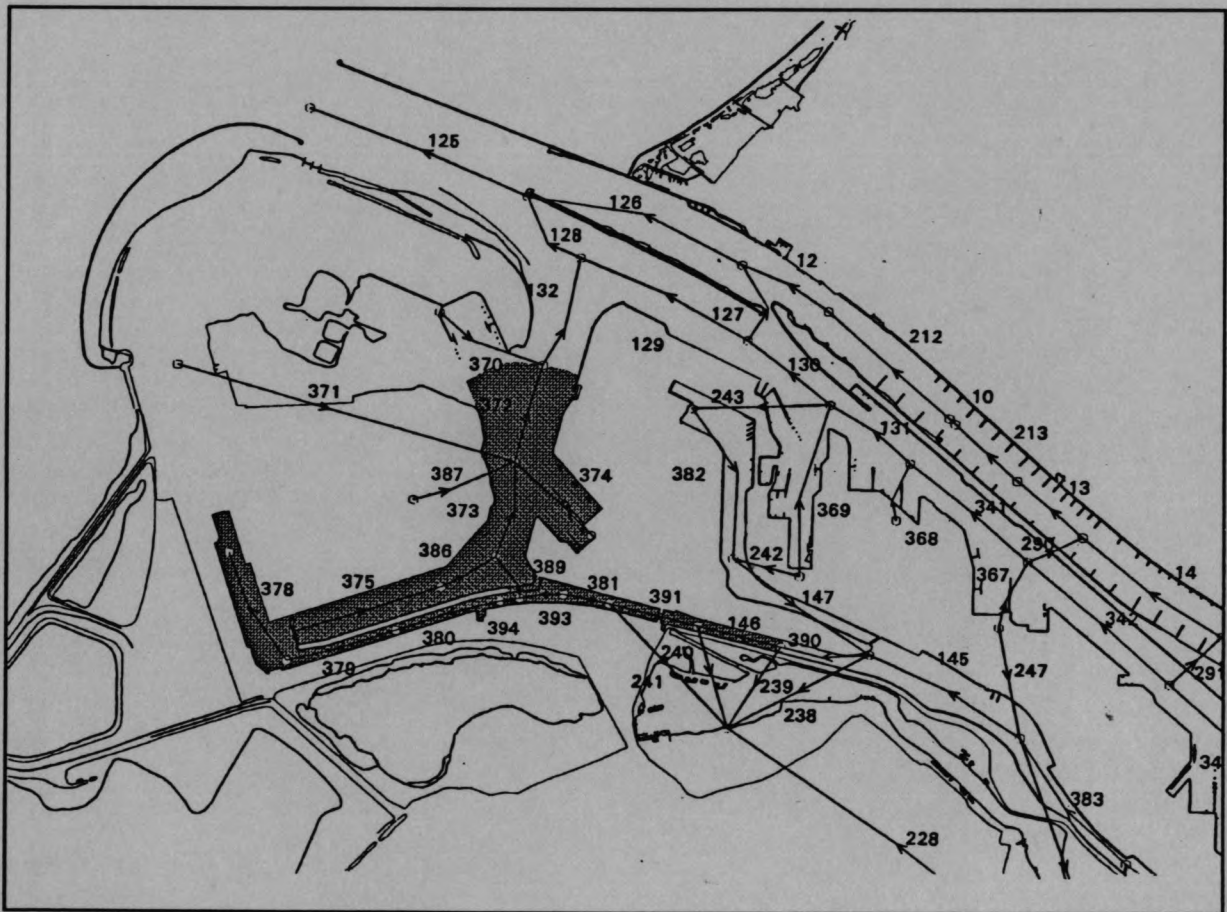


3118

Eindrapport van het afstudeerproject

Hydraulische modellering

Open Beerdam



door: M.H.Marell

M.H. Mareu

Bib. ULM

Hydraulische modellierung
Open Beerdem

Uitgeleend aan:

Naam:

Datum:

Tel.nr:

Bibl. Sectie U/m

CT. h 2.77

Verslag van het afstudeeronderzoek

Hydraulische modellering Open Beerdam

uitgevoerd door M.H. Marell

bij de Vakgroep Waterbouwkunde
van de Faculteit der Civiele Techniek
aan de Technische Universiteit Delft

Het afstudeerproject is uitgevoerd in opdracht van



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Bouwdienst Rijkswaterstaat

Delft, april 1994

Voorwoord

Dit eindrapport is een weergave van de resultaten van het afstudeeronderzoek 'Hydraulische modellering Open Beerdam' bij de sectie Vloeistofmechanica. De sectie Vloeistofmechanica maakt deel uit van de vakgroep Waterbouwkunde van de Faculteit der Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van de Bouwdienst Rijkswaterstaat Utrecht, in samenwerking met Gemeentewerken Rotterdam en het Waterloopkundig Laboratorium Delft. Het onderzoek heeft tot voornaamste doel gehad inzicht te geven in de gevoeligheid van een bestaande hydraulische modellering van de opening in de Beerdam voor veranderingen in de gebruikte parameters, en een globaal uitvoeringsschema voor de opening te bepalen.

De samenstelling van de afstudeercommissie is als volgt:

Prof. dr. ir. G.S. Stelling, <i>voorzitter</i>	sectie Vloeistofmechanica
ir. R.E. Jorissen	Rijkswaterstaat
ir. G.J. Schiereck	sectie Waterbouwkunde

Tijdens het afstudeerproject is voornamelijk gebruik gemaakt van computerprogramatuur van het Waterloopkundig Laboratorium, hetgeen mogelijk was door financiële bijdrage van Gemeentewerken Rotterdam. Verder is dankbaar gebruik gemaakt van de faciliteiten van het Projectbureau SVKW. Een speciaal woord van dank gaat uit naar R.Booij voor zijn uitleg over turbulentiemodellering, naar B.J.Kouwenhoven voor het mogelijk maken van de stageplaats bij de Bouwdienst Rijkswaterstaat en het nodige advies, en naar E.Vermeer van Gemeentewerken Rotterdam voor het meermaals leveren van de randvoorwaarden voor de berekeningen.

De meeste afbeeldingen die bij dit eindrapport horen, staan in een aparte bijlage (Bijlage I) omdat dit de leesbaarheid en de overzichtelijkheid van het rapport ten goede komt. Ter goede orde: in de grafieken zijn indien niets anders vermeld alle snelheden in meters per seconde weergegeven, en alle waterstanden in meters t.o.v. NAP.

M.H. Marell
Delft, april 1994

Samenvatting

Door het besluit om de Europoortkering in combinatie met de Stormvloedkeringen in de Nieuwe Waterweg en het Hartelkanaal te realiseren, zal de Beerdam in 1996 geopend kunnen worden. Deze opening heeft gunstige gevolgen voor de binnenscheepvaart-afwikkeling van en naar de Maasvlakte. Om de gevolgen van de opening voor de waterbewegingen in het benedenrivierengebied te voorspellen zijn tijdsafhankelijke berekeningen gemaakt met een 1D-numeriek waterbewegingsmodel van het gebied dat sinds langere tijd in het programma ZWENDL bestaat. Voor meer gedetailleerde stromingsberekeningen van stroomsnelheden in en nabij de opening zelf, zijn de resultaten van de ZWENDL-berekeningen gebruikt voor het aansturen van een dieptegemiddelde modellering voor het gebied van interesse in het programma TRISULA. Deze berekeningen werden uitgevoerd voor meerdere varianten. De meest opmerkelijke resultaten van de TRISULA-sommen waren

- dat er zich bij een neer bleek te ontwikkelen in de Mississippihaven
- dat er een retourstroom in het westelijk deel van het Hartelkanaal ontstond als gevolg van stoorgolven

Vooral de retourstroom leek in eerste instantie een obstakel voor de scheepvaart. De stoorgolven bleken echter het gevolg van inspeelverschijnselen van het model, zodat in een berekening waarin gebruik werd gemaakt van Riemann-randvoorwaarden de stoorgolven sneller uitdempten, waarna een nagenoeg stromingsvrije westelijke Harteltak geen problemen voor de scheepvaart meer opleverde. Wel werden er door de opdrachtgever nog vraagtekens geplaatst bij het ontstaan van de neer. Mede door het gebruik van de dieptegemiddelde (turbulentie)-modellering was het niet duidelijk of de berekende stroombeelden ook in werkelijkheid zouden optreden. Bovendien was het ZWENDL-model intussen aangepast, en wilde men de resultaten van hiermee aangestuurde TRISULA-berekeningen gebruiken in een gedetailleerd scheepvaartsimulatieonderzoek, zodat men de eerdere modelkeuze onderbouwd wilde zien voordat de nieuwe berekeningen met hetzelfde model zouden worden gedaan. Vervolgens was er tevens de wens naar een onderzoek naar de mogelijke uitvoeringsmethode voor de opening. Deze vragen en wensen hebben geresulteerd in het afstudeerproject 'Hydraulische modellering Open Beerdam'.

Voor het project is als doel gesteld de bestaande modellering van de opening met gebruik van de nieuwe randvoorwaarden te onderzoeken op zijn realiteitswaarde door de gebruikte aannames en parameters aan de hand van de ermee berekende stroombeelden te toetsen. Een tweede doel is om met een keuze voor zo reëel mogelijke berekende stroombeelden tijdens de opening van de Beerdam een uitvoeringsmethode te onderbouwen en de morfologische ontwikkelingen die zich voor zullen doen tijdens deze opening globaal te voorspellen.

Om het eerste doel te bereiken is de toetsing op basis van een keuze voor de meest voor gevoeligheid verantwoordelijk geachte modelleringsparameters en aannames, opgesplitst in drie deelonderzoeken:

- gevoeligheidsonderzoek naar de invloed van de viscositeit
- gevoeligheidsonderzoek naar de invloed van de openingsschematisatie
- onderzoek naar de correctheid van de stationaire aanpak

Ten behoeve van het tweede doel is hieraan een vierde studie aan toegevoegd:

- onderzoek naar een mogelijke uitvoeringsmethode.

Voor de onderzoeken is eerst een stationaire basisberekening met de nieuwe randvoorwaarden gemaakt. De invoer van de nieuwe randvoorwaarden in het model gaf problemen daar de resultaten grote afwijkingen vertoonde van die van het vrij betrouwbare nestmodel in ZWENDL. De eerste twee onderzoeken zijn daarom met aangepaste randvoorwaarden gedaan omdat nauwkeurigheid hiervoor geen rol speelde.

Gevoeligheidsonderzoek naar de invloed van de viscositeit

Er werd al gezegd dat de keuze voor een dieptegemiddelde (2DH) turbulentie modellering van het gebied één van de oorzaken van twijfels met betrekking tot de stroombeelden was. Deze modellering gebeurt met een formulering waarin de zogenaamde turbulentie-viscositeit zorg draagt voor alle turbulente effecten. Deze formulering is niet gebaseerd op analytische geheel correcte berekening, maar berust op aannames een grote vereenvoudigingen behelzen. De gevoeligheid van een model voor veranderingen in de waarde voor deze viscositeit is hierdoor een maat voor de correctheid van de gekozen 2DH-aannames, en dus ook van de keuze voor de 2DH-modellering: door deze aannames er wordt altijd een fout bij de berekening van de 2DH-stroombeelden gemaakt, en alleen wanneer deze fout niet veel invloed heeft op de werking van het model (m.a.w. als het model niet erg gevoelig is voor veranderingen van de parameter) kan zonder meer gesteld worden dat een 2DH-modellering op zijn plaats is. In het gevoeligheidsonderzoek is gebleken dat de stroombeelden in de Mississippihaven sterk beïnvloed worden door kleine veranderingen van de parameter. Dit maakt het bestaande model dus ongeschikt voor het correct weergeven van de stroombeelden in het havenbekken.

Gevoeligheidsonderzoek naar de invloed van de openingsschematisatie

Er zijn in dit onderzoek een drietal profielvarianten in het model getoetst op invloed ervan op de gevoeligheid van het model voor gerichte veranderingen. Een belangrijk aspect is in dit geval de berekening van de stroomsnelheden aan de wanden door het dieptegemiddelde model: er wordt hier gerekend met een zogenaamde no-slip conditie, die de snelheid direct aan de wand nul stelt. Ook dit is een vereenvoudigingsaannahme voor de 2DH-modellering, die niet altijd correct is voor elk model. Voor het onderzoek zijn drie varianten van het diepteprofiel van de opening aan een test onderworpen, waarbij een gridstrook verwijderd werd om een loslaatpunt te simuleren. Het oorspronkelijke model en een model met een steilere helling aan de diepe zijde van de opening bleken zeer gevoelig voor de verandering, terwijl een model waarin een (in werkelijkheid ook geplande) diepe stroomgeul aan de oostzijde van de opening nagenoeg geen gevoeligheden vertoont. Er kan dan ook geconcludeerd worden dat het oorspronkelijke model bij de eerste twee diepteprofielen te gevoelig voor veranderingen is om de stroombeelden met voldoende betrouwbaarheid weer te geven. Wanneer het model van een diepe stroomgeul voorzien wordt, resulteert dit in een meer robuuste schematisatie, waarmee de betrouwbaarheid van de hiermee berekende stroombeelden tevens groter is.

Onderzoek naar de correctheid van de stationaire aanpak

Voor dit onderzoek is een tijdsafhankelijke dieptegemiddelde berekening gemaakt om de gevolgde quasi-stationaire aanpak (het aansturen van een stationaire stromingstoestand door resultaten uit een tijdsafhankelijke berekening) op nauwkeurigheid ervan te controleren. De tijdsafhankelijke berekening vertoont goede overeenkomsten met het nestmodel in ZWENDL,

te zien in Afbeelding 8.2b (Bijlage I). Wanneer de stroombeelden in de Mississippihaven niet maatgevend voor de scheepvaartpassages zijn, kan voor de tijdsafhankelijke modellering worden gesteld dat de nauwkeurigheid hiervan toch nog voldoende is voor het gebruik van de resultaten voor de scheepvaartsimulaties. Verder is er onderzoek gedaan naar de verschillen die optraden tussen de TRISULA- en ZWENDL-resultaten bij de basisberekeningen. Met twee testcases is aangetoond dat deze niet het gevolg konden zijn van overnamefouten in de randvoorwaarden, en ook niet van een verkeerde modellering van de (bij de tijdsafhankelijke berekeningen geconstateerde) stromingen in de westelijke Harteltak. Na zorgvuldige bestudering van het model bleken de afwijkingen het gevolg te zijn van het gebruik van het verkeerd soort randvoorwaarden aan de noordelijke rand. Om de grip op de waterstand in het aanliggende havenbekken (die in de tijdsafhankelijke berekening niet de evenwichtsstand bleek) niet te verliezen in het stationaire geval, moet hier een waterstand opgelegd worden en niet, zoals in de eerdere berekeningen, een snelheidsrand. Met een testberekening is dit bevestigd, doordat met tijdsafhankelijke berekeningen overeenkomende resultaten gevonden werden.

Onderzoek naar een mogelijke uitvoeringsmethode

Voor het onderzoek naar de uitvoeringsmethode zijn voor een aantal uitvoeringsfasen stromingsberekeningen uitgevoerd. De fasen die met het oorspronkelijke TRISULA-model zijn doorgerekend laten zien dat een uitvoeringswijze beginnend in het midden van de toekomstige opening tot hevige dwarsstromingen leidt, en dat een openingsuitvoering beginnend in de buurt van de huidige oostelijke aansluiting minder aanval op oevers (en scheepvaart) teweeg zal brengen. Een globale morfologische beschouwing van de fasen laat zien dat plaatselijk zeer snelle ontgrondingen te verwachten zijn, al beginnend bij een kleine overstroming van de resterende initiële opening. Deze ontgrondingen lopen binnen 72 uur op tot zo'n 4,5 meter, indien er geen maatregelen getroffen worden (zie Afbeelding 9.23, Bijlage I). Deze ontgrondingen kunnen alleen dan in de hand worden gehouden wanneer de stroomsnelheden door snelle vergroting van het openingsprofiel beperkt worden. De beste uitvoeringsmethode is de dam over de hele breedte van de toekomstige opening eerst zoveel mogelijk te verlagen zonder dat een duidelijke overlaatconstructie ontstaat. Wanneer dit wel gebeurt kunnen zeer snel grote ontgrondingen optreden die moeilijk gecontroleerd kunnen worden als er nog veel grond in zijdelingse richting verwijderd moet worden. Tot een hoogte van ongeveer NAP + 1,5 meter kan zonder veel hinder van overstromingen gewerkt worden met landmaterieel. Daarna kan met cutterzuigers de breedte van de dam gereduceerd worden tot afmetingen die eenvoudig en (vooral) snel te verwijderen zijn als de uiteindelijke doorsteek plaatsvindt, en die toch vroegtijdige doorbraak uitsluiten.

Voornaamste conclusies

Uit de onderzoeksbevindingen kan in de eerste plaats gesteld worden dat er met het huidige 2DH-model geen nauwkeurige resultaten geboekt kunnen worden voor het voorspellen van de waterbewegingen in het diepe noordelijke havenbekken. Hiervoor is het model te grof in zijn turbulentie-berekening, en kan alleen een veel fijnmaziger subgridmodel (waarin de turbulentie op kleine schaal redelijk nauwkeurig berekend wordt) uitkomst bieden. Wordt het model toch gebruikt dan kan het best het reële openingsprofiel met een diepe stroomgeul gebruikt worden, omdat de robuustheid van het model hier positief door beïnvloed wordt.

In de tweede plaats is de keuze voor een noordelijke debietrand voor de stationaire berekening (zoals dat tot nu toe wel gedaan is) niet aan te bevelen, omdat het model zich dan kan instellen

Samenvatting

op een evenwichtstoestand die in werkelijkheid niet heerst. Beter is het de rand aan te sturen met een waterstandsrandvoorwaarden, zodat de grip op de waterstand in het bekken veel directer is.

Tenslotte moet tijdens de uitvoeringsfase (die bij voorkeur aan de oostrand van de toekomstige opening moet beginnen) zeer snel en doelgericht ontgraven worden om oncontroleerbare situaties met betrekking tot erosie te voorkomen.

Inhoudsopgave

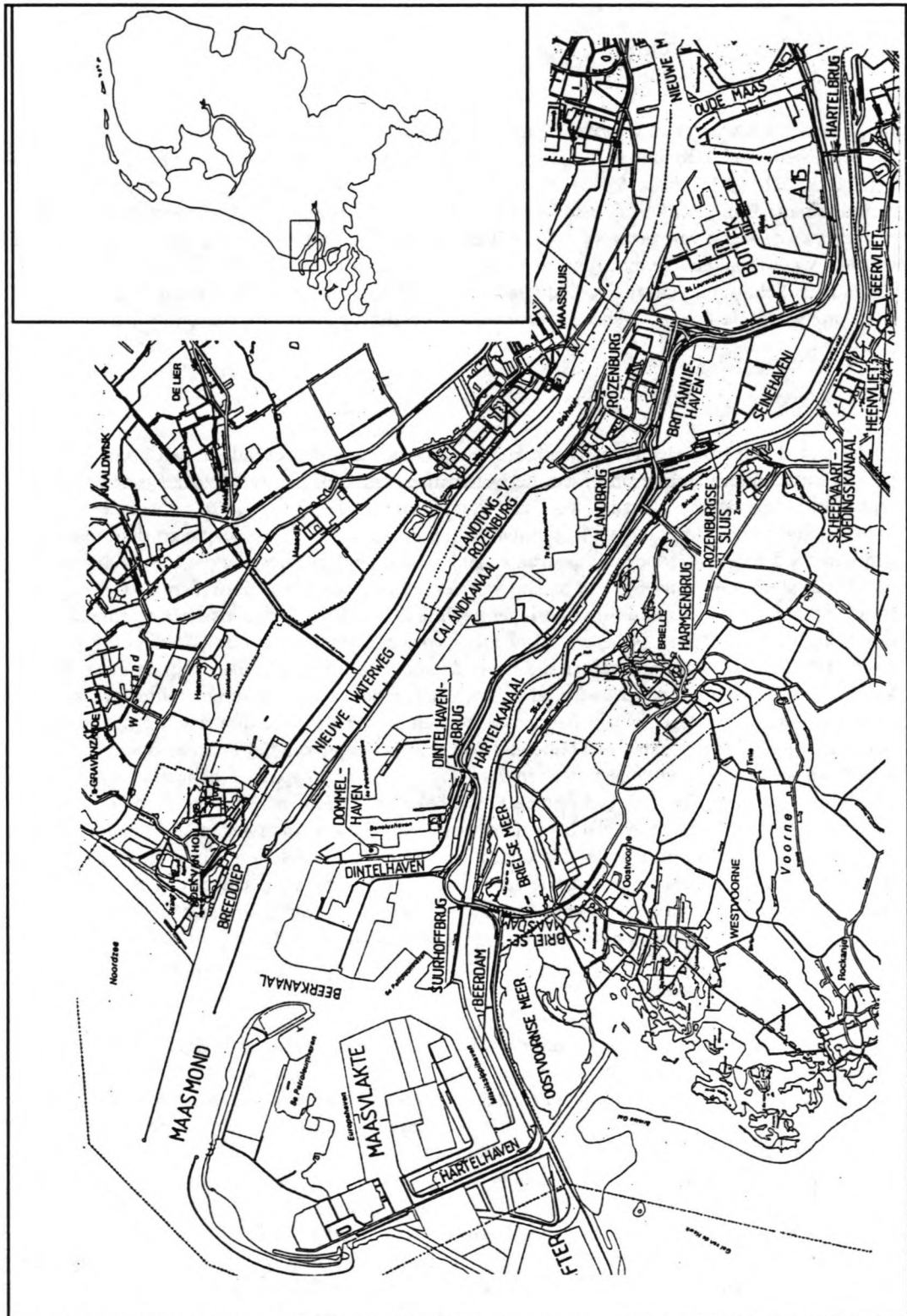
Voorwoord		iii
Samenvatting		v
Hoofdstuk 1	Inleiding	4
1.1	Algemeen	4
1.2	De Europoortkering	4
1.3	Open Beerdam	7
1.4	Europoortkering met Open Beerdam	10
1.5	Hydraulische modelleringen	12
1.6	Rapportindeling	14
Hoofdstuk 2	Het onderzoek	19
2.1	Probleemsignalering	19
2.2	Probleemstelling	20
2.3	Doelstelling	20
2.4	Probleemaanpak	20
2.5	Algemene randvoorwaarden en uitgangspunten	24
Hoofdstuk 3	TRISULA 2DH-modellering	31
3.1	De 2DH-basisvergelijkingen	31
3.2	Rekenmethode	32
3.3	Randafhandeling	37
3.4	Viscositeit	42
3.5	Overige parameters	43
Hoofdstuk 4	Oorspronkelijk onderzoek	47
4.1	Fase I	47
4.2	Fase II	49
4.3	Conclusies	52
Hoofdstuk 5	Opzet nieuwe TRISULA-berekeningen	55
5.1	Aanpassingen oorspronkelijke schematisaties	55
5.2	Randvoorwaarden	56
5.3	Resultaten	57
5.4	Verklaring en aanpassing randvoorwaarden	57
Hoofdstuk 6	Gevoeligheidsonderzoek viscositeit	61
6.1	Inleiding	61
6.2	Onderzoeksopzet	62
6.3	Resultaten	63
6.4	Verklaring en conclusies	64

Inhousopgave

Hoofdstuk	7	Onderzoek openingsprofiel	69
	7.1	Inleiding	69
	7.2	Onderzoeksopzet	69
	7.3	Profielvarianten	70
	7.4	Resultaten	71
	7.5	Verklaring en conclusies	72
Hoofdstuk	8	Onderzoek naar tijdsafhankelijke modellering	77
	8.1	Inleiding	77
	8.2	Onderzoeksopzet	77
	8.3	Resultaten	78
	8.4	Maatgevende toestanden	79
	8.5	Controle stationaire aanpak	80
	8.7	Verklaring en conclusies	82
Hoofdstuk	9	Onderzoek naar de uitvoering	87
	9.1	Algemeen uitvoeringsplan	87
	9.2	Onderzoeksopzet	88
	9.3	Resultaten	91
	9.4	Morfologische beschouwing	92
	9.5	Conclusies	93
Hoofdstuk	10	Evaluatie	97
	10.1	Algemene conclusies	97
	10.2	Aanbevelingen	98
Literatuurverwijzingen			103
Bijlage	I	Afbeeldingen	
Bijlage	II	2DH viscositeits- en turbulentieformulering	
Bijlage	III	Afleiding Riemann-invarianten	
Bijlage	IV	Keuze sedimenttransportformules	
Bijlage	V	Resultaten grondonderzoek	

Hoofdstuk 1

Inleiding



Afbeelding 1.1 Overzicht studiegebied

Hoofdstuk 1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de achtergronden voor dit afstudeerproject. Na een algemene introductie (§ 1.1) worden de onderwerpen 'Europoortkering' en 'Open Beerdam' toegelicht (§ 1.2 resp. § 1.3) en worden de voor dit project belangrijke onderzoeken naar de combinatie Europoortkering met Open Beerdam kort samengevat om een eerste indruk te krijgen van de stand van zaken (§ 1.4). Dit afstudeerproject zal zich voornamelijk bezighouden met een waterloopkundige modellering van een scheepvaartopening. Ook dit onderwerp wordt nader toegelicht om de keuzes voor de gebruikte methodes te kunnen verklaren (§ 1.5). Tenslotte wordt de opbouw van het overige deel van dit rapport weergegeven (§ 1.6).

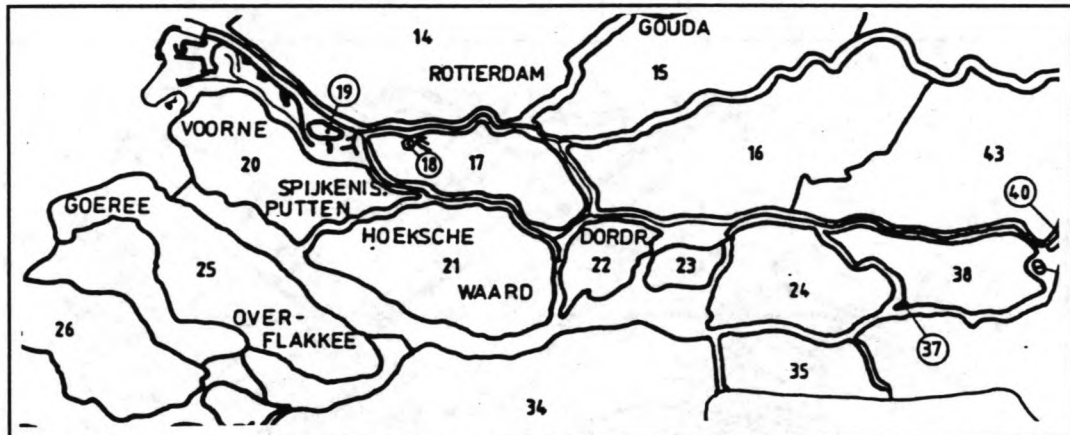
1.1 Algemeen

Nederland is van nature een waterland. Het is dan ook vanzelfsprekend dat een groot gedeelte van de activiteiten zich hier op of aan het water afspelen. Ook in ons vervoerssysteem heeft dit zijn inbreng: de beroepsvaart in Nederland vormt een van de pijlers van de economie. Bij het ontwerp van veel waterbouwkundige kunstwerken in ons land is de scheepvaart dan ook van grote invloed geweest: zonder scheepvaart zouden vele huidige kunstwerken niet nodig zijn (denk aan sluizen en stuwen). Het belang van een min of meer vrije doorvaart voor schepen maakt het noodzakelijk om de investeringen toch te doen, daar de dimensionering (breedte, diepte en hoogte) van een (scheepvaart)opening voor het grootste deel de kosten ervan bepaalt. De afmetingen en de stroombeelden die mede daardoor ter plekke heersen zijn de meest beperkende factoren voor het soort en aantal schepen dat er doorheen kan varen. (Uiteraard zijn ook de aansluitende vaarwegen van belang, deze hebben echter als ze de dimensionering beïnvloeden eerder een schaalverkleinend dan een schaalvergroterend effect: een opening zal, als deze voor scheepvaart ontworpen is, vrijwel nooit een grotere capaciteit hebben dan zijn aansluitingen). Ook zijn deze factoren de meest belangrijke voor de effecten die de opening op zijn omgeving heeft. Beslissingen betreffende het ontwerp van waterwegen en bijbehorende kunstwerken zijn dan ook meestal een optimalisatie van minimalisering van de kosten van het ontwerp enerzijds en het belang van de scheepvaart en de omgeving anderzijds. Bij elke verandering aan bestaande ontwerpen moet deze afweging op basis van gedegen onderzoek naar het effect ervan op scheepvaart en omgeving eveneens plaatsvinden.

1.2 De Europoortkering

Halverwege de jaren tachtig bleek, door uitbreiding van kennis van de hydraulische belastingen, dat recent opgehoogde en dus veilig geachte stukken dijk in het benedenrivierengebied van Nederland opnieuw verhoogd moesten worden. De eerdere ophogingen brachten al grote problemen met zich mee: met name de bebouwing op en langs de dijken in stedelijk gebied en de aspecten natuur en milieu bleken moeizame en kostbare oplossingen in de hand te werken. Destijds werd al gedacht aan een alternatieve keringswijze in de vorm van een Stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg (SVKW). Deze werd destijds echter als te kostbaar bevonden om ook daadwerkelijk gerealiseerd te worden. De nieuwe ophogingen zouden zo mogelijk nog meer problemen opleveren dan de vorige. Bij nadere bestudering van de nieuwe situatie, afgerond met een Beleidsanalyse / Milieu Effecten Rapportage (B/MER), bleek het alternatief met SVKW wel haalbaar, hetgeen werd bekrachtigd in een regeringsbesluit om deze variant uit te laten voeren.

Eén van de onderzoeken voor dit project was dat naar de inpassing van de kering in het stelsel van beveiligingen tegen overstromingen zoals dit in Nederland aanwezig is. Dit stelsel is ontstaan door opdeling van ons land in dijkringen. Dit zijn gebieden beschermd door waterkeringen, die elk zo gedimensioneerd zijn dat een maatgevende hoogwaterstand (MHW) gekeerd kan worden die hoort bij een vastgestelde frequentie van optreden. De indeling voor het benedenrivierengebied is gegeven in Afbeelding 1.2.



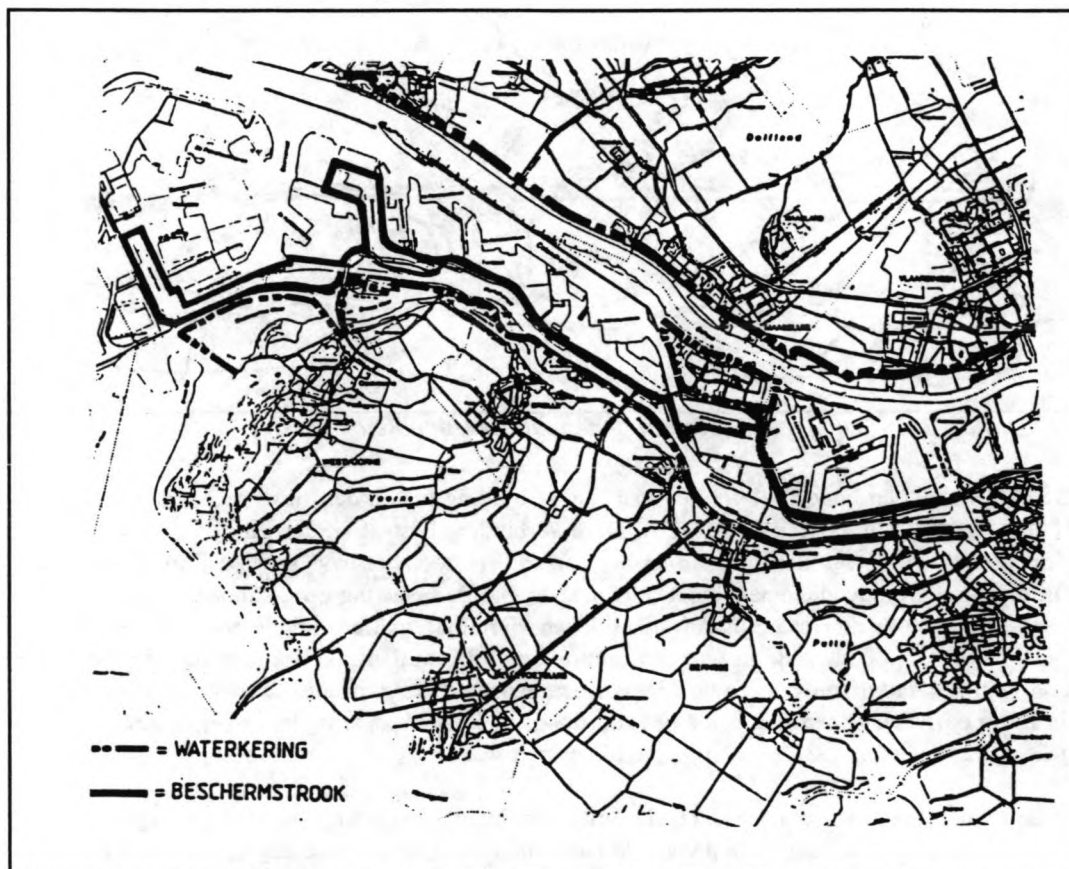
Afbeelding 1.2 *Dijkringen in het benedenrivierengebied*

De SVKW zal een onderdeel vormen van een verbinding tussen de dijkkring Centraal Holland (14) en de dijkkring Voorne Putten (20). Deze verbinding bestaat verder uit de **Europoortkering**, een kering waarvan het tracé dwars door het havengebied Europoort loopt. Dit dijkkringverbindend element moet blijven staan om de belasting op de andere keringen te voorkomen. Voor dit tracé zijn aanvankelijk een viertal alternatieven onderzocht in de B/MER van 1987 [lit.1]. Tijdens de inspraakprocedure die de B/MER moest doorlopen, bleek dat voor geen van deze alternatieven een unanieme keuze gemaakt kon worden. Daar de realisatie van de Europoortkering toen nog enige tijd zou duren en kostenbesparingen mogelijk werden geacht, werd medio 1988 een vervolgstudie gestart waarin:

- a) de mogelijkheden werden onderzocht om de ruimtelijke claims op het Europoortgebied te beperken door reeds geruime tijd voor de realisatie tot een verantwoorde keuze te komen zonder een uitgebreide beleidsanalyse, en
- b) getracht werd een oplossing te vinden waarbij de huidige beschermstrook¹ die nu door het Europoortgebied loopt komt te vervallen (dit in verband met de gevolgen voor de Ruimtelijke Ordening).

¹ Dit is de terreinstrook die de garantie moet vormen, dat het voorliggende gebied een integrerend deel uitmaakt van de waterkering van Voorne Putten.

Het resultaat van de vervolgstudie was het verschijnen van het rapport 'Europoort als Waterkering' [lit.18] in december 1989 waarin twee paar nieuwe alternatieven onderzocht zijn: één paar met een lang tracé slingerend over nagenoeg geheel Europoort, en één paar met een kort tracé waarbij een afsluitbare kering in het Hartelkanaal dient te worden aangelegd. Het grote verschil met de varianten uit de MER-fase was de hoogte van de ontworpen dijken. Deze



Afbeelding 1.3 Beerdam als onderdeel van de huidige beschermstrook.

hoogte is afhankelijk van de maatgevende hoogwaterstand (MHW) die gekeerd moet worden, en een hierbij opgetelde factor voor de golfhoogte. Een alternatievenanalyse wees echter uit dat de Europoortkering niet noodzakelijkerwijs onder extreme storm-omstandigheden de hoogste waterstand hoefde te keren, en dat ze (in sommige omstandigheden) zelfs mocht overstromen. Bij twee alternatieven werd deze nieuwe ontwerpfilosofie gevolgd, waardoor voor de meeste tracéonderdelen helemaal geen aanpassingen nodig zouden zijn. Op basis van deze studie werd het mogelijk een keuze te maken voor één van de voorgestelde alternatieven: een kort tracé waarbij tevens een stormvloedkering in het Hartelkanaal (SVKH) gebouwd wordt.

Het Hartelkanaal is in de 60^{er} jaren gegraven. Het kanaal loopt vanaf de aansluiting met de Oude Maas aan de oostzijde (de Hartelsluis) naar de Hartelhaven aan de westzijde. De opzet van het ontwerp was om de binnenscheepvaart te scheiden van de zeescheepvaart (op de

Nieuwe Waterweg), zodat de veiligheid vergroot werd en er een getijvrije havenzone ontstond. In 1982 is een open verbinding met de Oude Maas tot stand gebracht door middel van een doorsteek ten zuiden van de Hartelsluis. Dit nam de stremmingen bij de sluis weg, maar zorgde ook voor een getijsituatie in de aanliggende havens. Het kanaal vormt nu een belangrijke schakel in het achterlandvervoer per binnenvaart.

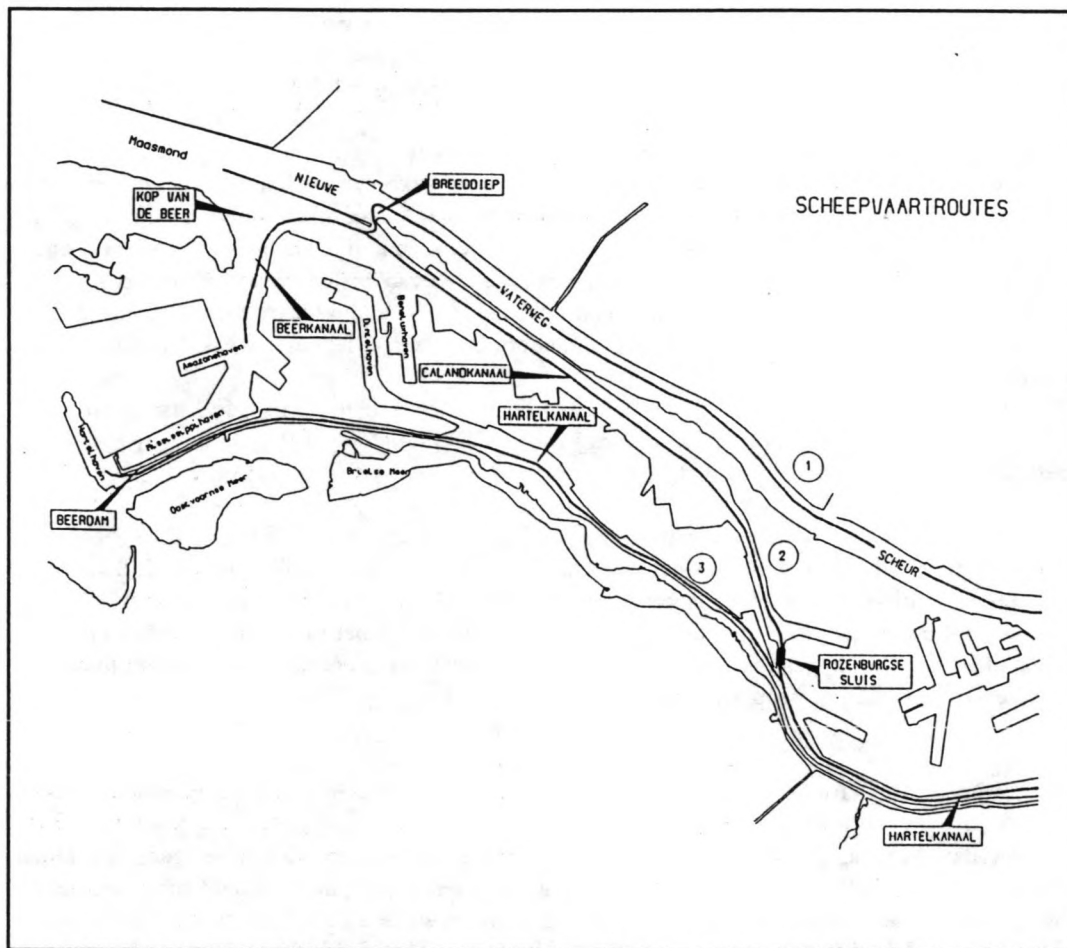
Sinds de open verbinding met de Oude Maas tot stand is gekomen, is het scheepsaanbod voor het kanaal aanzienlijk toegenomen. Bij het ontwerp van het kanaal in de zestiger jaren is geen rekening gehouden met ingrijpende veranderingen in het toenmalige aanbod van het soort en aantal schepen dat ervan gebruik maakte. Met het toelaten van zesbaksduwvaart moest dan ook op een aantal locaties in het kanaal een toelatingsbeleid voor de duwvaart worden ingesteld: ontmoetingen tussen zesbaksduweenheden en andere duwvaart (vier- en zesbaks) is hier uitgesloten.

Aan de westzijde van het kanaal zorgt de Beerdam voor de scheiding met de Mississippihaven. De dam (± 50 m breed en ± 3200 m lang) is sinds 1968 onderdeel van de bovengenoemde beschermstrook door het Europoortgebied.

De keuze voor het korte tracé voor de Europoortkering waarbij ook de SVKH wordt gebouwd heeft tot gevolg dat de functie van deze beschermstrook komt te vervallen, en dat de Beerdam als onderdeel hiervan niet meer als kering hoeft te dienen. Een doorsteek van de dam behoort dan ook tot de mogelijkheden. Voor de Rozenburgse Sluis aan het oostelijk uiteinde van het Calandkanaal geldt in principe hetzelfde: ook deze verliest haar kerende functie in het nieuwe tracé en kan permanent geopend worden.

1.3 Open Beerdam

De Beerdam kan dus geopend worden. Maar wat zijn de voordelen? Om deze vraag te kunnen beantwoorden is het in de eerste plaats nodig om te weten wat de huidige nautische situatie in het gebied is. De binnenvaart die van en naar Europoort en de Maasvlakte moet, kan dit nu doen via een drietal vaarwegen, nl. de Nieuwe Waterweg, het Calandkanaal en het Hartelkanaal (zie Afbeelding 1.4).



Afbeelding 1.4 Huidige scheepvaartroutes van/naar Europoort/Maasvlakte.

De eerste route gaat over de Nieuwe Waterweg via het Breddiep, waarbij de Hartelhaven en de Dintelhaven niet bereikt kunnen worden, duwvaart niet mogelijk is en de overige vaart hinder ondervindt van uit zee doordringende golven. Bij het volgen van de tweede route (via het Calandkanaal) zijn de twee havens aan het Hartelkanaal evenmin bereikbaar, wel zijn de overige havens van Europoort en Maasvlakte via de Rozenburgse Sluis bereikbaar zonder veel hinder van weersomstandigheden zoals bij de eerste route. Er moet hierbij echter (nog) rekening gehouden worden met de wachttijden voor de sluis. De derde route tenslotte gaat via het Hartelkanaal. Hiermee zijn de Hartel- en Dintelhaven wel bereikbaar, maar de overige havens juist weer niet. In Tabel 1.1 zijn het aantal scheepvaartpassages voor de belangrijkste knooppunten binnen het studiegebied gegeven.

Lokatie	Aantal passages
Hartelmond	70.000
Rozenburgse Sluis	36.000
Nieuwe Waterweg/Breeddiep	36.000

Tabel 1.1 Huidige scheepvaart van/naar Europoort/Maasvlakte

Van de scheepvaart die niet naar een van de havens aan het Hartelkanaal moet, gaat de helft via de Nieuwe Waterweg en het Breeddiep, de andere helft gaat via Hartelmond en Rozenburgse Sluis.

Uit studies naar de ontwikkeling van het scheepvaartverkeer dat op basis van het Goederen-Stroom-Model-6 (GSM-6, [lit.2]) van deze routes gebruik maakt, bleek dat er een grote stijging van het aantal binnenschepen in het gebied te verwachten is. Het aantal containers dat in Rotterdam verwerkt wordt zal van de huidige 2,5 miljoen toenemen tot ca. 3,6 miljoen in het jaar 2010. De Maasvlakte zal hiervan een aanzienlijk deel voor zijn rekening nemen. Ook in de droge-bulk sector (en met name de kolenoverslag) wordt een sterke groei in de komende twee decennia verwacht. Het Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (GHR) speelt op deze ontwikkelingen in met het plan 'Delta 2000-8' [lit.3] waarin 8 nieuwe containerterminals zijn voorzien voor de Centrale Maasvlakte, die alle in het jaar 2000 operationeel moeten zijn. Een van die terminals is gepland in de nieuwe Amazonehaven aan de noordkant van de Beerdam, daar de huidige binnenvaartterminal aan de Hartelhaven veel te klein zal zijn om de verwachte groei in de containeroverslag te kunnen verwerken. Maar uitbreiding van de overslagcapaciteit alleen is niet voldoende: zoals al gezegd is de Centrale Maasvlakte (en dus ook de Amazonehaven) niet bereikbaar via het Hartelkanaal, en leveren de andere routes nu al stremmingen op bij knooppunten als de Kop van de Beer, het Breeddiep en de Rozenburgse sluis. Deze stremmingen worden zonder maatregelen ontoelaatbaar groot in de toekomst. Met het openen van de Beerdam wordt een nieuwe route voor de binnenvaart van en naar de Centrale Maasvlakte gecreëerd die de belemmeringen in de bereikbaarheid op zal heffen. Aan de hand van de GSM-6 prognoses zijn ook schattingen gedaan voor het aantal schepen dat van deze opening gebruik zullen gaan maken. Tabel 1.2 geeft deze schattingen weer:

Soort schepen	aantal schepen (2-richtingen)	
	jaar 2000	jaar 2010
gewone binnenvaart	2000	4000
container binnenvaart	4000	4000
duwvaart	800	1000

Tabel 1.2 Prognoses binnenvaartschepen door Open Beerdam.

Onder meer hieruit blijkt het belang van een opening voor een goede scheepvaartafwikkeling.

1.4 Europoortkering met Open Beerdam

In de Tracénota Europoortkering met Open Beerdam [lit.4] zijn, uit de twee nieuwe varianten voor de Europoortkering (§1.2) die in [lit.18] gekozen zijn, een 8-tal uiteindelijke tracévarianten ontwikkeld die van een doorsteek van de Beerdam uitgaan. Na zorgvuldige afweging is een oplossing met de Hartelkering ter plaatse van de huidige Hartelbrug gekozen als de definitieve oplossing. Deze variant is weergegeven in Afbeelding 1.5.

Aan het maken van deze keuze is een scala van onderzoeken voorafgegaan, o.a. naar de effecten op stroombeelden (hydraulica), scheepvaart (nautica), bodem (morfologie), landschap en natuur. Ze zijn gebruikt om een indicatie te geven van de gevolgen van de opening in de vorm van de overkoepelende Tracénota Europoortkering met Open Beerdam [lit.4] en een meer specifieke Tracénota/MER Open Beerdam [lit.5]. De nautische en hydraulische onderzoeken zijn gebaseerd op globale aannames omtrent profilering van de opening (ondermeer afhankelijk van de verwachte scheepvaartintensiteiten erdoorheen) en de morfologische gevolgen daarvan. Het globale detaillerings- en kennisniveau van de stand van zaken en de te verwachten effecten vormde geen belemmering voor de besluitvorming over de tracévaststelling in [lit.4].



Afbeelding 1.5 Uiteindelijk tracé Europoortkering.

De reeds verrichte onderzoeken waar dit afstudeerproject mee te maken zal hebben zijn:

- *Hydraulisch onderzoek:* stromingsberekeningen in de (nog) fictieve opening met een numeriek hydraulisch model van de opening. In de berekeningen zijn een drietal (breedte)varianten voor de opening onderzocht, te weten 1000, 400 en 200 meter breed, en zijn er berekeningen uitgevoerd voor een variant waarbij het Hartelkanaal na de opening van de Beerdam tussen de doorsteek en de westelijke aansluiting gedempt wordt en de daar aanwezige damwand aan het einde van de Mississippihaven getrokken wordt, zodat een gladde aansluiting ontstaat [lit.6][lit.7].
- *Nautisch onderzoek:* indicatieve en voor dit geval maatgevend geachte berekeningen met 6-baks duwvaart door het gebied.
Hoewel het Hartelkanaal oorspronkelijk gedimensioneerd is op 4-baks duwvaart verwacht men in de toekomst ook een opkomst van 6-baks duwvaart in de opening. Op grond van de resultaten van de bovengenoemde stromingsberekeningen zijn dan ook een aantal 6-baks duwvaartbewegingen gesimuleerd met een fast-time simulatieprogramma. Dit is een computer-simulatieprogramma waarbij een aantal aannames zijn gedaan, o.a. betreffende de detectievermogens van zowel baanafwijking als stroomvariëaties en met betrekking tot maatgevende toestanden voor wind- en stroominvloeden [lit.8][lit.9].
- *Morfologisch onderzoek:* Op basis van de hydraulische veranderingen zijn de effecten op

sedimentatie/erosie voorspeld. Dit onderzoek geeft de veranderingen weer zoals ze zijn ingeschat per haven of per riviervak, aangezien een integraal morfologisch model voor het Rijnmondgebied (nog) niet bestaat. In de havens is sedimentatie bepaald als zijnde het produkt van het verwachte uitwisselingsvolume van water per getij, de sedimentconcentratie in de havenmond en het bezinkingspercentage binnen de haven. In de riviervakken is sedimentatie/erosie bepaald op basis van de afwijking van het (toekomstige) dwarsprofiel van het evenwichtsprofiel (afhankelijk van het passerende getijvolume). De resultaten geven met beperkte nauwkeurigheid (onnauwkeurighedsfactor 2 à 3 of hoger) de toekomstige baggerhoeveelheden in het gebied weer. Er is niet gekeken naar de ontwikkeling op langere termijn van het openingsprofiel, aangezien dat met de bovenbeschreven methode niet mogelijk is en omdat deze specifieke informatie toen nog niet nodig was binnen het globale kader van het onderzoek [lit.10].

Bij elk van de drie studies is uitgegaan van dezelfde globale afmetingen van de doorsteek, en is niet gekeken naar verdere detaillering van de opening. Juist voor een uiteindelijke uitvoering is deze detaillering echter van groot belang. Deze detaillering is de basis voor dit afstudeerproject. Vooral de detaillering van de hydraulische modellering verdient hierbij de nodige aandacht.

1.5 Hydraulische modelleringen

De meest betrouwbare manier om een toekomstige waterstroming in een gebied met enige nauwkeurigheid te kunnen voorspellen is door de stroming na te bootsen in een model van dat gebied. Er zijn twee soorten modelleringsmethodes die algemeen worden toegepast in de hydraulica:

- er kan een *schaalmodel* gemaakt worden. Dit model is een (meestal verkleinde) reconstructie van het gebied die een zo realistisch mogelijke weergave van het beoogde gebied geeft. De verwachte stroombeelden worden nagebootst door daadwerkelijk water door het model te laten stromen. Op basis van waarnemingen in het model kunnen dan uitspraken gedaan worden over de stroombeelden in het oorspronkelijk gebied, waarbij uiteraard rekening gehouden moet worden met schaafeffecten.
- er kan een *numeriek model* gemaakt worden. Een numeriek model kan worden omschreven als 'een wiskundig model met een eindig aantal onbekende variabelen en met een berekeningsmethode om die variabelen op te lossen'. In de praktijk komt het erop neer dat het te onderzoeken gebied in een aantal (rooster)punten wordt opgedeeld, en dat voor een opeenvolgend aantal tijdstappen voor elk roosterpunt met behulp van mathematisch-fysische vergelijkingen voor vloeistofbeweging een aantal variabelen wordt berekend. Het soort te berekenen variabelen hangt af van het inzicht dat gewenst is, bij een hydraulisch probleem zijn de meest belangrijke variabelen de waterstanden en de stroomsnelheden en -richtingen.

Een schaalmodel heeft meerdere nadelen: de bouw ervan neemt vrij veel tijd in beslag, schaafeffecten maken het moeilijk om het model op juistheid in te schatten, en voor metingen moet ingewikkelde meetapparatuur geïnstalleerd worden. De opzet van een numeriek model is daarentegen relatief eenvoudig en snel, schaafeffecten worden voorkomen, en aparte metingen worden overbodig omdat de waarden van interesse door het model zelf berekend (en onthouden) kunnen worden. In het numerieke model wordt er echter een mate van onbetrouw-

baarheid geïntroduceerd bij het berekenen van de variabelen, doordat de mathematisch-fysische vergelijkingen die daarbij gebruikt worden gebaseerd zijn op een groot aantal aannames omtrent het fysisch gedrag van stromingen. Er kunnen hier dus stroombeelden weergegeven worden die in werkelijkheid niet (kunnen) voorkomen. Het probleem ligt dus hierbij vooral bij de interpretatie van de resultaten: wat is de meest reële situatie? Vooral de laatste jaren wordt door de snelle ontwikkeling van computers en een beter inzicht in de numerieke interpretatie steeds meer gewerkt met numerieke in plaats van schaalmodellen. Vooral wanneer een snelle en eenmalige modellering gewenst wordt zal een numeriek model de voorkeur krijgen. Zo ook bij de modellering van de Open Beerdam.

Met de mathematisch-fysische vergelijkingen² kan in principe een 3-dimensionale vloeistofbeweging worden berekend. Omdat dit stelsel vergelijkingen in hun originele vorm, en dus ook de berekening ervan, zeer complex is, zijn er behalve de direct hieruit voorkomende 3D-modelleringen ook een aantal meer eenvoudige modelleringen ontwikkeld. Afhankelijk van de eigenschappen en de uitgestrektheid van het te modelleren gebied, kan men de berekening zo op een bepaald detailleringsniveau uitvoeren. Er zijn bijvoorbeeld gebieden waarin men wel de globale waterstanden wil voorspellen, maar waar inzicht in plaatselijke stroombeelden niet van belang is. Het is dan onnodig om deze dan toch met een ingewikkelde 3D-modellering door te rekenen. De volgende klassificatie binnen de beschikbare programmatuur, gebaseerd op de mate van vrijheid van rekenen in de dimensies maakt een snelle keuze voor het soort modellering mogelijk:

- 3D-modelleringen.
- 2DH-modelleringen
- 1D-modelleringen

3D-modelleringen

Op een aantal aannames na wordt hierin het stelsel 3-dimensionale vergelijkingen zonder drastische vereenvoudigingen opgelost. De vloeistof van het te onderzoeken stroomgebied wordt opgedeeld (gediscretiseerd) in kleine 3-dimensionale blokjes met lengte Δx , breedte Δy en diepte Δz , en voor elk blokje worden de 3D-vergelijkingen opgelost per tijdstap Δt . Door de implementatie van een turbulentie model (dat een stelsel vergelijkingen voor turbulente beweging van de waterdeeltjes, in principe een 3-dimensionaal verschijnsel, uitrekent) kan ook rekening gehouden worden met turbulente stroming, en met een ingebouwd transportmodel kunnen dichtheidsverschillen en diffusie van opgeloste stoffen en warmte berekend worden. Dit maakt een 3D-modellering zeer geschikt voor gedetailleerde berekeningen waarin bijv. dichtheidsstromingen of windeffecten een grote rol spelen, en waarin de bodemvariaties groot zijn. Een programma dat 3D-berekeningen aankan is bijv. TRISULA.

2DH-modelleringen

² in dit geval zijn dat de 3-dimensionale Navier-Stokes vergelijkingen. De afleiding hiervan valt buiten het doel van dit rapport, voor een duidelijke omschrijving wordt verwezen naar collegedictaat B71 [lit.11]. Wel wordt in hoofdstuk 3 de geïntegreerde 2-dimensionale vorm hiervan besproken.

Voor deze modellen worden de 3D-vergelijkingen vereenvoudigd door ze te integreren over de diepte (H), waardoor er een stelsel van 2D-vergelijkingen overblijft. Nu hoeft het gebied slechts opgedeeld te worden in een 2-dimensionaal rooster met cellen van Δx lang en Δy breed. In principe krijgt elk punt van het rooster zijn eigen waarden voor de daarbij behorende bodemligging, bodemruwheid, windschuifspanningen, enzovoort. Ook nu worden de vloeistofbewegingsvergelijkingen in elke gridcel uitgerekend per tijdstap Δt . Zo wordt voor elke gridcel bekend wat op een bepaald tijdstip onder meer de stroomsnelheid, -richting en waterstand is. De vereenvoudiging van 3D naar 2DH is gerechtvaardigd wanneer de dichtheid over de hele diepte constant verondersteld kan worden, de bodemfluctuaties in de verticale richting klein zijn, en wanneer dieptevariaties van de snelheid in de stroombeelden niet van belang zijn (bijv. in verband met scheepvaartonderzoeken). Er moet wel bewust rekening gehouden worden met de aannames die gebruikt worden bij de vereenvoudiging, omdat deze grote invloed kunnen hebben op de berekende stroombeelden. Voorbeelden van 2DH programma's zijn TRISULA, DUCHESS en WAQUA

1D-modelleringsen

Bij deze modelleringsen worden de 3D-vergelijkingen zowel over de diepte als de over breedte geïntegreerd, waardoor er slechts een stelsel van 1D-vergelijkingen opgelost hoeft te worden. De opzet van het rooster wordt nu beperkt tot een aantal 'vakken' (dus cellen met ondoorlaatbare wanden aan weerszijden, parallel aan de stroming). Deze vakken zijn de schematisatie van het onderliggende deel van de waterloop, en elk vak heeft dus zijn eigen (gemiddelde) bodemligging, bodemruwheid, enzovoort. Deze wijze van schematiseren brengt met zich mee dat er geen rekening wordt gehouden met plaatselijke geometrieafwijkingen; het detailleringsniveau is dan ook laag. 1D-modellen zijn door hun eenvoudige constructie en oplosmethode echter uiterst geschikt om grote netwerken van waterlopen te berekenen (denk aan een rivier met zijtakken of een delta daarvan). Voorbeelden van 1D-programma's zijn ZWENDL en DUFLOW.

1.6 Rapportindeling

Het afstudeeronderzoek 'Hydraulische modellering Open Beerdam' is opgedeeld in vier deelonderzoeken waarin gebruik is gemaakt van een bestaande 2DH-TRISULA modellering van de opening in de Beerdam.

In hoofdstuk 2 worden de onderzoeken afgebakend. Dit gebeurt aan de hand van de formulering van probleem- en doelstelling. Bovendien staat in dit hoofdstuk beschreven hoe de onderzoeken zijn aangepakt, en wat de algemene randvoorwaarden en uitgangspunten zijn.

De rekenwijze en modelleringsmogelijkheden van het 2DH-TRISULA programmapakket vormen de basis van hoofdstuk 3, samen met de omschrijving van de belangrijkste modelparameters.

Hoofdstuk 4 geeft een verslag van het oorspronkelijk onderzoek dat met het model voor de opening is gedaan. Dit verslag dient voor vergroting van het inzicht in de specifieke eigenschappen van het model en als vergelijkmateriaal voor de deelonderzoeken.

Hoofdstuk 5 bevat de uitwerking van de stromingsberekening die als basis voor de

deelonderzoeken wordt gebruikt.

In hoofdstukken 6 tot en met 9 wordt ieder van de deelonderzoeken apart behandeld, met elk zijn eigen onderzoeksopzet, resultaten en conclusies.

In hoofdstuk 6 wordt een gevoeligheidsonderzoek van het model voor de 2DH-turbulentie viscositeit behandeld. Voor 8 verschillende waarden van de parameter worden de stromingsberekeningen behandeld en worden de resultaten van commentaar voorzien.

In hoofdstuk 7 volgt een rapportage van het onderzoek naar de gevoeligheid van het model voor schematisatie aanpassingen. Er worden drie verschillende schematisaties onderzocht op hun toepassingsmogelijkheid voor de stromingsberekeningen.

Hoofdstuk 8 behelst een uitgebreid onderzoek naar het gebruik van een tijdsafhankelijke modellering in plaats van de tot dan toe gebruikte stationaire modellering. Hieraan zijn tevens een drie-tal testcases verbonden, die tevens beknopt behandeld worden.

In het afstudeeronderzoek is tevens naar de uitvoeringsproblematiek van de opening gekeken. Hoofdstuk 9 bevat hiervan het verslag, inclusief een globale morfologische beschouwing ervan.

In het 10^e en laatste hoofdstuk staan de conclusies die naar aanleiding van de onderzoeken zijn geformuleerd. Ook de aanbevelingen die op basis van deze conclusies zijn gedaan, worden behandeld. Tenslotte volgen nog een aantal suggesties met betrekking tot nader onderzoek naar de gevolgen en de uitvoeringsmethode van de opening.

Hoofdstuk 2

Het Onderzoek

Hoofdstuk 2 Het onderzoek

In dit hoofdstuk zal de basis voor het afstudeeronderzoek worden gelegd. Na de probleemsignalering (§ 2.1) wordt aan de hand van een probleemstelling (§ 2.2) en een doelstelling (§ 2.3) de probleemaanpak (§ 2.4) bepaald en worden de algemene uitgangspunten vastgelegd (§ 2.5).

2.1 Probleemsignalering

De opening van de Beerdam zal begin 1996 gerealiseerd worden. Vóór die tijd moet een aantal gedetailleerde onderzoeken hebben plaatsgevonden die ervoor moeten zorgen dat een gefundeerde keuze gemaakt kan worden voor de opening, en dat de gevolgen van de opening zo goed mogelijk bekend zijn. Eén van die onderzoeken is een uitgebreide scheepvaartanalyse voor het betreffende gebied. Hiertoe zullen een aantal simulaties moeten worden gedaan om de keuze van het openingsprofiel ook voor de scheepvaart te rechtvaardigen. Na de reeds uitgevoerde nautische onderzoeken werd geadviseerd een aantal real-time simulaties uit te voeren om meer inzicht te krijgen in het gedrag van de schippers in bepaalde situaties en om de gedane aannames te kunnen verifiëren en eventueel verbeteren. Een real-time simulatie zorgt ervoor dat de schippers in een nagebootste levensechte situatie hun beslissingen omtrent het besturen van hun schip zelf kunnen doorgeven aan de computer, terwijl fast-time programma's werken met vooraf ingestelde reacties van de schippers. Het voordeel van het laatste soort programma's is dat de simulaties snel uitgevoerd kunnen worden, het nadeel ervan is dat de menselijke factoren in de besturingsstrategie afwezig zijn. Dit laatste is in de real-time variant niet het geval, maar hierbij duren de simulaties veel langer en zijn ze onder andere daardoor veel duurder. Daarom is het nodig om van te voren een (meer) specifieke indruk te krijgen van de situaties die op hydraulisch gebied in de opening te verwachten zijn (m.a.w. welke stroombeelden treden er op, op welk tijdstip zijn deze maatgevend en hoe worden de resultaten beïnvloed door de modellering). Hierna kunnen de maatgevende stroombeelden voor de scheepvaartsimulaties gebruikt worden zonder dat er veel geld en tijd besteed wordt aan situaties die nog niet onderzocht zijn en die misschien geen afspiegeling zijn van de werkelijke situatie op hydraulisch gebied.

De opening zal ook zijn gevolg hebben voor de stroombeelden ter plaatse van de ingangen van de omliggende havens. De havenauthoriteiten van Rotterdam willen graag zekerheid dat de stroomsnelheden en richtingen aan de mondingen van vooral de Petroleumhaven en de (uit te breiden) Amazonehaven niet zodanig veranderen dat ze gevaar opleveren voor de in- en uitvarende schepen. Ook hier is dus de wens om een zo nauwkeurig mogelijk inzicht in de stroombeelden te krijgen. Hydraulisch onderzoek is ook van belang voor detailonderzoek naar de morfologische ontwikkeling tijdens de doorsteek als gevolg van de stroomsnelheden, aangezien de stabiliteit van de taluds in opening en omgeving, en de diepte ten behoeve van de scheepvaart gegarandeerd moet blijven. Ook de algemene uitvoeringsaspecten verdienen de nodige aandacht: wat gebeurt er tijdens de doorgraving met de stroombeelden en hoe moet deze uitvoering plaatsvinden?

Er zijn al een tweetal hydraulische onderzoeken voor de opening uitgevoerd. De randvoorwaarden voor deze onderzoeken zijn echter sinds die tijd aangepast, waardoor de realiteitswaarde ervan gedaald is. Bovendien vraagt een numerieke modelleringsmethode om een aantal aannames, die in principe voor elk nieuw model getoetst moeten worden. De aannames zijn voorheen gedaan op basis van ervaring, maar zullen, gezien het belang van het

onderzoek, op geschiktheid onderzocht moeten worden.

2.2 Probleemstelling

De tot nu toe uitgevoerde onderzoeken voor de opening van de Beerdam op hydraulisch gebied zijn gebaseerd op een modellering waarvoor de randvoorwaarden sindsdien bijgesteld zijn, en waarvoor de gebruikte aannames en parameters nog getoetst moeten worden. Ze geven mede daardoor nog onvoldoende inzicht in de situatie tijdens en na de opening om een definitieve keuze voor het openingsprofiel en de maatgevende situaties daarbij te kunnen maken. Hierdoor zijn ze ook nog ontoereikend om gerichte informatie voor real-time scheepvaartsimulaties te leveren. Er is nog te weinig bekend over het morfologisch gedrag ter plaatse van de toekomstige opening, zowel tijdens de daadwerkelijke doorsteek om een gefundeerde keuze te maken voor de uitvoeringsmethode.

2.3 Doelstelling

Het doel van dit afstudeerproject is de bestaande modellering van de opening met de nieuwe randvoorwaarden te onderzoeken op zijn realiteitswaarde door de gebruikte aannames en parameters aan de hand van de ermee berekende stroombeelden te toetsen. Een verder streven is om met een keuze voor zo reëel mogelijke berekende stroombeelden tijdens de opening van de Beerdam een uitvoeringsmethode methode te onderbouwen en de morfologische ontwikkelingen die zich voor zullen doen tijdens deze opening globaal te voorspellen. Het beeld moet voldoende inzicht in de situatie bieden om de nodige hydraulische aanbevelingen voor de scheepvaartsimulaties en de havenauthoriteiten kunnen leveren.

2.4 Probleemaanpak

Na de oorspronkelijke berekeningen zijn bij een tweetal aannames en de gebruikte werkwijze vraagtekens geplaatst. Er was vooral meer inzicht gewenst in de invloed van:

- de gebruikte waarde voor de viscositeitsparameter,
- de schematisatie van het openingsprofiel en
- het gebruik van een stationaire aanpak voor een tijdsafhankelijk probleem.

Samen met het onderzoek naar de uitvoering van de opening kan er dus een indeling gemaakt worden in 4 deelonderzoeken. Voor elk van deze onderzoeken geldt echter een gemeenschappelijke basisaanpak. In de volgende paragrafen wordt eerst de basisaanpak uitgelegd, waarna elk deelonderzoek kort wordt omschreven.

Basisaanpak

De oorspronkelijk verrichte onderzoeken naar de stroombeelden in de opening zijn uitgevoerd met een 2DH-modellering in TRISULA. Uit eerdere berekeningen waarmee de veranderingen van de zoutgehaltes van het water in het benedenrivierengebied zijn onderzocht [lit.12], is gebleken dat de dichtheidsverschillen als gevolg hiervan in de omgeving van de opening minimaal zullen worden. Daar verder voornamelijk informatie voor de scheepvaart gewenst

werd, is een 2DH-modellering van de opening voldoende geacht voor het hydraulisch onderzoek (zie § 1.4 en 1.5). Om de doelstelling van dit rapport te verwezenlijken zullen de stromingsberekeningen herhaald worden met hetzelfde 2DH-model. Dit is gedaan om een aantal redenen:

- De rekenresultaten kunnen op deze manier het best onderling vergeleken worden.
- Een 2DH-model is volgens een eerste indruk voldoende om de maatgevende situaties voor de scheepvaart en morfologische ontwikkelingen weer te geven (meerwerk voor een 3D-modellering is dus voor dit onderzoek overbodig, indien niet met dichtheidsstromingen gerekend hoeft te worden).
- Het opzetten van een nieuw (3D)model om nieuwe randvoorwaarden door te rekenen - neemt voor dit onderzoek te veel tijd in beslag.

De invoer van de terreineigenschappen van het model (gridschematisatie, bodemconfiguratie) heeft in dit programma al plaatsgevonden. Van deze terreineigenschappen wordt verondersteld dat ze correct zijn, zodat ze kunnen worden overgenomen uit de oorspronkelijke berekeningen, zij het eventueel met een aantal aanpassingen om recente veranderingen in de werkelijke situatie ook in het model te laten meewerken.

Bij de oorspronkelijke berekeningen is gebruik gemaakt van een aantal randvoorwaarden in de vorm van vaste debiets- en waterstandswaarden, afkomstig uit eerdere berekeningen met het 1D-computerprogramma ZWENDL (waarmee waterstromingen in het benedenrivierengebied met een open Beerdam berekend zijn). De ZWENDL-modellering is aangepast sinds de laatste TRISULA-berekeningen. Voor verder onderzoek naar de stroomsnelheden en richtingen is het belangrijk dat de randvoorwaarden die gebruikt worden zoveel mogelijk overeenstemmen met de werkelijkheid. Vandaar dat de nieuwe berekeningen gedaan worden met de aangepaste randvoorwaarden. Aangezien voor alle vier deelonderzoeken een uitgangsberekening nodig is zal het model eerst op de nieuwe randvoorwaarden afgeregeld worden, en worden tevens de oorspronkelijke stromingsberekeningen behandeld om een zo goed mogelijke eerste indruk te krijgen van de eigenschappen van het bestaande model. Uitgaande van deze berekeningen worden de deelonderzoeken uitgevoerd.

Gevoeligheidsonderzoek voor de viscositeit

Het gebruik van een numerieke modellering heeft tot gevolg dat rekening gehouden moet worden met de aannames die gedaan worden bij het oplossen van de mathematisch-fysische vergelijkingen door het programma (zie §1.5). Een aantal voor de vloeistofbeweging zeer belangrijke aannames die in 2DH-TRISULA modelleringen zijn gedaan, zijn de zgn. *sluitingsaannames*.

Een vloeistof heeft een aantal eigenschappen. Eén daarvan is viscositeit (ν), die een maat is voor de dissipatie van kinetische energie binnen deze vloeistof. Een analytisch exacte formulering hiervoor is erg ingewikkeld. Er wordt dan ook de aanname gedaan om de Navier-Stokes vergelijkingen op te kunnen lossen (sluitend te maken). Deze sluitingsaanname houdt in dat de dissipatie afhankelijk verondersteld wordt van de stroomsnelheid van de vloeistof (zie Bijlage II), een aanname die algemeen aanvaard is, goede overeenkomsten met de werkelijkheid levert en een relatief eenvoudige implementatie tot gevolg heeft. Nu wordt er echter ook kinetische energie gedissipeerd door middel van turbulentie in de vloeistof. Wederom levert de formulering hiervan problemen op. Naar een correcte sluitingsformulering is uitgebreid onderzoek gedaan, hetgeen heeft geresulteerd in ingewikkelde turbulentiemodellen

(bijv. het $k-\epsilon$ model, [lit.13]) die in de numerieke 3D-modelleringen gebruikt worden om de vergelijkingen sluitend te maken, en die bevredigende resultaten geeft. Wanneer deze formuleringen echter voor de 2DH-modellering over de diepte geïntegreerd moeten worden, blijken wederom sluitingsaannames nodig om de complexe dissipatie te implementeren. Onderzoek heeft een grote aantal verschillende formuleringen opgeleverd, die min of meer correct bleken te zijn. Voor de sluitingsaanname is in TRISULA gebruik gemaakt van de zogenaamde turbulentie viscositeit (ν_H): er wordt aangenomen dat het overdrachtsmechanisme hetzelfde werkt als dat voor de (kinematische) viscositeit. Beide viscositeiten hebben voor de 2DH-vergelijkingen dus dezelfde formulering. De waarde voor de turbulentie viscositeit is echter vele malen hoger dan de kinematische viscositeit, waardoor deze laatste verwaarloosd kan worden.

Omdat het bij turbulentie viscositeit om een artificiële factor gaat waarvan de waarde op globale aannames berust en waarvan de werking niet eensluidend is, kan een juiste keuze ervan voor een numeriek model nogal moeilijk zijn. Aangezien een verkeerd gekozen waarde tot verkeerde voorspellingen van de stroombeelden kan leiden, is het (in geval van twijfel of het soort modellering geschikt is voor een bepaald gebied) noodzakelijk dat de gevoeligheid van een 2DH-model voor de keuze van de waarde van de turbulentie viscositeit bekend is. Is deze gevoeligheid klein, dan is het niet nodig om een betere turbulentiemodellering (bijv. in de vorm van een 3D modellering met een subgrid-turbulentiemodel) te gebruiken, omdat de betrouwbaarheid van de voorspelde stroombeelden met het 2DH-model dan voldoende groot is. Is de gevoeligheid groot, dan zal daaruit geconcludeerd kunnen worden dat de keuze voor een 2DH-modellering van het betreffende gebied niet correct is: de gevonden stroombeelden zijn afhankelijk van een parameter gebaseerd op aannames, die voor het model waarschijnlijk niet juist zijn.

Bij de 2DH-modellering van de Open Beerdam zijn na het oorspronkelijk hydraulisch onderzoek (zie § 1.4) twijfels gerezen omtrent de keuze voor de waarde van de turbulentie viscositeit. Met een gevoeligheidsonderzoek, waarbij alleen deze waarde wordt veranderd en de overige parameters van het model gelijk worden gehouden, kan de mate van gevoeligheid van het model worden onderzocht.

Gevoeligheidsonderzoek openingsprofiel

Uit ervaring is gebleken dat de stroombeelden in een numeriek model zeer gevoelig kunnen zijn voor de vormgeving ervan. Vooral door de 2DH-TRISULA rekenwijze voor de wanden van cellen aan de (gesloten) randen van het model, kan een kleine verandering van de schematisatie voldoende zijn om compleet andere stroombeelden te verkrijgen. Er wordt hier namelijk aangenomen dat de snelheid ter plaatse van de wand overal arbitrair nul is (de zogenaamde no-slip aanname), terwijl er in werkelijkheid een veel ingewikkelder proces plaatsvindt [lit.13]. Door kritisch naar het bestaande model te kijken, en op basis hiervan specifiek (kleine) veranderingen aan te brengen en de berekeningen onder de veranderde omstandigheden met die zonder de verandering te vergelijken, kan het model op gevoeligheid ervoor worden getoetst en kan ook hiervoor gesteld worden of het modellering correct is, en of en hoe het verbeterd kan worden.

Onderzoek naar tijdsafhankelijke modellering

De oorspronkelijke berekeningen (zie § 1.4) zijn uitgevoerd op basis van een quasi-stationaire aanpak, waarbij slechts één (maatgevend geachte) situatie uit een tijdsafhankelijke

nestberekening wordt doorgerekend. Hiertoe zijn een aantal aannames gedaan die de correctheid van deze aanpak moeten waarborgen. Om de betrouwbaarheid van de berekeningen te controleren is het mogelijk om een tijdsafhankelijke berekening uit te voeren. Hiervoor hoeven de meeste van de bovenstaande aannames niet meer te worden gedaan. Op deze manier kan de correctheid van de modellering onderzocht worden door de berekeningen te vergelijken met de resultaten van tijdsafhankelijke ZWENDL-berekeningen, die dankzij een eenvoudiger rekensysteem, een langere toepassing en toetsing aan de werkelijkheid veel betrouwbaarder zijn.

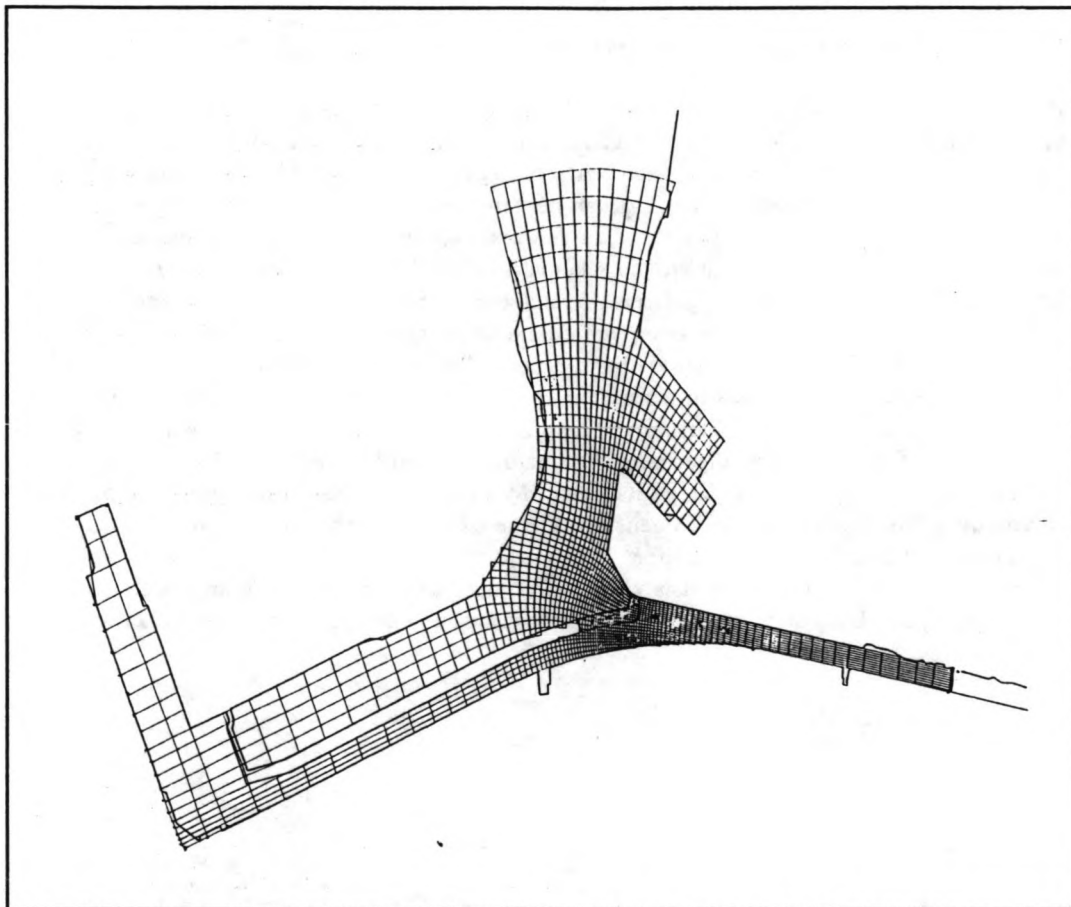
Onderzoek naar de methode van uitvoering

Behalve de uiteindelijke openingssituatie verdient ook de situatie tijdens de uitvoering van opening de nodige aandacht: de stromingen zullen naar alle waarschijnlijkheid zelfs heviger zijn tijdens het ontgraven dan erna, aangezien het doorstroomoppervlak van de opening aanvankelijk veel kleiner is. Met TRISULA kan het stroombeeld tijdens de uitvoering onderzocht worden. Voorwaarde hiervoor is wel dat de gebruikte schematisatie in ZWENDL een zo groot mogelijke overeenkomst vertoont met de schematisatie in TRISULA zodat de resultaten van ZWENDL ook voor de uitvoeringsfasen als randvoorwaarden voor TRISULA kunnen worden gebruikt. Zo kan in verschillende fasen van de ontgraving met TRISULA worden bekeken hoe sterk de stromingen zijn en kan aan de hand daarvan berekend worden welke gevolgen dit stroombeeld heeft voor erosie/sedimentatie in het profiel. Daaruit kan bijvoorbeeld blijken dat zeer snel en in de buurt van kentering van het getij gewerkt moet worden om complicaties te voorkomen, of dat het eenvoudiger is om "de natuur het werk te laten doen" door een kleine opening te maken en de rest te laten uitspoelen. Met deze gegevens wordt een methode van uitvoering gekozen waarvoor vervolgens een kleine morfologische beschouwing kan worden opgesteld: met behulp van (eenvoudige) transportformules zal een schatting gemaakt worden voor de sedimenttransporten op basis van de stroombeelden van de (uitvoerings)situaties zoals die uit het hydraulisch onderzoek volgen. Hiermee kan de openingswijze beter verantwoord worden.

2.5 Algemene randvoorwaarden en uitgangspunten

Voor de verschillende deelonderzoeken gelden verschillende randvoorwaarden en uitgangspunten. Een aantal facetten zijn echter voor het hele onderzoek gelijk.

Grootte van het onderzoeksgebied



Afbeelding 2.1 Gridschematisatie van het oorspronkelijke TRISULA-model

Voor alle drie deelstudies is het nodig om het onderzoeksgebied zo groot te nemen dat de aansturing van het model aan de randen de stroming in het gebied van interesse niet beïnvloeden, en toch zo klein mogelijk om de hoeveelheid rekenwerk beperkt te houden. In de eerdere TRISULA berekeningen is het onderzoeksgebied al dusdanig ingeperkt dat aan deze voorwaarden min of meer voldaan is. Er zal verder dan ook alleen gekeken worden binnen dit gebied. Het onderzoeksgebied omvat de plaats van doorsteek en de directe omgeving ervan. Met TRISULA is dit gebied als volgt geschematiseerd (zie Afbeelding 2.1).

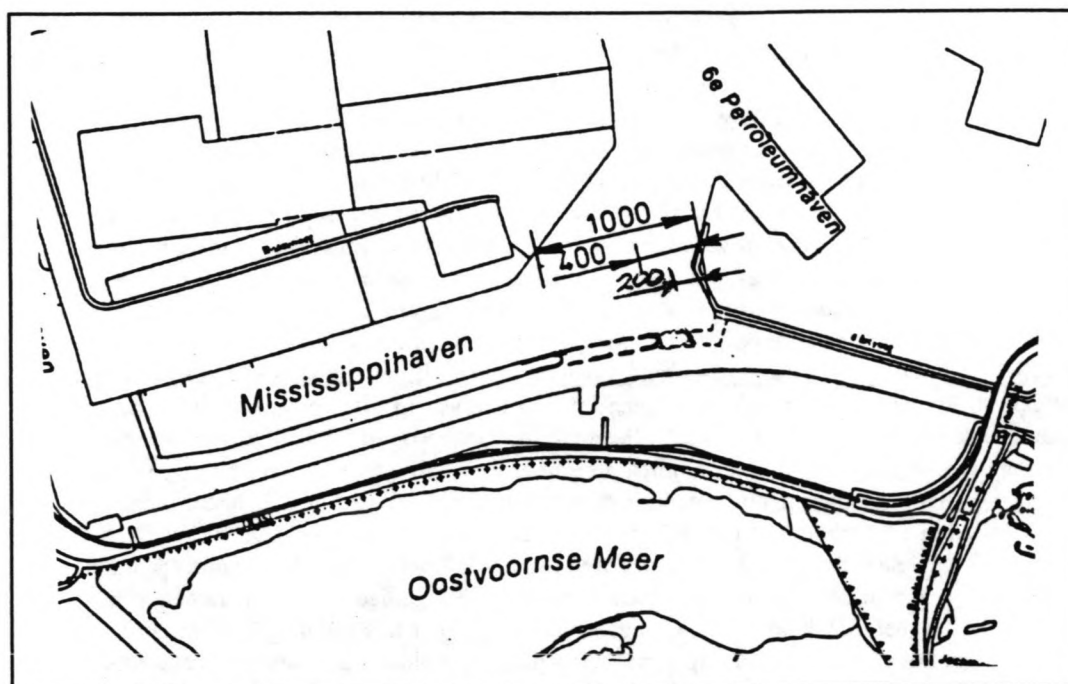
Effecten op de omgeving

In [lit.5] zijn de effecten van de opening voor het hele invloedsgebied van de opening onderzocht. Deze "algemene" effecten zullen waarschijnlijk niet veel veranderen wanneer het diepteprofiel van de doorsteek een kleine verandering ondergaat. Dit wordt gerechtvaardigd door het feit dat deze effecten gebaseerd zijn op oriënterende en algemeen geldige randvoorwaarden, die vrijwel ongevoelig zijn voor detail veranderingen. Wanneer er nieuwe (meer reële) randvoorwaarden met ZWENDL gecreëerd worden, en deze heel andere resultaten opleveren dan die in [lit.5] gebruikt werden, is het waarschijnlijk niet meer terecht dat de verandering in effecten wordt verwaarloosd, een nadere uitwerking hiervan valt echter buiten het kader van dit onderzoek. Wel kan worden aangegeven welke effecten nader onderzocht zouden moeten worden vanwege de veranderingen. Er wordt, om dit onderzoek binnen bepaalde grenzen te houden, echter aangenomen dat alle effecten door de profielveranderingen en aangepaste randvoorwaarden in dit onderzoek anders dan die op de lokale stroombeelden en morfologie, geen invloed hebben op die randvoorwaarden zelf. Dit houdt ook in dat voor de randsturing alleen van de (aangepaste) ZWENDL randvoorwaarden gebruik wordt gemaakt, en dat eventuele iteratieve berekeningen met ZWENDL geacht worden geen merkbare veranderingen voor deze randvoorwaarden tot gevolg te hebben. Naar de verschillen in zoutgehalten in het onderzoeksgebied is al onderzoek gedaan (zie lit.[12]). Hieruit is gebleken dat deze verschillen enige tijd na de opening zo klein zouden worden dat de invloeden ervan in de vorm van dichtheidsvariaties in het gebied minimaal zouden zijn. Dit houdt in dat met dichtheidsstromingen geen rekening hoeft te worden gehouden en dat de aanname dat een 2DH-modellering voor de opening zal voldoen gehandhaafd zal kunnen worden. Van het te onderzoeken gebied is tevens aangenomen dat het zo klein is dat windinvloeden op het betreffende oppervlak geen significante rol spelen in de hydraulische berekeningen.

Opening Rozenburgse Sluis

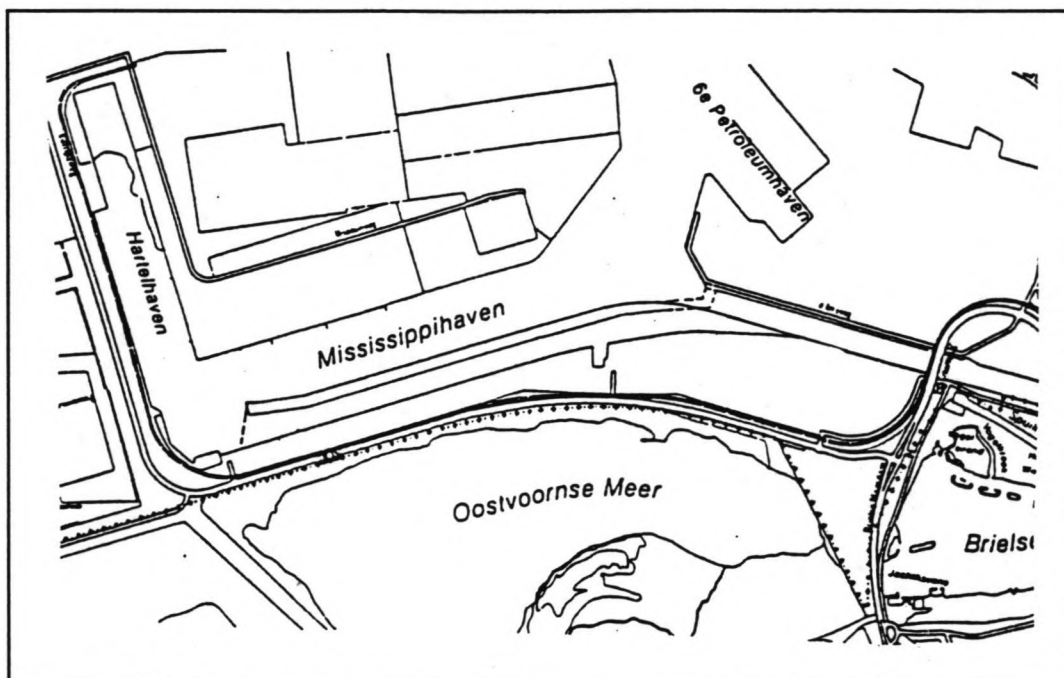
Alle eerdere onderzoeken naar de doorsteek zijn voor twee "hoofdvarianten" uitgevoerd. Er is namelijk sprake van een eventuele opening van de Rozenburgse Sluis. Aangezien in dat geval de stroombeelden en met name de stroomsnelheden in het onderzoeksgebied anders worden, zijn voor zowel de situatie met open als met gesloten sluis onderzocht. Bij de randvoorwaarden die gebruikt worden in dit onderzoek zal uitgegaan worden van de maatgevende situaties die volgens de eerdere berekeningen op zouden treden met opening van de sluis. Dit kan inhouden dat er voor sommige aspecten een overdimensionering plaatsvindt, dit is echter noodzakelijk zolang de keuze voor een gesloten dan wel een geopende Rozenburgse Sluis nog niet gemaakt is.

Openingsprofiel



Afbeelding 2.2 Oorspronkelijke varianten openingsbreedte

Voor de oorspronkelijke berekeningen van de opening (zie § 1.4) zijn aanvankelijk TRISULA-schematisaties van drie basisvarianten gebruikt. Het betreft hier een opening met 1000 meter breed en een opening van 400 meter breed (Afbeelding 2.2), gemeten vanaf de oostelijke aansluiting van de dam, en variant met een gladde aansluiting met de Beerdam. Bij deze laatste variant wordt het Hartelkanaal na de opening van de Beerdam tussen de doorsteek en de westelijke aansluiting gedempt waardoor dit terrein beschikbaar zou kunnen komen als nieuw haventerrein en zal de damwand aan het einde van de Mississippihaven getrokken worden, zodat uiteindelijk de gladde aansluiting ontstaat (Afbeelding 2.3). Omdat het te besteden budget beperkt was bleek al snel dat de prijs van de gladde variant zo hoog was dat deze mogelijkheid verviel. Er is dan ook besloten om bij de uitwerking van het oorspronkelijk onderzoek de resultaten van de berekening van de gladde variant in dit rapport achterwege te laten en er verder geen aandacht meer aan te besteden.



Afbeelding 2.3 Oorspronkelijke variant met gladde aansluiting

Op basis van de nautische onderzoeken (zie § 1.4) is een opening van 400 meter voldoende gebleken. De 200 meter variant was, hoewel zeer krap, ook nog voldoende breed. Uit het oogpunt van veiligheid zouden voor de 200 meter opening echter scheepvaartrestricties in de vorm van een begeleidingssysteem een vereiste zijn, waardoor ondanks de kostenverhoging door een grotere opening, de 400 meter variant toch aantrekkelijker. Er werd voor dit vervolgonderzoek aanvankelijk nog getwijfeld tussen een 400 en een 500 meter opening, maar het verschil in kosten/baten was hier minimaal. Omdat verder de stroombeelden tussen de 200 en de 400 meter variant toch al niet veel van elkaar verschilden, wordt aangenomen dat ook de keuze voor 400 of 500 meter ook niet veel uitmaakt. Ook zijn alle ZWENDL-randvoorwaarden al gegenereerd voor de 400 meter variant. Dit alles heeft ertoe geleid dat voor het vervolgonderzoek de 400 meter opening als enig openingsprofiel gebruikt zal worden.

TRISULA 2DH-modellering

Hoofdstuk 3 TRISULA 2DH-modellering

Voor het oorspronkelijk onderzoek naar de stroombeelden is gekozen voor een 2DH-modellering in TRISULA. Deze keuze heeft tot gevolg dat de specifieke rekeneigenschappen van het programma grote invloed hebben op de eigenschappen van het beoogde model. Voor diepgaand onderzoek is het dan ook nodig dat de rekeneigenschappen van TRISULA duidelijk bekend zijn, en dat de modelleringsmogelijkheden binnen de 2DH-versie van het programma toegelicht worden.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht van de rekeneigenschappen gegeven. Allereerst worden de basisvergelijkingen voor een 2DH-berekening kort besproken (§ 3.1) en wordt de berekeningsmethode van het programma specifiek toegelicht (§ 3.2). Omdat met name de randafhandeling en de implementatie van de viscositeit een belangrijke rol spelen in de geplande onderzoeken, worden deze onderwerpen apart toegelicht (§ 3.3 en § 3.4). Tenslotte worden de overige modelparameters die in de TRISULA 2DH-modellering van de Open Beerdam voorkomen behandeld (§ 3.5).

3.1 De 2DH-basisvergelijkingen

De vergelijkingen die in het TRISULA-model opgelost moeten worden zijn in principe de zogenaamde Navier-Stokes stromingsvergelijkingen. Afleiding hiervan valt buiten het doel van dit rapport. Het is voldoende te weten dat TRISULA rekent met een vereenvoudiging van deze vergelijkingen met een Bousinesq benadering voor de vloeistof en onder een 'ondiep-water' aanname. De Bousinesq benadering houdt ondermeer in dat de vloeistof onsamendrukbaar wordt geacht. De ondiep-water aanname houdt in dat de snelheden in de verticale richting klein worden verondersteld ten opzichte van de horizontale snelheden, en dat de verticale versnellingen in de vloeistof worden verwaarloosd ten opzichte van die ten gevolge van de zwaartekracht (hydrostatische-druk aanname). Deze vereenvoudigingen leveren de ondiep-water vergelijkingen op:

Continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

Bewegingsvergelijking in x-richting:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \nu_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{H} \frac{U^2}{C_{2D}} + f u = 0 \quad (3.2)$$

Bewegingsvergelijking y-richting:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial x} - \nu_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{H} \frac{U^2}{C_{2D}} - f v = 0 \quad (3.3)$$

Notatie:

x, y	= dimensies in carthesisch coördinatenstelsel
u	= snelheid in x-richting [m/s]
v	= snelheid in y-richting [m/s]
ν_H	= turbulentie viscositeit [m ² /s]
ζ	= waterstand t.o.v. een referentievlak [m]
d	= bodemniveau t.o.v. een referentievlak [m]
H	= $d + \zeta$ = totale waterdiepte [m]
f	= Coriolisparameter [1/s]
ρ	= dichtheid [kg.m/s ²]
g	= gravitatieconstante [m/s ²]
U	= $\sqrt{u^2 + v^2}$

De continuïteitsvergelijking volgt uit het opstellen van een massabalans voor een controlevolume: het verschil van de hoeveelheid water in de tijd (1^e term) in het controlevolume moet gelijk zijn aan het verschil tussen de in en uitstromende hoeveelheden vloeistof (2^e en 3^e term) aan de randen van het volume.

De bewegingsvergelijkingen ontstaan door het opstellen van een impulsbalans voor het controlehoeveelheid: het verschil in de hoeveelheid aanwezige impuls in de tijd (1^e term = lokale traagheidsterm) is gelijk aan het verschil tussen meegenomen en de afgevoerde impuls door de hoeveelheid instromende resp. uitstromende vloeistof (2^e en 3^e term = advectione traagheidsterm). Voor impuls is het binnen de controlehoeveelheid echter wel mogelijk dat het ontstaat of verdwijnt. Hierdoor moeten er dus een aantal termen worden toegevoegd:

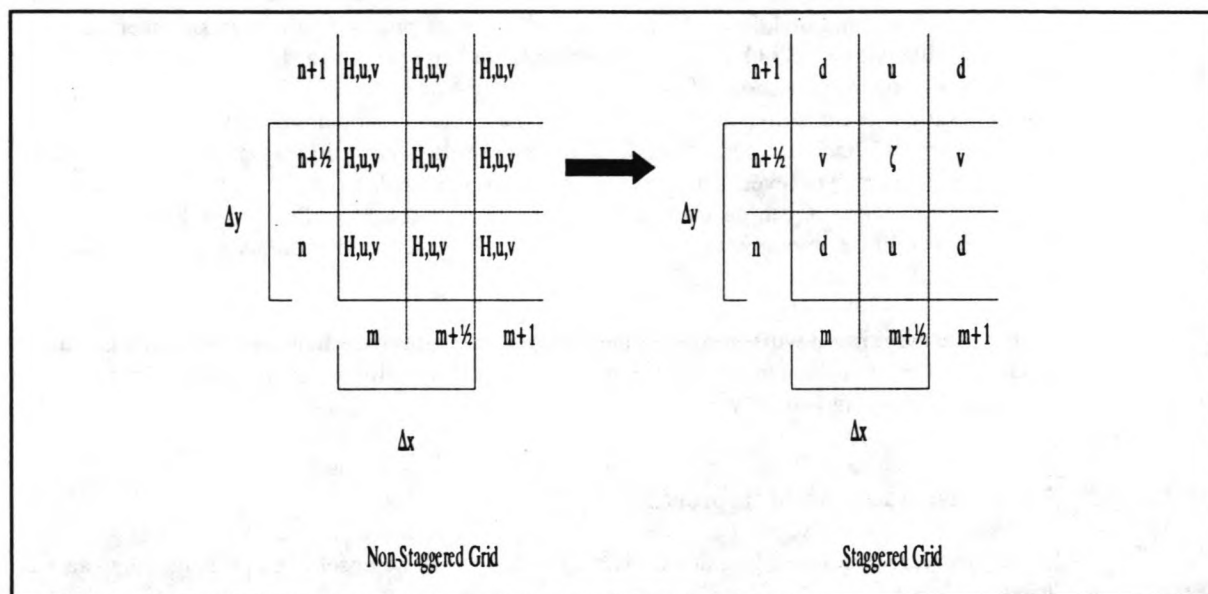
- De 4^e term (turbulentie-viscositeitsterm). Voor de afleiding van deze term wordt verwezen naar Bijlage II.
- De 5^e term (verhangterm) stelt de drukkracht voor die ontstaat doordat, door de heersende zwaartekracht, bij waterstandsverschillen in de hoeveelheid vloeistof op één plaats een hogere (hydrostatische) druk heerst dan op de andere, met als gevolg het ontstaan of verdwijnen van impuls om de drukverschillen op te heffen.
- De 6^e term (weerstandsterm) stelt het impulsverlies voor als gevolg van interactie van de vloeistof met de bodem. Deze term is afhankelijk van de ruwheid van de bodem en de snelheid waarmee de vloeistof eroverheen stroomt.
- De 7^e term (Coriolissterm) stelt het effect voor van de zogenaamde Corioliskrachten, die hun oorsprong vinden in de draaiing van de aarde. Door deze krachten zal een vloeistofdeeltje in beweging op het noordelijk halfrond een bewegingsafwijking naar rechts krijgen.

3.2 Rekenmethode

De vergelijkingen uit § 3.1 zijn gebaseerd op een continu model. Bij het oplossen van de differentiaalvergelijkingen stuit men hierbij op het probleem dat de differentialen niet zonder meer te berekenen zijn: voor formules (3.1)–(3.3) is alleen voor bepaalde eenvoudige gevallen een analytische oplossing te bepalen. De methode om ook voor een willekeurig geval oplossingen te genereren is door het model te discretiseren. De analytische oplossing gaat uit van oneindig kleine plaats en tijdstappen, waardoor er ook oneindig veel berekeningen gedaan moeten worden om de vergelijking op te lossen. Bij discretisatie wordt gewerkt met waarden die voor de mens en computer overzichtelijk zijn. Hierdoor kan in een discreet aantal punten voor een discreet aantal tijdstippen de vergelijkingen berekend worden. Er wordt als het ware een rooster (grid) over het continue model gelegd en worden voor elke tijdstap op elk

roosterpunt de (gediscretiseerde) vergelijkingen opgelost. In deze paragraaf wordt de wijze van roosterindeling in TRISULA en de methode waarop de vergelijkingen gediscretiseerd en opgelost worden kort omschreven.

Grid-staggering



Afbeelding 3.1 Omzetting naar een gestaggerd grid.

In principe worden in elk roosterpunt de terreineigenschappen (bodempligging, bodemruwheid, enzovoort) vastgelegd en worden er ook alle variabelen berekend om onder andere de vloeistofbeweging weer te geven. In TRISULA wordt gebruik gemaakt van 'grid staggering': in plaats van in elk punt van het numerieke rooster alle waarden (in dit geval de waterstand (H), en de snelheden in x - en y -richting (u en v) te berekenen, wordt versprongen tussen de op te lossen waarden voor elk gridpunt. Hiervoor is een methode gebruikt waarbij vier ongestaggerde gridcellen samen als één gestaggerde cel beschouwd worden. In deze cel worden drie van de originele cellen de drie variabelen ζ , u , en v berekend en wordt de vierde gebruikt om de bodempligging (d) vast te leggen (zie Afbeelding 3.1 en bijvoorbeeld C.A.J. Fletcher vol.II [lit.14]).

Het grote voordeel van gridstaggering is dat het aantal rekenwaarden wordt verminderd met een factor 4 terwijl de nauwkeurigheid gehandhaafd blijft (andere voordelen zijn dat de implementatie van de randvoorwaarden eenvoudiger wordt, in de meeste gevallen zonder introductie van stabiliteitsproblemen, en dat oscillaties van zgn. $2\Delta x$ golven, die optreden door de randafwerking, worden voorkomen, zie G.S.Stelling [lit.15]).

Curvilineair grid

Er wordt gerekend met orthogonaal grid, waarin de gridlijnen elkaar loodrecht kruisen. In TRISULA bestaat de mogelijkheid om met een rechthoekig dan wel curvilineair grid te rekenen: de gridlijnen kunnen recht dan wel krom zijn. De curvilineaire modellering heeft een

aantal voordelen:

- *Modelleringsvoordeel:*
Gecomplieerde modellen kunnen nauwkeuriger worden weergegeven op plaatsen van interesse: de gridcellen zullen hier een hoge resolutie hebben terwijl op de minder interessante plaatsen bij de modelranden de gridcellen grover worden.
- *Rekenvoordelen:*
Samenhangend met de modelleringsvoordelen voor plaatsen van interesse levert een curvilineair stelsel ook een efficiënter aantal te berekenen waarden op: veel daar waar men er naar geïnteresseerd is en weinig waar dit niet het geval is. Een ander voordeel volgt uit de mogelijkheid om kromlijnige kustlijnen te modelleren. In rechthoekige gridstelsels kan dit alleen gemodelleerd worden door het grid trapsgewijs te laten verspringen. Dit levert een bepaalde mate van onnauwkeurigheid op omdat bij de rekenmethode in een gestaggerd grid deze trapsgewijze modellering een kunstmatige viscositeit tot gevolg heeft. Met een curvilineair grid kan dit probleem in grote mate omzeild worden.

De basisvergelijkingen worden hiertoe herschreven met omzetscoëfficiënten $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ en $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ die de curvilineaire coördinaten omrekenen naar rechthoekige coördinaten. Dit verandert echter niets aan de werking van de vergelijkingen.

Roosterafstanden en tijdstapgrootte

De grootte van de roosterafstanden en van de tijdstap is in beginsel een optimalisering van een drietal factoren:

- a) het gewenste detailleringsniveau van het model. Hoe kleiner de roosterafstanden, hoe groter het oplossend vermogen van het model. Dit geldt ook voor de tijdstap.
- b) de rekentijd van de computer. Hoe kleiner de roosterafstanden, des te meer punten het model omvat en des te meer bewerkingen moeten worden uitgevoerd om de mathematische vergelijkingen in elk punt per tijdstap op te lossen. Dit houdt in dat voor elke tijdstap meer rekentijd nodig is. Deze rekentijd wordt uiteraard zo klein mogelijk gehouden, dus een zo groot mogelijke Δx , Δy en Δt zijn gewenst.
- c) de nauwkeurigheid en stabiliteit van de berekening. Deze zijn in eerste instantie afhankelijk van de combinatie van de tijdstapgrootte Δt en de gridafstanden Δx en Δy , en de snelheid waarmee een golf zich in het model kan voortplanten ($c = \sqrt{gH}$). Deze afhankelijkheid wordt in het algemeen uitgedrukt in het Courantgetal C_r . In TRISULA wordt gerekend met een gestaggerd orthogonaal curvilineair grid, waardoor voor het Courantgetal formule (3.4) geldt.

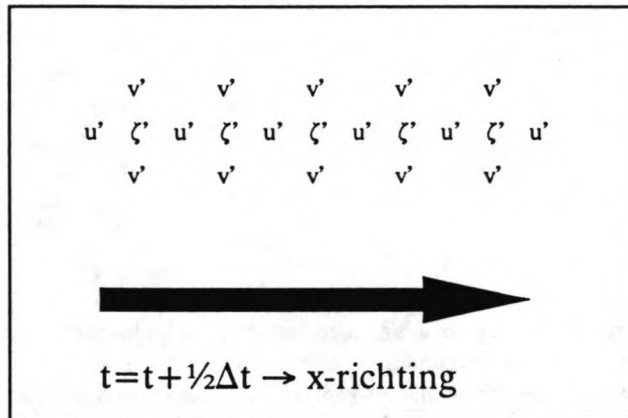
$$C_r = 2\Delta t \sqrt{gH} \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \quad (3.4)$$

De maximale waarde van het Courantgetal is afhankelijk van een groot aantal kenmerken van de het te berekenen model en van de gebruikte rekenmethode van het betreffende programma. Voor een 2DH-modellering in TRISULA geldt in principe een onconditionele stabiliteit. Dit houdt in dat voor de gebruikte rekenmethode elke Δt , Δx en Δy voldoet om een stabiel

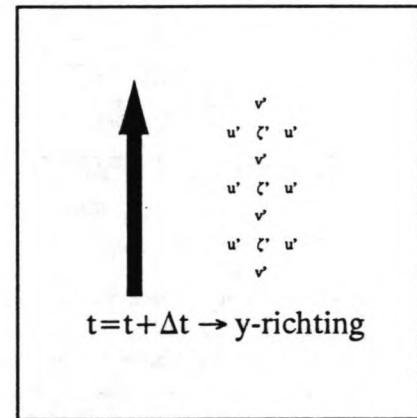
rekenproces te verkrijgen. Dit geldt echter niet voor de nauwkeurigheid ervan. Voor onregelmatige randen, waar de gridlijnen de geometrie niet glad kunnen weergeven, leiden getallen $C_r > 4\sqrt{2}$ bij de gebruikte ADI-methode (zie hieronder) tot slechte voorspellingen voor de stroombeelden (zie lit.[15]). Het verdient de aanbeveling om hiermee rekening te houden bij de opzet van een model. Bij het Open Beerdam model zijn de kleinste gridcellen ongeveer 10*15 meter en een diepte van 7 meter, waardoor een tijdstap van 6 seconden voldoende klein is.

ADI-methode

In TRISULA wordt de Alternating Direction Implicit methode toegepast. Hierbij wordt de rekentijdstap in tweeën gesplitst: in de eerste helft wordt gerekend in de x-richting en in de tweede helft in de y-richting.



Afbeelding 3.2 Eerste ADI-stap



Afbeelding 3.3 Tweede ADI-stap

In de eerste helft worden alle afgeleiden in de x-richting impliciet berekend en de afgeleiden in de y-richting expliciet (Afbeelding 3.2: u' en ζ' impliciet en v' expliciet). In de tweede helft worden de afgeleiden in de y-richting impliciet berekend en de afgeleiden in de x-richting expliciet (Afbeelding 3.3: v' en ζ' impliciet, u' expliciet).

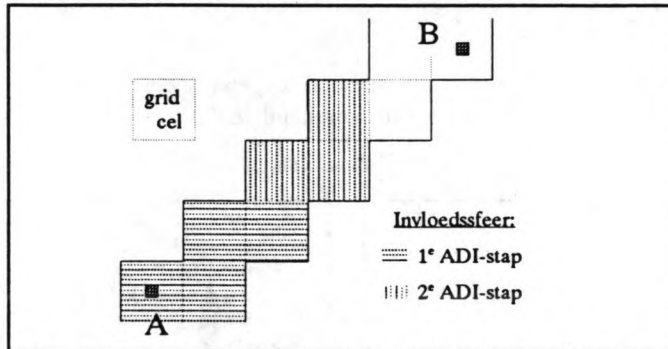
De discretisaties die bij de TRISULA 2DH-berekening gebruikt worden verschillen per term, maar bestaan voornamelijk uit een tweede orde centrale plaats-discretisatie en een tweede orde centrale tijdsdiscretisatie. Deze discretisaties leveren voor elke stap van de ADI-methode en voor elke gridrij resp. -kolom een stelsel vergelijkingen op in de vorm

$$A * V = B \quad (3.5)$$

waarin A een tridiagonale matrix is en V en B vectoren. Voor de berekening kan gebruik gemaakt worden van het Thomas-algoritme dat samen met de iteratieve oplossingsmethode Punt-Jacobi een impliciete oplossing voor (3.5) geeft. Op deze manier is een snelle en relatief eenvoudige berekening van de vergelijkingen van TRISULA mogelijk.

De ADI-methode heeft ook een aantal nadelen die voor problemen kunnen zorgen:

- De impliciteit van de methode zorgt, ook bij grote tijdstappen (en dus Courantgetallen) bij een 2DH-berekening voor een onconditionele stabiliteit. Het is desondanks soms moeilijk om met ADI voldoende nauwkeurigheid te verkrijgen. Een oorzaak hiervoor is dat het mogelijk is dat, in geval van complexe geometriën, een verstoring in een punt A, die in theorie een ander punt B in het rekengebied zou moeten beïnvloeden, dit bij ADI in het numerieke schema bij grote tijdstappen niet kan doen, simpelweg omdat de eerste slag (in de eerste helft van de tijdstap) een gedeelte van het theoretische rekengebied in de tweede slag niet bereikt kan worden (zie Afbeelding 3.4). Met een curvilineair grid kunnen deze problemen echter grotendeels voorkomen worden.

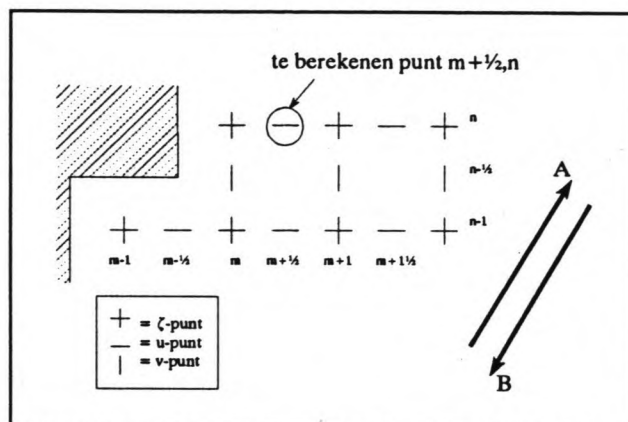


Afbeelding 3.4 Maximale invloedssfeer ADI-methode voor complexe geometriën

- Een ander probleem wordt gevormd door de afwerking aan de randen in speciale gevallen. Door de manier van discretisatie van de advectieve traagheidsterm bij de randen, kan deze bij hoge snelheden als een kunstmatige bodemwrijvingsterm werken (dus onnauwkeurigheid) of instabiliteit veroorzaken. Dit kan worden aangetoond aan de hand van een sprong in de rand van een gridschema. Voor de discretisatie van de term wordt gebruik gemaakt van formule (3.6).

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x}\right)_{m+1/2,n} \approx u_{m+1/2,n} \frac{(u_{m+1 1/2,n} - u_{m-1/2,n})}{2\Delta x} \quad (3.6)$$

De termen $u_{m-1/2,n}$ is voor een randschematisatie als in Afbeelding 3.5 gelijk aan 0. In het geval van een stroming in de richting A, ofwel $u > 0$, werkt (3.6) als een kunstmatige weerstandsterm (een vorm van u^2) met als gevolg grote waterstands gradiënten en een kunstmatige grenslaag aan de rand. In geval van een stroming in richting B, ofwel $u < 0$, kan (3.6) als een destabilisatieterm werken (als zowel $u_{m+1/2,n} < 0$ en $u_{m+1 1/2,n} < 0$ is de oplossing voor (3.6) niet uniek).



Afbeelding 3.5 Gridsprong randschematisatie

Met deze nadelen moet rekening worden gehouden bij het afregelen van een model (vooral bij modellen van een gebied met een complex uiterlijk). Door het aanhouden van formule (3.4) met een waarde van $C_f < 4\sqrt{2}$ is de nauwkeurigheid echter voldoende.

3.3 Randafhandeling

Voor TRISULA berekeningen zijn, net als voor elk ander simulatieprogramma, een aantal gegevens (voorwaarden) nodig waarmee situaties onder bepaalde omstandigheden berekend kunnen worden. Voor elke tijdstap wordt uitgaande van de situatie na de voorgaande tijdstap, een nieuwe situatie berekend. Hiervoor wordt in de eerste plaats gebruik gemaakt van de waarden van de variabelen die in de tijdstap daarvoor zijn berekend (of in het geval van een beginsituatie: gegeven). Daar waar zich in het model systeemranden bevinden zijn deze waarden echter niet bekend. Hier moet over de hele berekening een waarde worden opgelegd of op een speciale manier worden berekend. Deze waarden heten de randvoorwaarden van een model. In de numerieke hydraulische modellering worden onderscheid gemaakt tussen verticale 'gesloten' randen (water-landgrenzen)³ en fictieve horizontale 'open' randen (water-watergrenzen).

Gesloten randen

De gesloten randen kunnen worden ingedeeld in 2 soorten: de wandgrenzen en de bodemgrenzen. Voor alle gesloten randen worden alle snelheden loodrecht op de rand nul gesteld: de grenzen moeten net als in werkelijkheid ondoorlatend zijn. Bij wandgrenzen wordt in de 2DH-modellering voor verrekking van de wandschuifspanning de zogenaamde no-slip conditie opgelegd. Hierbij wordt de snelheid aan de wand nul gesteld, en worden geen ingewikkelde wandwetten toegepast die een meer nauwkeurige benadering van de werkelijke

³ Ook water-lucht grenzen behoren tot de gesloten grenzen aangezien hier ook geen water doorheen kan, maar waar wel windinvloeden verrekend kunnen worden. In het model van de Open Beerdam wordt echter geen rekening gehouden met windinvloeden, zodat de implementatie ervan achterwege wordt gelaten.

snelheden bieden. Aan de gesloten randen bij de bodem wordt verder nog de interactie tussen de vloeistof en de bodem (bodemschuifspanning) en tussen vloeistof en lucht (windschuifspanning) verrekend. Hiertoe wordt in de bewegingvergelijkingen een weerstandsterm gebruikt die het gevolg is van een (vrij correcte) aanname voor het schuifspanningsmechanisme van de bodemwrijving:

$$-\frac{g}{H} \frac{(\sqrt{u^2 + v^2})^2}{C_{2D}^2} \quad (3.7)$$

Voor de 2D schuifspanningscoëfficiënt C_{2D} kan in TRISULA gekozen worden uit 3 formuleringen, waarvan één constant is en de overige twee een functie van de diepte zijn:

- de Chézy formulering, waarbij geldt:

$$C_{2D} = \text{constant} \left[\frac{m^{1/2}}{s} \right] \quad (3.8)$$

- de Mannings-formulering, waarbij geldt:

$$C_{2D} = \frac{\sqrt[6]{H}}{n} \quad (3.9)$$

met: H = totale waterdiepte [m]

n = Manningscoëfficiënt

- de White-Colebrook formulering

$$C_{2D} = 18 \log \left(\frac{12H}{K} \right) \quad (3.10)$$

met: H = totale waterdiepte [m]

K = White-Colebrook coëfficiënt

In de praktijk blijken de drie formuleringen weinig verschillen in de stroombeelden teweeg te brengen. Voor de Open Beerdam is gekozen voor de Manningsformulering met een algemeen gebruikte waarde $n=0,026$.

De invloed van de weerstandsterm in een berekening kan worden ingeschat door deze te vergelijken met de lokale traagheidsterm uit formule (3.2) en (3.3). We ons beperken ons hiertoe tot sinusvormige golven in één richting, waarvoor geldt:

$$u = \hat{u} \cos(\omega t) \quad (3.11)$$

met: $\hat{u}$ = amplitude van de golfsnelheid [m/s]

$\omega = 2\pi/\tau$

τ = golfperiode [s]

In dat geval kan de verhouding tussen de twee termen worden geschreven als:

$$\mathfrak{R} = \frac{\left(\frac{g\hat{u}^2}{(C_{2D})^2 H} \right)}{\omega \hat{u}} = \frac{g\hat{u}}{(C_{2D})^2 \omega H} \quad (3.12)$$

Met (3.12) kan met behulp van (een schatting van) de golfsnelheid, de periode, de keuze voor C_{2D} en de plaatselijke waterdiepte een indruk verkregen worden van de invloed van de weerstand t.o.v. de lokale traagheidsterm. Voor de opening in de Beerdam wordt voornamelijk gerekend met getijgolven waarvoor bij benadering geldt:

$$\begin{aligned} \tau &= 44700 \text{ s} \\ \omega &= 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ rad/s} \\ \hat{u} &= 1 \text{ m/s} \\ H &= 20 \text{ m} \end{aligned}$$

dus volgt met (3.12): $\mathfrak{R} \approx 1$. Dit houdt dus in dat de weerstand en de traagheid ongeveer dezelfde rol bij dit probleem spelen.

Open randen

De open randen zijn de plaatsen waar het model afgebroken wordt terwijl dit in werkelijkheid niet zo is. Dit is nodig om het rekendomein te beperken. Op de open randen wordt tevens de aansturing van het model geregeld door introductie van speciale randvoorwaarden.

Om een zo goed mogelijke schatting voor de open-randvoorwaarden van een hydraulisch probleem te kunnen doen is de meest voor de hand liggende methode eerst de situatie voor het omvattende netwerk van waterlopen in een aantal punten globaal te berekenen, en de resultaten hiervan te gebruiken als de benodigde aanstuur gegevens voor het meer gedetailleerd gebied. Deze werkwijze, waarbij van groot naar klein gewerkt wordt, wordt ook wel 'nesting' genoemd.

Er zijn meerdere mogelijkheden om de randvoorwaarden in een model als TRISULA te nesten: tijdsafhankelijk of stationair.

De *tijdsafhankelijke* methode is laat de waarden net als in het nestprogramma in de tijd variëren, zodat er ook in TRISULA een tijdsafhankelijke berekening wordt gemaakt. Dit geeft een zo nauwkeurig mogelijke numerieke simulatie van de werkelijkheid, maar heeft als nadeel dat het nesten meer werk oplevert omdat tijdsafhankelijk rekenen in numerieke programma's als TRISULA instabiliteit en inspeelproblemen kan veroorzaken wat ervoor zorgt dat (veel) meer tijd nodig is om het model af te regelen.

Daarnaast bestaat de mogelijkheid om de berekening aan te sturen met een *stationaire* randvoorwaarde. Dit houdt in dat de randvoorwaarden over de hele rekenperiode constant verondersteld zijn en dat dus geen getijbeweging gesimuleerd wordt. De randvoorwaarde kan ook zó uit een tijdsafhankelijk 'nest'-programma gekozen dat een maatgevend geachte situatie wordt weergegeven. We spreken dan van een quasi-stationaire aanpak. Hierdoor wordt de werkelijk optredende situatie wel niet precies nagebootst, maar worden wel de nadelen van een tijdsafhankelijke berekening omzeild.

Open-randvoorwaarden

In TRISULA kan sturing aan de open randen door middel van vier soorten randvoorwaarden gebeuren:

- waterstandrandvoorwaarden
- snelheidsrandvoorwaarden
- debietrandvoorwaarden
- Riemannrandvoorwaarden

In de eerste twee gevallen wordt eenvoudigweg de waterstand (H) respectievelijk de stroomsnelheid loodrecht op de rand (U_1) voor de gridcellen op een bepaalde waarde vastgehouden, en kan de ander vrij variëren. In het derde geval wordt een combinatie van beide variabelen voorgeschreven (H en U_1), die beiden dus semi-variabel zijn. In principe geven deze drie opties dezelfde mogelijkheden voor implementatie.

Een punt dat extra aandacht vereist bij de manier van invoeren van de randvoorwaarden in TRISULA is het gebruik van de Riemannrandvoorwaarden.

Er kunnen in een numeriek model ongewild golven geïntroduceerd worden. Dit is het geval bij golven die ontstaan bij het 'aanslingeren' van het model: de randvoorwaarden die in een hydrodynamisch model gebruikt worden zullen, hoe zorgvuldig ze ook gekozen worden, altijd een vastgelegde beginsituatie verstoren om de gewenste stromingen te berekenen (anders gebeurt er namelijk niets en blijft het model in rust). Door deze verstoring worden golven gegenereerd die door het (numerieke) model lopen. Dit zou geen probleem zijn als de golven ook direct uit het model zouden kunnen lopen. Dit is echter niet het geval: het model heeft bij de 'open'-randen een randvoorwaarde die door zijn 'hardheid' (er wordt een bepaalde waarde aan de rand vastgehouden) in staat is golven min of meer te reflecteren. De uitdemptijd van deze golven kan in sommige gevallen zeer lang zijn doordat de golf (door toepassing van de reflecterende randvoorwaarden) in het systeem gevangen blijft en de damping geheel door (de meestal vrij geringe) bodemwrijving en numerieke effecten moet geschieden. Ditzelfde probleem treedt op wanneer het model dusdanig afwijkt van de werkelijke vorm heeft dat er golven gecreëerd worden door reflecties die in werkelijkheid niet voorkomen. De enige methode om de fouten die hierdoor ontstaan te verkleinen is de uitdamping van de stoorgolven te versnellen zodat de inspeeltijd van het systeem⁴ kleiner wordt. Bij een vaste configuratie van het model kan dit alleen als de reflectie aan de 'open'-randen kleiner worden. Dit heeft dan wel invloed op de initiële nauwkeurigheid van het model omdat er geen hard gedefinieerde rand meer is, de uiteindelijke nauwkeurigheid wordt echter veel sneller bereikt.

Er zijn in TRISULA twee manieren voor de invoer van dit soort zwak-reflecterende randvoorwaarden mogelijk:

- het voorschrijven van de zogenaamde 'Riemann-invariant' aan de randen:

$$F(t) = U \pm 2\sqrt{gH} \quad (3.13)$$

waarbij ingaande karakteristieken worden voorgeschreven en uitgaande karakteristieken worden vrijgelaten. Het principe hiervan is dat wanneer door een uitgaande golf bij een ingaande stroom (2e term rechterlid negatief; u negatief) de waterstanden toenemen de stroomsnelheid afneemt, en dus meer negatief wordt. Dit heeft tot gevolg dat er een soort antigolf wordt

⁴ Dit is de tijd waarin (vrijwel) alle opstartverschijnselen uit het systeem verdwenen zijn.

gecreëerd: de voortgangssnelheid van de golf wordt teruggedrukt, de golf dempt vrijwel uit. In het geval van een vaste waterstandsrand zouden beide factoren onafhankelijk zijn en zou de waterstand niet kunnen toenemen. De stroomsnelheid echter wel, waardoor de golf 'doorschiet', de snelheid absoluut kleiner wordt, en een totale reflectie van de golf het gevolg is. Een analytische afleiding is gegeven in Bijlage III. Voor berekening van elke invariant zijn zowel de snelheid als de waterstand nodig. Vóór de berekeningen zijn deze waarden echter nog niet bekend, terwijl we wel een Riemannwaarde moeten opgeven. Meestal zijn deze waarden wel uit een nestberekening bekend of kan in ieder geval een schatting ervoor worden gedaan. De waarden voor de snelheden zullen echter nooit precies overeenkomen: zelfs in geval van een nestprogramma zullen de twee modellen nooit dezelfde schematisatie hebben. Er kan dus alleen een beginwaarde worden aangegeven, waaruit na een aantal berekeningen een steeds betere waarde geïtereerd kan worden. De beginwaarde volgt niet direct uit formule (III.18) maar uit een linearisatie daarvan in ζ door middel van een Taylorreeksontwikkeling. De constante waarden, als gevolg van de constante bodemligging (d), in het rechterlid van de formule, kunnen dan met het linkerlid worden samengevoegd tot een 'nieuwe' invariant. Linearisatie van het rechterdeel van formule (III.18) naar ζ levert:

$$2\sqrt{g(d+\zeta)} \approx 2\sqrt{gd} + \zeta \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (3.14)$$

Hiervan is dus alleen het laatste deel variabel. De invariant kan nu dus worden benaderd met:

$$R_i \approx U_{\text{zwendel}} \pm \zeta \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (3.15)$$

- het introduceren van een zwak-reflecterende randvoorwaarde geïntroduceerd door G.S. Stelling [lit.15]. Hierbij wordt voor waterstands-randen in plaats van ζ voorgeschreven

$$F_{\zeta}(t) = \zeta + \alpha \frac{\partial}{\partial t} (U \pm 2\sqrt{gH}) \quad (3.16)$$

en bij snelheidsranden in plaats van U

$$F_U(t) = U + \alpha \frac{\partial}{\partial t} (U \pm 2\sqrt{gH}) \quad (3.17)$$

Voor voldoende kleine waarden van reflectie-coëfficiënt α zijn formules (3.16) en (3.16) een nauwkeurige benadering voor de harde waterstands- resp. snelheidsrandvoorwaarden. Hebben de vanuit het systeem komende golven echter een zeer korte golflengte (de golven zoals ze in het begin van deze paragraaf omschreven zijn), dan wordt de tweede term in het rechterlid zo groot dat de formule als een niet-reflecterende randvoorwaarde werkt. Deze golven zullen dan niet weerkaatst worden. Het voordeel van deze implementatie is dat de grip op de waterstanden of snelheden in grote mate behouden blijft. Dit levert bij eenvoudige modellen een betere nauwkeurigheid en een kortere inspeeltijd. Passende waarden voor α zijn

- voor waterstandsranden

$$\alpha = T_d$$

- en voor snelheidsranden

$$\alpha = T_d \sqrt{\frac{H}{g}}$$

T_d is hierin de tijd waarin een vrije oppervlaktegolf (met $c \approx \sqrt{gH}$) van de ene zijde van het model naar de andere loopt.

3.4 Viscositeit

Er wordt in een 2DH-modellering onderscheid gemaakt tussen de kinematische viscositeit en de turbulente viscositeit. De eerste parameter is een fysische parameter, en stelt de overdracht van kinetische energie tussen waterdeeltjes voor. De tweede parameter is een analytische parameter die het gevolg is van vereenvoudiging van het turbulentieverschijnsel om de 2DH-vergelijkingen sluitend te maken. De afleiding van de formuleringen voor beide parameters is gegeven in Bijlage II. Om een analytisch correcte waarde voor ν_H is te vinden wordt op basis van de (voor (II.3) gebruikte) Reynoldsanalogie de waarde voor de diffusiecoëfficiënt D_H voor dieptegemiddelde stromingen door brede rivieren en kanalen (zie [lit.13]) ook worden gebruikt voor ν_H . Empirisch is voor de diffusie-coëfficiënt in dwarsrichting gevonden:

$$D_H = (0.1 \text{ à } 0.2) H |u_*| \quad (3.20)$$

De formule levert een analytische schatting voor de waarde voor de turbulente viscositeit voor het dieptegemiddelde model. Een groter probleem is echter om een waarde voor het gediscretiseerde TRISULA model te vinden. Door vergelijking van de analytisch correcte en de discrete TRISULA-basisvergelijkingen kan de orde van grootte voor de viscositeit voor het discrete model ingeschat worden. Er kan dan gerekend worden met het zogenaamde 'cel-Reynolds getal'. Dit is een getal dat de verhouding tussen de niet lineaire termen (de viscositeitsterm en de advectieve traagheidsterm) uit de discrete vorm van de basisvergelijkingen (3.2) t/m (3.1) weergeeft. Voor de eenvoud nemen we de vergelijkingen voor één richting (x). De discrete vorm van de viscositeitsterm kan (zeer vereenvoudigd) geschreven worden als:

$$\nu_H \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \sim \nu_H \frac{\Delta u}{\Delta x^2} \quad (3.21)$$

De advectieve traagheidsterm kan geschreven worden als:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} \sim u \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (3.22)$$

Als de viscositeitsterm nu enig effect moet hebben in het gediscretiseerde geval, dan zullen de waarden van formules (3.21) en (3.22) afgezien van het niet lineaire snelheidsgedeelte van dezelfde orde van grootte moeten zijn, omdat anders één term volledig overheerst. De verhouding ertussen is het cel-Reynoldsgetal:

$$\frac{\frac{u}{\Delta x}}{\frac{v}{\Delta x^2}} = \frac{u \Delta x}{v} \quad (3.23)$$

Dit getal moet dus in de buurt van 1 liggen wil de viscositeit enig merkbaar effect hebben. Voor snelheden in de grootte orde van 1 m/s moeten de roosterafstanden dus ongeveer gelijk zijn aan de waarde voor de viscositeit, wil deze enige invloed hebben! Het belang van deze vergelijking speelt vooral bij de 2DH-modellen. Dit kan worden aangetoond met een eenvoudig voorbeeld:

We bekijken een brede, eenparige stroming met

$$U_{\text{gem}} = 1 \text{ [m/s]}$$

$$h = 10 \text{ [m]}$$

$$\kappa = 0.4$$

$$U_* = U_{\text{gem}} \frac{\sqrt{g}}{C} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \text{met: } g &= 10 \text{ [m/s}^2\text{]} \\ C &= 50 \text{ [m}^{1/2}\text{/s]} \end{aligned}$$

Formule (3.20) levert dan $\nu_H \approx 0.09 \text{ m}^2/\text{s}$ (hetgeen tevens de verwaarlozing van de kinematische viscositeit rechtvaardigt, zie Bijlage II). Volgens het cel-Reynoldsgetal moeten de gridafstanden voor een model waarin deze viscositeit merkbare invloed heeft in de orde van 0.1 meter liggen! Dit is uiteraard een onmogelijke waarde om een numeriek model mee te creëren. Om hetzelfde effect met grotere gridafstanden te bewerkstelligen moet de turbulente viscositeit dus aangepast worden om voorspellingen te kunnen doen van stroombeelden met inbegrip van turbulente effecten. Bovendien kan een verhoging van ν_H in sommige gevallen tevens zorgen voor een meer stabiele berekening. Door de verhoging worden er dus wel fouten geïntroduceerd, die alleen dan weinig afbreuk doen aan de nauwkeurigheid van de voorspelling als de gevoeligheid van het model voor de numerieke viscositeit klein is gebleken.

3.5 Overige parameters

Behalve de reeds behandelde aandachtspunten zijn er nog een drietal gegevens die van belang zijn:

- de dieptegegevens: voor een getijgolf-voortplanting in ondiep water geldt globaal $c = \sqrt{gH}$. Een juiste diepteschematisering is dus noodzakelijk voor het correct simuleren van een getijgolf.
- de Coriolisparameter: dit is een factor die de invloed van de rotatie van de aarde in de bewegingsvergelijking weergeeft. De waarde is afhankelijk van de ligging op aarde, en kan voor gebieden kleiner dan 500*500 km constant verondersteld worden. In

TRISULA wordt aan de hand van de coördinaten voor het model de waarde automatisch berekend en geïmplementeerd.

- de zwaartekrachtsversnelling: de veranderingen hiervan op aarde zijn klein, waardoor voor Nederland een constante waarde van $g=9.813 \text{ m/s}^2$ voldoet.

Hoofdstuk 4

Oorspronkelijk onderzoek

Hoofdstuk 4 Oorspronkelijk onderzoek

Het oorspronkelijke onderzoek is verricht in een tweetal onderzoeksfasen, waarin voor verschillende varianten een hydraulische berekening is gemaakt met een 2DH-TRISULA-model, waarmee vervolgens een nautische simulatie is uitgevoerd met het fast-time programma SHIPMA. Voordat we een vervolgonderzoek kunnen beginnen is het nodig te weten wat er in het oorspronkelijke onderzoek gedaan is: wat zijn de varianten geweest, wat waren de rand- en beginvoorwaarden in elke onderzoeksfase, en wat waren de resultaten van zowel de hydraulische en nautische berekeningen. Afbeeldingen 2.2 en 2.3 geven de verschillende varianten weer die voor de oorspronkelijke onderzoeken gebruikt zijn.

4.1 Fase I

Voor diepte schematisatie zijn voor alle varianten invoerwaarden van lodingen van de afdeling Hydrografie van Gemeentewerken Rotterdam gebruikt. Ter plekke van de doorsteek is telkens een diepte van ± 6 meter aangenomen waarbij de bodem glad verlopend is gemaakt tussen de diepe Mississippihaven en het ondiepe Hartelkanaal. In Afbeelding 4.1 zijn de isolijnen voor de diepte in de buurt van de opening (in dit geval 400 meter weergegeven). De 1000 meter variant is vrij willekeurig gekozen om scheepvaartpassages zo eenvoudig mogelijk te laten verlopen, terwijl de 400 meter variant is gekozen als goedkoper alternatief. Voor de drie varianten zijn TRISULA-berekeningen om een indruk te krijgen van de stroombeelden.

Randvoorwaarden

Zoals al gezegd zijn de randvoorwaarden 'genest' uit een schematisatie van het benedenrivierengebied in ZWENDL. De ZWENDL-takken voor de oorspronkelijke berekening zijn gegeven in Afbeelding 4.2. De schematisatie voor de opening was hierin gebaseerd op de gladde variant. De ZWENDL-berekeningen zijn uitgevoerd met een 'gemiddelde' zeerandvoorwaarde, ontleend aan een astronomische getijreeks uit mei 1979, en met twee verschillende rivierandvoorwaarden, te weten een minimaal rivierdebiet ($QBR = 800 \text{ m}^3/\text{s}$) en een gemiddeld rivierdebiet ($QBR = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$). Alle berekeningen zijn uitgevoerd voor een springtij- en een doottijdsituatie. Uit de resultaten zijn de maatgevend geachte situaties gekozen om de TRISULA berekeningen voor de detailmodellen aan te sturen. Men is ervan uitgegaan dat de meest maatgevende toestanden voor de scheepvaart optraden bij de maximale en minimale debieten in de debietsrand die volgens de ZWENDL-berekeningen tijdens springtij op 16 mei 1979 optraden.

In de oorspronkelijke berekeningen in fase I is in TRISULA gebruik gemaakt van deze laatste (quasi-stationaire) randvoorwaarden. Men er hiertoe van uitgegaan dat de dynamische responsietijden van het systeem (de tijd die het systeem nodig heeft om zich zo goed als geheel in te stellen op een tijdsafhankelijke randvoorwaarde) slechts een fractie van de getijperiode zijn, zodat stationaire berekeningen ondanks de afwijking met de werkelijkheid een goed beeld geven van de situaties die maatgevend zijn voor de scheepvaart. De waarden voor de (maatgevend geachte) waterstanden en debieten die in de oorspronkelijke TRISULA berekeningen zijn gebruikt, zijn gegeven in Tabel 4.1, de posities van de randen waar ze opgelegd zijn staan in Afbeelding 4.3.

springtij 16-5-'79	vloed	eb
H-rand (m + NAP)	0,89	1,17
Q-rand (m ³ /s)	911	778

Tabel 4.1 TRISULA-randvoorwaarden uit ZWENDL-berekeningen.

De randvoorwaarden zijn uit de ZWENDL-resultaten berekend (dus niet zomaar overgenomen) omdat de schematisering in TRISULA aangepast was (verkleining van het doorstroomprofiel van het Hartelkanaal, zie [lit.6]) hetgeen niet in de ZWENDL-schematisatie het geval was. De achtergronden van deze berekeningen zijn echter niet te achterhalen, zodat zorgvuldige onderbouwing ook niet te geven is.

Aanvankelijk zijn bij de TRISULA-berekeningen een waterstandsrandvoorwaarde aan de oostelijke rand van het model en een snelheidsrandvoorwaarde aan de noordelijke rand gebruikt. Voor deze laatste voorwaarde was een debietsrandvoorwaarde gepland. De snelheid is echter berekend uit het in ZWENDL gevonden maatgevende debiet, door dit eenvoudigweg te delen door het (globale) doorstroomoppervlak aan de rand. Het opleggen van een debietrand veroorzaakt in dit model namelijk stabiliteitsproblemen, omdat de randvoorwaarden in TRISULA gelijk over alle randvakken verdeeld wordt. Dit heeft tot gevolg dat aan de ondiepe uiteinden van de rand eenzelfde debiet wordt opgelegd als in het diepere midden van de rand. Hierdoor worden de snelheden tijdens de berekeningen in de uiteinden van de rand zo hoog, dat het programma instabiel wordt. Met het gebruik van een snelheidsrandvoorwaarde wordt dit probleem omzeild, er wordt echter wel een fout geïntroduceerd doordat de snelheden in werkelijkheid ook niet in het hele doorstroomoppervlak gelijk zijn, maar kleiner aan de ondiepe randen met meer wrijving. De fout zou verbeterd kunnen worden door een soort 'trechter' aan de modelrand te koppelen die geleidelijk overgaat van een rechthoekig profiel (waarin het vrijwel correct is dat de snelheden overal gelijk zijn) naar het bestaande profiel. Dit neemt echter voor dit onderzoek teveel tijd in beslag, waardoor we deze fout moeten accepteren. De fout is bovendien vrij klein, omdat de dieptes in dit deel relatief groot zijn ten opzichte van de dieptes in de opening. De verschillen met een rechthoekig profiel zijn dus ook klein.

Resultaten TRISULA-berekeningen

Voor 1000 en 400 meter opening zijn berekeningen gemaakt voor zowel maatgevende eb- als vloed-condities. Dit leverde de volgende beelden op:

Afbeelding 4.4a geeft de vloed-situatie voor 1000 meter opening weer. Stroomsnelheden in de opening zijn klein en er doen zich geen onverwachte verstoringen voor. Ter plaatse van de opening zijn de versnellingen als gevolg van de verondieping (met de stroom mee) duidelijk te zien. In het westelijke deel van het Hartelkanaal is vrijwel geen stroming te zien.

Afbeelding 4.4b geeft de eb-situatie voor 1000 meter opening weer. Nu zijn de stroomsnelheden in het Hartelkanaal lager dan bij vloed, bovendien blijkt er een neer te ontstaan vanaf de noordwand van de opening. De hoofdstroom in de opening ligt tegen de noordelijke wand aan, omdat de verdieping (met de stroom mee) direct na de voormalige

damaansluiting het merendeel van het water 'naar zich toe trekt'. Dit zou overigens niet in eerste instantie verwacht worden: het is normaal voor een hoge snelheidsstroming om 'door te dendereen'. Bij de aanwezige bodemconfiguratie wordt de hoofdstroom door de neer blijkbaar dusdanig weggedrukt dat aanliggen aan de noordwand mogelijk is. Ook nu is de stroming in de westelijke Harteltak minimaal.

Afbeelding 4.5a geeft de vloed-situatie voor 400 meter opening weer. Stroomsnelheden in de opening zijn nu ongeveer 0,4 m/s en er vindt een duidelijke omstroming van de resterende dam plaats. Verder verschillen de resultaten niet veel van die bij 1000 meter opening, waarschijnlijk omdat het aanvullende stuk dam zich niet in een voor de 1000-meter-stroming relevante zone bevindt. De retourstroom in de westelijke Harteltak is iets groter dan bij 1000-meter opening, echter niet noemenswaardig.

Afbeelding 4.5b geeft de eb-situatie voor 400 meter opening weer. De neer is in omvang toegenomen, alsmede de omstroming van het resterende damhoofd. Belangrijker is echter de retourstroom vanuit de westelijke Harteltak met snelheden van ca. 0,20 m/s. Dit is nogal vreemd, daar het hier om een gesloten haventak gaat, die na enige tijd (wegens de stationairiteit van de berekening) geen water meer het systeem inlaat. De retourstroom werd betiteld als 'het gevolg van lichte instabiliteit van het rekenmodel' die een stoorgolf in het kanaal tot gevolg zou hebben.

Resultaten nautische-simulaties

Naar aanleiding van de beelden uit de hydraulische berekeningen is er aanvankelijk besloten om de opening van 400 meter niet uit te voeren omdat de snelheidsverschillen in de opening voor scheepvaart ontoelaatbaar zouden zijn [zie lit.8]. Dit bleek uit nautisch onderzoek op deze stroombeelden met het fast-time programma SHIPMA, dat liet zien dat de 400 meter opening tot niet acceptabele manoeuvreer-situaties zou leiden voor westgaande 6-baks duwvaart (Afbeelding 4.6a en b). Als grootste obstakel werd de retourstroom in de westelijke Harteltak genoemd, die echter van numerieke aard was. De retourstroom leek in dit geval ook een stuk lager, zodat deze situatie als minder ongunstig werd gemarkeerd. De grote breedte laat bij 1000 meter opening genoeg ruimte over om scheepvaart ongehinderd te laten passeren. Vooral het belang van de retourstroom voor de simulaties, en de ongefundeerde verklaring ervan maakte een vervolgonderzoek noodzakelijk.

4.2 Fase II

Aan de resterende twee basisvarianten is in Fase II nog een derde variant toegevoegd, daar de problemen voor de scheepvaart in de nautische simulaties bleek mee te vallen en men toch op zoek was naar een concurrerend alternatief voor de 400 meter variant. De nieuwe variant betreft een opening van 200 meter breed, hetgeen als absoluut minimum voor de scheepvaart wordt geacht (Afbeelding 2.2). De schematisatie met uitzondering van de opening is dezelfde als bij de eerste twee varianten. In de tweede fase van het onderzoek is verder naar een meer specifieke verklaring voor de oorzaak van de bij de 400 meter variant optredende retourstroom gezocht. Hiertoe is er nauwkeuriger gekeken naar de stroomsnelheden en de waterstanden in het model. Er zijn hiertoe een aantal meetstations geïntroduceerd waarvan de plaats in het model weergegeven is in Afbeelding 4.7.

Randvoorwaarden

Voor het genereren van de nieuwe randvoorwaarden is het nodig te weten waar de stroming in de westelijke Harteltak vandaan komen. De retourstroom bleek het gevolg te zijn van oscillaties in het Hartelkanaal. Er werden twee mogelijke oorzaken voor aangewezen:

- a) De stoorgolven zouden van numerieke aard kunnen zijn (zie § 3.3), en dus na enige tijd uit moeten dempen door de bodemwrijving. In dit geval zouden ze in werkelijkheid niet optreden.
- b) Ze zouden van fysieke aard kunnen zijn, en dus in werkelijkheid wel optreden. In dit geval moet de oorzaak gezocht worden in resonantieverschijnselen die het gevolg zijn van de stroming en de configuratie in het gebied.

Het onderzoek naar de oscillaties in de TRISULA-berekeningen is gedaan door middel van het toepassen van een 'uitdempoproef'. Hierbij is op het model in rust een stoorgolf aangebracht, die qua grootte en golflengte overeenkwam met de waargenomen stoorgolf. De heersende rustsituatie houdt in dat de fysieke oorzaak b) in dit geval uitgesloten kon worden, omdat er geen aandrijvende stroming voor resonantie aanwezig was. Zou de golf nu toch in het systeem blijven en zeer langzaam uitdempen, dan zou er met zekerheid sprake zijn van een inspeelverschijnsel als gevolg van reflecterende randvoorwaarden. Dit laatste bleek inderdaad het geval te zijn: de golf bleek zelfs na 5 uur nog niet te zijn uitgedempt. Afbeelding 4.8 laat dit zien aan de hand van modelmetingen voor de stroomsnelheden in de stations in de westelijke Harteltak (station 5,6 en 7) nadat de stoorgolf is aangebracht.

Toen zeker was dat de stoorgolven ontstaan waren door de randafwerking, is er een aantal berekeningen uitgevoerd die aangestuurd werden met Riemann-randvoorwaarden aan de oost-rand. De snelheidsrandvoorwaarde aan de noordrand bleef dezelfde als in Fase I. Hierdoor dempen de stoorgolven veel sneller uit: na een paar uur zijn de verstoringen al verwaarloosbaar klein en uiteindelijk verdwijnen ze helemaal (zij het na lange tijd: $t = \pm 1500$ min.), zoals te zien is in Afbeelding 4.9.

De waarden van de invarianten zijn overigens het resultaat van deels berekening en deels iteratieve bewerkingen (zie § 3.3).

Tweede-fase berekeningen voor de 400 meter variant voor de vloed-conditie zijn niet meer uitgevoerd omdat hierbij de invloed van de stoorgolf in eerste instantie toch al miniem was. De tweede-fase berekeningen voor eb-conditie gaven geen opmerkelijke wijzigingen voor de stroombeelden, behalve in het gedeelte dat beïnvloed werd door de stoorgolven.

Resultaten

Afbeelding 4.10a geeft de eb-situatie voor de 400 meter opening weer 120 minuten na het begin van de berekening (wanneer de stoorgolf zo goed als uitgedempt is). De stroombeelden aan de westelijke oever van de opening zijn nu aanmerkelijk rustiger, en de hoofdstroom blijft zich nog beperken tot het noordelijk deel van de opening. De neer is iets in omvang afgenomen.

Afbeelding 4.10b geeft de eb-situatie voor 400 meter opening weer, maar nu op 180 minuten: de neer heeft zich naar het westen verplaatst, en de hoofdstroom heeft zich meer ontwikkeld naar het noordwesten.

Afbeelding 4.11 geeft de grafieken voor de snelheden en de waterstanden voor de stations in de

oostelijke Harteltak en het Beerkanaal voor eb-conditie en 400 meter opening weer (stations 2,3 en 9). In stationaire toestand zijn de snelheden uiteraard het hoogst in station 9, waar het kanaal het smalst is ($U_9 = 0,8$ m/s). In station 3 zijn de snelheden door de toegenomen breedte beduidend kleiner ($U_3 = 0,5$ m/s). Station 2 laat zien dat de neer in het Beerkanaal langzaam noordelijk beweegt. Voor de 'bult' op $t = 120$ min. is er nog sprake van een vrij lage snelheid ($U_2 = 0,1$ m/s), in de neer loopt deze op (tot $U_2 = 0,3$ m/s) en na het passeren wordt de stationaire toestand bereikt ($U_2 = 0,15$ m/s). De waterstandsgrafiek voor dezelfde stations laat duidelijk zien dat in het bovenstroomse gedeelte van het Hartelkanaal de waterstand iets hoger is ($H_9 = 1,2$ m) dan in de meer benedenstroomse gebieden ($H_3 = H_2 = 1,15$ m). In beide grafieken is de werking van de Riemann-invariant duidelijk te zien: in de eerste minuten van de berekening treden drastische schommelingen op als gevolg van het verwerken van de grootste stoorgolven. De schommelingen nemen snel af naarmate de berekening vordert. De berekeningen zijn ook voor een langere periode gedaan om er zeker van te zijn dat er geen nieuwe neren in het openingsgebied zouden ontstaan. Er bleek inderdaad sprake te zijn van een stationaire toestand, zelfs op $t = 1500$ min. waren de snelheden en waterstanden verder ongewijzigd.

Afbeelding 4.12 geeft de eb-situatie voor de 200 meter opening weer, ook op $t = 120$ min.. Bij deze variant is de westelijke oever van de opening zover in het stroombeeld 'geschoven' dat voor het damhoofd weer warrige stroombeelden ontstaan, de neer ligt nu een stuk noordelijker, en er lijkt zelfs een tweede neer aan de noordzijde van de stroom te ontstaan.

Afbeelding 4.13 geeft weer de metingen voor stations 2,3 en 9 aan, nu voor de 200 meter variant. Ondanks de versmalling zijn er vrijwel geen verschillen voor stations 3 en 9 in vergelijking met de 400 meter variant. Dit komt omdat de versmalling op bovenstroomse stations niet veel invloed kan hebben omdat hier de configuratie gelijk is gebleven. Bovendien ligt het grootste deel van de dam bij 200 meter opening buiten de hoofdstroom van de 400 meter opening, zodat het effect hierop minimaal zal zijn. Wel is de verschuiving van de neer te zien in het benedenstroomse station 2. De maximale snelheden in dit station tijdens het langstrekken van de neer zijn gedaald tot $U_2 = 0,2$ m/s, en de pieksnelheden treden nu op als $t = 60$ min..

Afbeelding 4.14: De maximale snelheden in stations 5, 6 en 7 als gevolg van de stoorgolf zijn voor de 200 meter variant in eb-situatie initieel iets hoger dan bij 400 meter opening, maar dempen ook hier na een aantal uren weer netjes uit. Hetzelfde geldt voor de waterstanden.

Afbeelding 4.15 geeft het beeld voor 200 meter opening vloed-conditie op $t = 120$ min. weer. De stroomsnelheden zijn iets hoger dan bij 400 meter en over de hele opening gelijk. Ook blijkt er een kleine neer in het Hartelkanaal te ontstaan.

Afbeelding 4.16: Vloedsnelheden en -waterstanden voor de 200 meter opening. Nu geldt: $U_9 = 1,05$ m/s; $U_3 = 0,6$ m/s; $U_2 = 0,1$ m/s. De neer is ook hierin niet meer terug te vinden. Waterstanden stijgen nu van oost naar west: $H_9 = 0,7$ m; $H_3 = 0,85$ m; $H_2 = 0,9$ m. Deze laatste zijn meer variërend dan bij de eb-situatie, omdat bij vloed de snelheidsverschillen over de opening groter zijn.

Resultaten nautische simulaties

Na het tweede fase hydraulisch onderzoek zijn ook weer nautische simulaties met de resultaten

hiervan uitgevoerd. Hierin blijken de nieuwe stroompatronen voor 400 meter opening geen noemenswaardige veranderingen voor de scheepvaart op te leveren. Nu wordt de situatie echter, met name voor de lege 6-baks duwvaart op het Hartelkanaal, wèl acceptabel bevonden doordat een verfijning van de controle op de scheepsbesturing in het simulatie programma SHIPMA een betere volging van de vaarbaan tot stand bracht. Zelfs de passages bij 200 meter opening bleken nu geen onoverkomelijke problemen op te leveren bij het voorkomen van strandingen (Afbeelding 4.17a en b). Wel zouden er, vooral bij harde wind, problemen op kunnen treden bij scheepvaartontmoetingen in of nabij de opening vanwege het gebrek aan manoeuvreerruimte⁵. Uiteindelijk werd een real-time simulator-onderzoek als noodzakelijk controlemiddel sterk aanbevolen.

4.3 Conclusies

Uit de behaalde resultaten is geconcludeerd dat de variant met een opening van 400 meter voldoende ruimte bied voor de scheepvaartbewegingen. Verder blijkt een Riemann-randvoorwaarde noodzakelijk om stoorgolven in het Hartelkanaal snel genoeg te dempen. De neer in de stroombeelden met 400 meter opening lijkt geen struikelblok voor de scheepvaart, al zal enige hinder hierdoor ongetwijfeld aanwezig zijn.

⁵ Het toelatingsbeleid sluit nu alleen ontmoetingen van duwvaart onderling uit, ontmoetingsrestricties met andersoortig verkeer moeten nog door het Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam opgesteld worden.

Opzet nieuwe TRISULA-berekeningen

Hoofdstuk 5 Opzet nieuwe TRISULA-berekeningen

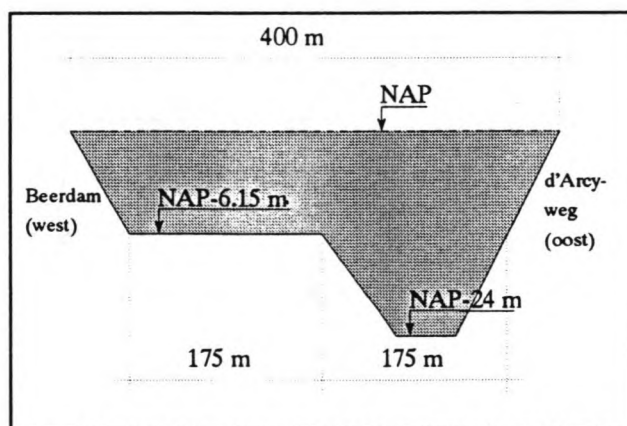
De oorspronkelijke TRISULA-berekeningen hebben een eerste indruk gegeven van de hydraulische gevolgen van de opening. Er zijn echter een aantal aanmerkingen op de gevolgde werkwijze en de gebruikte randvoorwaarden. Allereerst zijn er meer recente en bijgestelde berekeningen met ZWENDL gemaakt waardoor gebruik van de oorspronkelijke ZWENDL-randsturing niet meer accuraat is. Verder vond men een beter inzicht in de gevolgen van de keuze van de viscositeitsparameter noodzakelijk om de betrouwbaarheid van de berekeningen te verhogen. Daarnaast wordt het eenvoudig glad gestreken bodemverloop van het Hartelkanaal naar het Beerkanaal in de TRISULA-modellering als conservatief beschouwd [lit.6] en was er van de kant van de opdrachtgever behoefte aan berekeningen met een meer gedetailleerde uitwerking van het bodemprofiel van de opening. Tenslotte wilde men eveneens in verband met de betrouwbaarheid de keuze voor de huidige werkwijze met stationaire randvoorwaarden verantwoorden. Voor de onderzoeken naar de viscositeit, het openingsprofiel en de tijdsafhankelijke modellering zijn stationaire uitgangsberekeningen nodig met inachtneming van de aanpassingen die sinds de oorspronkelijke berekeningen gedaan zijn.

5.1 Aanpassingen oorspronkelijke schematisaties

Sinds de oorspronkelijke berekeningen met TRISULA zijn er in een meer gedetailleerde fase van de onderzoeken veranderingen in de ZWENDL-schematisatie aangebracht. Dit heeft uiteraard ook gevolg voor de nauwkeurigheid van de TRISULA-berekening. Hierin zullen deze veranderingen ook verwerkt moeten worden als er berekeningen met de nieuwe randvoorwaarden volgen.

ZWENDL aanpassingen

De oorspronkelijke ZWENDL-berekeningen voor het 'nesten' van de TRISULA-randvoorwaarden zijn tot december 1992 uitgevoerd met een openingsschematisatie die afgeleid is van de 'gladde variant' (zie Afbeelding 2.3). Deze variant is echter wegens zijn kostbaarheid niet meer relevant. De 400 meter variant geniet de voorkeur en de schematisatieverschillen tussen deze twee varianten, in tegenstelling tot die tussen de gladde- en de 1000 meter-variant, zijn niet meer verwaarloosbaar. Er zijn naar aanleiding hiervan nieuwe



Afbeelding 5.1 Nieuwe ZWENDL-schematisatie

ZWENDL-berekeningen uitgevoerd waarbij de openingsschematisatie aangepast is aan de 400 meter doorsteek. Om de doorsteek te schematiseren is er aan de openingsloze ZWENDL-schematisatie een extra vak toegevoegd tussen de punten 333 en 341. Dit vak heeft een lengte van 100 meter en een doorstroomoppervlak als getoond in Afbeelding 5.1.

Een verdere aanpassing van de schematisatie betreft de toevoeging van een vak voor de Amazone-haven (vaknr.387) tussen de Europahaven en de Mississippihaven. Van deze haven is op dit moment de eerste fase van de constructie in het kader van het plan 'Delta 2000-8' [lit.3] gereed. Dit houdt in dat er nu een haven ligt van ca. 900 meter lang, 250 meter breed en 24 meter diep. In een tweede fase zal deze haven worden uitgebreid tot een lengte van ± 2500 meter. Afbeeldingen 5.2a en b geven de layout van de (toekomstige) haven weer.

Aanpassingen TRISULA- schematisatie

In het nieuwe onderzoek is de oorspronkelijke TRISULA-schematisatie aangepast zodat ze overeenstemmen met de nieuwe ZWENDL-schematisatie.

Allereerst zijn aan de bestaande schematisatie de Amazonehaven toegevoegd. Het grid is hiertoe uitgebreid met 11*5 cellen met de streefdiepte van de haven (Afbeelding 5.3). Een totaaloverzicht van de nieuwe gridschematisatie is gegeven in Afbeelding 5.4

Een verdere aanpassing is gemaakt bij de opening zelf. Uit de oorspronkelijke diepteschematisatie bleek dat voor de 400 meter schematisatie een 'verlenging' van de Beerdam vanuit de 1000 meter schematisatie was gebruikt. Hiertoe zijn eenvoudigweg een aantal gridcellen buiten werking gesteld. Dit houdt in dat de diepte aan de westelijke openingszijde geen reële waarden heeft: in plaats van een talud is hier sprake van loodrechte wanden over de hele diepte. Aangezien het model gevoeligheid heeft getoond voor loslating van neren in de opening, wordt het verstandig geacht om de wand een reël talud van ca. 1:4 te geven (Afbeelding 5.5).

5.2 Randvoorwaarden

De resultaten van de nieuwe ZWENDL-berekeningen zijn gebruikt in de nieuwe TRISULA-berekeningen. De nieuwe randvoorwaarden zijn uit dezelfde spring- en doottijperiode genomen als de oorspronkelijke, en werden door Gemeentewerken Rotterdam aangeleverd als zijnde maatgevend⁶ (zie Tabel 5.1).

ZWENDL meetpunt	springtij	vloed	eb
	16-5-'79	4:50	22:10
390.2	H-rand (m + NAP)	0,20	-0,37
372.2	Q-rand (m ³ /s)	-2708	1696

Tabel 5.1 Nieuwe TRISULA-randvoorwaarden uit ZWENDL-berekeningen

⁶ Het kiezen van de maatgevende toestand was hierbij een moeilijk punt, temeer daar de gegevens over de keuze van de oorspronkelijke randvoorwaarden niet (meer) bekend waren. Men is er op aanraden van het RIZA vanuit gegaan dat de maatgevende toestanden optreden wanneer de stroomsnelheden in het Hartelkanaal het hoogst zijn, zodat de scheepvaart de meeste hinder zal ondervinden.

Voor de viscositeit wordt de oorspronkelijke waarde van $\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$ aangehouden, terwijl ook alle overige parameters onveranderd zijn.

5.3 Resultaten

Voor het verkrijgen van een berekening die zo snel mogelijk de gewenste stationaire toestand weergeeft moet het model 'afgeregeld' worden. Hiertoe wordt eerst de nieuwe 'harde' waterstandsrand omschreven worden naar een bijpassende Riemann-invariant. De procedure hiervoor staat omschreven in hoofdstuk 3. In de eb-berekeningen is met een beginvoorwaarde van $\zeta_0 = -0,37 \text{ m}$ gewerkt, waardoor met $H_{\text{rand}} = 7 \text{ m}$, $U_{\text{zwendl}} = -1,19 \text{ m/s}$ en $\zeta = -0,37 \text{ m}$ wordt gerekend. Dit levert met formule (3.15) : $R_1 \approx -1.62$. Afbeelding 5.6 geeft de resultaten voor waterstanden en de snelheden van deze berekening weer. De waarden voor de waterstanden worden echter niet stationair maar lijken af te lopen naar een veel lagere waarde dan de bedoelde $-0,37 \text{ m}$: het leek erop alsof het model langzaam leegliep, en een oorzaak was aanvankelijk niet direct aan te wijzen. Na veel proberen bleek de oorzaak van de dalende waterstand de beginvoorwaarde te zijn: de aanname dat de beginvoorwaarde niet van groot belang was voor het uiteindelijk resultaat klopte, maar een (te hoge of te lage) waarde voor ζ_0 gaat slechts zeer langzaam naar de door de randvoorwaarden gedicteerde eindsituatie toe. De enige manier om dit te ondervangen is door met behulp van een langdurige beginberekening de eindwaterstand voor de geschatte Riemann-randvoorwaarde te bepalen en deze te gebruiken als beginwaterstand voor een nieuwe berekening, waarvoor de Riemann-invariant echter weer gewijzigd moet worden. Dit houdt in dat er in plaats van de op twee parameters gebaseerde iteratieve bepaling van de Riemann-invariant nu met drie parameters rekening gehouden moet worden, die elkaar bovendien allemaal beïnvloeden. De iteratie is hierdoor een moeizame en tijdrovende bezigheid, die pas na enige ervaring met het model redelijk snel kan worden toegepast.

De resultaten voor de afgeregelde berekening voor eb-conditie zijn gegeven in Afbeelding 5.7. Er blijkt een veel sterkere stroming in het Hartelkanaal te staan dan in de ZWENDL-berekeningen het geval was ($U_9 = 2,3 \text{ m/s}$ tegenover $U_{\text{zwendl}} = 1,19 \text{ m/s}$). De vloedberekeningen geven dezelfde problemen. Afbeelding 5.8 laat zien dat de stroomsnelheden ook hierbij veel hoger zijn dan de ZWENDL resultaten.

5.4 Verklaring en aanpassing randvoorwaarden

De te hoge snelheid kan in de eerste plaats duiden op een fout in de gebruikte randvoorwaarden. Bij een stationaire berekening zal uiteindelijk het voorgeschreven debiet aan de noordrand ook de oostrand moeten passeren (anders loopt het model leeg of vol). Het maatgevende eb-debiet was gegeven als $Q_{\text{rand}} = 1794 \text{ m}^3/\text{s}$. Als dit door het Hartelkanaal stroomt met een oppervlakte gevormd door een waterstand van $H - \zeta \approx 6,63 \text{ m}$ en een kanaalbreedte van $B \approx 125 \text{ m}$ krijgen we inderdaad snelheden van ca. $2,2 \text{ m/s}$. Een te hoog randdebiet kan hier direct de oorzaak van zijn. Na controle is gebleken dat het niet in TRISULA geschematiseerde ZWENDL-vak 371 in de debietrand meegenomen was. Dit is het grootste vak in de ZWENDL-schematisatie en heeft dus in de tijdsafhankelijke berekening van ZWENDL een behoorlijk bergende werking, die zeker niet mag worden verwaarloosd. Het debiet in punt 372.2 moet dus nog verminderd worden met het debiet in punt 371.2 ($295 \text{ m}^3/\text{s}$). Nu wordt de debietrand: $Q_{\text{rand}} = 1469 \text{ m}^3/\text{s}$. Maar ook dit zal nog te hoge snelheden van $U_9 \approx 1,8 \text{ m/s}$ opleveren. Dit moet dan toch een andere oorzaak hebben.

Een tweede oorzaak van het snelheidsverschil zou het verschil tussen de schematisaties van TRISULA en ZWENDL kunnen zijn. Er is echter ruim aandacht besteed aan het overeenkomstig krijgen hiervan. Kleine snelheidsverschillen zouden uiteraard wel aan schematisatieverschillen verweten kunnen worden, maar in dit geval hebben we te maken met snelheidsverschillen van meer dan 50% !

Een derde oorzaak van de snelheidsverschillen tussen TRISULA en ZWENDL die overblijft is dan dat de overname van de resultaten van de tijdsafhankelijke ZWENDL-modellering voor de quasi-stationaire TRISULA-modellering niet correct is. In deze paragraaf wordt daar niet verder op ingegaan, in hoofdstuk 8 wordt hier meer aandacht aan besteed.

Er is, om tijd te sparen en omdat de reden van het verschil aanvankelijk niet bekend was, eerst verder onderzoek gedaan met aangepaste randvoorwaarden die wel de gewenste snelheden in het Hartelkanaal teweegbrengen: $Q_{\text{rand}} = 960 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze randvoorwaarde is bepaald door de snelheden in het Hartelkanaal uit ZWENDL om te rekenen naar een debiet voor TRISULA. Van het hierop afgeregelde model zijn in Afbeelding 5.9a en b de waterstanden en snelheden in de meetstations in de hoofdstroom gegeven, terwijl Afbeelding 5.10a-b de stroombeelden en het isolijnenpatroon voor de snelheden weergeeft.

Dit aangepaste model is in de volgende hoofdstukken gebruikt voor een gevoeligheidsanalyse voor de viscositeit en voor de openingsschematisatie. Overigens is het daarvoor niet direct nodig om met nauwkeurige randvoorwaarden te werken, omdat bij gevoeligheidsonderzoeken toch meer naar verschillen in stroompatronen en stroomsnelheden wordt gekeken dan naar de nauwkeurigheid ervan.

Gevoeligheidsonderzoek viscositeit

Hoofdstuk 6 Gevoeligheidsonderzoek viscositeit

Dit hoofdstuk bevat een verslag van een onderzoek naar de gevoeligheden van de TRISULA modellering van de Open Beerdam voor de keuze van de 2DH-turbulentie viscositeit ν_H . We spreken vanaf nu alleen van viscositeit, aangezien de kinematische viscositeit verwaarloosd wordt. Na een korte inleiding (§ 6.1) wordt de onderzoeksopzet uiteengezet (§ 6.2) waarna de resultaten (§ 6.3) en een verklaring met conclusies (§ 6.4) volgen.

6.1 Inleiding

De grootte van de parameters die in TRISULA gebruikt worden zijn gebaseerd op aannames voor het gedrag van het model ten opzichte van de werkelijkheid. Deze aannames kunnen met zich mee brengen dat de geschiktheid van het model voor het onderzoek geringer wordt. Een methode om deze geschiktheid in te schatten is een gevoeligheidsanalyse, waarbij wordt gekeken hoe de uitkomsten van de berekeningen afhangen van de keuze van de parameters. Hierna kan dan gesteld worden hoe afhankelijk de berekeningen van de waarde voor een bepaalde parameter zijn, en kan een uitspraak worden gedaan over het al dan niet terecht toepassen van de 2DH-modellering.

Het als vuistregel handig om te weten dat voor een 2DH-berekening 'normaal gesproken' waarden van $\nu_H = 0 \text{ m}^2/\text{s}$ tot $\nu_H = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ beperkte invloed hebben op een tijdsafhankelijke stromingsberekening, maar dat waarden hoger dan $\nu_H = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ een duidelijke afvlakking van de snelheidsgradiënten laten zien. Deze effecten zijn voor een stationaire berekening in het algemeen al bij veel lagere waarden te zien. In het geval van de oorspronkelijke Open Beerdam berekeningen heeft men gekozen voor een relatief lage waarde van $\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$. De afmetingen van de afzonderlijke grids in het schema dat gebruikt wordt, zijn ten opzichte van de 'normale' berekeningen namelijk zo klein (de kleinste is slechts 10 bij 15 meter terwijl dit 'normaal' in de orde van meerdere tientallen meters is) dat men aan heeft genomen dat $\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$ eerder een hoge dan een lage waarde is. Dit is theoretisch te verklaren met het cel-Reynoldsgetal (§ 3.4), dat nog veel lagere waarden zou voorschrijven. De achterliggende gedachte van deze keuze was, dat als er in de berekeningen ondanks de relatief hoge viscositeitsparameter toch neren voorkomen, het waarschijnlijk is dat ze ook in werkelijkheid opgewekt zullen worden.

Aangezien men echter met deze berekeningen de meest ongunstige situatie voor de scheepvaart wilde weergeven werd het verstandig geacht de parameter ook weer niet te hoog te kiezen. Een lage waarde voor ν_H houdt mede in dat door grotere snelheidsgradiënten de stroombeelden onrustiger zijn en minder gunstig weergegeven worden.

Het werkelijke gedrag van de stroming in de opening is te onvoorspelbaar om op basis hiervan een zo goed mogelijke schatting voor de viscositeit te doen. Verder was men er niet zozeer op uit om het gedrag van het hele model te bekijken, maar meer om de stroombeelden nabij de randen van de opening zelf te voorspellen, waarbij een relatief lage viscositeit de meest warrige stroombeelden tot gevolg heeft. Voor de scheepvaart door de opening zelf zou een zo laag mogelijke viscositeit dus noodzakelijk zijn om 'op het ergste voorbereid te zijn'.

Na de oorspronkelijke TRISULA berekeningen vond Rijkswaterstaat de keuze voor een viscositeit van $\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$ niet voldoende gefundeerd. Vooral door het ontstaan van de neren in eb-situatie (§ 5.3), naar alle waarschijnlijkheid mede als gevolg van deze keuze, rezen steeds meer vragen over de betrouwbaarheid van de gevonden stroombeelden. Daarom is

besloten om in het vervolgonderzoek voor deze parameter een gevoeligheidsonderzoek op te stellen.

6.2 Onderzoeksopzet

De invloed van de viscositeit kan het meest duidelijk worden gemaakt door een aantal berekeningen met TRISULA uit te voeren waarin alleen ν_H gevarieerd wordt. Aan de hand van de resultaten kan dan een uitspraak gedaan worden over de correctheid van de keuze voor de parameter in de oorspronkelijke onderzoeken.

Doel

Het doel van het onderzoek is om het gedrag van het model van de Open Beerdam bij verschillende viscositeitsparameters te analyseren en om een uitspraak te kunnen doen over de correctheid van de oorspronkelijk gebruikte waarde van $\nu_H = 0.3 \text{ m}^2/\text{s}$.

Werkwijze

De waarde voor ν_H wordt gevarieerd van $\nu_H = 0.06 \text{ m}^2/\text{s}$ tot $\nu_H = 5.0 \text{ m}^2/\text{s}$, bij elke waarde worden de stroombeelden geanalyseerd. De hoogste waarde is een gemiddelde waarde voor tijdsafhankelijke berekeningen (dus relatief hoog voor een stationaire berekening), de laagste waarde is een analytische correcte waarde (die in de praktijk echter veel te laag zal blijken te zijn, zie § 3.4). De waarden voor de viscositeitsparameter waarmee gewerkt is, zijn gegeven in Tabel 6.1. De waarden zijn zo gekozen dat met name het gebied in de buurt van de oorspronkelijke waarde goed geanalyseerd kan worden, omdat vooral hier de grootste verschillen verwacht worden. Er is alleen naar de situatie onder eb-conditie gekeken, omdat de vloed-conditie in de oorspronkelijke berekeningen geen neren (en dus voor scheepvaart storende stroombeelden) teweegbrengt. Voor de analyse van de stroombeelden wordt gebruik gemaakt van vectorplots van de omgeving van de opening en van isolijnenplots voor de snelheid. De vectorplots zijn gebaseerd op een pijl van één centimeter voor een snelheid van één meter per seconde. De isolijnen hebben een interval van 0.1 m/s .

Berekening	$\nu_H \text{ [m}^2/\text{s]}$
V0.06	0.06
V0.15	0.15
V0.3 (ref)	0.3
V0.5	0.5
V0.75	0.75
V1.0	1.0
V2.5	2.5
V5.0	5.0

Tabel 6.1 ν_H -waarden onderzoek

Randvoorwaarden en uitgangspunten

Voor het gevoeligheidsonderzoek gaan we uit van de huidige TRISULA schematisatie van de 400-meter variant van de opening, en alleen van de eb-situatie uit hoofdstuk 5 omdat de neerontwikkeling bij vloed ontbreekt en een (turbulentie) viscositeitsanalyse voor deze situatie dus niet interessant is. Voor alle berekeningen zullen dezelfde aangepaste zwak-reflecterende randvoorwaarden uit ZWENDL gebruikt worden, en worden alle parameters anders dan die voor de viscositeit gelijk gehouden.

6.3 Resultaten

Voor elke berekening zijn de resultaten met een bespreking ervan weergegeven:

V0.06 - Afbeelding 6.1a-b

Hierin is gerekend met een analytisch correcte waarde van $\nu_H = 0.06 \text{ m}^2/\text{s}$. Praktisch is deze waarde echter véél te laag om een juist beeld te geven in een numeriek 2DH-model. Dit blijkt ook wel uit de resultaten: de stroombeelden westelijk van de opening laten een groot aantal neren zien, waardoor de berekening zelfs niet meer stationair is.

V0.15 - Afbeelding 6.2a-b

Er blijkt bij een waarde van $\nu_H = 0.15 \text{ m}^2/\text{s}$ nog maar één grote neer te resteren, de stroombeelden meer noordelijk van de opening zijn echter nog warrig. Nu is ook duidelijk een hoofdstroom te herkennen vanaf de opening naar de Mississippihaven.

V0.3 - Afbeelding 6.3a-b

Bij $\nu = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$ is duidelijk slechts één neer aan de westzijde van de opening te zien. Stroomsnelheden zijn $0,9 \text{ m/s}$ in de opening zelf, er bevindt zich nog steeds een hoofdstroom met snelheden groter dan $0,2 \text{ m/s}$ van de opening naar de ingang van de Amazonehaven. Deze stroom blijft aanvankelijk aan de noordwand aanliggen tot aan de scherpe hoek $\pm 350 \text{ meter}$ na de opening. De $0,5 \text{ m/s}$ grens ligt op $\pm 400 \text{ meter}$ van de opening. In de hele neer treden snelheden op tussen $0,1$ en $0,2 \text{ m/s}$.

V0.5 - Afbeelding 6.4a-b

Bij $\nu = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ is de afname van de neerontwikkeling in het isolijnenpatroon al duidelijk te zien. De snelheden hierin zijn nu vlak na de splitsing met de hoofdstroom nog boven $0,1 \text{ m/s}$, maar nemen af als de bewegingsrichting (tegen de klok in) gevolgd wordt. In de hoofdstroom zelf zijn de snelheden ter plaatse van de opening nog steeds $0,9 \text{ m/s}$, ze nemen daarna echter iets sneller af: de $0,5 \text{ m/s}$ grens ligt ongeveer 350 meter na de opening.

V0.75 - Afbeelding 6.5a-b

Bij $\nu = 0,75 \text{ m}^2/\text{s}$ blijkt de neer drastisch teruggedrongen te zijn. Een stroomsnelheid van $0,1$

m/s komt alleen nog maar voor direct na de splitsing hoofdstroom/neer. snelheden in de opening zijn gereduceerd tot 0,8 m/s, 0,5 m/s is nog net aanwezig op 350 meter van de opening. De hoofdstroom lijkt een 'keel' te krijgen vlak voor botsing met de westwand.

V1,0 - Afbeelding 6.6a-b

Bij $\nu = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ is de neer bijna geheel verdwenen. Snelheden van de neerstroming zijn bijna nergens groter dan 0,1 m/s. De hoofdstroom heeft nu een vergaand teruggedrongen 0,5 m/s grens op 250 meter van de opening. In de opening blijven de snelheden ongeveer 0,8 m/s.

V2,5 - Afbeelding 6.7a-b

Bij $\nu = 2,5 \text{ m}^2/\text{s}$ is de neer niet meer aanwezig. Opmerkelijk is dat de stroomsnelheden bij het westelijke damhoofd veel groter zijn: het hele isolijnenpatroon is 'in elkaar gedrukt' in de lengte-as van de hoofdstroom, die in de opening breder is geworden. De vrije ruimte die bij de overige viscositeits-berekeningen aanwezig was is nu bijna helemaal weggedrukt. Stroomsnelheden in de hoofdstroom zijn in het westelijk gedeelte ongeveer 0,1 m/s en in de opening zelf 0,7 m/s. De 0,5 m/s grens ligt nog op 250 meter daarvandaan.

V5,0 - Afbeelding 6.8a-b

In de laatste berekening met $\nu = 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$ is de stroomsnelheid in de hoofdstroom niet meer doorlopend hoger dan 0,1 m/s, en in de opening niet hoger dan 0,6 m/s. De 0,5 m/s grens is nu niet verder dan 150 meter van de opening verwijderd. De stroomsnelheden voor het westelijke damhoofd zijn nu meer dan 0,1 m/s.

6.4 Verklaring en conclusies

De analytisch/empirisch gevonden waarde van $\nu_H = 0,06 \text{ m}^2/\text{s}$ levert zoals verwacht een stroombeeld met veel neren op. Dit is logisch omdat de viscositeit bij deze kleine roosterafstanden een erg ondergeschikte rol speelt. Een kleine verhoging naar $\nu_H = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$ laat al een aanmerkelijk rustiger stroombeeld zien. Blijkbaar is de gevoeligheid van het model voor de viscositeit bij deze zeer lage waarden zeer groot. Een verdere verhoging laat (op de snelheden in de neer en de hoofdstroom na) weinig duidelijke veranderingen zien. De neer begint echter duidelijk te verdwijnen bij een verhoging van naar $\nu_H = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$. Uiteraard zullen er bij hogere waarden nog lichte neerstromingen aanwezig blijven, deze zijn echter bij $\nu = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ vrijwel overal al kleiner dan 0,1 m/s en dus verwaarloosbaar. Het voorgaande is direct het gevolg van de verhoogde viscositeit, waardoor de mate van overdracht van impuls tussen de waterdeeltjes groter wordt: de gradiënten die in de 2DH-vergelijkingen voor de overdracht zorgen zijn nog voor de plaats waar de neer zou ontstaan zo klein dat van een neer geen sprake meer kan zijn. Vooral bij waarden van $\nu_H = 2,5 \text{ m}^2/\text{s}$ krijgt de viscositeitsterm bij de gebruikte gridafstanden een overheersend karakter. De terugdringing van de snelheden in de hoofdstroom (vanuit de opening in noordwestelijke richting) heeft dezelfde oorzaak. Opmerkelijk is ook de 'verbreding' van de hoofdstroom in de opening. Door de snelle dissipatie van de kinetische energie als gevolg de hogere viscositeit heeft stroming in de opening ook veel sneller dezelfde snelheid.

Uit het voorgaande kunnen de volgende conclusies getrokken worden: De gevoeligheid van het model voor de viscositeit is erg hoog. Vooral bij $\nu_H < 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ is een kleine verandering hiervan voldoende om zichtbaar drastische wijzigingen in het stroompatroon te veroorzaken. Bovendien geeft een lagere viscositeit niet zonder twijfel de meest nadelige stroombeelden voor de scheepvaart weer (zoals wèl aangenomen werd): bij $\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$ is de stroomsnelheid in de neer weliswaar groter, de snelheden in de westzijde de opening zelf zijn echter groter wanneer met bijv. $\nu_H = 2,5 \text{ m}^2/\text{s}$ gerekend wordt. Deze laatste snelheden zijn nu juist het meest hinderlijk voor de scheepvaart. De gevoeligheid voor de waarde van de viscositeit heeft tot gevolg dat de tot nu toe berekende stationaire stroombeelden uit de 2DH-berekeningen, en met name die in de Mississippihaven, als onbetrouwbaar kunnen worden betiteld. Dit vindt direct zijn oorzaak in de keuze voor een dieptegemiddelde modellering, die tot gevolg heeft dat de gebruikte turbulentie-formulering voor de grote dieptevariaties en de kleine roosterafstanden in het model te veel vereenvoudigd wordt om de stroombeelden juist weer te geven. De enige manier om een meer betrouwbare indruk van de gevolgen van de opening van de Beerdam op de stroombeelden te verkrijgen is door een 3D-modellering met subgridmodel te gebruiken, waarbij de afwikkeling van de turbulentie ook op de kleinste lengte schaal juist gebeurt.

Hoofdstuk 7

Onderzoek openingsprofiel

Hoofdstuk 7 Onderzoek openingsprofiel

Dit hoofdstuk bevat het verslag van een onderzoek naar de invloed op de stroombeelden van de schematisatie van het openingsprofiel van de Beerdam in de 2DH-modellering. Na een inleiding (§ 7.1) wordt de onderzoeksopzet besproken (§ 7.2) waarna de resultaten (§ 7.3) en een verklaring met conclusies (§ 7.4) volgen.

7.1 Inleiding

De bodemconfiguratie van het oorspronkelijke model is voor het grootste deel ingevoerd met recente lodingresultaten van het havengebied. Ter plaatse van de opening zelf en in de omgeving van de huidige dam zijn de dieptes echter eenvoudig vlak gestreken en is weinig rekening gehouden met de werkelijke verwachte bodemconfiguratie. De eerdere berekeningen werden dan ook bestempeld als conservatief [lit.6]. Een nauwkeurige bepaling van het toekomstige bodemprofiel is nog niet mogelijk als er geen bodembescherming wordt toegepast om de configuratie te fixeren. Er wordt echter aangenomen dat door de situering van de hoofdstroom aan de oostzijde van de opening, er hier in geval van een onbeschermd bodem een verdiepte erosiegeul zal ontstaan die er mede voor zal zorgen dat de stroomsnelheden gereduceerd worden, hetgeen de situatie in de opening aantrekkelijker maakt voor de scheepvaart. Om een beslissing te nemen over de maatgevende (uiteindelijke) stroombeelden bij een verandering in de bodemconfiguratie zou de modellering in TRISULA uitkomst kunnen bieden. Een voorwaarde is dan wel dat de betrouwbaarheid van de modellering groot genoeg is om een gefundeerde keuze te kunnen maken.

7.2 Onderzoeksopzet

Om de gevolgen van de veranderingen in de bodemconfiguratie in te kunnen schatten is een nader onderzoek naar de schematisatie in TRISULA een vereiste. Net als bij het voorgaande viscositeitsonderzoek kan het TRISULA-model ook op gevoeligheden voor veranderingen in de bodemschematisatie onderzocht worden.

Doel

Het doel van het onderzoek is om een uitspraak te kunnen doen over de betrouwbaarheid van de schematisatie van:

- a) de oorspronkelijke bodemconfiguratie
- b) bodemconfiguratie met een steilere helling van het openingsprofiel en
- c) van de bodemconfiguratie met een stroomgeul ter plaatse van de huidige oostelijke aansluiting te analyseren.

Werkwijze

Met een beschouwing van de voorgaande berekeningen wordt eerst getracht de meest opmerkelijke onderdelen van de stroombeelden als gevolg van de bodemschematisatie te verklaren. Gezien de oorspronkelijke conservatieve bodemschematisatie is besloten om een aantal

aan bij de noordwand, het snelheidsveld in de opening zelf is weer ordelijk verdeeld.

Variant B

In de snelheidsplot (Afbeelding 7.6a-b) is de vernauwing van de hoofdstroom als gevolg van de verdieping te zien. De invloed op de neer is minimaal, de stroomsnelheden in de opening zijn iets hoger, erachter nemen ze echter sneller af.

De controleberekening met gridstrookverwijdering levert ook hier dezelfde problemen op als de oorspronkelijke variant, afgezien van een kleine vernauwing van de stroombaan in de opening (Afbeelding 7.7a-b). Ook deze schematisatie is dus nog zeer gevoelig voor de verandering.

Variant C

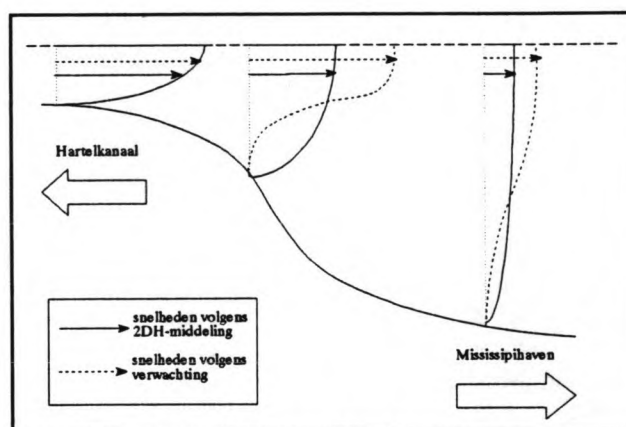
De stroombeelden in Afbeelding 7.8a-b geven een ongestoorde neer aan, de hoofdstroom is nu echter zeer veel nauwer en de stroomsnelheden in de opening zijn lager. Opmerkelijk is het grote nagenoeg stromingsvrije deel in de opening.

Het grote verschil met de eerdere variant is nu het stroomgedrag bij gridstrookverwijdering (Afbeelding 7.9a-b): nu blijft de hoofdstroom netjes aanliggen, en zijn de beelden weinig verschillend van die bij een onveranderd model! De snelheden in de neer zijn iets hoger, dit is echter het gevolg van de snelheidsverhoging door de vernauwing. De gevoeligheid voor de verandering is nu als verwacht vrijwel niet meer aanwezig, zodat dit model een veel robuuster beeld van de stromingen geeft dan het oorspronkelijke.

7.5 Verklaring en conclusies

Gezien de resultaten kan het oorspronkelijke model in ebsituatie vooral voor lage waarden van ν_H zeer gevoelig geacht worden voor kleine veranderingen in de schematisatie. Dit direct verband met de situering van het loslaatpunt van de hoofdstroom, en indirect met de gebruikte wandwet (no slip conditie). In eerste instantie werd verwacht dat deze hoofdstroom zijn oost-westbaan vanuit het Hartelkanaal zou volgen wegens zijn relatief grote snelheid. Door de dieptegemiddelde berekening in de snel dieper wordende Mississippihaven (zie

Afbeelding 7.10) krijgt het water waarschijnlijk een dusdanige vertraging dat bij toepassen van de no-slip randvoorwaarde aanliggen aan de noordwand van de opening (ter plaatse van de huidige damaansluiting) mogelijk blijft.



Afbeelding 7.10 Vertraging door 2DH-snelheidsverdeling

Doordat een onregelmatigheid in de gridrand ongeveer 200 meter noordwestelijk van de huidige aansluiting de oorzaak was van een loslaatpunt, is het aannemelijk dat het aanliggen snel verstoord zou kunnen worden door bewust een gridstrook in het Hartelkanaal te verwijderen. De gedachte hierachter is dat wanneer de 2DH-wandwet kunstmatig opgeheven wordt door een gridsprong ter plaatse van het te verwachten loslaatpunt (hierdoor wordt plaatselijk een soort perfect-slip conditie geforceerd, waarbij de snelheid aan de wand bijna gelijk is aan die een stuk ervandaan) dit andere stroombeelden oplevert. Inderdaad blijkt de hoofdstroom na verwijdering wel rechtdoor te gaan, met als gevolg een instationaire stroming door bewegende neren in het havenbekken.

De gevonden gevoeligheid voor de schematisatie heeft tot gevolg dat de stroombeelden in het havenbekken, die tot nu toe met het oorspronkelijke model berekend zijn niet erg betrouwbaar zijn. Het onderzoek naar de gevoeligheid voor andere (en wellicht meer realistische) schematisaties van het gebied hebben aangetoond dat schematisering van een voldoende diepe stroomgeul aan de noord-oostzijde van de geplande opening (Variant C) een robuuster model oplevert, aangezien de gevoeligheid voor de gridstrookverwijdering aanzienlijk afneemt.

Blijkbaar is de sturende werking van de geul voldoende om de hoofdstroom toch weer aan de noordwand te laten aanliggen. De robuustheid van deze modellering heeft een positief effect op de betrouwbaarheid van de gevonden stroombeelden, zodat de gevonden stroombeelden met grote waarschijnlijkheid ook in werkelijkheid zullen optreden. Indien de stroomgeul zich in werkelijkheid niet in de opening zal bevinden, kunnen met de oorspronkelijke schematisatie geen betrouwbare stroombeelden voorspeld worden.

Onderzoek naar tijdsafhankelijke modellering

Hoofdstuk 8 Onderzoek naar tijdsafhankelijke modellering

In dit hoofdstuk wordt onderzoek gedaan naar een tijdsafhankelijke berekening met de 2DH-modellering van de Open Beerdam. Na een inleiding (§ 8.1) volgt de omschrijving van het onderzoek (§ 8.2), waarna de resultaten (§ 8.3) en de daaruit volgende maatgevende toestanden (§ 8.4) uitgewerkt kunnen worden. Vervolgens wordt de quasi-stationaire aanpak aan de hand van twee testcases kritisch bekeken (§ 8.5), waarna de verklaringen en conclusies het hoofdstuk afsluiten (§ 8.6).

8.1 Inleiding

In § 3.1 werd al aangeduid dat in TRISULA naast met de tot nu toe gebruikte quasi-stationaire randvoorwaarden ook met tijdsafhankelijke randvoorwaarden gerekend kan worden. Voor de overname van de randvoorwaarden werd aangenomen dat de tijdsafhankelijke ZWENDL-resultaten zonder meer konden dienen om een stationaire TRISULA-berekening aan te sturen. Deze aanname werd enigszins ondermijnd bij het opzetten van de nieuwe stationaire berekeningen. Bij het afregelen van het TRISULA-model met de nieuwe ZWENDL-randsturing in § 5.3, leek het gebruik van stationaire randvoorwaarden genomen uit een tijdsafhankelijke berekening voor dit specifieke model de oorzaak te zijn van onnauwkeurigheid van de gevonden stroomsnelheden. Er zijn uiteindelijk aangepaste randvoorwaarden gebruikt om het onderzoek naar de viscositeit en het openingsprofiel te doen. Deze gevoeligheidsonderzoeken zijn niet direct afhankelijk van de randvoorwaarden, maar geven een min of meer objectieve indruk van de robuustheid van het model zelf. Het gebruik van exacte randvoorwaarden was hiervoor dus niet nodig. Voor berekening van de maatgevende toestanden voor de scheepvaart en voor het onderzoek naar de uitvoeringsmogelijkheden, is het gebruik van de juiste randvoorwaarden echter wel van belang. Ook voor latere soortgelijke berekeningen met andere modellen is het antwoord op de vraag waarom een quasi-stationaire aanpak in dit geval niet voldoet van belang. Om deze twee redenen is er onderzoek uitgevoerd naar de correctheid van de tijdsafhankelijke 2DH-modellering van de Open Beerdam, en naar de oorzaak van de fouten in de stationaire berekeningen.

8.2 Onderzoeksopzet

De onnauwkeurigheden die tijdens het afregelen van de quasi-stationaire toestand aan het licht kwamen, zijn mogelijk het gevolg van de vereenvoudiging van het tijdsafhankelijk probleem naar een stationair probleem (de quasi-stationaire aanpak). Door nu een tijdsafhankelijke berekening met het TRISULA-model te maken en de resultaten ervan te vergelijken met die uit de ZWENDL-modellering kan een uitspraak gedaan worden over de overeenkomst tussen de twee modelleringen. Als de resultaten goed met elkaar overeenkomen kan bovendien gesteld worden dat de overname van de tijdsafhankelijke randvoorwaarden juist gebeurd is en zullen de fouten bij de eerdere berekeningen alleen veroorzaakt kunnen zijn door een fout in de overname van de stationaire randvoorwaarden of in de keuze voor een quasi-stationaire aanpak. In dit laatste geval zal naar fouten gezocht kunnen worden in de manier van modelleren, door de bestaande modellering kritisch te bekijken en op eventuele probleempunten aan te passen.

Doel

Het doel van dit onderzoek is te trachten een met ZWENDL overeenkomende berekening te verkrijgen en een oorzaak te vinden voor de geconstateerde verschillen tussen de tijdsafhankelijke berekeningen ZWENDL en quasi-stationaire TRISULA-berekeningen. Indien de tijdsafhankelijke TRISULA-resultaten voldoende overeenkomsten hebben met die uit ZWENDL, worden de maatgevende TRISULA-toestanden voor de scheepvaartsimulatie gebruikt.

Werkwijze

Voor nauwkeuriger inzicht in de snelheden voor de Amazone- en Petroleumhaven en in de opening in de Beerdam zijn er een aantal nieuwe meetstations geïntroduceerd, respectievelijk Amazone-1 en -2, Petrol-3 t/m -5, en Beerdam-6 t/m -14. Aan de oostelijke waterstandsrand en de noordelijke snelheidsrand zijn tenslotte ook meetstations gesitueerd, te weten Hrand-15 en Vrand-16. De stations zijn weergegeven in Afbeelding 8.1. Er zijn tijdsafhankelijke berekeningen gemaakt met de tijdsafhankelijke randvoorwaarden uit ZWENDL. De grafiek voor de randvoorwaarden is weergegeven in Afbeelding 8.2. Voor de debietrand zijn weer de waarden van ZWENDL-station 372.2 - 371.2 genomen, voor de waterstanden zijn dit de waarden uit station 390.2. Om een lange inspeeltijd te voorkomen is een 'restart' berekening met Riemann-randvoorwaarden gemaakt. Hiervoor is het model afgeregeld voor die waterstand en dat debiet waarbij de snelheden in het model het laagst zijn. Dit is gedaan omdat door de onnauwkeurigheid in de stationaire TRISULA-berekeningen de hoge snelheden veel meer afwijken van de ZWENDL-snelheden dan de lage snelheden. De tijdsafhankelijke berekeningen zijn voor een tweetal viscositeitsparameters gedaan, te weten $\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$ en $\nu_H = 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$. De eerste waarde is genomen om de effecten van de viscositeitsparameter voor tijdsafhankelijke berekeningen te kunnen vergelijken met de al eerder uitgevoerde stationaire berekeningen, de laatste waarde heeft een meer theoretische achtergrond: vooral voor tijdsafhankelijke berekeningen is de factor stabiliteit van groot belang. Het is hierbij dan ook algemeen geaccepteerd dat de viscositeit omwille hiervan iets hoger genomen kan worden dan bij stationaire berekeningen. Een andere variatie is aangebracht in het openingsprofiel. Aangezien het onderzoek in hoofdstuk 7 aantoonde dat een opening met stroomgeul het meest aantrekkelijke alternatief zou zijn, is deze ook toegepast in de tijdsafhankelijke modelleringen. Er worden in totaal dus een viertal basisberekeningen gemaakt.

Randvoorwaarden en uitgangspunten

Voor de tijdsafhankelijke randsturing wordt uitgegaan van de resultaten van de tijdsafhankelijke ZWENDL-berekening waaruit in de vorige hoofdstukken de stationaire randvoorwaarden zijn gekozen. Het betreft hier de spring- doottijberekeningen voor 13 t/m 18 mei 1979. Er worden dezelfde ZWENDL-metpunten voor gebruikt als in § 5.4. Behalve de bovengenoemde viscositeits en profielvariaties worden alle parameters gelijk gehouden. Na de eerste tijdsafhankelijke berekeningen bleken de stroomsnelheden in het westelijke deel van het Hartelkanaal verre van nul te zijn waardoor werd besloten om een checkraai voor controle van de debieten hier doorheen in te stellen ongeveer 200 meter van de westelijke openingsrand. Voor de maatgevende toestanden worden die tijdstippen gekozen waarvoor de snelheden in de opening (dus ter plaatse van het te verwijderen damgedeelte) het hoogst zijn.

8.3 Resultaten

De berekeningen zijn gedaan over vier dagen (13 mei 23:20 tot 18 mei 0:00), hier worden daarvan alleen het etmaal met de hoogste snelheden in TRISULA en ZWENDL weergegeven (14 mei 0:00 uur tot 15 mei 0:00 uur).

Afbeelding 8.2a geeft de ZWENDL-waterstanden die opgelegd zijn aan de oostelijke rand van het TRISULA-model. Afbeelding 8.2b toont de snelheden die daarvan het gevolg zijn volgens de berekening in ZWENDL en de snelheden gemeten in TRISULA. De waarden blijken nu opmerkelijk goed met elkaar overeen te komen. Er zijn uiteraard wel enige verschillen in de snelheden, de meest waarschijnlijke oorzaak hiervoor zijn de 1D - 2DH schematisatieverschillen. Deze verschillen zijn echter minimaal, op te maximale eb snelheden na. De overeenkomsten zijn echter zo groot dat van een betrouwbare berekening gesproken kan worden.

8.4 Maatgevende toestanden

Als maatgevende toestanden worden die tijdstippen geacht waarop de maximale snelheden in de opening (stations Bd-6 t/m -11) op treden.

Afbeelding 8.3a en b geven deze snelheden weer voor $\nu_H = 0,3$ resp. $5,0 \text{ m}^2/\text{s}$ weer. De snelheden in station Bd-11 zijn het hoogst, hetgeen ook te verwachten viel doordat het kanaal hier het smalst is ten opzichte van de overige meetpunten. Voor de lage viscositeitswaarde zijn de snelheidsgrafieken bovendien iets grilliger dan bij de hoge waarde. Dit is te wijten aan de hogere snelheidsgradiënten als gevolg van een lagere dissipatie van impuls.

Inzicht in de stroombeelden wordt verkregen door de vectorvelden voor eb- en vloedsituaties te bekijken. Hiertoe worden voor de tijdstippen met de maximale snelheden in de opening vector- en isolijnenplots voor de snelheden getoond. Afbeelding 8.4a geeft het snelheidsveld voor de maximale ebconditie met $\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$ weer. De neer is nog aanwezig, de hoogste snelheden in de opening bevinden zich ook hier aan de oostzijde. Wat echter zeer opmerkelijk is, is dat de snelheden in het gedeelte van het Hartelkanaal westelijk van de opening (westelijke Harteltak) duidelijk niet nul zijn, hetgeen bij de stationaire aanpak wel het geval was. Een betere indruk van deze verdeling volgt uit het beeld voor de snelheidsisolijnen, Afbeelding 8.4b. De formatie van een hoofdstroom is hierin duidelijk te zien.

Afbeelding 8.5a-b laten het model onder maximale vloedconditie met $\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$ zien. Hierin valt vooral de slinging van de snelheidsvectoren in de Mississippihaven op. Een echte hoofdstroom wordt in de vloedfase blijkbaar niet gevormd, wel zijn ook in dit geval de snelheden in de westelijke Harteltak aanzienlijk.

Afbeelding 8.6a-b laten de maximale ebsituatie met $\nu_H = 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$ zien. De neer is volledig verdwenen, de snelheden in de opening zelf zijn nu echter aan de westzijde groter dan bij een lagere viscositeit.

Afbeelding 8.7a-b tonen de maximale vloodsituatie bij $\nu_H = 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$. De slinging in de Mississippihaven is nu niet aanwezig, de snelheden alhier zijn een stuk kleiner dan bij een lagere ν_H , die in de opening zijn gelijkmatiger verdeeld en iets hoger.

Afbeelding 8.8a-b: geul, maximaal eb, $\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$.

Afbeelding 8.9a-b: geul, maximaal vloed, $\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$

Afbeelding 8.10a-b: geul, maximaal eb, $\nu_H = 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$

Afbeelding 8.11a-b: geul, maximaal vloed, $\nu_H = 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$

Uit de laatste Afbeeldingen (8.8 - 8.11) blijkt de invloed van de geul op de stroombeelden in vergelijking met die zonder geul minimaal. Wel zijn de snelheden uiteraard iets lager in de opening zelf.

8.5 Controle stationaire aanpak

Gezien de overeenkomsten in de resultaten van de TRISULA en de ZWENDL berekening komen de twee modelleringen zelf waarschijnlijk ook goed overeen, en kan verder gesteld worden dat de overname van de tijdsafhankelijke randvoorwaarden op juiste wijze is gebeurd. De oorzaak van de fouten gevonden bij de afregeling moet dus liggen bij eerdere overnamefouten uit de ZWENDL modellering of de keuze voor een quasi-stationaire aanpak. Om fouten in de overname te kunnen uitsluiten is allereerst in een testcase gecontroleerd of gebruik van de tijdsafhankelijke TRISULA-resultaten voor quasi-stationaire TRISULA-sommen dezelfde fouten geeft. In een tweede testcase is gecontroleerd of de snelheden in de westelijke Harteltak die uit de tijdsafhankelijke berekeningen bleken, een mogelijke modelleringsfout introduceren, en of de keuze voor een open rand in deze tak tot betere resultaten leidt.

Testcase voor overname randvoorwaarden

Deze testcase is gemaakt om te controleren of de verschillen in stroombeelden voor de tijdsafhankelijke ZWENDL-berekening en de quasi-stationaire TRISULA-berekening, geconstateerd in de stationaire afregeling (§ 5.4), door overnamefouten komen of dat ze uitsluitend het gevolg zijn van de keuze voor een quasi-stationaire aanpak. Hiertoe is een stationaire TRISULA-som gemaakt waarbij als randvoorwaarden dezelfde waarden zijn gebruikt die aan het model ten tijde van de maximale ebtoestand van de tijdsafhankelijke berekening werden opgelegd. Hierdoor zijn er dus absoluut geen schematisatieverschillen (er wordt immers met hetzelfde TRISULA-model gerekend), waardoor overeenkomsten tussen de tijdsafhankelijke en de stationaire berekening een quasi-stationaire aanpak ondersteunen (en dus aan een foutieve overname voor de eerdere quasi-stationaire berekeningen moet worden gedacht), en verschillen in de resultaten altijd te wijten zijn aan de verschillen tussen tijdsafhankelijk en stationaire berekeningen. Als tijdsafhankelijke vergelijkingsberekening wordt de al eerder uitgevoerde berekening met oorspronkelijk profiel en $\nu_H = 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$ gebruikt. De resultaten voor maximale ebconditie zijn te zien in Afbeelding 8.6a-b: de snelheden waren hier maximaal ca. 1,1 m/s. Er blijkt dat de hoofdstroom geheel aan de noordwand aan blijft liggen en een neer niet meer voorkomt. De snelheden in de westelijke Harteltak zijn ca. 0,4 m/s, en over de hele opening staan snelheden van meer dan 0,3 m/s.

Met de randvoorwaarden die op dit tijdstip in de tijdsafhankelijke TRISULA-berekening aan de randen werden opgelegd is een stationaire testberekening gemaakt met hetzelfde model. De resultaten zijn te zien in Afbeelding 8.12. Te zien is dat de snelheden in station 9 (Afbeelding 8.13) ook hier aanmerkelijk hoge waarden hebben dan in de tijdsafhankelijke vergelijkingsberekening. Verder valt op dat de snelheden in de westelijke Harteltak nagenoeg nul zijn, dat er ondanks de hoge viscositeit toch een neer optreedt en er een duidelijke hoofdstroom gevormd wordt. Ook wanneer de waterstanden aan de noordrand van het model

vergeleken worden zijn drastische verschillen te zien: ondanks precies dezelfde h- en u-randvoorwaarden zijn de waterstanden bij de noordelijke rand beduidend lager voor de testberekening (NAP-0,20 meter in de test tegenover NAP+0,10 meter tijdsafhankelijk). De stroombeelden uit de testberekening komen dus totaal niet overeen met die uit de tijdsafhankelijke berekeningen. Ondanks het gebruik van Er kan dan ook geconcludeerd worden dat keuze voor de stationaire aanpak hier om een of andere reden niet correct is geweest.

Testcase voor open-rand westelijke Harteltak

De snelheden in het deel van het Hartelkanaal westelijk van de opening (westelijke Harteltak) bleken in de tijdsafhankelijke berekeningen verre van nul (zie onder meer Afbeelding 8.6a-b). Om er zeker van te zijn dat het hier niet om een artificiële stroming gaat (veroorzaakt door de vormgeving van het model of de keuze van de randen) zijn de debieten gemeten door een checkraai in het Hartelkanaal ongeveer 250 m ten westen van de opening. Deze zijn vergeleken met de debieten die optraden in de ZWENDL-berekening in dezelfde periode (zie Afbeelding 8.14). De grote overeenkomst tussen de twee geeft blijk van goed overeenkomende modelleringen en dus redelijk betrouwbare resultaten. Bij een quasi-stationaire aanpak worden de snelheden in de westelijke Harteltak uiteindelijk uiteraard altijd nul omdat er vanuit de Hartelhaven geen water stroomt (enkel gesloten randen). Hierdoor is het mogelijk dat het ontbreken van deze snelheid tot ongewoon hoge debieten in het oostelijke deel leidt, omdat het debiet aan de noordrand gelijk wordt genomen aan die tijdens een tijdsafhankelijke berekening, waarin tevens debieten in de westelijke Harteltak voorkomen. Dit zou dan de hoge snelheden in de oostelijke Harteltak kunnen verklaren. Verder kan het ook zo zijn dat de waterstanden in en nabij de opening door het ontbreken van dit debiet in stationaire toestand afwijken van die tijdens de tijdelijke berekeningen en daardoor mede de geconstateerde verschillen veroorzaken. Dit kan gecontroleerd worden door in de westelijke Harteltak een open rand te introduceren en dus de Hartelhaven buiten het model te laten vallen. Als aansturing van deze rand kunnen weer waarden uit de ZWENDL berekeningen worden gebruikt. Op deze manier zou dan wel een stationaire toestand verkregen kunnen worden die dezelfde debieten en snelheden op zou leveren als de tijdsafhankelijke toestand. De introductie van de extra rand kan weer op meerdere manieren geschieden, voor dit relatief ondiepe gedeelte is het echter verstandig om een waterstandsrand te gebruiken om stabiliteitsredenen (zie § 3.4). Voor de controleberekening is het meetpunt 380.2 uit ZWENDL gebruikt: het punt 394.2 ligt zo dicht bij de geplande opening dat een randsturing op deze plaats de stroming door de opening zou beïnvloeden. De nieuwe gridschematisatie voor deze testcase is getoond in Afbeelding 8.15. De waterstanden voor de rand worden gemeten in een meetstation (H-hartel) op deze plaats.

De resultaten van de berekening zijn gegeven in Afbeelding 8.16 en 8.17. Ook hier zien we de opvallend hoge snelheden in station 9 ($U_9 = 1,75$ m/s) en bovendien een aantal neren die ervoor zorgen dat de berekening met $\nu_H = 0,3$ m²/s niet stationair is! De instationairiteit verdwijnt weliswaar bij hogere viscositeitswaarden (zie Afbeelding 8.18 en 8.19 voor $\nu_H = 5,0$ m²/s), de snelheden blijven echter nog veel hoger dan die bij de tijdsafhankelijke berekening met dezelfde viscositeit en randvoorwaarden op alleen de noord en ooststrand. De ZWENDL- en TRISULA-resultaten geven namelijk een snelheid van $U_9 = 1,15$ m/s op het maximale ebtijdstip (zie Afbeelding 8.2b). Ook deze testcase leidt dus niet tot een methode waarbij de resultaten van een stationaire TRISULA aanpak wel overeenkomt met die van tijdsafhankelijke berekeningen.

8.7 Verklaring en conclusies

De tijdsafhankelijke berekeningen vertonen opvallend veel overeenkomsten met de ZWENDL-berekeningen. Er kan dan ook gesteld worden dat het gebruik van de oorspronkelijke quasi-stationaire randvoorwaarden, die in eerste instantie volstrekt geen overeenkomstige resultaten leverde, niet gebruikt kan worden om de maatgevende stroombeelden voor de scheepvaart te voorspellen. Deze maatgevende toestanden kunnen dus beter uit de tijdsafhankelijke berekeningen genomen worden.

De vraag is nu of het model in tijdsafhankelijke toestand betrouwbare stroombeelden geeft. In de voorgaande onderzoeken (hoofdstuk 6 en 7) is namelijk gebleken dat het model grote gevoeligheid vertoonde voor de viscositeit en de schematisatie van het openingsprofiel. Ondanks het feit dat de laatste gevoeligheid ondervangen kon worden door een (realistische) geul in het model te introduceren, blijven de conclusies staan dat het model geen juiste turbulentieafwikkeling voor de diepteverschillen heeft. Deze gevoeligheid heeft echter voornamelijk te maken met de stroombeelden in de Mississippihaven. De stroombeelden in het Hartelkanaal hebben door de plaatselijk kleine diepte een meer betrouwbaar karakter, ze blijken ook weinig te veranderen met de viscositeit. Voor scheepvaartsimulaties spelen vooral de snelheden in dit kanaal een belangrijke rol. Alleen stroomsnelheden in de opening zelf blijken nog enige invloed te ondervinden van de (twijfelachtige) neervorming bij de tijdsafhankelijke berekening met lage viscositeit ($\nu_H = 0,3 \text{ m}^2/\text{s}$). Dit is echter een minder ongunstige situatie voor de scheepvaart dan die bij hoge viscositeit ($\nu_H = 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$). Na overleg met nautici van het GHR is de laatste toestand als maatgevend bevonden, en gebruikt voor de simulaties. Een betere modellering is weliswaar te verkrijgen, maar zou zoveel tijd en geld kosten dat dit zijn doel voorbij zou schieten.

Om de vraag te kunnen beantwoorden waarom een quasi-stationaire aanpak hier niet voldoet, moeten de resultaten van de testcase bekeken worden. Uit de testcase blijkt dat de geconstateerde verschillen tussen de stationaire en de tijdsafhankelijke berekeningen niet direct te wijten zijn aan de fouten in de overname of invoer van de randvoorwaarden. De eerste testcase voor de schematisatieverschillen heeft fouten in de overname van de randvoorwaarden uit de tijdsafhankelijke ZWENDL-berekeningen uitgesloten, omdat ook randvoorwaarden voor een sterk overeenkomstige tijdsafhankelijke TRISULA-berekening bij stationaire toepassing tot soortgelijke fouten leiden. De tweede testcase voor de open rand in de westelijke Harteltak heeft aangetoond dat ook deze modellering de verschillen niet wegneemt.

De enige oorzaak die na dit onderzoek met zekerheid aan de fouten kan worden toegewezen is de keuze voor een stationaire aanpak bij gebruik van uit tijdsafhankelijke-berekeningen volgende randvoorwaarden.

Wel kan een mogelijke specifieke oorzaak worden aangedragen. In 'normale' situaties is namelijk gebleken dat de quasi-stationaire aanpak meestal wel tot bevredigende resultaten leidt. Het uitblijven hiervan in dit geval moet dus liggen aan het 'abnormale' van de situatie. Het meest abnormale aan de Open Beerdam modellering is het grote verschil in diepte tussen het Hartelkanaal (6m) en de Mississippihaven (35m). Een plausibele oorzaak kan hierdoor te vinden zijn in een fysieke eigenschap van het model: de stromingen van de grote watermassa in de Mississippihaven beïnvloeden de waterstanden en snelheden in het Hartelkanaal te sterk. Dit kan op de volgende manier beredeneerd worden:

De snelheden aan de noordrand worden constant gehouden, waardoor het debiet in principe ook gelijk zou moeten blijven. Als de waterstand in het havenbekken slechts

een klein stuk zakt (in dit geval slechts 0,30 meter t.o.v. de diepte van 35m!) betekend dit een verwaarloosbare daling van het debiet aan de noordrand, maar een aanzienlijke verhoging van de snelheid in het Hartelkanaal (hier wordt het waterstandsverval over 2500 meter kanaal 0,30 meter groter). Door de keuze van de soort en plaats van de open rand randen in het model kan de waterstand alleen vastgehouden aan de oostelijke rand. De invloed die deze waarde op de waterstand in het havenbekken heeft, is echter zeer gering wegens het grote verschil in volume tussen het kanaal en het havenbekken. De waterstanden in het havenbekken worden dus voornamelijk impliciet gedicteerd door de snelheidsvoorwaarde aan de noordelijke modelrand. Dit is te goed merken aan de afhankelijkheid van de evenwichtswaterstanden van de grootte van de voorgeschreven snelheid aan de noordrand bij het afregelen van het model: de initiële waterstand ζ_0 moet zo gekozen worden dat deze evenwichtswaterstand van het havenbekken geëvenaard wordt (en dus niet die van het Hartelkanaal), omdat anders de inspeeltijd van het model te groot wordt. Een snelle verhoging van de snelheid hier heeft verder een veel langzamere verhoging van de waterstand tot gevolg door de geringe invloed ervan op de totale waterstand. Dit is duidelijk te zien aan de traagheid waarmee de waterstanden in het havenbekken naar hun evenwichtsstand gaan vlak na het instellen van een stationaire snelheid in de oorspronkelijke modellering (Afbeelding 5.6). Doordat in een quasi-stationaire berekening één bepaalde snelheid lange tijd⁷ aan het systeem wordt opgelegd kan zich een evenwichtswaterstand in het havenbekken instellen (geholpen door het gebruik van de bijpassende beginwaterstand) die in de tijdsafhankelijke berekening gewoonweg de tijd niet heeft om zich in te stellen. Het gevolg is een onwerkelijk hoge snelheid in het Hartelkanaal door een veel groter waterstandsverhang in de stationaire toestand. In principe kan dus op deze manier nooit een stationaire toestand met de huidige soort randen met het model berekend worden, omdat het de traagheid van het systeem de waterstanden in het havenbekken vasthoudt, en een stationaire berekening niet van deze traagheid uitgaat!

De juistheid van deze redenering moet blijken uit een geval waarbij niet de (quasi-stationaire ZWENDL) snelheden maar de (quasi-stationaire ZWENDL) waterstanden in de noordrand van het havenbekken, en de daarbij horende snelheden in de oostrand van het Hartelkanaal worden vastgehouden (voor alle duidelijkheid: dit is dus géén evenwichtstoestand). Dit moet als de bovenstaande theorie juist is in stationaire toestand wel een met de tijdsafhankelijke berekeningen overeenkomend waterstandsverschil tussen de oostelijke en de noordelijke rand geven. Een snel opgezette testcase laat dit inderdaad zien: in Afbeelding 8.20 staan de snelheids en waterstands resultaten voor een quasi-stationaire berekening waarbij aan de noordrand een ZWENDL-waterstand van 0,125 meter wordt opgelegd, aan de oostrand een ZWENDL-snelheid van 1,25 m/s en een beginwaterstand $\zeta_0 = 0,125$ meter⁸ ($\nu_H = 5,0$ m²/s). De snelheden blijken snel naar de juiste waarde te gaan zonder dat veel afregelen nodig is. Dit bekrachtigt de bovenstaande redenering. Er kan dus gesteld worden dat in soortgelijke gevallen, wanneer twee gebieden met grote verschillen in volumes gescheiden worden door een relatief kleine opening en elk gebied een open rand bevat, de rand van het gebied met het

⁷ Lang t.o.v. de tijdsafhankelijke sommen: bij de stationaire sommen wordt de snelheid meer dan 2 uur vastgehouden om de stationaire toestand te bereiken, bij een tijdsafhankelijke som verandert de waarde om de 10 minuten.

⁸ In deze berekening is wegens tijdgebrek en het informatieve karakter ervan geen Riemann-rand gebruikt om de inspeeltijd te verkorten.

grootste volume bij voorkeur een waterstandsrand moet zijn als er quasi-stationair gerekend moet worden.

Hoofdstuk 9

Onderzoek naar de uitvoering

Hoofdstuk 9 Onderzoek naar de uitvoering

Tot nu toe is bij de berekeningen telkens uitgegaan van een toestand van volledige opening van 400 meter breed op NAP-niveau. Voordat deze opening gerealiseerd is, zullen er echter afwijkende toestanden optreden tijdens het openen zelf. Om de toestanden tijdens de opening te kunnen voorspellen kunnen een aantal fasen van de uitvoering doorgerekend worden. Om een idee te geven van het soort en de hoeveelheid werk waar het hierom gaat, wordt eerst een algemeen uitvoeringsplan voorgedragen (§ 9.1). Hierna wordt het onderzoek naar de uitvoering opgezet (§ 9.2) en worden de resultaten (§ 9.3) en de conclusies en aanbevelingen (§ 9.4) gegeven.

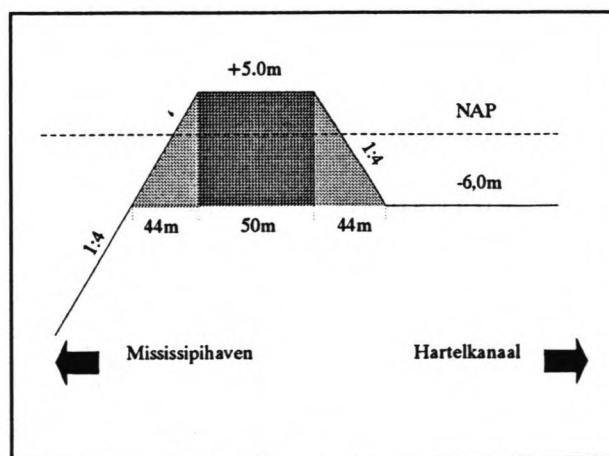
9.1 Algemeen uitvoeringsplan

De methodes die hier aangegeven worden zijn bedoeld als indicatie voor de mogelijkheden die gebruikt kunnen worden om de opening te bewerkstelligen. De keuzes die in deze paragraaf gemaakt worden, zijn gebaseerd op eenvoudige schattingen uit de praktijk.

De grondsoort en de hoeveelheden die weggegraven moeten worden zijn in grote mate bepalend voor het soort materieel dat bij de uitvoering gebruikt zal worden. Daarom is in juli 1992 een bodemanalyse gedaan van het gebied ter plaatse van de huidige Beerdam [lit.16]. Voor het morfologisch onderzoek is hiervan vooral de boring B/EO-18 van belang. Deze boringen levert informatie betreffende de grondsoort en de korrelverdeling ervan. De precieze locatie van deze boring en de resultaten zijn gegeven in Bijlage V. Voor de eenvoud wordt aangenomen dat over de hele lengte van de dam dezelfde grondsoort weggehaald moet worden: korreldiameter $D_{50} \approx 160 \mu\text{m}$. Om een indruk te krijgen van de benodigde hoeveelheid grondverzet wordt eerst een globale aanname gedaan voor de initiële profiel. Deze houdt in dat in eerste instantie een zeer eenvoudige doorsteek verwezenlijkt wordt, nl. dat de dam over de hele breedte zal worden weggegraven tot de diepte van het aanliggende Hartelkanaal (NAP-6,0 m). De benodigde hoeveelheid grondverzet wordt dan (zie Afbeelding 9.1):

$$\begin{array}{rcl} 50 * (11) & = & 550 \text{ m}^3 \text{ onder de kruin} \\ 44 * (11) & = & 484 \text{ m}^3 \text{ onder de taluds} \\ \hline \text{Totaal} & & 1034 \text{ m}^3/\text{m}^1 \end{array}$$

Voor een opening van 400 meter geldt dan een initieel grondverzet van $V \approx 410.000 \text{ m}^3$.



Afbeelding 9.1 Minimale ontgravingshoeveelheid

Verwerken van het bovengenoemd materiaal kan in principe op 2 manieren geschieden:

- *hydraulisch*: de grond wordt na vermenging met een hoeveelheid water opgezogen en door leidingen of met 'hoppers' vervoerd. Voor de afmetingen van dit werk ligt het voor de hand om een cutterzuiger te gebruiken (zie lit.[x]). Hydraulische verwerking heeft het grote voordeel dat er met een hoge produktie van het materieel gewerkt kan worden. Een nadeel is dat het afgevoerde materiaal in een even hoog tempo moet worden geloosd. Wanneer de stortplaats te ver van de winplaats ligt en dus de pijpleidingen te lang worden (maximaal 3 à 4 km.), zal het niet meer lonen deze afstanden hydraulisch te overbruggen. In dit geval zal er met sleepbakken ('hoppers') gewerkt moeten worden hetgeen de snelheid van verwerking doet afnemen. Een ander nadeel is stagnatie in geval van obstakels (bijv. stenen die er in dit geval liggen aangezien de huidige dam met stortsteen bekleed is).
- *mechanisch*: de grond wordt weggegraven. Hiervoor kan een breed scala van materieel gebruikt worden (grijpers, baggermolens, enz.). De obstakels vormen nu een kleiner probleem, de snelheid van ontgraven is echte veel lager.

In het fijnzandige bodemmateriaal is het werken met een cutterzuiger het snelst, een middelgroot schip zou dan een capaciteit hebben van $\pm 1000 \text{ m}^3/\text{uur}$, met een maximale werkbaarheid van 80% (20% tijdverlies door verankeren, obstakels en dergelijke) is deze niet hoger dan $800 \text{ m}^3/\text{uur}$. In totaal zal het werken met één schip in totaal ongeveer 500 uur voor 400 meter dam in beslag nemen, ofwel 12 werkweken (nogmaals, dan is over de hele lengte dezelfde diepte gerealiseerd).

9.2 Onderzoeksopzet

De uitvoer van de opening zal ergens in de dam moeten beginnen. In dit beginstadium zullen de snelheden in de kleine, ondiepe initiële opening relatief groot zijn ten opzichte van de tot nu toe berekende snelheden. Dit houdt in dat, om erosieproblemen te voorkomen, de keuze van de initiële openingsplaats niet zonder meer vaststaat omdat de hydraulische consequenties ervan niet bekend zijn. Het is dan ook nuttig geacht om voor de uitvoering een hydraulisch onderzoek op te stellen waarmee deze gevolgen globaal ingeschat kunnen worden.

Doel

Het doel van dit onderzoek is om voor de uitvoeringsfase een gefundeerde uitspraak te kunnen doen over wat de hydraulische gevolgen zijn van de meest voor de hand liggende openingsmethoden, om een aanbeveling te doen voor het beste alternatief, en voor dit alternatief een globale schatting te geven van de morfologische gevolgen.

Werkwijze

Er wordt eerst een indeling gemaakt tussen twee stroomsnelheidsberekeningen voor de uitvoeringsfase. Voor de allerkleinste (initiële) opening is het voldoende om een 'handmatige' berekening van de stroomsnelheden te maken omdat de waterstanden in de omgeving in deze fase nauwelijks beïnvloedt worden door de (kleine) debieten door het gat. De stroombeelden in de latere fasen kunnen globaal berekend worden met het bestaande 2DH-TRISULA model. De

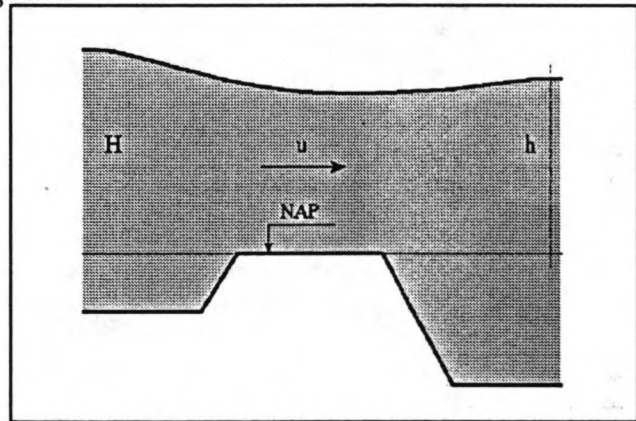
uitvoering wordt hiervoor opgedeeld in een aantal fasen, voor elke fase wordt het daarbij behorende profiel vastgesteld, en wordt een tijdsafhankelijke berekening uitgevoerd. Zo kan een globale indruk verkregen worden van de situaties die zich tijdens de uitvoering zullen voordoen.

Om een indruk te krijgen van de gevolgen van de eerste doorsteek (dus vóór de eerste fase in TRISULA) zijn de stroomsnelheden bepaald voor een gat met de bodem op NAP en een breedte van 100 meter (deze breedte is niet direct van invloed op het sedimenttransport omdat dit per eenheid van breedte wordt berekend. Alleen als de tenen van de resterende damgedeelten elkaar 'raken' moet de zandsluitingsformule iets aangepast worden). Voor de berekening zijn ZWENDL-resultaten van een berekening met een gesloten Beerdam gebruikt om de waterstanden aan weerszijden van de dam te bepalen. We gaan er voor het gemak vanuit dat bij de waterstanden de globale snelheden door de initiële opening (fase 0) ingeschat kunnen worden met de onvolkomen overlaatformule (9.1) als voor het verschil in de waterstanden over de dam (zie Afbeelding 9.2) geldt: $H-h < \frac{2}{3}H$ en dat voor de snelheden de volkomen overlaatformule (9.2) geldt als $H-h > \frac{2}{3}H$.

$$u = m \sqrt{2g(H-h)} \quad (9.1)$$

$$u = m 1.7 H^{\frac{3}{2}} \quad (9.2)$$

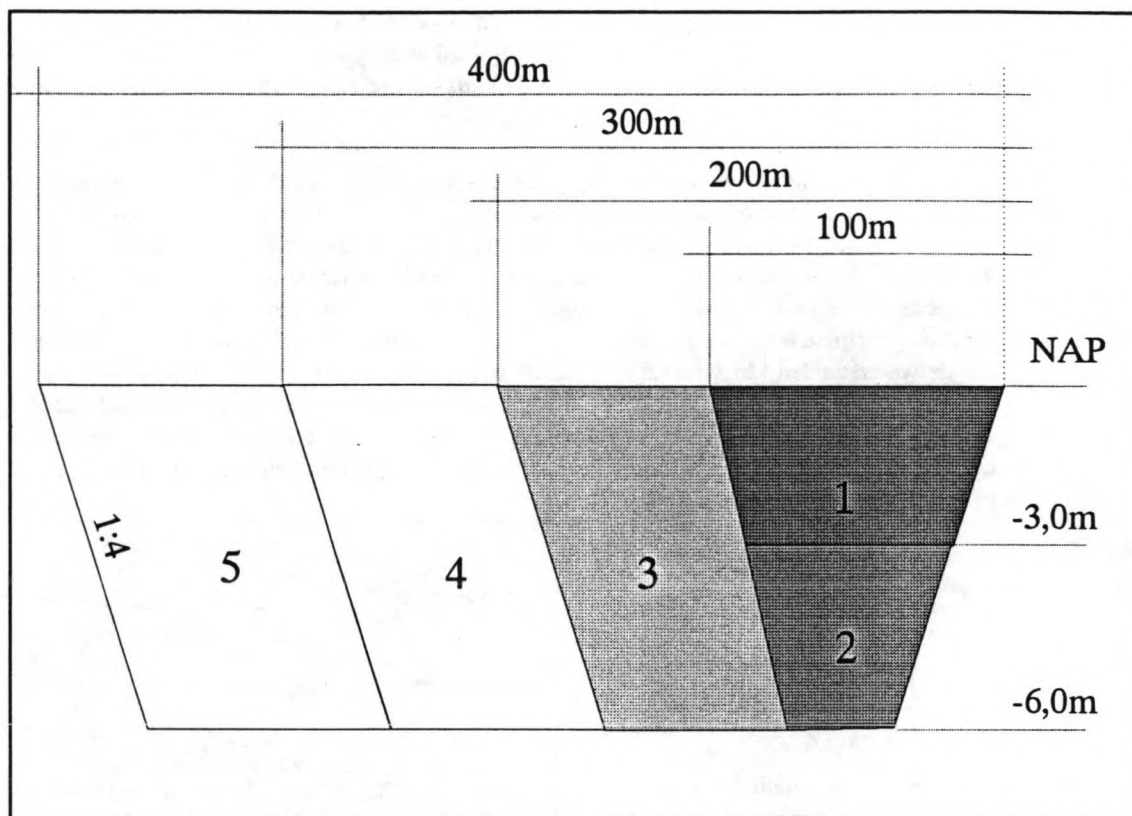
met: u = snelheid in de opening [m/s]
 m = afvoer-coëfficiënt
 H = waterniveau boven de kruin aan bovenstroomse zijde [m]
 h = waterniveau boven de kruin aan benedenstroomse zijde [m]



Afbeelding 9.2 Schematisering fase 0

Uiteraard zal de snelheid nul worden als de waterstanden beiden onder de kruin staan. De afvoer-coëfficiënt wordt voor het gemak gesteld op een gemiddelde waarde van $m=1,0$ voor zowel de volkomen als de onvolkomen overlaat. Hier kunnen vraagtekens bij gezet worden, omdat een juiste waarde afhankelijk is van de vorm van het gat, de grootte van de waterstandsverschillen en de taluds aan weerszijden. Het globale karakter van de berekeningen laat deze veralgemenisering echter toe.

Het mag duidelijk zijn dat de meest interessante uitvoeringsfase voor de TRISULA-berekeningen van de stroombeelden de beginfasen zullen zijn: de opening is dan klein en ondiep, waardoor de stroomsnelheden naar verwachting hoog zullen zijn. Deze fasen zullen dus de meeste hinder opleveren voor baggermaterieel en andere vaartuigen, en zijn het meest gevoelig voor erosieproblemen. Het verdient dan ook de voorkeur om tussen de eerste fasen kleinere openingsverschillen te kiezen dan voor de latere (minder interessante) fasen, om zo het aantal berekeningen te beperken. Er is voor de TRISULA-berekeningen een indeling gemaakt met vijf fasen (zie Afbeelding 9.3).



Afbeelding 9.3 Schematisatie openingsfasen uitvoeringsonderzoek

- Fase 1 is de initiële openingsfase voor de TRISULA-berekeningen, waarbij de diepte over de opening nog klein is (NAP-3,00m) en de opening een breedte heeft van ongeveer 100m op NAP. De hellingen zijn vrij steil genomen (1:4) aangezien deze tijdens de baggerwerkzaamheden ook in onbeschermde toestand vrij steil zullen zijn. Het doorstroomoppervlak onder NAP (O_{nap}) is hier $\pm 260\text{m}^2$.
- Fase 2 heeft dezelfde openingsbreedte op NAP, maar nu is de opening uitgediept tot het uiteindelijk te baggeren niveau van ongeveer NAP-6m⁹. O_{nap} is 445 m^2 .
- Fase 3 t/m 5 hebben allen eenzelfde openingsvergroting. De openingsbreedte op NAP is respectievelijk 200m, 300m en 400m, de bodem ligt op NAP-6m, de hellingen zijn 1:4. O_{nap} is resp. 1044 , 1644 en 2244m^2 .

Uiteraard wordt begonnen met fase 1, en geëindigd met fase 5. De plaats van de initiële opening is echter nog het punt van discussie. Deze plaats is voornamelijk van belang wanneer de stroombeelden worden onderzocht (de TRISULA-fasen 1 t/m 5). Er worden hier twee uitvoeringsmethoden onderzocht, waarbij deze plaats verschilt:

⁹De werkelijke uiteindelijke openingsdiepte is officieel wel hoger, voor het globale karakter van dit onderzoek is een aanname van NAP-6m echter voldoende.

- Methode 1: Hierbij is de initiële opening gekozen aan de oostelijke aansluiting van de dam (zijde D'Arcyweg). Hierdoor kan de erosie van zand in de diepte na enige tijd leiden tot de erosiegeul die gepland was. Wel moet hier bekeken worden of deze erosie niet zo snel gaat dat er problemen ontstaan voor de dijk bij de huidige aansluiting (deze moet immers intact blijven. Na de opening kan in westelijke richting verder gebaggerd worden.
- Methode 2: Nu wordt begonnen in het midden van de uiteindelijke opening, waardoor men zich weinig zorgen hoeft te maken over erosieproblemen voor de dam zelf (die immers moet verdwijnen). De optredende stroombeelden moeten uitwijzen of de problemen voor de omgeving ook uitblijven.

Randvoorwaarden en uitgangspunten

De handberekeningen zijn uitgevoerd voor de waterstanden bij gesloten Beerdam voor één etmaal tijdens doodtij.

Tijdens de uitvoering zullen de verschillen in doorstroomoppervlak invloed hebben op de waterstanden en de debieten in het omliggende stroomgebied. De opening zorgt in een vroeg stadium namelijk voor meer weerstand en daardoor grotere fase- en amplitudeverschillen in het gebied dan in een later stadium, wanneer de opening groter is. Dit houdt in dat de ZWENDL randvoorwaarden die voor de uiteindelijke openingstoestand zijn gebruikt (hoofdstuk 8) voor de TRISULA-uitvoeringsfasen niet meer correct zijn. Om de schematisaties toch weer kloppend te maken moeten de aansturingsberekeningen in ZWENDL voor dezelfde openingsfasen gedaan worden. Door RIZA zijn in samenwerking met Gemeentewerken Rotterdam de 5 fasen doorgerekend. Als randvoorwaarden zijn de optredende waterstanden en debieten voor dezelfde meetpunten als in de berekeningen voor de uiteindelijke toestand gebruikt. Ook hier zijn alleen de spring-/doodtij berekeningen uit mei '79 gebruikt. Er is verder aangenomen dat de keuze voor de uitvoeringsmethode voornamelijk afhankelijk is van de situatie direct na de opening, wanneer de snelheden het grootst zijn. Er is enkel tijdsafhankelijk met een viscositeit van $\nu_H = 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$ gerekend. Voor de morfologische berekeningen is uitgegaan van een uniform over het doorstroomoppervlak verdeelde stroomsnelheid, en een uniform verdeelde korrelgrootte van $160 \mu\text{m}$ voor het sediment.

Voor de fasemodellering in TRISULA is uitgegaan van het aangepaste basismodel uit § 5.4. Hierin zijn voor elke fase een aantal gridcellen buiten werking gesteld, en wel zò dat het resterende deel van de dam binnen deze gridcellen ligt. De meetpunten Beerdam-6 t/m 9 die in hoofdstuk 8 geïntroduceerd zijn vallen telkens binnen elk faseoppervlak. Fase 1 en 2 zijn bemeten met Bd-9, in fase 3 t/m 5 worden hieraan resp. Bd-8 Bd-7 en Bd-6 toegevoegd.

9.3 Resultaten

De waterstanden die aan weerszijden van de Beerdam volgens ZWENDL heersen staan samen met de snelheden die volgens de overlaat berekeningen daarvan het gevolg zijn staan in Afbeelding 9.4. De maximale snelheden zijn 3 m/s , en een groot gedeelte van de tijd zijn de waterstanden zo laag dat de dam niet overspoeld wordt.

Voor de interpretatie van de resultaten van de TRISULA 2DH-uitvoeringsberekeningen worden voor de twee methoden telkens 3 Afbeeldingen getoond voor fase 1. De eerste Afbeelding geeft bovenaan de gridschematisatie met dieptelijnen, landgrenzen en meetstations voor de betreffende fase weer. De grafiek onderaan geeft de snelheden van de (in gebruikt zijnde) meetstations weer, en toont ter vergelijking tevens de snelheden zoals ze met ZWENDL

berekend zijn (in m/s). In de twee daarop volgende Afbeeldingen worden vervolgens de maximale vloed- resp. de maximale ebtoestand in het openingsgebied bekeken met bovenaan een vectorplot (schaal: 1 cm = 1 m/s) en onderaan een isolijnenplot voor de snelheid (interval 0,1 m/s).

Afbeelding 9.5 geeft de initiële openingsfase voor methode 1 weer. Alleen station Bd-9 wordt doorgerekend, en de vergelijking met de ZWENDL-resultaten laat zien dat de snelheden in TRISULA kleiner zijn, maar dat de grafiek wel ongeveer dezelfde vorm heeft. Dit heeft waarschijnlijk als oorzaak dat de schematisaties niet goed overeenkomen: vooral in de opening zelf, waar hoge snelheden voorkomen en de waarvoor de 1D-2D overstap nu juist gemaakt is, zullen deze verschillen goed merkbaar zijn. De overeenkomstige vorm van de grafieken geeft dan ook aan dat de modellering toch als goed genomineerd kan worden.

Afbeelding 9.6 geeft de vloedsituatie weer: de stroming is grotendeels parallel aan de wanden, en alleen aan de oostwand van de opening ontstaat door de vertraging na de ondiepte en de westelijke stroming in de westelijke Harteltak een neer. Daar waar de neer de zuidelijke Hartelwand aanvalt staan stroomsnelheden van 0,8 m/s. De noordwand wordt bij de voormalige aansluiting zwaar aangevallen door een langsstroming van meer dan 2,5 m/s.

Afbeelding 9.7 geeft de situatie voor eb weer. de oevers worden nu enkel door langsstroming aangevallen, echter met zeer hoge snelheden tot 3 m/s in de opening zelf. Verder wordt vooral het resterende damhoofd sterk omstroomd.

Afbeelding 9.8 toont de initiële openingsfase voor methode 2. Nu wordt alleen station Bd-7 doorgerekend. Vergelijking met ZWENDL levert goede resultaten op (zij dat de snelheden ook nu weer iets lager zijn). Wel valt op dat de pieksnelheden voor eb geen groot verschil meer tonen met die voor vloed, hetgeen bij methode 1 wel het geval was.

Afbeelding 9.9 laat zien dat de zuidelijke Harteloever bij vloed loodrecht aangestroomd wordt met zeer hoge snelheden. De langssnelheden lopen op tot 1,5 m/s. In de rest van het gebied doen zich geen ernstige verstoringen voor.

Afbeelding 9.10 laat zien dat bij eb de situatie juist omgekeerd is: nu wordt de noordwand aangevallen. De snelheden zijn aan de wand uiteraard wel kleiner dan bij vloed vanwege de plaatselijk grote diepte. Beide damhoofden worden sterk omstroomd, terwijl de zuidelijke Hartelwand buiten schot blijft.

9.4 Morfologische beschouwing

Voor de sedimentatie/erosie is het van groot belang hoe groot de stroomsnelheden in de opening zijn en hoe ze in de tijd variëren. Hierom is het noodzakelijk om een tijdsafhankelijke berekening voor de stroming te gebruiken die ook in niet maatgevende gevallen een indicatie geeft van de verschillende stroomparameters. Bij dit onderzoek zijn de snelheden in de opening gebruikt zoals ze in de vorige paragrafen berekend zijn. In Bijlage IV wordt een berekeningsmethode aangedragen om het sedimenttransport in de openingsfasen in te kunnen schatten. Met de aangegeven zandsluitingsformules zijn per tijdstap de sedimenttransporten per seconde per meter breedte berekend, waarbij iteratief rekening is gehouden met waterstandsverhoging door bodemerosie. Vervolgens is het totale transport voor een bepaalde tijdsperiode ingeschat worden en is aan de hand daarvan een schatting voor de bodemdaling als

functie van de tijd gedaan.

De resultaten voor de handberekeningen zijn gegeven in Afbeelding 9.11. Wat vooral opvalt is de abrupte daling voor het transport vlak na de initiële verhoging. Dit is te wijten aan het gebruik van de Engelund-Hansen formulering. Door de overlaat aanname is de diepte boven de kruin vlak na het begin van de stroming zeer klein, terwijl de snelheid zeer snel hoger wordt. Hierdoor zijn kleine variaties in deze snelheid het gevolg van grote variaties in het sedimenttransport. Na de eerste maximale transporten wordt de diepte door erosie snel groter, zodat bij de volgende overstroming de snelheden al zover zijn afgenomen dat het transport zeer veel kleiner is. De bodemligging die in de onderste grafiek staat is berekend door eenvoudig het momentane cumulatieve transport door de breedte van de dam (dus de lengte van de overlaat in de stroomrichting) te delen, waardoor de bodemdaling per meter breedte bepaald wordt. Uitgaande van een initiële bodemligging op NAP zal in deze fase de bodem in één etmaal ongeveer 1,2 meter eroderen.

Van de TRISULA-resultaten zijn alleen die voor uitvoeringsfase 1 en 2 gebruikt voor sedimenttransport berekeningen, omdat dit de belangrijkste fasen zijn voor het bepalen van de erosiesnelheid. Afbeelding 9.12 geeft de transporten per seconde per eenheid van breedte weer voor fase 1 (de bijbehorende snelheden staan in Afbeelding 9.2). De transporten zijn nu in eerste instantie groter dan bij de handberekening. Dit is het gevolg van de toegenomen debieten die met ZWENDL berekend zijn als gevolg van de opening zelf. Nu treedt een schommeling van de transporthoeveelheden niet op omdat de opening nu continu water doorlaat, waardoor de snelheden niet meer abrupt stijgen. De hoge transporten hebben een sterke erosie tot gevolg waardoor de bodemligging snel lager wordt, oplopend tot 3 meter per etmaal, zoals in de onderste grafiek van de Afbeelding te zien is.

Voor fase 2 staan de resultaten in Afbeelding 9.13. Nu zijn de transporten sterk afgenomen door snelheidsafname als gevolg van de grote diepte van NAP-6 meter. De bodem daalt als gevolg hiervan veel langzamer, per etmaal 1 meter.

9.5 Conclusies

De resultaten voor de initiële fasen geven aan dat voor methode 2 vooral de zuidelijke Hartelwand wellicht te sterk wordt aangestroomd om erosieproblemen voor de dijk te voorkomen. Bij methode 1 zullen de hoge langssnelheden uiteraard ook de nodige problemen opleveren. Voor het vervolg van het onderzoek gaan we er van uit dat deze langssnelheden grotendeels vermeden kunnen worden door de initiële opening niet direct te laten aansluiten aan de noordwand. Hierdoor zal de stroom toch enigszins parallel aan de oever blijven omdat oost-west stroming in het Hartelkanaal tijdens eb zijn weg kan volgen, en de west-oost stroming tijdens vloed toch al via een "trechter" geleid wordt. De erosie die dan toch optreedt zal zo beperkt blijven tot de te verwijderen damhoofden. Omdat methode 1 uit deze berekeningen als beste basisalternatief naar voren komt, zijn hiervoor de overige fasen eveneens doorgerekend. De resultaten zijn gegeven in Afbeelding 9.14 tot en met 9.22. Wat hieruit vooral opvalt is dat de snelheden voor de fasen met een grotere diepte al snel acceptabele stroomsnelheden tot gevolg hebben. Dit bekrachtigt de aanname dat de berekeningen voor fase 1 de maatgevende toestanden weergeven.

Om een idee te krijgen van wat er nu in een aantal dagen gebeurt met het bodemprofiel zijn de transportberekeningen van fase 1 en fase 2 samengevoegd, op zo'n manier dat de dieptes als gevolg van erosie voor elke fase op elkaar aansluiten. Afbeelding 9.23 geeft de resultaten weer: uitgaande van de begintoestand op NAP-3 meter volgt na een snelle daling in de eerste

24 uur een steeds minder wordende erosie. Deze erosie is in totaal echter zo sterk dat binnen 72 uur een diepte van meer dan NAP-7,5 meter bereikt is. Om te voorkomen dat er een zeer diepe erosiegeul plaatsvindt moet het profiel binnen deze tijd zo snel mogelijk vergroot worden. Dit betekent dus snel en doelgericht werken met groot materieel.

Hoofdstuk 10

Evaluatie

Hoofdstuk 10 Evaluatie

10.1 Algemene conclusies

In het onderzoek 'Hydraulische modellering Open Beerdam' heeft een bestaande dieptegemiddelde quasi-stationaire modellering in het programma TRISULA van de opening centraal gestaan. Er is met nieuwe randvoorwaarden onderzoek gedaan naar de gevoeligheid van het model voor een aantal belangrijke parameters en de gebruikte modelleringmethode. Daarna is het model gebruikt om met een tijdsafhankelijke berekening randvoorwaarden voor real-time scheepvaartsimulaties te genereren en is een uitvoeringsmethode onderzocht.

De invoer van de nieuwe randvoorwaarden in het model gaf problemen daar de resultaten grote afwijkingen vertoonde van die van het vrij betrouwbare nestmodel in ZWENDL. De eerste twee onderzoeken zijn daarom met aangepaste randvoorwaarden gedaan omdat nauwkeurigheid hiervoor geen rol speelde.

Het gevoeligheidsonderzoek naar de viscositeit heeft een indruk gegeven van hoe de berekende stroombeelden afhangen van de waarde van de door het model gebruikte turbulentie viscositeit. De waarde hiervan is het gevolg van een aanname om turbulentie in een dieptegemiddelde stroming weer te kunnen geven, en varieert in het gebruik aangezien de aanname tot gevolg heeft dat een correct gebruik van de waarde afhankelijk is van de gevoeligheid van het model ervoor. Een hoge gevoeligheid betekend dat de turbulentie-vereenvoudiging niet geschikt is om stroombeelden met voldoende nauwkeurigheid weer te geven. Het bestaande model toonde met betrekking tot de berekende stroombeelden in de diepe Mississippihaven grote gevoeligheid voor kleine veranderingen van de parameter. Dit maakt het bestaande model ongeschikt voor het weergeven van turbulente effecten in het havenbekken.

Met het gevoeligheidsonderzoek naar de schematisatie van het openingsprofiel is gekeken naar de invloeden van profielveranderingen op de te berekenen stroombeelden. Een belangrijk aspect is hier de berekening van de stroomsnelheden aan de wanden van de dieptegemiddelde modellering: er wordt hier gerekend met een no-slip conditie die de snelheid direct aan de wand nul stelt, hetgeen niet in elk geval correct is. Voor het onderzoek zijn drie varianten van het diepteprofiel van de opening aan een test onderworpen, waarbij een gridstrook verwijderd werd om een loslaatpunt te simuleren. Het oorspronkelijke model en een model met een steilere helling aan de diepe zijde van de opening bleken zeer gevoelig voor de verandering, terwijl een model waarin een (in werkelijkheid ook geplande) diepe stroomgeul aan de oostzijde van de opening nagenoeg geen gevoeligheden vertoonde. Er kan dan ook geconcludeerd worden dat het oorspronkelijke model bij de eerste twee diepteprofielen te gevoelig voor veranderingen is om de stroombeelden met voldoende betrouwbaarheid weer te geven. Wanneer het model van een diepe stroomgeul voorzien wordt, resulteert dit in een meer robuuste schematisatie, waarmee de betrouwbaarheid van de hiermee berekende stroombeelden tevens groter is.

Het onderzoek naar een tijdsafhankelijke dieptegemiddelde modellering is gedaan om de quasi-stationaire aanpak op nauwkeurigheid ervan te controleren. De tijdsafhankelijke berekening vertoonde goede overeenkomsten met het nestmodel in ZWENDL. Wanneer de stroombeelden in de Mississippihaven niet maatgevend voor de scheepvaartpassages zijn, kan voor de tijdsafhankelijke modellering worden gesteld dat de nauwkeurigheid hiervan eveneens voldoende is voor het gebruik van de resultaten voor de scheepvaartsimulaties.

De problemen bij de invoer van de nieuwe randvoorwaarden voor stationaire berekeningen zijn nader onderzocht door het model aan twee testcases te onderwerpen. Door het gebruik van de tijdsafhankelijke TRISULA-modellering als nestmodel voor nieuwe quasi-stationaire TRISULA-berekeningen konden fouten door overname en schematisatieverschillen verder worden uitgesloten omdat ook hierbij geen overeenkomsten met de tijdsafhankelijke berekeningen verkregen werden. Door invoer van een nieuwe randsturing in plaats van de doodlopende Hartelhaven konden ook geen betere resultaten verkregen worden, zodat de aanwezigheid van een lang gesloten havenbekken in het model niet de oorzaak van de afwijkingen kon zijn. Dit beperkte de oorzaak enkel tot de vereenvoudiging van een tijdsafhankelijk in een stationair probleem. Met een zelf ontwikkelde theorie is gesteld dat de oorzaak zou kunnen liggen aan de keuze voor het soort randvoorwaarden dat gebruikt werd aan de open randen van het model. Deze theorie is bevestigd met een berekening waarbij de oorspronkelijke soorten randvoorwaarden zijn verwisseld. Hiermee werden zeer goede overeenkomsten met de tijdsafhankelijke berekeningen geboekt. Dit levert de conclusie dat wanneer een numerieke modellering gewenst is in het geval van een opening tussen twee totaal verschillende vloeistofbekkens, de keuze voor een quasi-stationaire aanpak gepaard moet gaan met een gerichte keuze voor het te gebruiken soort randvoorwaarden, en de plaats daarvan afhankelijk van de eigenschappen van de betreffende bekkens. In het geval van de Open Beerdam modellering moet het diepe noordelijke havenbekken noodzakelijkerwijs aangestuurd worden met een waterstandsrand. Dit komt omdat een waterstandsrand op het relatief ondiepe Hartelkanaal (zoals in de oorspronkelijke berekeningen gedaan is) de waterstanden in het havenbekken de gelegenheid geeft om in een stationaire berekening een evenwichtsstand te bereiken die in de tijdsafhankelijke berekening niet bereikt wordt.

Voor het onderzoek naar de uitvoering zijn voor een aantal uitvoeringsfasen stromingsberekeningen uitgevoerd. De fasen die met het oorspronkelijke TRISULA-model zijn doorgerekend laten zien dat een uitvoeringswijze beginnend in het midden van de toekomstige opening tot hevige dwarsstromingen leidt, en dat een openingsuitvoering beginnend in de buurt van de huidige oostelijke aansluiting minder aanval op oevers (en scheepvaart) teweeg zal brengen. Een globale morfologische beschouwing van de fasen laat zien dat plaatselijk zeer snelle ontgrondingen te verwachten zijn, al beginnend bij een kleine overstroming van de resterende initiële opening. Deze ontgrondingen kunnen alleen dan in de hand worden gehouden wanneer de stroomsnelheden door snelle vergroting van het openingsprofiel beperkt worden. Wel moet gezegd worden dat de ontgrondingsberekeningen een zeer globaal karakter hebben, waardoor de resultaten slechts als indicatie kunnen gelden.

10.2 Aanbevelingen

De belangrijkste aanbeveling is: schroom niet om voor een nauwkeurige berekening van stroombeelden in diepe havenbekkens die via een kleine opening grenzen aan ondiepe kanalen of rivieren direct een 3D-submodellering te gebruiken waarbij een voldoende fijne turbulentieberekening en nauwkeurige wandwetten gebruikt worden. Een 2DH-berekening is in deze gevallen weliswaar goed om een globale schattingen voor de stroomsnelheden te doen, maar de meerwaarde boven een 1D-modellering is zeer gering omdat de stroomrichtingen toch voornamelijk afhangen van 3-dimensionale effecten, die in beide gevallen niet of erg slecht weergegeven kunnen worden.

Let verder bij de keuze voor een quasi-stationaire aanpak van een tijdsafhankelijk probleem goed op de configuratie van het gebied. Door het instellen van evenwichtstoestanden die in een

tijdsafhankelijke modellering niet bestaan, kunnen grote onnauwkeurigheden van de stationaire berekening niet uitgesloten worden. Gebruik voor soortgelijke gevallen als de Open Beerdam een waterstandsrand aan de diepe zijde van het model om de grip op de quasi-evenwichtswaterstand niet te verliezen. Hierdoor worden wel betrouwbare maatgevende stationaire stroombeelden verkregen.

Voor de uitvoeringsmethode wordt aangeraden om de dam over de hele breedte van de toekomstige opening eerst zoveel mogelijk te verlagen zonder dat een duidelijke overlaatconstructie ontstaat. Wanneer dit wel gebeurt kunnen zeer snel grote ontgroningen optreden die moeilijk gecontroleerd kunnen worden als er nog veel grond in zijdelingse richting verwijderd moet worden. Tot een hoogte van ongeveer NAP + 1,5 meter kan zonder veel hinder van overstromingen gewerkt worden met landmaterieel. Daarna kan met cutterzuigers de breedte van de dam gereduceerd worden tot afmetingen die eenvoudig en (vooral) snel te verwijderen zijn als de uiteindelijke doorsteek plaatsvindt, en die toch vroegtijdige doorbraak uitsluiten.

Met betrekking tot verder hydraulisch onderzoek naar de Beerdam geldt dat indien nauwkeuriger informatie gewenst is van stroombeelden in het noordelijk havenbekken (Mississippihaven, Petroleumhaven, Amazonehaven) er bij voorkeur gewerkt moet worden met resultaten van een 3D-model met een goede subgridmodellering voor de turbulentie en de wandafhandeling. De stroombeelden die geleverd zijn voor de scheepvaartsimulaties zijn niet betrouwbaar genoeg om meer dan alleen een scheepspassage op basis van globale stroomsnelheden in de opening te simuleren.

Voor verdere uitvoeringsberekeningen wordt aangeraden om ook met een ander transportmodel dan het zandsluitingsmodel een aantal controleberekeningen uit te voeren, om meer zekerheid met betrekking tot de hier gevonden resultaten te verkrijgen. Ook de resultaten van de snelheidsberekeningen die in dit rapport gepresenteerd zijn, moeten met enige terughoudendheid gebruikt worden, vooral omdat deze waarden een bepalende factor zijn in de sedimenttransportformules, en de berekening ervan op globale aannames van randvoorwaarden is gebeurd.

Literatuurverwijzingen

Literatuurverwijzingen

- [1] 'Beveiliging benedenrivierengebied tegen stormvloed; B / MER deel 1 en 2'; Rijkswaterstaat, september 1987
- [2] 'Goederenstroommodel 6; goederenstromen voor de Rijnmondhavens (1995-2000-2010)'; Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, juli 1990
- [3] 'Delta 2000-8; naar een grootschalig containeroverslag- en goederendistributie-centrum op de Maasvlakte'; Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, november 1990
- [4] 'Tracénota Europoortkering met Open Beerdam'; Rijkswaterstaat / Gemeente Rotterdam / Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, mei 1992
- [5] 'Tracénota / MER Open Beerdam'; Rijkswaterstaat / Gemeente Rotterdam / Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, augustus 1993
- [6] 'Stromingsberekeningen Beerdam en Rozenburgse sluis : nota met resultaten'; Waterloopkundig Laboratorium Delft, juli 1991
- [7] 'Stromingsberekeningen Beerdam deel II; Onderzoek naar oscillaties en 200-meter doorsteekberekeningen'; Waterloopkundig Laboratorium Delft, mei 1993
- [8] 'Nautische gevolgen Open Beerdam; concept nota'; P.A. Kluijtenaar Nautisch Adviesbureau Rotterdam, juli 1991
- [9] 'Nautische gevolgen Open Beerdam; vervolgstudie'; P.A. Kluijtenaar Nautisch Adviesbureau Rotterdam, mei 1993
- [10] 'Effecten van open Beerdam en Rozenburgse sluis op de morfologie van het benedenrivierengebied'; Rijkswaterstaat / Gemeente Rotterdam, augustus 1991
- [11] 'Vloeistofmechanica; Handleiding colleges B71'; prof. dr. ir. J.A. Battjes, Technische Universiteit Delft, juli 1989
- [12] 'Effecten van open Beerdam en Rozenburgse sluis op de zoutindringing in het benedenrivierengebied'; Rijkswaterstaat / Gemeente Rotterdam, mei 1992
- [13] 'Turbulentie in de waterloopkunde; Handleiding colleges B82'; R. Booij, Technische Universiteit Delft, december 1992
- [14] 'Computational techniques for fluid dynamics; Vol. I & II'; C.A.J. Fletcher, Springer-Verlag, 1988
- [15] 'On the construction of computational methods for shallow water flow problems'; Rijkswaterstaat Communications nr. 35, 1984
- [16] 'Europoortkering, doorgraven Beerdam; rapportage grondonderzoek'; Gemeentewerken Rotterdam, september 1992

Literatuurverwijzingen

- [17] 'Zandsluitingen: state of the art'; nota in opdracht van Rijkswaterstaat, 1988
- [18] 'Europoort als waterkering; een alternatievenanalyse'; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, december 1989

Overige geraadpleegde literatuur:

- 'Tracénota Europoortkering: Waterloopkundige en morfologische aspecten'; Waterloopkundig Laboratorium Delft, maart 1991
- Notitie over huidige en verwachte scheepvaartbewegingen van en naar Europoort/Maasvlakte; C. Deelen, Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, mei 1992
- 'Afsluitdammen, regels voor het ontwerp'; Rijkswaterstaat, maart 1992
- 'Waterbouw, rekenregels voor waterbouwkundig ontwerpen'; Rijkswaterstaat, afdeling sluizen en stuwen, mei 1990
- 'Boundary conditions for the use of dredging equipment'; prof. ir. J. de Koning, Technische Universiteit Delft, april 1991
- 'Lange golven, handleiding colleges B73'; C. Verspuy, Technische Universiteit Delft, april 1987
- 'Computational Hydraulics'; M.B. Abbot, 1982
- 'Generation of two-dimensional horizontal secondary currents'; research report, Delft Hydraulics Laboratory, juli 1976
- 'TRISULA, a simulation program for hydrodynamic flows and transports in 2 and 3 dimensions'; Delft Hydraulics Laboratory, mei 1993
- 'Experiments on unsteady separating flow with free surface'; L.X. Wang, internal report, Laboratory of Fluid Mechanics, Technische Universiteit Delft, 1982
- 'Weakly-reflective boundary-conditions for two dimensional shallow water equations'; G.K. Verboom, publication no. 266, Delft Hydraulics Laboratory, mei 1982

