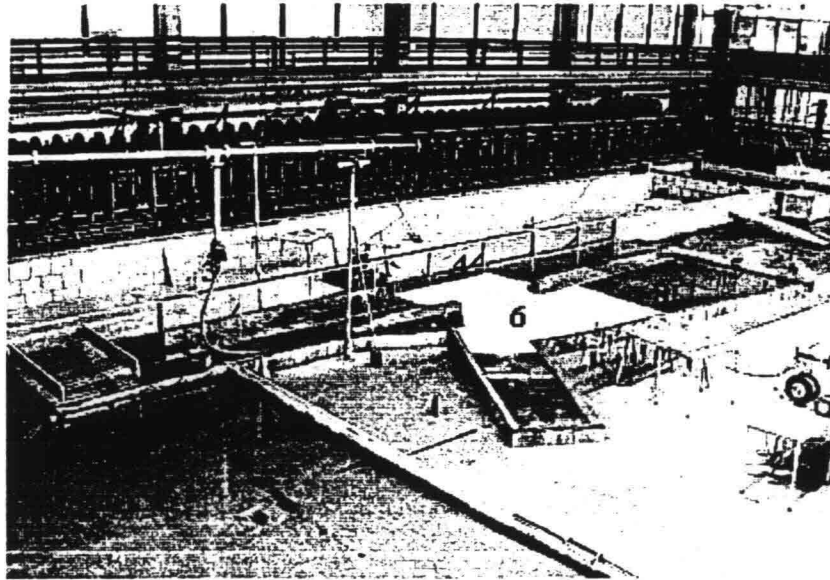
Het model in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, representeert het Maastraject van km 78,4 tot km 78,9. Daarin bevinden zich de volledige jachthaven 't Steel en een deel van jachthaven La Bonne Aventure. Van de Maas is het gedeelte tussen de as van de rivier en de rechter oever gemodelleerd. De schaal van het model is 1:50, zowel in verticale als in horizontale zin. In figuur 5.1 staat op een kaart van Roermond aangegeven welk deel gemodelleerd is.



Figuur 5.1 Ligging van het schaalmodel in Roermond

Het model is gebouwd met behulp van een gedetailleerde tekening van indeling en bodemligging van de haven. Zie voor deze tekening bijlage I. De tekening is gemaakt volgens gegevens van Adviesbureau Brouwers BV en volgens de metingen van Gerritsen (1996). Tijdens de winter van 96/97 heeft de haven in zijn geheel droog gestaan en zijn de gegevens gecontroleerd door Adviesbureau Brouwers.

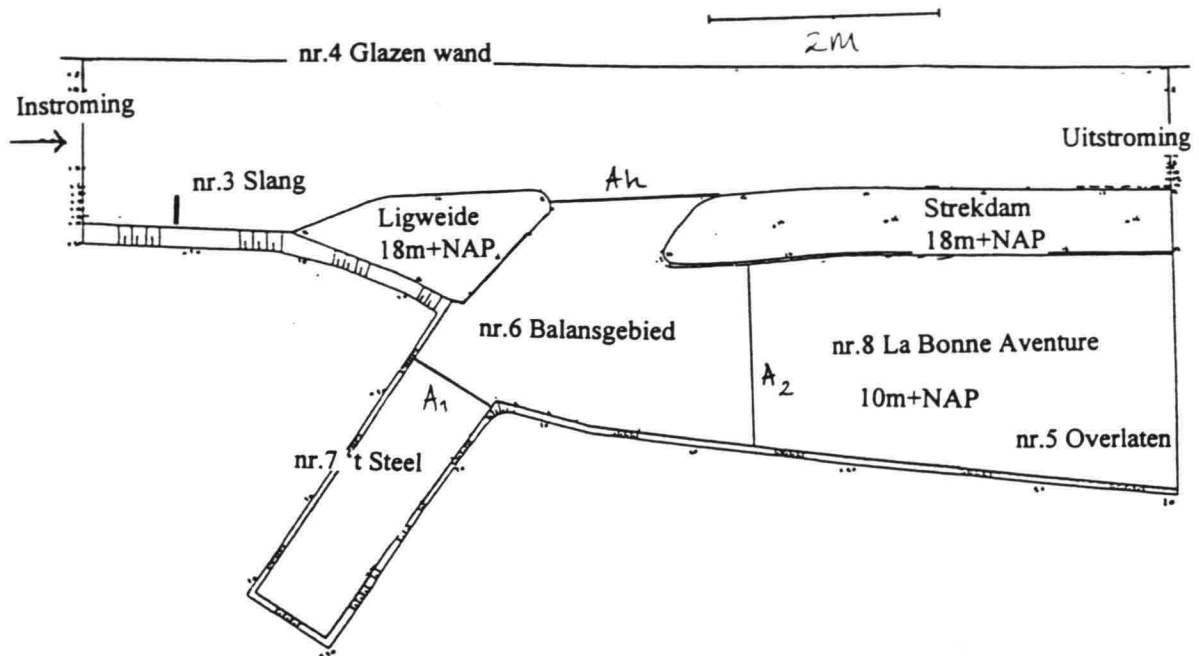
Twee personen hebben een maand aan de bouw van het model gewerkt. Details, die men normaal in een jachthaven vindt, zoals schepen en steigers, zijn hier weggelaten ter vereenvoudiging. De contouren van het model zijn opgebouwd in baksteen. Vervolgens zijn hierin om de 25 cm, loodrecht op de rivieras, op maat gezaagde houten mallen geplaatst. Het uiteindelijke nauwkeurige bodemprofiel is bereikt door de ruimtes tussen de mallen op te vullen met zand, afgewerkt met cement. Delen van de ligweide en de strekdam zijn gemaakt van losse kalkzandstenen, zodat eventueel eenvoudig veranderingen aangebracht kunnen worden in de geometrie van de havenmond. Om een beeld te geven van het model is in figuur 5.2 een foto van het model te zien.



Figuur 5.2 Foto van het schaalmodel

Links op de foto en op de plattegrond, de bovenstroomse zijde, zijn de geleideschermen te zien (nr.1), die er voor zorgen dat de instroming vanuit het naastgelegen bassin ordelijk verloopt. Direct na de instroming bevindt zich een onregelmatigheid in het verder tamelijk rechte aanstroomgedeelte (nr.2). Deze representeert de steiger van de naast de haven gelegen olie-overslagplaats. De slang die in het model ligt verzorgt de aanvoer van warm water (nr.3). Deze is via een buizenstelsel (nr.3) aangesloten op een boiler. Dit is nodig, omdat tijdens de experimenten slib wordt vervangen door warm water, zie § 5.4. De glazen wand evenwijdig aan de rivier vormt de as van de Maas (nr.4). Aan de benedenstroomse zijde van het model, rechts op de foto, bevinden zich overlaten, waarmee de waterstanden geregeld kunnen worden (nr.5). De overlaten in de haven worden gebruikt om er voor te zorgen dat de waterbeweging in de overstromde situatie overeenkomt met datgene dat is waargenomen door de havenmeester ten tijde van hoogwater. Het centrale deel van de haven is wit geschilderd om de stromingspatronen

goed te kunnen visualiseren met kleurstof (nr.6). Het rechthoekige bassin onderaan de foto is jachthaven 't Steel (nr.7) en het grote bassin rechts is een deel van jachthaven La Bonne Aventure (nr.8). Voor de volledigheid wordt in figuur 5.3 nog een vereenvoudigde plattegrond van het model getoond. De nummers in de figuur corresponderen met bovenstaande nummers.



Figuur 5.3 Vereenvoudigde plattegrond van het schaalmodel

In het model wordt geen specifieke afvoer van de Maas gesimuleerd, maar de waterstand gedurende de gemiddelde stroomcondities, te weten 16,84m+NAP. Deze wordt, omdat het model een tolerantie heeft van 5 mm, afgerond naar 17m+NAP. Het water staat dan ongeveer 1 m onder het niveau van de strekdam en ligweide (18m+NAP). Het nulniveau van het model is gekozen in het diepste punt van La Bonne Aventure en ligt in werkelijkheid op 10m+NAP. Dit geeft een waterdiepte van +14 cm in het model voor de niet-overstroomde situatie. Voor de overstroomde situatie is vervolgens gekozen voor een waterstand van 2 m boven die van de niet-overstroomde situatie, oftewel +18 cm in het model. Deze twee waterdiepten zijn het uitgangspunt voor het bepalen van de debieten in beide gevallen, 36,8 l/s in niet-overstroomde situatie en 42,6 l/s in overstroomde situatie. Het debiet wordt bepaald met behulp van een meetflens in de buis, waardoor het water toestroomt.

5.3 DIMENSIELOZE PARAMETERS

Om te kunnen beoordelen of een model de werkelijkheid goed simuleert moeten niet alleen de geometrische parameters gelijk zijn, maar is ook een aantal schaalregels van toepassing met betrekking tot stroming, turbulentie en transport van materie. Deze zijn nodig om ook de fysische processen goed te kunnen simuleren. Twee kentallen spelen een belangrijke rol: het Reynoldsgetal en het Froudegetal. In principe moeten deze in model en prototype gelijk zijn. Ze worden gedefinieerd door de volgende formules:

$$Re = \frac{u_r h}{\nu} \quad (5.1)$$

$$Fr = \frac{u_r}{\sqrt{gh}} \quad (5.2)$$

Hierin is u_r de stroomsnelheid van de rivier, h een karakteristieke waterdiepte in de havenmond, ν de kinematische viscositeit van water en g de versnelling van de zwaartekracht.

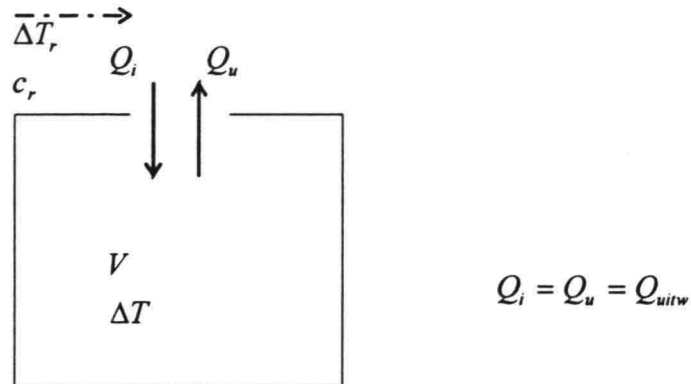
Omdat het niet haalbaar is om bovenstaande getallen in model en prototype beide gelijk te krijgen is het voldoende als ze voldoen aan bepaalde eisen ten aanzien van turbulentie en stroming. Het Reynoldsgetal moet groter zijn dan ca. 2000, en bij voorkeur groter dan 10.000. In dit geval is in de niet-overstroomde situatie in het model gekozen voor $u_r \approx 0,30 \text{ m/s}$. Met een waterstand voor de havenmond van $h \approx 0,12 \text{ m}$ geeft dat een Reynoldsgetal van 36.000. De snelheid in de neer is $0,07 \text{ m/s}$ waarmee het Reynoldsgetal in de neer 8.400 wordt. In de overstroomde situatie geldt $u_r \approx 0,21 \text{ m/s}$ en $h \approx 0,16 \text{ m}$. Het Reynoldsgetal is dan 33.600. Er zal dus een volledig ontwikkelde turbulente stroming ontstaan. Omdat de waterspiegel bijna vlak is, zal de invloed van het Froudegetal minimaal zijn en is het voldoende dat dit getal aanzienlijk kleiner is dan één, in ieder geval kleiner dan 0,5. Het blijkt dat in de niet-overstroomde situatie het Froudegetal ongeveer 0,28 is en in de overstroomde situatie 0,17. In beide gevallen dus veel kleiner dan één. Uit bovenstaande blijkt dat er wat betreft het Reynoldsgetal en het Froudegetal aan de eisen is voldaan.

5.4 SIMULATIE VAN DE AANSLIBBING

Het doel van dit onderzoek is om de effectiviteit van oplossingen voor het verminderen van het aanslibbingsprobleem in jachthavens aan rivieren te onderzoeken met behulp van een schaalmodel. Helaas is het onmogelijk om slib te gebruiken in schaalproeven. Ten eerste is de samenstelling nauwelijks bekend en ten tweede is slib niet te schalen, omdat het uit te kleine deeltjes bestaat en zich te complex gedraagt. Er is onderzoek gedaan naar het gebruik van kunstslib, maar dat is voor de huidige situatie niet toe te passen. Om dit probleem te omzeilen, is besloten bij dit onderzoek de uitwisseling van slib te simuleren met de uitwisseling van warm water. Deze stoffen gedragen zich niet geheel identiek, maar een nadere beschouwing leert, dat er wel een analogie te ontdekken is tussen beide.

Het uitwisselingsmechanisme, zoals dat uitgelegd is in hoofdstuk 3, geldt voor beide stoffen met als enige verschil, dat de ervaring leert dat bijna al het slib bezinkt in de tijd dat het in de haven is, maar dat daarentegen een deel van het warme water uiteindelijk de haven weer zal verlaten. Dit is de reden dat alleen het begin van opwarmen wordt beschouwd.

Voor de uitwisseling van warm water tussen haven en rivier kan een eerste-orde-systeem worden opgesteld aan de hand van een massabalans. Zie voor het schema van dit systeem figuur 5.4.



Figuur 5.4 Eerste-orde-systeem van warmte

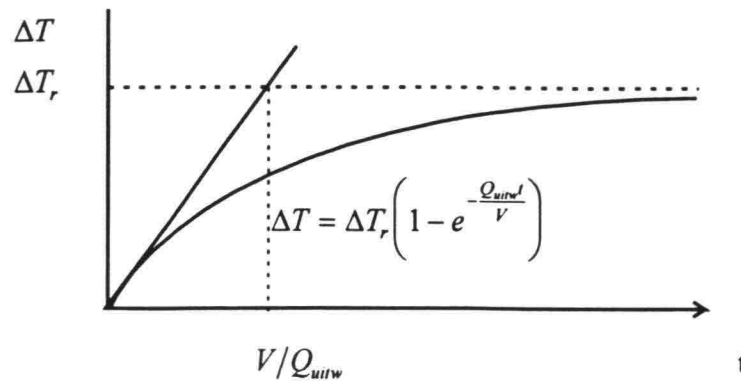
Volgens de wet van behoud van inwendige energie (voor water \propto absolute temperatuur T) volgt:

$$V \frac{d\Delta T}{dt} = Q_i \Delta T_r - Q_u \Delta T = Q_{uirw} \Delta T_r - Q_{uirw} \Delta T \quad (5.3)$$

Waarin V het volume is van het balansgebied, ΔT de temperatuursverandering in het balansgebied, ΔT_r de temperatuursverandering in de rivier, t de tijd, Q_i het debiet van rivier naar haven, Q_u het debiet van haven naar rivier en Q_{uirw} het uitwisselingsdebiet tussen haven en rivier. De oplossing voor deze vergelijking voor constante ΔT_r ($t > 0$) is:

$$\Delta T = \Delta T_r \left(1 - e^{-\frac{Q_u t}{V}} \right) \quad (t = 0, \Delta T = 0) \quad (5.4)$$

Wanneer ΔT wordt uitgezet tegen de tijd volgt als resultaat figuur 5.5.



Figuur 5.5 Grafiek van ΔT uitgezet tegen de tijd

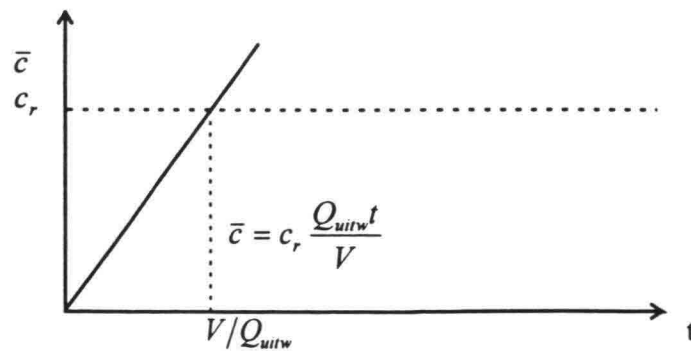
Voor het systeem met slib kan eenzelfde balans worden opgezet. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat al het slib bezinkt in het havenbekken. Nu volgt voor de vergelijking:

$$\frac{dM}{dt} = Q_{uirw} c_r, \text{ met } \bar{c} \equiv \frac{M}{V} \Rightarrow V \frac{d\bar{c}}{dt} = Q_{uirw} c_r \quad (5.5)$$

Hierin is M de massa van het slib in het balansgebied, \bar{c} de concentratie in het balansgebied en c_r de concentratie op de rivier. De oplossing voor deze vergelijking voor constante c_r ($t > 0$) is:

$$\bar{c} = c_r \frac{Q_{uirw} t}{V} \quad (5.6)$$

Als \bar{c} wordt uitgezet tegen de tijd volgt als resultaat figuur 5.6.



Figuur 5.6 Grafiek van \bar{c} uitgezet tegen de tijd

Wanneer de raaklijn aan de negatieve e-macht in de temperatuurfunctie vergeleken wordt met het lineaire verband van aanslibbing, kan worden opgemerkt dat voor kleine t de verlopen van de functies gelijk zijn. Daardoor geldt dan het volgende:

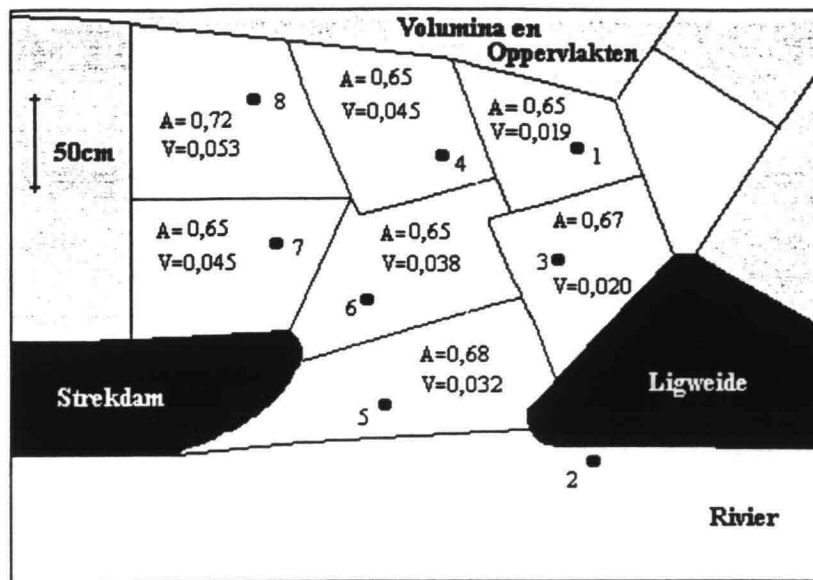
$$\frac{\Delta T}{\Delta T_r} \approx \frac{\bar{c}}{c_r} = \frac{Q_{uirw} t}{V} \quad \left(0 \leq t \ll \frac{V}{Q_{uirw}}\right) \quad (5.7)$$

Dit betekent dat in de beginfase zowel de snelheid van opwarmen als de snelheid van aanslibben in dezelfde mate beïnvloed wordt, zodra Q_{uitw} verandert als gevolg van een ingreep in de haven. Hierdoor is alleen het initiële warmtetransport door de havenmond van belang. Dit gegeven wordt gebruikt om het mechanisme van aanslibbing in de haven te simuleren met behulp van warm water. Er wordt een bestaande situatie gedefinieerd en alle mogelijke varianten worden hiermee vergeleken.

5.5 MEETINSTRUMENTEN EN MEETPROCEDURE

Voor het meten van temperatuurverschillen ter bepaling van de netto-uitwisseling, zijn temperatuuropnemers nodig. In dit geval zijn acht thermokoppels gebruikt. Deze kunnen temperatuurverschillen meten tot $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ nauwkeurig met behulp van voltageverschillen en zijn ingesteld op een bereik van $14 \text{ }^\circ\text{C}$ tot $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Een thermokoppel is een eenvoudige weerstand die gevoelig is voor temperatuurwisselingen. Omdat voor thermokoppels geldt dat hoe kleiner ze zijn, hoe sneller ze reageren is hier gekozen voor kleine thermokoppels met een doorsnede van ca. 1 mm. De thermokoppels zijn regelmatig gecontroleerd door ze te vergelijken met een digitale thermometer, die naast het thermokoppel in de haven werd gelegd.

Zeven thermokoppels zijn gelijkmatig over het balansgebied in de haven verdeeld, zodat ze een zo representatief mogelijk beeld geven van de eventuele veranderingen in temperatuur als gevolg van ingrepen in de bestaande situatie. Vervolgens is de oppervlakte van het balansgebied zo gelijk mogelijk over de thermokoppels verdeeld en is het volume per thermokoppel bepaald. Het laatste thermokoppel staat in de rivier, 0,4 m van de kop van de ligweide. Voor een overzicht van de posities van alle thermokoppels en oppervlakte en volume dat ze innemen in het model in de niet-overstroomde situatie wordt verwezen naar figuur 5.7.



Oppervlakte in m²
Volumina in m³

Figuur 5.7 Positie van de thermokoppels en oppervlakte en volume dat zij innemen in de niet-overstroomde situatie

Alle thermokoppels bevinden zich op de halve waterdiepte, omdat er vanuit wordt gegaan dat de gemeten temperatuur representatief is voor de gemiddelde temperatuur over de diepte. Dit is geverifieerd door voor diverse thermokoppels op verschillende diepten de temperatuur te meten.

Bij de eerste metingen bleek dat de temperatuurmetingen oscillaties vertoonden. Door de digitale thermometer naast de thermokoppels te plaatsen is gekeken of deze oscillaties het gevolg waren van onnauwkeurigheid van de thermokoppels. Dit bleek niet het geval te zijn. Oscillaties in de haven kunnen een mogelijke verklaring zijn.

In de rivier staat op 0,75 m van de kop van de ligweide en 0,5 m van de rechteroever van de rivier een elektromagnetische snelheidsmeter (EMS). Deze bepaalt de snelheid van het stromende water in x-en y richting met behulp van voltverschillen. Hij heeft een bereik van 1 m/s, met een nauwkeurigheid van 10^{-3} m/s. Het meetvolume van de EMS bevindt zich op $\frac{1}{3}$ van de diepte onder het wateroppervlak om beïnvloeding van de bodem te vermijden. Er wordt vanuit gegaan dat de gemeten snelheid de gemiddelde snelheid over de diepte is.

Zowel de thermokoppels als de EMS zijn via een A-D converter aangesloten op een meet PC, waar de signalen met een frequentie van 10 Hz bemonsterd worden. De computer maakt gebruik van het programma DasyLab. DasyLab is een Windows-applicatie, waarmee data kunnen worden gemeten en bewerkt.

In het model wordt de van tevoren bepaalde waterstand ingesteld en vervolgens wordt met behulp van een meetflens op de stroombuis het debiet bepaald. Dit is voor beide situaties gedaan met als resultaat een debiet van 36,8 l/s voor de niet-overstroomde situatie en een debiet van 42,6 l/s voor de overstroomde situatie. De warmwatertoevoer geschiedt via een buizenstelsel dat van een boiler naar het model loopt. In de boiler wordt het water al stromend ca. 5°C opgewarmd. Aan het einde van het buizenstelsel is een slang bevestigd, die buiten het model ligt zolang het water wordt opgewarmd, zie § 5.2. Zodra de proef begint wordt de slang in het model gelegd op een van tevoren vastgestelde plaats. Het debiet door de slang is 1,67 l/s en het water verlaat de slang via een spuitstuk met een oppervlakte van $18,7\text{ cm}^2$ ($17,0\text{ cm} \times 1,1\text{ cm}$). Hierdoor krijgt het een snelheid van 0,89 m/s. Het spuitstuk van de slang ligt op 3,60 m bovenstrooms van de kop van de ligweide in het water.

Uit testen met opgeloste kleurstof is gebleken dat het warme water goed mengt met het water van de rivier en dat er dus een homogeen warme pluim voor de havenmond langs stroomt. Op het moment dat de warmwaterpluim voor de haven langs gaat, is de temperatuurverhoging ongeveer $1,5^{\circ}\text{C}$. Wanneer experimenten met warm water worden uitgevoerd, moet altijd rekening worden gehouden met stromingen als gevolg van dichtheidsverschillen. Naarmate de temperatuurverschillen groter zijn, is de kans op dergelijke stromingen ook groter. Hoewel in dit experiment het initiële temperatuurverschil tussen haven en rivier klein is, is toch met kleurstof de waterbeweging in de havenmond bestudeerd. Uit deze waarnemingen is gebleken dat dichtheidsstromen als gevolg van temperatuurverschillen verwaarloosd kunnen worden.

Later tijdens de experimenten bleek het nodig te zijn om verschillen in verval te meten. Hiervoor is een zogenaamde vervalmeter gebruikt. Dit is een omgekeerde U-buis manometer, die speciaal geschikt is om kleine waterdrukverschillen nauwkeurig te meten. In de rivier worden twee Pitot-buizen gehangen, één net benedenstrooms van de instroming en de ander 7 m stroomafwaarts. Een Pitot-buis meet de energiehoogte. De twee buizen worden met de vervalmeter verbonden via twee slangen, waardoor het verschil in hoogte tussen deze twee wateroppervlakken via de U-buis wordt weergegeven. In de U-buis bevinden zich twee glazen vlotter met daaraan een schaalverdeling. Via een optisch systeem worden deze schaalverdelingen 40 keer vergroot op één scherm weergegeven, zodat het verschil in hoogte zeer nauwkeurig kan worden afgelezen. Voor een schematische weergave van de vervalmeter wordt verwezen naar bijlage II.

Tijdens de experimenten is niet alleen gekeken naar temperatuur en snelheid. Er zijn ook stroombeelden bestudeerd en geanalyseerd. Dit is onder andere gedaan door het videobeelden. Om de stroombeelden duidelijk te visualiseren is gebruik gemaakt van drijvers en van kaliumpermanganaat, zowel in korrelvorm als in opgeloste toestand. De drijvers zijn gebruikt om de patronen en snelheden aan het wateroppervlak te kunnen zien en de korrels kaliumpermanganaat om de stroompatronen aan de bodem te verduidelijken. Het opgeloste kaliumpermanganaat werd gebruikt om de stroming over de diepte te visualiseren.

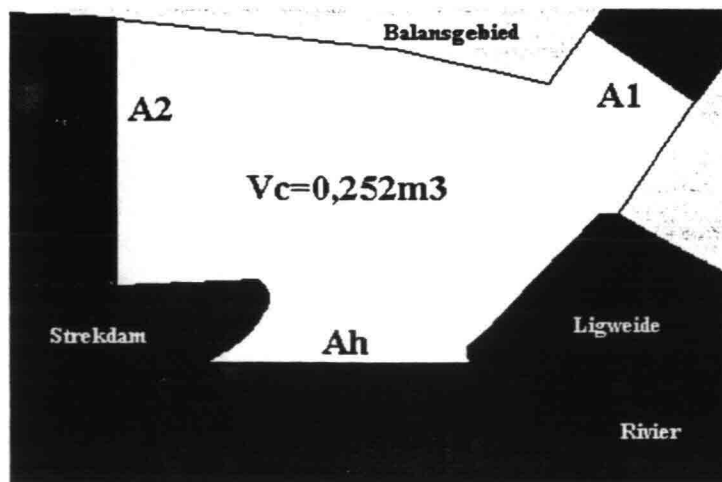
Om elke proef op dezelfde manier te kunnen uitvoeren zijn de proeven aan de hand van een van tevoren opgesteld meetprotocol uitgevoerd. Hierin staat beschreven wat er voor elke proef ingesteld en gecontroleerd moet worden en in welke volgorde de handelingen moeten worden voltrokken. Zo moeten eerst de stroombeelden op video vast worden gelegd. Vervolgens worden de thermokoppels in de haven geplaatst en start de meting met warm water. Deze meting duurt precies 10 minuten. Dan wordt het warme water uitgezet en wordt er nog eens 10 minuten gemeten, terwijl de haven aan het afkoelen is. De tijdsduur is bepaald door de proef diverse malen uit te voeren om te zien wanneer de temperaturen in de haven niet meer aanzienlijk veranderen. Dit bleek iedere keer binnen 10 minuten te gebeuren. Het protocol schrijft ook voor dat na iedere meting de data moeten worden uitgewerkt. Voor details van het meetprotocol wordt verwezen naar bijlage III.

Alle gegevens die relevant zijn voor een proef, zijn vastgelegd in een zogenaamd logboek. Dit beschrijft per proef de datum, documentnaam, gemiddelde snelheid op de rivier, gemiddelde temperatuur in de haven, de exacte temperatuur van het warme water en het verschil tussen gemiddelde temperatuur in de haven en temperatuur van het warme water. Zaken die opvallend zijn of mis zijn gegaan worden ook in dit logboek genoteerd en meegenomen in latere proeven. Het logboek bevat ook een gedetailleerd overzicht van wat op video staat.

5.6 DATAVERWERKING

5.6.1 BEPALING VAN HET WARMTETRANSPORT

Zoals al eerder genoemd is het initiële warmtetransport door de havenmond gebruikt als maat voor de aanslibbing in een rivierhaven. Door de sterk variërende stroomsnelheden en temperaturen, als gevolg van turbulentie, is dit transport niet goed te meten. Om dit toch te bepalen is een balans opgesteld. Het balansgebied wordt gedefinieerd in het centrale deel van het havenbekken en wel op de manier zoals in figuur 5.8 te zien is.



Figuur 5.8 Balansgebied in het havenbekken

Voor de balans geldt:

$$\underbrace{\iint_{A_h} v \Delta T dA}_{\textcircled{1}} = \frac{d}{dt} \left(\underbrace{\iiint_{V_c} \Delta T dV}_{\textcircled{2}} \right) + \underbrace{\iint_{A_1} v \Delta T dA}_{\textcircled{3}} + \underbrace{\iint_{A_2} v \Delta T dA}_{\textcircled{4}} + \underbrace{\text{warmteafgifte}}_{\textcircled{5}} \quad (5.8)$$

Hierin is A_h de natte oppervlakte van de havenmond, zijn A_1 en A_2 de natte oppervlakten van de respectieve doorsneden in het bekken en is V_c het natte volume van het centrale deel. Term ① is het warmtetransport door de havenmond. De lokale stroomsnelheidscomponent loodrecht op het vlak van de doorsnede, in dit geval de havenmond, wordt voorgesteld door v en ΔT is de lokale temperatuurverhoging. Term ② is een bergingsterm en kan worden gemeten met behulp van de zeven thermokoppels in het balansgebied. Term ③ en ④ zijn de respectieve transporten door doorsneden A_1 en A_2 . Met behulp van een houten frame is een deel van de haven geïsoleerd en vervolgens opgewarmd. Drie thermokoppels hebben gedurende twee uur de temperatuurschommelingen in het afgesloten deel gemeten en het bleek dat het afkoelen zo langzaam ging, dat er in verhouding tot optredende transporten de afgifte aan bodem en lucht verwaarloosbaar is. Term ⑤ blijkt dus verwaarloosbaar te zijn.

In bovenstaande balans kunnen de termen ②, ③ en ④ bepaald worden door meten en daarmee kan het warmtetransport door de havenmond bepaald worden in zowel de niet-overstroomde situatie als de overstroomde situatie door variëren van onder andere A_h . Dit wordt in detail besproken in § 5.6.2. Om de effectiviteit van de diverse varianten te kunnen bepalen worden twee grootheden ingevoerd, die karakteristiek zijn voor de uitwisseling tussen haven en rivier, te weten de tijdschaal van het uitwisselingsproces t_0 en de dimensieloze uitwisselingscoëfficiënt k . Beide karakteristieken zullen per geval bepaald worden en vervolgens vergeleken worden. Op deze manier kan wat gezegd worden over de effectiviteit van de diverse geometrische ingrepen.

De tijdschaal van het uitwisselingsproces is afhankelijk van een aantal variabelen en kan gedefinieerd worden als de tijd die nodig is om het balansgebied op te warmen als het warmtetransport door de havenmond gelijk blijft aan het initiële warmtetransport. Hiervoor geldt:

$$t_0 \left(\iint_{A_h} v \Delta T dA \right)_{t=0} = V_c \Delta T_r \quad (t = 0, \Delta T = 0) \quad (5.9)$$

Hierbij wordt het warmtetransport door de havenmond gebruikt dat met behulp van de warmtebalans kan worden uitgerekend. De term $V_c \Delta T_r$ vertegenwoordigt de opwarming van het havenbekken tot ΔT_r , de temperatuurverhoging voor de havenmond op de rivier. Het tijdstip $t = 0$ wordt gedefinieerd door het tijdstip waarop de warmwaterpluim het thermokoppel buiten de haven bereikt.

Om de tijdschaal om te rekenen naar het prototype moet gekeken worden naar de dimensieloze kentallen:

$$\frac{u_r t_0}{h} = f(\text{Re}, \text{Fr}) \quad (5.10)$$

Al eerder is gebleken dat door de keuze van u_r , de invloed van het Reynoldsgetal en het Froudegetal verwaarloosd kan worden. Hierdoor kan een tijd, die is gemeten in het model, worden omgerekend naar een uitwisselingstijd in het prototype met de relatie:

$$\left(\frac{u_r t_0}{h}\right)_p = \left(\frac{u_r t_0}{h}\right)_m \quad (5.11)$$

Hierin stellen de indices p en m respectievelijk prototype en model voor. In dit geval geldt bijvoorbeeld $\frac{h_p}{h_m} = 50$. Op deze manier kan een berekende uitwisselingstijd in het model eenvoudig worden omgerekend naar een uitwisselingstijd in de werkelijkheid. Hoe groter deze tijd, hoe minder uitwisseling optreedt tussen haven en rivier.

Naast de tijdschaal is de dimensieloze uitwisselingscoëfficiënt k van belang, die in nauwe relatie staat tot t_0 . Deze wordt gegeven door:

$$\left(\iint_{A_h} v \Delta T dA\right)_{t=0} = k u_r \Delta T_r A_h \quad (5.12)$$

Ook hier wordt weer het initiële warmtetransport gebruikt, zodat k op eenvoudige wijze kan worden berekend met:

$$k = \frac{V_c}{u_r A_h t_0} \quad (5.13)$$

Bij de gekozen waarden van het Reynoldsgetal en het Froudegetal zal k_p gelijk zijn aan k_m . Hier geldt dat hoe kleiner k is, hoe kleiner de uitwisseling in het systeem. Het slibtransport door de havenmond wordt nu gegeven door:

$$\iint_{A_h} v c dA = k u_r c_r A_h \text{ waarin } c_r = \text{concentratie slib in de rivier} \quad (5.14)$$

In principe is k een betere grootheid dan t_0 , omdat hij onafhankelijk is van het volume van het balansgebied.

5.6.2 UITWERKING VAN DE GEMETEN DATA

Met behulp van DasyLab worden alle data, aangaande snelheid en temperaturen, tegelijkertijd ingelezen en vervolgens in drie aparte documenten weggeschreven: twee voor de temperatuurmetingen en één voor de snelheidsmetingen. De temperatuurmetingen worden in *.ddf en *.asc weggeschreven. Dit zijn de extensies van specifieke DasyLabdata en van data, die in elk gewenst programma kunnen worden ingelezen. De snelheidsmetingen worden alleen in *.ddf weggeschreven. Tijdens het meten worden de voltages van de EMS direct omgerekend naar snelheden en kan het verloop hiervan in een grafiek worden gevolgd. De signalen van de thermokoppels worden pas later in het dataverwerkingsproces omgerekend naar temperaturen, maar tijdens het meten kan wel het verloop van de ruwe data gevolgd worden in een grafiek.

De ruwe data worden omgerekend naar absolute temperaturen, waarna de gemiddelde temperatuur in de haven vóór de warmwaterlozing wordt bepaald. Dit gemiddelde wordt van alle data afgetrokken, zodat voor elk thermokoppel verder kan worden gerekend met ΔT . Na deze bewerking is het zaak de data dusdanig te bewerken dat de bergingsterm en de transporttermen uit de warmtebalans ermee berekend kunnen worden. Bij de bergingsterm gaat het in feite om de maximale afgeleide van $\iiint_{V_c} \Delta T dV$. Zij kan bepaald

worden door het vermenigvuldigen van de temperaturen van alle thermokoppels in het havenbekken met hun bijbehorende watervolumina en ze vervolgens op te tellen. Het thermokoppel dat buiten de haven staat wordt vanzelfsprekend niet meegenomen in het bepalen van de bergingsterm, maar wordt gebruikt om de gemiddelde waarde voor $V_c \Delta T_r$ op de rivier te bepalen. Bovenstaande handelingen worden verricht in speciaal voor dit experiment geschreven programma's in Matlab. Er is een versie voor de niet-overstroomde situatie en een voor de overstroomde situatie. Zie voor een volledige listing van deze programma's bijlagen IV en V.

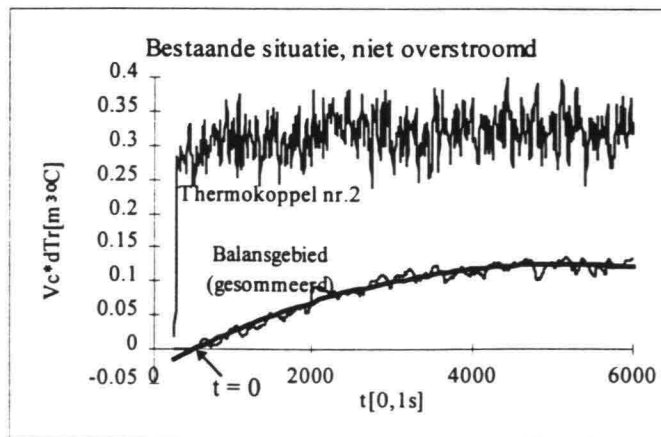
Voor de transporttermen zijn ook twee programma's geschreven, zowel voor de niet-overstroomde situatie als voor de overstroomde situatie. De oppervlakten die hierin gebruikt worden, zijn aan de hand van de bodemligging bepaald, de temperaturen worden gemeten door de twee desbetreffende thermokoppels en de snelheden door de doorsnede zijn uit de video bepaald. Het blijkt dat het transport van warmte door doorsneden A_1 en A_2 in beide situaties, zowel niet-overstroomd als overstroomd, op het tijdstip $t = 0$ verwaarloosbaar is. Om inconsistentie op latere tijdstippen dan $t = 0$ te vermijden, moet de aanname met betrekking tot het bezinken van slib, namelijk dat al het slib bezinkt in het havenbekken, nog wat nader gespecificeerd worden tot: al het slib zal in het balansgebied bezinken. Voor een listing van bovenstaande programma's kunnen bijlagen VI en VII worden bestudeerd.

Als gevolg van de verwaarlozing van de transporttermen en de warmteafgifte-term reduceert de warmtebalans tot de volgende vergelijking:

$$\iint_{A_h} v \Delta T dA = \frac{d}{dt} \left(\iiint_{V_c} \Delta T dV \right) \quad (t = 0) \quad (5.15)$$

Het initiële warmtetransport wordt nu alleen bepaald door de maximale afgeleide van de bergingsterm. Om deze afgeleide te kunnen bepalen, zijn de data uit Matlab ingelezen in Excel waar ze vervolgens in een grafiek zijn geplot. Om de maximale afgeleide van deze grafiek te kunnen bepalen moet een mathematische functie aan de data worden toegekend. Het meest logische zou zijn om een negatieve e-macht te gebruiken, zoals de oplossing voor ΔT in § 5.4, maar deze voldeed niet. Na proberen bleek een derde-graads-polynoom het best te passen bij de gemeten data. De vergelijking van dit polynoom kan gebruikt worden om de maximale afgeleide te bepalen met een rekenprogramma in Excel. Deze afgeleide bleek zich voor elke variant te bevinden op het tijdstip $t = 0$. Met behulp van deze afgeleide worden daarna t_0 en k bepaald, zodat de varianten vergeleken kunnen worden. Zie voor een voorbeeldgrafiek en een voorbeeld van het bepalen van t_0 en k figuur 5.9.

$\iint_{A_h} v \Delta T dA \left[\frac{m^3}{s} \cdot ^\circ C \right]$	$V_c \cdot \Delta T_r \left[m^3 \cdot ^\circ C \right]$	$t_0 [s]$	$u_r [m/s]$	k - waarde
$5,4 \cdot 10^{-5}$	0,316	$5,8 \cdot 10^3$	0,30	$1,8 \cdot 10^{-3}$



Vergelijking polynoom: $y = 5 \cdot 10^{-14} t^3 - 6 \cdot 10^{-9} t^2 + 6 \cdot 10^{-5} t - 0,0285$

Figuur 5.9 Grafiek van data met derde-graads-polynoom en bepalen van t_0 en k -waarde

Een blokkenschema van de gehele procedure bevindt zich in bijlage VIII.

5.7 MEETPROGRAMMA

De hier gepresenteerde varianten zijn voor een deel tot stand gekomen met behulp van de brainstormsessie "Oplossingen en gereedschappen" (Waterloopkundig Laboratorium, 1996b). Tijdens deze sessie is een aantal oplossingen gegenereerd waarnaar men meer onderzoek wilde verrichten. De overgebleven varianten zijn na literatuuronderzoek en gedurende de experimenten ontwikkeld en geoptimaliseerd. Voor een aantal varianten is zowel de niet-overstroomde situatie als de overstroomde situatie bekeken. Hieronder volgt een overzicht van de toegepaste varianten met een korte toelichting. Een meer uitgebreide toelichting volgt in hoofdstuk 6.

- *Geleidescherm (Current Deflecting Wall, CDW)*; een gekromd scherm staat in de stroming om de stroming op een dusdanige manier te geleiden dat de neer in de havenmond wordt onderdrukt.
- *Paalscherm*; circa 40 m van de kop van de ligweide staat een paalscherm, dat de snelheid plaatselijk verlaagt
- *Rechte drempel*; een rechte drempel ligt zo in de havenmond dat hij in het verlengde van de oever de ligweide verbindt met de strekdam
- *Gekromde drempel in de havenmond*; een gekromde drempel ligt ongeveer halverwege de havenmond
- *Gekromde drempel met dam in de havenmond*; een gekromde drempel ligt halverwege de havenmond in combinatie met een dam, die wat verder naar buiten ligt en aansluit op de strekdam.
- *Gekromde drempel met paalscherm op kop van ligweide*; de gekromde drempel ligt in de havenmond en op de kop van de ligweide staat het paalscherm, zoals boven genoemd
- *Dam op de ligweide*; een 1 m hoge dam ligt op de oever van de ligweide om de stroming in de overstroomde situatie te geleiden

In tabel 5.1 staat welke varianten in welke situatie zijn gemeten en of ze geoptimaliseerd zijn of niet.

Variant	Niet overstroomd	Over- stroomd
Bestaande situatie	+	+
Geleidescherm	+ *	+
Paalscherm	+	+
Rechte drempel voor de havenmond	+	-
Gekromde drempel in de havenmond	+ *	+
Gekromde drempel en dam in de havenmond	+ *	+
Gekromde drempel met paalscherm op kop van ligweide	+	-
Bestaande situatie met dam op ligweide	-	+
Gekromde drempel met dam op ligweide	-	+
Gekromde drempel met dam met dam op ligweide	-	+

*Tabel 5.1 Meetprogramma, +uitgevoerd; -niet uitgevoerd; * geoptimaliseerd*

5.8 RANDVOORWAARDEN EN AANNAMEN SCHAALMODEL

In dit hoofdstuk is een aantal randvoorwaarden en aannamen aan bod gekomen. Deze worden voor de duidelijkheid samengevat.

RANDVOORWAARDEN

- Het debiet in de niet-overstroomde situatie is 36,8 l/s.
- Het debiet in de overstroomde situatie is 42,6 l/s.
- Het debiet van de warmwatertoevoer is 1,67 l/s.
- Het spuitstuk van de warmwatertoevoer ligt op 3,60 m van de kop van de ligweide.
- Het warme water heeft oorspronkelijk een temperatuur, die 5° C hoger is dan de gemiddelde temperatuur in de haven. Tegen de tijd dat het de havenmond bereikt heeft, is het temperatuurverschil nog 1,5° C .
- Het Reynoldsgetal is groot genoeg om volledig ontwikkelde turbulentie te veroorzaken in het model, namelijk 36.000 in de niet-overstroomde situatie, en 33.600 in de overstroomde situatie.
- Het Froudegetal is voldoende kleiner dan 1, namelijk 0,28 in de niet-overstroomde situatie en 0,17 in de overstroomde situatie.

- De snelheid op de rivier in de niet-overstroomde situatie is gemiddeld 0,30 m/s.
- De snelheid op de rivier in de overstroomde situatie is gemiddeld 0,21 m/s.

AANNAMEN

- De gemiddelde waterstand van 16,84m+NAP (+14 cm in het model, het nulniveau in het model is 10m+NAP) wordt aangenomen als waterstand in de niet-overstroomde situatie.
- Een waterstand van 19m+NAP (+18 cm in het model) wordt aangenomen in de overstroomde situatie.
- De meting van de snelheid is representatief voor de gemiddelde snelheid over de diepte.
- De meting van de temperatuur is representatief voor de gemiddelde temperatuur over de diepte.
- De afgifte van warmte aan bodem en lucht kan verwaarloosd worden.
- De grenzen van het balansgebied liggen zo ver weg dat er op $t = 0$ geen warmtetransport door optreedt.
- Al het slib bezinkt in het balansgebied.
- De transporten door doorsneden A_1 en A_2 op $t = 0$ kunnen verwaarloosd worden.
- Dichtheidsstromen als gevolg van temperatuurverschillen kunnen verwaarloosd worden.
- Oscillaties in de temperatuurregistraties in de haven zijn het gevolg van schommelingen in het model, niet van onnauwkeurigheid van de thermokoppels.

6 RESULTATEN VAN DE METINGEN

6.1 INLEIDING

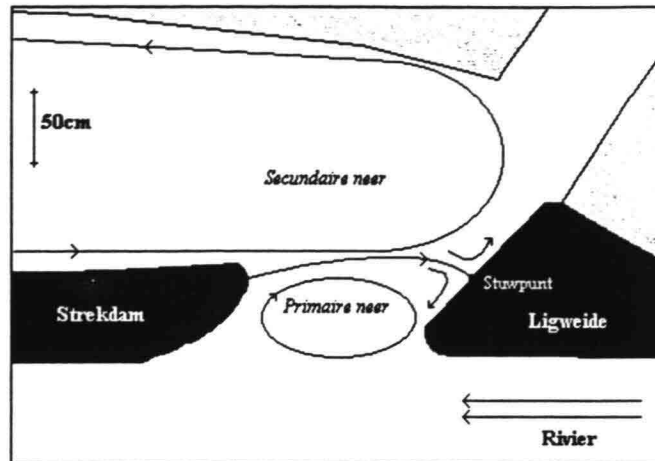
In dit hoofdstuk zullen de resultaten van de metingen uitvoerig worden geanalyseerd. In eerste instantie wordt de bestaande situatie gedefinieerd, zowel voor de niet-overstroomde situatie als voor de overstroomde situatie. Deze dient als referentie bij het bepalen van de effectiviteit van de bestudeerde varianten. Vervolgens worden alle varianten beschreven en worden de stroombeelden geanalyseerd. Ook wordt vermeld welke stadia zijn doorlopen om tot de uiteindelijke variant te komen. Bij het bespreken van de varianten zal volstaan worden met het noemen van de desbetreffende k -waarde en de reductie ten opzichte van de bestaande situatie. In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk zal een overzicht gegeven worden van alle toegepaste varianten en hun karakteristieken.

Wanneer conclusies worden getrokken uit fysisch modelonderzoek moet rekening gehouden worden met de beperkingen van een model. Zo kunnen bepaalde effecten die in de natuur voorkomen niet bekend zijn of onmogelijk gemodelleerd worden. Bovendien kan de gevonden oplossing de situatie dusdanig veranderen dat ongewenste neveneffecten optreden. Het is dus zaak om zorgvuldig om te springen met de resultaten van dit onderzoek en om te proberen controlemogelijkheden in te bouwen. Een goede controle in de niet-overstroomde situatie is bijvoorbeeld dat de waarde voor $\iiint_{V_c} \Delta T dV$ nooit groter kan zijn dan $V_c \Delta T_r$.

6.2 BESTAANDE SITUATIE, NIET OVERSTROOMD

Sinds de aanleg van de jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure is er circa cm aangeslibd en moet er gebaggerd worden om de havens bereikbaar te houden voor alle schepen. Om onderzoek te kunnen doen naar de effectiviteit van eventuele oplossingen moet een referentie situatie worden gedefinieerd. In dit geval is dat de situatie anno '96/'97.

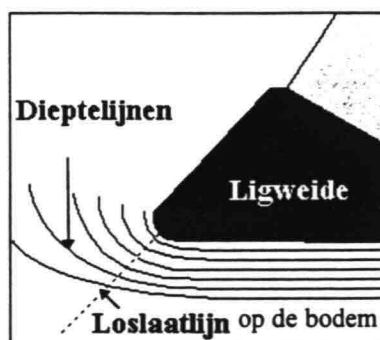
In het schaalmodel zal zich een zekere tijd na begin van stromen een evenwicht instellen volgens de theorie van hoofdstuk 2. Aan de bovenstroomse zijde van de havenmond laat de stroming los in een bepaald punt en wordt een menglaag gevormd, die zich verder stroomafwaarts uitbreidt. Deze menglaag veroorzaakt een roterende stroming in de havenmond, de primaire neer, die op zijn beurt een secundaire neer in het centrale deel van de haven aandrijft. Dit patroon is ook waargenomen door de havenmeester van de jachthaven en is geverifieerd door Gerritsen met behulp van drijvermetingen (Gerritsen, 1996). Voor een schets van het stroombeeld wordt verwezen naar figuur 6.1.



Figuur 6.1 Stroombeeld in bestaande situatie, niet-overstroomd

In het model is de snelheid op de rivier 0,30 m/s en zijn de maximale snelheden in de respectieve neren 0,07 m/s en 0,025 m/s. Als gevolg van de optredende beweging zal sedimentatie van slib optreden in het centrum van de primaire neer en aan de buitenranden van de secundaire neer. Bij de secundaire neer vindt sedimentatie aan de buitenrand plaats, omdat de snelheden daar erg laag zijn. Dit komt overeen met het gemeten en waargenomen bodemprofiel.

Om de invloed van de flauwe taluds in en rond de havenmond beter te bestuderen is de complexe drie-dimensionale waterbeweging op het bovenstroomse talud nader beschouwd. De aandacht is vooral uitgegaan naar het loslaten op het talud. Het blijkt dat een toestromend waterdeeltje tot een bepaald punt de dieptelijn volgt maar van de bodem loslaat als de dieptelijn teveel afbuigt. Uit waarnemingen met behulp van kleurstof op het talud is gebleken dat waterdeeltjes op verschillende diepten dat op verschillende plaatsen doen. Worden deze punten met elkaar verbonden dan kan gesproken worden over een loslaatlijn op het bovenstroomse talud. Aan de havenzijde van de loslaatlijn treedt aan de bodem nauwelijks stroming en turbulentie op terwijl zich in de stroming aan de bodem van de rivier (en daarboven) de menglaag vormt. Het blijkt dat wanneer deze stromingsvorm verstoord wordt, de turbulentie-intensiteit op het talud toeneemt en daarmee de uitwisseling. In figuur 6.2 staat een tekening van de loslaatlijn.



Figuur 6.2 Loslaatlijn op de bodem van het talud

Zoals eerder genoemd is aangenomen dat er geen slibtransport plaatsvindt door doorsneden A_1 en A_2 , omdat al het slib bezinkt in het balansgebied. Uit de stroombeelden blijkt dat de secundaire neer voor jachthaven 't Steel langs gaat en nauwelijks een tertiaire neer aandrijft, waardoor er geen uitwisseling is met deze haven. Voor La Bonne Aventure geldt dat de secundaire neer na verloop van tijd wel degelijk warmte uit het balansgebied voert, maar dat heeft geen invloed op de afgeleide op het moment $t = 0$.

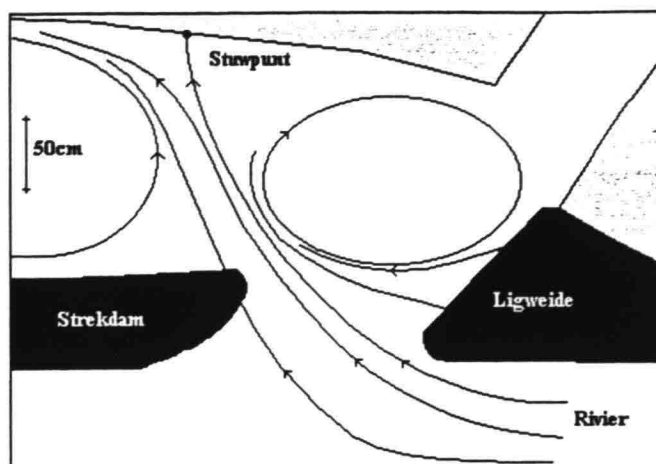
De werkwijze om t_0 en k te berekenen is reeds uiteengezet in § 5.6.1. Voor de natte oppervlakte A_h wordt in alle gevallen de waarde in de bestaande situatie aangehouden, te weten $0,08 \text{ m}^2$. Hier is voor gekozen, zodat de daadwerkelijk reductie ten opzichte van de bestaande situatie wordt bepaald. In principe wordt de reductie namelijk nog kleiner wanneer in het geval van bijvoorbeeld een drempel een kleinere A_h wordt gebruikt. Voor de snelheid van de rivier geldt iets dergelijks. Hier wordt de gemeten waarde genomen zolang deze tussen $0,29 \text{ m/s}$ en $0,32 \text{ m/s}$ ligt. Als de snelheid daarboven komt, wordt de waarde van de bestaande situatie genomen, $0,30 \text{ m/s}$. Hieronder volgt een tabel met de karakteristieken voor de bestaande, niet-overstroomde situatie.

NIET OVERSTROOMDE SITUATIE	$\iint v \Delta T dA$ [$\text{m}^3/\text{s} \cdot ^\circ\text{C}$]	$V_c \Delta T_r$ [$\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$]	t_0 [s]	u_r [m/s]	K-WAARDE	REDUCTIE
<i>Bestaande situatie</i>	$5,4 \cdot 10^{-5}$	0,32	$5,8 \cdot 10^3$	0,30	$1,8 \cdot 10^{-3}$	---

Tabel 6.1 Karakteristieken van de bestaande, niet-overstroomde situatie

6.3 BESTAANDE SITUATIE, OVERSTROOMD

Het stroombeeld dat ontstaat in de overstroomde situatie wijkt in hoge mate af van dat in de niet-overstroomde situatie. Dit is het gevolg van het onderlopen van de ligweide en de strekdam. Daardoor ontstaat er door de havenmond een straalstroom in de richting van het centrale deel van de haven, die zich splitst aan de oever, ter hoogte van de benedenstroomse zijde van de havenmond. Aan beide zijden van deze splitsing vormt zich een grote neer, waarvan een zowel de havenmond als het centrale havenbekken beslaat en de ander La Bonne Aventure. Het water, dat over de strekdam de haven binnenkomt, stroomt direct door naar La Bonne Aventure. In figuur 6.3 staat een schematische weergave van het stroombeeld.



Figuur 6.3 Stroombeeld in bestaande situatie, overstroomd

Om het stuwpunt in het havenbekken op de juiste plaats te krijgen zijn met behulp van bakstenen de overlaten in het model ingesteld. Ook op de kop van de strekdam is een baksteen geplaatst. De juiste plaats van het stuwpunt gedurende hoogwater is waargenomen door de havenmeester en een werknemer van Adviesbureau Brouwers. Drijfvuil dat zich vastzet aan de steigers, steunt deze waarneming en ook het bodemprofiel bevestigt dit beeld (Gerritsen, 1996).

De loslaatlijn, zoals deze zich voordoet in de niet-overstroomde situatie, is in dit geval niet te definiëren.

De metingen in de overstroomde situatie zijn minder nauwkeurig dan in de niet-overstroomde situatie, doordat in dit geval een aanzienlijke hoeveelheid warm water via de ligweide de haven inkomt. Het water voor de havenmond heeft een temperatuurverhoging van $1,5^{\circ}\text{C}$, terwijl het water dat over de ligweide aankomt een temperatuurverhoging heeft van 4°C . De resultaten van de overstroomde situatie zullen dan ook niet in exacte cijfers gegeven worden en bovendien niet vergeleken worden met de niet-overstroomde situatie. Ze kunnen wel onderling vergeleken worden, maar daar is voorzichtigheid bij geboden, om de boven genoemde reden. Het belang van de overstroomde situatie is echter niet zo groot. Het betreft maar circa 20% van de gehele meerjarige aanslibbing (geschat, Gerritsen, 1996).

Voor de oppervlakte van de havenmond wordt in alle situaties een waarde van $0,17\text{ m}^2$ aangehouden om dezelfde reden als bij de niet-overstroomde situatie. Dit is de havenmond met een waterstand van +18cm en daarbij opgeteld de natte doorsnede boven de ligweide. In onderstaande tabel 6.2 staan de karakteristieken vermeld van de bestaande, overstroomde situatie.

OVERSTROOMDE SITUATIE	$\iint v \Delta T dA$ [m ³ /s°C]	$V_c \Delta T_r$ [m ³ °C]	t_0 [s]	u_r [m/s]	K-WAARDE	REDUCTIE
<i>Bestaande situatie</i>	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,17	$9,4 \cdot 10^2$	0,21	$1,3 \cdot 10^{-2}$	---

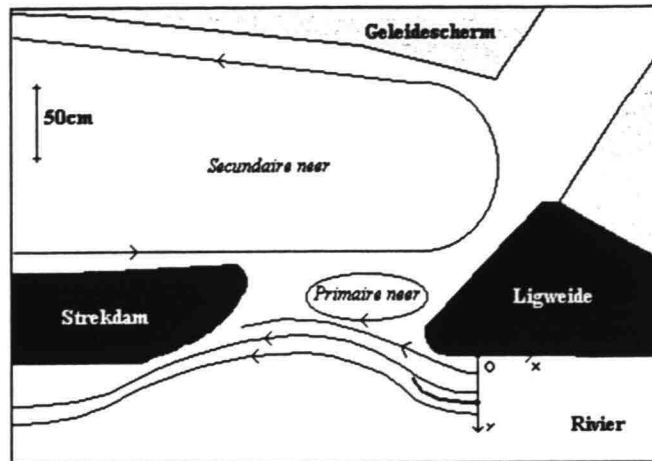
Tabel 6.2 Karakteristieken van de bestaande, overstroomde situatie

6.4 GELEIDESCHERM IN DE RIVIER

6.4.1 OMSCHRIJVING

Een geleidescherm is een gebogen verticaal scherm dat in de buurt van de ingang van de havenmond wordt geplaatst en het in-en uitstromingspatroon dusdanig dient te wijzigen dat er minder slib de haven inkomt. Omdat de stroming afbuigt wordt het ook wel een Current Deflecting Wall (CDW) genoemd. Tot nu toe is het geleidescherm alleen nog in combinatie met een drempel gebruikt in havens waar getij een rol speelt, zoals in Hamburg. In die situatie wordt het overgrote deel van de aanslibbing veroorzaakt door het vullen van de haven tijdens vloed en een klein deel door uitwisseling via de menglaag. De combinatie van het scherm met de drempel zorgt er voor dat de drempel het water met hoge slibconcentraties aan de bodem tegenhoudt en dat het scherm genoeg water uit de bovenste lagen van de waterkolom 'schept' om de haven te vullen tijdens vloed. Er komt dus relatief schoner water de haven binnen. De uitwisseling door de menglaag wordt bij een goed ontworpen geleidescherm verminderd, doordat het scherm de neer in de havenmond onderdrukt en in sommige gevallen zelfs helemaal laat verdwijnen (Winterwerp et al., 1994).

Omdat in dit onderzoek geen sprake is van een getij-effect zal de aandacht alleen uitgaan naar het onderdrukken van de neer in de havenmond. Het resultaat van dit onderzoek is een geleidescherm zoals dat te zien is in figuur 6.4.



Figuur 6.4 Positie van geleidescherm en stroombeeld

De oorsprong in de tekening ligt in het model op 30 cm uit de kop van de ligweide. De bovenstroomse zijde van het geleidescherm bevindt zich op $y = 35$ cm. De benedenstroomse zijde van het scherm bevindt zich op $x = -50$ cm en $y = 17$ cm.

De vorm en positie zijn geoptimaliseerd door nauwgezette studie van de optredende stroombeelden met behulp van kleurstof. Het blijkt dat het stroombeeld erg gevoelig is voor interactie tussen scherm, geometrie van de omgeving en plaatselijke stromingen. In eerder onderzoek heeft Christiansen (Persoonlijke communicatie, 1996) aangegeven dat voor een vermindering van de aanslibbing door toepassen van een geleidescherm een komvormige benedenstroomse vormgeving vereist is. Bij deze jachthaven bleek dat echter niet nodig. Er is ook een S-vormig geleidescherm toegepast, maar dat gaf geen hogere reducties. In figuur 6.4 is het stroombeeld te zien dat ontstaat als gevolg van het plaatsen van het optimale geleidescherm. Hieraan is te zien dat de neer in de havenmond voor een groot deel onderdrukt wordt.

Het geleidescherm is in het model gerealiseerd met behulp van een aluminiumplaat die eenvoudig in de gewenste vorm gebogen kon worden. Om een beeld te geven van de orde van grootte van een dergelijk scherm, volgen hier de afmetingen van het scherm in het model en in het prototype.

	<i>Model</i>	<i>Prototype</i>
Hoogte	16 cm	8 m
Lengte	40 cm	20 m
Dikte	1 mm	5 cm
Straal van de ronding	30 cm	15 m

6.4.2 RESULTATEN

NIET-OVERSTROOMD

Het blijkt dat het geleidescherm in de niet-overstroomde situatie een k-waarde geeft van $1,4 \cdot 10^{-3}$. Dit is een reductie van ca.25% ten opzichte van de bestaande situatie. Zie ook tabel 6.4 in § 6.11.

Uit de resultaten blijkt dat een geleidescherm in de niet-overstroomde situatie relatief weinig reductie geeft. Dit kan verklaard worden door twee oorzaken. Ten eerste is het scherm hier toegepast in een situatie waar het sediment gelijkmatig verdeeld is over de diepte, waardoor het toepassen van de eerder genoemde drempel niet zinvol is. Het positieve effect, het tegenhouden van het sediment in de onderste lagen, waardoor er relatief schoon water de haven inkomt, bestaat dus niet. Ten tweede is het mogelijk dat door de gevoeligheid van het stroombeeld voor de vormgeving van het scherm niet de optimale configuratie is gevonden. Het bleek gedurende het zoeken naar de juiste positie dat, wanneer het scherm slechts enkele centimeters werd verplaatst, de stroming sterk veranderde, soms zelfs zo dat het effect van het scherm negatief werd. Het is dus noodzakelijk dat er modelonderzoek wordt verricht voordat een geleidescherm wordt gebouwd.

OVERSTROOMD

In de overstroomde situatie is de k-waarde $1,2 \cdot 10^{-2}$, wat een reductie inhoudt van 5 tot 15%. Zie ook tabel 6.5 in § 6.11.

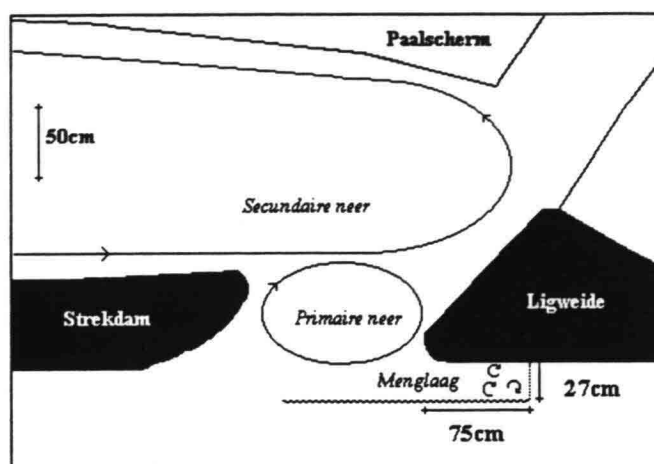
In de overstroomde situatie treedt er weinig reductie op. Dit kan verklaard worden door het feit dat in deze situatie nog steeds de straalstroom door de havenmond optreedt. Deze is weliswaar minder sterk geworden, maar het geleidescherm onderdrukt de straal niet. Bovendien komt er nu ook een onevenredig groot gedeelte van het warme water via de ligweide binnen.

6.5 PAALSCHEM IN DE RIVIER

6.5.1 OMSCHRIJVING

Een paalscherm is een enkele rij palen in de rivier bovenstrooms van de havenmond in een lijn loodrecht op de oever. Deze palen zijn op verschillende afstanden van elkaar geplaatst. De doorlatendheid neemt toe met de afstand uit de oever. Eerder is hier al ervaring mee opgedaan als kustbescherming. Het paalscherm gedraagt zich als een hydraulische ruwheid voor de langsstroming, waardoor deze gedeeltelijk onderdrukt wordt. (Raudkivi, 1996).

In dit onderzoek ontstaat achter het scherm een relatief brede menglaag, die zich stabiel gedraagt waardoor de uitwisseling vermindert. De menglaag gedraagt zich stabiel, omdat de wervels achter het scherm minder groot zijn. Dit wordt veroorzaakt door het meer geleidelijke verloop van snelheid van de rivier naar snelheid van de haven. In figuur 6.5 is een afbeelding te zien van de positie van het scherm en het stroombeeld dat het veroorzaakt.



Figuur 6.5 Positie van paalscherm en stroombeeld

Het paalscherm is in het model gesimuleerd door een houten klem boven water met daarin 19 stokjes die de palen voorstellen. Om een idee te geven van de orde van grootte van het scherm waarnaar onderzoek is gedaan volgen de belangrijkste afmetingen, zowel in het model als in het prototype:

	<i>Model</i>	<i>Prototype</i>
<i>Afstand van de kop</i>	75 cm	37 m
<i>Lengte scherm</i>	27 cm	13,5 m
<i>Diameter palen</i>	0,9 cm	45 cm
<i>Gemiddelde afstand tussen palen</i>	0,7 cm	35 cm

Bij de afstand tussen de palen moet nog vermeld worden dat deze niet constant is. Dit is een gemiddelde waarde. Voor een optimale werking van het scherm moeten de palen namelijk nabij de oever dicht tegen elkaar aan staan met een tussenruimte van 0,1-0,3 maal de diameter van de paal. Aan het einde van het scherm is de ruimte tussen de palen ongeveer één maal de diameter van de paal.

6.5.2 RESULTATEN

NIET-OVERSTROOMD

Het blijkt dat het paalscherm in de niet-overstroomde situatie een k-waarde geeft van $9,1 \cdot 10^{-4}$. Dit is een reductie van ca.50% ten opzichte van de bestaande situatie. Zie ook tabel 6.4 in § 6.11.

De resultaten die in de niet-overstroomde situatie met het paalscherm geboekt kunnen worden zijn aanzienlijk, zeker gezien de eenvoud van de oplossing. Uit het onderzoek blijkt dat de effectiviteit van het paalscherm niet erg gevoelig is voor de dimensionering en positie van het scherm. Variatie in deze geeft dezelfde resultaten. Wat wel van belang is, is de lengte van het scherm. Zodra deze bijvoorbeeld gehalveerd wordt vermindert de reductie aanzienlijk. Het is daarentegen niet zinvol om het paalscherm langer te maken omdat in dat geval de reductie gelijk blijft. Een mogelijke verklaring hiervoor is, dat de extra lengte van het scherm de snelheid van het water wel doet afnemen, maar dat dit water toch al voorbij de haven zou stromen, waardoor de reductie niet toeneemt.

De aanwezigheid van een paalscherm kan in principe een belemmering zijn voor de scheepvaart op een rivier. De vaarweg wordt smaller en de stroming verandert in de buurt van het scherm. In het huidige geval staat het scherm geheel op het talud van de rivier en zal de eigenlijke vaarweg dus niet kleiner worden. Wat niet te vermijden is, is dat schippers automatisch wat verder van de kant gaan varen. Dit kan een ongewenste situatie opleveren. De invloed van het scherm op de hoofdstroming is minimaal. Alleen direct achter het scherm verandert de stroming.

OVERSTROOMD

In de overstroomde situatie is de k -waarde $1,3 \cdot 10^{-2}$, wat een reductie inhoudt van 0 tot 10%. Zie ook tabel 6.5 in § 6.11.

Voor de overstroomde situatie geldt bij het paalscherm gedeeltelijk hetzelfde als bij het geleidescherm. De reductie is nog minder in het geval van het paalscherm, omdat de straalstroom door de havenmond niet onderdrukt wordt.

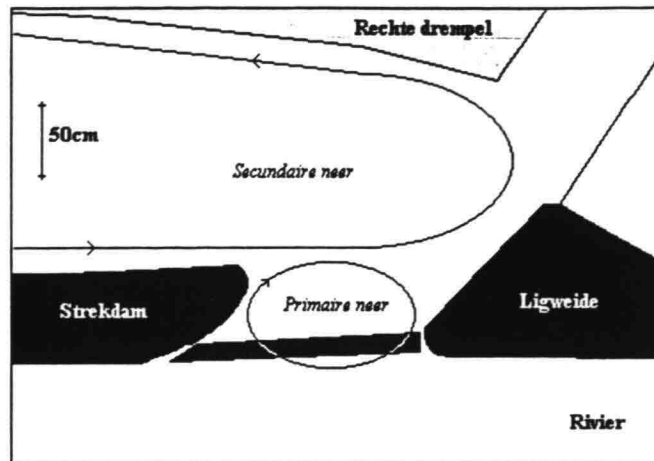
6.6 RECHTE DREMPEL IN DE HAVENMOND

6.6.1 OMSCHRIJVING

In de theorie van aanslibbing valt op dat de natte doorsnede van de havenmond daarin een grote rol speelt. Aanslibbing neemt ongeveer evenredig af met een afname van de natte oppervlakte. Vandaar dat ook de effecten van een drempel in de havenmond zijn onderzocht. Omdat het slib buiten de haven gehouden moet worden wordt de drempel op de rand van de havenmond gelegd, op de verbindingslijn tussen de oevers van ligweide en strekdam. Het laagste deel van de drempel is 12,5 m breed en ligt op 14,5m+NAP, wat resulteert in een diepte van ten minste 2,35 m boven de drempel bij de gemiddelde waterstand van 16,84m+NAP. De uiteinden van de drempel komen niet hoger dan de strekdam of ligweide.

Het stroombeeld dat ontstaat bij toepassing van de drempel wijkt niet veel af van het stroombeeld zonder drempel, met dat verschil dat in beide neren de snelheden iets afnemen. Er ontstaat nog steeds een menglaag, die een primaire neer aandrijft. In dit geval

roteert de neer voor een deel boven de drempel. Voor een beeld van de drempel en het stroombeeld wordt verwezen naar figuur 6.6.



Figuur 6.6 Positie van rechte drempel en stroombeeld

Om de drempel eenvoudig aan te kunnen brengen en te veranderen, is gebruik gemaakt van 'zandzakjes', dikke panty's gevuld met grof zand. Hiermee konden alle gewenste soorten drempels in de haven gelegd worden. In een later stadium is ook nog met steenslag gewerkt met een $D_{n_{50}}$ van 9,8 mm om de drempel wat realistischer te maken. Het bleek dat dat geen verschil maakte in effectiviteit van de drempel.

6.6.2 RESULTATEN

NIET-OVERSTROOMD

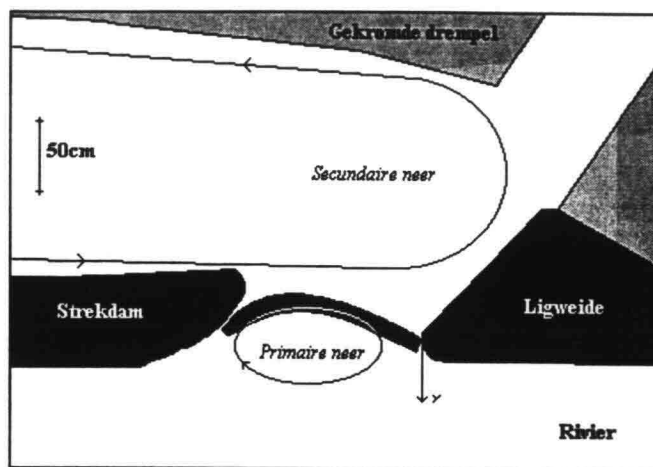
Het blijkt dat de rechte drempel in de niet-overstroomde situatie een k-waarde geeft van $1,3 \cdot 10^{-3}$. Dit is een reductie van ca.30% ten opzichte van de bestaande situatie. Zie ook tabel 6.4 in § 6.11. De rechte drempel is niet gemeten in de overstroomde situatie.

De reductie is niet verbazingwekkend gezien het feit dat de rechte drempel ongeveer 25% van de natte doorsnede heeft afgesloten. Hier wordt bevestigd dat aanslibbing in een haven min of meer recht evenredig is met de natte doorsnede.

6.7 GEKROMDE DREMPEL IN HAVENMOND

6.7.1 OMSCHRIJVING

Het is gebleken dat een drempel een reductie geeft die recht evenredig is met de oppervlakte die hij afsluit. In een poging de primaire neer buiten de haven te isoleren met een drempel om zo de reductie groter te maken is een gekromde drempel ontstaan die wat verder de haven inligt. Het laagste deel is 12,5 m breed en ligt op 14,5m+NAP. De primaire neer is inderdaad geïsoleerd buiten de haven en drijft bijna geen secundaire neer aan. In figuur 6.7 staat een tekening van de drempel en het stroombeeld dat ontstaat.



Figuur 6.7 Positie van gekromde drempel en stroombeeld

In de tekening van de drempel is een oorsprong aangegeven. Met behulp van de schaal kan vanuit hier een grid over de tekening worden gelegd om de exacte locatie te bepalen.

De snelheden in de twee neren zijn respectievelijk 0,07 m/s en 0,01 m/s. Opvallend hieraan is dat de snelheid van de primaire neer gelijk is en dat de snelheid van de secundaire neer duidelijk lager is dan in de bestaande situatie.

Tijdens het onderzoek bleek dat de uitwisseling gevoelig is voor de exacte positie van de drempel. Als de drempel te ver in de havenmond ligt, drijft de primaire neer nog steeds een secundaire neer aan, die een snelheid heeft van ongeveer 0,025 m/s. Als hij te ver naar buiten ligt, ligt de primaire neer over de drempel, zoals bij de rechte drempel. Het blijkt ook dat de twee oplopende delen van de drempel nauwkeurig op elkaar afgesteld moeten worden. Als dat niet gebeurt heeft de primaire neer de neiging om alsnog over de drempel de haven in te 'schieten'. De optimale oplossing moet dus gevonden worden door het proberen van diverse posities van de drempel in een schaalmodel. Als de optimale oplossing niet gevonden wordt, blijft in het ongunstigste geval de reductie bestaan door verkleinen van de natte doorsnede.

In het geval van de jachthavens van Roermond kan een tamelijk hoge drempel worden toegepast, omdat de vaargeul in het midden diep is. Dit is niet bij iedere haven het geval.

Er zijn veel havens waar de waterdiepte net voldoende is om de gewenste schepen door te laten. In dat geval zal het moeilijk zijn een drempel toe te passen anderzijds hoeft de drempel niet overal zo hoog te zijn als in Roermond. Het onderzoek leerde dat de vormgeving van de oplopende delen van groter belang is voor het optredende effect dan de hoogte van de drempel. Waarschijnlijk kan voor andere havens met een minder hoge drempel worden volstaan.

Een probleem dat zich voordoet bij een dergelijke drempel is dat het slib kan bezinken in het midden van de primaire neer en daardoor de ruimte voor de drempel opvult. Het gevaar bestaat dat daardoor de neer alsnog over de drempel 'schiets'. Om te kijken of dit daadwerkelijk gebeurt, is de ruimte voor de drempel opgevuld met steenslag. Het blijkt dat de primaire neer dan nog steeds voor de drempel blijft liggen. Bovendien bestaat de kans dat het bezonken slib tijdens hoogwater weer in suspensie wordt gebracht en alsnog wordt meegevoerd. Dit is echter niet met zekerheid te zeggen.

6.7.2 RESULTATEN

NIET-OVERSTROOMD

Het blijkt dat de gekromde drempel in de niet-overstroomde situatie een k-waarde geeft van $5,7 \cdot 10^{-4}$. Dit is een reductie van ca. 70% ten opzichte van de bestaande situatie. Zie ook tabel 6.4 in § 6.11.

Bij het berekenen van de reductie is het thermokoppel dat in de havenmond staat (nr.5) buiten beschouwing gelaten, omdat het niet meer in het balansgebied valt, dat kleiner wordt gemaakt door de drempel. De delen van gebied 5 die nog wel in het balansgebied vallen zijn verdisconteerd in de oppervlakten van thermokoppels nr.3 en nr.6.

De reductie die verkregen wordt met deze drempel is aanzienlijk. Het is gebleken dat de primaire neer nauwelijks een secundaire neer aandrijft. Het water in de haven staat praktisch stil. Er wordt dus weinig sediment van de primaire neer overgebracht naar de secundaire neer, ofwel het havenbekken. Getracht is om een theoretische verklaring te vinden voor het feit dat de primaire neer bijna geen secundaire neer aandrijft ondanks de gelijke snelheden in de primaire neer als in de situatie zonder drempel. Het bleek echter niet mogelijk om op korte termijn, zonder verder onderzoek, een afdoende verklaring te vinden voor de grote reducties als gevolg van de drempel.

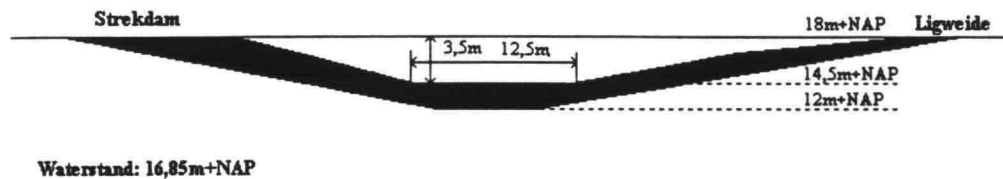
OVERSTROOMD

In de overstroomde situatie is de k-waarde $1,5 \cdot 10^{-2}$, wat een vermeerdering inhoudt van 5 tot 15%. Zie ook tabel 6.5 in § 6.11.

De vermeerdering van aanslibbing in de overstroomde situatie is voor een deel te verklaren door het feit dat door de aanwezigheid van de drempel relatief meer water over de ligweide de haven instroomt. Dit heeft meer uitwisseling tot gevolg in het havenbekken. Een ander deel van de vermeerdering is te verklaren door de gebruikte

rekenmethode. In tabel 6.5 is te zien dat de waarde van $V_c \Delta T_r$, gedurende deze proef laag is vergeleken met de andere proeven. Zoals al eerder genoemd is de waarde voor $V_c \Delta T_r$, in de overstroomde situatie niet erg betrouwbaar. Als de k-waarde wordt berekend met de gemiddelde waarde van $V_c \Delta T_r$, (0,155), wordt de k-waarde $1,4 \cdot 10^{-2}$. Dit is slechts een vermeerdering van 2%. Zie ook de waarden tussen haakjes in tabel 6.5 in § 6.11.

Omdat de gekromde drempel een van de mogelijke oplossingen lijkt te zijn voor het probleem van jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure, is in figuur 6.8 een gedetailleerde tekening weergegeven met de afmetingen, die nodig zijn om de drempel te construeren.

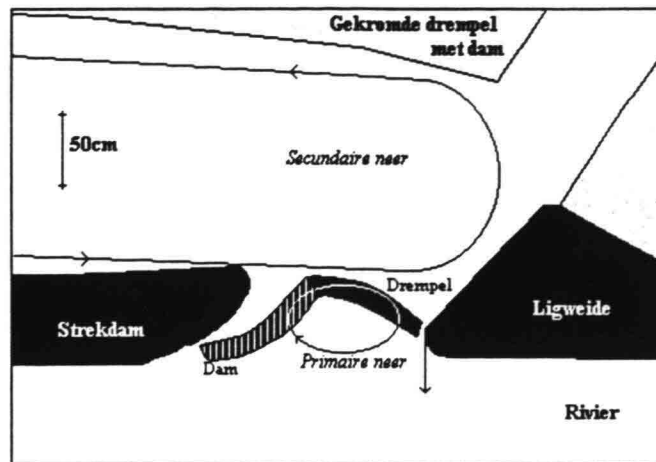


Figuur 6.8 Detailtekening gekromde drempel

6.8 GEKROMDE DREMPEL MET DAM IN DE HAVENMOND

6.8.1 OMSCHRIJVING

De uitwisseling zou wellicht nog meer gereduceerd kunnen worden door het gedeeltelijk helemaal afsluiten van de havenmond. Vanuit de strekdam wordt een dam uitgebouwd ter hoogte van de strekdam tot aan het begin van het laagste deel van de oorspronkelijke gekromde drempel. Het overgebleven deel van de gekromde drempel blijft ongewijzigd. Het blijkt dat de dam een kromming moet hebben tegengesteld aan de kromming van de drempel. Is dat niet het geval dan wordt de neer in zo'n sterke mate gestuurd dat hij over de drempel 'schiet'. De combinatie dam en drempel blijkt ook gevoelig te zijn voor verandering van de vormgeving. Voor aanslibbing voor de drempel geldt hetzelfde als bij de gewone gekromde drempel. In figuur 6.9 staat een tekening van de constructie tezamen met het stroombeeld.



Figuur 6.9 Positie van gekromde drempel en dam en stroombeeld

Ook in deze tekening is een oorsprong aangegeven, zodat de exacte locatie bepaald kan worden met een grid.

6.8.2 RESULTATEN

NIET-OVERSTROOMD

Het blijkt dat de gekromde drempel met dam in de niet-overstroomde situatie een k -waarde geeft van $3,3 \cdot 10^{-4}$. Dit is een reductie van ca.80% ten opzichte van de bestaande situatie. Zie ook tabel 6.4 in § 6.11.

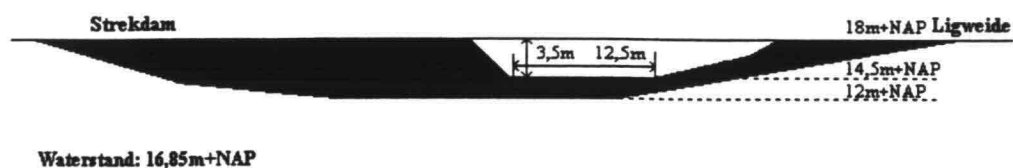
De verwachte extra reductie treedt hier op. Door het verder afsluiten van de havenmond neemt de uitwisseling in de niet-overstroomde situatie af.

OVERSTROOMD

In de overstroomde situatie is de k -waarde $2,2 \cdot 10^{-2}$, wat een vermeerdering inhoudt van 60 tot 70%. Zie ook tabel 6.5 in § 6.11.

Voor de k -waarde in de overstroomde situatie geldt hetzelfde als wat bij de gekromde drempel is gezegd. Met gebruikmaking van de gemiddelde waarde van 0,155, wordt de k -waarde $1,8 \cdot 10^{-2}$. Dat is een vermeerdering van 25 tot 35%. Dit is nog steeds veel, maar wel aanzienlijk minder dan de k -waarde in de bestaande situatie. Zie ook de waarden tussen haakjes in tabel 6.5 in § 6.11.

Omdat de gekromde drempel in combinatie met de dam een van de mogelijke oplossingen lijkt te zijn voor het probleem van jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure, is in figuur 6.10 een gedetailleerde tekening weergegeven met de afmetingen, die nodig zijn om de drempel met dam te construeren.

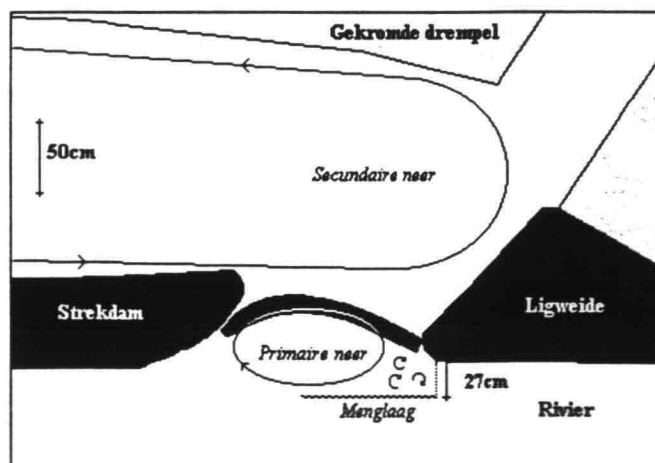


Figuur 6.10 Detailtekening gekromde drempel met dam

6.9 GEKROMDE DREMPEL IN COMBINATIE MET PAALSCHERM OP KOP VAN LIGWEIDE

6.9.1 OMSCHRIJVING

Van de beschreven varianten kunnen combinaties worden toegepast en elke combinatie zal waarschijnlijk meer reductie opleveren dan de varianten afzonderlijk. Het zou te ver voeren om al deze mogelijkheden te onderzoeken, maar de combinatie van de gekromde drempel en het paalscherm is toch onderzocht in verband met de mogelijke toepassing bij de jachthavens te Roermond. In dit geval staat het paalscherm als beschreven in § 6.5.1 op de kop van de havenmond. Er wordt gebruik gemaakt van het feit dat het paalscherm de snelheid voor de havenmond reduceert, waardoor de snelheden in de primaire neer verder afnemen en de aandrijving voor de secundaire neer nog minder wordt. In figuur 6.11 staat een tekening van de drempel en het scherm en het daardoor ontstane stroombeeld.



Figuur 6.11 Positie van gekromde drempel en paalscherm en stroombeeld

6.9.2 RESULTATEN

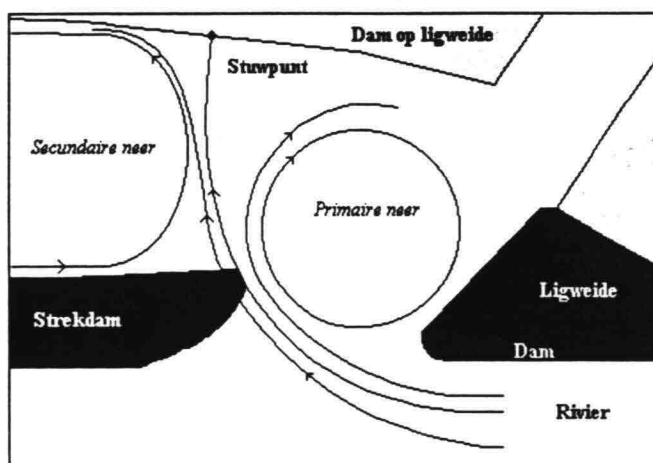
NIET-OVERSTROOMD

Het blijkt dat de gekromde drempel in combinatie met het paalscherm in de niet-overstroomde situatie een k -waarde geeft van $1,7 \cdot 10^{-4}$. Dit is een reductie van ca. 90% ten opzichte van de bestaande situatie. Zie ook tabel 6.4 in § 6.11.

De reductie die hier optreedt is een logisch gevolg van het goed toepassen van een combinatie van twee werkende varianten.

6.10 DAM OP LIGWEIDE IN OVERSTROOMDE SITUATIE

Omdat ongeveer 20% van de aanslibbing in de haven waarschijnlijk ontstaat tijdens hoogwater is ook onderzoek verricht naar het verminderen van aanslibbing ten tijde van hoogwater. Het aanbrengen van een 1 meter hoge dam langs de oever van de ligweide blijkt goede resultaten te geven in de overstroomde situatie. Het gevolg van de dam is dat het stroombeeld van de niet-overstroomde situatie min of meer hersteld wordt. Er ontstaat in de havenmond weer een primaire neer, die op zijn beurt weer een secundaire neer aandrijft. De straalstroom is nog steeds aanwezig, maar stroomt minder hard. Voor een tekening van de dam en het ontstane stroombeeld wordt verwezen naar figuur 6.12.



Figuur 6.12 Positie van dam op ligweide en stroombeeld

Omdat in het geval zonder dam het probleem met het warme water over de ligweide een rol speelt, kan geen eenduidige uitspraak gedaan worden over de reductie als gevolg van de dam. Hieronder zullen twee uitersten voor de bestaande situatie met de dam op ligweide besproken worden. De eigenlijke waarde zal daar ergens tussenin liggen. Voor de varianten met de gekromde drempel en de gekromde drempel plus dam in combinatie met de dam op de ligweide kunnen op analoge wijze de twee uitersten bepaald worden.

Neem aan dat in de bestaande situatie de hogere temperatuur over de ligweide geen rol speelt. Met andere woorden dat de afname van de k-waarde alleen door de dam op de ligweide veroorzaakt wordt. De reductie zal dan 65% bedragen.

Neem aan dat in de situatie met de gekromde drempel plus dam al het water over de ligweide binnenstroomt en dat de temperatuurverhoging daar 2,5 maal zo groot is. De 'werkelijke' k-waarde is dan $0,022/2,5=0,0088$. De reductie zal dan 45% bedragen.

In tabel 6.3 staan de uiterste waarden voor alle varianten met de dam op de ligweide.

Bestaande situatie + dam op ligweide	45 - 65%
Gekromde drempel + dam op ligweide	40 - 60%
Gekromde drempel plus dam + dam op ligweide	40 - 60%

Tabel 6.3 Uiterste waarden van varianten met de dam op ligweide

Ook hier blijkt dat beide drempels in principe een negatief effect hebben op de uitwisseling ten opzichte van de overstroomde situatie met dam op de ligweide, hoewel hun beider reductie nog steeds aanzienlijk is.

De dam op de ligweide is een oplossing die specifiek voor de havens van Roermond in aanmerking komt. Er zijn namelijk weinig havens met dergelijke lage oevers. Het bezwaar van de dam is dat het een obstakel vormt in de rivier en dat wordt niet toegestaan door Rijkswaterstaat in verband met de afvoer van hoogwatergolven. Metingen met een vervalmeter geven inderdaad aan dat het verhang groter wordt wanneer de dam op de ligweide ligt. Het verval gaat van 0,17 mm naar 0,22 mm in het model. Dit kan omgerekend worden naar een waarde voor de werkelijkheid, maar dat is in dit geval niet nodig omdat het voldoende is om te weten dat het verval toeneemt.

6.11 SAMENVATTING RESULTATEN

In onderstaande tabellen 6.4 en 6.5 staan voor de volledigheid en ter vergelijking de waarden voor het initiële warmtetransport, $V_c \Delta T_r$, t_0 , u_r , de k-waarde en het percentage reductie van de k-waarde nog een keer genoemd voor alle varianten in de niet-overstroomde én de overstroomde situatie.

NIET OVERSTROOMDE SITUATIE	$\iint v \Delta T dA$ [$m^3/s \cdot ^\circ C$]	$V_c \Delta T_r$ [$m^3 \cdot ^\circ C$]	t_0 [s]	u_r [m/s]	K-WAARDE	REDUCTIE
<i>Bestaande situatie</i>	$5,4 \cdot 10^{-5}$	0,32	$5,8 \cdot 10^3$	0,30	$1,8 \cdot 10^{-3}$	---
<i>Geleidescherm</i>	$3,9 \cdot 10^{-5}$	0,32	$7,9 \cdot 10^3$	0,29	$1,4 \cdot 10^{-3}$	25%
<i>Paalscherm</i>	$3,1 \cdot 10^{-5}$	0,33	$1,1 \cdot 10^4$	0,32	$9,1 \cdot 10^{-4}$	50%
<i>Rechte drempel</i>	$3,9 \cdot 10^{-5}$	0,31	$7,9 \cdot 10^3$	0,31	$1,3 \cdot 10^{-3}$	30%
<i>Gekromde drempel</i>	$1,7 \cdot 10^{-5}$	0,33	$1,9 \cdot 10^4$	0,29	$5,7 \cdot 10^{-4}$	70%
<i>Gekromde drempel + dam</i>	$8,0 \cdot 10^{-6}$	0,24	$3,2 \cdot 10^4$	0,30	$3,3 \cdot 10^{-4}$	80%
<i>Gekromde drempel + paalscherm</i>	$5,0 \cdot 10^{-6}$	0,33	$6,1 \cdot 10^4$	0,30	$1,7 \cdot 10^{-4}$	90%

Tabel 6.4 Karakteristieken van de niet-overstroomde situatie

Wat opvalt in deze tabel zijn de lage k-waarden in verhouding tot de k-waarden, die Booiij en Dursthoff vonden in § 3.3. Dit kan misschien verklaard worden door de flauwe taluds en de afgeronde zijden van de havenmond van 't Steel en La Bonne Aventure.

OVERSTROOMDE SITUATIE	$\iint v \Delta T dA$ [$m^3/s \cdot ^\circ C$]	$V_c \Delta T_r$ [$m^3 \cdot ^\circ C$]	t_0 [s]	u_r [m/s]	K-WAARDE	REDUCTIE
<i>Bestaande situatie</i>	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,17	$9,4 \cdot 10^2$	0,21	$1,3 \cdot 10^{-2}$	---
<i>Geleidescherm</i>	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,16	$9,4 \cdot 10^2$	0,24	$1,1 \cdot 10^{-2}$	10 tot 20%
<i>Paalscherm</i>	$1,9 \cdot 10^{-4}$	0,16	$9,7 \cdot 10^2$	0,21	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0 tot 10%
<i>Gekromde drempel</i>	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,14 (0,15)	$8,4 \cdot 10^2$	0,21	$1,5 \cdot 10^{-2}$ ($1,4 \cdot 10^{-2}$)	-5 tot -15% (0 tot -10%)
<i>Gekromde drempel + dam</i>	$1,9 \cdot 10^{-4}$	0,12 (0,15)	$6,6 \cdot 10^2$	0,18	$2,2 \cdot 10^{-2}$ ($1,8 \cdot 10^{-2}$)	-60 tot -70% (-25 tot -35%)
<i>Bestaande situatie + dam op ligweide</i>	$8,4 \cdot 10^{-5}$	0,20	$2,4 \cdot 10^3$	0,23	$4,8 \cdot 10^{-3}$	45 tot 65%
<i>Gekromde drempel + dam op ligweide</i>	$8,2 \cdot 10^{-5}$	0,19	$2,3 \cdot 10^3$	0,21	$5,4 \cdot 10^{-3}$	40 tot 60%
<i>Gekromde drempel + dam + dam op ligweide</i>	$7,6 \cdot 10^{-5}$	0,18	$2,3 \cdot 10^3$	0,22	$5,2 \cdot 10^{-3}$	40 tot 60%

Tabel 6.5 Karakteristieken van de overstroomde situatie

Om een idee te geven van de orde van grootte van het slibtransport in de bestaande situatie volgt hieronder een berekening voor het prototype. De waarden voor de snelheden in de overstroomde en de niet-overstroomde situaties zijn een aanname. De waarde voor de concentratie in de niet-overstroomde situatie is berekend uit de gemiddelde slibvracht per jaar gedeeld door de langjarig gemiddelde afvoer per jaar. Dit geeft een concentratie van 60 g/m^3 . De waarde voor de concentratie in de overstroomde situatie is een schatting. De niet-overstroomde situatie is 51,67 weken van toepassing en de overstroomde situatie 0,33 weken.

<i>Niet overstroomd</i>	<i>Overstroomd</i>
$k = 0,0018$	$k = 0,0134$
$u_r = 0,55 \text{ m/s}$	$u_r = 1,0 \text{ m/s}$
$c_r = 60 \text{ g/m}^3$	$c_r = 150 \text{ g/m}^3$
$A_h = 200 \text{ m}^2$	$A_h = 425 \text{ m}^2$
<i>Slibtransport</i> = $ku_r c_r A_h = 12 \text{ g/s}$	<i>Slibtransport</i> = $ku_r c_r A_h = 854 \text{ g/s}$
<i>Per jaar</i> : $51,67 \cdot 7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 12$	<i>Per jaar</i> : $0,33 \cdot 7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 854$
$= 3,7 \cdot 10^5 \text{ kg} = 370 \text{ ton}$	$= 1,7 \cdot 10^5 \text{ kg} = 170 \text{ ton}$

Met een dichtheid van 500 kg/m^3 voor slib resulteert dit bijvoorbeeld in een laag van 0,2 m per jaar over een oppervlakte van 5000 m^2 .

Als bovenstaande cijfers worden beschouwd, is de overstroomde situatie verantwoordelijk voor 30% van de aanslibbing. Dit komt redelijk overeen met de eerder genoemde schattingen van Gerritsen van 20%.

In tabellen 6.4 en 6.5 worden enkel de reducties per situatie bekeken, niet-overstroomd of overstroomd, in verband met het feit dat de resultaten in de overstroomde situatie minder betrouwbaar zijn. Voor de volledigheid worden in tabel 6.6 nog de netto reducties gegeven van alle varianten. Netto reductie betekent dat is meegenomen dat de overstroomde situatie 20% van de aanslibbing bewerkstelligt. De rechte drempel en de combinatie van gekromde drempel en paalscherm op de kop van ligweide zijn niet gemeten in de overstroomde situatie en komen dus ook niet voor in onderstaande tabel.

Variant	Reductie niet-overstroomd	Reductie overstroomd	Netto reductie
Geleidescherm	25%	10 tot 20%	22 tot 24%
Paalscherm	50%	0 tot 10%	40 tot 42%
Gekromde drempel	70%	-5 tot -15%	53 tot 55%
Gekromde drempel met dam	80%	-60 tot -70%	50 tot 52%

Tabel 6.6 Netto reducties

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Het doel van dit onderzoek was om met behulp van een schaalmodel van de jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure de effectiviteit van in dit onderzoek ontwikkelde ingrepen voor het verminderen van het aanslibbingsprobleem vast te stellen en om zo mogelijk hun werking te verklaren. Bovendien moeten ook de generieke aspecten van de gevonden oplossingen worden beschouwd.

CONCLUSIES MET BETREKKING TOT GENERIEKE ASPECTEN

Omdat de overstromde situatie, zoals deze in dit rapport ter sprake is gekomen, in het algemeen erg zeldzaam is, zullen enkel conclusies worden getrokken met betrekking tot de generieke aspecten van de niet-overstromde situatie. Alleen de algemene conclusie met betrekking tot de dam op de ligweide wordt hier genoemd.

- Flauw aflopende taluds bovenstrooms van en in de havenmond verminderen de turbulentie bij het loslaten, waardoor de uitwisseling via de menglaag ook zal verminderen.
- Een geleidescherm in het zomerbed van de rivier levert een relatief kleine reductie van uitwisseling op en heeft het risico dat wanneer het niet goed wordt geplaatst een negatief effect heeft. Om een verantwoorde keuze te maken voor de positie van het geleidescherm zal altijd een uitgebreid modelonderzoek nodig zijn.
- Een paalscherm in het zomerbed levert, zeker gezien de eenvoud van het ontwerp, een grote reductie op. Bovendien is de uitwisseling weinig afhankelijk van de plaats en vorm van het paalscherm. Voor het ontwerpen van een paalscherm kan worden volstaan met een bureaustudie. Nadeel van het paalscherm is dat het de scheepvaart kan belemmeren.
- Een rechte drempel in het begin van de havenmond vermindert de uitwisseling met ongeveer het percentage waarmee de oppervlakte van de doorsnede afneemt. De positie van de drempel kan eenvoudig met een bureaustudie worden bepaald.
- Een gekromde drempel wat verder de haven in vermindert de aanslibbing in een niet-overstromde situatie sterk. Een modelstudie is nodig om de optimale drempel te bepalen. Een groot voordeel van de drempel is dat hij altijd de aanslibbing zal verminderen, ook als de positie van de drempel niet optimaal is bepaald.
- Een gekromde drempel met een dam versterkt de vermindering van aanslibbing ten opzichte van alleen de gekromde drempel in een niet-overstromde situatie. Voor de benodigde modelstudie geldt hetzelfde als bij de gekromde drempel.
- De combinatie van een gekromde drempel met een paalscherm op de kop van de ligweide vergroot de reductie in verhouding tot de beide oplossingen los van elkaar. Het blijkt dat het toepassen van een weldoordachte combinatie een positief effect heeft.

- Het plaatsen van een dam op een bovenstroomse ondergelopen oever kan de uitwisseling sterk verminderen tijdens hoogwater. Een dergelijke dam kan met een bureaustudie ontworpen worden.

CONCLUSIES MET BETREKKING TOT SPECIFIEKE ASPECTEN 'T STEEL EN LA BONNE AVENTURE

- Een geleidescherp (*ca. 25% reductie*) zal geen goede oplossing zijn voor deze havens. Het effect is erg gevoelig voor plaatsing en eventuele veranderingen in het bed van de rivier kunnen een negatief effect hebben.
- Een paalscherp (*ca. 50% reductie*) voldoet goed in deze situatie. Het is een goedkope oplossing en erg flexibel. Eventueel kan het scherm in combinatie met andere varianten worden toegepast. Een nadeel van het paalscherp is dat het de scheepvaart kan belemmeren.
- Een rechte drempel (*ca. 30% reductie*) is geen optie in deze, omdat er betere alternatieven zijn.
- Een gekromde drempel (*ca. 70% reductie*) is een goede oplossing voor de beide jachthavens. Hij geeft een aanzienlijke reductie en is eenvoudig aan te brengen. De kosten van deze drempel zullen fl 30.000,- tot fl 50.000,- bedragen (Adviesbureau Brouwers). De aanslibbing die eventueel optreedt voor de drempel zal in eerste instantie het stroombeeld weinig beïnvloeden, maar kan op den duur een probleem opleveren.
- Voor de gekromde drempel met een dam (*ca. 80% reductie*) geldt min of meer hetzelfde als voor de gekromde drempel, met dat verschil dat deze combinatie duurder is omdat er meer materiaal nodig is.
- De combinatie van gekromde drempel met paalscherp op de kop van de ligweide (*ca. 90% reductie*) is een goede oplossing voor jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure.
- De dam op de ligweide is een goede oplossing voor de overstroomde situatie, maar heeft als bezwaar dat Rijkswaterstaat er waarschijnlijk niet mee zal instemmen. De dam veroorzaakt namelijk bij hoge afvoer een toename van de hydraulische weerstand.

AANBEVELINGEN

- Verder onderzoek naar het geleidescherm kan in de toekomst wat meer generieke aspecten naar voren brengen
- Nader onderzoek naar de invloed van het paalscherm op de scheepvaart en het snelheidsprofiel dat ontstaat achter het scherm
- Verdere constructieve uitwerking van de gekromde drempel in de havenmond, eventueel in combinatie met het paalscherm
- Onderzoek of de aanslibbing voor de drempel inderdaad zal plaatsvinden en hoe het slib zich gedraagt gedurende hoogwater
- Onderzoek naar de vloeistofmechanische aspecten van de werking van de gekromde drempel
- Bepaling van de benodigde grootte van een schaalmodel en onderzoek naar de mogelijkheden om met een klein schaalmodel een optimale vormgeving van de havenmond te ontwerpen
- Verder onderzoek naar de toepassing van numerieke modellen bij het vinden van oplossingen voor aanslibbing in havens aan rivieren, waarin de nadruk ligt op de 3D-effecten en geometrische details

PARAMETERLIJST

A	Constante, afhankelijk van de definitie van breedte van menglaag	$[-]$
A_h	Natte oppervlakte van de havenmond	$[m^2]$
A_1	Natte oppervlakte van doorsnede 1	$[m^2]$
A_2	Natte oppervlakte van doorsnede 2	$[m^2]$
b	Breedte van de menglaag	$[m]$
B	Breedte van de haven	$[m]$
B_h	Breedte van de havenmond	$[m]$
c	Massaconcentratie	$[g/l]$
\bar{c}	Gemiddelde volumeconcentratie slib in het balansgebied	$[g/l]$
\bar{c}_0	Gemiddelde volumeconcentratie slib in het balansgebied op $t = 0$	$[g/l]$
c_r	Slibconcentratie in de rivier	$[g/l]$
D_{50}	Mediane korreldiameter	$[m]$
D_{macro}	Depositie van slib op macroscopisch niveau	$[kg/s]$
D_{micro}	Depositie van slib op microscopisch niveau	$[kg/m^2 s]$
e_t	Trap-efficiency	$[-]$
E	Hoeveelheid geerodeerd slib	$[kg/m^2 s]$
Fr	Froudegetal	$[-]$
g	Versnelling van de zwaartekracht	$[m/s^2]$
h	Karakteristieke waterdiepte in de havenmond	$[m]$
h_m	Karakteristieke diepte voor de havenmond in het model	$[m]$
h_p	Karakteristieke diepte voor de havenmond in het prototype	$[m]$
k	Dimensieloze uitwisselingscoëfficiënt	$[-]$
k_m	Dimensieloze uitwisselingscoëfficiënt in het model	$[-]$
k_p	Dimensieloze uitwisselingscoëfficiënt in het prototype	$[-]$

L	Lengte van de haven	$[m]$
M	Erosieconstante	$[-]$
M_s	Massa van het slib	$[kg]$
p	Kans dat sediment zich afzet op de bodem	$[-]$
Q	Debiet van een rivier	$[m^3/s]$
Q_i	Debiet van rivier naar haven	$[m^3/s]$
Q_u	Debiet van haven naar rivier	$[m^3/s]$
Q_{uitw}	Uitwisselingsdebiet tussen haven en rivier	$[m^3/s]$
Re	Reynoldsgetal	$[-]$
S	Slibbezwaar	$[kg/s]$
t	Tijdstap	$[s]$
t_0	Tijdschaal van het uitwisselingsproces	$[s]$
T_{neer}	Circulatietijd van een deeltje in een neer	$[s]$
ΔT	Temperatuursverandering van het balansgebied	$[^{\circ}C]$
ΔT_r	Temperatuursverandering op de rivier	$[^{\circ}C]$
u_h	Snelheid in de haven	$[m/s]$
u_m	Snelheid in het midden van de menglaag	$[m/s]$
u_r	Snelheid op de rivier	$[m/s]$
u_s	Bodemschuifsnelheid in de rivier	$[m/s]$
V	Volume balansgebied	$[m^3]$
V_c	Nat volume van het centrale wit geschilderde deel van de haven	$[m^3]$
w_s	Valsnelheid van de afzonderlijke slibdeeltjes	$[mm/s]$
x	Afstand in de menglaag tot loslaatpunt	$[m]$
α	Hoek die de havenmond maakt met de rivier	$[^{\circ}]$
ν	Kinematische viscositeit van water	$[m^2/s]$

LIJST VAN FIGUREN

Hoofdstuk 2

- Figuur 2.1 Uitwisselingsmechanismen tussen haven en rivier
Figuur 2.2 Het ontstaan van wervels in een scheidingsvlak tussen twee stromingen
Figuur 2.3 Vorming van een menglaag (naar Brinkmann, 1989)
Figuur 2.4 Neerstroming (Schlichting, 1965)

Hoofdstuk 3

- Figuur 3.1 Definitie schets havenoriëntatie
Figuur 3.2 Afzetting patronen grof en fijn sediment (naar Langendoen, 1992)
Figuur 3.3 Proefopstellingen havengeometrie met obstakels (naar Dursthoff, 1970)
Figuur 3.4 Proefopstellingen havengeometrie met afronding en
 uitbouw (naar Dursthoff, 1970)

Hoofdstuk 4

- Figuur 4.1 Plattegrond jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure
Figuur 4.2 Schematische weergave havenmond
Figuur 4.3 Afpleisterlaag op de bodem van de Maas

Hoofdstuk 5

- Figuur 5.1 Ligging van het schaalmodel
Figuur 5.2 Foto van het schaalmodel
Figuur 5.3 Vereenvoudigde plattegrond van het schaalmodel
Figuur 5.4 Eerste-orde-systeem van warmte
Figuur 5.5 Grafiek van ΔT uitgezet tegen de tijd
Figuur 5.6 Grafiek van \bar{c} uitgezet tegen de tijd
Figuur 5.7 Positie van de thermokoppels en oppervlakte en volume dat zij
 innemen in de niet-overstroomde situatie
Figuur 5.8 Balansgebied in het havenbekken

Figuur 5.9 Grafiek van data met derde-graads-polynoom en bepalen van t_0 en
k-waarde

Hoofdstuk 6

Figuur 6.1 Stroombeeld in bestaande situatie, niet overstroomd
Figuur 6.2 Loslaatlijn op de bodem van het talud
Figuur 6.3 Stroombeeld in bestaande situatie, overstroomd
Figuur 6.4 Positie van geleidescherm en stroombeeld
Figuur 6.5 Positie van paalscherm en stroombeeld
Figuur 6.6 Positie van rechte drempel en stroombeeld
Figuur 6.7 Positie van gekromde drempel en stroombeeld
Figuur 6.8 Detailtekening gekromde drempel
Figuur 6.9 Positie van gekromde drempel en dam en stroombeeld
Figuur 6.10 Detailtekening gekromde drempel en dam
Figuur 6.11 Positie van gekromde drempel en paalscherm en stroombeeld
Figuur 6.12 Positie van dam op ligweide en stroombeeld

LIJST VAN TABELLEN

Hoofdstuk 3

Tabel 3.1 Sedigraaf metingen, ¹⁾ verkregen door zeven

Hoofdstuk 4

Tabel 4.1 Afvoeren en waterstanden te Roermond

Tabel 4.2 Gemiddelde zandtransporten op de Maas

Hoofdstuk 5

Tabel 5.1 Meetprogramma

Hoofdstuk 6

Tabel 6.1 Karakteristieken van de bestaande, niet-overstroomde situatie

Tabel 6.2 Karakteristieken van de bestaande, overstroomde situatie

Tabel 6.3 Uiterste waarden van varianten met de dam op ligweide

Tabel 6.4 Karakteristieken van de niet-overstroomde situatie

Tabel 6.5 Karakteristieken van de overstroomde situatie

Tabel 6.6 Netto reducties

LITERATUURLIJST

- Allersma, E. et al. (1984). *Simulatie van slib. Literatuurstudie*. Delft: Waterloopkundig Laboratorium.
- Booij, R. (1986). *Metingen van uitwisselingen tussen rivier en haven*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Brukel, R.M.A. et al. (1992). *De Maas. Verleden, heden en toekomst*. Lelystad: Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling.
- Brinkmann, B. (1989). Ein Beitrag zur Bestimmung des Wasseraustausches zwischen Fluss und Hafen in Tidegebieten. *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 70*, pp. 1-150.
- Dursthoff, W. (1970). Über de quantitativen Wasseraustausch zwischen Fluss und Hafen. *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 34*, pp. 194-368.
- Eysink, W.D. & Vermaas, H. (1983). *Computational methods to estimate the sedimentation in dredged channels and harbour basins in estuarine environments*. Delft: Waterloopkundig Laboratorium.
- Gerritsen, A.H.A.M. (1996). *Modelonderzoek aanslibbing 't Steel, met toepassing van TRISULA*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Kuijper, C. et al. (1990). *Erosion and deposition characteristics of natural muds; Sediments from the river Maas (Belfeld)*. Delft: Delft Hydraulics
- Langendoen, E.J. (1992). *Communications on hydraulic and geotechnical engineering*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Lesieur, M. (1993). *Turbulence in fluids*. Dordrecht: @@@@.
- Leussen, W. van (1982). *Onderzoek flokkulatie en valsnelheid. Vooronderzoek slibkolom*. Delft: Waterloopkundig Laboratorium.
- Mosselman, E. & Wang, Z.B. (1994). *Onderzoek Watersnood Maas: deelrapport 6, Rapportnummer Q1858/T1349*, Delft: Waterloopkundig Laboratorium.
- Raudkivi, A.J. (1996). Permeable pile groins. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, Volume 122, No.6*, pp. 267-272.
- Rohr, F. (1933). *Wasser- und sinkstoff-bewegungen in fluss-und seehäfen*. Karlsruhe: Technische Hochschule Karlsruhe.
- Schwarze, H. (1992). *Hydraulic and sedimentological aspects in connection with water exchange processes under tidal conditions*. Gdansk: Polish Academy of Sciences, Institute of Hydroengineering.

Waterloopkundig Laboratorium (1996a). *Haalbaarheidsstudie naar de minimalisatie van de aanslibbing van kleine havens door veranderingen in de vormgeving van de havenmond*. Delft: Waterloopkundig Laboratorium.

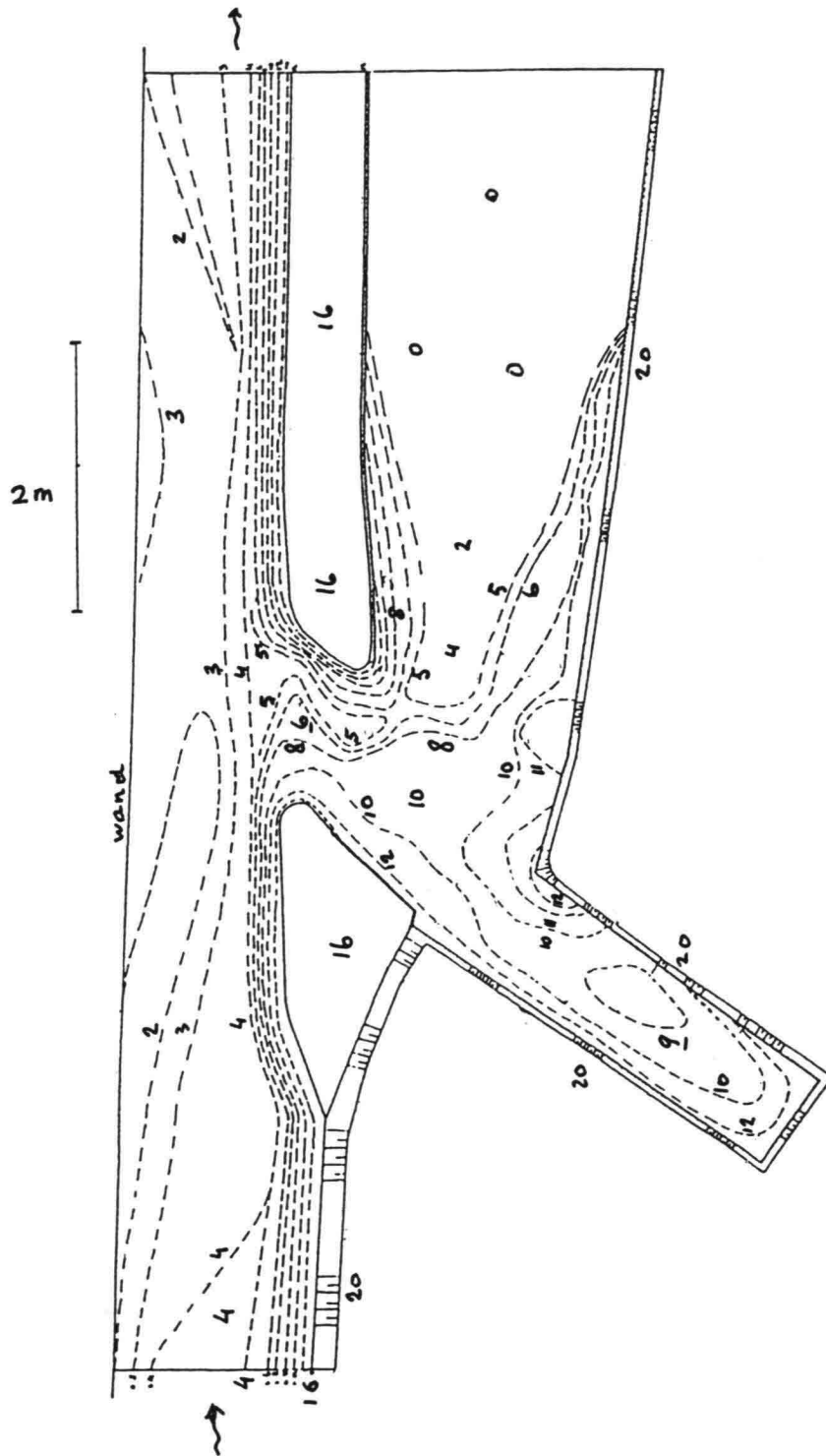
Waterloopkundig Laboratorium (1996b). *Oplossingen en gereedschappen*. Brain-1.wrd/jmc/28-6-1996. Delft: Waterloopkundig Laboratorium.

Winterwerp, J.C. et al. (1994). The current deflecting wall; a device to minimise harbour siltation. *Dock and Harbour Authority, Volume 74*, No 849, pp. 243-247.

Wit, P.J. de (1995). *Liquefaction of cohesive sediments caused by waves*. Delft: Technische Universiteit Delft.

BIJLAGE I

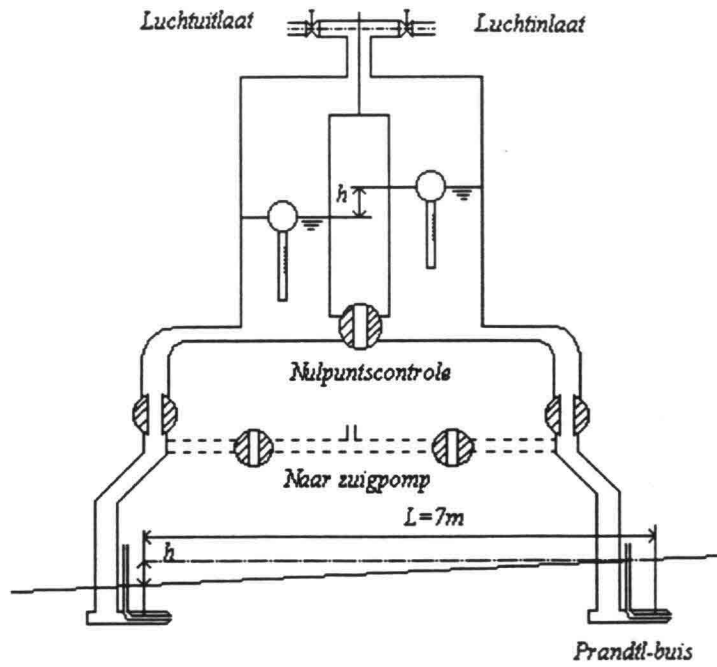
Bodemligging van het schaalmodel 1:50 van jachthavens 't Steel en La Bonne Aventure



Hoogten in cm
Nulniveau is 10m+NAP

BIJLAGE II

VERVALMETER



BIJLAGE III

MEETPROTOCOL

- Stel het debiet in.
- Wacht tot stationaire stroming is ontstaan.
- Controleer de waterstand, stel eventueel het debiet bij.
- Verwijder thermokoppels uit het model. Leg het stroombeeld in de haven vast op video. Kies de injectiepunten zodanig dat een volledig beeld ontstaat van de stroming. Zet ook drijvers in. Leg, indien zinvol, de stroombeelden bij bodem en vrij oppervlak afzonderlijk vast (drijvers en kaliumpermanganaatkorrels op de bodem).
- Plaats de thermokoppels in het model.
- Start de toevoer van warm water en laat het water buiten het model uitstromen, totdat het de juiste constante temperatuur heeft.
- Start de temperatuurs- en snelheidsmeting en verplaats bijna gelijktijdig de toevoer van warm water naar een van tevoren vastgesteld punt in de rivier.
- Beëindig de toevoer van warm water na 10 minuten meten en stop de meting.
- Begin de meting opnieuw zonder warm water toevoer.
- Beëindig de meting na 10 minuten meten.
- Werk na ieder experiment de metingen uit en controleer de video-opnamen.

BIJLAGE IV

Bepalen van verloop van opwarmen in de niet-overstroomde situatie

```
% file inlezen
load d:\simone\dlab\temperat\ascii\nov\nltpa6.asc;
DATA=nltpa6;
clear nltpa6;

% info ingelezen file
S=size(DATA);Column=S(1,2);Num=S(1,1);

%Matrix maken met echte absolute temperaturen
abs=DATA*0.465;
def=abs+19;
DATA=def;

% Met behulp van de eerste twintig waarden een gemiddelde temperatuur bepalen
% en deze aftrekken van de hele matrix
gem1 = mean(DATA(1:20,2));
gem2 = mean(DATA(1:20,3));
gem3 = mean(DATA(1:20,4));
gem4 = mean(DATA(1:20,5));
gem5 = mean(DATA(1:20,6));
gem6 = mean(DATA(1:20,7));
gem7 = mean(DATA(1:20,8));
gem8 = mean(DATA(1:20,9));
gem9 = gem1+gem2+gem3+gem4+gem5+gem6+gem7+gem8;
gem = gem9/8;
dT= DATA-gem;

tijdas=DATA(:,1); %tijdas bewaren

DATA=dT;
outf=fopen('nietov.asc','w');

% Elke tiende waarde (elke sec) vermenigvuldigen met het volume
% van het desbetreffende thermokoppel en vervolgens optellen
% met als resultaat een grafiek met het verloop van alle thermokoppels
increment=10;
for teller=1:(floor(S(1,1)/10));
    TS=increment * teller;
    vol1=0.019;
    vol2=0.252;
    vol3=0.020;
    vol4=0.045;
```

```
vol5=0.032;
vol6=0.038;
vol7=0.045;
vol8=0.053;
som1=DATA(TS,2)*vol1;
som2=DATA(TS,3)*vol2;
som3=DATA(TS,4)*vol3;
som4=DATA(TS,5)*vol4;
som5=DATA(TS,6)*vol5;
som6=DATA(TS,7)*vol6;
som7=DATA(TS,8)*vol7;
som8=DATA(TS,9)*vol8;
som10=som1+som3+som4+som5+som6+som7+som8;
tijdas=TS;
fprintf(outf,'%9.3f %9.3f %9.3f\n',tijdas,som2,som10);
end
    fclose(outf);
    end
```

BIJLAGE V

Bepalen van verloop van opwarmen in overstroomde situatie

```
% file inlezen
load d:\simone\dlab\temperat\ligweide.asc;
DATA=ligweide;
clear ligweide;

% info ingelezen file
S=size(DATA);Column=S(1,2);Num=S(1,1);

%Matrix maken met echte absolute temperaturen
abs=DATA*0.465;
def=abs+19;
DATA=def;

% Met behulp van de eerste twintig waarden een gemiddelde temperatuur bepalen
% en deze aftrekken van de hele matrix
gem1 = mean(DATA(1:20,2));
gem2 = mean(DATA(1:20,3));
gem3 = mean(DATA(1:20,4));
gem4 = mean(DATA(1:20,5));
gem5 = mean(DATA(1:20,6));
gem6 = mean(DATA(1:20,7));
gem7 = mean(DATA(1:20,8));
gem8 = mean(DATA(1:20,9));
gem9 = gem1+gem2+gem3+gem4+gem5+gem6+gem7+gem8;
gem = gem9/8;

dT= DATA-gem;

tijdas=DATA(:,1); %tijdas bewaren

DATA=dT;

outf=fopen('overstr.asc','w');

% Elke tiende waarde (elke sec) vermenigvuldigen met het volume
% van het desbetreffende thermokoppel en vervolgens optellen
% met als resultaat een grafiek met het verloop van alle thermokoppels
increment=10;
for teller=1:(floor(S(1,1)/10));
    TS=increment * teller;
    voll=0.045;
```



```
vol2=0.447;
vol3=0.047;
vol4=0.071;
vol5=0.067;
vol6=0.064;
vol7=0.071;
vol8=0.082;
som1=DATA(TS,2)*vol1;
som2=DATA(TS,3)*vol2;
som3=DATA(TS,4)*vol3;
som4=DATA(TS,5)*vol4;
som5=DATA(TS,6)*vol5;
som6=DATA(TS,7)*vol6;
som7=DATA(TS,8)*vol7;
som8=DATA(TS,9)*vol8;
som10=som1+som3+som4+som5+som6+som7+som8;
tjdas=TS;
fprintf(outf,'%9.3f %9.3f %9.3f\n',tjdas,som2,som10);
end
fclose(outf);
```

BIJLAGE VI

Transport door doorsnede A2 in niet-overstroomde situatie

```
% file inlezen
load d:\simone\dlab\temperat\ascii\nov\nhtpa1.asc;
DATA=nhtpa1;
clear nhtpa1;

% info ingelezen file
S=size(DATA);Column=S(1,2);Num=S(1,1);

%Matrix maken met echte absolute temperaturen
abs=DATA*0.465;
def=abs+19;
DATA=def;

% Met behulp van de eerste twintig waarden een gemiddelde temperatuur bepalen
% en deze aftrekken van de hele matrix
gem1 = mean(DATA(1:20,2));
gem2 = mean(DATA(1:20,3));
gem3 = mean(DATA(1:20,4));
gem4 = mean(DATA(1:20,5));
gem5 = mean(DATA(1:20,6));
gem6 = mean(DATA(1:20,7));
gem7 = mean(DATA(1:20,8));
gem8 = mean(DATA(1:20,9));
gem9 = gem1+gem2+gem3+gem4+gem5+gem6+gem7+gem8;
gem = gem9/8;
dT= DATA-gem;
tijdas=DATA(:,1); %tijdas bewaren
DATA=dT;

outf=fopen('transa3.asc','w');

% Per thermokoppel wordt elke tiende meting vermenigvuldigd
% met het volume van het thermokoppel en de snelheid in dat punt
% De snelheid wordt bepaald aan de hand van video-opnamen
increment=10;

for teller=1:(floor(S(1,1)/10));
    TS=increment * teller;
    opp7=0.09;
    opp8=0.05;
    snel7=0.02;
    snel8=0.025;
```

```
som7=DATA(TS,8)*opp7*snel7;  
som8=DATA(TS,9)*opp8*snel8;  
som10=-som7+som8;  
tijdas=TS;  
fprintf(outf,'%9.3f %9.3f\n',tijdas,som10);  
end  
fclose(outf);  
end
```

BIJLAGE VII

Transport door doorsnede A2 in overstroomde situatie

```
% file inlezen
load d:\simone\dlab\temperat\ascii\ov\nhtpb2b.asc;
DATA=nhtpb2b;
clear nhtpb2b;

% info ingelezen file
S=size(DATA);Column=S(1,2);Num=S(1,1);

% tijd-as
tijd=0.1:0.1:S(1,1)/10;
tijd=tijd/60;

%Matrix maken met echte absolute temperaturen
abs=DATA*0.465;
def=abs+19;
DATA=def;

% dT berekenen met behulp van de eerste tien waarden
gem1 = mean(DATA(1:10,2));
gem2 = mean(DATA(1:10,3));
gem3 = mean(DATA(1:10,4));
gem4 = mean(DATA(1:10,5));
gem5 = mean(DATA(1:10,6));
gem6 = mean(DATA(1:10,7));
gem7 = mean(DATA(1:10,8));
gem8 = mean(DATA(1:10,9));
gem9 = gem1+gem2+gem3+gem4+gem5+gem6+gem7+gem8;
gem = gem9/8;
dT= DATA-gem;

tijdas=DATA(:,1); %tijdas bewaren

DATA=dT;

outf=fopen('transov.asc','w');

% Aan de hand van het oppervlak en dT wordt het transport door
% doorsnede A3 bepaald in overstroomde toestand
increment=10;
for teller=1:(floor(S(1,1)/10));
    TS=increment * teller;
    opp7=0.12;
```

```
opp8=0.04;  
snel7=-0.01;  
snel8=0.03;  
som7=DATA(TS,8)*opp7*snel7;  
som8=DATA(TS,9)*opp8*snel8;  
som10=som7+som8;  
tijdas=TS;  
fprintf(outf,'%9.3f %9.3f\n',tijdas,som10);  
end  
fclose(outf);  
  
end
```

BIJLAGE VIII

DATAVERWERKING

