

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Voorstudie gekoppeld 1D-2D systeem  
voor seiches in de Nieuwe Waterweg

inclusief beschrijving besturing en ballaststelsel Maeslantkering

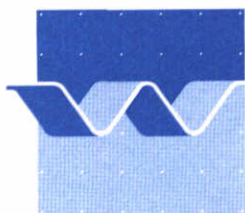
Verslag

december 1999

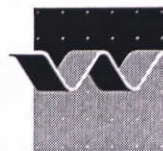
# Vorstudie gekoppeld 1D-2D systeem voor seiches in de Nieuwe Waterweg

inclusief beschrijving besturing en ballaststelsiem Maeslantkering

G.S. Stelling en J.A.T.M. van Kester



**wl | delft hydraulics**



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

TITEL: Voorstudie gekoppeld 1D-2D systeem voor seiches Nieuwe Waterweg

## SAMENVATTING:

De stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg is ontworpen voor het opvangen van verhoogde waterstanden op zee. Bij een verhoogde waterstand op de rivier (negatief verval) is de constructie slechts beperkt belastbaar en moet de kering weer geopend worden. Een mogelijke oorzaak van een negatief verval is het optreden van seiches. Seiches zijn staande golven opgewekt door resonantie van de inkomende golven van zee. Om de faalkans van de Maeslantkering te kunnen bepalen wordt een probabilistische benadering toegepast, waarbij ook het effect van seiches wordt beschouwd. Om in een wiskundig model seiches nauwkeurig te kunnen voorspellen, moet de uitstraling van de uitredende golf naar zee goed beschreven kunnen worden. Het afstudeerwerk van E. de Haas toont aan dat dit mogelijk is door de combinatie van 1D rekenen voor de Nieuwe Waterweg met 2D rekenen voor een klein deel van de Noordzee.

Tot nu wordt voor de risico analyse het door Redeker&Partners ontwikkelde model RAS/FLOW gebruikt. Dit programma bevat naast een 1D waterbewegingsmodel een algoritmische beschrijving van het beslis- besturings- en ballaststelsel van de Maeslantkering. Het programma is geschreven in GFA Basic en geen eigendom van Rijkswaterstaat.

In deze voorstudie is zowel gekeken naar de technische haalbaarheid als de inspanning, die nodig is om te komen tot een standaard Rijkswaterstaat software product, bestaande uit een gekoppeld 1D2D waterbewegingsmodel en een module voor de dynamica (beslis- besturings- en ballaststelsel) van de Maeslantkering. Er zijn drie varianten beschouwd.

REFERENTIES: Contract number 3100-0638, projectnaam DZH/seichesNWW

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
	J. van Kester	26-11-99	concept	H. Kernkamp	
	G. Stelling	6-12-99	eerste	H. Kernkamp	
		14-12-99	tweede	H. Kernkamp	T. Schilperoort
PROJECTNUMMER:		Z2728			
TREFWOORDEN:		seiches, gekoppeld 1D2D-model, Maeslantkering			
INHOUD:	TEKST	TABELLEN	FIGUREN	APPENDICES	0
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG	<input type="checkbox"/> CONCEPT	<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>1-1</b>
1.1	Algemeen.....	1-1
1.2	Seiches.....	1-5
<b>2</b>	<b>Beschrijving dynamica Maeslantkering</b> .....	<b>2-1</b>
2.1	Inleiding.....	2-1
2.2	Beschrijving sectordeuren.....	2-2
2.3	Krachten op constructie.....	2-6
2.4	Sluitscenario kering.....	2-8
2.5	Modellering stormvloedkering in het waterbewegingsmodel.....	2-10
2.6	Samenvatting.....	2-15
<b>3</b>	<b>Beschrijving RAS/FLOW</b> .....	<b>3-1</b>
3.1	1D netwerkmodel.....	3-1
3.2	Modellering stormvloedkering.....	3-4
3.3	Rekentijd.....	3-4
3.4	Programmastructuur.....	3-5
3.5	Uitbreidbaarheid met 2D zeegebied.....	3-6
<b>4</b>	<b>Beschrijving 1D2D model</b> .....	<b>4-1</b>
4.1	Achtergrond.....	4-1
4.2	Vergelijkingen.....	4-2
4.3	Systeem opzet en datastructuur van het rekenprogramma.....	4-7
4.4	Rekensnelheid.....	4-8
4.5	Noodzakelijke uitbreidingen.....	4-9

---

<b>5</b>	<b>Overzicht varianten 1D2D model voor seiches NWW .....</b>	<b>5-1</b>
5.1	Inleiding .....	5-1
5.2	Technische haalbaarheid .....	5-3
5.3	Risico's .....	5-3
5.4	Vergelijking varianten .....	5-4
<b>6</b>	<b>Conclusies .....</b>	<b>6-1</b>
<b>7</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>7-1</b>

# I Inleiding

## I.1 Algemeen

De stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg (Maeslantkering of SVKW) is gebouwd om Rotterdam en het achterland te beschermen tegen extreem hoge waterstanden. Om de belangen van de Rotterdamse haven zo min mogelijk te schaden, is gekozen voor een beweegbare kering. Het gekozen ontwerp, bestaande uit twee boogvormige sectordeuren die vanaf de beide oevers om twee bolscharnieren de rivier opgedraaid worden, was afkomstig van Bouwcombinatie Maeslant Kering (BMK). De bolscharnieren zijn ontworpen voor het opvangen van krachten op de sectordeuren door een verhoogde waterstand op zee. Bij een verhoogde waterstand op de rivier (negatief verval) zijn de bolscharnieren slechts beperkt belastbaar, zonder dat er schade aan de constructie optreedt. Het beheer van de kering dient zo ingericht te worden dat grote negatieve vervallen voorkomen worden. Een oorzaak van een negatief verval is het optreden van seiches.

### *Seiches*

Seiches zijn resonante staande golven in havenbekkens. Resonantie treedt op als de frequentie van de inkomende golven van zee 'past' bij de eigenfrequentie van het havenbekken. Deze resonantie kan leiden tot opslinging (amplificatie) van de golven in het havenbekken. De amplificatie neemt toe naarmate de haveningang smaller is ten opzichte van de lengte van het bekken. Dit, op het eerste gezicht, vreemde verschijnsel noemt men de havenparadox. Om dit verschijnsel met een wiskundig model nauwkeurig te kunnen voorspellen, moet de radiale uitstraling van de uitgaande golf naar zee beschreven kunnen worden. Bovendien moet het ingaande signaal voldoende lang aanhouden om volledige opslinging te genereren, zie paragraaf 1.2. De seiches voor de Rotterdamse havens hebben een periode van 10 minuten tot 2 uur. Het spectrum en de statistiek van de inkomende golven van zee bij Hoek van Holland in de seichesband is tot nu toe nooit exact vastgesteld. Kennis hiervan is gebaseerd op seichesregistratie bij Rozenburgsesluis en de havenrespons berekend met het golvenmodel PHAROS.

### *Totale belasting op kering*

De belasting op de stormvloedkering wordt bepaald door het verschil in waterstand vóór en áchter de deuren. Dit verschil is afhankelijk van de hoogte van getij, stormopzet, seiches en rivierafvoer. Ieder van de grootheden heeft een eigen statistiek, die niet altijd onafhankelijk hoeft te zijn. Het waterstandsverschil wordt mede bepaald door het faseverschil tussen storm en getij en het beheer van de kering. Om de faalkans van en de belasting op de Maeslantkering te bepalen wordt een probabilistische benadering toegepast. Hiervoor zijn duizenden berekeningen met een wiskundig waterbewegingsmodel nodig. Er wordt zowel gerekend voor de situatie van een open als voor de situatie van een gesloten kering, dus tweemaal zoveel simulaties. In verband met rekentijd en doorlooptijd worden één-dimensionale (1D) berekeningen geprefereerd boven twee-dimensionale (2D)-berekeningen.

### ***Beheer van de kering***

Een extra element dat bij de bepaling van de belasting op de kering een rol speelt is het beheer van de Maeslantkering zelf tijdens openen en sluiten, geregeld door het BOS en het BES (besturingssysteem), de beslisser en de uitvoerder. Het BOS (Beslis en Ondersteunend Systeem) bepaalt wanneer er wordt gesloten. Op basis van de waterstanden vóór en achter de kering en de spleethoogte stuurt het BES (Besturingssysteem Stormvloedkering) de pompen en kleppen aan en wordt de afzinknelheid bepaald. Daarnaast kan het afzinkproces door het BOS worden afgebroken indien er geconstateerd wordt dat er een te groot negatief verval is t.g.v. seiches, respectievelijk onvoldoende erosie-capaciteit is om de drempel schoon te spoelen. Voor de bepaling van de belasting op de kering (zonder seiches) is in het verleden een ZWENDL-model van het Noordelijk Deltabekken gebruikt. In dit ZWENDL-model is het beheer van de Maeslantkering gemodelleerd als twee schuiven en een overlaat. Het sluiten en afzinken gebeurt in het ZWENDL-model met een constante snelheid. De interactie tussen waterbeweging en sluitsnelheid op basis van het ballastsysteem is in de ZWENDL-modellering dus niet meegenomen. De tijdschalen van de verschillende fasen tijdens het openen en sluiten zijn van de orde van de periode van de kortste seiches. De interactie tussen kering en waterbeweging moet daarom bij het bepalen van de belasting op de constructie in beschouwing genomen worden. Een wiskundige beschrijving van de dynamica van de Maeslantkering zoals in het ZWENDL-model is daarom voor het bepalen van de belasting op de kering en voor risico analyse te eenvoudig en niet geschikt.

### ***RAS/FLOW***

Tot nu toe is voor de bepaling van de belasting op de kering en voor risico analyse het door Redeker & Partners ontwikkelde computerprogramma RAS/FLOW toegepast. Dit programma bevat naast een 1D-model voor de waterbeweging in het rivierennetwerk een volledige algoritmische beschrijving van het beslis-, besturings- en ballastsysteem van de Maeslantkering. Het effect van de stormvloedkering op de waterbeweging is in RAS/FLOW gemodelleerd als een lokale vernauwing van het doorstroomoppervlak in het rivierennetwerk en een extra vertragingsterm in de bewegingsvergelijking. De interactie tussen waterbeweging en stormvloedkering is in RAS/FLOW dus aanwezig. Op de zeerand (Hoek van Holland) wordt in RAS/FLOW bij het astronomisch getij en de stormopzet, een random signaal t.g.v. seiches toegevoegd. De statistiek van de maximale seiche amplitude bij Hoek van Holland is een vertaling van de seiche statistiek bij de kering, zoals dat op basis van PHAROS-berekeningen uitgaande van de gemeten seiche statistiek bij Rozenburgsesluis is bepaald. De omzetting is gebaseerd op de verhouding tussen de hoogste resonantiepieken (Beslisdocument Seiches). In RAS/FLOW wordt zowel gerekend met een uniform als met een exponentieel spectrum op de zeerand. Omdat in het 1D-model de nauwkeurige uitstraling van de golfenergie naar zee ontbreekt (zie paragraaf 1.2), wordt het seichesmaximum bij de kering bepaald door het seichesignaal op de zeerand. In RAS/FLOW wordt voor een open dan wel gesloten kering een andere kansverdeling voor het maximum seiche gehanteerd. Bij RAS/FLOW wordt verondersteld dat het maximum niet beïnvloed wordt door het dynamisch sluiten of openen van de stormvloedkering.

Het RAS/FLOW programma is ontwikkeld in opdracht van Bouwcombinatie Maeslant Kering (BMK) om de belasting op de kering te bepalen. Daarnaast is het ingezet als testinstrument tijdens de ontwerpfase van het besturingssysteem (BES). De RAS/FLOW

software is destijds niet ontworpen en geprogrammeerd om later opgenomen te worden als standaard software binnen de Rijkswaterstaat organisatie. De programmastructuur en de documentatie voldoen daarom nog niet aan de regels, die voor standaard software bij Rijkswaterstaat (bijvoorbeeld de SIMONA-normen) gelden.

#### ***Voorspellend 1D2D rekenmodel in standaard Rijkswaterstaat software omgeving***

Rijkswaterstaat Directie Zuid Holland bepaalt in het kader van de vijfjaarlijkse toeslag de maatgevende hoogwaterstanden (MHW) met ZWENDL/SOBEK. In dat kader dient ook de belasting op de kering te worden bepaald t.g.v. waterstanden op zee, seicheskarakteristieken, rivierafvoer, meteorologie, etc.. Effecten van wijzigingen in het beheer van de kering of wijzigingen in de geometrie van het rivierengebied (tweede Maasvlakte) moeten worden meegenomen. Er is daarvoor een robuust, flexibel, betrouwbaar en goed gedocumenteerd softwareproduct nodig. De organisatie rond het softwareproduct moet zodanig zijn dat continuïteit gegarandeerd kan worden.

Uit onderzoek, verricht in het kader van het afstuderen van A. Méndez Lorenzo blijkt dat voor monochromatische golven een zwak reflecterende randvoorwaarde kan worden afgeleid, die in een 1D numeriek model de havenrespons nauwkeurig voorspelt (Méndez Lorenzo, 1997). Voor een havengeometrie met een samengesteld seichesspectrum is deze randvoorwaarde niet geschikt (De Haas, 1998). Het afstudeerwerk van E. de Haas toont een eenvoudige oplossing voor de radiale uitstraling van golfenergie naar zee: de combinatie van 1D rekenen voor de Nieuwe Waterweg met 2D rekenen voor een klein deel van de Noordzee. De rekentijd neemt dan nauwelijks toe t.o.v. zuivere 1D simulaties terwijl de uitstraling van golfenergie correct wordt afgehandeld.

Op dit moment wordt door Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde in samenwerking met het WL | delft hydraulics een programma ontwikkeld dat het 1D-modelsysteem SOBEK-LOWLAND met het 2D-modelsysteem Delft-FLS integreert. Door uitbreiding van het 2D-modelsysteem Delft-FLS met speciale seichesrandvoorwaarden voor het zeegebied, zoals beschreven in (Kernkamp e.a., 1994 en de Haas, 1998), zou voor seichesberekeningen de 1D waterbeweging in de Nieuwe Waterweg gekoppeld kunnen worden aan een 2D zeegebied voor de uitstraling van golfenergie. Dit alles in een omgeving die gebruik maakt van standaardsoftware.

#### ***Ontwerpeisen 1D2D rekenmodel***

Om ook in de toekomst effecten van wijzigingen in de geometrie van het Noordelijk Deltabekken (tweede Maasvlakte, openen Haringvlietsluizen) en de randvoorwaarden op zee (zeespiegelstijging) op het beheer van de Maeslantkering te kunnen onderzoeken, is het belangrijk voor Rijkswaterstaat om een gevalideerd rekenmodel te hebben in een standaard software omgeving waarmee de belasting op de kering bepaald kan worden. Een rekenmodel voor bepaling van de belasting op de Maeslantkering onder invloed van getij, stormopzet en seiches dient dus de volgende componenten te bevatten:

1. 1D waterbeweging voor het rivierenetwerk met een willekeurige natte doorsnede als functie van de waterstand.



2. 2D waterbeweging voor een kleine kuststrook rond de monding van de Nieuwe Waterweg, die aan een 1D-model van de Waterweg vastgeknoopt kan worden. Hierbij dienen op zee speciale randvoorwaarden op basis van Riemann invarianten opgelegd te kunnen worden.
3. Beschrijving dynamisch gedrag van de Maeslantkering onder invloed van de waterbeweging tijdens openen en sluiten.
4. Beschrijving ballaststelsel voor de bepaling van de krachten en momenten onder invloed van de waterbeweging op de constructie.

### ***Mogelijke implementaties***

Alle bovengenoemde componenten zijn, onafhankelijk van elkaar, aanwezig in bestaande software. Software waarin alle genoemde componenten geïntegreerd beschikbaar zijn, is nog niet in een bruikbare vorm aanwezig. Uitgangspunt is dat conform de andere rekentechnische programma's van Rijkswaterstaat, het rekengedeelte van het softwareproduct in FORTRAN geprogrammeerd zal moeten zijn. Doel van deze voorstudie is om een inventarisatie te maken wat nodig is om tot een dergelijk softwareproduct te komen. Hierbij zijn drie varianten mogelijk:

1. Uitbreiding RAS/FLOW met een 2D zeegebied. Daarnaast moet de RAS/FLOW programmatuur zodanig gestructureerd en gedocumenteerd worden dat het door Rijkswaterstaat in beheer en onderhoud kan worden genomen.
2. Het 1D2D-model (SOBEK-LOWLAND + Delft-FLS) uitbreiden met een geherstructureerde module van RAS/FLOW voor de beschrijving van de dynamica van de Maeslantkering. Het betreft hier zowel de koppeling tussen waterbeweging en de toestand van de stormvloedkering (regeling) als de beschrijving van het ballaststelsel.
3. Het 1D2D-model (SOBEK-LOWLAND + Delft-FLS) uitbreiden met een nieuw op te zetten module voor de beschrijving van de dynamica van de Maeslantkering. Het betreft hier zowel de koppeling tussen waterbeweging en de toestand van de stormvloedkering (regeling) als de beschrijving van het ballaststelsel. In deze variant wordt uitgaande van bestaande documenten de module geprogrammeerd.

### ***Technische haalbaarheid***

In deze voorstudie is zowel gekeken naar de technische haalbaarheid van de drie varianten, de risico's als de benodigde inspanning voor realisatie. De technische haalbaarheid is gebaseerd op de ervaring met RAS/FLOW. Daarnaast zijn de voor- en nadelen van de verschillende varianten naast elkaar gezet. De kennis van RAS/FLOW is gebaseerd op het document "RAS/FLOW, simulatie SVKW", A-10-5090, (Redeker & Partners, 1999). Om tot een goed beeld te komen over de functionaliteit en structuur van RAS/FLOW is aan G. Bruynzeel (DIGITEC) en F. (Redeker & Partners) op de besprekingen in het kader van dit project om aanvullende informatie gevraagd. De beschrijving van het ballaststelsel staat in het document W-03-0082 "ballaststelsel, functionaliteit 1996" (MSM, 1997).

### ***Inhoud rapport***

In paragraaf 1.2 geven we kort de achtergrond van seiches. In hoofdstuk 2 wordt de regeling van de Maeslantkering uiteengezet. Hoofdstuk 3 geeft een kort overzicht van de functionaliteit en structuur van het programmasysteem RAS/FLOW van Redeker & Partners. Er wordt bovendien besproken welke activiteiten er nodig zijn om het systeem uit te breiden tot een 1D2D systeem dat aan de software eisen van Rijkswaterstaat voldoet. Hoofdstuk 4

geeft een korte beschrijving van de huidige functionaliteit van het gekoppelde 1D2D model SOBEK-LOWLAND met Delft-FLS. Bovendien wordt aangegeven welke uitbreidingen er nog nodig zijn om het systeem dezelfde functionaliteit te geven als RAS/FLOW. In hoofdstuk 5 worden de drie varianten vergeleken. In hoofdstuk 6 staan de conclusies van deze voorstudie.

### **Projectgegevens**

Deze voorstudie is uitgevoerd door J. van Kester, H. Kernkamp en G. Stelling WL | delft hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat, Dienst Weg en Waterbouwkunde. De projectnaam is DZH/seichesNWW en het projectnummer bij WL | delft hydraulics is Z2728. Als projectbegeleider namens Rijkswaterstaat DWW traden op Mw. A. Méndez Lorenzo en E. Berendsen. Op de besprekingen in het kader van dit project waren ook de ontwikkelaars van RAS/FLOW G. Bruynzeel (DIGITEC) en F. Redeker (Redeker & Partners) aanwezig.

## **1.2 Seiches**

Seiches zijn resonante staande golven. In havenbekkens worden ze opgewekt door inkomende golven van zee.

Als een vanuit zee inkomende golf weerkaatst tegen het gesloten uiteinde van de haven, dan loopt de gereflecteerde golf vanuit de haven naar de zee. De zee gedraagt zich min of meer als een 'harde' rand voor deze golf, waardoor de gereflecteerde golf ten dele terugkaatst de haven in. Hierdoor wordt golfenergie in de haven opgebouwd. Als de lengte van de golf uit zee 'past' bij de lengte van de haven, dan kan er resonantie of amplificatie optreden. De hoogste amplificatie is i.h.a. te verwachten bij de grondtoon (de frequentie waarbij de havenlengte ongeveer gelijk is aan een kwart van de golflengte). De mate waarin de uitgaande golf op de zeerand wordt gereflecteerd, heet de reflectiecoëfficiënt en hangt af van de lengte van de golf ten opzichte van de breedte van de haven. Bij een relatief smalle havenmond varieert de waterstand in de havenmond minder dan bij een brede havenmond en is de reflectiecoëfficiënt hoger dan bij een brede haven.

De amplificatie ( $A_{mp}$ ) van een haven is gedefinieerd als de waterstands-amplitude achterin de haven ( $A_{haven}$ ) gedeeld door tweemaal de waterstands-amplitude van de inkomende golf ( $A_{ink}$ ):

$$A_{mp} = \frac{A_{haven}}{2A_{ink}}. \quad (1.1)$$

Bij deze definitie heeft een oneindig brede haven (ofwel een lange rechte kust), een amplificatie van 1. Immers, bij een inkomende golf met amplitude  $A_{ink}$ , is de amplitude in de haven  $A_{haven} = 2 * A_{ink}$ , gelijk aan de som van inkomend en gereflecteerd signaal. Een oneindig brede haven heeft een amplificatie van 1, ofwel geen amplificatie. De gereflecteerde golf vanuit de haven treedt dan ongestoord als een volkomen vlakke golf (recht golffront) weer naar buiten en er vindt geen energieopbouw in de haven plaats. Bij een haven met eindige breedte/lengteverhouding stoot de vanuit de haven gereflecteerde

golf tegen de zeerand aan en veroorzaakt daar een cirkelvormig uitstralend golffront. De maximale amplificatie van een haven die 10 keer zo lang is als breed, bedraagt ongeveer 15.

Brede havens geven een meer vlakke uitstraling, smallere havens geven een meer radiële uitstraling. De reflectiecoëfficiënt en de amplificatie van een haven hangen dus af van de kromming van de golf vanuit de haven naar zee. Om deze kromming in een wiskundig model te beschrijven, is ofwel een twee-dimensionale beschrijving van het zeegebied vereist (de Haas 1998), ofwel moeten er aannamen omtrent deze kromming van de uittredende golf op de zeerandvoorwaarde gedaan worden. Het maakt daarbij niet uit of in het rekenmodel een impliciete of expliciete tijdsintegratie methode wordt gebruikt.

De amplificatie hangt ook af van de variabiliteit van het ingangssignaal, dus van het al dan niet stationair zijn van ingangssignaal. Dit wordt veroorzaakt doordat een seiche niet in 1 golfperiode zijn maximale grootte krijgt, maar aangroeit in de tijd. Per halve golfperiode neemt de amplificatie toe met een increment van 2. Om de hierboven genoemde amplificatie van 15 te verkrijgen, moet het seiches signaal dus langer dan 3.5 golfperiode aanhouden. Houdt het ingangssignaal minder lang aan, dan blijft de amplificatie onder de 15. Aanname van een stationair seiches ingangssignaal leidt i.h.a. tot een conservatieve schatting van de seiches belasting. Als het generatie mechanisme van de seiches samenhangt met buistoten op zee, is een kortere seichesduur wellicht meer representatief.

### *Seiches modellering in 1D*

Bij toepassing van een waterstandsrandvoorwaarde in een eendimensionaal model wordt in feite niet de grootte van de inkomende golf voorgeschreven, maar de som van een vlak inkomend en vlak gereflecteerd signaal. De hoogte van de amplitude in de haven wordt dan vooral bepaald door de positie van het randvoorwaarde punt ten opzichte van de knooppunt in het interfererende stelsel golven. Een oneindige amplificatie is een mogelijke uitkomst, maar treedt in de praktijk niet op door seiche dempende effecten als bodemwrijving, niet-lineaire interacties en numerieke dissipatie.

Een 1D-model is alleen zinvol inzetbaar bij het afschatten van de seichebelasting op de kering, als de grootte van het waterstandssignaal wordt gecalibreerd op bekende amplificaties uit een twee-dimensionaal model of uit metingen. Het mechanisme van het aangroeien van de seiches-hoogte in de tijd kan echter niet worden niet uitgerekend, maar moet als randvoorwaarde worden voorgeschreven. Bij een haven die aan de achterkant gesloten is, is dit goed mogelijk. Als de achterkant van de haven gevormd wordt door een kering waarvan de openingsgrootte afhangt van de berekende seicheshoogte, dan is het vrijwel onmogelijk het groeiverloop van de seiches te voorspellen en als randvoorwaarde voor te schrijven.

## 2 Beschrijving dynamica Maeslantkering

### 2.1 Inleiding

Na de watersnood van 1953 werd het Deltaplan opgesteld om een herhaling van deze watersnoodramp te voorkomen. De dijken in Zuid-Holland en Zeeland moesten op deltahoogte worden gebracht, d.w.z. ze moesten zelfs stormvloed kunnen weerstaan die anderhalve meter hoger waren dan de waterstanden in 1953. Nadat er in de jaren '70 vanuit de bevolking steeds meer weerstand ontstond tegen de aantasting van het rivierlandschap door de verhoging van de dijken en in de jaren '80 op basis van de verwachte stijging van de zeespiegel verdere verhoging noodzakelijk bleek, ontstond het plan voor een stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg. Dit moest een beweegbare kering zijn om de belangen van de Rotterdamse haven zo min mogelijk te schaden. De kering zou alleen bij extreem hoge waterstanden, gemiddeld 1 à 2 maal per 10 jaar worden gesloten.

In 1991 is met de bouw van de Maeslantkering begonnen. Het uitverkozen ontwerp was de "beweegbare sectordeurkering" van de Bouwcombinatie Maeslant Kering (BMK). In mei 1997 werd de Maeslantkering officieel in gebruik genomen. Het beschermt ongeveer 1 miljoen mensen tegen overstromingen.

De Maeslantkering bestaat uit twee waterkerende deuren van 22 meter hoog en 210 meter lang. Als de kering open staat liggen de twee deuren in de dokken aan beide oevers van Waterweg. Het sluiten begint altijd met het met water vullen van de dokken. De holle deuren gaan drijven en ze worden met behulp van twee locomobielen en een bolscharnier de Nieuwe Waterweg opgedraaid. Dit uitvaren van de deuren duurt ongeveer een half uur. Als de deuren elkaar zijn genaderd worden de kleppen geopend en lopen de 15 compartimenten in iedere deur vol met water. Dit afzinken gebeurt in stappen. Het afzinken van de deuren tot 1 meter boven de drempel duurt ongeveer een uur. Door het gereduceerde doorstroomoppervlak nemen de snelheden toe en spoelt het slib van de drempel. Het afzinken van de laatste anderhalve meter gebeurt weer in ongeveer een uur zodat de deuren bij landing op de drempel geen schade veroorzaken. Hiertoe zijn onder aan de deuren zogenaamde fenders (elastische stootblokken) aangebracht. Tijdens de laatste fase van het afzinken en de periode dat de deuren op de bodem steunen, wordt de spanning op de bodem voortdurend gecontroleerd en door middel van het aansturen van pompen en kleppen bij geregeld. Dit zogenaamde voorspanbeheer is er op gericht de kering op de bodem te laten rusten met een minimale hoeveelheid water in de compartimenten, zodat bij het optreden van een negatief verval de kering snel kan opdrijven. Zonder dit voorspanbeheer zou het ontballasten t.b.v. opdrijven maximaal 2 uur duren.

Als het extreme hoogwater voorbij is en het waterniveau aan de rivierzijde gelijk is aan het waterniveau aan de zeezijde wordt de kering geopend. Het water wordt uit de deuren gepompt en de deuren drijven op. Na circa twee uur is de verticale positie van de deuren zodanig dat de deuren m.b.v. de locomobielen terug in de dokken gevaren kunnen worden. Na een half uur zijn de deuren terug in het dok. BOS is voornamelijk actief in de voorfase,

de fase om te beslissen of de kering dicht moet. Daarnaast bewaakt BOS tijdens afzinken en in de voorspanfase het negatief verval.

Naam fase	tijdsduur	gestuurd door
uitvaren	0.5 uur	BOS/BES
afzinken	2 uur	BES/BOS
voorspanbeheer (kerende fase)	afhankelijk waterstanden zee en rivier	BES/BOS
opdrijven	2 uur	BOS/BES
Invaren	0.5 uur	BOS/BES

Tabel 2.1 operationele fasen beheer Maeslantkering

In Paragraaf 2.2 en 2.3 zal de dynamica van de kering nader beschreven worden. Deze beschrijving is gebaseerd op de manier zoals de verschillende fasen in het RAS/FLOW model zijn gemodelleerd (Redeker & Partners, 1999) en in het BES zijn geïmplementeerd.

Ook in het Hartelkanaal is een stormvloedkering aanwezig, de zogenaamde Hartelkering. De regeling van de Hartelkering is sterk gekoppeld aan de regeling van de Maeslantkering. De Hartelkering wordt in RAS/FLOW beschreven als twee onafhankelijk beweegbare schuiven, met een aantal schuifafhankelijke parameters. De kering is niet voorzien van een ballastsysteem en de sluitsnelheden zijn per fase van de regeling constant. In deze voorstudie besteden we verder geen speciale aandacht aan de beschrijving van de Hartelkering.

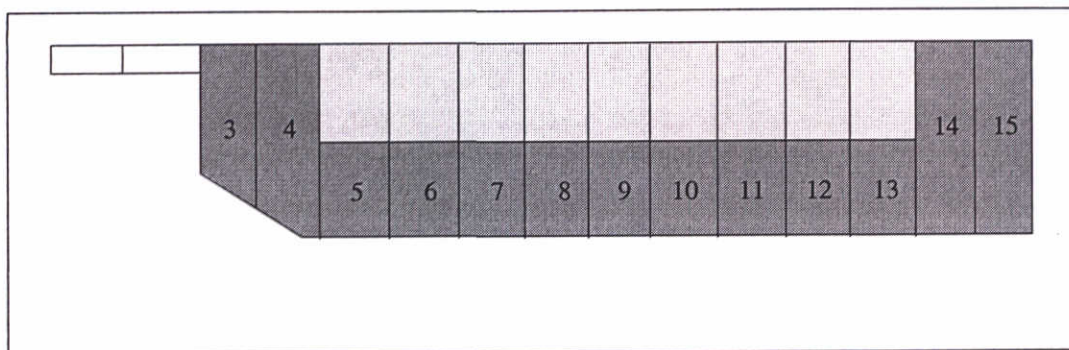
## 2.2 Beschrijving sectordeuren

De kerende wand van de Maeslantkering bestaat uit twee cirkelvormige sectordeuren. Een sectordeur bestaat uit een drijflichaam en een bovenkoker welke over de gehele lengte van de kerende wand aan elkaar verbonden zijn, zie Figuur 2.1. Het drijflichaam bestaat uit 13 ballastcompartimenten. De bovenkoker bestaat uit 15 secties.

De kerende wand wordt door middel van een vakwerkarm verbonden aan een bolscharnier en aan de oever zit de deur door middel van een locomobiel vast aan de geleidetoeren.

De ballastcompartimenten zijn genummerd 3 t/m 15, 3 is oeverzijde en 15 is rivierzijde. De compartimenten 3, 4, 14 en 15 strekken zich uit over de volledige hoogte van de kerende wand, dit zijn trimcompartimenten. Onder trim wordt verstaan de hoek die de horizontale bovenzijde van de deur maakt met de drempel. De overige ballastcompartimenten bevinden zich in het drijflichaam. Compartiment 1 en 2 vormen de uitkraging waarop de locomobiel staat in uitgevaren toestand. Deze uitkraging is geheel doorlatend voor water.

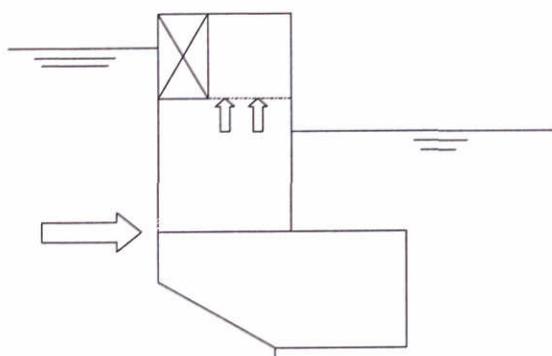
Boven het drijflichaam en gelegen tussen de trimcompartimenten bevindt zich de zogenaamde geperforeerde wand. Hierachter bevinden zich compartimenten waar in- en uitstroming van zeewater mogelijk is door openingen van geringe afmetingen.



Figuur 2.1 vooraanzicht kerende wand

De vorm van de sectordeur is zodanig dat het waterdoorsnijdend oppervlak varieert met de diepgang, zie Figuur 2.2.

#### Geperforeerde wand



Figuur 2.2. verticale doorsnede door sectordeur, aan onderkant skirt.

Onder de kerende wand zijn skirts aangebracht om dynamische instabiliteiten te voorkomen.

Per compartiment is getabelleerd met incrementen van 0.5 meter:

- het ondergedompelde volume als functie van de diepgang,
- het volume van de hoeveelheid water in de tanks als functie van de peilhoogte.

Het referentievlak is voor beide tabellen de buitenkant van de bodem van het compartiment. Het ondergedompelde volume van het vakwerk is afhankelijk van de waterstand op de rivier en de afzinkhoek. Ook deze gegevens zijn getabelleerd.

Het afzinken respectievelijk opdrijven van de sectordeuren gebeurt door middel van het vullen respectievelijk leegpompen van de ballasttanks. Hiertoe zijn de compartimenten voorzien van afzonderlijke kleppen en pompen. Iedere klep en pomp van de 13 tanks is afzonderlijk aan te sturen.

## *Afzinken*

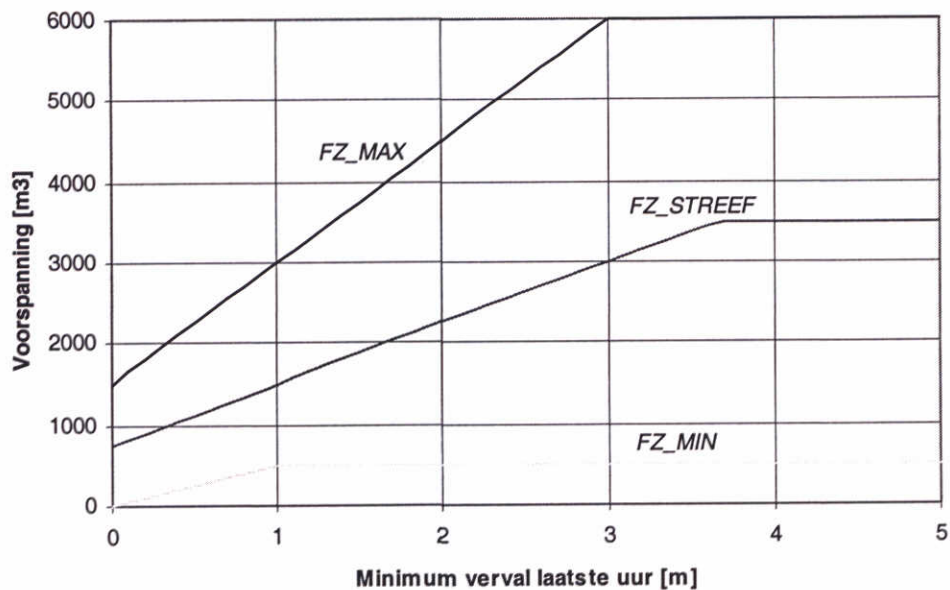
Het drukverval over de inlaatkleppen en dus de innamecapaciteit varieert met de diepgang. Als gevolg hiervan varieert ook de afzinksnelheid met de diepgang. Als functie van de spleet wordt de afzinksnelheid gestuurd d.m.v. een z.g. 'afzinkmatrix' waarin het aantal (volledig) geopende kleppen per compartiment wordt ingesteld. De keuze van de afzinkmatrix gebeurt op basis van de waterstand bij Hoek van Holland en de voorspelde waterstand (BOS) twee uur later. In de afzinkmatrix staat per 0.5 meter spleethoogte, van welke compartimenten kleppen geopend moeten worden. Deze nauwkeurige regeling van de kleppen is nodig om de kering met de juist afzinksnelheid en vertrimming op de drempel te laten afzinken, zonder dat de constructie beschadigd wordt.

Het afzinkproces zal door het BOS afgebroken worden indien een negatief verval over de kering t.g.v. seichesgeconstateerd wordt en er zal worden over gegaan naar opdrijven.

Het afzinkproces kan ook door het BOS afgebroken worden indien er geconstateerd wordt dat er onvoldoende waterstands verval geweest is over de kering tijdens afzinken om het slib op de drempel weg te spoelen. Er treedt dan een zogenaamde "slibstop" op. De kering stopt bij een spleethoogte van minimaal 5 meter boven de drempel. Indien er onvoldoende erosie is opgebouwd zullen alle kleppen in de kerende wand ( inclusief de trimgat kleppen ) sluiten en zal de kering in een rustfase worden gezet. Deze fase duurt tot er voldoende erosie is opgebouwd of totdat er negatief verval optreedt. Als verder wordt gegaan met afzinken zullen alle kleppen ( inclusief de trimgat kleppen ) worden geopend om het laatste traject tot de drempel af te leggen.

## *Voorspannen*

Nadat de spleet kleiner is geworden dan 1.5 meter gaat de kering over van de fase afzinken in de fase voorspannen. Deze 1.5 meter is zo gekozen dat de deur onder 'normale' omstandigheden nog geen bodemcontact heeft als gevolg van vertrimming. Er wordt berekend wat de kracht en indrukking van de fenders onder de linker en rechter helft van de deur is. Bij een klein positief verval is de kering gevoeliger voor seiches. Een klein negatief verval over de kering duidt op het mogelijk aanwezig zijn van seiches. De hoeveelheid extra ballast in de tanks, die zorgen voor de voorspanning moet nu gereduceerd worden, om de deuren eventueel snel te kunnen laten opdrijven. Het minimum verval gedurende het laatste uur levert regelgrenzen (min, max en streef). Op basis van deze resultaten wordt het kleppen pompgebruik geschakeld. Als de kracht op de bodem groter wordt dan de maximale kracht die bij het minimum verval hoort, worden de pompen aangezet om de kracht te verkleinen. Er wordt dan gepompt totdat de streefwaarde bereikt is. In het geval dat de kracht onder het minimum komt wordt met kleppen gebruik de voorspanning weer opgebouwd tot de streefwaarde. De voorspanning bepaalt dus de tijd, die nodig is om de kering te laten opdrijven (los te komen van de drempel).



Figuur 2.3: regelgrenzen voorspanning

### Opdrijven

De trigger voor het opdrijven is een negatief verval over de kering, bewaakt door het BOS. De marge negatief verval die de kering mag hebben is niet in alle fasen dezelfde. Als de kering aan het afzinken is geldt er een marge van 5 cm. Als er tijdens afzinken een negatief verval ontstaat van meer dan deze 5 cm zal de kering gaan opdrijven. Indien de kering in de fase voorspanning is geldt er geen marge voor het negatief verval. Bij negatief verval zal de kering in dit geval direct overgaan tot opdrijven. De reden dat er tijdens afzinken met een marge van 5 cm wordt gerekend is omdat anders, bij 1 cm, ruis over de meetpalen die het negatief verval moeten registreren tot openen kan leiden. Als dit niet zou gebeuren worden er veel vergeefse pogingen tot afzinken ondernomen. De kans dat de palen een klein negatief verval meten bij een grote spleet is immers aanzienlijk omdat er nog geen verval opgebouwd kan worden.

Het opdrijven heeft plaats door middel van pompen, die het water in de ballasttanks via de bovenzijde van de kerende wand in de rivier pompen. Als de kering het commando opdrijven krijgt, worden aan beide zijden de trimcompartimenten (3,4,14 en 15), zie Figuur 2.1 en het middencompartiment (9) op volledige capaciteit (2 pompen) gezet. Vervolgens wordt de linker- (5 t/m 8) en rechterhelft (10 t/m 13) als volgt van pompcapaciteit voorzien: de twee volste compartimenten krijgen 2 pompen toegewezen, de twee resterende krijgen één pomp toegewezen. Als tijdens het opdrijven een compartiment leeg raakt, wordt de beschikbare pompcapaciteit verdeeld over de compartimenten waarvoor eerder één pomp beschikbaar was.

Gedurende de fase opdrijven is het autotrimmechanisme op de pompen actief. Dit mechanisme draagt zorg voor het binnen gestelde grenzen houden van de trimhoek van de kerende wand.



### *Sluiten na opdrijven*

Indien het nodig is dat de kering voor een tweede maal moet afzinken, wordt gewacht tot er een positief verval optreedt. Dit om ervoor te zorgen dat er niet te veel vergeefse pogingen worden ondernomen (“flippergedrag”). Er wordt niet met een marge gerekend tijdens het wachten op positief verval. Als er begonnen is met afzinken verloopt het proces analoog aan de eerste keer afzinken.

### *Invaren*

Als de kering is opgedreven en de alarmfase is voorbij zal de kering het dok indraaien. Tijdens deze fase worden de pompen gebruikt om de vertrimming van de kerende wand binnen gestelde grenzen te houden.

## **2.3 Krachten op constructie**

Tijdens de verschillende operationele fasen van de stormvloedkering werkt een groot aantal krachten op de constructie. De verticale krachten worden in het BES berekend op basis van metingen van het waterpeil in de compartimenten, de waterstanden voor en achter de kering en de spleethoogte, zie “ballaststelsel, functionaliteit 1996” (MSM, 1997). De krachten hebben invloed op de regeling van de kering.

### *Waterballast*

De waterballast in de tanks en compartimenten wordt bepaald door het vuldebiet in de tijd. Voor de compartimenten in de geperforeerde wand is dit afhankelijk van het verval over de opening voor de andere tanks is het afhankelijk van het pompdebiet. Met behulp van de berekende debieten kan de nieuwe waterballast in de deur worden berekend. Het aangrijpingspunt van de waterballast in de geperforeerde wand is afhankelijk van de vulling van de compartimenten en kan uit een tabel worden geïnterpoleerd.

### *Zuigkracht*

De zuigkracht op de kering is afhankelijk van het verval over de kering en de spleet ter plaatse. Omdat de hydrodynamische vormgeving langs de deur sterk verschilt wordt de zuigkracht per compartiment bepaald. De compartimenten zijn gegroepeerd:

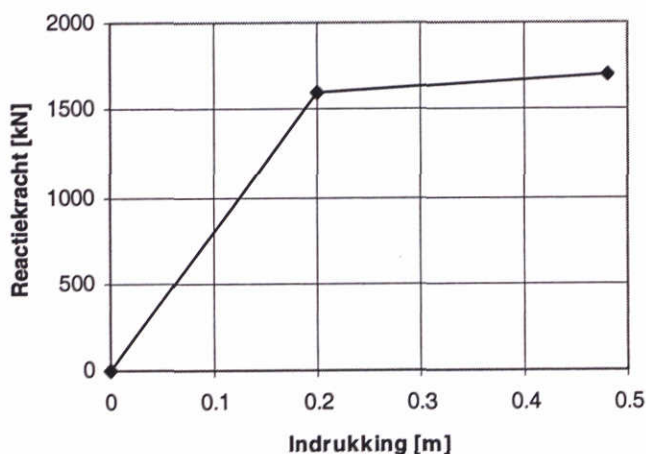
- zuigkracht ter plaatse van het talud (compartiment 3 en 4)
- zuigkracht onder het skirt (compartiment 5 t/m 15).

In de bepaling van de kracht speelt een evenredigheidsfactor een rol (“nablafactor”). Deze factor is afhankelijk van de spleethoogte en is met fysisch modelonderzoek bepaald en in een tabel opgeslagen. De zuigkracht bij het talud wordt op een iets andere wijze berekend. Indien de kering op de drempel staat blijft bij het talud constant een spleet van zo’n 1.5 meter over. De breedte en vorm van het drijflichaam verandert hier wel afhankelijk van de waterstand.

## Fenderkracht

Aan de onderzijde van de deuren zijn fenders aangebracht om in de situatie van een gesloten stormvloedkering de deuren elastisch te ondersteunen en te zorgen voor een gelijkmatige belasting van de drempel. De fenders voorkomen bovendien beschadiging van de drempel en de deur bij het neerkomen. Per deur zijn 31 fenders geplaatst. Het zijn rubberblokken, met een gemiddelde hoogte van ongeveer 1.10 meter. Omdat de drempelblokken in principe nooit volledig vlak zijn te plaatsen, is geopteerd voor het contramallen van de fenders. Ter afdichting van de opening tussen de bovenkant van de drempel en de onderkant van de deur hangt er voor de fenders aan de zeezijde een skirt, zie Figuur 2.2.

Tijdens de fase van voorspannen wordt voortdurend bepaald of de indrukking van de fenders op de hoeken van de deur aan de rivierzijde en de oeverzijde niet te groot wordt. Dit gebeurt indirect door het bepalen van de krachtenbalans op de deur. De spleethoogte en de trimhoek in combinatie met de hoogte van de drempelblokken legt de indrukking van iedere fender vast. Deze indrukking wordt via de functiekaracteristiek omgezet in de betreffende fender reactiekracht. De functiekarateristiek is voor iedere fender dezelfde.



Figuur 2.4 : indrukking fenders

Het gedeelte boven de 0.48 m is ingebouwd als vangnet. De fender is hier volledig ingedrukt. Het gedeelte tussen 0.48 m en 0.50 m loopt zeer steil om zo het effect van staal op staal weer te geven. Het aangrijpingspunt van de kracht die door een fender geleverd wordt ligt in het hart van de fender. De coördinaten van iedere fender liggen opgeslagen in een geometriefile (Redeker & Partners, 1999).

T.g.v. storingen in één van de pompen kan de deur scheef op de drempel landen. Dit zou direct tot overschrijding van de maximale fenderbelasting van één van de hoekfenders en tot aanpassing van de pompdebieten leiden. De regeling van de voorspanning is echter voorzien van een zogenaamd “antiklepper” mechanisme. Indien één van de hoekfenders meer dan 20 cm wordt ingedrukt wordt gewacht tot eerst de andere zijde van de deur op de drempel staat alvorens de regeling van de pompen en kleppen op basis van voorspanning wordt geregeld.

### ***Opdrijvende kracht***

Het opdrijvend vermogen van de deur is opgeslagen in tabellen die per 0.5 meter diepgang zijn ingedeeld. De diepgang van ieder compartiment wordt berekend uit het waterpeil in de compartimenten. Vervolgens wordt uit de betreffende tabel het bijbehorende ondergedompeld volume geïnterpoleerd. Tevens wordt uit deze tabel het bij de diepgang behorende aangrijpingspunt van de opdrijvende kracht verkregen.

Het opdrijvend vermogen van het vakwerk, dat de deur met de oever verbindt wordt bepaald uit een tabel met ondergedompeld volume per afzinkhoek en rivierwaterstand. Afhankelijk van deze twee gegevens wordt de juiste waarde geïnterpoleerd. Het aangrijpingspunt van deze kracht wordt op een vast punt genomen. Dit punt ligt op 230.8 meter van het bolscharnier in het midden van de deur.

### ***Gewicht kering***

Het gewicht van de kering bestaat uit het gewicht van de constructie (deur + vakwerk) en het gewicht van de locomobielen. De gewichtskrachten van de locomobielen hebben een aangrijpingspunt, dat een functie is van de positie van de deur in de rivier.

## **2.4 Sluitscenario kering**

In de loop der tijd zijn er op het beheer van de Maeslantkering vele aanpassingen gemaakt. Deze paragraaf geeft een beschrijving van het uiteindelijke scenario. Voordat er gekozen wordt voor een bepaald type sluiting moet er gekeken worden naar de noodzaak van sluiten. De beslissing door het BOS wordt gebaseerd op een voorspelling met ZWENDL. Er wordt gekeken of de waterstanden bij Rotterdam, Dordrecht en Spijkenisse hun vastgestelde kritieke waarden (sluitcriteria) niet zullen overschrijden, anders zal er mogelijk tot sluiting moeten worden overgegaan. De kritieke waarden zijn voor Rotterdam 3.20 m NAP, voor Dordrecht 2.90 m NAP en voor Spijkenisse 2.70 m NAP.

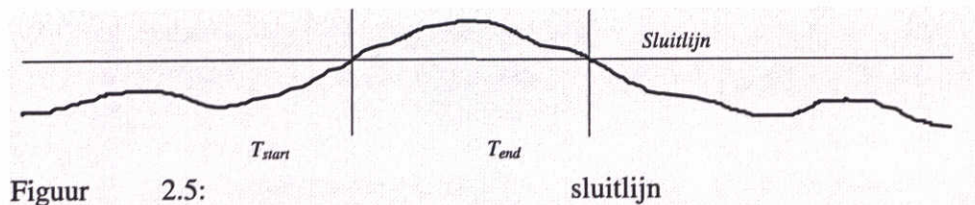
<i>Q-lobith(m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>Halarm SVKW(m NAP)</i>	<i>Halarm SVKH(m NAP)</i>
<b>600</b>	3.26	2.92
<b>2000</b>	3.14	2.79
<b>4000</b>	3.06	2.73
<b>6000</b>	2.99	2.65
<b>8000</b>	2.86	2.53
<b>10000</b>	2.65	2.45
<b>13000</b>	2.31	2.29
<b>16500</b>	1.99	1.98
<b>18000</b>	1.86	1.85

Tabel 2.1 Sluitcriteria voor Hoek van Holland

Voor gebruik in wiskundige modellering van de Nieuwe Waterweg met stormvloedkering (RAS/FLOW) zijn met behulp van modelberekeningen, de sluitcriteria bij Rotterdam, Dordrecht en Spijkenisse terugvertaald naar een kritieke waterstand (sluitcriterium) bij Hoek van Holland gegeven de Rijn afvoer bij Lobith. Deze relatie geeft het verband weer

tussen  $Q_{Lobith}$  en het maximale peil ter plaatse van de Maasmond, waarboven de kering zal sluiten, zie tabel 2.1. In deze tabel staan tevens de sluitcriteria voor de Hartelkering.

Om het moment van sluiten te bepalen wordt door middel van een voorspelling zonder seiches met open kering naar de twee momenten gezocht waartussen de kering in alarmfase staat, zie figuur 2.5.



Figuur 2.5:

sluitlijn

Er zijn twee typen sluitingen mogelijk:

1. Peilsluiting
2. Kenteringsluiting

De randvoorwaarde die bepalend is voor de keuze uit de twee typen sluitingen is het debiet bij Lobith ( $Q_{Lobith}$ ). Indien dit debiet kleiner is dan  $6000 \text{ m}^3/\text{s}$  zal voor de peilsluiting worden gekozen. In alle andere gevallen wordt voor de kenteringsluiting gekozen. Voor de Hartelkering is er nog een derde type sluiting mogelijk namelijk het volgen van de Maeslantkering.

### **Peilsluiting**

Bij een peilsluiting gaat de kering uitvaren op het moment dat de waterstand bij de kering de NAP + 2.0 meter overschrijdt. Om het moment van de 2+ doorsnijding te bepalen wordt in een voorspelling van de waterstand zonder seiches m.b.v. RAS/FLOW vanaf de top van de storm teruggezocht naar het moment dat het niveau t.p.v. de stormvloedkering onder de NAP +2.0 meter ligt (laatste + 2.0 meter doorsnijding). Vanaf twee uur vóór dit moment wordt voor de simulatie met seiches naar de berekende waterstand t.p.v. de kering gekeken. Het venster van twee uur is gekozen omdat in RAS/FLOW twee uur de langst gesimuleerde seichesperiode is. Seiches kunnen het moment van de 2+ doorsnijding vervroegen.

### **Kenteringsluiting**

In het geval dat de kering op kentering sluit wordt er in de voorspelling met RAS/FLOW naar het moment van de laatste kentering gezocht, dat vooraf gaat aan het overschrijden van de kritieke waarde van de waterstand bij Hoek van Holland, zie tabel 2.1. De laatst gevonden kentering geldt dan als sluitmoment.

## *Opdrijven*

In het geval van een negatief verval zal de kering moeten openen. De marge negatief verval is afhankelijk van de fase. Tijdens afzinken is er een marge van 5 cm maar tijdens de fase voorspannen zal een negatief verval direct leiden tot opdrijven.

Als de storm voorbij is en de waterstand bij Hoek van Holland is onder het sluitpeil gedaald, dan wordt gewacht op een gelijke waterstand vóór en áchter de kering alvorens op te drijven. In de fase opdrijven wordt gekeken naar de spleet onder de beide hoekfenders. Indien deze beide spleten groter zijn dan de voor de betreffende zijde vastgestelde waarde, kan begonnen worden met invaren.

## **2.5 Modellerings stormvloedkering in het waterbewegingsmodel**

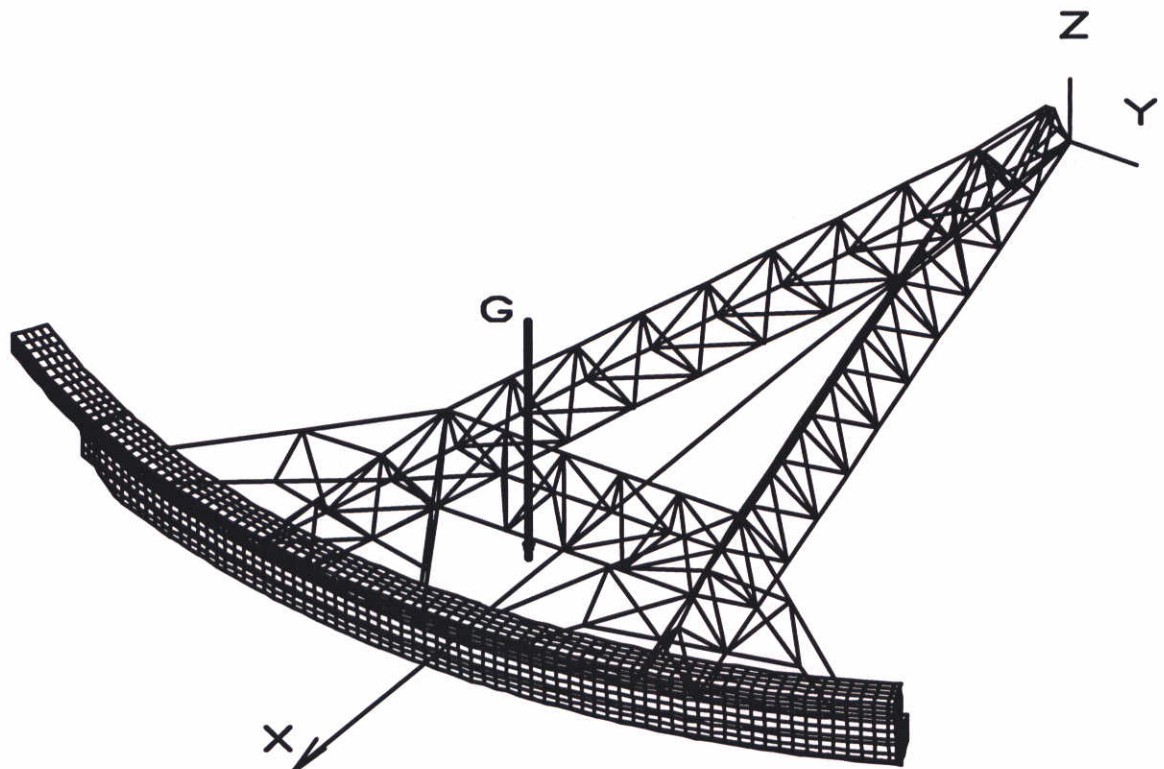
Tijdens de operationele fasen van het beheer van de stormvloedkering wordt door het sluiten van de deuren het natte doorstroomoppervlak van de rivier vernauwd. Tijdens de fasen “uitvaren”, “afzinken”, “opdrijven” en “invaren” verandert het natte doorstroomoppervlak als functie van de tijd op basis van de sturing door het BOS en het BES. De waterstanden vóór en achter de kering, in combinatie met de spleethoogte bepalen de krachten op de deuren, de vulling van de compartimenten en daarmee de krachten op de fenders.

De vernauwing van het natte doorstroomoppervlak leidt tot convergentie van de stroming bij aanstroming en divergentie van de stroming bij afstroming. De divergentie geeft vertragsingsverliezen. In een numeriek model van de waterbeweging in de rivier ter plaatse van de kering zal zowel de lokale vernauwing van de natte doorsnede als de vertragsingsverliezen in rekening gebracht moeten worden.

### *Vernauwing natte doorsnede*

De vernauwing van het natte doorstroomoppervlak wordt bepaald door de horizontale en verticale positie van de deuren. De beweging van de deuren is een rotatie om het bolscharnier. Er wordt verondersteld dat de twee deuren zich op exact dezelfde wijze gedragen. De deur heeft, nadat hij is ingevaren, twee vrijheidsgraden. De kerende wand kan zich in verticale richting verplaatsen (*afzinken*), en kan om zijn as parallel aan de as door het midden van de deur en het bolscharnier draaien (*trim*).

De beweging van de deur wordt beschreven binnen een Cartesisch coördinatenstelsel, zie Figuur 2.6. De X-as loopt vanuit het bolscharnier door het hart van compartiment 9, zie Figuur 2.1, en de Y-as staat hier loodrecht op. De positieve Y-richting is gericht naar rivierzijde en de Z-as is omhooggericht.



Figuur 2.6: coördinatenstelsel voor beschrijving kerende wand

De bewegingen volgen uit de momentevenwichten om het bolscharnier in X, Y en Z-richting.

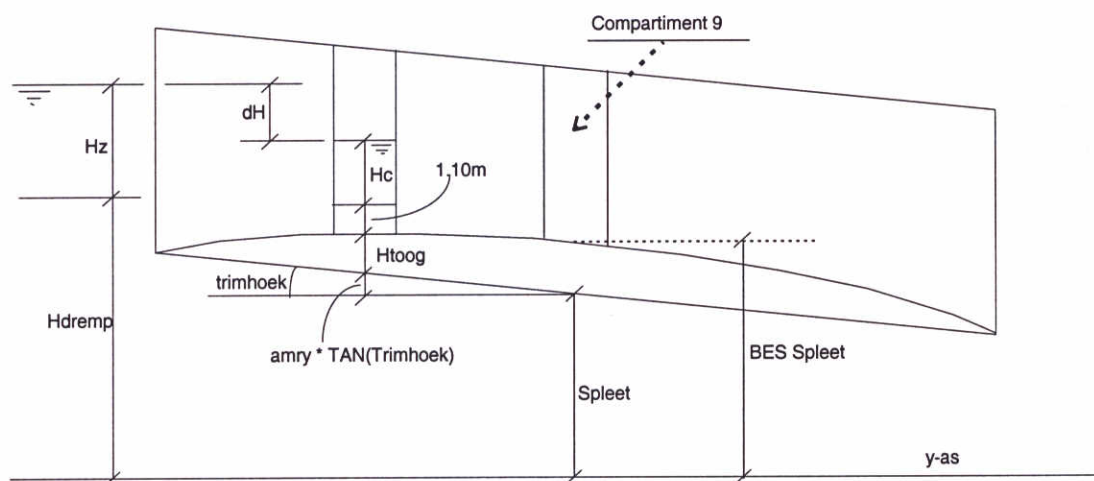
- Het moment om de Z-as wordt opgelegd door het in/uitdraaien met een constante riverversmalling (dus vrijwel gelijk aan een constante hoeksnelheid). Als de kering nog in het dok ligt is de breedte van de rivier 360m. Bij sluiten van de kering zal breedte van de rivier volgens een opgelegde snelheid van 720 m/uur naar 0 m (volledig gesloten) aflopen. Deze 720 m/uur is dus niet de snelheid waarmee de deur zich verplaatst maar de snelheid waarmee de lekopening zich vernauwt.
- Het moment om de X-as (*vertrimmen*) wordt bepaald uit een statisch momentevenwicht om het scharnierpunt.
- Het moment om de Y-as (*afzinken*) wordt bepaald uit een statisch momentevenwicht om het scharnierpunt. Er wordt pas met afzinken begonnen als de deuren volledig gesloten zijn.

De beweging van de deur wordt als traag volgend beschouwd, waarbij de krachten en momenten op de deur voortdurend in evenwicht worden beschouwd. Op elk tijdstip wordt de verticale positie van de deuren (spleet) berekend uit het krachteenwicht en de vertrimming van de deuren uit het momentenevenwicht, gegeven de vulling van de ballasttanks en de waterstanden vóór en áchter de stormvloedkering. Het vullen van de tanks is afhankelijk van het pompdebiet en de stroming door de perforatiegaten. Omdat de krachten en momenten niet-lineair afhangen van de verticale positie en de trimhoek, zal dit in een numeriek model iteratief moeten gebeuren.

Bij gesloten deuren ligt de bodem van alle compartimenten niet in één vlak. De spleethoogte is dus op ieder tijdstip voor alle compartimenten anders. De afstand tussen de bodem van elk compartiment en een referentievlak kan worden beschreven middels een

functie van de afzinkhoek van de kering (=hoek tussen het XY-vlak en de rechte verbindingslijn tussen de twee uiterste compartimenten). Als de kering op de bodem staat levert deze functie voor ieder compartiment dus de waarde 0. De waarde bij een afzinkhoek van 0 graden is voor de tussenschotten opgenomen in een tabel.

De spleet wordt gemeten vanaf de onderkant skirt tot aan de bovenkant drempel. De skirt dient ter afdichting van de ruimte t.p.v. de fenders tussen bodemcompartiment en bovenkant drempel. De skirt, heeft een hoogte van 1.10 meter, en is beweegbaar verbonden aan de deur. Voor de regeling van het BES wordt de spleethoogte ter plaatse van compartiment 9 gebruikt.



Figuur 2.7 Verticale doorsnede deur en definitie spleethoogte

### **vertragingverliezen**

De vernauwing van het doorstroomoppervlak ter plaatse van de stormvloedkering tijdens sluiten en openen zal tot vertragingverliezen leiden en dus tot een waterstandsverschil vóór en áchter de kering. Bij stationaire stroming zonder bodemwrijving kan het globale energieverlies bepaald worden met de Carnot-wet, welke bij heel kleine opening weer nadert naar de Torricelli-vergelijking. Omdat deze energieverliezen toegevoegd moeten worden aan het numerieke waterbewegingsmodel, wordt de afleiding zoals gedaan voor RAS/FLOW door (Redeker & Partners, 1999) hier gegeven.

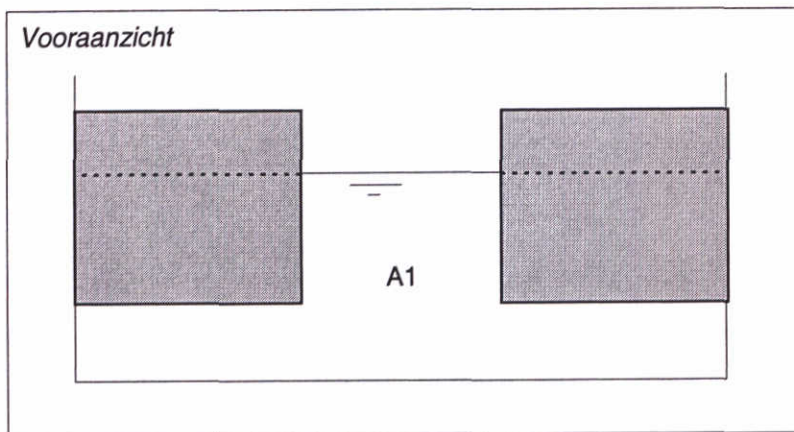
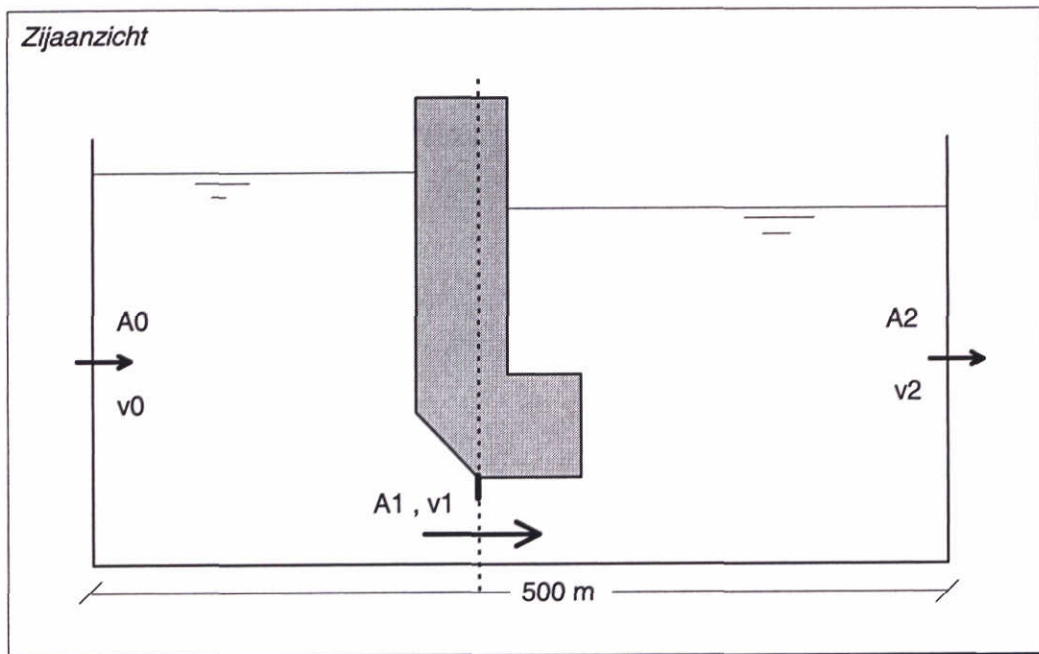
We onderscheiden de natte doorsnede en snelheid vóór, in en áchter de vernauwing, zie Figuur 2.8:

Stroomopwaarts van de kering	: dwarsdoorsnede $A_0$ en stroomsnelheid $V_0$
Onder de kering	: dwarsdoorsnede $A_1$ en stroomsnelheid $V_1$
Stroomafwaarts van de kering	: dwarsdoorsnede $A_2$ en stroomsnelheid $V_2$

Het doorstroomoppervlak  $A_1$  is opgebouwd uit een gedeelte ongestoorde rivierdoorsnede bij het indraaien van de kering, de oppervlakte onder de kering en de lekopening.

Bij een divergerende stroming geldt impulsbehoud. Dit leidt voor een stationaire situatie tot de formule van Carnot voor het verschil in energiehogte ( $H$ ):

$$H_1 - H_2 = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2 \cdot g} \tag{2.1}$$



Figuur 2.8 Definitie snelheden en doorstroomoppervlakken

Vergelijking (2.1) kan herschreven worden in de waterstanden ( $\zeta$ ). De relatie tussen energiehogte en waterstand is:

$$H = \zeta + \frac{v^2}{2 \cdot g} \tag{2.2}$$



Invullen van Vgl. (2.2) in Vgl. (2.1) geeft:

$$\zeta_1 - \zeta_2 = \frac{2 \cdot V_2^2 - 2 \cdot V_1 \cdot V_2}{2 \cdot g} \quad (2.3)$$

Het stuk vóór de stormvloedkering is een versnellingsgebied. Voor een convergerende stroming geldt energiebehoud:

$$H_0 - H_1 = 0 \quad (2.4)$$

Uitgedrukt in de waterstand geeft dit:

$$\zeta_0 - \zeta_1 = \frac{V_1^2 - V_0^2}{2 \cdot g} \quad (2.5)$$

Het waterstandsverschil over de vernauwing wordt dan:

$$\zeta_0 - \zeta_2 = \frac{V_1^2 - V_0^2 + 2 \cdot V_2^2 - 2 \cdot V_1 \cdot V_2}{2 \cdot g} \quad (2.6)$$

Het waterstandsverschil over de kering kan uitgedrukt worden in het debiet. Ter plaatse van de kering wordt er verondersteld dat:

$$Q = \mu A_1 V_1 \quad (2.7)$$

De afvoercoëfficiënt  $\mu$  voor de Maeslantkering is afhankelijk van de richting van het waterstandsverval en de spleethoogte. De grootte is door fysisch modelonderzoek bepaald en getabelleerd, zie (Redeker & Partners, 1999). Voor het waterstandsverval over de kering uitgedrukt in het debiet geldt:

$$\zeta_0 - \zeta_2 = \frac{(A_1^{-2} - A_0^{-2} + 2 \cdot A_2^{-2} - 2 \cdot A_1^{-1} \cdot A_2^{-1}) \cdot Q \cdot |Q|}{2 \cdot g \mu^2} \quad (2.8)$$

De extra verliesterm Vgl. (2.8) wordt in een 1D numeriek model ter plaatse van de kering aan de impulsvergelijking toegevoegd.

Het debiet dóór de kering bestaat niet alleen uit een debiet door het natte doorstroomoppervlak, maar bij zeer hoge waterstanden ook nog uit een debiet over de kering bij zeer hoge waterstanden op zee. Dit debiet kan bepaald worden met een volkomen overlaat formule:

$$Q_{over} = B \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{1}{3}} \cdot (\zeta_0 - h_{bovenkant})^{1.5} \quad (2.9)$$

waarin:  $B$  de natte breedte. Hierbij is verondersteld dat het hoogteverloop van de kering  $h_{bovenkant}$  als de deuren op de bodem staan gegeven wordt als een rechte. In werkelijkheid

staan de uiteinden hoger. De overstort is echter maar een kleine hoeveelheid zodat deze fout verwaarloosd kan worden.

## 2.6 Samenvatting

In dit hoofdstuk zijn de kerende wand en de complexe regeling (BES) van de Maeslantkering beschreven en zijn seiches beschreven. Er is een sterke samenhang tussen de optredende waterstanden vóór en áchter de stormvloedkering, de belasting van de constructie en de procesfasen van de kering. Ook de snelheid waarmee de deuren afzinken respectievelijk opdrijven, hangt af van het vullen van de ballasttanks en daarmee van de lokale waterbeweging ter plaatse van de stormvloedkering. Een numeriek model dat zowel de waterbeweging in de Nieuwe Waterweg als de belasting op de constructie nauwkeurig moet voorspellen, zal dus een volledige beschrijving van het BOS (beslissing op basis van sluitcriteria) en het BES (besturing) moeten bevatten. In het programma RAS/FLOW ontwikkeld door Redeker&Partners is deze beschrijving aanwezig. In het volgende hoofdstuk zullen de kenmerken van RAS/FLOW nader worden beschreven.

### 3 Beschrijving RAS/FLOW

RAS/FLOW is een door Redeker & Partners (G. Bruinzeel en F. Redeker) ontwikkeld 1D waterbewegingsmodel met een volledige beschrijving van het besturingssysteem van zowel de Maeslantkering in de Nieuwe Waterweg (SVKW) als de Hartelkering in het Hartelkanaal. Het waterbewegingsmodel is onderdeel van een risico analyse interface (RAI). Het wordt toegepast om de mogelijke vervallen over de kering te analyseren, met name onder invloed van seiches. Het RAI omvat een probabilistische aanpak, met als uitvoer overschrijdingslijnen voor de verschillende resultaatparameters. De belangrijkste uitvoer voor beoordeling van de belasting van de Maeslantkering is de overschrijdingslijn voor negatief verval.

In "RAS/FLOW, simulaties SVKW" (Redeker&Partners, 1999) zijn voor de Bouwcombinatie Maeslant Kering (BMK) de uitgangspunten, gehanteerde formuleringen, gekozen scenario's en berekeningen gerapporteerd. Van RAS/FLOW is een PC-demoversie bij Rijkswaterstaat DWW aanwezig.

In het kader van deze voorstudie heeft WL | delft hydraulics geen inzage gehad in de broncode. Wel hebben de ontwikkelaars G. Bruynzeel (DIGITEC) en F. Redeker (Redeker & Partners) op de besprekingen in het kader van dit project aanvullende informatie geleverd.

#### 3.1 1D netwerkmodel

RAS/FLOW bevat een numeriek model voor de 1D waterbeweging in een rivieren netwerk. De waterbeweging wordt beschreven door een continuïteitsvergelijking en een bewegingsvergelijking. Het modelsysteem rekent in waterstanden en debieten. Met verschillen in dichtheid t.g.v. zout zeewater versus zoet rivier water wordt geen rekening gehouden.

Op basis van testberekeningen is besloten de convectieve term uit te schakelen. Het stelsel differentiaalvergelijkingen dat opgelost wordt is dus als volgt:

$$B_s \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -gA_s \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gQ|Q|}{C^2 A_s R} - B_s C_d |\bar{W}| W_x \quad (3.2)$$

met

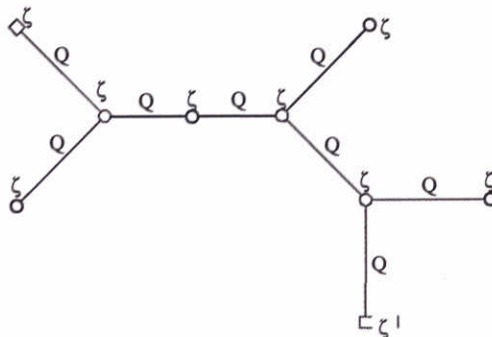
$A_s$  stroomvoerend oppervlak

$B_s$  stroomvoerende breedte

- $C$  Chézy coëfficiënt
- $C_d$  Overdrachtcoëfficiënt wind op water
- $\zeta$  waterstand
- $R$  hydraulische straal
- $Q$  debiet
- $W$  wind snelheid

De continuïteitsvergelijking staat in een niet-behoudende vorm d.w.z. de niet-lineaire relatie tussen waterstand en stroomvoerende breedte  $B_s(\zeta)$  is voor de bepaling van de berging in een knooppunt niet in beschouwing genomen.

Het Noordelijk Deltabekken wordt geschematiseerd als een netwerk van knopen verbonden door takken. Dit hangt samen met het feit dat het numerieke schema van RAS/FLOW werkt op een “versprongen” rooster.



Voorbeeld van een versprongen RAS/FLOW schematisatie ( $Q$ - en waterstands- $(\zeta)$ -punten)

Voor de schematisatie van het Noordelijk Deltabekken in takken en knopen is gebruik gemaakt van de bestaande ZWENDL-schematisatie. T.b.v. de representatie van seiches is het netwerk rond de stormvloedkering verfijnd en zijn de Europoortbekkens toegevoegd. De ZWENDL-vakken zijn zoveel mogelijk opgedeeld in takken van 500 tot 1000 meter. Uitgangspunt was de noodzaak om geleidelijke overgangen tussen grote en kleine takken te maken. Immers, te grote overgangen tussen vakken kunnen leiden tot reflecties van seiches. In zijkavens zijn de takken soms iets langer. In tegenstelling tot RAS/FLOW bestaat een ZWENDL-netwerk uitsluitend uit vakken met berging en een doorstroom profiel. Dit komt door het in ZWENDL toegepast Preismann-schema. Hierdoor is het dus niet mogelijk om voor RAS/FLOW een één op één kopie van de ZWENDL-schematisatie te gebruiken. De natte doorstroomoppervlakken  $A_s$  als functie van de waterstand in de RAS/FLOW schematisatie zijn gebaseerd op de ZWENDL-schematisatie en per tak in tabelvorm opgeslagen. Voor de berging in een knoop is de berging van de omliggende ZWENDL-vakken gemiddeld. Ook de bodemruwheidscoëfficiënten voor de RAS/FLOW-schematisatie van het Noordelijk Deltabekken zijn overgenomen uit ZWENDL. In het netwerk zijn het gat in de Beerdam en de Hartelkering aan en uit te zetten. Omdat het model gebruikt wordt voor de simulatie van de stroming in de Nieuwe Waterweg onder extreme waterstanden zijn aan

de schematisatie overstroomgebieden toegevoegd om het effect van het onderlopen van haventerreinen in rekening te kunnen brengen.

Per tak is bij RAS/FLOW bekend met welke knopen het verbonden is. Alle knopen in het netwerk liggen in een willekeurig coördinaatsysteem zodat hun onderlinge ligging en afstand overeenstemt met de werkelijke ligging. Hierdoor kan voor iedere tak de richting bepaald worden zodat de windeffecten op een juiste manier kunnen worden berekend. In de bewegingsvergelijkingen is te zien hoe de windeffecten opgenomen zijn in het model. De coördinaten worden niet gebruikt om de lengte van de takken te berekenen. Deze lengte wordt opgegeven in het netwerk.

Bij de ingang van de Nieuwe Waterweg (Maasmond) en bij Haringvlietsluizen wordt een waterstand opgedrukt. Het waterstandssignaal bij de Maasmond is de som van getij, stormopzet, zeespiegelstijging en seiche. Het waterstandssignaal bij de Haringvlietsluizen is de som van getij, stormopzet en zeespiegelstijging. Zoals aangetoond door De Haas (1998) kan de opslinging van seiches bij gebruik van een waterstandsrand eigenlijk te groot worden. In RAS/FLOW wordt verondersteld dat de opslinging niet door het model berekend wordt, maar dat via het randsignaal wordt opgedrukt. Het randsignaal is een vertaling van de gemeten seiches statistiek bij de Rozenburgsesluis op basis van PHAROS-berekeningen en een gemiddelde energiebeschouwing (Redeker & Partners, 1999).

Voor de numerieke tijdsintegratie in RAS/FLOW wordt een "leap-frog"-schema gebruikt. Dit schema is zeer nauwkeurig voor golfvoortplanting: tweede orde in plaats en tijd en heeft geen amplitude demping.

$$B_s \frac{\zeta_i^{n+1} - \zeta_i^n}{\Delta t} + \frac{Q_{i+\frac{1}{2}}^n - Q_{i-\frac{1}{2}}^n}{\Delta x} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{Q_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - Q_{i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} = -g A_s \frac{\zeta_{i+1}^{n+1} - \zeta_i^{n+1}}{\Delta x} - \frac{g Q_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} |Q_{i+\frac{1}{2}}^n|}{C^2 A_s R} - B_s C_d |\bar{W}| W_x \quad (3.4)$$

Het is een expliciet schema en de tijdstap moet voldoen aan het bekende Courant-Friedrichs-Lewy voorwaarde voor de vrije oppervlakte golf:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{g \frac{A_s}{B_s}}} \quad (3.5)$$

De minimale roosterafstand in het netwerkmodel van het benedenrivierengebied is 500 meter. De tijdstap van 30 seconde voldoet ruim aan de CFL voorwaarde (3.5) en hangt samen met de kortste periode van een optredende seiche van ongeveer 10 minuten.

Het op een expliciete manier toevoegen van centraal gediscrètiseerde convectieve termen (Bernouilli) kan de numerieke tijdsintegratie met "leap-frog" instabiel maken. Dit is ook geconstateerd (Redeker & Partners, 1999). Het is daarom robuuster om de convectieve

termen met een zogenaamde “upwind” discretisatie toe te voegen. Het schema wordt dan eerste orde in de plaats.

### 3.2 Modelling stormvloedkering

In RAS/FLOW is een volledige beschrijving van de beweging van de sectordeuren en de krachten op de constructie van de stormvloedkering (deuren, fenders) onder invloed van de optredende waterbeweging aanwezig. Per tijdstap wordt de aansturing en het effect van de vele pomp- en klepacties, de wijze waarop dan de diverse tanks zich vullen, de diverse additionele krachten op de deur en de daarop volgende bewegingen van de deur bepaald.

In RAS/FLOW wordt de beweging van één deur gesimuleerd. De deur wordt voortdurend in statisch evenwicht verondersteld. De eigenperiode, met het drijflichaam gezien als schip, voor dompen en stampen ligt tussen de 9 en 12 seconde. Dit is kort in verhouding met de andere processnelheden, die in de orde van minuten liggen. Gegeven de vulling van de ballasttanks en de geperforeerde wand, en de waterbeweging van de vorige tijdstap, wordt uit het momentenevenwicht om de Y-as de verticale positie van de deur bepaald (spleethoogte) en uit het momentenevenwicht om de X-as de vertrimming (trimhoek). In het momentenevenwicht worden de volgende krachten meegenomen:

- oprijvend vermogen kerende wand
- oprijvend vermogen vakwerk
- eigen gewicht kering
- waterballast in ballast tanks
- waterballast in geperforeerde wand
- zuigkracht
- fenderkracht.

Vanwege de niet-lineaire relaties tussen de optredende krachten en de te bepalen spleethoogte en trimhoek, wordt de positie iteratief bepaald. In het iteratieproces zijn de spleet en trimhoek de parameters waarmee gestuurd kan worden. De momenten om de X- en Y-as worden om en om naar 0 geïtereerd totdat de beide afwijkingen in het moment kleiner zijn dan een vooraf gegeven grenswaarde. Binnen dit iteratieproces worden alleen het oprijvend vermogen van het vakwerk en de kerende wand, de fenderreactie en de zuigkracht opnieuw berekend. Het iteratief bepalen van de positie van de kering kost relatief veel rekentijd.

Het effect van de stormvloedkering op de waterbeweging in de Nieuwe Waterweg is in het 1D waterbewegingsmodel RAS/FLOW gemodelleerd als een vernauwing van het natte doorstroomoppervlak in de continuïteitsvergelijking en een extra vertragingsterm volgens Carnot Vgl. (2.8) in de impulsvergelijking. De stormvloedkering ligt in de schematisatie in een tak en heeft geen invloed op de berging in de omliggende knopen. Vgl. (2.8) wordt tevens gebruikt om het waterstandsverschil over de stormvloedkering te bepalen.

### 3.3 Rekentijd

Op een Pentium 133 MHz PC duurt een simulatie met RAS/FLOW van 60 uur fysische tijd met een tijdstap van 30 seconde voor het netwerk van 300 punten 120 seconden. De

simulatietijd per rekenpunt is dus ongeveer  $5 \cdot 10^{-5}$  seconde. De simulaties van een volledige probabilistische run van 5400 stormen worden over een PC-netwerk verdeeld door een intelligent distributie programma dat ontwikkeld is in DELPHI.

### 3.4 Programmastructuur

RAS/FLOW is geprogrammeerd met de GFA/Basic® compiler/interpreter en draait onder Windows 95™. Het model is tijdens de ontwerpfase van de regeling van de stormvloedkering continu verder ontwikkeld, meestal onder tijdsdruk waarbij prototyping in Basic het meest effectief bleek. Prototyping betekent in dit verband het direct bijbouwen van functionaliteit als de vraag opkomt, zonder eerst een formeel stuk systeemontwerp uit te werken. Van het programma ontbreekt daarom op dit moment een systeemdokumentatie en een gebruikershandleiding.

Het programma is modulair opgezet. De broncode bestaat uit ongeveer 18000 regels. Het gedeelte dat het BES en het ballaststelsel beschrijft is ongeveer 5000 regels en er is een visualisatie module van ongeveer 2000 regels. Alle variabelen zijn globaal. Intern in de broncode is er nog geen beschrijving van de functie van de modules en variabelen aanwezig. Er is een volledige animatie mogelijk van het vullen en ledigen van de ballasttanks en compartimenten, de waterstanden vóór en áchter de kering, de horizontale en verticale positie van de sectordeuren en de zuig- en fenderkrachten. Het 1D netwerkmodel is slechts een zeer klein onderdeel (500 regels) van de broncode.

De ontwikkelaars F. Redeker en G. Bruinzeel vinden de broncode goed leesbaar en gemakkelijk - inspanning in de orde van weken - over te zetten naar C-code. Zij verwachten dat het overzetten naar FORTRAN 90 aanzienlijk meer tijd zal kosten. Voor omzettingen van programma's naar andere programmeertalen zijn tools aanwezig die dit automatisch doen. De ervaring leert dat de broncode daarna nog wel volledig gestructureerd moet worden om onderhoudbaar te worden. In het kader van deze voorstudie hebben we geen inzage gehad in de broncode, we kunnen hier dus geen verdere uitspraken over doen.

De ontwikkelaars merken op (Redeker&Partners, 1999): "Het ontwikkeltraject kenmerkt zich door perioden van snelle ontwikkeling afgewisseld met een moment van herstructurering om controle te houden. Na het ten behoeve van seiches inbouwen van de Europoort en modelverfijningen is het model op dit moment weer aan een herstructurering toe."

Het RAS/FLOW programma is uitgebreid getest. Er zijn vergelijkingen gemaakt met ZWENDL en PHAROS. Van de testen zijn in het archief van de BMK resultaten aanwezig. Juist het testen van software kost relatief veel tijd. Zeker de module, die het besturingssysteem van de stormvloedkering beschrijft, is complex. Er zijn zeer veel toestanden van de regeling mogelijk, die allemaal tijdens het testen doorlopen moeten worden. Ook het effect van het falen van pompen en kleppen is destijds getest. Dit is gebeurd door de in de broncode pompen en kleppen uit te schakelen. Deze testen zijn niet door middel van invoerfiles aan te sturen en kunnen dus alleen gereproduceerd worden door aanpassingen in de broncode. Juist voor het testen is de visualisatie van grote waarde.

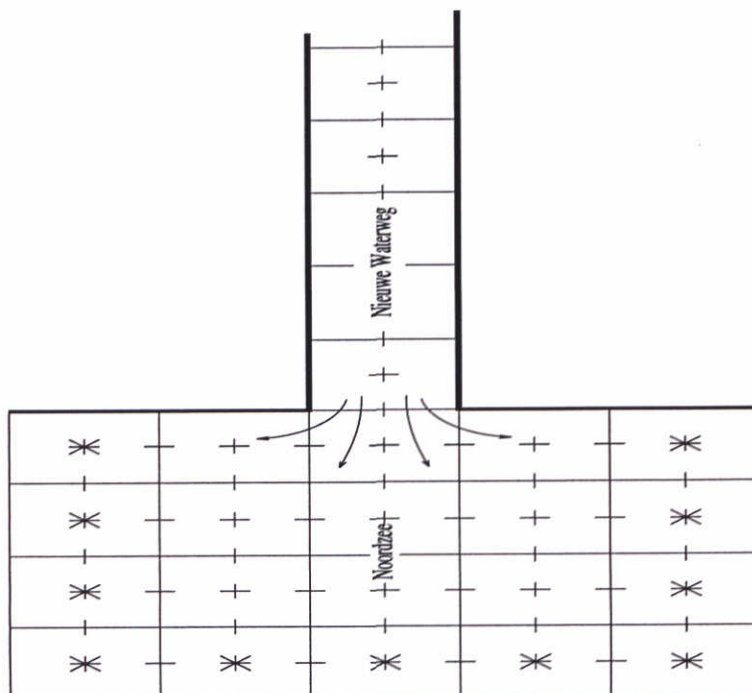
### 3.5 Uitbreidbaarheid met 2D zeegebied

Om de amplitude van seiches in de Nieuwe Waterweg nauwkeurig te kunnen voorspellen is het nodig om het effect van de radiale uitstraling van golven naar zee in beschouwing te nemen. De 1D-schematisatie van de Nieuwe Waterweg moet worden uitgebreid met een 2D zeegebied, zie Figuur 3.1. In deze paragraaf bespreken we of een dergelijke uitbreiding mogelijk is voor RAS/FLOW.

In paragraaf 3.1 zijn de vergelijkingen van het 1D netwerk model gegeven. Zoals in hoofdstuk 4 nader uiteengezet wordt kan een 2D zeegebied opgevat worden als een gestructureerd netwerk en kan op basis van de behoudswetten voor massa en impuls een koppeling gemaakt worden. In RAS/FLOW wordt het 1D netwerk opgeslagen als een tabel met per tak de vakken *van* en *naar*, waarmee de tak gekoppeld is. Deze tabel kan zonder problemen uitgebreid worden met het zeegebied. Per rekenpunt zal er een kenmerk toegevoegd moeten worden of het punt een "1D" of "2D"-rekenpunt is. In de "2D"-rekenpunten worden extra termen aan de vergelijking toegevoegd.

De expliciete tijdsintegratie van RAS/FLOW "leap frog" is direct uitbreidbaar naar 2D. De extra termen komen in het rechterlid terecht. Ook het toevoegen van Riemann randvoorwaarden op de Noord en Zuidrand van het zeegebied, zie paragraaf 4.4 is mogelijk.

Het is rekentechnisch mogelijk om binnen RAS/FLOW het 1D rivierennetwerk model uit te breiden met een 2D zeegebied.





## 4 Beschrijving 1D2D model

### 4.1 Achtergrond

Na het hoogwater van januari 1995 is door de provincies Gelderland, Overijssel, Utrecht, de Directie Oost Nederland, de Dienst Weg- en Waterbouwkunde en de Bouwdienst van de Rijkswaterstaat het initiatief genomen tot de ontwikkeling van een Hoogwater Informatie Systeem (HIS). Met een dergelijk informatiesysteem zou sneller en beter antwoord gegeven kunnen worden op vragen van bestuurders tijdens een hoogwaterperiode. In het kader van de ontwikkeling van een HIS is er ook een plan opgesteld voor wiskundige modelontwikkeling.

Zowel bij Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouw als bij WL | delft hydraulics bestond de behoefte voor de ontwikkeling van een integraal overstromingsinstrumentarium. Deze behoefte is in het speurwerk- en ontwikkelingsvoorstel voor Delft-FLS van december 1997 door Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouw en WL | delft hydraulics verwoord. Daarbij werd in eerste instantie samenwerking in het kader van het landelijke HIS voorzien. Deze samenwerking heeft geleid tot een 1D2D gekoppeld modelsysteem op basis van Delft-FLS en SOBEK-LOWLAND.

In dit hoofdstuk wordt in het kort de principes van de koppeling tussen het 2D programma Delft-FLS en het 1D modelsysteem SOBEK-LOWLAND beschreven. We geven de vergelijkingen, de oplossing van de vergelijkingen, de systeemopzet en de datastructuur van het rekenprogramma. De rekenkernen van Delft-FLS en SOBEK-LOWLAND en de koppeling zijn ontwikkeld door G.S. Stelling.

Het gekoppelde 1D2D modelsysteem is gebaseerd op SOBEK-LOWLAND. In tegenstelling tot SOBEK-RIVERS maakt SOBEK-LOWLAND gebruik van een versprongen rooster. De horizontale posities waar de berging en het natte doorstroomoppervlak worden opgegeven zijn dus voor beide modelsystemen verschillend (halve roosterafstand verschoven). Zowel SOBEK-RIVERS als ZWENDL zijn gebaseerd op het Preismann-schema. Een ZWENDL-schematisatie van het Noordelijk Deltabekken is daarom gemakkelijk over te zetten naar SOBEK-RIVERS. Een ZWENDL-schematisatie overzetten naar SOBEK-LOWLAND of RAS/FLOW vraagt om een conversieslag. SOBEK-LOWLAND en RAS/FLOW kunnen dezelfde schematisatie gebruiken. Op dit moment worden er vergelijkende berekeningen uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA voor het Noordelijk Deltabekken tussen de beide SOBEK versies (M3190, "Onderzoek rekenschema's SOBEK"). De mogelijkheden m.b.t. de modellering van "hydraulic structures" zijn in SOBEK-LOWLAND nog niet zo geavanceerd als in SOBEK-RIVERS. Echter het is wel de bedoeling om deze functionaliteit in de toekomst toe te voegen. De modellering van de gewijzigde regeling van de Haringvlietsluizen is daarom nu (december 1999) nog niet mogelijk binnen SOBEK-LOWLAND. Bij Rijkswaterstaat Directie Zuid Holland wordt op dit moment alleen SOBEK-RIVERS gebruikt. SOBEK-RIVERS bevat veel specifieke

functionaliteit voor de modellering van rivieren zoals laterale debieten, en complexe regelingen van hydraulische structures.

Begrip	Omschrijving
Adjacency graph	verzameling indices van niet nul elementen buiten de hoofddiagonaal van de matrix
ADI	Alternating Direction Implicit
Delft-FLS	2D-Hydrodynamisch modelsysteem voor simulatie van overstromingen. Ontwikkeld door WL.
CG	Conjugate Gradient
Graph	verzameling van getallen paren b.v.: (1,2), (3,4), (3,6) waarin 1,2,3,4,6, enz. zijn vertex (knopen) en (1,2) is een edge (of geeft aan dat een relatie / verbinding bestaat tussen die twee vertex).
Fill ins	Niet nul elementen die ontstaan door manipulatie / eliminatie
Minimum degree	Minimaliseren van fill in op basis van de adjacency graph
Simple graph	uitsluitend één verbinding tussen knopen
View	aspect

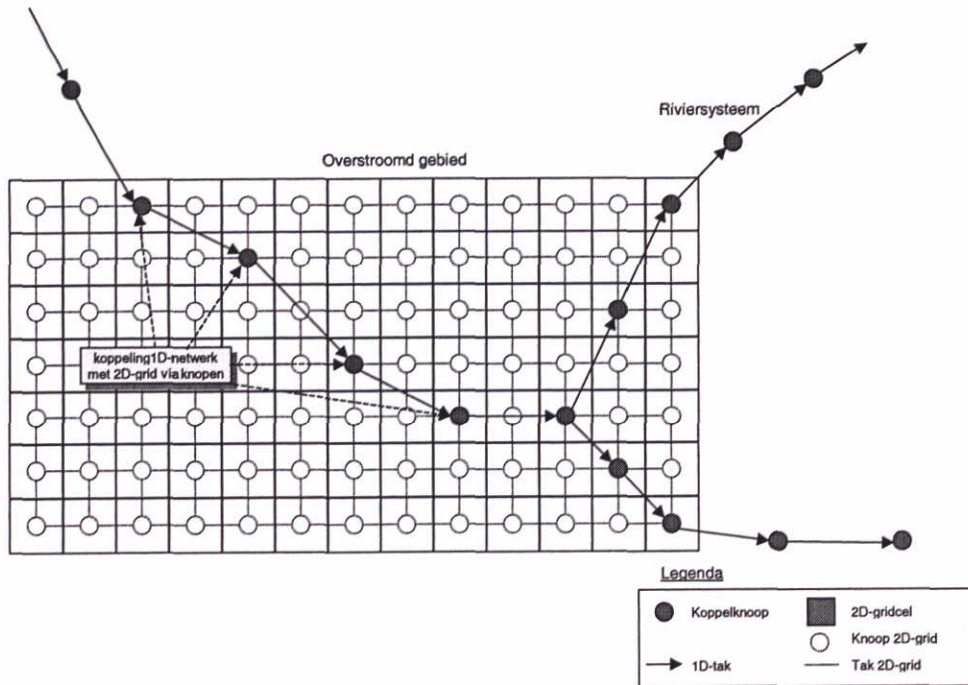
Tabel 1.1 Gebruikte begrippen

## 4.2 Vergelijkingen

Voor het gekoppelde 1D2D-modelsysteem gelden de volgende aannamen:

1. de stroming is één- of twee-dimensionaal,
2. de druk is hydrostatisch,
3. dichtheidsgradiënten spelen geen rol,
4. effect Corioliskracht is verwaarloosd.

Het model berekent waterstanden en diepte-gemiddelde snelheden op een versprongen rooster. Voor het 1D-modelsysteem zijn dit knopen en takken, zie Figuur 3.1, voor het 2D-model zijn het waterstands- en snelheidspunten. Voor een 1D2D gekoppeld model is de schematisatie als volgt:



Voor de discretisatie wordt uitgegaan van een eindige volumebenadering van de behoudswetten van volume en impuls:

**Behoud van massa:**

$$\frac{dV_{\zeta}(h)}{dt} = \int_{A_{\zeta}(h)} u \cdot \vec{n} \tag{4.1}$$

**Behoud van impuls:**

$$\frac{d}{dt} \int_{V_u(h)} \vec{u} = \int_{A_u(h)} \vec{u}(\vec{u} \cdot \vec{n}) + \int_{A_u(h)} \frac{p \cdot \vec{n}}{\rho} - \int_{b_u} \frac{\vec{\tau}_b}{\rho} + \int_{s_u} \frac{\vec{\tau}_w}{\rho} \tag{4.2}$$

Hierbij geldt:

- $\zeta$  : De waterstand boven een referentievlak
- $\vec{u}$  : De snelheidsvector
- $h$  : De totale waterdiepte
- $\vec{n}$  : De normaalvector op het doorstroomoppervlak  $A_{\zeta}(h)$  of  $A_u(u)$
- $p$  : De hydrostatische druk ( $\partial p / \partial z = -\rho g$ )
- $V_{\zeta}(h)$  : Het volume in een “ $\zeta$ ” punt
- $V_u(h)$  : Het volume in een “ $u$ ” punt
- $A_{\zeta}(h)$  : Het natte oppervlak van  $V_{\zeta}$
- $A_u(u)$  : Het natte oppervlak van  $V_u$
- $b_u$  : Bodem oppervlak in een “ $u$ ” punt
- $s_u$  : Vrij oppervlak in een “ $u$ ” punt

$\tau_b$  : Bodemschuifspanning  
 $\tau_w$  : Windschuifspanning

De termen in de vergelijking hebben de volgende betekenis:

$\frac{dV_{\zeta}(h)}{dt}$ : Verandering van volume (berging)

$\int_{A_{\zeta}(h)} \vec{u} \cdot \vec{n}$ : Som van alle invoer en uitvoer van volume

$\frac{d}{dt} \int_{V_u(h)} \vec{u}$ : Hoeveelheid verandering van impuls in het controle volume  $V_u$

$\int_{A_u(h)} \vec{u}(\vec{u} \cdot \vec{n})$ : Som van alle invoer en uitvoer van impuls

$\int_{A_u(h)} \frac{p \cdot \vec{n}}{\rho}$ : Geïntegreerde hydrostatische druk

$\int_{b_u} \frac{\vec{\tau}_b}{\rho}$ : Impulsverlies door bodemschuifspanning

$\int_{s_u} \frac{\vec{\tau}_w}{\rho}$ : Impulstoename door windschuifspanning

Andere termen zijn vooralsnog niet in beschouwing genomen. Dit betreft o.a. Coriolis, de horizontale diffusie van impuls door turbulentie of de aandrijving door dichtheidsverschillen. Deze termen kunnen eenvoudig aan de balansvergelijking toegevoegd worden.

Door de eindige volumebenadering kan uitgaande van de behoudswetten, een 1D-volume gemakkelijk gekoppeld worden met een 2D-volume. Voor behoud van massa speelt de richting geen rol. In dit geval is er in wezen geen onderscheid tussen 1D of 2D. Impuls is echter een vectorgrootte. Voor 2D moet hier rekening gehouden worden met de richting van de stroming. De snelheid in een roostercel is derhalve één- of twee-dimensionaal. Bij lokale 1D-2D overgangen kan dit in principe verlies betekenen. In het algemeen echter is het transport van impuls van geringe betekenis in de impulsbalans. In knooppunten van 1D-netwerken, waarbij meer dan 2 takken samenkomen, wordt dit transport eveneens gedeeltelijk verwaarloosd. Uitsluitend de ingaande impulstransporten worden beschouwd. Er is dus verlies. Dit lijkt een redelijke aanname, immers op een kruispunt kan veel verlies optreden door turbulentie.

Op deze manier wordt een rekengebied overdekt met eindige volumes voor massabehoud. Het volume is in principe een niet-lineaire functie van de waterstand. Voor een 1D

rekenpunt dat ligt in een 2D gebied is de totale berging de som van het 1D en 2D volume en wordt gegeven door de volgende formule:

$$V(h) = V_{1D}(h_{1D}) + V_{2D}(h_{2D}) \quad (4.3a)$$

Hierbij geldt:

$$h_{1d} = \zeta + d_{1d}, h_{2d} = \zeta + d_{2d} \quad (4.3b)$$

M.a.w. er worden twee bodems gedefinieerd. Hierdoor kan een 1D-tak dieper liggen dan de 2D-omgeving die door deze tak doorsneden wordt. Beneden de 2D-bodem doet uitsluitend het 1D-deel mee. Daarboven kan het 1D-volume begrensd worden door bevrozing van de doorsnede van de 1D-tak. In wezen is slechts het 1D-deel van het volume niet-lineair. Het 2D-volume is gelijk aan het horizontale oppervlak (vierkant) van het volume maal de 2D-diepte. Voor de koppeling in het kader van dit project is dit niet relevant. Er is geen overlap tussen de 1D en 2D-schematisatie.

De vergelijkingen van het 1D-model SOBEK-LOWLAND zijn:

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial(UA_s)}{\partial x} = 0 \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{A_s} \frac{\partial(UQ)}{\partial x} + \frac{U}{A_s} \frac{\partial Q}{\partial x} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gU|U|}{C^2 R} - C_d |\vec{W}| W_x \quad (4.5)$$

waarbij  $Q = U A_s$ . De speciale schrijfwijze van de impulstransportterm in Vgl. (4.5) is gekozen vanwege de numerieke discretisatie. Hiervoor is in SOBEK-LOWLAND een impulsbehoudende discretisatie gebruikt. Echter in knooppunten van 1D-netwerken, waarbij meer dan 2 takken samenkomen, worden uitsluitend de ingaande impulsfluxen beschouwd. In tegenstelling tot RAS/FLOW rekent SOBEK-LOWLAND dus in snelheden en niet in debieten. Het natte doorstroomoppervlak is afhankelijk van de waterstand  $A_s(\zeta)$ . Voor een rivierennetwerk wordt de berging in de knooppunten gelijk gesteld aan het gemiddelde van de berging van de omliggende takken.

De vergelijkingen van het 2D-model Delft-FLS zijn:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{h} \frac{\partial(Uq_x)}{\partial x} + \frac{U}{h} \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{1}{h} \frac{\partial(Uq_y)}{\partial y} + \frac{U}{h} \frac{\partial q_y}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gU|\vec{U}|}{C^2 R} - C_d |\vec{W}| W_x \quad (4.7a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{1}{h} \frac{\partial(Vq_x)}{\partial x} + \frac{V}{h} \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{1}{h} \frac{\partial(Vq_y)}{\partial y} + \frac{V}{h} \frac{\partial q_y}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gV|\bar{U}|}{C^2 R} - C_d |\bar{W}| W_y \quad (4.7b)$$

waarbij  $q_x = U h$  en  $q_y = V h$ .

De numerieke discretisaties van SOBEK-LOWLAND en Delft-FLS zijn gelijk. Ze staan uitgebreid beschreven in "Uitbreiding Delft-FLS/Koppeling met SOBEK" (Stelling, Kernkamp en Laguzzi, 1998). Het betreft:

- voor tijdsintegratie impliciete  $\theta$  - methode  $\theta \in [0.5:1]$  ( $\theta = 1$  Euler impliciet,  $\theta = 0.5$  Crank Nicolson),
- transport impuls expliciet,
- transport impuls op een impulsbehoudende manier,
- bepaling natte doorstroomoppervlakken met "upwind"-aanpak,
- iteratie over niet-lineairiteit in  $A_s(\zeta)$  i.v.m. massabehoud.

Voor het 1D-model kunnen de gediscretiseerde vergelijkingen geschreven worden als

$$\frac{A_i^{n+1} - A_i^n}{\Delta t} + \frac{U_{i+1/2}^{n+\theta} A_{i+1/2}^n - U_{i-1/2}^{n+\theta} A_{i-1/2}^n}{\Delta x} = 0 \quad (4.8)$$

$$\frac{U_{i+1/2}^{n+1} - U_{i+1/2}^n}{\Delta t} = -g \frac{\zeta_{i+1}^{n+\theta} - \zeta_i^{n+\theta}}{\Delta x} - \frac{g U_{i+1/2}^{n+1} |U_{i+1/2}^n|}{C^2 R_{i+1/2}^n} - C_d |\bar{W}| W_x \quad (4.9)$$

waarbij de sub-indices de positie op het rooster en de sup-indices het tijdsniveau weergegeven. We merken op dat de discretisatie van de advectietermen ontbreekt in vgl. (4.9). Tevens geldt dat

$$\begin{aligned} U_{i+1/2}^{n+\theta} &= \theta U_{i+1/2}^{n+1} + (1-\theta) U_{i+1/2}^n \\ \zeta_{i+1}^{n+\theta} &= \theta \zeta_{i+1}^{n+1} + (1-\theta) \zeta_{i+1}^n \end{aligned} \quad (4.10)$$

en

$$A_{i+1/2} = \begin{cases} A_i & \text{als } U_{i+1/2} > 0 \\ A_{i+1} & \text{als } U_{i+1/2} < 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Voor vergelijkingen (4.8)-(4.11) kan afgeleid worden dat positiviteit van de natte doorstroomoppervlakken gegarandeerd is als de tijdstap voldoet aan:

$$\frac{\Delta t U_{i+1/2}^{n+\theta}}{\Delta x} < 1 \quad (4.12)$$

Het systeem is met een automatische tijdstapschatter uitgerust om te controleren of aan (4.12) wordt voldaan. Een vergelijkbare discretisatie wordt toegepast in 2D in Delft-FLS. Voor Crank Nicolson ( $\theta = 0.5$ ) is de methode tweede orde in de tijd en geeft geen amplitude demping van golven. De nauwkeurigheid verschilt dan niet van RAS/FLOW.

De oplossing van de differentievergelijkingen vindt plaats in een aantal stappen:

1. Stel de coëfficiënten op van de impulsvergelijking. Dit verloopt in een tweetal substappen:
  - a) Bereken het impulstransport 1D en 2D.
  - b) Bereken de overige termen.
2. Substitueer het resultaat van 1 in de continuïteitsvergelijking.
3. Los het resultaat van 2 op.

De vergelijkingen zijn niet-lineair. De niet-lineariteit betreft uitsluitend het volume. De vergelijkingen worden iteratief opgelost. Per iteratie wordt een vergelijking opgesteld die symmetrisch is en positief definitief. De oplossing hiervan gebeurt gedeeltelijk direct (met "minimum degree") en gedeeltelijk iteratief (Conjugate Gradient). Het deel dat direct geëlimineerd wordt uit het stelsel en het deel dat iteratief wordt opgelost is te kiezen. Min of meer experimenteel is vastgesteld dat eliminatie tot alle 6<sup>e</sup> orde knopen de snelste oplossingen geeft. Daarboven neemt de rekensnelheid eerder af dan toe. Ook het geheugen beslag door z.g. "fill ins" is groot.

De niet-lineaire vergelijkingen blijven overigens lastig op te lossen. Het is dikwijls beter om de iteraties te laten voor wat ze zijn en een gering massaverlies (of massatoename) te accepteren.

Door de impliciete tijdsintegratie is er geen tijdstapbeperking. De tijdstap zal dus bepaald worden door de eis om de kortste seiches (orde 10 minuten) goed te kunnen representeren. De tijdstap toegepast voor het expliciete model RAS/FLOW van 30 seconde zal dus ook voor het impliciete systeem gebruikt worden.

### 4.3 Systeem opzet en datastructuur van het rekenprogramma

Het gekoppelde 1D2D modelsysteem SOBEK-LOWLAND met Delft-FLS is een FORTRAN '90 programma. Het modelsysteem heeft een User Interface in Visual Basic. Het is ontwikkeld in samenwerking tussen Rijkswaterstaat DWW en WL | delft hydraulics. Van het programma bestaat een systeemdokumentatie, een gebruikershandleiding en een testrapport (WL | Delft hydraulics, november 1999a, b, c). Er wordt voor Rijkswaterstaat RIZA een test uitgevoerd met de schematisatie van het Noordelijk Deltabekken en een vergelijking gemaakt met SOBEK-RIVERS. Er is nog geen testberekening gemaakt met een lopende korte golf ter vergelijking met PHAROS.

Het 1D2D gekoppelde systeem bestaat uit een inlees gedeelte van een invoer file, een rekenprogramma en een uitvoer gedeelte. De invoer bevat een viertal definities:

1. De definitie van 1D knooppunten (volumes) + eventuele verbindingen (1D snelheden)

2. De definitie van een willekeurig aantal 2D rekendomeinen op basis van de interne definities van Delft-FLS.
3. De definitie van 1D verbindingen tussen willekeurige knooppunten zoals gedefinieerd bij 1. en 2.
4. De definitie van 2D verbindingen tussen diverse 2D domeinen zoals gedefinieerd bij 2. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid tot het lokaal nesten van rekenroosters met een grover of fijner grid.

Het inlees gedeelte van het programma integreert al deze definities in een groot netwerk. Om echter op correcte wijze impulstransport te kunnen uitrekenen en tegelijkertijd de volume balans correct op te lossen is een aantal aspecten of "views" belangrijk. Dit vindt zijn weerslag in de datastructuur. Het betreft hier 2 aspecten:

1. de topologische view,
2. de geometrische view.

De topologische view bevat de verzameling van alle knooppunten (of "vertices"  $V(G)$ ). Alle knooppunten hebben een volgnummer. Het maakt niet uit of een knooppunt in een 2D-domein ligt of in een 1D-domein. Daarnaast zijn er verbindingen (of "edges") tussen knopen. De verzameling,  $E(G)$ , van alle verbindingen of snelheden komen in deze view voor. Het paar  $(E(G), V(G))$  vormt een z.g. "simple graph", die overeenkomt met de z.g. "adjacency graph" van de vergelijking die overblijft na eliminatie van de impulsvergelijkingen. Deze "graph" vormt het uitgangspunt voor de eliminatieprocedure van het stelsel vergelijkingen.

De geometrische view legt de relatie tussen coördinaten in een 2D-(deel)domein en een deelverzameling van de knooppunten. Ook worden aan een deelverzameling van de snelheden, richting en locatie toegevoegd zodat impulstransport kan worden berekend. Elk knooppunt krijgt een x- en y-coördinaat en bij elke x- en y-coördinaat binnen het 2D(deel) is een knooppunt-nummer bekend. In principe is er zo veel redundantie, maar de gewenste rekensnelheid maakt dat nodig.

Alle vergelijkingen in knopen (waterstandspunten) en verbindingen (snelheidspunten) worden in één groot stelsel samengevoegd (volledig impliciet) en daarna opgelost. De voordelen zijn:

1. Transparante programma-structuur.
2. Flexibel, in principe uitbreidbaar met bijvoorbeeld lokale roosterverfijning of willekeurige roosters (zoals bij eindige elementen)

Het nadeel van de aanpak wordt gevormd door de relatief langere rekestijden.

Het programma is duidelijk gestructureerd en er is interne documentatie aanwezig. De variabelen zijn goed beschreven.

#### 4.4 Rekensnelheid

Gebleken is dat het gekoppelde 1D2D systeem voor een vergelijkbare 2D-berekening 2 à 3 maal langzamer is dan Delft-FLS. Op een Pentium 133 MHZ PC is de rekestijd van Delft-



FLS  $2 \cdot 10^{-5}$  seconde per rekenpunt per tijdstap. Op basis van factorisatietechnieken zijn reketijden mogelijk die dezelfde efficiëntie hebben als Delft-FLS. Factorisatietechnieken vragen echter om een meer ingewikkelde administratie van de stelsels vergelijkingen.

De reketijd van 1D2D en RAS/FLOW lijken vergelijkbaar. Echter in het 1D2D systeem zit nog niet de module voor de stormvloedkering! Er gaat dus geen reketijd op aan het bepalen van de krachtenbalans op de deuren. Verwacht mag worden dat het 1D2D-systeem dus een factor 2 à 3 langzamer zal rekenen dan RAS/FLOW.

#### 4.5 Noodzakelijke uitbreidingen

Om het gekoppelde 1D2D model geschikt te maken voor de simulatie van seiches in de Nieuwe Waterweg ter vervanging van RAS/FLOW zal het huidige programma uitgebreid moeten worden met:

1. een module voor beschrijving stormvloedkering (BES),
2. seiches randvoorwaarden voor 2D zeegebied,
3. visualisatie ballaststelsel en fenderkrachten,
4. module voor automatische aansturing randvoorwaarden (variatie stochastische invoerparameters)
5. module voor nabewerking resultaten simulaties tot kansoverschrijdingskromme negatief verval.

*M.b.t. punt 1:* De invloed van de stormvloedkering op de waterbeweging kan in het 1D2D-systeem op een zelfde manier in rekening worden gebracht als in RAS/FLOW d.w.z. een vernauwing van het natte doorstroomoppervlak, zie Figuur 2.8 en een extra kwadratische verliesterm  $V_{gl. (2.8)}$  in de bewegingsvergelijking. Omdat ook het 1D2D-systeem rekent met een "versprongen" rooster kan de numerieke implementatie van de stormvloedkering uit RAS/FLOW overgenomen worden. De wiskundige beschrijving van de regeling van de stormvloedkering (BES) zoals aanwezig in RAS/FLOW is echter nog niet aanwezig in het 1D2D-systeem. Zoals afgeleid kan worden uit de beschrijving in hoofdstuk 2 moet het vullen en legen van de tanks en compartimenten in de sectordeuren berekend worden om de snelheid van afzinken van de deuren goed te kunnen voorspellen. De regeling past niet binnen de nu in SOBEK beschikbare "controllers". De module uit RAS/FLOW die het ballaststelsel beschrijft en uiteindelijk de horizontale en verticale positie van de sectordeuren oplevert gegeven waterstanden en snelheden rond de kering, zal daarom in het systeem geïntegreerd moeten worden. Voor de bepaling van het natte doorstroomoppervlak  $A_1$  worden de waterstanden en snelheden op de vorige tijdstap gebruikt (expliciet). De gekozen tijdstap op basis van de kortste seiches en de numerieke implementatie van de extra termen t.g.v. de stormvloedkering zijn gelijk aan RAS/FLOW en we verwachten daarom geen complicaties. Dat het 1D2D-systeem impliciet rekent in de verhangterm heeft hierop geen invloed.

*M.b.t. punt 2:* Delft-FLS is nog niet voorzien van randvoorwaarden, die geschikt zijn voor het simuleren van seiches. Als we de golven in het zeegebied splitsen in drie golfcomponenten, een loodrecht inkomende golf, een loodrecht op de kust gereflecteerde golf en een uit de haven uitgestraalde golf,

$$\zeta = \zeta_i + \zeta_r + \zeta_c \quad (4.13)$$

dan eisen we van de randvoorwaarden op de Noord en Zuid rand (loodrecht op de kust) dat inkomende golf  $\zeta_i$  en op de kust gereflecteerde golf  $\zeta_r$  evenwijdig aan de Noord/Zuid randen moeten kunnen lopen, en  $\zeta_c$  vanuit de havenmond gezien radiaal door de rand heen moet kunnen lopen.

Bij gesloten Noord en Zuid rand worden  $\zeta_i$  en  $\zeta_r$  optimaal ondersteund, maar  $\zeta_r$  kan niet door de rand naar buiten. Bij open Noord en Zuid rand en een open West rand, worden  $\zeta_i$  en  $\zeta_r$  te weinig respectievelijk teveel ondersteund, maar kan  $\zeta_c$  wel vrij uitreden.

T.b.v. de modellering van seiches is er daarom (Kernkamp e.a. 1994, fase 2) een alternatieve randvoorwaarde geconstrueerd, op basis van Riemann invarianten. Deze randvoorwaarde laat de uitgestraalde golf  $\zeta_c$  vrij door de rand naar buiten treden. Bovendien is de aansturing van de rand zo gekozen, dat de  $\zeta_i$  en  $\zeta_r$  evenwijdig aan de rand goed worden ondersteund. Het ondersteunen van  $\zeta_i$  en  $\zeta_r$  komt er op neer dat als alleen  $\zeta_i$  en  $\zeta_r$  aanwezig zijn, de snelheidscomponent die loodrecht op de Noord/Zuid-rand staat, nul wordt gemaakt, zoals bij een dichte wand. Als randvoorwaarde wordt op de Noord en Zuid rand voorgeschreven:

$$V + \zeta \sqrt{\frac{g}{h}} = f(t) \quad (4.14)$$

waarbij  $f(t)$  het in te sturen Riemann signaal en  $V$  de snelheidscomponent loodrecht op de rand. Kiezen we  $f(t) = \zeta \sqrt{\frac{g}{h}}$ , dan wordt  $V$  nul, en is er geen 'lek' door de rand van de inkomende en loodrecht gereflecteerde golf. Op ieder randsegment moeten we een waterstand  $\zeta$  bepalen, die enkel het gevolg is van de inkomende en loodrecht op de kust gereflecteerde golf ( $\zeta_i$  en  $\zeta_r$ ), maar niet wordt gestoord door andere componenten zoals de uitstraling vanuit de haven ( $\zeta_c$ ). Dit kan gerealiseerd worden door, parallel aan de simulatie van het gekoppelde model van havengebied en open zee, in aparte 1D kanalen met dezelfde geometrie en diepte als die van de eerste rekenrij evenwijdig aan de Noord en Zuid-rand, de  $\zeta_i$  en  $\zeta_r$  uit te rekenen. De 1D kanalen zijn loodrecht op de kust afgesloten en hebben aan het open uiteinde (West rand) dezelfde randaansturing als de open zee. De waterstanden die in iedere rekencel in de 1D kanalen worden berekend, worden overgezet naar het Riemann signaal van het corresponderende randsegment op de open zee. In het kader van de simulaties van seiches in het Europoortgebied is goede ervaring opgedaan met deze implementatie van een "seiches randvoorwaarde".

*M.b.t. punt 3:* Om de belasting op de kering te kunnen bepalen is het nodig om tijdens de verschillende operationele fasen van het beheer de krachten op de constructie te kunnen monitoren. Hiervoor is extra uitvoer nodig in de vorm van tijdreeksen. Daarnaast kan een

visualisatie (tijdens en na de simulatie) van de beweging van de deuren, de waterstanden rond de kering en de krachten op de fenders veel inzicht verschaffen in de werking van het BES en ballaststelsel en in de correctheid van de programmering. Een visualisatie module zoals in RAS/FLOW, is handig maar niet strikt noodzakelijk.

*M.b.t. punt 4:* Het falen van de kering wordt in RAS/FLOW bepaald met een probabilistische aanpak (Redeker&Partners 1999). De vijf stochastische invoerparameters: stormopzet, stormduur, faseverschuiving tussen stormpiek en getij, Rijnafvoer bij Lobith en amplitude seiches componenten worden incrementeel gevarieerd. Per combinatie worden er 10 simulaties uitgevoerd met randomtrekkingen voor de fase van de seiches.

*M.b.t. punt 5:* Uit de resultaten worden overschrijdingslijnen voor het negatief verval bepaald. Er is in RAS/FLOW een module aanwezig om dit geheel automatisch te doen. Er zal voor het 1D2D-systeem ook een dergelijke nabewerkings module ontwikkeld moeten worden.

## 5 Overzicht varianten 1D2D model voor seiches NWW

### 5.1 Inleiding

Rijkswaterstaat Directie Zuid Holland heeft een wiskundig modelinstrumentarium nodig om

- 5 jaarlijks de belasting van de Maeslantkering en Hartelkering te kunnen toetsen gegeven de op dat moment geldende randvoorwaarden m.b.t. waterstanden op zee, seicheskarakteristieken, rivierafvoer, meteorologie etc.,
- effect van wijzigingen in het beheer op de belasting van de kering te kunnen onderzoeken,
- effect van wijzigingen in de geometrie van het rivierengebied op de belasting van de kering te kunnen onderzoeken.

Het modelsysteem zal gebruikt worden in een operationeel kader. Dit vraagt om een robuust, flexibel, betrouwbaar en goed gedocumenteerd softwareproduct. De organisatie rond het softwareproduct moet zodanig zijn dat ook op lange termijn continuïteit gegarandeerd kan worden. Dit vraagt om goede afspraken m.b.t. het onderhoud en beheer van de software. Daarnaast wil Rijkswaterstaat Directie Zuid Holland graag toe naar minder modelschematisaties en minder rekenmodellen van het zelfde gebied om zo kosten te besparen op de conversie van invoerbestanden en de calibratie van de modellen.

Op dit moment wordt het simulatiemodel RAS/FLOW gebruikt voor het bepalen van de belasting op de stormvloedkering. RAS/FLOW is ontwikkeld en eigendom van Redeker&Partners. Voor een nauwkeurigere modellering van de opslinging van seiches in het gebied tussen zee en stormvloedkering is uitbreiding nodig van RAS/FLOW met een 2D zeegebied. Daarnaast dient RAS/FLOW uitgebreid te worden met een gebruikersvriendelijke schil.

Een numeriek modelsysteem voor bepaling van de belasting op de Maeslantkering onder invloed van getij, stormopzet en seiches dient de volgende componenten te bevatten:

- 1D waterbeweging voor het rivierennetwerk met een willekeurige natte doorsnede als functie van de waterstand.
- 2D waterbeweging voor een kleine kuststrook rond de monding van de Nieuwe Waterweg, die aan een 1D-model van de Waterweg vastgeknoopt kan worden. Hierbij dienen op zee speciale randvoorwaarden op basis van Riemann invarianten opgelegd te kunnen worden.
- Beschrijving dynamisch gedrag van de Maeslantkering onder invloed van de waterbeweging tijdens openen en sluiten. Onderdeel hiervan is een beschrijving van het ballastsysteem voor de bepaling van de krachten en momenten op de deur onder invloed van de waterbeweging.

Alle bovengenoemde componenten zijn, onafhankelijk van elkaar, aanwezig in bestaande software. Software waarin alle genoemde componenten geïntegreerd beschikbaar zijn, is er nog niet in een bruikbare vorm aanwezig. Doel van deze voorstudie is om een inventarisatie te maken wat nodig is om tot een dergelijk softwareproduct te komen. Hierbij zijn drie varianten mogelijk:

- Uitbreiding RAS/FLOW met een 2D zeegebied. Daarnaast moet de RAS/FLOW programmatuur zodanig aangepast worden dat het door Rijkswaterstaat in beheer en onderhoud kan worden genomen.
- Het 1D2D-model (SOBEK-LOWLAND + Delft-FLS) uitbreiden met een geherstructureerde module uit RAS/FLOW voor de beschrijving van de dynamica van de Maeslantkering. Het betreft hier zowel de koppeling tussen waterbeweging en de toestand van de stormvloedkering (regeling) als de beschrijving van het ballaststelsel.
- Het 1D2D-model (SOBEK-LOWLAND + Delft-FLS) uitbreiden met een nieuw op te zetten module voor de beschrijving van de dynamica van de Maeslantkering. Het betreft hier zowel de koppeling tussen waterbeweging en de toestand van de stormvloedkering (regeling) als de beschrijving van het ballaststelsel.

Om tot een goed beeld te komen over de functionaliteit en structuur van RAS/FLOW is aan G. (DIGITEC) en F. Redeker (Redeker & Partners) om informatie gevraagd. De beschrijving van het ballaststelsel staat in het document W-03-0082 "ballaststelsel, functionaliteit 1996" (MSM, 1997).

Het uitgangspunt bij het vergelijken van de varianten is dat rekentechnische programma's bij Rijkswaterstaat (SIMONA en SOBEK) in FORTRAN zijn geschreven. Voor invoer en naverwerking worden wel andere programmeertalen/programma's gebruikt, denk aan C, Visual Basic en MATLAB. Het rekengedeelte van het gevraagde softwareproduct dient derhalve in FORTRAN (FORTRAN 77 of FORTRAN 90) geprogrammeerd te worden.

Variante 2 en 3 zijn gebaseerd op het 1D2D-model (SOBEK-LOWLAND + Delft-FLS). Dit systeem is ontwikkeld in samenwerking tussen Rijkswaterstaat DWW en WL | delft hydraulics. Bij Rijkswaterstaat Directie Zuid Holland wordt (december 1999) alleen nog SOBEK-RIVERS gebruikt. Het rekenschema van LOWLAND is bijzonder robuust, maar gebaseerd op een "versprongen rooster", zie hoofdstuk 4. De schematisatie van het Noordelijk Deltabekken voor RIVERS zal dus geconverteerd moeten worden. De schematisatie van het Noordelijk Deltabekken voor RAS/FLOW kan wel direct overgezet worden naar LOWLAND. Op dit moment wordt een vergelijking gemaakt tussen RIVERS en LOWLAND voor riviertoepassingen (M3190, "Onderzoek rekenschema's SOBEK").

Bij variante 3 zal Rijkswaterstaat niet over de broncode van RAS/FLOW hoeven te beschikken. Bij variante 1 en 2 wordt gebruik gemaakt van de bestaande RAS/FLOW broncode. Deze software is echter eigendom van Redeker & Partners. Rijkswaterstaat kan door een licentie het recht op gebruik kopen. Een richtprijs is fl. 100.000,-.

## 5.2 Technische haalbaarheid

Alle drie de ontwerpvarianten zijn technisch haalbaar. Bij alle varianten wordt gebruik gemaakt van componenten die in de praktijk bewezen en getest zijn:

- 1D model RAS/FLOW
- 1D model SOBEK-LOWLAND
- BES in RAS/FLOW
- Seichesrandvoorwaarde in 2D (Delft3D-FLOW)
- Koppeling van een 2D zeegebied met een 1D netwerkmodel
- Berekening van seiches in een gekoppeld 1D2D systeem
- Probabilistische aansturing en uitwerking.

Het koppelen van deze componenten is technisch gezien haalbaar, omdat het voornamelijk integratie en herprogrammeren van bestaande software betreft.

De implementatie van de Maeslantkering (hydraulic structure) in het numerieke waterbewegingsmodel is in alle drie de varianten gelijk en gebaseerd op de implementatie in RAS/FLOW. Weliswaar is SOBEK-LOWLAND gebaseerd op een impliciete tijdsintegratiemethode van de vrije oppervlakte golf en RAS/FLOW op een expliciete tijdsintegratiemethode, maar de koppeling met de regeling van de Maeslantkering gebeurt in alle drie de varianten op een expliciete manier. De waterstanden en snelheden rond de kering op het oude tijdsniveau bepalen het natte doorstroomoppervlak  $A_1$ , zie Figuur 2.8, op het nieuwe tijdsniveau. De kwadratische verliesterm Vgl. (2.8) wordt in alle drie de varianten impliciet afgehandeld. De tijdstap (30 seconde) wordt voor deze toepassing bepaald door de periode van de kortste seiches (10 minuten) en niet door een stabiliteitsgrens. Omdat voor alle drie de varianten dezelfde tijdstap gebruikt wordt, verwachten we op basis van de ervaring met RAS/FLOW geen problemen.

## 5.3 Risico's

In paragraaf 5.2 is de technische haalbaarheid van de drie varianten besproken. In het kader van deze voorstudie, zijn ook een aantal risico's naar voren gekomen. Deze zullen we hier kort samenvatten.

### *Conversie GFA Basic naar FORTRAN*

Zowel voor variant 1 als 2 zal een module uit RAS/FLOW omgezet moeten worden van GFA Basic naar FORTRAN. Hier is zowel bij DIGITEC als WL | delft hydraulics geen ervaring mee. WL | delft hydraulics heeft de broncode van RAS/FLOW niet ingezien.

### *SOBEK-RIVERS versus SOBEK-LOWLAND*

De vergelijking tussen de resultaten van SOBEK-LOWLAND en SOBEK-RIVERS voor het Noordelijk Deltabekken is (december 1999) nog niet voltooid. Een beslissing of SOBEK-LOWLAND wordt opgenomen in de Rijkswaterstaat modellenlijn en gebruikt gaat worden door Directie Zuid Holland is nog niet genomen. De RIVERS-schematisatie van het Noordelijk Deltabekken moet geconverteerd worden alvorens in LOWLAND gebruikt te kunnen worden. De mogelijkheden m.b.t. de regeling van "hydraulic structures" (Haringvlietsluizen) zijn in LOWLAND nog niet zo geavanceerd als in RIVERS. Beheer en onderhoud van twee modelschematisaties van hetzelfde gebied levert extra kosten. op

## 5.4 Vergelijking varianten

### Variant 1: Uitbreiding RAS/FLOW

Variant 1 is gebaseerd op het uitbreiden en herstructureren van het RAS/FLOW programma. Hierbij wordt de broncode van het rekengedeelte in RAS/FLOW (ongeveer 5000 regels) omgezet naar FORTRAN 90. Het numerieke waterbewegingsmodel wordt uitgebreid met een 2D zeegebied. Er wordt een speciale seiches-randvoorwaarde ingebouwd op zee. RAS/FLOW wordt voorzien van een gebruikersvriendelijke schil.

Met RAS/FLOW is al veel ervaring opgedaan. Er is een interface aanwezig om voor de probabilistische aanpak de runs aan te sturen. De rekensnelheid is hoog. Het waterbewegingsmodel wijkt af van de SOBEK-lijn. Het onderhoud en beheer van het modelsysteem en de ondersteuning zijn voor de lange termijn derhalve onzekere factoren. Van RAS/FLOW is er nog geen documentatie (systeemdokumentatie, gebruikershandleiding, testrapport). Omdat de eisen m.b.t. de documentatie nog niet geformuleerd zijn wordt hier geen schatting voor gegeven.

Ontwikkelingen	inspanning (in dagen)
koppeling 2D-zeegebied	10
inbouwen seiches randvoorwaarde	10
omzetten en herstructureren rekenhart van RAS/FLOW van GFA-Basic naar FORTRAN	30
gebruikersvriendelijke schil	20
kennisoverdracht: begeleiding door Redeker&Partners/DIGITEC	5
kennisoverdracht: inwerken RWS	15
statistische naverwerking	5
aansturen runs	10
documenteren	p.m.

De kostenschattingen voor het omzetten van de Visual Basic broncode van RAS/FLOW naar C of FORTRAN '90, en het herstructureren, zijn gebaseerd op informatie van Redeker & Partners en DIGITEC. WL | delft hydraulics heeft in het kader van de voorstudie geen inzage gehad in de broncode.

Voordelen	nadelen
veel ervaring mee	lange termijn continuïteit niet gegarandeerd
hoge rekensnelheid	extra model en modelschematisatie NWW

### Variant 2: Uitbreiding 1D2D met module RAS/FLOW

Variant 2 is gebaseerd op het uitbreiden van het gekoppelde 1D2D model (SOBEK-LOWLAND + Delft-FLS) met de module van RAS/FLOW, die de dynamica van de Maeslantkering beschrijft. Het betreft hierbij zowel een beschrijving van de regeling als het ballaststelsel. De invloed van de Maeslantkering op de waterbeweging is vergelijkbaar

met andere “hydraulic structures” in SOBEK-LOWLAND: een vernauwing van het natte doorstroomoppervlak en een extra kwadratische verliesterm. De module uit RAS/FLOW zal afgesplitst moeten worden en omgezet naar FORTRAN '90 en aangekoppeld moeten worden in het 1D2D-systeem. Bij het herprogrammeren van de module is uitgegaan van een grote bijdrage van de ontwikkelaars van RAS/FLOW Redeker&Partners en DIGITEC.

Daarnaast zal er rond het 1D2D-model een schil gebouwd moeten worden om volgens een probabilistische aanpak simulaties uit te kunnen voeren en de resultaten statistisch na te bewerken tot de gewenste overschrijdingslijnen voor de belasting op de kering. De uitvoermogelijkheden van het 1D2D-systeem moeten worden uitgebreid met specifieke zaken m.b.t. de belasting op de kering (bijvoorbeeld negatief verval).

Ontwikkelingen	inspanning (in dagen)
inbouwen seiches randvoorwaarde	10
afsplitsen + herstructureren module BES + ballaststelsel RAS/FLOW + inbouwen in 1D2D	50
kennisoverdracht: begeleiding door Redeker&Partners/DIGITEC	5
kennisoverdracht: inwerken RWS/WL	15
statistische naverwerking	15
aansturen runs	15
visualisatie ballaststelsel	p.m.
aanpassen documentatie 1D2D	20

voordelen	nadelen
1D2D al in gebruik bij RWS	factor 2 à 3 langzamere rekensnelheid
2D-schematisatie havens mogelijk	
SOBEK-modellenlijn	

Variante 2 past goed in de bestaande modellenlijn bij Rijkswaterstaat. Het systeem biedt ook de mogelijkheid in de toekomst havens 2D te schematiseren. Door de impliciete rekentechniek is de rekensnelheid een factor 2 à 3 langzamer dan variante 1.

### Variante 3: Uitbreiding 1D2D met nieuwe module Maeslantkering

Variante 3 is gebaseerd op het uitbreiden van het gekoppelde 1D2D model (SOBEK-LOWLAND + Delft-FLS) met een nieuw op te zetten module in FORTRAN '90, die de dynamica van de Maeslantkering beschrijft. Het betreft hierbij zowel een beschrijving van de regeling als het ballaststelsel. De invloed van de Maeslantkering op de waterbeweging is vergelijkbaar met andere “hydraulic structures” in SOBEK-LOWLAND: een vernauwing van het natte doorstroomoppervlak en een extra kwadratische verliesterm. In deze variante wordt de module opgezet uitgaande van de documenten en specificaties van het BES en het ballaststelsel. Voor variante 3 hoeft dus geen licentie RAS/FLOW voor orde fl. 100.000,- aangeschaft te worden. Overleg met de ontwikkelaars van RAS/FLOW G. Bruynzeel (DIGITEC) en F. Redeker (Redeker & Partners) lijkt wel bijzonder gewenst.



Naast de opzet van de module voor de dynamica van de kering zal er rond het 1D2D-model een schil gebouwd moeten worden om volgens een probabilistische aanpak simulaties uit te kunnen voeren en de resultaten statistisch na te bewerken tot de gewenste overschrijdingslijnen voor de belasting op de kering. De uitvoermogelijkheden van het 1D2D-systeem moeten worden uitgebreid met specifieke zaken m.b.t. de belasting op de kering (bijvoorbeeld negatief verval).

Ontwikkelingen	inspanning (in dagen)
inbouwen seiches randvoorwaarde	10
opzet module BES + ballastsysteem + koppeling 1D2D	200
kennisoverdracht: begeleiding door Redeker&Partners/DIGITEC	15
statistische naverwerking	15
aansturen runs	15
visualisatie ballastsysteem	p.m.
aanpassen documentatie 1D2D	20 dagen

voordelen	nadelen
kennisopbouw bij ontwikkelaar	grote inspanning
1D2D al in gebruik bij RWS	factor 2 à 3 langzamere rekensnelheid
2D-schematisatie havens mogelijk	
SOBEK-modellenlijn	

## 6 Conclusies

Om ook in de toekomst de belasting op de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg, mede onder invloed van seiches, nauwkeurig te kunnen bepalen, bestaat bij Rijkswaterstaat de wens om hiervoor een modelinstrument te hebben in de Rijkswaterstaat standaard software omgeving. Op basis van het afstudeerwerk van E. de Haas (1998) is geconcludeerd dat de opslinging van seiches in havenbekkens door inkomende golven van zee het meest efficiënt en nauwkeurig kan worden berekend door een combinatie van een 1D model voor de Nieuwe Waterweg met een 2D model van het zeegebied voor de monding. In het nieuwe modelinstrument van Rijkswaterstaat zal daarom een dergelijke gekoppelde 1D2D modelaanpak mogelijk moeten zijn. In deze voorstudie zijn drie varianten bestudeerd:

- Uitbreiden en herstructureren van RAS/FLOW.
- Uitbreiden van het 1D2D gekoppeld modelsysteem SOBEK-LOWLAND en Delft-FLS en met een geherstructureerde module uit RAS/FLOW voor de dynamica van de stormvloedkering.
- Uitbreiden van het 1D2D gekoppeld modelsysteem SOBEK-LOWLAND en Delft-FLS en met een nieuw op te zetten module voor de dynamica van de stormvloedkering.

Er is een sterke interactie tussen de waterbeweging ter plaatse van de kering en de horizontale en verticale positie van de deuren. Vereenvoudiging van de beschrijving van het ballaststelsel voor de bepaling van de belasting op de stormvloedkering is daarom niet acceptabel.

### *Technische haalbaarheid*

Alle drie varianten zijn technisch haalbaar. Zowel de ruimtelijke discretisaties in RAS/FLOW als SOBEK-LOWLAND zijn gebaseerd op een "versprongen" rooster. Vanuit numeriek-wiskundig oogpunt is in alle drie varianten de koppeling op basis van debieten van een 1D model met een 2D model mogelijk. In het 1D2D gekoppeld modelsysteem SOBEK-LOWLAND en Delft-FLS is de koppeling al gerealiseerd en uitgebreid getest (WL | delft hydraulics, 1999c). Ook de modellering van de stormvloedkering in het 1D model van de Nieuwe Waterweg als een gereduceerd nat doorstroomoppervlak in de continuïteitsvergelijking en een extra verliesterm in de impulsvergelijking is bij alle drie de varianten numeriek mogelijk. Het natte doorstroomoppervlak ter plaatse van kering wordt gebaseerd op de waterstanden en snelheden van het oude tijdsniveau. Deze expliciete aanpak is al succesvol toegepast in RAS/FLOW. Omdat in alle drie de varianten deze implementatie van RAS/FLOW wordt gevolgd en de tijdstap voor deze toepassing bepaald door de kortste seiches ook in variant 2 en 3 niet zal worden aangepast verwachten we geen numerieke stabiliteitsproblemen.

### *Hergebruik software*

De besturing van de Maeslantkering en de regeling van het ballaststelsel zijn complex. Een algoritmische beschrijving is al volledig geïmplementeerd in RAS/FLOW. Opnieuw bouwen en testen van deze onderdelen van RAS/FLOW op basis van de technische

specificaties vereist een omvangrijke inspanning (orde 200 dagen). Variant 3 vergt daarom dan ook de meeste inspanning in mandagen en doorlooptijd. Hergebruik van RAS/FLOW of modules er uit, is derhalve bijzonder aan te bevelen. RAS/FLOW is echter geprogrammeerd in GFA Basic, een programmeertaal die niet tot de Rijkswaterstaat standaard voor rekentechnische programma's behoort. Dit betekent dat de programmatuur omgezet dient te worden naar een andere programmeertaal (FORTRAN of C).

Het grootste gedeelte van de RAS/FLOW code bestaat uit de module voor de beschrijving van het ballaststelsel (5000 regels) en de visualisatie module (2000 regels). Het 1D waterbewegingsmodel is slechts een klein onderdeel van de code. Voor variant 1 en 2 dient de module voor de regeling en het ballaststelsel omgezet te worden naar een andere programmeertaal. De inspanning voor het omzetten van de visualisatie module is buiten beschouwing gelaten.

*Het verschil in inspanning voor de realisatie van variant 1 en 2 betreft vooral de documentatie, en de aansturing en naverwerking van de simulaties, wat een relatief klein onderdeel is van de vereiste activiteiten.*

Om de software in beheer en onderhoud te kunnen nemen is gedetailleerde kennis van de broncode nodig. Deze kennis is nu aanwezig bij ontwikkelaars van RAS/FLOW G. Bruynzeel (DIGITEC) en F. Redeker (Redeker & Partners) en zal voor variant 1 en 2 overgedragen moeten worden naar de Rijkswaterstaat beheerder. Bij variant 3 wordt deze kennis tijdens de ontwikkeling opgebouwd.

#### ***Minder modellen en modelschematisaties***

Bij Rijkswaterstaat Directie Zuid Holland, bestaat de wens om zo weinig mogelijk verschillende waterbewegingsmodellen en modelschematisaties te hebben voor hetzelfde gebied. Variant 2 en 3 sluiten aan bij de SOBEK-modellenlijn. Weliswaar wijkt de schematisatie van SOBEK-LOWLAND af van SOBEK-RIVERS: LOWLAND rekent in snelheden en waterstanden en gebruikt een "versprongen" rooster (waterstand in knopen en snelheid in takken) en RIVERS rekent in debieten en waterstanden en gebruikt (overeenkomstig ZWENDL) het compacte Preismann-schema. Voor het Noordelijk Deltabekken met bijna rechthoekige profielen zullen de verschillen in de numerieke resultaten gering zijn. Een ZWENDL-schematisatie overzetten naar SOBEK-LOWLAND of RAS/FLOW vraagt om een conversieslag. SOBEK-LOWLAND en RAS/FLOW kunnen dezelfde schematisatie gebruiken. Op dit moment worden er vergelijkende berekeningen uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA voor het Noordelijk Deltabekken tussen de beide SOBEK versies (M3190, "Onderzoek rekenschema's SOBEK"). De resultaten zijn nog niet bekend. De implementatie van "hydraulische structuren", zoals de Maeslantkering is op een versprongen rooster numeriek aanzienlijk gemakkelijker en robuuster als in het Preismann-schema. Een beslissing over het gebruik van SOBEK-LOWLAND bij Rijkswaterstaat (Directie Zuid Holland) is nog niet genomen.

Door implementatie in het gekoppelde 1D2D-systeem SOBEK-LOWLAND met Delft-FLS kan ook voor andere toepassingen bijvoorbeeld waterkwaliteit of slibverspreiding in het Noordelijk Deltabekken model de dynamica van Maeslantkering in beschouwing genomen worden.

Op basis van deze voorstudie beveelt WL | delft hydraulics variant 2 aan. De motivatie hiervoor is als volgt:

1. variant 2 maakt gebruik van bestaande kennis m.b.t. de algoritmes voor de beschrijving van sturing en het ballastsysteem van de Maeslantkering (hergebruik module RAS/FLOW)
2. variant 2 maakt gebruik van onderdelen die al uitgetest zijn, de inspanning voor realisatie is daarom beperkt (wel kosten aankoop licentie RAS/FLOW)
3. variant 2 sluit aan bij de nieuw ontwikkelde 1D2D-modellenlijn van Rijkswaterstaat DWW en WL | delft hydraulics
4. voor variant 2 is al documentatie aanwezig, er zal alleen een beschrijving van de nieuwe functionaliteit moeten worden toegevoegd.

## 7 Referenties

- Bouwdienst Rijkswaterstaat Hoek van Holland, 1995: Schil rond SOBEEK ten behoeve van het Beslis & Ondersteunend Systeem voor de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg en de stormvloedkering in het Hartelkanaal (contract BDW 5021). SVKW-BOS-94226 versie 2.0.
- Haas, E. de, 1998: Boundary conditions for a seiche model. Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Kernkamp, H.W.J., Otta, A., Uittenbogaard, R.E. and Veldman, J.J., 1994: Seiches Europoort. Analyse en betrouwbaarheid van seiches-berekeningen met PHAROS en TRISULA. WL | delft hydraulics rapport Z568/H1866.
- Laguzzi, M., 1998: Uitbreiding Delft-FLS/koppeling met Sobek. Deelrapport 1: onderzoek naar mogelijke verbeteringen performance Delft-FLS. WL | Delft hydraulics rapport R3240.
- Méndez Lorenzo, A.B., 1997: Seiches in het Europoortgebied. Numerieke modellering van de zeerand in een ééndimensionaal model. Afstudeerrapport.
- MSM, 1997: Ballaststelsel, functionaliteit 1996. CTR-nummer 2170. Documentnummer W-03-0082.
- Redeker & Partners B.V., 1999: R/FLOW. Simulatie SVKW. Integrale simulatie van het benedenrivierengebied met de Stormvloedkering Nieuwe Waterweg, inclusief beslis-, besturings- en ballaststelsel, alsmede het effect van seiches.
- WL | Delft hydraulics, 1997: Sobek; Technical reference manual. Version 1.18.
- WL | Delft hydraulics, 1999a: Uitbreiding Delft-FLS/koppeling met Sobek. Delft1D2D: systeemdokumentatie. WL | Delft hydraulics rapport R3240/R3260.
- WL | delft hydraulics, 1999b: Uitbreiding Delft-FLS/koppeling met Sobek. Principes van de koppeling tussen Delft FLS en Sobek-Lowland (Delft1D2D). WL | delft hydraulics rapport R3240/R3260.
- WL | delft hydraulics, 1999c: Uitbreiding Delft-FLS/koppeling met Sobek. Delft1D2D: tests implementatie koppeling tussen Delft-FLS en Sobek-Lowland. WL | delft hydraulics rapport R3240/R3260.



## **wl | delft hydraulics**

**Rotterdamseweg 185  
postbus 177  
2600 MH Delft  
telefoon 015 285 85 85  
telefax 015 285 85 82  
e-mail [info@widelft.nl](mailto:info@widelft.nl)  
internet [www.widelft.nl](http://www.widelft.nl)**

**Rotterdamseweg 185  
p.o. box 177  
2600 MH Delft  
The Netherlands  
telephone +31 15 285 85 85  
telefax +31 15 285 85 82  
e-mail [info@widelft.nl](mailto:info@widelft.nl)  
internet [www.widelft.nl](http://www.widelft.nl)**

