

# Uitbreiding ESTMORF model Westerschelde

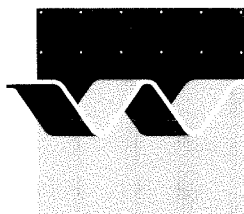
Afregelen van het waterbewegingsmodel Implic

M.C.J.L. Jeuken

A.W. v.d. Weck

Verslag

december 1999



**wl | delft hydraulics**



<b>OPDRACHTGEVER:</b>	Ministerie van Verkeer en Waterstaat Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ Postbus 20907 2500 EX 's-Gravenhage				
<b>TITEL:</b>	<b>Uitbreiding ESTMORF model Westerschelde</b> Afregeven van het waterbewegingsmodel Implic				
<b>SAMENVATTING:</b>	<p>De onderliggende waterbeweging voor het uitgebreide ESTMORF model van de Westerschelde wordt bepaald met behulp van een ééndimensionaal IMPLIC model. Dit model is recentelijk uitgebreid met de buitendelta, zeewaarts van de lijn Vlissingen - Breskens tot aan de 20 meter dieptelijn. Het op deze manier uitgebreide waterbewegingsmodel moet opnieuw worden afgeregeld, met behulp van randvoorwaarden op de nieuwe zeewaartse rand van het model. Daarnaast is een beperkt vooronderzoek naar de relatieve invloed van de belangrijkste afregelings-parameters op de asymmetrie van het verticale getij gewenst.</p> <p>Het primaire doel van het huidige onderzoek is het opstellen van een afgeregeld waterbewegingsmodel van de gehele Westerschelde, inclusief het mondingsgebied. Hierbij ligt de nadruk op het mondingsgebied, de rest van het model is reeds eerder gekalibreerd.</p> <p>Om dit doel te bereiken is het model uitgebreid gecontroleerd en vervolgens in een aantal stappen afgeregeld. Bij controle is gebleken dat de bestaande modelschematisatie (met per vak verschillende oppervlakken voor het begin- en eindprofiel) niet betrouwbaar bleek. Dit is ondervangen door deze profielen te vervangen door gemiddelde profielen, net als in het bestaande model van de Westerschelde. Het afregelen bestond vervolgens voornamelijk uit het aanpassen van de ruwheden in het model. Dit bleek voor het grootste deel van het model bevredigende resultaten op te leveren. De debietverdeling tussen de Wielingen en de Sardijngeul / Oostgat / Deurloo combinatie werd tenslotte nauwkeurig afgeregeld door lokale verschuiving van de vakgrenzen en variatie van de ruwheden in eb- en vloedrichting.</p> <p>Geconcludeerd kan worden dat het aldus afgeregelde model de waterstanden en debieten in het mondingsgebied redelijk goed benaderd, zodat het model kan worden gebruikt voor het uitvoeren van morfodynamische modelberekeningen met behulp van ESTMORF. Uit een (overigens beperkt uitgevoerde) gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de weergave van de asymmetrie van waterstanden in de buitendelta door het model weinig gevoelig is voor aanpassingen van de bodemruwheid.</p>				
<b>REFERENTIES:</b>	Offerte-aanvraag RIKZ/OS-99.6508, datum 4 augustus 1999 Offerte MCM6217/Z2701/db, datum 13 augustus 1999 Opdrachtbon 22992173, ontvangen op 25 augustus 1999				
<b>REV.</b>	<b>AUTEUR</b>	<b>DATUM</b>	<b>OPMERKINGEN</b>	<b>REVIEW</b>	<b>GOEDKEURING</b>
1.0	A.W. vd Weck	Okt 1999	Concept	Wang Z.B.	
2.0	M.C.J.L. Jeuken	Dec 1999	Definitief	Wang Z.B.	T. Schilperoort
<b>TREFWOORDEN</b>			<b>INHOUD</b>		<b>STATUS</b>
ID model, ESTMORF, Implic, Westerschelde			TEKST: TABELLEN: FIGUREN: APPENDICES:	18 bladzijden 4 3 geen	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG <input type="checkbox"/> CONCEPT <input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF
			PROJECTNUMMER Z2701		

# Inhoud

<b>1 Inleiding en doelstelling.....</b>	<b>1</b>
1.1 Achtergrond en probleemstelling.....	1
1.2 Doel.....	1
1.3 Aanpak en organisatie.....	2
<b>2 Het uitgebreide Implic model .....</b>	<b>3</b>
2.1 Bodemschematisatie .....	3
2.2 Modelschematisatie .....	3
2.3 Randvoorwaarden en controlegegevens .....	4
2.4 Afregeling van het getijmodel .....	5
2.5 Resultaten van het gekalibreerde model .....	9
2.5.1 Waterstanden.....	9
2.5.2 Getijvolumina en maximale stroom snelheden.....	13
2.6 Conclusies afregeling waterbewegingsmodel.....	14
<b>3 Gevoeligheidsanalyse .....</b>	<b>15</b>
3.1 Inleiding.....	15
3.2 Analyse en resultaten .....	15
<b>4 Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>17</b>
<b>5 Literatuur .....</b>	<b>18</b>

# I Inleiding en doelstelling

## I.1 Achtergrond en probleemstelling

Het Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ voert voor de Directie Zeeland van Rijkswaterstaat onderzoek uit naar de werking en de ontwikkeling van de morfologie van de Westerscheldemond. Een belangrijk deel van dit onderzoek is gewijd aan het verzamelen en integreren van kennis om antwoord te kunnen geven op vragen naar de gevolgen van bagger- en stortwerkzaamheden in het estuarium en om richtlijnen voor de uitvoering van het baggerwerk te kunnen geven. Daarnaast wordt door het RIKZ in het kader van de produkten Veiligheid en Zeespiegelrijzing onderzoek uitgevoerd naar veranderingen in het getij van de Westerschelde over een periode van 50 jaar en de daarmee gepaard gaande morfologische veranderingen. Deze onderzoeken zullen worden uitgevoerd met behulp van het morfologische model ESTMORF. Voor een zinvolle toepassing van dit model is het echter noodzakelijk dat het model wordt uitgebreid met het mondingsgebied van de Westerschelde. Deze uitbreiding is nodig om te voorkomen dat de morfologische veranderingen als gevolg van ingrepen in de Westerschelde de hydrodynamische randvoorwaarden van de open zeerand van het model beïnvloeden. Bovendien kunnen hydraulische en morfologische veranderingen in het mondingsgebied zelf ook invloed hebben op de waterbeweging en het morfologische gedrag van de rest van het estuarium.

De onderliggende waterbeweging voor het morfologische model wordt bepaald met behulp van een ééndimensionaal getijdemodel, waarmee de debieten en waterstanden van het interessegebied over een lange periode gedetailleerd kunnen worden bepaald. Dit model, gebaseerd op het rekenprogramma IMPLIC, omvatte oorspronkelijk het estuarium tot aan de lijn Vlissingen - Breskens. Recentelijk is de schematisatie van het bestaande model uitgebreid met de buitendelta, zeewaarts van de lijn Vlissingen - Breskens tot aan de 20 meter dieptelijn (WL | Delft Hydraulics, 1999). Het op deze manier uitgebreide waterbewegingsmodel moet opnieuw worden afgeregeld, met behulp van randvoorwaarden op de nieuwe zeewaartse rand van het model.

Het RIKZ heeft WL | Delft Hydraulics door middel van opdrachtbon 22992173 gevraagd om het uitgebreide model af te regelen. Daarnaast dient een beperkt vooronderzoek te worden uitgevoerd naar de relatieve invloed van de belangrijkste afregelings-parameters op de asymmetrie van het verticale getij.

## I.2 Doel

Het primaire doel van het huidige onderzoek is het opstellen van een afgeregeld waterbewegingsmodel van de gehele Westerschelde, inclusief het mondingsgebied. Hierbij ligt de nadruk op het mondingsgebied, de rest van het model is reeds eerder gecalibreerd. Een tweede doel betreft het bepalen van het relatieve belang van de calibratie-parameters voor het reproduceren van de verticale getijsymmetrie in het model.

### 1.3 Aanpak en organisatie

Het ééndimensionale waterbewegingsmodel van het estuarium is in eerdere projecten uitgebreid met de buitendelta. Voor het huidige project werd een Dufrow-schematisatie van het gehele model aangeleverd door het RIKZ. De randvoorwaarden op de nieuwe zeerand van het model zijn door RIKZ bepaald met behulp van het Kuststrookmodel van Rijkswaterstaat. Naast de randvoorwaarden heeft het RIKZ controlegegevens voor de afregeling toegeleverd.

Met behulp van deze gegevens is het model gevalideerd. In eerste instantie werd het model afgeregeld op correcte weergave van de waterstanden. Vervolgens zijn de snelheden en de debieten (met name de debietverdeling over de Wielingen en de Sardijngemaal) gecontroleerd en waar nodig bijgesteld. Bij deze afregeling werden de ruwheden van de verschillende geulsegmenten en de verdeling van het doorstroomoppervlak van de buitendelta over de verschillende vakken aangepast. Na afregeling van het getijmodel op waterstanden en debieten is een vooronderzoek uitgevoerd naar het relatieve belang van parameters, die bij het afregelen van het hydraulische model de getijsymmetrie bepalen. Hierbij is gekeken naar de invloed van veranderingen in de ruwheid van de modelvakken in het mondingsgebied van de Westerschelde. Zowel de gemiddelde ruwheid als de verschillen in ruwheid tussen eb en vloed werden hierbij betrokken.

Het hier gerapporteerde onderzoek is uitgevoerd door John Cornelisse, Claire Jeuken en Arjan van der Weck, geassisteerd door Rinze Bruinsma en Willy ter Horst. De rapportage werd opgesteld door Claire Jeuken en Arjan van der Weck. De resultaten van het onderzoek werden intern beoordeeld door Wang Zheng Bing.

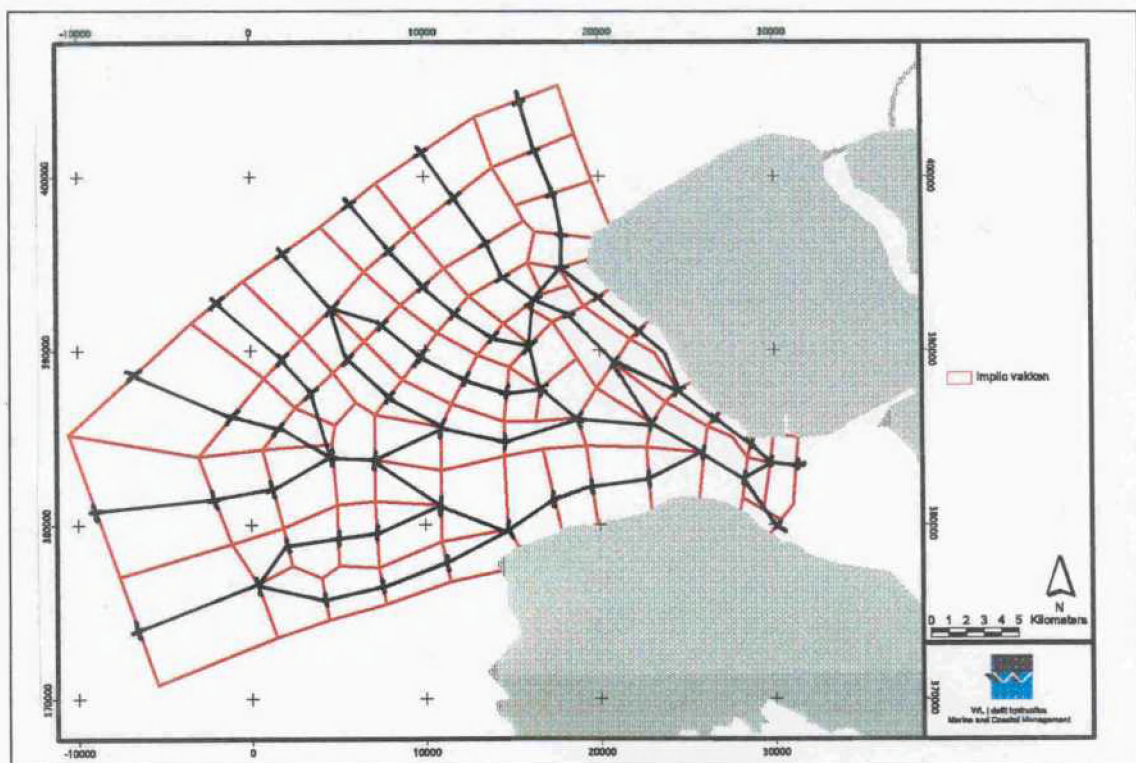
## 2 Het uitgebreide Implic model

### 2.1 Bodemschematisatie

Het Implic-model dat wordt gebruikt als basis voor het Estmorf model van de Westerschelde is opgezet en afgeregeld voor de situatie van 1968 - 1970. Dit geldt ook voor het met het mondingsgebied uitgebreide model van de Westerschelde. De bodemschematisatie is dan ook gebaseerd op lodingskaarten uit de periode eind jaren '60 - begin jaren '70. Voor het uitgebreide model is gebruik gemaakt van de bestaande schematisatie van de Westerschelde, aangevuld met het mondingsgebied zoals voorgesteld en beschreven in WL | Delft Hydraulics (1998). Daarnaast is door het RIKZ een wijziging aangebracht in het gedeelte van de schematisatie voor het Verdrongen Land van Saeftinge. De oorspronkelijke drie vakken in dat gebied zijn ieder in tien gelijke delen gesplitst om numerieke instabiliteiten in de relatief grote maar zeer ondiepe vakken te voorkomen.

Bij de aanvang van het onderzoek is door het RIKZ een Duflow-schematisatie (komt vrijwel overeen met een Implic-schematisatie) voor het mondingsgebied aangeleverd. De bodemligging van dit Duflow-model is door het RIKZ met behulp van de GIS-applicatie Eendims zodanig geschematiseerd dat per modelvak de dwarsdoorsnede van de geul en de komberging zo goed mogelijk wordt benaderd (Van der Male, 1999a).

### 2.2 Modelschematisatie



Figuur 1 Netwerkstructuur van het uitgebreide model van de Westerschelde

De vakindeling van het Implic-model van de Westerscheldemonde is beschreven in WL | Delft Hydraulics (1999). Door RIKZ is aan de hand van de opgestelde vakindeling een modelschematisatie gegenereerd. Figuur 1 geeft een overzicht van het netwerk van het model.

De aangeleverde DufLOW-schematisatie van de Westerscheldemonde is opgezet volgens de standaard die wordt gebruikt bij Implic berekeningen van de waterbeweging. Dit houdt in dat ieder modelvak wordt beschreven aan de hand van een begin- en eindoppervlak, bergende breedtes en een hydraulische straal op verschillende dieptes. Deze parameters zijn bepaald met behulp van de Arc-Info applicatie Eendims en GIS-bestanden van de bodemligging van de monding van de Westerschelde. Hierbij wordt overigens niet uitsluitend uitgegaan van de bekende bodemligging. Bij de berekening van de verschillende parameters wordt gelijk enige schematisatie aangebracht (Van der Male, 1999b; Langerak, 1999), gebaseerd op de grote ervaring die bij Rijkswaterstaat voorhanden is met het gebruik van ééndimensionale waterbewegingsmodellen voor het beschrijven van de waterbeweging in estuaria.

Het is noodzakelijk gebleken de aangeleverde DufLOW-schematisatie op drie punten aan te passen voordat er probleemloos met behulp van Implic mee kon worden gerekend. In de eerste plaats is het format aangepast (volgorde van parameters in de schematisatie). Vervolgens is de vaknummering in het mondingsgebied gewijzigd omdat Implic geen vaknummers boven 400 herkent. Tot slot is de code van Implic aangepast om met het totale aantal vakken van de schematisatie te kunnen rekenen. Na deze wijzigingen was het mogelijk om met het nog niet afgeregelde model een berekening uit te voeren.

### **2.3 Randvoorwaarden en controlegegevens**

De zeevaartse randvoorwaarden (waterstanden) voor het model zijn door het RIKZ berekend met een 2DH mathematisch model van de kustzone (kuststrook model). Met dit model zijn randvoorwaarden op de zeerand van het Implic model berekend voor de periode van 9 mei 1971 tot 11 mei 1971. In 1971 waren de uitbreiding van de havenhoofden van Zeebrugge en de eerste verdieping van de Wielingen overigens nog niet gerealiseerd. Deze situatie is weergegeven in de bodemschematisatie van het Implic model. De bodemschematisatie van het 2DH model is echter gebaseerd op meer recente lodingsgegevens (1986), waarin de bovengenoemde ingrepen wel zijn gerealiseerd. Hierdoor kunnen kleine afwijkingen in de randvoorwaarden die werden gebruikt voor het Implic model zijn ontstaan. De op deze wijze verkregen randvoorwaarden werden aangeleverd aan WL | Delft Hydraulics. De randvoorwaarden aan de landvaartse rand van het model (afvoer van de diverse Scheldetakken) zijn overgenomen van het bestaande Implic model van de Westerschelde.

Naast de randvoorwaarden werd voor de afregeling van het model ook gebruik gemaakt van controlegegevens. Deze gegevens bestaan uit waterstandsregistraties in een aantal stations langs de Westerscheldemonde (Westkapelle en Cadzand) en de Westerschelde (Vlissingen, Terneuzen, Hansweert, Bath). Ze werden gebruikt om de reproductie van de waterstanden in de mondingsgebied te controleren en te beoordelen of de uitbreiding van het model de weergave van de waterstanden in de Westerschelde beïnvloedt. Daarnaast is gebruik gemaakt van afvoergegevens in een aantal raaien over het mondingsgebied om de gesimuleerde debietverdeling tussen de diverse geulen (met name tussen de Wielingen,

de Sardijngeul en het Oostgat) te controleren. In een later stadium van het onderzoek kwamen Belgische waterstandsgegevens beschikbaar van de stations Zeebrugge, Blankenberge en Oostende.

Alle randvoorwaarden en controlegegevens werden voorafgaand aan het eerste gebruik beoordeeld op geschiktheid. Hierbij werd gekeken of de aangeleverde gegevens reële waarden gaven, zowel absoluut als in onderling verband. De later aangeleverde waterstandsgegevens van de drie Belgische stations vertoonden grote verschillen met de overige beschikbare metingen. In overleg met de opdrachtgever is geconcludeerd dat er waarschijnlijk sprake is van een reductiefout in de Belgische waterstandsmetingen.

## 2.4 Afregeling van het getijmodel

In deze paragraaf wordt het totale calibratie proces beschreven (zie Tabel 1). Hierbij zijn twee fasen onderscheiden die elk weer kunnen worden onderverdeeld in verschillende stappen. Tijdens de eerste fase zijn diverse gevoeligheden van het model afgetast. Tijdens de tweede fase is op de resultaten van fase 1 teruggegrepen, wat uiteindelijk heeft geresulteerd in een ‘definitieve’ calibratie. De resultaten van deze definitieve calibratie worden besproken in paragraaf 2.5.

Aanpassing	Omschrijving
FASE 1	
1	$k_{eb} = k_{vloed} = 35$ in het hele mondingsgebied.
2	$k_{eb} = 40, k_{vloed} = 35$ in het hele mondingsgebied.
3	$k_{eb} = 40, k_{vloed} = 30$ in het hele mondingsgebied.
4	Aanpassing van $k$ per geul.
5	Aanpassingen van de oppervlakte verdeling Sardijngeul / Oostgat / Deurloo en de definitie van de oppervlakten $A_1$ en $A_2$ van een vak.
6	Optimalisatie ruwheden.
7	Aanpassing uitvoerdefinitie waterstand stations naar aanleiding van aanvullende informatie over de precieze locatie.
8	Optimalisatie ruwheden.
9	Aanpassing zeewaartse randvoorwaarden.
10	Gevoeligheid geullengte en dwarsdoorsnede bij Westkapelle.
FASE 2	
	Uitgangspunt: schematisatie na stap 4, gecalibreerde randvoorwaarden en uniforme ruheidswaarden.
1	Aanpassing verdeling doorstroomoppervlak tussen Sardijngeul en de Wielingen in de keel van het estuarium.
2	Ruimtelijke differentiatie ruwheden. Eb- en vloedwaarden per geul gelijk.
3	Naast ruimtelijke differentiatie ook verschillende $k$ waarden voor eb en vloed gevolgd door een optimalisatie slag.

Tabel 1 Overzicht van de verschillende stappen tijdens de calibratie ( $k$ =reciproke Manning waarde).

### Fase I

Het doel van de eerste sommen tijdens fase I was een controle en eventuele verbetering van de weergave van de waterstanden in het mondingsgebied en de rest van de



Westerschelde. Modelaanpassingen die in deze fase kunnen worden uitgevoerd bestaan uit het wijzigen van de moeilijk te meten ruwheidsparameters en het variëren van de overige geulparameters binnen de meetnauwkeurigheid. Uit een analyse van mogelijke foutenbronnen bij het opstellen van een Implic-schematisatie is gebleken dat fouten van ongeveer 5 procent in de bepaling van de geulparameters geen uitzondering zijn. De bepaling van de aslengte kan zelfs aanzienlijk onnauwkeuriger zijn (Langerak, 1984). In de praktijk is de calibratie een iteratief proces: na iedere wijziging in bijvoorbeeld de geometrie worden indien nodig de ruwheden opnieuw geoptimaliseerd.

Voor de calibratie van de waterstanden is de bodemruwheid, die per vak in de vloed- en in de ebrichting wordt gedefinieerd, in vier stappen aangepast:

1. Als eerste benadering is de reciproke Manning waarde in eb- en vloedrichting gelijk gesteld op 35. Dit resulteerde al in zinvolle resultaten over de gehele lengte van het estuarium.
2. Vervolgens zijn de reciproke Manning waarden tijdens eb verhoogd van 35 naar 40, waardoor het model gladder is geworden en dus sneller leegloopt.
3. De reciproke Manning waarden tijdens vloed werden verlaagd van 35 naar 30, waardoor het model voor de vloedstroom ruwer werd en dus minder snel volloopt. Deze aanpassingen van de ruwheid in alle geulvakken van het mondingsgebied resulteerden in een duidelijke verbetering van de waterstandssimulatie, alhoewel er nog steeds sprake was van lokale afwijkingen (met name nabij Westkapelle).
4. Tot slot zijn de ruwheden per geul aangepast, waarbij variaties van de ruwheid in de lengterichting van een geul (Wielingen, Deurloo, Oostgat - Sardijngeul en de geulen over de Vlakte van de Raan) zoveel mogelijk werd vermeden. De reciproke Manning waarden in het Oostgat en de Sardijngeul zijn verlaagd (toenemende ruwheid, zowel bij vloed als bij eb), terwijl de reciproke Manning waarden in de Wielingen (vooral voor eb) zijn verhoogd. In de tusseliggende geulen zijn de ruwheden zodanig aangepast dat er geen grote sprongen in bodemruwheid over model optreden.

Deze calibratie leidde tot een redelijke simulatie van het waargenomen waterstandsverloop in het estuarium.

Na de calibratie van het verticale getij is een controle op de weergave van de debieten en stroomsnelheden in het model uitgevoerd. Hiervoor is met name gekeken naar de relatieve debietverdeling, dat wil zeggen uitgedrukt als percentage van het totale watertransport door de raai. Argument voor deze benadering is dat, gezien de destijds gebruikte meetmethoden, getwijfeld kan worden aan de absolute waarde van de gemeten debieten (Langerak, 1999).

Uit een eerste vergelijking bleek dat de debietverdeling in het mondingsgebied tijdens vloed goed vergelijkbaar was met de metingen. De verschillen tijdens eb waren groter. Met name de relatieve bijdrage van de ebdebieten door de Sardijngeul en het Oostgat aan het totale debiet bleek groter dan in de metingen.

Getracht is dit verschil tussen de modelresultaten en de metingen te verkleinen door de verdeling van het doorstroomoppervlak tussen de Sardijngeul/Oostgat en de Wielingen te wijzigen (aanpassing 5 in tabel 1). Hierbij zijn in totaal drie wijzigingen (a-c) aangebracht:

- 5a) Aanpassing van de verdeling van het doorstroomoppervlak tussen de Sardijngeul en de Wielingen ter hoogte van Vlissingen. Hierbij is het doorstroomoppervlak van de Sardijngeul aan de oostzijde (instroomzijde bij eb) verkleind en dat van de Wielingen

vergroot. De invloed op de debietverdeling tussen de Wielingen en de Sardijngeul-Oostgat bleek gering (1-2%).

- 5b) Aanpassing van de definitie van het doorstroomoppervlak in de invoerfile. Tijdens de aanpassing van de geulgeometrie bleek dat de weergave van de doorstroomoppervlakken zoals ingebouwd in de aangeleverde schematisatie niet logisch is: tussen het eindprofiel en beginprofiel van twee opeenvolgende vakken komen veel grotere verschillen (tot 30%) voor dan waarschijnlijk is. Hetzelfde geldt voor de berekende de hydraulische straal bij verschillende diepteniveaus: de toename van de hydraulische straal tussen deze verschillende niveaus is in het model vaak veel groter dan verwacht kan worden. Dit hangt vermoedelijk samen met de gehanteerde definities van deze parameter die niet gelijk is aan oppervlak gedeeld door natte omtrek. Deze constatering suggereren dat er wellicht nog fouten zitten in het door het RIKZ gebruikte programma Eendims. Geadviseerd wordt de implementatie van de berekeningswijze van de verschillende parameters grondig te controleren. Voor het huidige model is deze onzekerheid opgevangen door de begin- en eindprofielen van alle vakken in het mondingsgebied te middelen (A1 is gelijk aan A2) (aanpassing 6). Hierbij is ervan uitgegaan dat de totale inhoud, zoals met behulp van Eendims bepaald, wel correct is. Uit een eenvoudige controle van de modelschematisatie bleek dat dit waarschijnlijk wel het geval is. Overigens wordt opgemerkt dat schematisatie van het reeds langer bestaande Westerschelde-deel op een vergelijkbare manier tot stand is gekomen. De hydraulische straal in het model is niet aangepast. De fout die hierdoor ontstaat is niet bekend, maar vormt vooralsnog geen probleem voor het rekenmodel.
- 5c) Aanpassing van de geometrie van het Oostgat en Deurloo. Uit een verdere analyse bleek dat het knelpunt in de debietverdeling zich verderop in het Oostgat voordoet. Om de debietverdeling te verbeteren is, naast stap 5a, de vakgrens tussen beide geulen verplaatst in de richting van het Oostgat. De doorstroomoppervlakken van beide geulen werden evenredig aangepast. Het totale doorstroomoppervlak door deze twee geulen is hiermee hetzelfde gebleven. De aangebrachte verandering is fors, maar gezien de relatief brede ondiepte met zeer steile wanden tussen beide geulen morfologisch wel te verantwoorden. Door deze brede en vlakke ondiepte is het niet gemakkelijk uit metingen van de bodemdiepte te bepalen waar de waterscheiding tussen beide geulen ligt. Dus het diepere en kortere Oostgat wordt in de aangepaste schematisatie geknepen terwijl de ondiepere en langere Deurloo is verruimd. Deze aanpassing resulteerde in een veranderde debietverdeling tussen Oostgat/Deurloo en Wielingen in de orde van enkele procenten. Opgemerkt wordt dat door deze wijzigingen de relatieve verdeling van het doorstroomoppervlak in het model afwijkt van de metingen.

Na deze aanpassingen in de geometrie zijn de ruwheden in het model opnieuw geoptimaliseerd (stap 6). Vervolgens is naar aanleiding van aanvullende informatie over de precieze locatie van de waterstandstations in het mondingsgebied de uitvoerde definitie voor de modelberekeningen aangepast (stap 7). Hierna zijn de ruwheden nog een keer gecontroleerd en geoptimaliseerd (stap 8).

De berekende waterstanden bij Westkapelle bleken nog aan de lage kant. Daarnaast is er in het model sprake van een 'aggertje' tijdens hoogwater. Het eerste verschil is grotendeels verholpen door de zeewaartse randvoorwaarden te wijzigen. Hierbij zijn de waterstanden op het meest noordelijke vak (zie Figuur 1) met 4 procent vergroot. Om een geleidelijke

overgang te creëren zijn de waterstanden in de drie meest zeevaartse vakken ten zuiden van het eerste vak vergroot met respectievelijk 3, 2 en 1 procent.

Het ‘aggertje’ wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de vernauwing van de geulvakken in het traject tussen de zeevaartse rand tot aan het Oostgat nabij Westkapelle, met als gevolg een gedeeltelijke reflectie van de getijgolf. Deze verstoring wordt gedurende het grootste gedeelte van het getij onderdrukt. Tijdens hoogwater, het moment van stroomkentering, wordt de verstoring zichtbaar. Een simulatie waarin de vaklengte van de twee meest zeevaarts gelegen vakken is gehalveerd bevestigt dit vermoeden. Deze aanpassing resulteert in een gladdere vloedtop, waarin de oorspronkelijke verstoring nog wel te herkennen is. Een vergroting (40%) van het doorstroomoppervlak en de diepte van de uitloop van de geul van de Rassen nabij Westkapelle beïnvloedt het waterstandsverloop niet noemenswaardig. Dit impliceert dat met name de afname van de bergende breedte in het traject zeevaartse rand- Westkapelle, verantwoordelijk is voor het ‘aggertje’ in de waterstand bij Westkapelle. Dit moeilijk te verhelpen verschijnsel lijkt weinig invloed te hebben op de waterbeweging van het mondingsgebied omdat het alleen merkbaar tijdens het moment van stroomkentering.

De door het model berekende waterstanden komen redelijk tot goed overeen met de metingen. De debietverdeling is ondanks de forse ingrepen tijdens stap 5 echter nog steeds matig: het getijvolume door het verkleinde Oostgat is nog 10% te groot. Bovendien is de relatieve verdeling van het doorstroomoppervlak tussen Deurloo en Oostgat zodanig gewijzigd dat deze eigenlijk niet meer goed te vergelijken is met de metingen. Daarom is op basis van de resultaten van deze fase een tweede calibratiefase uitgevoerd.

## Fase 2

Uitgangspunt voor deze fase was de modelschematisatie na stap 4 van fase 1 in combinatie met:

- de gemiddelde waarden voor het doorstroomoppervlak in plaats van verschillende waarden voor het begin en eind van een vak (uitkomst stap 5, fase 1).
- een uniforme bodemruwheid in ruimte en tijd in het mondingsgebied.
- de gecalibreerde randvoorwaarden (stap 9, fase 1).

Dit ‘basis’ model is vervolgens in vier stappen aangepast:

Stap 1: In de eerste plaats is de verdeling van het doorstroomoppervlak in de keel van de monding gewijzigd. Het overgangsgebied tussen Honte en Sardijngeul had in de oorspronkelijke schematisatie een relatief doorstroomoppervlak van 30% (van het totaal). Dit vak sluit direct aan op de Sardijngeul en Oostgat die in de rest van het mondingsgebied een relatief doorstroomoppervlak hebben van 10-15%. Dit verschil is rechtgetrokken door in de keel de verdeling van het gemiddelde doorstroomoppervlak te wijzigen. Hierbij is het geulvak dat de verbinding vormt tussen Honte en Sardijngeul 800 meter smaller gemaakt, terwijl de Wielingen 800 meter breder is gemaakt. Als gevolg van de aanpassing bedraagt de bijdrage van het verkleinde overgangsgebied ongeveer 12 procent van het totale doorstroomoppervlak. Deze aanpassing verbeterde de debietverdeling met een paar procent.

Stap 2: In het aangepaste model stroomt nog steeds te veel water door de noordelijke tak Oostgat-Deurloo ten koste van de zuidelijke tak Wielingen (orde 12%). Daarom is er een ruimtelijke variatie in de ruwheid opgelegd waarbij de noordelijk geulen ruwer zijn

gemaakt ( $k=45$ ) en de zuidelijke geul gladder ( $k=55$ ) is gemaakt. De Vlake van Raan bleef ongewijzigd ( $k=50$ ). De reciproke Manning waarden voor eb en vloed zijn per geul hetzelfde. Deze exercitie resulteerde in een lichte verbetering van de debietverdeling. De hoogwaterstanden bij Vlissingen waren iets te groot geworden: de Wielingen was iets te glad gemaakt. Daarnaast bleek dat de afwijking in de debietverdeling tijdens eb enkele procenten groter was dan tijdens vloed (vooral ter hoogte van debietraai 11).

Stap 3: De debietmetingen duiden op een vloeddominantie in het Oostgat/Sardijngeul en een ebdominantie in de Wielingen. Om dit fenomeen te kunnen simuleren zijn de ruwheden voor eb en vloed in een geul verschillend gemaakt. Daarnaast zijn alle ruwheden nog enigszins verlaagd om de tekortkomingen die uit de vorige stap naar voren kwamen te verbeteren. Het nieuwe ruwheidsplaatje is samengevat in tabel 2.

Geul	vloed	eb
Sardijngeul / Oostgat / Deurloo	40	35
Vlake van Raan	45	45
Wielingen	45	55

Tabel 2. Verdeling van reciproke Manningwaarden in het gecalibreerde model

Deze laatste aanpassing levert van alle exercities die tijdens fase 1 en 2 zijn uitgevoerd de beste overeenkomsten op tussen model en metingen. Zoals uit de resultaten in de volgende paragraaf zal blijken reproduceert het model de waterstanden goed en zijn de gesimuleerde debietverdeling en snelheden zeer acceptabel.

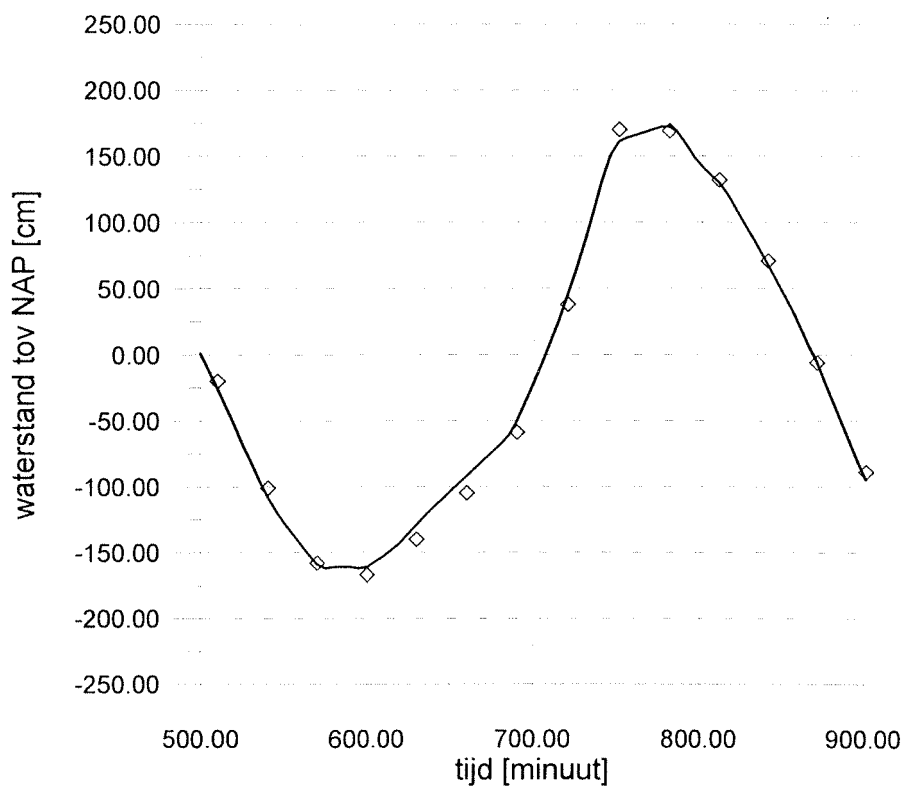
## 2.5 Resultaten van het gekalibreerde model

### 2.5.1 Waterstanden

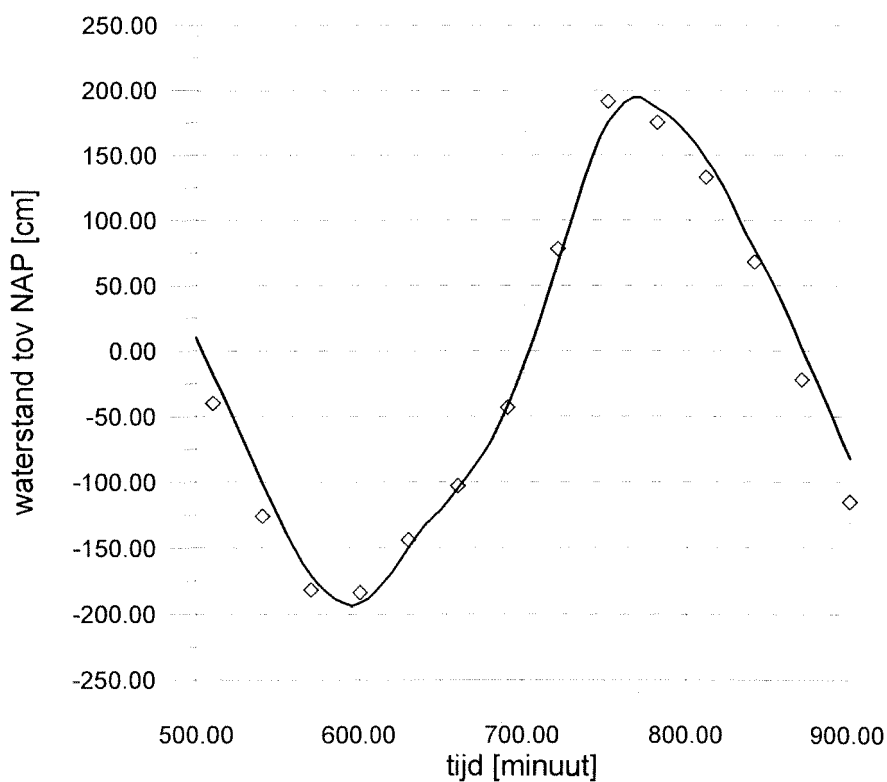
Figuur 2 toont de vergelijking tussen de berekende en gemeten waterstanden voor de diverse stations in het mondingsgebied en langs de Westerschelde. In deze figuren kan het volgende worden waargenomen:

- Bij alle stations zijn de gemeten en berekende waterstanden in fase: de verschillen bedragen maximaal enkele minuten wanneer wordt uitgegaan van de nuldoorgang.
- Voor de stations langs de Westerschelde zijn de verschillen tussen de berekende en gemeten hoog- en laagwaterstanden verwaarloosbaar klein (orde centimeters). De verschillen zijn vergelijkbaar met het model zonder mondingsgebied.
- De berekende en gemeten waterstanden in het mondingsgebied bij Cadzand en Westkapelle vertonen iets grotere verschillen: bij Cadzand lijkt het berekende hoogwater ongeveer 10 centimeter te laag te zijn. De waterstand bij Westkapelle vertoont een ‘aggertje’ rond hoogwater vermoedelijk als gevolg van de vernauwing van de geulvakken ter hoogte van Westkapelle (zie vorige paragraaf, stap 10 fase 1).

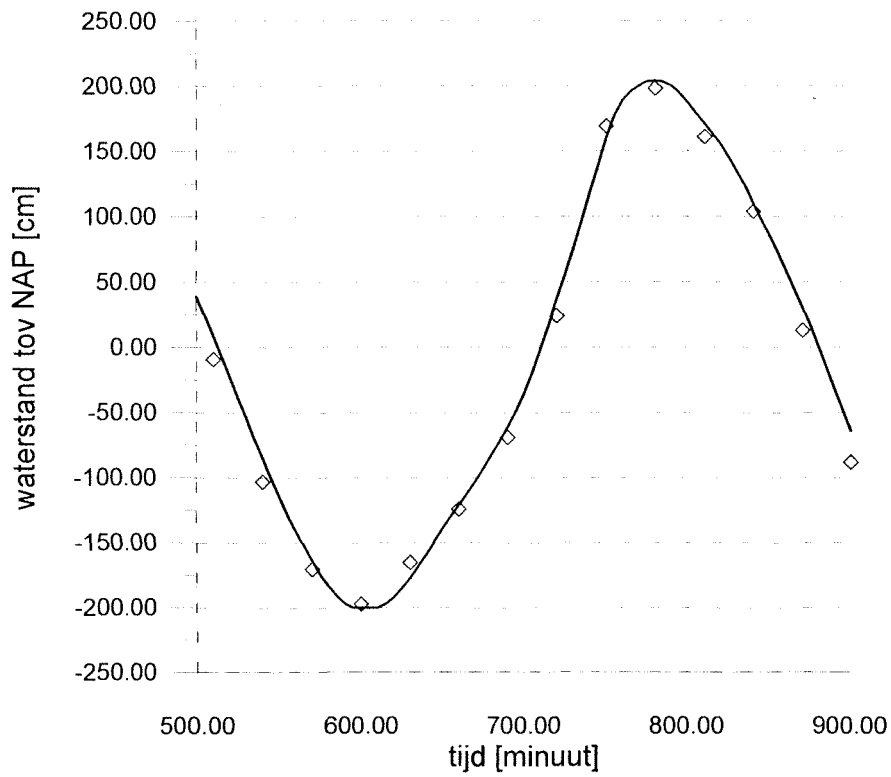
Al met al kan worden geconcludeerd dat het, met het mondingsgebied uitgebreide, model de waargenomen waterstanden redelijk tot goed reproduceert.



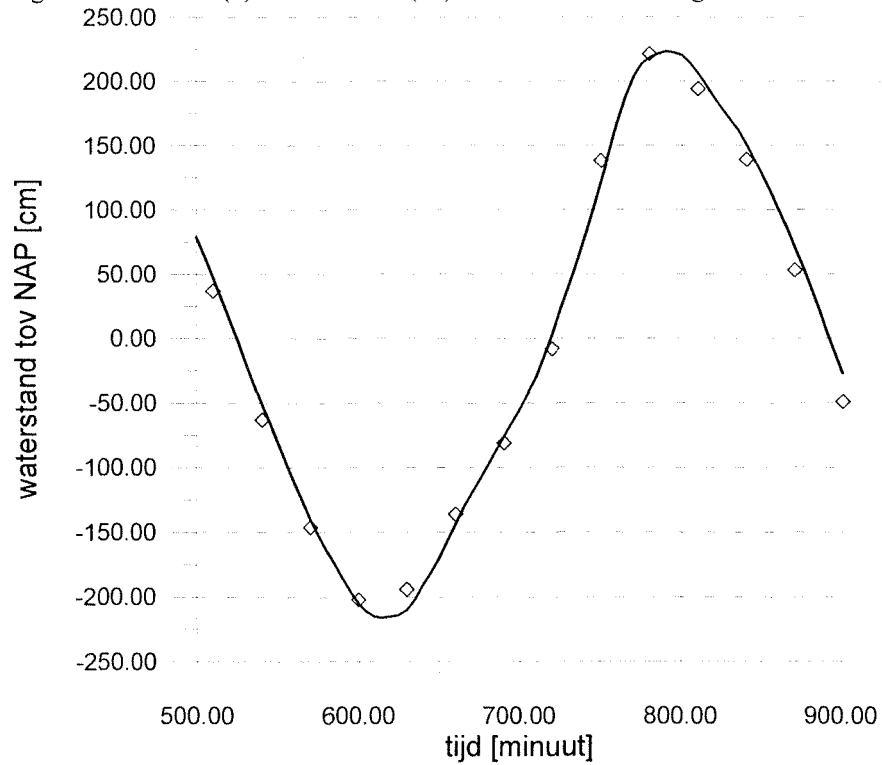
Figuur 2a Gemeten (◊) en berekende (—) waterstand in Westkapelle.



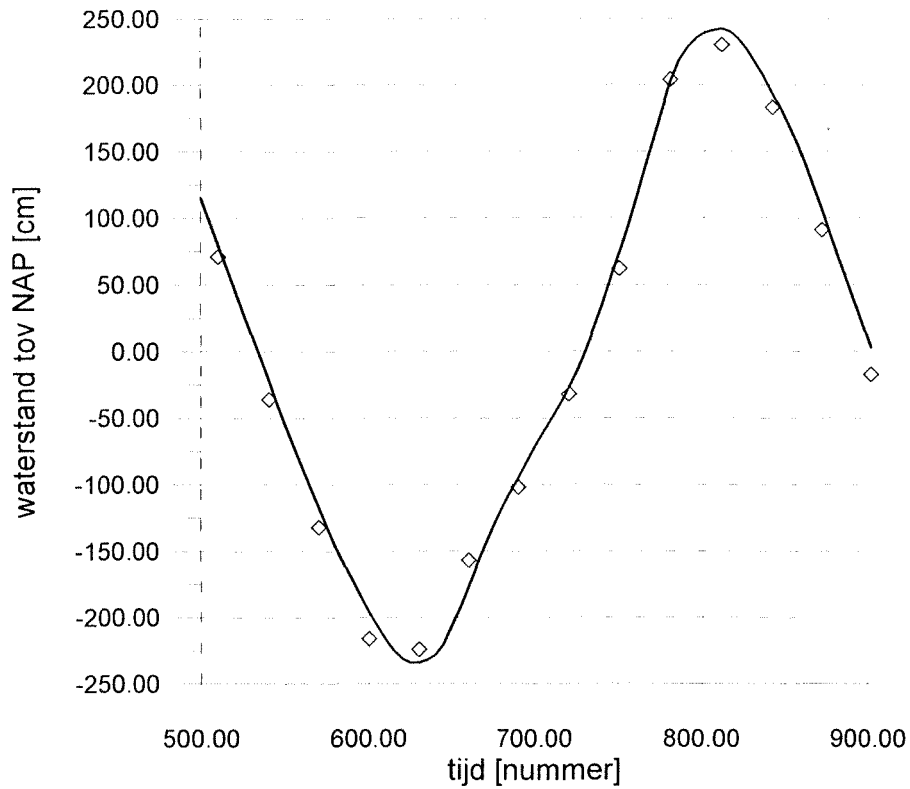
Figuur 2b Gemeten (◊) en berekende (—) waterstand in Cadzand.



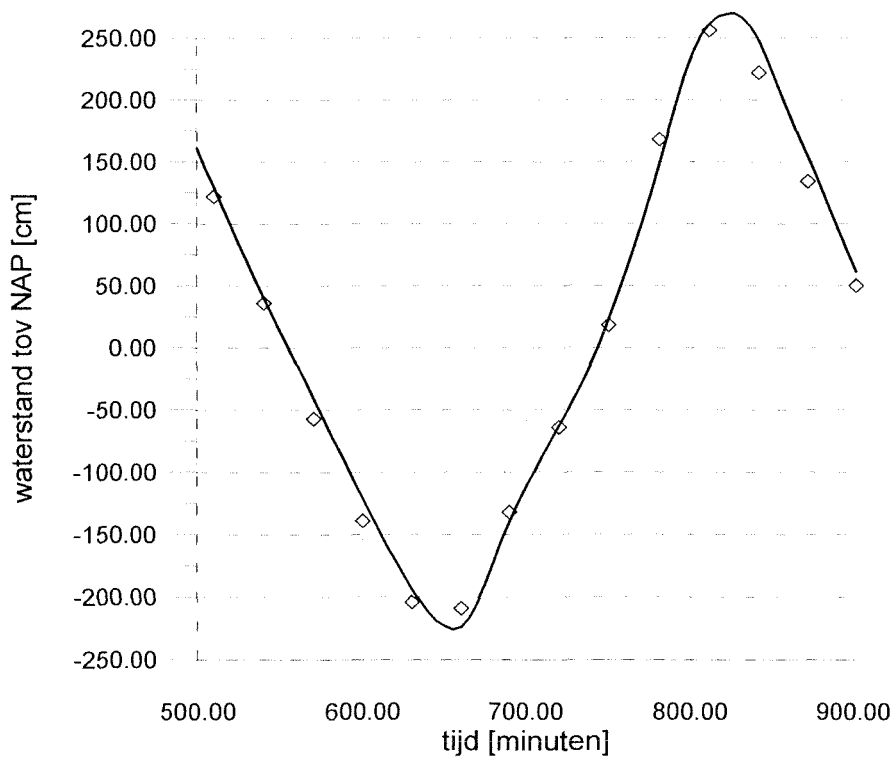
Figuur 2c Gemeten (◊) en berekende (—) waterstand in Vlissingen.



Figuur 2d Gemeten (◊) en berekende (—) waterstand in Terneuzen.



Figuur 2e Gemeten (◊) en berekende (—) waterstand in Hansweert.



Figuur 2f Gemeten (◊) en berekende (—) waterstand in Bath.

## 2.5.2 Getijvolumina en maximale stroom snelheden

### Getijvolumina

De resultaten van de vergelijking tussen de berekende en gemeten eb- en vloedvolumina zijn samengevat in tabel 3. Hierbij is uitgegaan van de relatieve verdeling van de watertransporten: de volumina per geul zijn uitgedrukt als een percentage van het totale eb- of vloedvolume door de gehele monding van de Westerschelde. Het belangrijkste argument voor deze benadering is dat de nauwkeurigheid van met name de oudere metingen beperkt is (onzekerheidsmarge van ongeveer 10-15%). Zowel de resultaten van de metingen als de modelberekeningen zijn herleid naar de jaargemiddelde getijslag bij Vlissingen (deze bedraagt 3,82 meter in 1971). Deze laatste aanpassing was noodzakelijk om de modelresultaten te kunnen vergelijken met de metingen, die allemaal in andere perioden dan de gesimuleerde periode werden uitgevoerd.

Raai/geul	Ebvolumen (%)			Vloedvolumen (%)		
	model	meting 1	meting 2	model	meting 1	meting 2
<i>Raai 10</i>						
jaar	1970	1971	1989	1970	1971	1989
Honte	86	87	87	89	88	89
Vaarwater langs de Hoofdplaat	14	13	13	11	12	11
<i>Raai 11</i>						
jaar	1970	1966	1995	1970	1966	1995
Sardijngeul	17	8	8	18	9	10
Wielingen	83	92	92	82	91	90
<i>Raai 12</i>						
jaar	1970		1991	1970		1991
Oostgat	12	-	10	11	-	12
Deurloo	11	-	14	10	-	13
Wielingen	77	-	76	79	-	75

Tabel 3 Procentuele verdeling van de eb- en vloedvolumina in de debietraaien 10, 11 en 12 in het mondingsgebied van de Westerschelde.

Uit de resultaten in tabel 3 blijkt dat de verschillen tussen de metingen en de berekeningen binnen de nauwkeurigheidsmarge van de metingen liggen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat gesimuleerde en waargenomen debietverdelingen overeenkomen. Hoewel de verschillen niet significant zijn, lijkt het getijvolume door de Wielingen ter hoogte van raai 11 aan de lage kant. De debietverdelingen in de raaien 10 en 12 lijken het



beste te worden gesimuleerd door het model. Tot slot blijkt uit de metingen dat debietverdeling in het mondingsgebied tussen 1970 en 1995 niet significant is veranderd.

### Maximale snelheden

De berekende maximale stroomsnelheden in de Wielingen en het Oostgat zijn samengevat in tabel 3. De eb- en vloednelheden zijn niet herleid naar dezelfde getijslag. Hierdoor zijn de vloednelheden relatief groter dan de maximale ebsnelheden. Uit deze tabel blijkt dat de maximale snelheden globaal variëren tussen de 0,9 en 1,3 meter per seconde, hetgeen realistische waarden lijken: ze zijn vergelijkbaar met de stroomsnelheden in de geulen van de Westerschelde. Hieruit wordt geconcludeerd dat het model betrouwbare (dat wil zeggen: geen extreem hoge of lage) snelheden genereert in het mondingsgebied.

Raai/geul	stroomsnelheid (in meters per seconde)	
	eb	vloed
<i>Raai 10</i>		
Honte	1,12	1,31
Vaarwater langs de Hoofdplaat	1,11	1,08
<i>Raai 11</i>		
Sardijngeul	1,15	1,27
Wielingen	1,05	1,25
<i>Raai 12</i>		
Oostgat	0,91	1,05
Wielingen	1,07	1,2

Tabel 2 Berekende maximale stroomsnelheden in de geulen van het mondingsgebied

## 2.6 Conclusies afgeregelde waterbewegingsmodel

Het afgeregelde model geeft een zeer acceptabele weergave van de waterstanden en de verdeling van de debieten in het mondingsgebied van de Westerschelde. De prestaties van het reeds eerder afgeregelde deel van de Westerschelde zijn niet significant veranderd en nog steeds in orde. Er is dan ook geen reden dat deel van de Westerschelde opnieuw af te regelen.

Tijdens de analyses die voorafgegaan zijn aan de definitieve kalibratie zijn er twijfels ontstaan over de juistheid van de implementatie van de rekenregels waarmee het programma Eendims een bodemschematisatie aanmaakt. Om deze reden wordt een nauwkeurige analyse van de resultaten van Eendims sterk aanbevolen. Het is heel goed mogelijk dat fouten in de schematisatie ter hoogte van debietraai 11 de oorzaak zijn van de grotere lokale verschillen tussen berekende en gemeten getijvolumina.

## 3 Gevoeligheidsanalyse

### 3.1 Inleiding

Naast het afregelen van het model is tevens een kleine gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Het doel van deze analyse is het achterhalen van de invloed die de belangrijkste modelparameters hebben op de weergave van de asymmetrie in het verloop van het getij.

Een dergelijke analyse is reeds eerder uitgevoerd voor het bestaande model van de Westerschelde (WL | Delft Hydraulics, 1998). De huidige analyse is om deze reden dan ook beperkt tot het nieuw toegevoegde deel van de Westerschelde: het mondingsgebied.

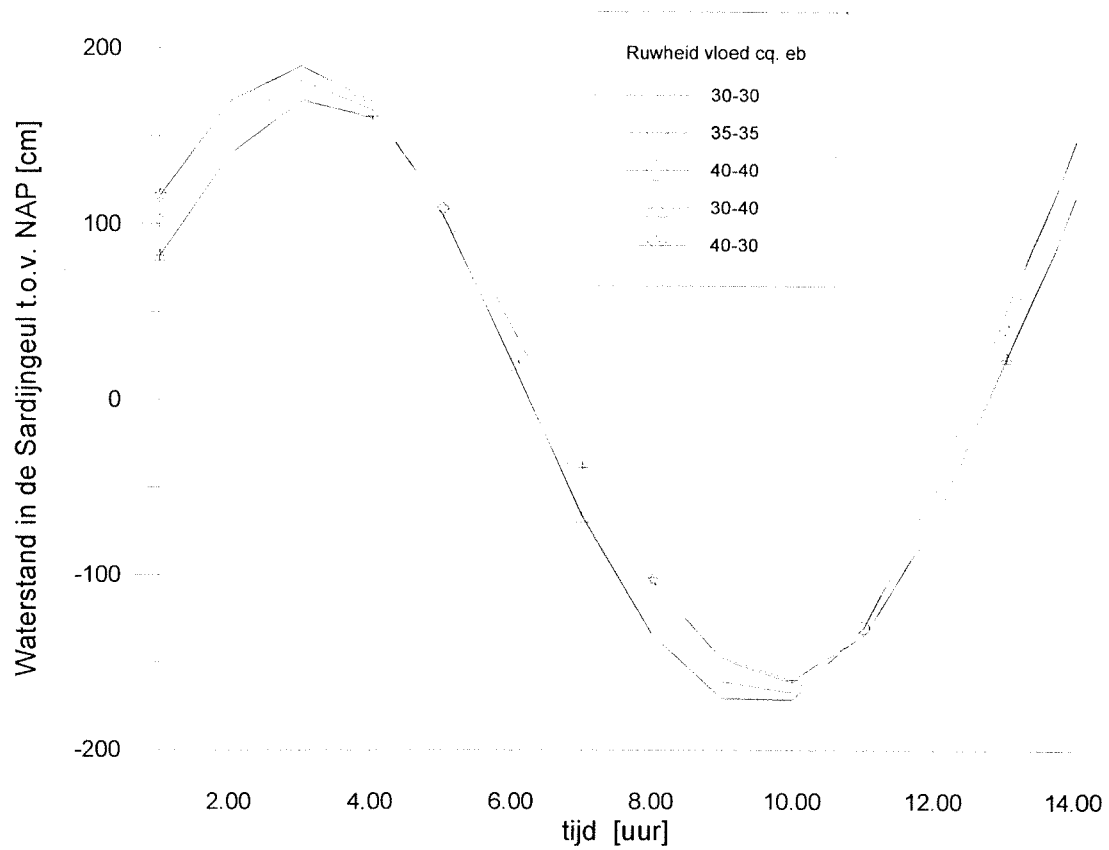
### 3.2 Analyse en resultaten

Bekeken is in hoeverre de bodemruwheid (en dan met name de verschillen in bodemruwheid tussen de vloed en de eb fase van het getij) invloed hebben op de asymmetrie van de getijcurve. Verwacht mag worden dat de fase van het getij verandert bij verandering van de bodemruwheid: verkleining van de reciproke Manning-coëfficiënt voor de bodemruwheid (het model wordt minder glad) zal vertraging van de voortplanting van de getijgolf tot gevolg hebben. Verhoging van de reciproke Manning-coëfficiënt zal daarentegen juist versnelling van de voortplantingssnelheid van de getijgolf tot gevolg hebben. Wanneer de ruwheden per fase van het getij tegengesteld worden aangepast, kan worden verwacht dat de asymmetrie van de getijgolf zal toenemen.

Om dit proces in het model te onderzoeken is een aantal modelberekeningen uitgevoerd waarbij de bodemruwheid systematisch werd gevarieerd. In eerste instantie is een drietal berekeningen uitgevoerd waarbij de eb- en vloedruwheden op dezelfde waarde werden gehouden (reciproke Manning-coëfficiënt 30, 35 en 40). Vervolgens is een tweetal berekeningen uitgevoerd met per getijfase verschillende waarden voor de reciproke Manning-coëfficiënt (30 - 40 en 40 - 30).

De resultaten van deze berekeningen laten zien dat de invloed van veranderingen in de ruwheid in het mondingsgebied van de Westerschelde slechts beperkte invloed hebben op de weergave van de getijkromme (figuur 3). De waargenomen veranderingen komen kwalitatief overeen met de hiervoor omschreven verwachtingen, maar zijn kwantitatief klein. Overigens kan dit resultaat worden verwacht, gezien de ten opzichte van de Westerschelde gemiddeld grotere diepte van het mondingsgebied. Hierdoor is de invloed van de bodemruwheid in het mondingsgebied relatief minder groot is.

Geconcludeerd kan worden dat de bodemruwheid in het mondingsgebied slechts zeer weinig bijdraagt aan de weergave van de asymmetrie van het verticale getij door het Implic-model. Om deze reden wordt vastgesteld dat nader onderzoek hiernaar waarschijnlijk weinig zin heeft.



Figuur 3. Invloed van de bodemruwheid op het waterstandsverloop bij Vlissingen.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

### Conclusies

Het met het mondingsgebied uitgebreide Implic-model van de Westerschelde is afgeregeld op een juiste weergave van de waterstanden en de debietverdeling over de belangrijkste geulen in het mondingsgebied van de Westerschelde. De berekende waterstanden en de debietverdeling in het mondingsgebied model komen goed overeen met gemeten waarden. De bij Westkapelle geconstateerde verschillen tussen model en metingen (niet met behulp van aanpassingen in de bodemruwheden te corrigeren) zijn gecorrigeerd door de randvoorwaarden enkele procenten aan te passen.

De modelprestaties in het reeds eerder opgestelde deel van de Westerschelde zijn volledig vergelijkbaar met de uitkomsten van eerdere berekeningen en komen goed overeen met de metingen. Er is dan ook geen reden om dat deel van het model opnieuw af te regelen.

Uit het (overigens beperkte) gevoeligheidsonderzoek is gebleken dat een variatie van de ruwheden in het mondingsgebied binnen fysisch aannemelijke grenzen, geen grote invloed heeft op de weergave van de berekende asymmetrie van het verticale getij. Hieruit kan worden geconcludeerd dat nader onderzoek hiernaar niet zinvol lijkt.

Geconcludeerd kan worden dat het huidige model kan worden gebruikt als basis voor het uitvoeren van morfologische berekeningen met behulp van het rekenmodel Estmorf.

### Aanbevelingen

Aanbevolen wordt de door het RIKZ gebruikte procedure voor het genereren van Implic schematisaties (geïmplementeerd in de Arc-Info applicatie Eendims) nauwkeurig te controleren. Er is reden te twijfelen aan de weergave van de doorstroomprofielen en de berekende hydraulische straal. Voordat opnieuw modelschematisaties worden opgesteld met behulp van deze applicatie is een nauwkeurige analyse van de manier waarop de verschillende rekenregels (zoals voor de bepaling van de doorstroomoppervlakken en de hydraulische straal) zijn geïmplementeerd zeer gewenst.

## 5 Literatuur

Langerak, A., 1984. Herziening eendimensionaal getijmodel Oosterschelde. Rijkswaterstaat Nota DDWT-84.024.

Langerak, A., 1999. Persoonlijke communicatie. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Male, K. van der, 1999a. Persoonlijke communicatie. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Male, K. van der, 1999b. Fax met gedeelte uit concept-detailontwerp Eendims. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

WL | Delft Hydraulics, 1998. Morphodynamic network simulations of the Westerschelde. WL | Delft Hydraulics rapport Z0919.

WL | Delft Hydraulics, 1999. Vooronderzoek uitbreiding Estmorf schematisatie Westerschelde. WL | Delft Hydraulics rapport Z2590.